



**HAL**  
open science

## Aide à la décision pour la conception préliminaire de procédés d'évaporation flash.

Vanessa Ho Kon Tiat

► **To cite this version:**

Vanessa Ho Kon Tiat. Aide à la décision pour la conception préliminaire de procédés d'évaporation flash.. Mécanique [physics.med-ph]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2006. Français. NNT: . tel-00194229

**HAL Id: tel-00194229**

**<https://theses.hal.science/tel-00194229>**

Submitted on 6 Dec 2007

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

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

N° d'ordre : 3313

**Université Bordeaux 1**

**THÈSE**

PRESENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

DE

**L'UNIVERSITE BORDEAUX I**

Spécialité : MÉCANIQUE ET INGENIERIE

Par

**Vanessa HO KON TIAT**

---

Aide à la décision pour la conception préliminaire de  
procédés d'évaporation flash

---

Soutenue le 14 décembre 2006 devant le jury d'examen :

MM. D. MILLET, Professeur, SUPMECA, Toulon.....Rapporteur  
J.-M. LELANN, Professeur, ENSIACET, Toulouse.....Rapporteur  
A. AOUSSAT, Professeur, ENSAM, Paris  
P. GIRARD, Professeur, Université Bordeaux 1  
P. SEBASTIAN, Maître de Conférences, H.D.R, Université Bordeaux 1.....Encadrant  
J.-P. NADEAU, Professeur, ENSAM, Bordeaux.....Encadrant







# Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire TREFLE site ENSAM (UMR CNRS 8508).

C'est donc tout naturellement que mes premiers remerciements s'adressent à Jean-Rodolphe PUIGGALI, directeur du laboratoire à mon arrivée et à Eric ARQUIS, actuel directeur du laboratoire, pour leur accueil et leur intérêt.

Un merci reconnaissant à mon directeur de thèse, Patrick SEBASTIAN, qui a su, tout au long de ces trois années, orienter mes recherches aux bons moments en étant souvent disponible. Merci pour ta confiance et ton soutien. J'adresse toute ma gratitude à Jean-Pierre NADEAU, qui a co-encadré cette thèse et a toujours su trouver, dans son emploi du temps de ministre, des instants précieux à m'accorder...merci.

Je remercie également les rapporteurs de cette thèse, le professeur Dominique MILLET, de SUPMECA Toulon et le professeur Jean-Marc LE LANN, directeur de l'ENSIACET à Toulouse, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Mes remerciements s'adressent aussi aux autres membres du Jury, le professeur Améziane AOUSSAT, de l'ENSAM Paris, président du jury et le professeur Philippe GIRARD, de l'Université Bordeaux 1, pour avoir accepté de juger ce travail.

A mon compagnon de galère "manipales", Dimitri JAUPART, je voudrais dire un très grand merci ! Non seulement pour sa gentillesse et sa disponibilité, mais aussi pour ses conseils et son aide tout au long de ces trois années. Bien des choses n'auraient pas été possibles sans ton soutien !

Au sein de l'équipe « Systèmes Energétiques et Conception », dans laquelle j'ai évolué plus particulièrement, la sollicitude de Jérôme PAILHES et de Waste AREGBA ont été d'un précieux secours, notamment pour ce qui est des questions autour de CE (nous nous comprendrons !). Pour cela, je tiens à les remercier vivement.

Je remercie également les autres membres de l'équipe, aussi bien permanents que doctorants passés et présents, pour les discussions enrichissantes tant sur le plan scientifique que personnel. Je pense, ici, à Dominique SCARAVETTI, Raphael CHENOUEAU, Abdel Aziz ARBAOUI, Mohammed SALLAOU, Thomas MORILLON, Raphaëlle DORE, Yoann VERNAT, Serge MOUTON et Denis BRUNEAU. A Amar BOUCHAMA, je voudrais dire un grand merci tout particulier, car c'est avec beaucoup de patience et de générosité que tu m'as passé le flambeau de l'évaporation flash (et des galères sur la manip !), et tes conseils m'ont toujours été d'un grand secours !

Au-delà de l'équipe Systèmes Energétiques et Conception, c'est tous les membres du laboratoire que je voudrais aussi remercier. C'est en effet grâce à eux que ce travail a pu être mené de façon agréable et enrichissante. Des remerciements particulièrement chaleureux à Sylviane BOYA et Muriel BORE, parce que, sans elles, tellement de choses auraient été plus difficiles voire infaisables ! Un grand merci à Marian ANTOS et Frédéric LAPEGUE, pour leur science de l'informatique qui m'a secouru bien des fois au cours de ces trois années. Je remercie les permanents qui, de près ou de loin, se sont intéressés à mon travail, notamment



Andrzej KUSIAK, Jean-Luc BATTAGLIA, Jean-François BONNET, Michel COMBARNOUS, Pierre MOUNEYRON et Jean-Marie GEORGES.

Je remercie également Paul LAPORTE et Alain OCHSENHOFER, techniciens à l'ENSAM, pour leur contribution sur le pilote expérimental.

A mes « camarades de promo », doctorants et post, merci pour votre bonne humeur : Jérôme, Bérengère, Nathalie, Christophe, Samuel, Cécile, Vladimir et tous les autres ! Merci aussi à David et Sadoth, pour m'avoir initiée à la culture mexicaine et pour leur bonne humeur sans faille. A Gustavo pour son intérêt, sa pêche et ses conseils avisés...Merci ! Tes talents de showman déjanté m'époustouflent encore ! Un merci tout particulier à Zoubir, alias Zou. Ton humour incomparable, ta bonne humeur constante et tes petites attentions m'ont ravies tout au long de ces trois ans.

Un merci tout particulier à mes « compagnons de bureau ». Saed, que j'estime, merci pour ta gentillesse et ta disponibilité qui m'ont beaucoup touchée. Adée, ton tempérament ivoirien dériderait même la plus ancienne des statues et m'a aidée à affronter bien des passages à vide...merci! Geoff, qu'est-ce qu'elles étaient bien ces prises de bec quotidiennes au RU 1, nan ? Merci pour tout...

Un grand merci aussi aux amis qui m'ont accompagné ces trois années, et celles d'avant...Vio, tu en fais partie.

A ma famille, tantes et oncles, cousins et cousines...trop nombreux pour être tous cités...je n'oublie pas votre contribution...Merci! Je tiens tout de même à remercier particulièrement tatie Josiane, mon parrain et tonton "Zémon". Merci aussi à mes grand-mères, je ne vous oublie pas...

A Jean-François, mon « mamour », je ne sais comment exprimer ma gratitude pour toute la patience dont tu as fait preuve, pour ta présence, tes attentions constantes et ton amour si réconfortant. Tu m'as beaucoup aidé à surmonter les derniers mois de cette thèse, et ce mémoire n'aurait pas été le même sans ta contribution...merci pour ce chemin que nous traçons ensemble.

Enfin, le parcours mené jusqu'à l'écriture de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien et l'amour inconditionnel de mes parents Roseline et Maurice et de mes sœurs Alexandra et Livia. Vous avez toujours été là pour m'accompagner, me soutenir à tous les niveaux et en dépit des épreuves. Pour cela, je ne pourrais jamais assez vous remercier. Merci d'être tels que vous êtes.







# **TABLE DES MATIERES**

<b><i>Chapitre 1 – CONTEXTE</i></b>		<b>23</b>
1-1	INTRODUCTION	25
	1-1.1 Le procédé d'évaporation flash	25
	1-1.2 Le processus de conception	26
1-2	POSITIONNEMENT DU PROBLEME	28
	1-2.1 Enjeux de la conception préliminaire	28
	1-2.2 Démarche proposée	29
	1-2.3 Objectifs de la thèse	31
1-3	ORGANISATION DU DOCUMENT	32
 <b><i>Chapitre 2 – DEMARCHE DE FORMALISATION PAR CONTRAINTES POUR L'AIDE A LA DECISION EN CONCEPTION PRELIMINAIRE</i></b>		<b>33</b>
2-1	INTRODUCTION	35
	2-1.1 Fondements	35
	2-1.2 Définition d'un problème de satisfaction de contraintes	35
2-2	ANALYSE ET STRUCTURATION DU PROBLEME DE CONCEPTION	38
	2-2.1 Analyse du besoin	39
	2-2.2 Approche fonctionnelle	41
	2-2.2.1. Approche fonctionnelle externe	41
	2-2.2.2. Approche fonctionnelle interne	42
	2-2.3 Approche organique	42
	2-2.4 Approche physique	44
2-3	FORMALISATION ET QUALIFICATION DES MODELES	47
	2-3.1 Nature des variables et des modèles de conception	47
	2-3.2 Définition des hypothèses	49
	2-3.3 Formulation des modèles	50
	2-3.4 Validation du modèle global	51
	2-3.5 Qualification du modèle global	52
	2-3.6 Adaptation des modèles	53
	2-3.7 Notion d'héritage entre hypothèses	54
2-4	TRAITEMENT ET RESOLUTION DU PROBLEME DE CONCEPTION	55
	2-4.1 Le solveur "Constraint Explorer"	55
	2-4.2 Limitations liées au formalisme de Problème de Satisfaction de Contraintes	59
	2-4.3 Exploitation du modèle	60
2-5	SYNTHESE DE LA DEMARCHE	62
 <b><i>Chapitre 3 – ANALYSE, STRUCTURATION ET FORMALISATION DES MODELES D'EVAPORATEURS FLASH BI-ETAGES</i></b>		<b>63</b>
3-1	INTRODUCTION	65
3-2	MISE EN ŒUVRE DE LA DEMARCHE	66
	3-2.1 Algorithme de mise en œuvre	66
	3-2.2 Organisation des fiches modèles	67
3-3	APPLICATION DE LA DEMARCHE AUX EVAPORATEURS FLASH BI-ETAGES	67
	3-3.1 Principe de solution et Organigramme Technique étendu de premier niveau	67
	3-3.2 Application au pilote 2000	70
	3-3.2.1. Analyse du besoin	70
	3-3.2.2. Approche fonctionnelle	70
	3-3.2.3. Approche organique	72
	3-3.2.4. Approche physique	73
	3-3.2.5. Synthèse du cas du pilote 2000	78
	3-3.3 Application au pilote 2003	80



3-3.3.1.	Analyse du besoin et approche fonctionnelle	80
3-3.3.2.	Approche organique	82
3-3.3.3.	Approche physique	82
3-3.3.4.	Synthèse du cas du pilote 2003	94
3-3.4	Application au prototype industriel	95
3-3.4.1.	Analyse du besoin	96
3-3.4.2.	Impact environnemental	97
3-3.4.3.	Approche fonctionnelle	99
3-3.4.4.	Approches organique et physique	101
3-3.4.5.	Synthèse du cas du prototype industriel	105

#### ***Chapitre 4 – VALIDATION EXPERIMENTALE ET QUALIFICATION***

<b><i>DES MODELES DU PROTOTYPE INDUSTRIEL</i></b>		<b>107</b>
4-1	INTRODUCTION	109
4-2	DEMARCHE DE QUALIFICATION DES MODELES	109
4-2.1	Estimation de la Parcimonie	110
4-2.2	Estimation de l'Exactitude	110
4-2.3	Estimation de la Précision	111
4-2.4	Estimation de la Spécialisation	112
4-2.5	Qualification des modèles	112
4-3	VALIDATION EXPERIMENTALE ET QUALIFICATION DU MODELE PHYSIQUE	113
4-3.1	Présentation du dispositif expérimental	113
4-3.2	Déroulement des essais	114
4-3.3	Validation des hypothèses	117
4-3.4	Qualification du modèle physique	120
4-3.4.1.	Evaluation de la Parcimonie du modèle physique	126
4-3.4.2.	Evaluation de l'Exactitude du modèle physique	127
4-3.4.3.	Evaluation de la Précision du modèle physique	129
4-3.4.4.	Evaluation du niveau de Spécialisation du modèle physique	130
4-3.4.5.	Conclusion	131
4-4	QUALIFICATION DES MODELS DE DIMENSIONNEMENT, COÛTS ET ECOCRITERES DU PROTOTYPE INDUSTRIEL	132
4-4.1	Présentation du modèle et des valeurs de référence	132
4-4.1.1.	Description du modèle	132
4-4.1.2.	Description de la référence	138
4-4.2	Qualification des modèles	140
4-4.2.1.	Evaluation de la Parcimonie	140
4-4.2.2.	Evaluation de l'Exactitude et de la Précision	140
4-4.2.3.	Evaluation du niveau de Spécialisation	140
4-4.2.4.	Conclusion	141
4-5	QUALIFICATION DU MODELE GLOBAL	141
4-6	EXPLOITATION DU MODELE GLOBAL	142
4-6.1	Introduction	142
4-6.2	Définition des indices de qualité et des indicateurs de performance	142
4-6.3	Résolution du modèle	144
4-6.4	Conclusion	151

#### ***Chapitre 5 – CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES***

5-1	CONCLUSION GENERALE	155
5-1.1	Développement de la démarche de formalisation des modèles	155
5-1.2	Formulation par contraintes, qualification des modèles de conception architecturale pour les évaporateurs flash et résolution des modèles	156
5-2	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	157
5-2.1	Extension du champ d'application de l'outil	157
5-2.2	Intégration de contraintes supplémentaires	158
5-2.3	Evaluation de la Parcimonie et du niveau de spécialisation dans le PEPS	159



## TABLE DES FIGURES

Figure 1.1. Modèle simplifié du processus de conception proposé par Pahl et Beitz .....	27
Figure 1.2. Influence stratégique de la conception préliminaire sur les coûts de.....	29
Figure 1.3. Axes de réalisation de l'outil d'aide à la décision en conception préliminaire.....	31
Figure 1.4. Schéma récapitulatif de l'organisation de la thèse.....	32
Figure 2.1. Démarche de conception architecturale pour l'aide à la décision.....	36
Figure 2.2. Cycle de vie d'un produit et situations de vie correspondantes [Sca04].....	40
Figure 2.3. Organigramme Technique étendu (OTé).....	42
Figure 2.4. Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF).....	44
Figure 2.5. Graphe d'association Substance-Champs (GSC).....	45
Figure 2.6. Illustration de la notion d'héritage entre hypothèses.....	56
Figure 2.7. Etapes, outils associés et caractéristiques structurantes identifiés pendant la phase d'analyse et structuration [Sca04a].....	61
Figure 2.8. Formalisation d'un modèle global de conception sous forme de contraintes.....	62
Figure 3.1. Numérotation des composants dans un Organigramme Technique étendu.....	66
Figure 3.2. Structuration des fiches modèles.....	67
Figure 3.3. Analyse fonctionnelle externe de la situation de vie <i>Utilisation</i> pour les évaporateurs flash.....	68
Figure 3.4. Réalisation de la fonction de Service 1 et blocs fonctionnels associés (syntaxe FAST).....	69
Figure 3.5. Organigramme Technique étendu de niveau 1 relatif aux évaporateurs flash.....	69
Figure 3.6. Approche fonctionnelle externe de la situation de vie <i>Utilisation</i> pour le pilote 2000.....	71
Figure 3.7. Réalisation des fonctions FS1, FC5, FC6, FC7 et blocs fonctionnels associées (syntaxe FAST).....	72
Figure 3.8. Organigramme Technique étendu de niveau 3 du pilote 2000.....	73
Figure 3.9. Bloc Diagramme Fonctionnel relatif au Pilote 2000.....	73
Figure 3.10. Graphe Substances-Champs relatif à l'unité de détente du pilote 2000.....	74
Figure 3.11. Organigramme Technique étendu de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs du pilote 2000.....	75
Figure 3.12. Schéma du pilote 2000 de flash détente bi-étagé [Bou03].....	79
Figure 3.13. Organigramme Technique étendu de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs du pilote 2003.....	81
Figure 3.14. Schéma du Pilote 2003 de flash détente bi-étagé.....	84
Figure 3.15. Schéma descriptif de la méthodologie de l'EcoIndicateur 99.....	89
Figure 3.16. Approche fonctionnelle externe de la situation de vie <i>Utilisation</i> pour les prototypes industriels.....	90
Figure 3.17. Organigramme Technique étendu de niveau 2 du prototype industriel.....	92
Figure 3.18. Bloc Diagramme Fonctionnel de niveau 2 du prototype industriel.....	94
Figure 3.19. Organigramme technique étendu de niveau 3 de l'unité de détente du prototype industriel.....	97
Figure 3.20. Organigramme technique étendu de niveau 3 de l'unité de traitement des vapeurs du prototype industriel.....	98
Figure 3.21. Bloc Diagramme Fonctionnel de niveau 3 du prototype industriel.....	99
Figure 3.22. Bloc Diagramme fonctionnel de niveau 4 de l'unité de condensation.....	103



<i>Figure 3.23.</i> Maquette du prototype industriel bi-étagé d'évaporation flash, réalisée sous Catia V5.....	106
<i>Figure 4.1.</i> Schéma de représentation du PEPS d'un modèle de conception architecturale idéal [Ver04]. .....	112
<i>Figure 4.2.</i> Vues de face et de côté du dispositif expérimental (pilote 2003). .....	114
<i>Figure 4.3.</i> Températures relevées lors du fonctionnement du pilote 2003. ....	116
<i>Figure 4.4.</i> Débit de vapeur et pressions relevées lors du fonctionnement du pilote 2003.....	116
<i>Figure 4.5.</i> Températures mesurées par les thermocouples ( $T_{ve}, T_{vs}$ ) et températures de saturation calculées à partir des mesures de pression ( $T_{sat}(P_{ve}), T_{sat}(P_{vs})$ ) en entrée et sortie des condenseurs haute (a) et basse (b) pression, en fonction de la température de chauffe du fluide. ....	118
<i>Figure 4.6.</i> Puissance générée par la condensation ( $P_{uiss_v}$ ) et puissance transmise au liquide de refroidissement ( $P_{uiss_{li}}$ ) en fonction de la température de chauffe du fluide, pour les condenseurs haute (a) et basse (b) pression.....	118
<i>Figure 4.7.</i> Evolution des températures de vapeur en entrée/sortie des condenseurs haute pression (cdsrHP) et basse pression (cdsrBP) au cours de l'essai réalisé avec $T_{pe}=40,8$ °C. ....	119
<i>Figure 4.8.</i> Débits de gouttes relevées au dévésiculeur expérimental et théorique en fonction de la température de saturation.....	121
<i>Figure 4.9.</i> Valeurs expérimentales et théoriques du débit de condensats en fonction du débit de vapeur expérimental pour le condenseur haute pression.....	122
<i>Figure 4.10.</i> Valeurs expérimentales et théoriques du débit de condensats en fonction du débit de vapeur expérimental pour le condenseur basse pression.....	122
<i>Figure 4.12.</i> Coefficients d'échange locaux obtenus pour différentes corrélations pour la condensation dans les condenseurs haute pression (a) et basse pression (b). ....	125
<i>Figure 4.12.</i> Comparaison des coefficients d'échange expérimental et théorique côté vapeur+film de condensât pour le condenseur haute pression. ....	128
<i>Figure 4.13.</i> Comparaison des coefficients d'échange expérimental et théorique côté vapeur+film de condensât pour le condenseur basse pression. ....	128
<i>Figure 4.14.</i> Coefficient théorique d'échange en condensation pour le condenseur haute pression.....	130
<i>Figure 4.15.</i> Coefficient théorique d'échange en condensation pour le condenseur basse pression.....	130
<i>Figure 4.16.</i> Représentation du PEPS du modèle physique du pilote 2003. ....	131
<i>Figure 4.17.</i> Schéma représentatif du flotteur entre les étages haute et basse pression. ....	133
<i>Figure 4.18.</i> Représentation du PEPS du modèle physique du pilote 2003. ....	141
<i>Figure 4.19.</i> Schéma de représentation du PEPS du modèle global des évaporateurs flash bi-étagés.....	142
<i>Figure 4.20.</i> Puissance frigorifique de l'ensemble des solutions en fonction de l'indice de qualité de puissance....	148
<i>Figure 4.21.</i> Evolution de l'indice de performance de consommation en eau par rapport au débit de liquide de refroidissement au condenseur haute pression. ....	149
<i>Figure 4.22.</i> Evolution de l'indice de performance de consommation en eau par rapport au débit de liquide de refroidissement au condenseur basse pression.....	149
<i>Figure 0.23.</i> Evolution de l'indicateur de performance d'impact environnemental par rapport à la température de la vapeur dans l'étage haute pression.....	150

## **LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau 3.1.</i> Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse du besoin pour le pilote 2000.....	70
<i>Tableau 3.2.</i> Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'approche fonctionnelle externe du pilote 2000.....	71
<i>Tableau 3.3.</i> Relations et variables mises en jeu entre composants des différentes unités pour le pilote 2000.....	75
<i>Tableau 3.4.</i> Fiche modèle de niveau 3 adapté relative aux condenseurs haute et basse pression du pilote 2000. ....	77
<i>Tableau 3.5.</i> Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse du besoin et l'approche fonctionnelle du pilote 2003. ....	80
<i>Tableau 3.6.</i> Fiche modèle de niveau 3 adapté relative au condenseur haute pression du pilote 2003.....	82
<i>Tableau 3.7.</i> Fiche modèle de niveau 3 adaptée relative au condenseur basse pression du pilote 2003.....	83
<i>Tableau 3.8.</i> Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse du besoin pour le prototype industriel.....	86
<i>Tableau 3.9.</i> Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'approche fonctionnelle externe pour le prototype industriel.....	90



<i>Tableau 3.10.</i> Extrait de la fiche modèle de niveau 2 de la cuve tampon du prototype industriel.....	95
<i>Tableau 3.11.</i> Fiche modèle de niveau 2 de l'interaction entre la cuve tampon et la cuve de détente.....	96
<i>Tableau 3.12.</i> Fiche modèle de niveau 2 de la cuve de détente du prototype industriel.....	96
<i>Tableau 3.13.</i> Fiche modèle de niveau 2 de l'interaction entre la cuve de détente et la pompe d'extraction.....	96
<i>Tableau 3.14.</i> Fiche modèle de niveau 2 de la pompe d'extraction.....	97
<i>Tableau 3.15.</i> Extrait de la fiche modèle de niveau 2 adapté de la cuve tampon.....	100
<i>Tableau 3.16.</i> Extrait de la fiche modèle de niveau 3 de la cuve haute pression.....	101
<i>Tableau 3.17.</i> Extrait de la fiche modèle de niveau 3 du le flotteur.....	102
<i>Tableau 3.19.</i> Fiche Modèle de niveau 3 du condenseur haute pression du prototype industriel.....	104
<i>Tableau 3.20.</i> Fiche Modèle de niveau 3 du condenseur basse pression du prototype industriel.....	105
<i>Tableau 4-1.</i> Valeurs moyennes des températures d'entrée et de sortie de la vapeur aux condenseurs haute et basse pression pour l'essai réalisé à $T_{pe} = 40,8$ °C.....	120
<i>Tableau 4-2.</i> Valeurs théoriques et expérimentales du coefficient d'échange en condensation des condenseurs... ..	129
<i>Tableau 4-3.</i> Contraintes dimensionnelles, économiques et environnementales intégrées au modèle global des évaporateurs flash.....	137
<i>Tableau 4-4.</i> Valeurs de référence pour l'estimation du coût des condenseurs.....	138
<i>Tableau 4-5.</i> Valeurs de référence pour l'estimation du coût du dévésiculeur.....	139
<i>Tableau 4-6.</i> Valeurs de référence pour l'estimation du coût des composants à dimensionner et des pompes.....	139
<i>Tableau 4.7.</i> Caractéristiques techniques de l'évaporateur sous vide GEYSERS-WTSE 2000.....	144
<i>Tableau 4.8.</i> Intervalles de définition et pas des pavés d'exploration considérés pour les variables de conception du procédé d'évaporation flash bi-étagé.....	145
<i>Tableau 4.9.</i> Extrait des résultats obtenus pour la simulation avec les VCo correspondant aux valeurs du tableau 4.8.....	145
<i>Tableau 4.10.</i> Extrait des résultats obtenus pour la simulation avec les VCo correspondant aux valeurs du tableau 4.8.....	146







---

---

# CHAPITRE 1

---

---

## CONTEXTE



## 1-1 INTRODUCTION

### 1-1.1 Le procédé d'évaporation flash.

Lorsque, dans une enceinte, un liquide et une vapeur coexistent en équilibre à une température donnée, on dit qu'ils sont à saturation. La pression correspondant à cet état d'équilibre est appelée pression de saturation. L'évaporation flash est le phénomène observé lorsqu'un fluide liquide ou semi-liquide, préalablement chauffé à une température donnée, est soumis à une brusque chute de pression en dessous de sa pression de saturation. Sous ces nouvelles conditions, le fluide est à un état de surchauffe. Les molécules les plus énergétiques vont alors briser la force d'attraction et s'arracher de la surface liquide pour se retrouver sous forme de vapeur. Elles emportent avec elles de l'énergie calorifique, de telle sorte que la température de la masse restante diminue jusqu'à la valeur d'équilibre. L'évaporation flash se caractérise donc par la vaporisation d'une partie du fluide chauffé, conduisant au refroidissement quasi instantané de la masse restante. La vaporisation étant particulièrement violente dans le cas d'une forte différence de pression, elle peut s'accompagner de la formation de gouttelettes au sein de la vapeur formée.

Ce procédé permet donc un refroidissement rapide du fluide traité, mais aussi une concentration de celui-ci, puisqu'une partie s'évapore.

Différents travaux autour de l'évaporation flash ont montré son intérêt dans différentes applications.

La plus répandue est le dessalement de l'eau de mer [Miy01] dans laquelle l'eau est introduite dans une enceinte à basse pression, après avoir été préalablement chauffée. Le sel contenu n'étant pas volatil, il en résulte une vaporisation partielle d'eau douce. Cette vapeur, après passage par un séparateur afin de retenir les éventuelles gouttelettes d'eau salée emportées du fait de la violence de la vaporisation, est ensuite condensée. On obtient ainsi de l'eau douce sous forme liquide. Les premiers procédés de dessalement d'eau de mer mis au point étaient très consommateurs en énergie. Actuellement, ils sont multi-étagés : l'énergie libérée lors de la condensation de la vapeur sert à chauffer l'eau de mer aux étages inférieurs.

Des applications de séchage, telles que la stérilisation [Bal96] ou le séchage de feuilles de papier [Woo00, Woo01] utilisent également l'évaporation flash. On retrouve encore ce procédé à

une échelle plus grande, pour la transformation de l'énergie géothermique [Des97, Sho97], où la vapeur formée est utilisée pour actionner les turbines et produire de l'électricité.

La réalisation des films métalliques constitutifs des électrodes des super conducteurs utilise également le procédé d'évaporation flash [Mer00]. Un jet continu de monomère liquide est vaporisé de manière violente. La vapeur formée est alors dirigée vers un substrat refroidi où elle se condense pour former un film liquide. Le substrat va ensuite subir une radiation ionisante, pour permettre la solidification du film liquide par polymérisation. Comparativement à l'évaporation simple, qui est généralement utilisée pour réaliser des dépôts de film métalliques, l'évaporation flash permet un meilleur contrôle de l'épaisseur et du taux de déposition du film formé.

Des travaux plus récents ont permis de montrer que l'évaporation flash permettait également d'améliorer la qualité et le conditionnement de fluides sous forme liquide simple, ou sous forme de liquides chargés en particules solides. Ce procédé est donc utilisé dans l'agroalimentaire pour conditionner du lait, des jus de fruits [Tec01], ou pour refroidir la vendange [Seb02, Bou03].

Une étude a été menée sur le procédé d'évaporation flash appliqué au traitement de la vendange au laboratoire TRansferts Ecoulements Fluide et Energétique [Tre04a] dans lequel s'est déroulé ce travail de thèse. Ces travaux ont conduit à l'élaboration d'un procédé d'évaporation flash bi-étagé, plus performant que les procédés mono-étagés.

Compte tenu du large champ d'applications de cette technologie, l'objectif principal de ce travail a été la modélisation préliminaire de ce procédé, dans un contexte d'aide à la décision, de manière à pouvoir en généraliser l'exploitation à différents secteurs.

Comme tout système complexe, le procédé d'évaporation flash fait appel à plusieurs technologies difficiles à maîtriser. Il s'agit ici des technologies du vide, du dévésicelage de vapeurs et des transferts de chaleur et de masse. Cette caractéristique rend la conception de tels systèmes difficile.

## **1-1.2 Le processus de conception.**

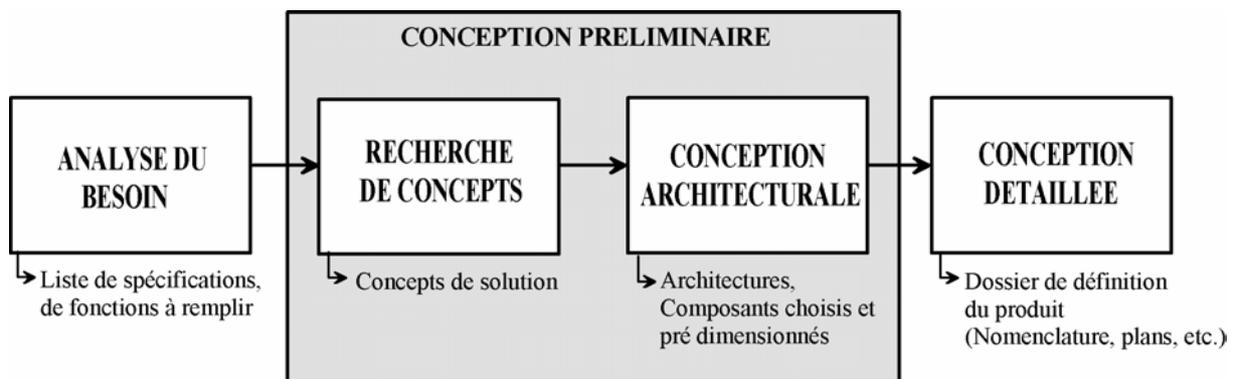
Dans un processus industriel de réalisation d'un système, la conception représente la phase initiale déterminante dans le cycle de vie de ce système. Elle a pour objet de définir un ensemble exhaustif de paramètres (architecture, forme géométrique, dimensions, matière(s) première(s), etc.) qui permettront de décrire le système et d'assurer les fonctionnalités émises par le Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF).

Le concepteur est donc amené à identifier ces paramètres en utilisant un ensemble de règles inhérentes à la phase de conception. L'affectation à chacun de ces paramètres de valeurs satisfaisant un système de description du fonctionnement (modèles, lois physiques, règles métiers) conduit à la définition d'un groupe de solutions possibles, généralement appelées "solutions de conception".

D. Scaravetti [Sca04a] présente un condensé des descriptions de déroulement d'un processus de conception les plus répandues. Celles-ci varient selon les entreprises et les habitudes professionnelles, mais ont toutes en commun une trame semblable [Suh90] :

- Connaître et comprendre les besoins du client,
- Définir le problème à résoudre pour satisfaire ces besoins,
- Conceptualiser la solution,
- Effectuer une analyse pour optimiser la solution,
- Vérifier la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins client initiaux.

Le processus de conception dont nous avons choisi de nous inspirer est celui de Pahl et Beitz [Pah 96], présenté sur la figure 1.1.



*Figure 1.1.* Modèle simplifié du processus de conception proposé par Pahl et Beitz.

Ce processus est divisé en quatre étapes principales, ou jalonnements, qui respectent la trame conduisant à une conception satisfaisant les besoins du client :

- L'analyse du besoin, qui permet de formaliser le besoin client et qui conduit à l'établissement de listes de spécifications et de fonctions à remplir par le système à concevoir.
- La recherche de concept ou "conceptual design", qui exploite des processus de créativité pour évaluer divers principes de solutions pour aboutir à des concepts permettant de répondre aux besoins client. Les principes de solutions étudiés peuvent parfois être issus

de la mémoire de l'entreprise, de l'expérience du concepteur ou de l'utilisation de méthodes de recherche de solutions ou de méthodes d'aide à l'innovation. Cette étape permet donc de définir le problème à résoudre et de conceptualiser la solution envisagée.

- La conception architecturale ou "embodiment design", correspond à une analyse de faisabilité reliée à une estimation de performances. Elle permet de définir les principales caractéristiques du système à concevoir et d'évaluer les performances globales des concepts retenus. Ces concepts sont ensuite traduits en architectures, pour lesquelles des choix de structure, de composants, de matériaux, de dimensions, et d'autres paramètres pertinents vont être faits.

Les deux étapes de recherche de concepts et de conception architecturale constituent la phase de **conception préliminaire**.

- La conception détaillée, ou "Detail design", permet d'aboutir aux dossiers complets de définition du système à concevoir. La solution est évaluée afin de vérifier qu'elle répond bien aux exigences initiales.

Ce processus, bien que majoritairement utilisé, présente le désavantage d'être séquentiel et itératif, dans le sens où les choix de conception réalisés durant la conception préliminaire, qui ne sont pas nécessairement adaptés à la fabrication du produit, ne sont remis en cause qu'au cours de la phase de conception détaillée. Cette organisation peut ainsi s'avérer pénalisante en terme de délais et de coûts de développement. Il est donc essentiel de pouvoir faire les bons choix de conception dès la phase de conception préliminaire. Comment, alors, optimiser la prise de décision durant cette phase préliminaire de manière à minimiser les risques pour la suite de la conception?

## **1-2 POSITIONNEMENT DU PROBLEME**

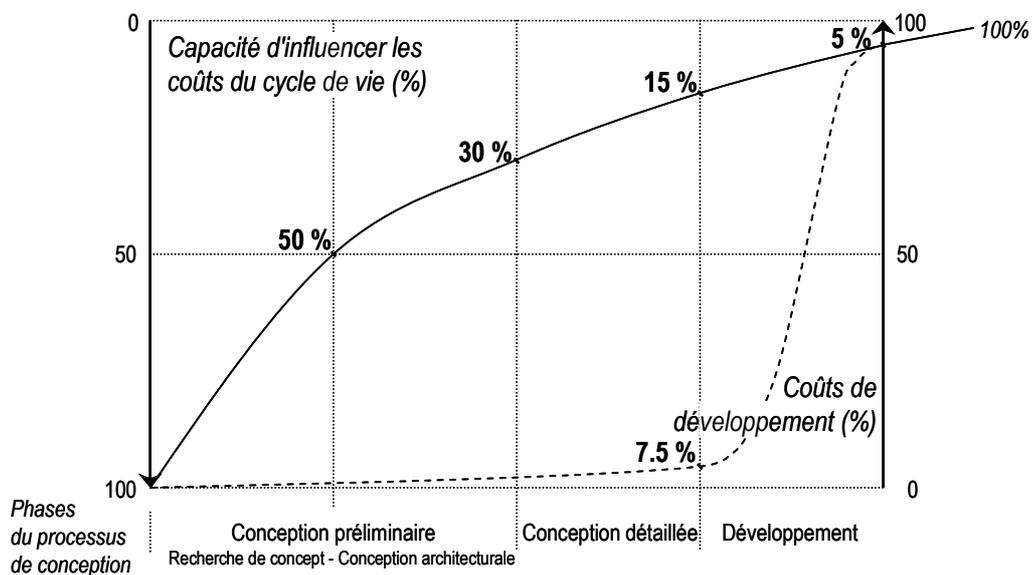
### **1-2.1 Enjeux de la conception préliminaire.**

La conception préliminaire regroupe les étapes de recherche de concepts et de conception architecturale (cf. Figure 1.1). Elle correspond donc au choix d'un principe de solution basé sur l'analyse du besoin préalablement effectuée, et à la détermination des choix structuraux et technologiques (composants, pré dimensionnement du dispositif) pour ce principe de solution.

La modélisation d'un système dans sa globalité, à ce stade de la conception, suppose l'intégration de connaissances hétérogènes provenant de diverses disciplines, de processus de natures diverses dont les relations ne sont connues que de façon partielle et souvent imprécise [Tra97]. Ces

connaissances sont donc elles-mêmes mal ou incomplètement définies, et les contraintes liées au fonctionnement optimal du système à concevoir sont mal connues.

Ces caractéristiques, propres aux modèles de conception préliminaire, rendent la prise de décision difficile et complexe, ce qui comporte des risques pour la suite de la conception. Cette prise de décision est pourtant capitale, notamment si on se réfère à l'influence de cette phase sur le coût d'un projet industriel. Celle-ci est mise en évidence sur la figure 1.2, issue des travaux de [Ber88], qui montre que la conception préliminaire ne représente qu'une faible part des coûts réels de développement, alors qu'elle conditionne à hauteur de 80 % les coûts du cycle de vie.



*Figure 1.2.* Influence stratégique de la conception préliminaire sur les coûts de développement d'un produit [Zab01].

## 1-2.2 Démarche proposée.

La modélisation, particulièrement dans le cas de systèmes complexes, implique de définir de manière aussi complète que possible le cadre de représentation du système à concevoir, ainsi que le cadre de validité du modèle. Il est également nécessaire, dans un contexte d'aide à la décision, de qualifier les connaissances impliquées dans les modèles.

La plupart des outils classiques de conception sont principalement dédiés à la conception et à la définition détaillée d'un système. Ils sont basés sur un fonctionnement itératif, qui ne permet de vérifier l'adéquation du système qu'une fois celui-ci conçu de manière détaillée. Ils sont donc

consommateurs en temps de développement et ne sont pas adaptés à la prise de décision en conception préliminaire. Certains outils permettent la simulation de processus et de procédés, par des approches orientées Objet [Het06; Aug06] et peuvent donc être exploités pour l'aide à la décision. Mais ces outils ne permettent pas l'association de contraintes techniques à des contraintes de type économique ou environnemental. De plus, ils ne sont pas adaptés pour l'aide à la décision en conception préliminaire. Des outils ont été développés très récemment dans ce but, mais aucun n'est associé à une démarche de formalisation qui permette de capitaliser les connaissances afin de construire des bases exploitables par ces outils.

Nous proposons ici d'utiliser une démarche de formalisation des modèles dédiée à l'aide à la prise de décision en conception préliminaire [Sca04a, Ver04]. Cette démarche utilise :

- une méthode d'analyse et de structuration du problème, qui permet l'identification des besoins et la prise en compte des critères d'appréciation du cahier des charges fonctionnel,
- des techniques de décomposition du système à modéliser pour en simplifier la modélisation,
- une stratégie de formulation et de qualification des modèles, qui permet d'identifier les variables à prendre en compte dans le modèle et d'évaluer sa capacité à fournir une aide à la décision,
- un outil numérique d'aide à la décision et des méthodes d'aide aux choix des solutions les plus adaptées.

La stratégie de formulation est adaptée aux caractéristiques des modèles de conception architecturale, puisqu'elle permet, par le biais du formalisme utilisé, l'intégration de connaissances hétérogènes et définies de manière imprécise.

La démarche proposée permet donc l'intégration de l'ensemble des paramètres pertinents pour la conception dans les modèles. En plus de ceux liés aux lois mécaniques (efforts, transferts de chaleur et de masse, etc.) inclus dans le modèle de comportement physique du système, des critères inhérents au Cahier des Charges Fonctionnel (procédés de fabrication, contraintes de maintenance, de marketing, d'encombrement, connaissances métiers, coûts, critères environnementaux) sont pris en compte dès cette phase. La solution de conception prédéfinie qui en découle répond donc nécessairement aux besoins exprimés. Cette démarche est donc particulièrement bien adaptée à l'aide à la décision en conception préliminaire.

### 1-2.3 Objectifs de la thèse.

En s'appuyant cette démarche, l'objectif général de ce travail a été de développer un outil d'aide à la décision pour la conception préliminaire d'un procédé d'évaporation flash bi étagé.

Notre travail s'est donc orienté vers la mise en place d'une base de connaissances autour du phénomène d'évaporation flash et des processus liées à la conception d'un système exploitant cette technologie, afin d'aboutir à un modèle global validé et qualifié d'un évaporateur flash initialement dédié au traitement de la vendange, dans le but d'en généraliser l'utilisation à d'autres applications.

La réalisation de cette base de connaissances s'est faite suivant deux axes complémentaires, présentés sur la figure 1.3 :

- l'un expérimental, avec l'exploitation de mesures de températures et de pressions sur un dispositif de laboratoire,
- l'autre théorique, par la mise en œuvre de la démarche proposée.

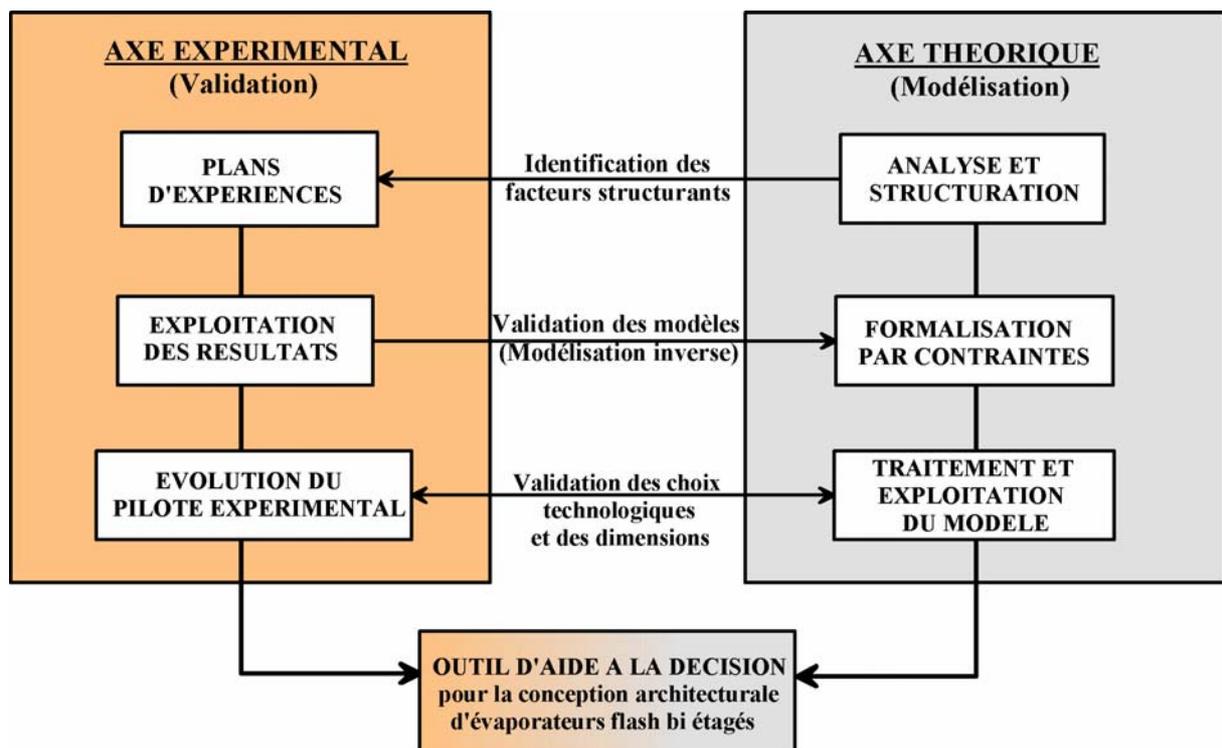


Figure 1.3. Axes de réalisation de l'outil d'aide à la décision en conception préliminaire.

## 1-3 ORGANISATION DU DOCUMENT

L'organisation générale du document, récapitulée sur la figure 1.4, est calquée sur celle de la démarche globale.

Ainsi, après une présentation détaillée, au **chapitre 2**, de la démarche de formalisation et des outils utilisés, nous développons au **chapitre 3**, l'analyse, la structuration et la formulation des modèles d'évaporateurs flash bi-étagés. Ce chapitre fournit une description des concepts retenus pour la modélisation, et capitalise les connaissances liées à la conception de ces procédés.

Le **chapitre 4** est consacré à la validation expérimentale, à la qualification et à l'exploitation des modèles obtenus au chapitre précédent. Il présente donc la procédure de réalisation des essais ainsi que les résultats obtenus, et propose une évaluation de la capacité de ces modèles à apporter une aide à la décision en conception préliminaire de procédés d'évaporation flash. Les connaissances capitalisées et qualifiées sont ensuite traitées par le solveur, et les résultats obtenus sont interprétés pour fournir une aide à la décision pour la conception de ces procédés.

Le dernier chapitre permettra de conclure et tracera les perspectives à venir.

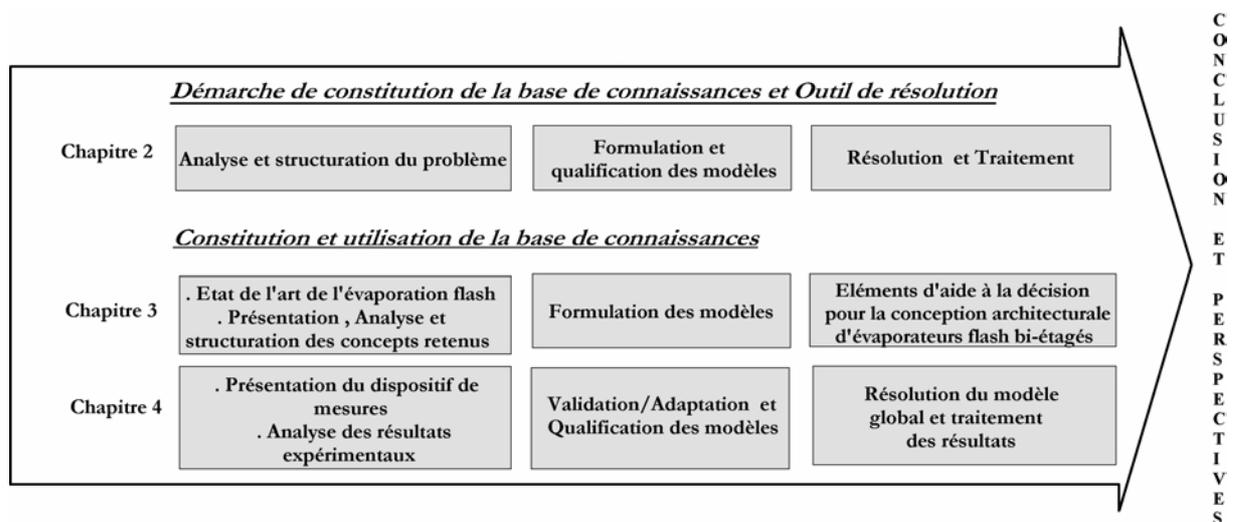


Figure 1.4. Schéma récapitulatif de l'organisation de la thèse.

---

---

## **CHAPITRE 2**

---

---

# **DEMARCHE DE FORMALISATION PAR CONTRAINTES POUR L'AIDE A LA DECISION EN CONCEPTION PRELIMINAIRE**



## 2-1 INTRODUCTION

### 2-1.1 Fondements.

Ce travail de thèse s'appuie sur une démarche de formalisation des modèles en conception architecturale pour l'aide à la décision. Cette démarche, déjà éprouvée au sein de l'équipe [Sca04a, Sca04b, Ver04], regroupe une méthode d'analyse et de structuration du problème, une stratégie de formalisation et de qualification des modèles et la résolution de ce modèle par le biais d'un outil numérique. Elle est résumée sur la figure 2.1.

Son emploi suppose de choisir un **formalisme** particulier, permettant l'intégration des connaissances hétérogènes, imprécises ou mal définies, caractéristiques des problèmes de conception préliminaire. Notre choix s'est porté sur le formalisme des **Problèmes de Satisfaction de Contraintes** (PSC) [Tho96, Sca04a], dans lequel les connaissances sont traduites sous forme de contraintes. La résolution des modèles de conception exprimés sous formes de PSC se fait à l'aide d'outils numériques de satisfaction des contraintes. Dans ces outils, les variables traitées peuvent être continues ou discrètes. L'aspect déclaratif du problème sous forme de relations simples et naturelles rend la modification de la base de connaissances facile, car il est toujours possible d'ajouter ou d'enlever une contrainte. Ils permettent, en outre, de traiter des variables en contexte imprécis, puisque celles-ci peuvent être définies sur des intervalles. On trouve, dans la littérature, des travaux présentant l'intérêt de l'approche par contraintes en conception. Ainsi, Lottaz et al. [Lot99] montrent comment les PSC permettent de gérer les conflits et favorisent la collaboration en mettant en commun les points de vue de différents métiers (architecte, ingénieur, fournisseur de systèmes de ventilation) pour la définition d'une solution de compromis.

La démarche proposée permet ainsi **l'intégration de l'ensemble des paramètres pertinents pour la conception** dans les modèles. En plus de ceux liées aux lois mécaniques (efforts, transferts de chaleur et de masse, etc.) inclus dans le modèle de comportement physique du système, des critères inhérents au Cahier des Charges Fonctionnel (procédés de fabrication, contraintes de maintenance, de marketing, d'encombrement, connaissances métiers, coûts, etc.) sont pris en compte dès cette phase de conception. La solution pré définie qui en découle répond donc nécessairement aux besoins exprimés. Cette démarche est donc particulièrement bien adaptée à **l'aide à la prise de décision en conception préliminaire.**

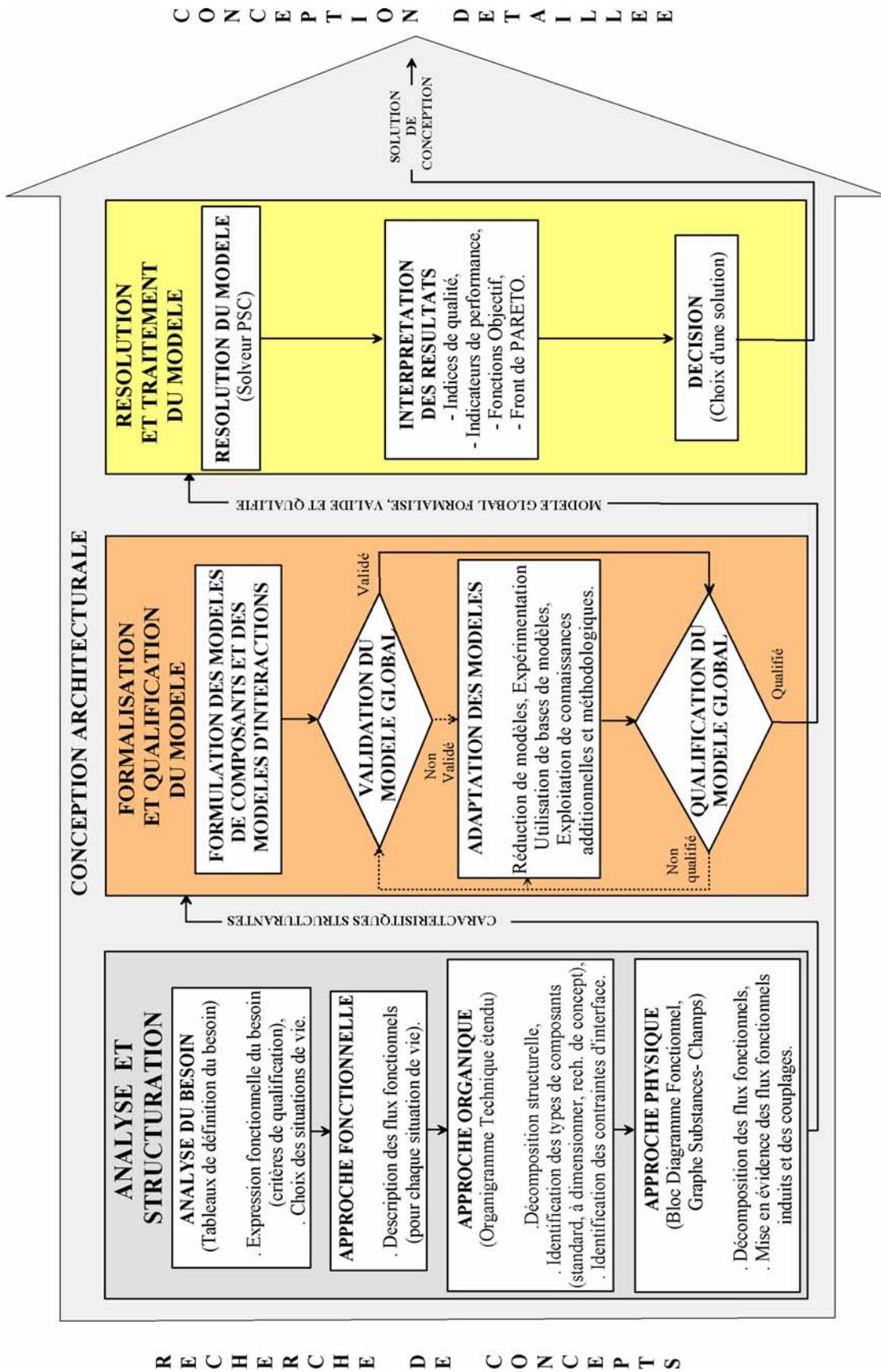


Figure 2.1. Démarche de conception architecturale pour l'aide à la décision.

## 2-1.2 Définition d'un problème de satisfaction de contraintes.

Un problème de satisfaction de contraintes, ou PSC, est défini comme un triplet  $(V, D, C)$  dans lequel :

- $V$  est un ensemble de  $n$  variables  $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ ,
- $D$  est un ensemble de  $n$  domaines initiaux de valeurs pour chaque variable :  
 $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ , où  $V_1 \in D_1, V_2 \in D_2, \dots, V_n \in D_n$ .
- $C$  est un ensemble de  $p$  relations appelées contraintes  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ .

Les variables  $(V_i, i=1 \text{ à } n)$  sont des grandeurs, physiques ou non, caractéristiques du système, dont la valeur n'est pas fixée mais peut être éventuellement déterminée par le calcul.

Les contraintes  $(C_j, j=1 \text{ à } p)$  sont des relations explicites entre plusieurs variables du problème, qui peuvent être des combinaisons logiques de relations élémentaires. Nous distinguons :

- Les contraintes extensives, qui décrivent une liste des combinaisons possibles – ou au contraire impossibles – de valeurs pour les variables mises en jeu.
- Les contraintes intensives, qui peuvent être des équations ou des inéquations reliant les variables entre elles (égalité, inégalité), et font intervenir des fonctions analytiques (transcendantes).
- Les contraintes logiques, qui peuvent être des implications suivies de déclencheurs logiques de contraintes (SI...ALORS), de conjonctions de contraintes (ET logique), de disjonctions de contraintes (OU logique), et permettent d'obtenir des combinaisons de contraintes.

Chaque contrainte va permettre d'exprimer individuellement et isolément une connaissance donnée, quelle que soit sa nature (loi de conservation, loi d'échange, point de vue, etc.). Ce formalisme par contraintes permet donc, par exemple, d'intégrer simultanément des connaissances liées à un comportement physique, à des règles métiers, à des objectifs économiques ou environnementaux.

La résolution d'un PSC s'effectue généralement à l'aide d'un moteur d'inférences, ou solveur de Problème de Satisfaction de Contraintes. Ces solveurs traitent conjointement l'ensemble des contraintes, des variables et des domaines qui définissent la base de connaissances, dans le but d'évaluer les valeurs de chaque variable en respectant toutes les contraintes du problème. La combinaison de valeurs  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  pour les variables, dans laquelle chaque valeur  $a_i$  appartient au

domaine  $D_i$  qui lui est associé, et qui satisfait l'ensemble des contraintes de l'ensemble  $C$  représente une solution ou, dans un contexte d'aide à la décision, un principe de solution. Ainsi, toutes les solutions issues de la résolution du modèle de conception valident l'ensemble des contraintes du cahier des charges fonctionnel. Ce point sera détaillé en troisième partie de ce chapitre.

---

*Les modèles formalisés par le biais de la démarche proposée sont des ensembles de variables définies sur des domaines de valeurs et reliées par des relations appelées contraintes. Chaque contrainte permet de traduire une connaissance donnée, liée au problème de conception.*

*Le traitement des modèles ainsi formalisés est réalisé à l'aide d'un solveur de Problèmes de Satisfaction de Contraintes, qui définit des restrictions des domaines de définition des variables. Les valeurs comprises dans ces restrictions satisfont simultanément toutes les contraintes et comprennent nécessairement l'ensemble des solutions du modèle.*

---

## **2-2 ANALYSE ET STRUCTURATION DU PROBLEME DE CONCEPTION**

La phase d'analyse et de structuration d'un problème de conception est la phase initiale de notre démarche globale (cf. Figure 2.1). Elle conduit à la **décomposition du problème de conception**, dans un souci d'exhaustivité, et à l'identification de ses caractéristiques structurantes afin de faciliter l'intégration des connaissances pour la formulation des modèles.

Sont considérées comme structurantes toutes les connaissances nécessaires et suffisantes au travail de conception et de définition d'une première architecture. Ainsi, comme le soulignent Pahl et Beitz [Pah96], différentes natures de caractéristiques pouvant être considérées comme structurantes. Dans notre cas, il peut s'agir de variables, de domaines de valeurs des variables, de fonctions incontournables ou comportant un risque, de situations de vie, de comportements physiques pertinents pour décrire le fonctionnement du système ou de critères particuliers.

L'analyse et la structuration du problème de conception ont pour but d'**identifier** ces différentes **caractéristiques structurantes** de la manière la plus exhaustive possible. Cette phase est réalisée en utilisant quatre approches :

- Une **analyse du besoin**, qui permet de traduire le besoin exprimé de façon implicite ou explicite par les utilisateurs et d'identifier et classer les situations de vie du système à concevoir,
- Une **approche fonctionnelle**, qui permet d'identifier l'ensemble des fonctions liées à l'utilisation du système,

- Une **approche organique**, qui permet une décomposition structurale du système facilitant la gestion du problème de sa conception, puisque les éléments constitutifs sont répertoriés et classés,
- Une **approche physique**, qui permet une analyse des flux explicitement associés aux fonctions (flux fonctionnels) ou induits par elles et donc une sélection des comportements physiques pertinents à prendre en compte pour la conception du système.

### 2-2.1 Analyse du besoin.



L'analyse du besoin permet de **traduire le besoin** exprimé explicitement ou implicitement par les utilisateurs futurs du système à concevoir en critères. Ces critères sont appelés critères de qualification, car ils vont permettre de s'assurer que les solutions choisies satisfont bien le besoin exprimé.

Nous distinguons trois catégories de critères [Sca04a] :

- Les **critères de qualification technologiques**, qui caractérisent les fonctionnalités et l'architecture souhaités pour le système. Ils peuvent donc être fonctionnels (performance, durée de vie, sûreté de fonctionnement), c'est-à-dire relatifs à une fonctionnalité du système à concevoir, ou structurels (masse, encombrement, complexité), c'est-à-dire relatifs à une architecture particulière,
- Les **critères de qualification économiques** tels que les coûts, les possibilités d'investissement,
- Les **critères de qualification client**, qui vont permettre au client de faire un tri parmi les différents concepts. Ces critères sont donc essentiels dans le développement d'outils d'aide à la décision,
- Les **critères de qualification propres au service marketing**, tels que le temps de mise sur le marché, les coûts de possession du produit, les effets sur l'environnement.

Ces critères sont traduits qualitativement ou quantitativement, par des égalités, des inégalités ou par l'appartenance à un domaine défini.

Une fois identifiés, ces critères vont permettre de hiérarchiser les **situations de vie (SdV)** par ordre d'importance pour la conception. Ces situations de vie, présentées sur la figure 2.2, correspondent à des contextes particuliers d'utilisation du système au cours de son cycle de vie. Dans le cadre de notre démarche, il est important de hiérarchiser ces situations de vie en fonction de leur pertinence pour la conception, afin de privilégier les contraintes associées.

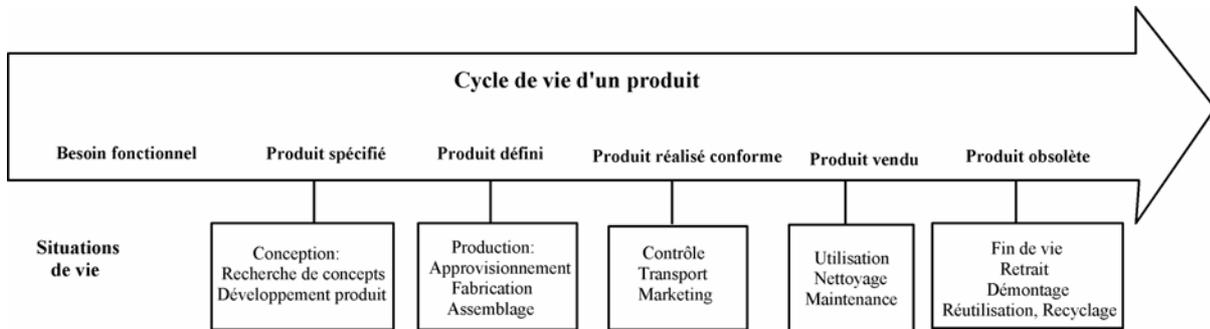
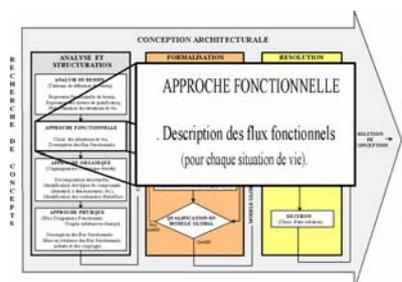


Figure 2.2. Cycle de vie d'un produit et situations de vie correspondantes [Sca04a].

Les situations de vie (**SV**) généralement retenues comme structurantes sont :

- Les SV pertinentes client,
- Les SV directement liées à la satisfaction de la fonction globale,
- Les SV mal maîtrisées et identifiées grâce aux retours d'expériences,
- les SV conception et/ou fabrication et/ou maintenance (phases où l'entreprise intervient et utilise des règles métier),
- Les SV liées à la sûreté de fonctionnement (disponibilité, fiabilité).

## 2-2.2 Approche fonctionnelle.



L'approche fonctionnelle a pour but d'identifier les fonctions structurantes associées au système, pour chaque situation de vie jugée comme structurante pour la conception et de la manière la plus exhaustive possible.

Afin de mieux appréhender les caractéristiques à identifier, deux points de vue sont nécessaires pour une approche fonctionnelle complète, l'un **externe** et l'autre **interne**.

### 2-2.2.1 Approche fonctionnelle externe.

La vision externe de l'approche fonctionnelle a pour but d'identifier les fonctions essentielles du système à concevoir, qu'elles soient demandées ou imposées par son environnement. Le système est donc considéré dans sa globalité.

Ainsi, pour chaque situation de vie structurante identifiée à l'étape précédente, on associe au système les éléments susceptibles d'avoir une influence sur son comportement ou sur sa conception. Les éléments de l'environnement sont appelés "milieux extérieurs". Chaque relation identifiée entre le système et un autre élément est caractérisée par une fonction à remplir par le système. Nous distinguons :

- Les **Fonctions de Service (FS)**, qui sont relatives à une action attendue du système à concevoir, ou réalisée par lui pour répondre à un besoin de l'utilisateur. Ces fonctions sont donc perçues et voulues par l'utilisateur, et vont apporter de la valeur au système.
- Les **Fonctions Contrainte (FC)**, qui traduisent une contrainte imposée au système par un milieu extérieur, qui a un impact sur la réalisation d'une ou de plusieurs FS.

A ces fonctions, sont associées des critères d'appréciation permettant d'apprécier la manière dont elles sont remplies. Ces critères comportent chacun un niveau traduisant les variables caractéristiques des fonctions, une flexibilité traduisant les domaines de valeurs de ces variables et une limite d'acceptation correspondant à la limite de ces domaines de valeurs.

### 2-2.2.2 Approche fonctionnelle interne.

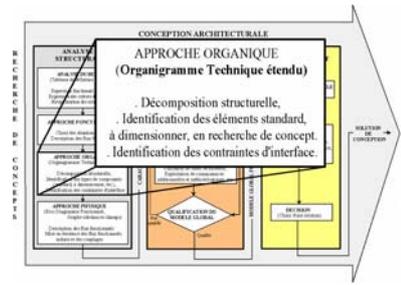
L'approche fonctionnelle interne permet, par le biais de diagrammes FAST (Function Analysis System Technique) [Tas03], d'analyser les modalités de réalisation des fonctions identifiées durant l'approche externe. Cette analyse conduit à d'autres types de fonctions, non demandées par le client, qui sont internes au système et liées au concept lui-même. Ces fonctions, dites **Fonctions Techniques (FT)**, participent tout de même à la qualité du système, puisqu'elles permettent la parfaite réalisation des FS. Le choix des FT va dépendre de la solution technique choisie pour la conception et de l'expérience du concepteur.

---

*Les critères relatifs aux besoins utilisateur, ainsi que les caractéristiques associées aux fonctions à remplir par le système à concevoir sont identifiés par l'analyse du besoin et l'approche fonctionnelle. Cette deuxième étape se fait d'un point de vue externe, d'abord, en identifiant des fonctions de service et des fonctions contraintes liées au fonctionnement attendu du système, puis de manière interne, par l'identification de fonctions techniques liées au concept choisi.*

---

### 2-2.3 Approche organique.



L'approche organique permet de décomposer le problème de conception afin de structurer la modélisation. Elle exploite un outil de représentation issu de l'analyse fonctionnelle, l'Organigramme Technique (**OT**), qui permet une description technique du système à concevoir par blocs fonctionnels.

Pour la conception de systèmes réels, les méthodes MAL'IN [Tre04b, Nad06a, Nad06b] préconisent de prendre en compte, dans la constitution de l'OT, les milieux extérieurs influençant le système, de manière à prendre en compte leurs effets dans la traduction des contraintes. Notre objectif étant de prendre en compte le maximum de connaissances structurantes pour la conception préliminaire des systèmes, nous avons choisi d'utiliser une adaptation de l'OT, présentée sur la figure 2.3, que nous avons appelée **Organigramme Technique étendu (OTé)**.

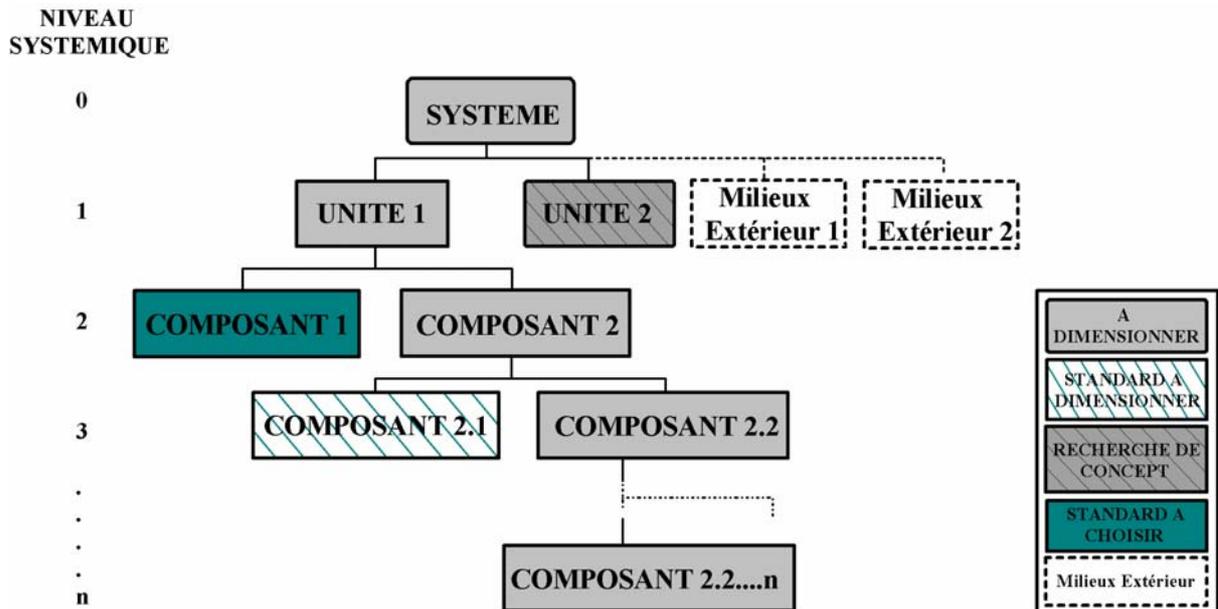


Figure 2.3. Organigramme Technique étendu (OTé).

Dans cet organigramme technique étendu, les blocs fonctionnels de l'OT classique sont conservés, ils représentent les composants du système organisés par niveau de décomposition structurelle. Des blocs fonctionnels aux bordures en pointillés représentent les milieux extérieurs au

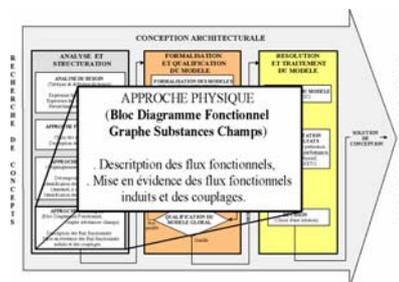
système. Afin de faciliter la représentation, ils ne sont représentés qu'au niveau systémique le plus élevé de l'organigramme. L'organigramme technique étendu permet, en outre, d'identifier :

- les **composants standard à choisir**, qui sont des composants entièrement conçus et dimensionnés. Leur choix se fait sur des paramètres jugés structurants, liés aux fonctions qu'ils doivent remplir. Ils peuvent être déterminés à partir d'abaques, de tableaux ou de références dans des catalogues. Le fait qu'il s'agisse de composants standard impose des contraintes intrinsèques de dimension et d'interfaçage dont il va falloir extraire celles qui sont structurantes pour la conception;
- les **composants standard à dimensionner**, qui sont des composants entièrement conçus, pour lesquels des règles de dimensionnement existent mais pour lesquels aucune valeur standard n'est imposée;
- les **composants à dimensionner**, dont la conception est incontournable, et donc structurante pour la conception du système;
- Les composants pour lesquels une **recherche de concept** s'impose.

La liaison entre ces différents composants implique en outre de prendre en compte un certain nombre de contraintes d'interface fonctionnelles (connexions, fixation, assemblage) et physiques (compatibilités, conditions aux limites) dans le modèle de conception.

*L'Organigramme Technique étendu est l'outil utilisé pour l'approche organique de la démarche. Il permet d'associer les fonctions définies durant les étapes précédentes à des blocs fonctionnels, et donc de visualiser le système par niveaux systémiques de blocs fonctionnels. Il permet également de faire ressortir les milieux extérieurs associés au système, et donne donc des indications sur la complexité du système à concevoir (nature des composants) et sur les risques liés à la gestion de cette complexité (recherche de concept, contraintes d'interfaçage, etc.).*

## 2-2.4 Approche physique.



Au-delà des représentations schématisées, la conception d'un système passe par sa modélisation par le biais, entre autres, de lois traduisant son(ses) comportement(s) physique(s).

Dans le contexte de notre travail, le modèle de conception architecturale doit donc prendre en compte les **variables et contraintes traduisant les comportements physiques structurants**

pour la conception, mis en jeu dans le fonctionnement du système. L'approche physique est l'étape permettant d'identifier ces variables et contraintes.

Cette approche consiste, à partir de l'organigramme technique étendu, à différencier les éléments relevant de la structure, de la fonction ou des variables physiques pour chacun des blocs fonctionnels, dans le but de proposer une description du système mettant en évidence les flux y circulant. Ces flux peuvent être des flux d'énergie (mécanique, thermique, électrique), de matière (fluide à traiter, air, eau), de contact ou d'information (capteurs de niveau). Ils traduisent les fonctions préalablement identifiées, et facilitent l'identification des phénomènes physiques ainsi que des composants liés à la réalisation d'une fonction.

Nous utilisons, pour cette description, un autre outil d'analyse fonctionnelle : le **Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF)** [Nad06a], qui permet de mettre en évidence des relations entre les fonctions et les composants d'un système (cf. Figure 2.4). Il est réalisé pour chaque situation de vie structurante, et présente le cheminement des flux fonctionnels au sein d'un bloc fonctionnel, en faisant apparaître les composants de niveau immédiatement inférieur dans l'OTé.

Le BDF permet ainsi de mettre en évidence les interactions entre composants et d'identifier les composants structurants d'un système, puisqu'il renseigne sur les éléments par lesquels vont transiter les flux fonctionnels associées à la réalisation d'une fonction principale.

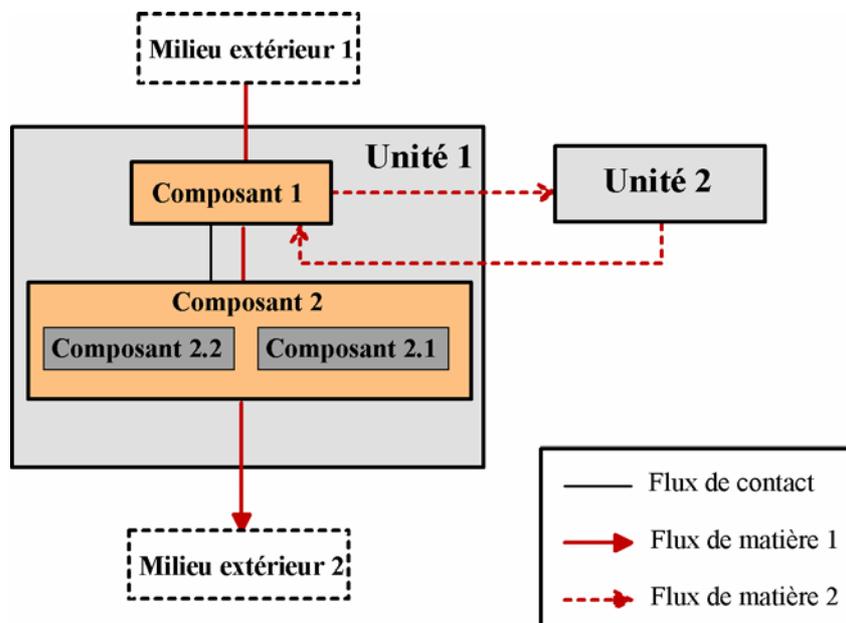


Figure 2.4. Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF).

Le but de la représentation des flux circulant dans le système étant d'identifier les caractéristiques physiques structurantes de la manière la plus exhaustive possible, le BDF présent l'inconvénient de ne mettre en évidence ni les éventuels couplages physiques entre les différents flux, ni les phénomènes physiques induits par certains flux fonctionnels, non souhaités mais qui peuvent avoir une influence non négligeable pour la conception du système (vibration, dilatation, etc.). De plus, les matières ne sont représentées qu'au travers de leur flux dans le système, alors qu'elles peuvent avoir une influence autre.

Pour pallier ce problème, nous utilisons un système de représentation employé dans la théorie TRIZ [Sav00], le **Graphe des associations Substances-Champs (GSC)** [Nad06b], qui permet d'intégrer les matières comme des blocs à part entière, puisque les unités, les composants, les milieux extérieurs et les matières sont identifiés à un même niveau comme étant les "substances". Les flux transitant entre ces substances correspondent aux "champs". Ils sont caractérisés par des verbes d'actions (cf. Figure 2.5).

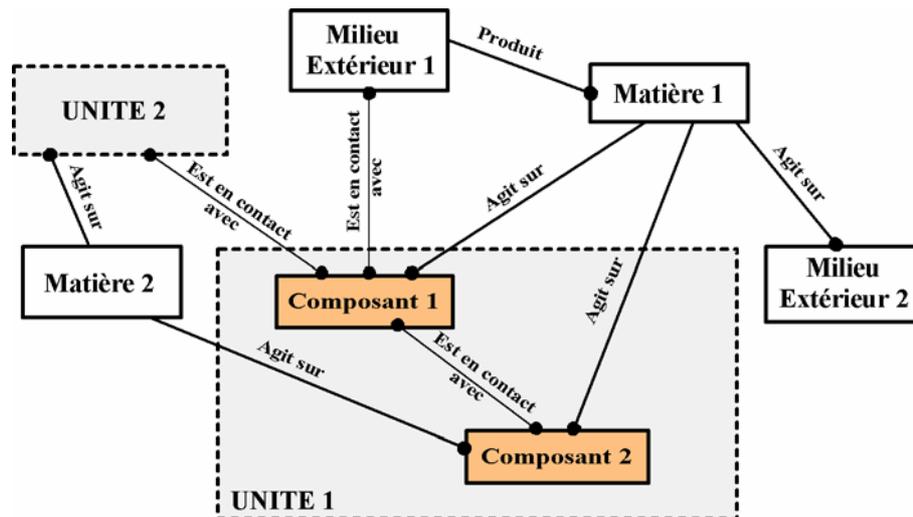


Figure 2.5. Graphe d'association Substance-Champs (GSC).

Il est possible, par le biais de cette représentation, d'identifier les effets utiles, utiles insuffisants, néfastes ou nuisibles, qui n'étaient pas représentés dans le BDF.

Une fois tous les flux structurants identifiés, il est alors possible de leur associer les contraintes et variables à prendre en compte dans le modèle, par le biais de lois physiques, de règles métiers, de modèles existants, etc.

D. Scaravetti [Sca04a] propose un tableau récapitulatif des caractéristiques structurantes associées aux comportements physiques facilitant cette étape de l'approche physique.

---

*L'utilisation des Blocs Diagrammes Fonctionnels, complétée par celle de Graphes Substances-Champs permet de mettre en évidence les flux fonctionnels et induits (nuisibles ou non) existant entre les différents composants du système à concevoir. L'identification de ces flux va permettre de déterminer les variables et contraintes liées au comportement physique du système à intégrer au modèle de conception architecturale.*

---

## **2-3 FORMALISATION ET QUALIFICATION DES MODELES**

La phase de formalisation et de qualification des modèles permet de prédéfinir le problème de manière complète. Elle aboutit à un modèle global validé et qualifié du système à concevoir, qui sera ensuite traité par l'outil numérique pour conduire à des solutions de conception. Cette phase inclut :

- la définition d'hypothèses qui vont définir le cadre de représentation du système à modéliser, ainsi que son cadre de validité,
- la formulation, sous formes de PSC, des différents modèles pour les composants et interfaces identifiés dans la phase d'analyse et de structuration, ainsi que leur validation du point de vue de la complétude et de la cohérence,
- la qualification de chacun de ces modèles, puis du modèle global, afin d'évaluer leur capacité à aider à la prise de décision, de valider le choix des hypothèses,

L'adéquation du modèle global avec l'outil de traitement et avec les objectifs de la conception est également vérifiée.

Le travail de Y. Vernat [Ver04] portant sur la définition d'une logique systématique de formalisation des modèles en conception architecturale a permis de structurer les étapes de définition des hypothèses, de formulation des modèles et de validation et de qualification du modèle global.

### **2-3.1 Nature des variables et des modèles de conception.**

Le besoin lié à la modélisation est de pouvoir différencier des configurations de conception les unes par rapport aux autres, en terme de performances et de coût, afin d'aider au choix. Pour faciliter cette différenciation, Vernat [Ver06] définit deux catégories de variables de modélisation, qui vont découler des caractéristiques structurantes identifiées lors de la phase d'analyse et de structuration:

- les **variables de conception (VCo)**,
- les **variables auxiliaires (VA)**.

Il définit par ailleurs des **Critères (Cr)**, issus du cahier des charges, qui sont des indicateurs de la pertinence de la conception. Ils permettent de caractériser les propriétés, l'état ou la qualité d'une configuration de conception, et peuvent donc être des critères de qualification du besoin, ou des critères d'appréciation associés aux fonctions principales. Ils sont traduits par une égalité, une inégalité ou par l'appartenance à un domaine défini.

Les variables de conception (**VCo**) définissent de manière stricte le composant auquel elles sont associées (longueur, couleur, référence dans un catalogue). Une fois évaluées, elles permettent donc de distinguer deux configurations de conception entre elles.

Les Variables Auxiliaires de modélisation (**VA**), correspondent aux variables de modélisation qui ne sont pas VCo. Bien qu'elles ne permettent pas d'identifier un composant par rapport à un autre, elles sont néanmoins nécessaires à la modélisation pour relier les variables de conception aux critères (débit, effort extérieur, pression, nombre adimensionnels).

Une fois définies sur un domaine de valeurs et reliées entre elles par des relations de type algébrique, ou contraintes, ces VCo et VA vont constituer les modèles de conception.

Nous avons vu préalablement que l'organigramme technique étendu permettait de mettre en évidence les composants principaux du système à concevoir. Les éléments mis en cause dans les interactions entre composants, qui peuvent parfois être également des composants (tuyauteries, vannes) n'y sont cependant pas représentés. Leur influence est néanmoins prise en compte dans l'analyse des flux, par le biais des Blocs Diagrammes Fonctionnels et de Graphes Substances-Champs. Pour faciliter la formulation des modèles, Y. Vernat [Ver06] propose également de distinguer :

- les modèles de composant (**MC**), relatifs aux blocs fonctionnels identifiés dans l'OTé, qui permettent de décrire le comportement d'un bloc fonctionnel face aux sollicitations extérieures. Les variables relatives aux milieux extérieurs influençant le fonctionnement de ce bloc sont donc prises en compte.
- Les modèles d'interaction (**MI**), qui permettent de décrire les relations apparaissant aux interfaces entre les blocs fonctionnels, et donc de relier les modèles de composants entre eux. Ils peuvent ainsi définir des liaisons mécaniques, des liaisons fluidiques, des flux

d'information, des liaisons électriques ou magnétiques, ou être relatifs à des composants dits d'interaction.

Ces modèles de composants et d'interactions reliés entre eux vont constituer le modèle global de conception.

---

*Les caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse et la structuration du problème de conception permettent de définir des variables de conception (VCo), des variables auxiliaires de modélisation (VA) et des critères (Cr). Les VCo permettent de définir de manière complète un composant donné, les Cr vont servir d'indicateurs de pertinence pour aider au choix parmi plusieurs configurations et les VA permettent de relier les VCo aux Cr et de donner une cohérence physique aux modèles.*

*Une fois définies et contraintes, les VCo et les VA permettent la formulation de modèles de composant (MC), relatifs au comportement des composants identifiés dans l'Organigramme Technique étendu, et de modèles d'interaction (MI), caractérisant les interactions entre ces composants. L'association des MC et des MI constitue le modèle global de conception.*

---

### **2-3.2 Définition des hypothèses.**

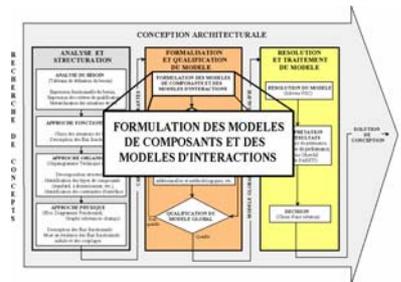
Toute modélisation d'un système implique une schématisation de celui-ci. Un modèle ne fait, en effet, que représenter certains aspects jugés nécessaires et suffisants pour la traduction d'un comportement donné.

Girard et al. [Gir01] soulignent le fait que la caractérisation d'une connaissance nécessite de connaître **l'objectif de la modélisation et le contexte de définition** de cette connaissance. L'étape de définition des hypothèses va permettre de définir ce contexte puisqu'elle permet de délimiter l'espace d'utilisation du modèle à formaliser, et donc de définir le cadre de représentation du système à modéliser. Elle permet donc de conditionner le caractère schématique du modèle.

Etant donnée la distinction faite entre les modèles de composants (**MC**) et ceux d'interactions (**MI**), l'étape de définition des hypothèses se fait nécessairement sur la base du découpage effectué durant l'approche organique, puisqu'elle se fait pour un modèle donné. Elle débute donc par le choix d'un niveau de modélisation initial, à partir de l'organigramme technique étendu qui a été réalisé. Ce choix peut se faire :

- par rapport à un niveau de détail nécessaire, identifié pendant l'analyse et la structuration du problème,
- par rapport à l'état des connaissances, c'est-à-dire que toute absence de connaissances sur un composant impose de descendre au niveau systémique inférieur,
- par rapport à la complétude et à la cohérence du modèle : il faut vérifier que toutes les variables structurantes sont représentées.

### 2-3.3 Formulation des modèles.



L'étape de formulation des modèles correspond à leur expression sous forme de contraintes, ou réalisation.

Comme dans le cas de la définition des hypothèses, l'expression des modèles sera nécessairement basée sur la structuration effectuée dans l'Organigramme Technique étendu (OTé). Nous distinguons donc l'expression des modèles de composants, correspondant aux blocs fonctionnels de l'OTé de celle des modèles d'interactions, relatifs aux interfaces entre les composants.

Dans le cas des modèles de composants (MC), pour chaque bloc fonctionnel structurant de l'OTé, on répertorie les flux fonctionnels identifiés dans le Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) le traversant et transformés par lui. Les variables associées, leurs domaines de définition ainsi que les relations les reliant vont permettre l'expression du modèle correspondant. Pour un niveau systémique donné, l'expression des MC se fait à partir des connaissances disponibles : règles métiers, bases de données de modèles existants, catalogues, utilisation d'abaques, résultats expérimentaux. Toute absence de connaissances à un niveau de modélisation donné oblige à descendre au niveau inférieur.

La réalisation des modèles d'interaction est, elle, basée sur l'identification des éléments situés aux interfaces des blocs fonctionnels structurants. A partir du Graphe Substances-Champs (GSC), l'analyse des flux d'interactions fonctionnels et induits identifiés comme pertinents, conduit à l'expression des modèles, par la traduction de lois d'interactions ou de résultats expérimentaux.

---

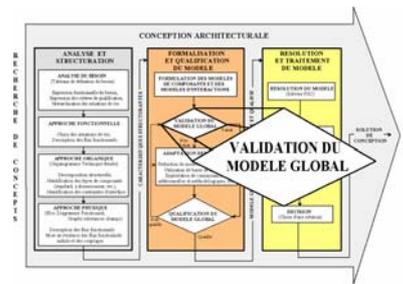
***La définition des hypothèses permet de délimiter l'espace d'utilisation du modèle du système à concevoir auquel elles sont associées. Elle est réalisée pour chacun des modèles de composants et d'interactions identifié comme structurant, en se basant sur la structuration de l'organigramme technique étendu***

***Une fois le cadre de représentation défini, la formulation des modèles se fait à partir de l'analyse de flux fonctionnels et induits, par la traduction de connaissances existantes : modèles théoriques ou expérimentaux, règles métiers, abaques, lois de conservations pour les modèles de composants; lois d'interactions ou résultats expérimentaux pour les modèles d'interaction.***

***Toute absence de connaissance à un niveau donné implique de descendre au niveau inférieur de représentation.***

---

### 2-3.4 Validation du modèle global.



L'ensemble des modèles de composants (MC) et des modèles d'interaction (MI) constitue le modèle global du système à concevoir. Il est alors important de vérifier la validité de ce modèle global, en terme de complétude et de cohérence des connaissances mises en jeu et d'adéquation avec l'outil de traitement. C'est l'étape de validation du modèle global.

L'analyse de la complétude du modèle se fait en vérifiant que, pour un niveau de représentation donné, un MC a bien été établi pour chaque bloc fonctionnel de l'OTé identifié comme structurant, et que toutes les variables structurantes sont prises en compte. Chaque flux identifié comme structurant dans le Graphe Substances-Champs, qu'il soit fonctionnel ou induit, doit conduire à un MI.

L'analyse de la cohérence permet de vérifier que tous les MC et MI sont reliés entre eux. L'utilisation des Blocs Diagrammes Fonctionnels est alors très utile, puisqu'ils font intervenir toutes les interactions fonctionnelles, même celles existant entre composants de niveaux systémiques différents. Il faut ainsi vérifier que :

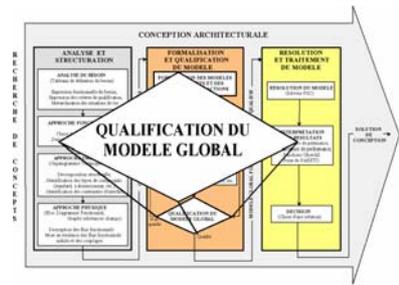
- les variables représentant les mêmes grandeurs ont le même sens dans tous les différents modèles constitutifs,
- les mêmes systèmes d'unités sont utilisés pour tous les modèles,
- les critères et les variables associées sont bien cohérents entre eux,
- les conditions aux limites entre un modèle de composant et les modèles d'interactions associés correspondent.

Toute incohérence dans le modèle global entraînera l'adaptation ou la reformulation des modèles impliqués.

L'estimation de l'adéquation du modèle global avec l'outil de traitement, se fait en analysant son formalisme et sa taille. Pour ce qui est du formalisme, dans notre cas, chacune des variables du modèle doit être contrainte, c'est-à-dire qu'elle doit être définie sur un intervalle donné et être impliquée dans une relation de type algébrique.

L'analyse de la taille se fait en terme de temps et/ou de coût de calcul, du nombre de variables, etc. Les limites liées à l'utilisation des solveurs PSC sont abordées en troisième partie de ce chapitre.

### 2-3.5 Qualification du modèle global.



Le modèle global de conception architectural formulé et validé synthétise les connaissances nécessaires à la conception du système modélisé, sur lesquelles vont se baser les conclusions qui permettront de prendre les décisions. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer la confiance à mettre dans les choix qui seront faits à partir de ces conclusions, pour évaluer l'aide apportée par l'outil d'aide à la décision.

L'étape de qualification du modèle global a pour objet d'estimer cette aide, relativement au besoin exprimé par l'utilisateur, en qualifiant les connaissances mises en jeu dans l'outil d'aide à la décision. Cette qualification repose sur l'évaluation de quatre paramètres de Parcimonie, d'Exactitude, de Précision et de Spécialisation, regroupés sous l'acronyme "PEPS" [Seb03, Ver04, Sca06].

La Parcimonie caractérise donc la capacité d'un modèle à décrire correctement le comportement du système qu'il représente avec un nombre minimum de relations et de variables. Elle croît avec le nombre et le niveau de couplage entre les variables du modèle. Elle peut être considérée comme une échelle inverse de la complexité du modèle, puisque dans le cas des Problèmes de Satisfaction de Contraintes où les relations sont de types algébrique et analytique, le nombre d'étapes et le temps de traitement caractérisant la complexité d'un modèle augmentent de manière exponentielle en fonction du nombre de variables incluses dans le modèle [Sam95].

L'Exactitude est une évaluation de l'écart entre l'espace de solutions du modèle et la réalité qu'il doit représenter. Cette réalité est caractérisée par des informations accessibles au travers d'expérimentations, de modèles ayant fait leurs preuves ou de comportements de référence.

La Précision représente l'étendue du domaine des valeurs possibles pour une même variable. Elle n'est donc pas à confondre avec l'incertitude, qui se rapporte plus à une densité de probabilité ou à une distribution de possibilité.

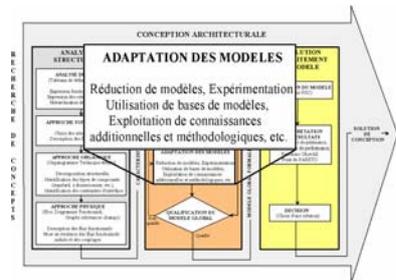
La Spécialisation correspond à une évaluation de la quantité et du niveau des informations du modèle qui s'opposent à la généralité de son utilisation. Elle caractérise donc l'ensemble des hypothèses et des informations qui restreignent le domaine de recherche des solutions.

Ces quatre paramètres vont permettre de comparer plusieurs modèles entre eux, afin de définir celui qui répondra le mieux aux exigences liées à la satisfaction des objectifs de conception et qui aidera le mieux à la prise de décision.

La mesure de la précision des résultats fournis par le modèle permettra d'estimer les incertitudes inhérentes aux connaissances utilisées (relations et variables). Celle de l'exactitude conduira à évaluer les risques liés aux décisions prises à l'aide des résultats du modèle. L'estimation de la parcimonie donnera une idée de la complexité du modèle. L'évaluation de la spécialisation renseignera sur les limites d'utilisation du modèle, et définira le champ d'application des connaissances qui ont été impliquées dans l'élaboration des résultats.

Ainsi, un modèle aidera d'autant mieux à la prise de décision que sa parcimonie, son exactitude et sa précision seront élevées et que sa spécialisation sera faible.

### 2-3.6 Adaptation des modèles.



Dans le cas où le modèle global ne serait pas validé ou qualifié, une adaptation des modèles de composants (MC) et des modèles d'interaction (MI) s'impose. Cette adaptation débute par une analyse globale des modèles, qui a pour but d'identifier ceux qui sont à remettre en cause, c'est-à-dire ceux qui ont l'impact le plus important dans l'invalidation du modèle global. Parmi les modèles qui sont identifiés, les MI sont traités en premiers, car ce sont eux qui jouent essentiellement sur la cohérence globale du modèle, puisqu'ils traduisent les interfaces entre les composants du système.

L'adaptation se fait en vérifiant avant tout le formalisme des modèles incriminés. Il peut également s'avérer nécessaire de modifier les critères d'appréciation du besoin pris en compte pour la validation. En complément, différentes techniques d'adaptation des modèles sont utilisables, de façon isolée ou simultanée [Ver06]. Les plus utilisées sont :

- La simplification, qui consiste à éliminer un certain nombre de variables, par le biais d'hypothèses simplificatrices, et donc d'augmenter la parcimonie des modèles,
- La spécialisation, qui exploite l'usage d'hypothèses spécialisantes pour faciliter l'écriture des modèles, mais diminue, par là, la généralité de leur utilisation,
- L'analyse dimensionnelle, qui permet d'agréger plusieurs variables en une seule variable sans dimensions. La parcimonie est ainsi augmentée sans enlever d'information,
- L'analyse expérimentale, qui permet d'améliorer l'exactitude du modèle relativement au comportement de référence que constitue l'expérimentation. Les modèles correspondants ne sont, cependant, applicables que dans le contexte fourni par l'expérimentation, ce qui en diminue fortement la généralité d'utilisation.

*La validation du modèle global, constitué par l'association des modèles de composants et d'interactions, se fait en analysant sa complétude, sa cohérence et son adéquation avec l'outil de traitement. Les différents outils utilisés pour l'analyse et la structuration du problème (OTé, BDF, GSC) sont particulièrement adaptés pour aider à la validation du modèle.*

*Une fois validé, ce modèle global est ensuite qualifié relativement au besoin exprimé par l'utilisateur, afin d'évaluer l'aide apportée par l'outil d'aide à la décision dans lequel il sera intégré. La qualification se fait au travers de l'évaluation de quatre paramètres de Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation (PEPS).*

*Si le modèle global n'est pas validé ou pas qualifié, les modèles de composants et d'interaction mis en cause sont réexprimés, sur la base de techniques d'adaptation diverses (simplification, analyse dimensionnelle, etc.).*

### **2-3.7 Notion d'héritage entre hypothèses.**

Un modèle n'est pas dissociable des hypothèses auquel il est rattaché, puisqu'il n'est applicable que dans le cadre défini par celles-ci. Dans un contexte de validation du modèle global, il apparaît donc essentiel d'éprouver la validité des hypothèses émises pour justifier l'utilisation du modèle.

Si on se réfère aux travaux de P. Duhem [Duh06] sur le holisme épistémologique, thèse selon laquelle une hypothèse n'est jamais testée isolément mais est un ensemble d'hypothèses interdépendantes, la procédure de mise à l'épreuve d'une hypothèse met toujours en jeu un grand nombre d'autres hypothèses, qui font partie des fondements de la théorie considérée. Toute hypothèse  $h$  est nécessairement associée à un certain nombre d'hypothèses  $H_i$  implicitement admises, et la déduction de conséquences mesurables ou observables supposées permettre de tester  $h$  fera toujours appel à ces hypothèses  $H_i$ . L'énumération des hypothèses relatives à un modèle, dans un objectif d'exhaustivité, peut donc s'avérer être une tâche longue et peu aisée.

Afin de pallier ce problème, nous avons adopté la notion d'héritage, telle qu'elle est employée en intelligence artificielle : l'héritage constitue la forme d'inférence existant entre différentes classes, que l'on peut formuler par **si A est une sous-classe de B et que B possède la propriété P, alors A possède aussi la propriété P**. C'est-à-dire que les concepts d'un même ensemble sont organisés en classes hiérarchisées, de telle sorte que les classes correspondant aux concepts les plus généraux englobent celles relatives aux concepts les plus spécialisés.

Par extension, nous allons considérer l'ensemble des hypothèses comme un système de classes hiérarchisées, des plus générales aux plus spécialisées. La validité d'un modèle reposant sur une hypothèse  $h$  d'une classe  $A_i$  sera nécessairement associée à toutes les hypothèses des classes  $A_{m_i}$  hiérarchiquement supérieures.

H. Poincaré évoque, dans son ouvrage sur la science et les hypothèses [Poi03], quatre catégories d'hypothèses :

- Les hypothèses naturelles, qui constituent le fondement des théories de la physique mathématique. Ce sont donc les hypothèses qui seront remises en cause en dernier lieu. Ces hypothèses constituent les hypothèses  $H_i$  précédemment évoquées. A titre d'exemple, considérer l'attraction de corps éloignés comme négligeable constitue une hypothèse naturelle.
- Les hypothèses indifférentes, qui ne modifient pas le résultat de l'expérience, car leur influence n'est pas directement vérifiable. Un exemple peut être de considérer la matière comme continue ou comme un regroupement d'atomes.
- Les hypothèses de généralisation, que l'expérience va confirmer ou infirmer. Elles peuvent donc être utiles, mais en nombre restreint car si elles sont trop nombreuses, l'impact relatif de chacune serait difficile à mettre en évidence.
- Les hypothèses dangereuses, qui sont généralement tacites et émises de manière inconsciente. La rigueur apportée par la physique mathématique est un bon moyen de les éviter.

Ces catégories d'hypothèses ne sont, selon nous, pas indépendantes puisque la définition d'hypothèses indifférentes ou de généralisation induira implicitement celle d'hypothèses naturelles.

Par ailleurs, les travaux effectués dans le cadre de cette thèse nous ont permis de mettre en évidence trois autres types d'hypothèses, selon leur influence relative sur les paramètres de parcimonie, exactitude, précision et spécialisation :

- les hypothèses qui simplifient (simplificatrices), qui induisent une réduction du nombre d'éléments structurants et contribuent donc à augmenter la parcimonie du modèle, mais en en diminuant l'exactitude. A titre d'exemple, considérer une température uniforme va constituer une hypothèse simplificatrice,
- les hypothèses qui spécialisent (spécialisantes), qui impliquent une limitation supplémentaire de l'espace d'utilisation du modèle. Elles contribuent donc à en diminuer la généralité d'utilisation. Considérer un écoulement comme laminaire va spécialiser le modèle qui en découle,
- les hypothèses qui induisent une augmentation du caractère flou de certaines informations fournies par le modèle (fuzzyfiantes), qui contribuent à en diminuer la précision.

Ces hypothèses sont toutes liées à des connaissances relatives à des critères techniques, physiques ou associés au contexte de l'étude (comportement, forme, domaine de validité), et facilitent la modélisation du système. Ce sont donc, au sens de Poincaré [Poi03], des hypothèses de généralisation. Elles vont être vérifiées par l'expérience et ne sont jamais dangereuses, dans le cadre de notre démarche de formalisation des modèles, puisqu'elles sont nécessairement définies.

Nous avons également identifié, au cours de nos travaux, d'autres catégories d'hypothèses exploitables pour la formulation et la qualification des modèles, qui interviennent à un niveau plus bas de choix des hypothèses :

- les hypothèses de validité, relatives au domaine de validité du modèle associé. Elles sont spécialisantes puisqu'elles restreignent le domaine d'utilisation du modèle,
- les hypothèses géométriques, relatives à la géométrie d'un élément (taille, forme, échelle). Ces hypothèses sont nécessairement spécialisantes, puisqu'elles restreignent l'application du modèle associé à la géométrie considérée. Elles peuvent également être simplificatrices, dans le sens où le choix d'une géométrie peut réduire le nombre de caractéristiques structurantes,
- les hypothèses topologiques, relatives à l'agencement au sein d'un élément (réseaux, circulations), qui sont considérées comme spécialisantes,
- les hypothèses cinématiques, relatives au mouvement de l'élément considéré, qui sont spécialisantes et peuvent également être simplificatrices,
- les hypothèses de frontières, relatives aux frontières de l'élément considéré (conditions initiales et finales, système isolé, fermé ou ouvert), qui sont spécialisantes et parfois, simplificatrices,
- les hypothèses d'état, qui sont relatives à l'état et/ou aux variables d'état associées à l'élément considéré (température, pression). Ce sont des hypothèses qui sont spécialisantes et peuvent aussi être simplificatrices ou fuzzyfiantes.

Sur cet ensemble d'hypothèses identifiées, nous proposons une hiérarchisation basée sur la notion d'héritage entre hypothèses. Cette hiérarchisation se fait sur la base du rôle que celles-ci vont avoir sur l'opération de modélisation, ainsi que sur leur nature. La figure 2.6 présente la notion d'héritage appliquée aux hypothèses présentées précédemment. Cet héritage ne se fait pas de manière linéaire, puisqu'une sous classe d'hypothèses peut réunir les caractéristiques de deux (ou plus) classes antérieures.

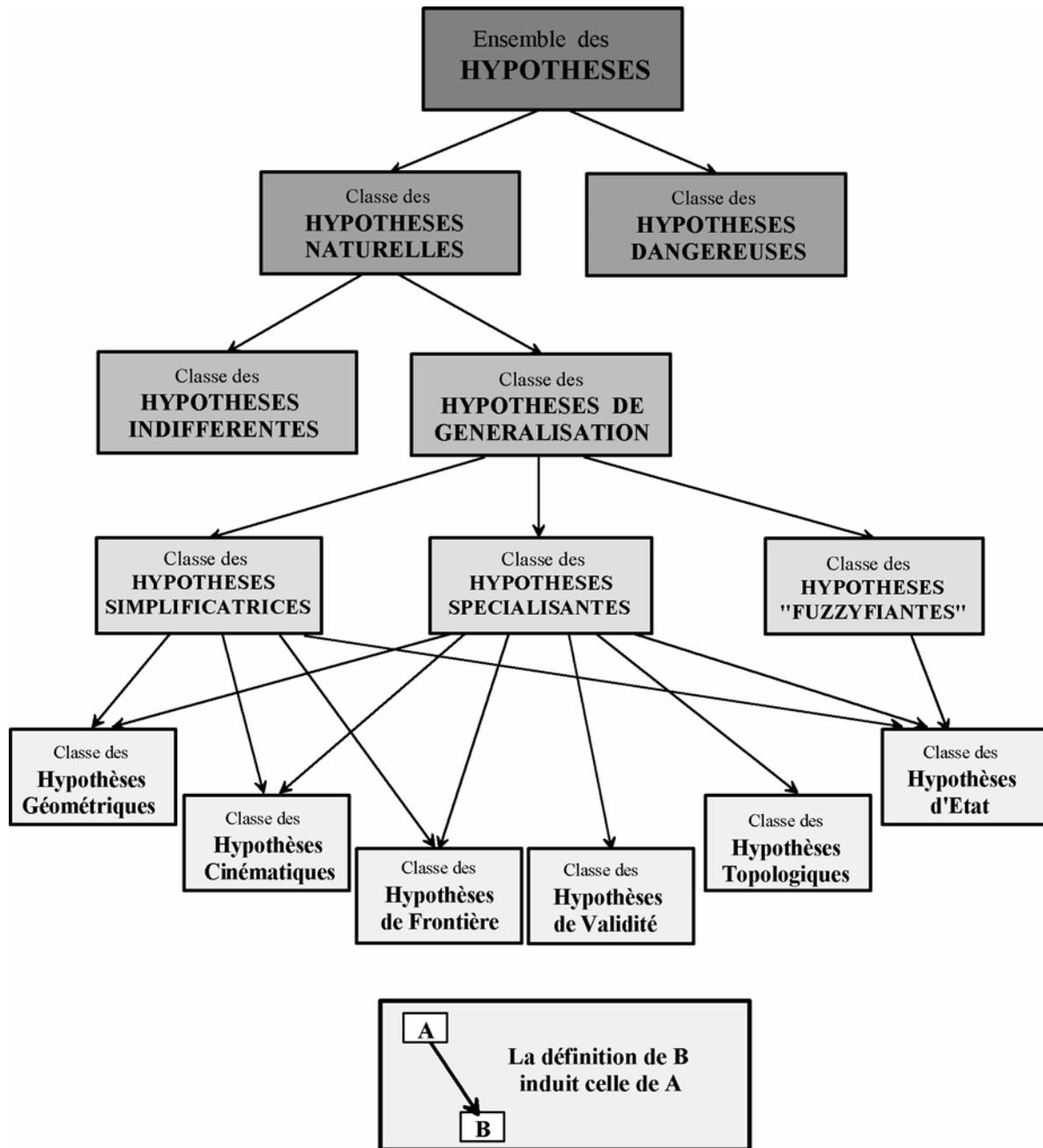


Figure 2.6. Illustration de la notion d'héritage entre hypothèses.

*L'énumération des hypothèses relatives à un modèle pose un problème d'exhaustivité. Nous pallions ce problème en exploitant la notion d'héritage entre hypothèses : la définition d'une hypothèse de classe  $i$  induit celle des hypothèses des classes hiérarchiquement supérieures qui lui sont liées.*

## **2-4 TRAITEMENT ET RESOLUTION DU PROBLEME DE CONCEPTION**

A ce stade de la démarche (cf. Figure 2.1), les modèles de conception architecturale sont écrits sous forme de Problème de Satisfaction de Contraintes (PSC). Il convient alors de les résoudre afin d'aboutir à des solutions de conception. La résolution des PSC se fait par le biais de solveurs PSC numériques. Ces solveurs sont des programmes ou logiciels informatiques utilisant des méthodes de raisonnement pour faire des déductions logiques à partir d'une base de connaissances (ensemble d'équations), dans le but de proposer des solutions au problème posé. Ils intègrent des variables qui peuvent être continues (variables réelles dont le domaine de valeur est un intervalle) ou discrètes (nombres entiers, variables symboliques). Des précisions sur les algorithmes mathématiques permettant la résolution d'un PSC numérique, et sur les processus de propagation des contraintes et de restriction des domaines sont disponibles dans les travaux de Lhomme [Lho93], Cleary [Cle87] et Granvilliers [Gra00]. Nous présentons ici le solveur PSC numérique associé à notre démarche, ainsi que les techniques de résolution du problème de conception.

### **2-4.1 Le solveur "Constraint Explorer".**

Le solveur PSC numérique que nous utilisons, *Constraint Explorer (CE)* [Zim04], est développé par la société Dassault Aviation [Zab01]. Sa mise au point a été initiée dans le cadre du projet RNTL\* Conception par Contraintes [Zim01], en collaboration avec le laboratoire TREFLE des laboratoires d'intelligence artificielle de Paris (LIP6), de Nantes (LINA) et de Bayonne (LIPSI-ESTIA), afin d'en faire un outil d'aide à la décision en conception préliminaire.

Ce solveur est basé sur l'arithmétique des intervalles [Jau01, Ben97]. Dans le cas de variables discrètes, il détermine des sous-domaines de valeurs pour les variables dans lesquels une solution au problème de conception existe, sachant que toutes les valeurs de ces sous-domaines ne sont pas forcément solutions. Dans le cas de variables continues, la valeur de la variable correspondant à une solution est un sous-domaine dont la taille est conditionnée par la précision de la résolution souhaitée.

Ainsi, les solutions définies par le solveur sont des restrictions sur les domaines de valeurs des

---

\* RNTL : Réseau National des Technologies Logicielles.

variables qui satisfont à toutes les contraintes. La résolution se faisant par une exploration complète et séquentielle de l'espace de définition, toutes les solutions du problème font partie des restrictions des domaines proposées.

### **2-4.2 Limitations liées au formalisme de Problème de Satisfaction de Contraintes.**

Les PSC permettent de traiter des connaissances de natures diverses et leur résolution par le biais de solveurs PSC aboutit à un espace de solution complet. Néanmoins les performances des solveurs PSC sont limitées par certaines spécificités qu'il convient de noter :

- Spécificités liées aux solveurs PSC numériques :
  - le nombre de variables et de contraintes traitées est limité (de l'ordre de quelques centaines de variables fortement couplées).
  - il n'est pas possible d'intégrer des modèles dynamiques, au sens où l'actualisation des solutions en fonction du temps ne peut être effectuée.
- Spécificités liées à la syntaxe des contraintes :
  - les relations entre variables doivent être algébriques. Elles peuvent faire intervenir des fonctions transcendantes et des relations logiques.
  - les relations entre variables doivent être explicites, on ne peut pas faire intervenir d'équations intégro-différentielles, ni de code de simulation.

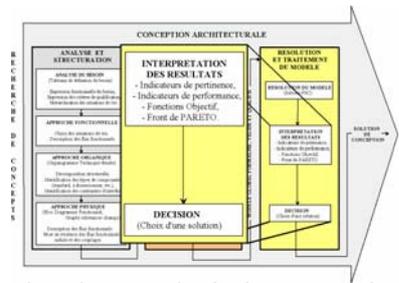
---

*Le modèle exprimé sous forme de contraintes est traité à l'aide d'un solveur de PSC numérique. Ce formalisme est bien adapté à la conception architecturale car il permet de traiter des données issues de domaines divers, mais il présente l'inconvénient de ne pas permettre le traitement de problèmes temporels.*

*Le solveur que nous utilisons, **Constraint Explorer (CE)**, développé par la société Dassault Aviation, explore l'espace des domaines de définition des variables de manière complète et séquentielle afin de définir des restrictions de domaines satisfaisant à toutes les contraintes. Ces restrictions de domaines contiennent nécessairement l'ensemble des solutions du problème.*

---

### 2-4.3 Exploitation du modèle.



L'exploitation du modèle fait suite à sa résolution par le solveur. Elle comprend l'interprétation des résultats auxquels il conduit, à savoir un tri parmi les solutions obtenues, et le choix d'une solution de conception. Elle se prépare donc dès la phase d'analyse et de structuration, dans laquelle les critères qui seront déterminants pour le choix d'une solution sont identifiés.

L'évaluation des solutions obtenues se fait à deux niveaux. Les solutions sont avant tout comparées entre elles, afin de ne retenir que les plus conformes au besoin. Cette comparaison se fait par le calcul d'**indices de qualité**, définis par :

$$IQ_i = \frac{Cr_i \times Fiabilité}{Coût} \quad (1)$$

où  $Cr_i$  représente le critère de qualification concerné, traduisant les performances du système.

Ces indices vont permettre d'évaluer :

- les performances principales à travers les critères de qualification identifiés pour les fonctions de services,
- la qualité de conception et de fabrication, à travers la fiabilité
- le critère économique, par le biais du coût.

Lorsque l'objectif du concepteur est d'éprouver la viabilité des solutions par rapport à une référence, les indices de qualité ne conviennent plus. Nous définissons alors des **indicateurs de performance**, qui traduisent la proximité ou l'éloignement des critères par rapport à une référence.

$$IP_i = \frac{Cr_i}{Cr_{réf}} \quad (2)$$

où  $Cr_i$  représente le critère de qualification du modèle, et  $Cr_{réf}$  celui qui sert de référence. Cette référence peut être fixe pour toutes les solutions (norme, limites de calcul accessibles par les codes de calculs professionnels, élément chiffré imposé par le client) ou relative à un indicateur (valeur minimale ou maximale de l'indicateur pour un ensemble de résultats), ce qui permet de comparer les solutions par rapport à cet indicateur.

Dans un contexte d'optimisation multi-objectifs, la comparaison relative des solutions de conception implique une pondération des indicateurs de performance afin de privilégier certaines solutions compte tenu des objectifs de conception.

Généralement, des **fonctions objectif** regroupant les indicateurs à prendre en compte, pondérés de facteurs dits de négociation, sont alors utilisées. Le problème de l'utilisation de ces fonctions objectif réside dans l'affectation de valeurs aux facteurs de négociation, qui se fait de manière arbitraire en fonction des préférences du concepteur, en adéquation avec le besoin.

La méthode du **front de Pareto** [Cor03] permet d'éviter ce problème de pondération. Elle consiste à déterminer l'ensemble des solutions qui ne sont pas meilleures les unes par rapport aux autres, relativement à un indicateur de performance, parmi tout l'espace des solutions identifié par le solveur.

L'espace des solutions est constitué de  $n$  dimensions,  $n$  étant le nombre d'indicateurs de performances. Chaque solution est représentée dans cet espace, par un point dont les coordonnées correspondent aux valeurs des indicateurs de performances. Une solution sera alors considérée comme dominante sur une autre si elle n'est pas moins bonne que celle-ci pour tous les critères définis, et si elle est strictement meilleure que celle-ci pour au moins un de ces critères.

L'ensemble des solutions non dominées, ou Front de Pareto, regroupe les solutions qui réalisent le mieux les objectifs de conception et parmi lesquelles aucune ne se distingue des autres au regard de la satisfaction de ces objectifs. Le choix parmi cet ensemble est ainsi facilité.

---

*L'exploitation du modèle correspond à l'interprétation des résultats obtenus et au choix de la solution optimale, parmi l'ensemble des solutions du modèle. Ce choix se fait par rapport aux exigences exprimées dans le cahier des charges, par le biais des indices de qualité, mais aussi compte tenu des exigences du concepteur, à travers les indicateurs de performances.*

*Ces indicateurs de performance traduisent la proximité ou l'éloignement des critères par rapport à une référence et permettent ainsi de comparer différentes solutions entre elles.*

*L'utilisation de la méthode du front de Pareto permet de mettre en évidence l'ensemble de solutions qui réalisent le mieux les objectifs de conception et qui sont équivalentes compte tenu de ces objectifs. Le choix définitif peut ainsi se faire plus facilement.*

---

## 2-5 SYNTHÈSE DE LA DEMARCHE

Nous avons présenté ici la démarche de conception architecturale que nous avons adoptée au cours de nos travaux. Elle regroupe trois phases principales :

- l'analyse et la structuration du problème de conception, qui livre les caractéristiques structurantes du problème de conception architecturale. Ces caractéristiques peuvent être de différentes natures (fonctions, critères de pertinence, comportement physiques, etc.), et une même caractéristique peut se retrouver plusieurs fois au cours des étapes,
- la formalisation des modèles, qui permet, par le biais de l'expression des modèles de composants et des modèles d'interactions, d'obtenir un modèle global pour le système à concevoir. Ce modèle, exprimé sous forme de Problème de Satisfaction de contraintes, est validé de manière intrinsèque et en adéquation avec l'outil de traitement, et qualifié par rapport au besoin,
- la résolution et le traitement du modèle global, qui permet de faire un tri parmi les solutions obtenues, afin de choisir la solution optimale qui sera détaillée par la suite.

Les figures 2.7 et 2.8 résument les phases d'analyse et de structuration et de formalisation des modèles.

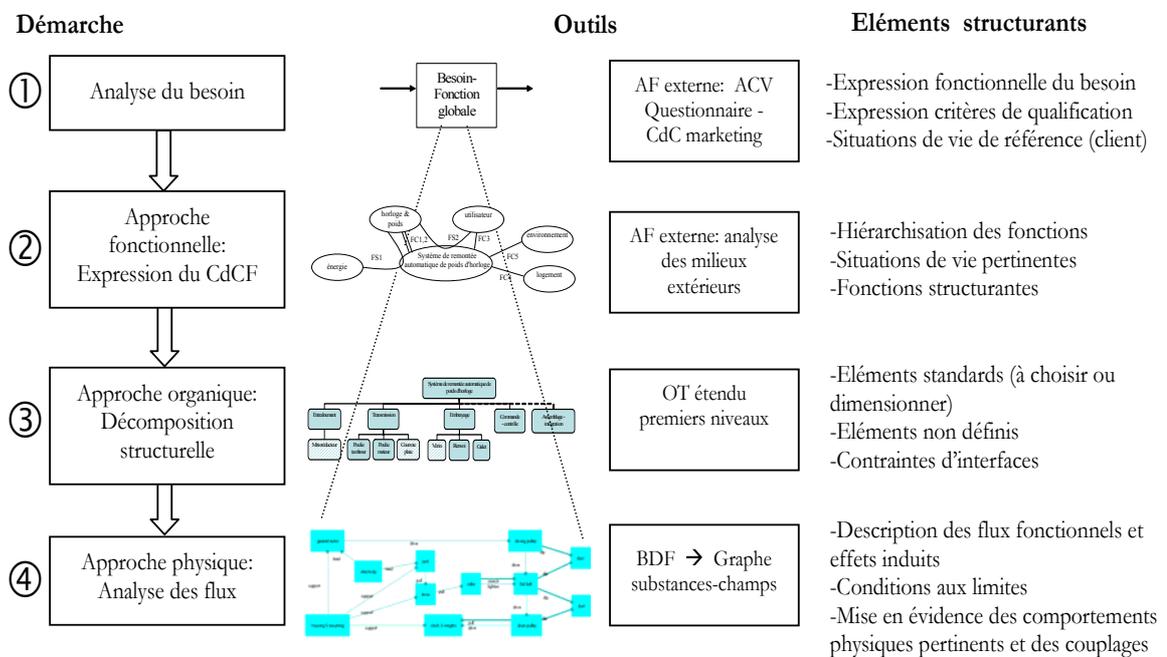


Figure 2.7. Etapes, outils associés et caractéristiques structurantes identifiés pendant la phase d'analyse et structuration [Sca04a].

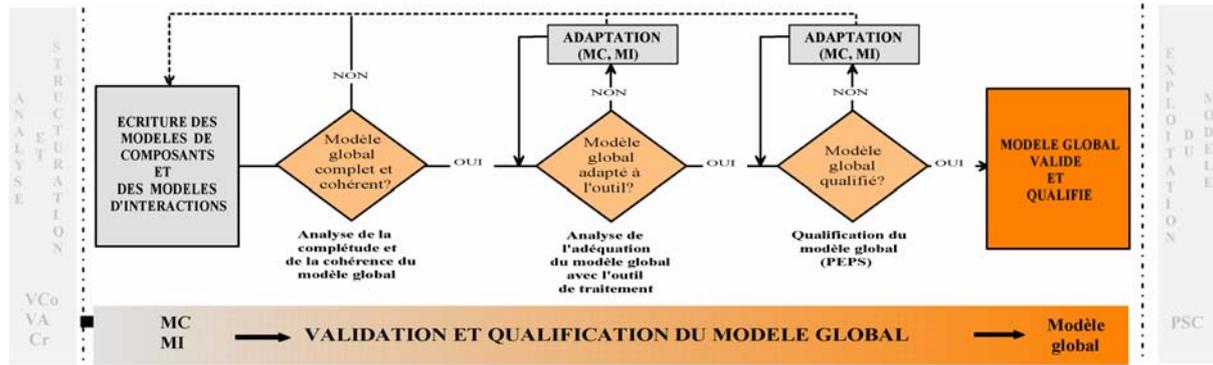


Figure 2.8. Formalisation d'un modèle global de conception sous forme de contraintes.

Les projets actuels de conception s'appuient sur le concept d'ingénierie collaborative, dans le but de fluidifier la communication entre les partenaires du projet et de modifier la relation entre client et fournisseur.

Dans la pratique, notre démarche n'échappe pas à cette règle. Bien que présentée ici de façon linéaire, il existe en fait une communication à double sens entre les trois grandes phases présentées ici. En effet, la nécessité d'adaptation d'un modèle de composant ou d'un modèle d'interaction au cours de la formalisation peut conduire à reprendre, en partie ou entièrement, l'analyse et la structuration du problème. De même, le traitement des résultats obtenus à l'aide du modèle peut conduire à repenser sa formulation, voire même l'analyse et la structuration du problème afin d'en améliorer la conception.

L'avantage de cette démarche est qu'elle permet l'intégration de nouvelles connaissances au sein du modèle, en fonction de l'évolution du projet. Les modèles issus de cette démarche sont donc facilement réutilisables.

---

---

## **CHAPITRE 3**

---

---

# **ANALYSE, STRUCTURATION ET FORMALISATION DES MODELES D'EVAPORATEURS FLASH BI- ETAGES**



### 3-1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1, l'évaporation flash est la conséquence d'une forte dépression appliquée à un fluide. Pour des raisons d'économies d'énergie, la plupart des procédés actuels utilisant l'évaporation flash se font sous vide d'air et sur plusieurs étages, pour abaisser la pression de saturation du fluide et permettre une réutilisation de la chaleur dégagée par l'évaporation.

Notre travail porte sur un procédé bi-étagé d'évaporation flash sous vide, mis au point au sein du laboratoire TREFLE [Tre04a], dans un contexte de refroidissement de la vendange. L'objectif était alors d'améliorer les performances d'un système existant en terme de compacité et de consommation énergétique.

Les tous premiers travaux, réalisés sur un pilote expérimental mono-étagé, avaient permis une compréhension du phénomène d'évaporation flash et la validation du concept d'une chambre de détente à deux étages. En effet, le fait de séparer la chambre de détente en deux étages permet de diminuer l'écart entre les températures d'entrée et de sortie du fluide traité, et donc de diminuer la différence de pression à ces endroits. La taille des gouttes créées dans la chambre étant inversement proportionnelle à la différence de pression entre son entrée et sa sortie, la taille des gouttes formées lors du flash est ainsi augmentée, ce qui facilite leur récupération. D'autre part, le fait que les écarts de températures soient moindres permet d'augmenter la densité de la vapeur, et donc de réduire le volume des étages de détente et des condenseurs en aval, d'où une réduction de la taille globale du système.

Ce constat a permis d'aboutir à un concept de d'évaporateurs flash bi-étagés sous vide, pour lequel aucun modèle exploitable par le solveur par Satisfaction de Contrainte que nous utilisons, *Constraint Explorer*, n'est disponible dans la littérature.

Nous présentons, ici, l'application de la démarche présentée au chapitre précédent à ce concept d'évaporateurs flash, afin d'aboutir à un outil d'aide à la décision en conception préliminaire de ces procédés.

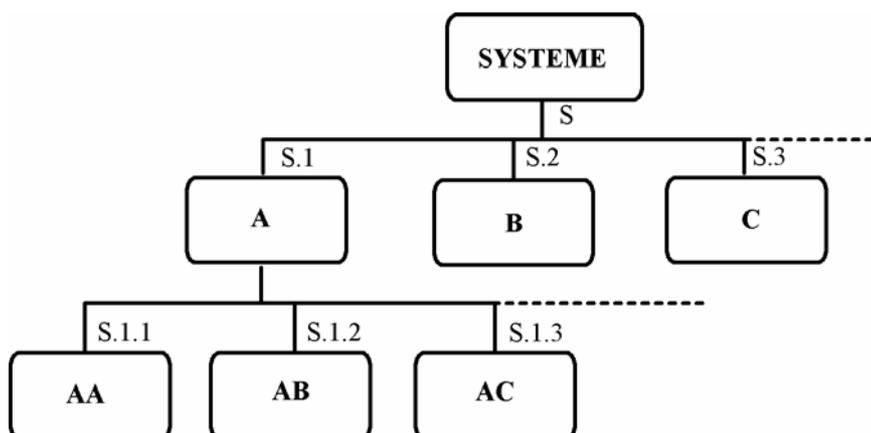
## 3-2 MISE EN ŒUVRE DE LA DEMARCHE

### 3-2.1 Algorithme de mise en œuvre.

Comme nous l'avons montré précédemment, l'Organigramme Technique étendu (OTé) permet de structurer le système à concevoir en un ensemble de composants reliés entre eux par des éléments d'interactions. Cet outil de représentation servira donc de base à l'élaboration du système documentaire de gestion des différents modèles de composants et d'interactions associés aux procédés.

Au niveau zéro de l'OTé, le système à concevoir est repéré par un code (lettre(s) et/ou chiffre(s)). A chaque niveau inférieur, les composants sont numérotés de 1 à  $n$  par ordre d'apparition, de gauche à droite. Chaque modèle de composant (MC), relatif à un bloc fonctionnel de l'OTé, sera repéré dans le système de gestion des modèles par une référence correspondant au numéro du bloc fonctionnel auquel il est associé. Les modèles d'interaction (MI), traduisant les interactions entre les blocs fonctionnels de l'OTé, seront répertoriés en utilisant les numéros des blocs concernés, séparés par une barre transversale.

A titre d'exemple, sur la figure 3.1, le MC du composant AA sera répertorié sous la référence S.1.1, et le MI traduisant l'interaction entre les composants AB et AC sera répertoriés par S.1.2/S.1.3.



**Figure 3.1.** Numérotation des composants dans un Organigramme Technique étendu.

Cet algorithme de mise en œuvre permet ainsi de répertorier les différents modèles de composants et d'interaction composant le modèle global en fiches appelées "fiches modèles".

### 3-2.2 Organisation des fiches modèles.

Les fiches modèles sont répertoriées comme les modèles eux-mêmes, c'est-à-dire à partir du numéro du composant ou de l'interaction dont ils sont les référents. Elles se présentent sous la forme d'un tableau présentant le niveau de modélisation, les variables mises en jeu, leur nature (VCo, VA, Cr), la nature du modèle (MC ou MI), les relations entre les variables, l'évaluation du PEPS relatif au modèle ainsi que la position du composant dans l'organigramme technique étendu.

La figure 3.2 propose une représentation de la structuration de ces fiches modèles.

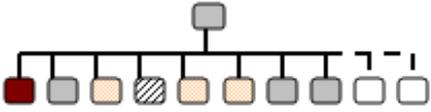
Niveau (de modélisation)	Référence du modèle	Nom du composant		
Vco	Cr	VA	Nature du modèle (MC ou MI)	
			Flux 1	Relation 1
			Flux 2	Relation 2
			Flux 3	Relation 3
			Flux 4	Relation 4
			Flux 5	Relation 5
<p><b>P</b> Faible → Forte</p> <p><b>E</b> Faible → Forte</p> <p><b>P</b> Faible → Forte</p> <p><b>S</b> Forte → Faible</p>				

Figure 3.2. Structuration des fiches modèles.

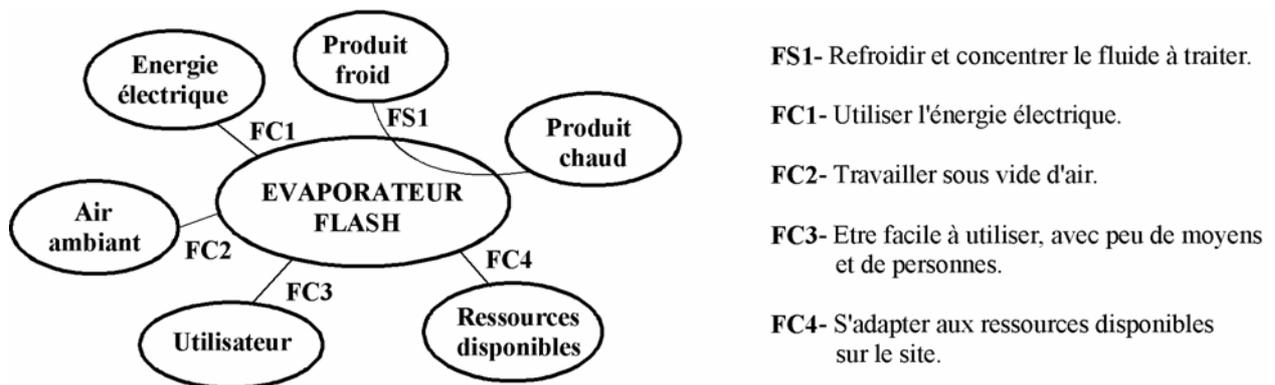
## 3-3 APPLICATION DE LA DEMARCHE AUX EVAPORATEURS FLASH BI-ETAGES

### 3-3.1 Principe de solution et Organigramme Technique étendu de premier niveau.

Quel que soit le système considéré, sa conception répond à un besoin exprimable par un certain nombre d'exigences. Dans le cas des évaporateurs flash, il s'agit de refroidir et de concentrer un fluide, en travaillant de façon continue et à des températures inférieures à 90 °C. Le système doit

être facile à utiliser, avec peu de moyens et de personnes, transportable par un camion et adaptable aux ressources disponibles sur site.

La traduction de ces besoins en fonctions, par le biais d'une analyse fonctionnelle externe, permet de mettre en évidence des fonctions de service (FS), qui vont permettre de les réaliser, et des fonctions contraintes (FC), qui sont imposées par les milieux extérieurs. La figure 3.3 présente le résultat de l'analyse fonctionnelle externe réalisée pour les évaporateurs flash, dans la Situation de Vie *Utilisation*.



**Figure 3.3.** Analyse fonctionnelle externe de la situation de vie *Utilisation* pour les évaporateurs flash.

L'analyse fonctionnelle interne va permettre d'aboutir à un principe de solution et faire ressortir les premiers blocs fonctionnels du système à concevoir. La figure 3.4 présente l'exemple des blocs fonctionnels associés à la réalisation de la FS 1, dans la syntaxe FAST (Function Analysis System Technique).

Dans notre cas, le principe de solution qui a été retenu est le suivant : le refroidissement et la concentration du fluide sont réalisés simultanément dans une unité de détente. Pour permettre un fonctionnement en continu, les vapeurs formées lors du refroidissement sont traitées par le biais d'une unité de traitement des vapeurs. Afin d'optimiser le traitement de ces vapeurs, une unité de vide permet d'isoler le système de l'air extérieur. Le fonctionnement de l'ensemble est géré par une unité de commande.

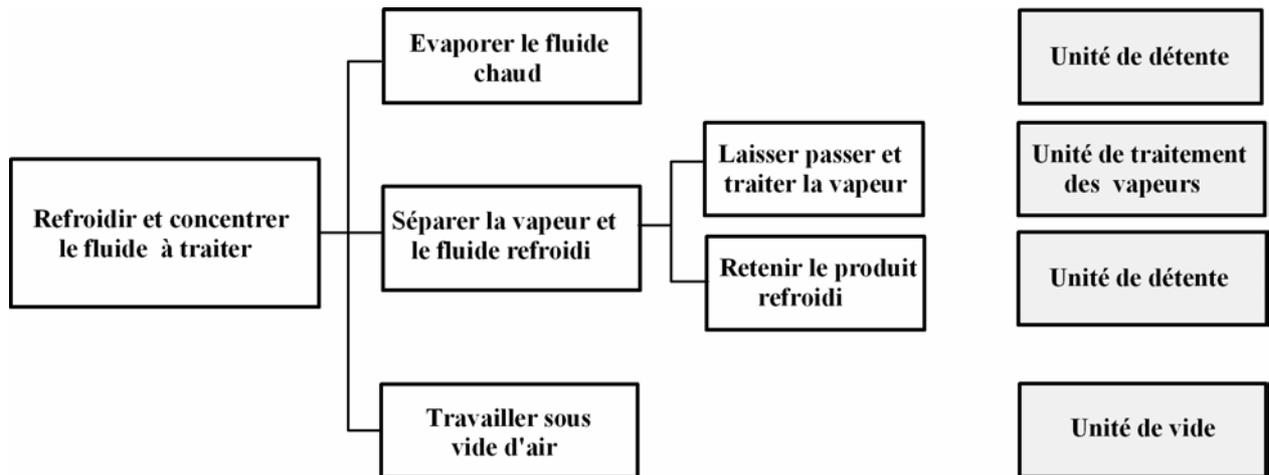


Figure 3.4. Réalisation de la fonction de Service 1 et blocs fonctionnels associés (syntaxe FAST).

Il est alors possible d'établir le premier niveau de l'OTé relatif à ce principe de solution, qui sera valable quelle que soit la configuration envisagée par la suite pour les blocs fonctionnels identifiés à ce niveau. Cet organigramme de niveau 1 est présenté à la figure 3.5.

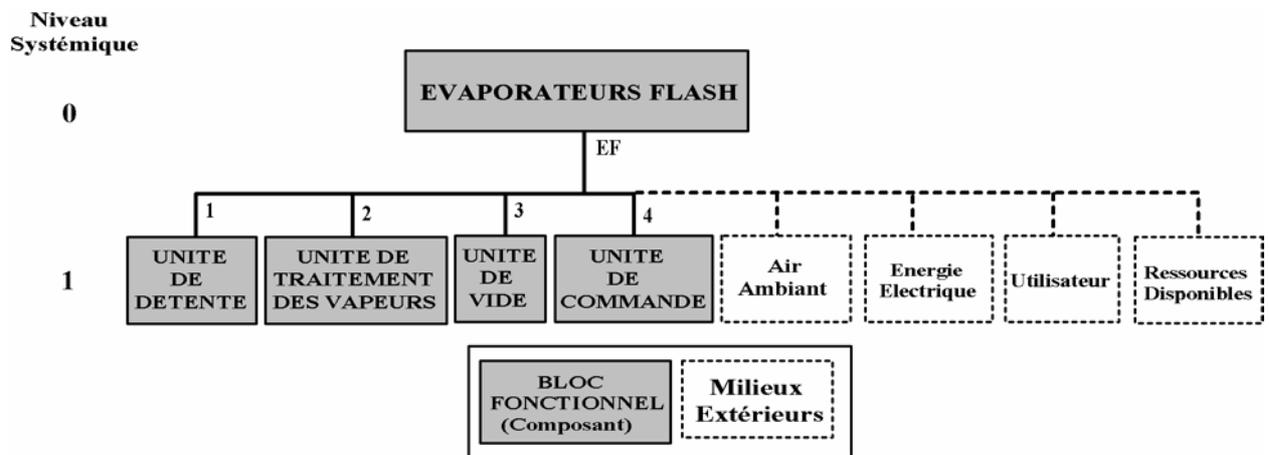


Figure 3.5. Organigramme Technique étendu de niveau 1 relatif aux évaporateurs flash.

Le fluide traité, préalablement chauffé, passe par une unité de détente où il subit la vaporisation. Les vapeurs formées sont traitées par le biais d'une unité de traitement des vapeurs, les éventuelles gouttes formées étant récupérées en amont. L'ensemble de l'enceinte est mis sous vide par le biais d'une unité de vide, qui doit permettre en outre l'évacuation des incondensables.

Ce principe de solution a conduit à trois architectures différentes, le pilote expérimental 2000, le pilote expérimental 2003 et un prototype industriel. Ces trois architectures ont été choisies sur la base de critères liés au besoin exprimé pour chaque unité identifiée.

### 3-3.2 Application au pilote 2000.

L'objectif du pilote 2000 ( $P_{00}$ ) était la mise en œuvre d'un dispositif expérimental permettant la mesure de paramètres jugés nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques liés au procédé d'évaporation flash bi-étagé. Le problème de conception est donc relativement simplifié, puisqu'un certain nombre de contraintes (fabrication, transport, coûts divers, critères environnementaux, etc.) ne sont pas considérées comme pertinentes pour la conception de ce système.

#### 3-3.2.1 Analyse du besoin.

A ce stade de la conception, l'OTé de premier niveau a déjà été établi. L'analyse du besoin a permis d'identifier des fonctions de service et des fonctions contraintes dont il va falloir évaluer la satisfaction. Le tableau 3.1 présente les critères relatifs à la satisfaction de la fonction principale, qui est de refroidir et concentrer le fluide de façon continue.

Compte tenu des objectifs attendus de la réalisation du pilote 2000, seuls les critères technologiques ont été considérés.

**Tableau 3.1.** Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse du besoin pour le pilote 2000.

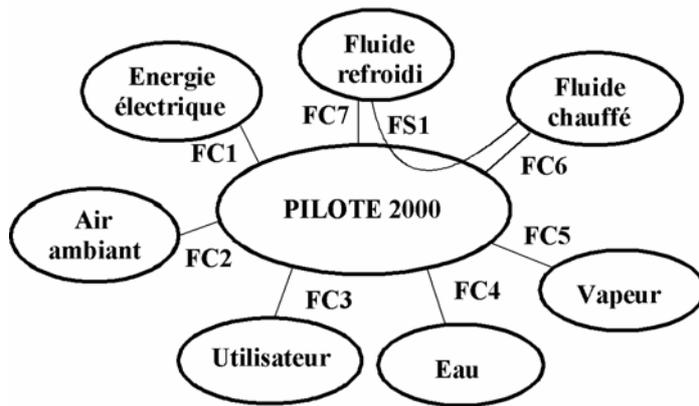
Critères Technologiques	Caractérisation	Evaluation quantitative	Evaluation qualitative
Performances attendues	Température initiale	$T_{pe} = [70;90] \text{ °C}$	-
	Température finale	$T_{ps} = 30 \text{ °C}$	-
	Taux d'évaporation	$x \in [0;7] \%$	-
	Débit minimum traité	$q_{pe} = 1 \text{ t/h}$	-

Pour les mêmes raisons, la seule situation de vie retenue comme structurante pour la conception est celle d'*Utilisation*.

#### 3-3.2.2 Approche fonctionnelle.

##### ➤ Approche fonctionnelle externe :

La figure 3.6 présente le diagramme relatif à l'analyse fonctionnelle externe du pilote 2000 pour la situation de vie *Utilisation*. Ce diagramme est basé sur une analyse du besoin exprimé, tenant compte des milieux extérieurs identifiés.



**FS1**- Refroidir et concentrer le fluide.

**FC1**- Utiliser l'énergie électrique.

**FC2**- Travailler sous vide d'air.

**FC3**- Etre facile à utiliser, avec peu de moyens et de personnes.

**FC4**- S'adapter aux caractéristiques de l'eau de refroidissement.

**FC5**- Traiter les vapeurs formées.

**FC6**- Chauffer et isoler le fluide chaud.

**FC7**- Isoler le fluide froid

**Figure 3.6.** Approche fonctionnelle externe de la situation de vie *Utilisation* pour le pilote 2000.

Les critères relatifs à la satisfaction des fonctions de service et de contraintes sont répertoriés dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2.** Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'approche fonctionnelle externe du pilote 2000.

Fonction	Critère(s)	Caractérisation	Evaluation quantitative	Evaluation qualitative
<b>FS1</b>	Performances attendues	Température finale Taux d'évaporation Débit moyen	$T_{ps} \in [25; 30] \text{ }^\circ\text{C}$ $x = f(Q_{pe}, T_{pe}, T_{ps})$ $q_{pe} \in [1; 1,5] \text{ t/h}$	-
<b>FC1</b>	Coût de possession	Consommation Energétique	$Co_{En} < 10 \text{ kWh}$	-
<b>FC2</b>	Performances attendues	Pression atmosphérique Pression requise	$P_{atm} \in [1000; 1090] \text{ mbar}$ $P_0 \in [25; 150] \text{ mbar}$	-
<b>FC4</b>	Caractéristiques de l'eau	Débit Température d'entrée	$q_{lr} \in [25; 30] \text{ L/min}$ $T_{lr} \in [10; 30] \text{ }^\circ\text{C}$	-
<b>FC5</b>	Caractéristiques de la vapeur formée	Débit moyen de vapeur Titre de la vapeur formée Température de la vapeur	$q_v$ $X_v \in [0,5; 1]$ $T_v \in [30; 50] \text{ }^\circ\text{C}$	-
<b>FC6</b>	Quantité de fluide chaud	Température de chauffe Volume de fluide chaud	$T_{pe} \in [60; 90] \text{ }^\circ\text{C}$ $V_{fc} \in [0; 200] \text{ L}$	-
<b>FC7</b>	Quantité de fluide froid	Volume de fluide froid	$V_{ff} \in [0; 200] \text{ L}$	-

➤ Approche fonctionnelle interne :

Dans le cas du pilote 2000, l'approche fonctionnelle interne va porter sur l'analyse du besoin relatif aux unités identifiées, afin de descendre dans l'organigramme technique. La figure 3.7 présente l'exemple des blocs fonctionnels associés à la réalisation de la FS1 et des FC5, 6 et 7, dans la syntaxe FAST (Function Analysis System Technique).

Cette analyse permet d'identifier un certain nombre d'éléments à intégrer au système, comme des condenseurs de vapeurs, et des enceintes pour le stockage du fluide chaud et du fluide froid. Elle permet également de mettre en évidence d'autres fonctions de type plus techniques, comme l'élimination des incondensables.

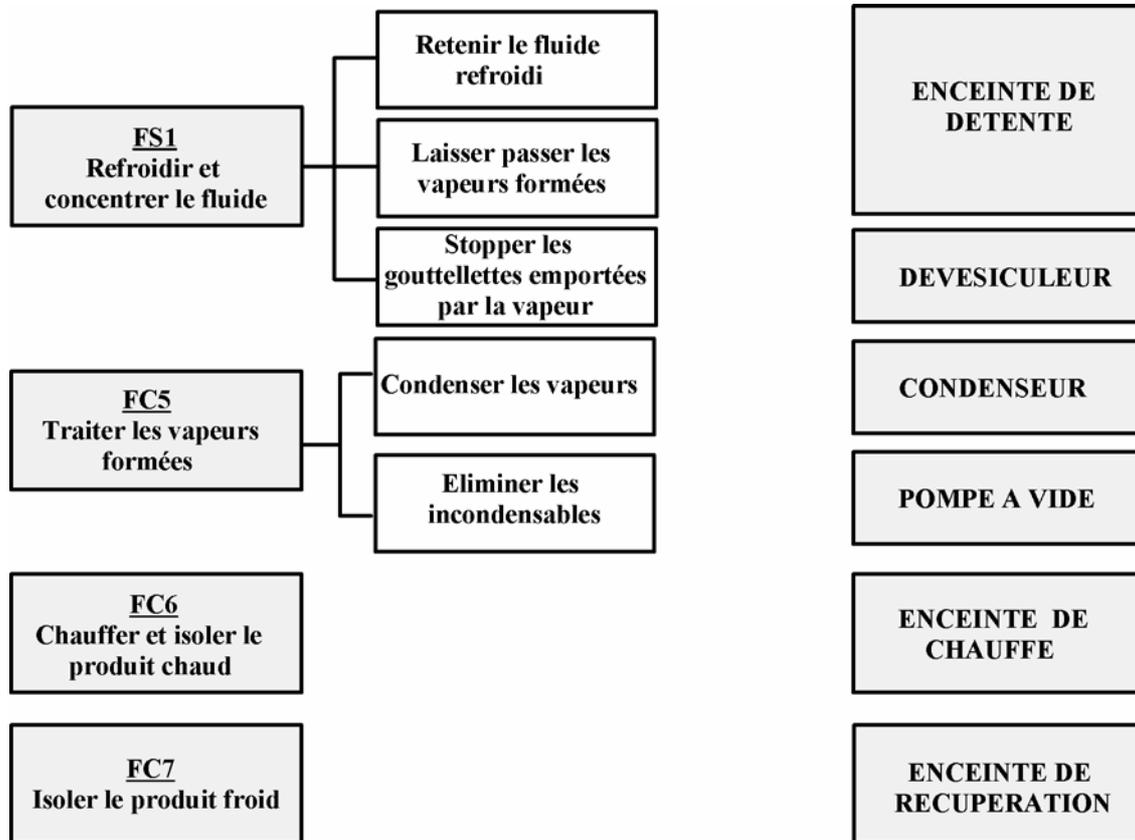


Figure 3.7. Réalisation des fonctions FS1, FC5, FC6, FC7 et blocs fonctionnels associées (syntaxe FAST).

### 3-3.2.3 Approche organique.

L'objectif du pilote 2000 étant d'aider à la compréhension du fonctionnement bi-étagé d'un évaporateur flash, l'enceinte de détente identifiés lors de l'analyse fonctionnelle devra être divisée en deux étages. Le traitement des vapeurs doit donc se faire pour chacun de ces étages.

Afin de permettre l'élimination des incondensables, le choix de la pompe à vide s'est porté sur une pompe à anneau liquide couplée à un éjecteur, afin d'en limiter le risque de cavitation [Bou03]. D'autre part, la nécessité de chauffer le produit en amont pour les essais a conduit à l'ajout d'une cuve de chauffe dans l'unité de détente. La figure 3.8 présente l'organigramme technique étendu de niveau 3 relatif au pilote 2000. Cet organigramme, présente les niveaux de décomposition correspondant aux concepts choisis pour les cuves de chauffe et de détente, le dévésiculeur, ainsi que pour les unités de condensation et de vide.

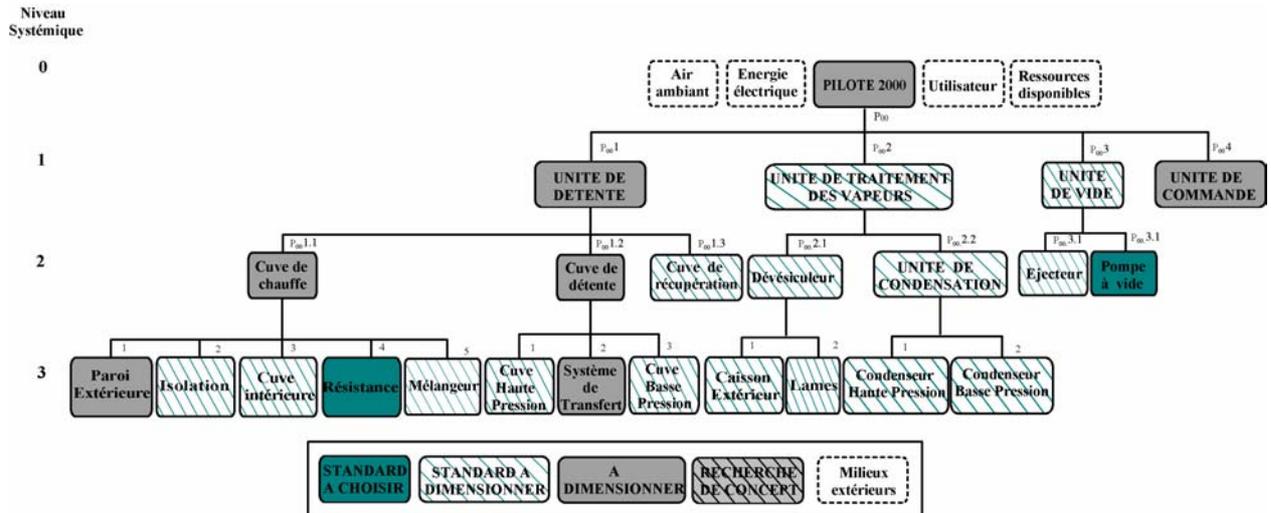


Figure 3.8. Organigramme Technique étendu de niveau 3 du pilote 2000.

3-3.2.4 Approche physique.

La figure 3.9 représente le bloc diagramme fonctionnel (BDF) correspondant à l'analyse physique du pilote 2000 jusqu'au niveau 3 de modélisation. L'unité de commande, pour laquelle aucune recherche de concept n'a été effectuée dans le cas du pilote 2000, n'est pas représentée dans ce diagramme.

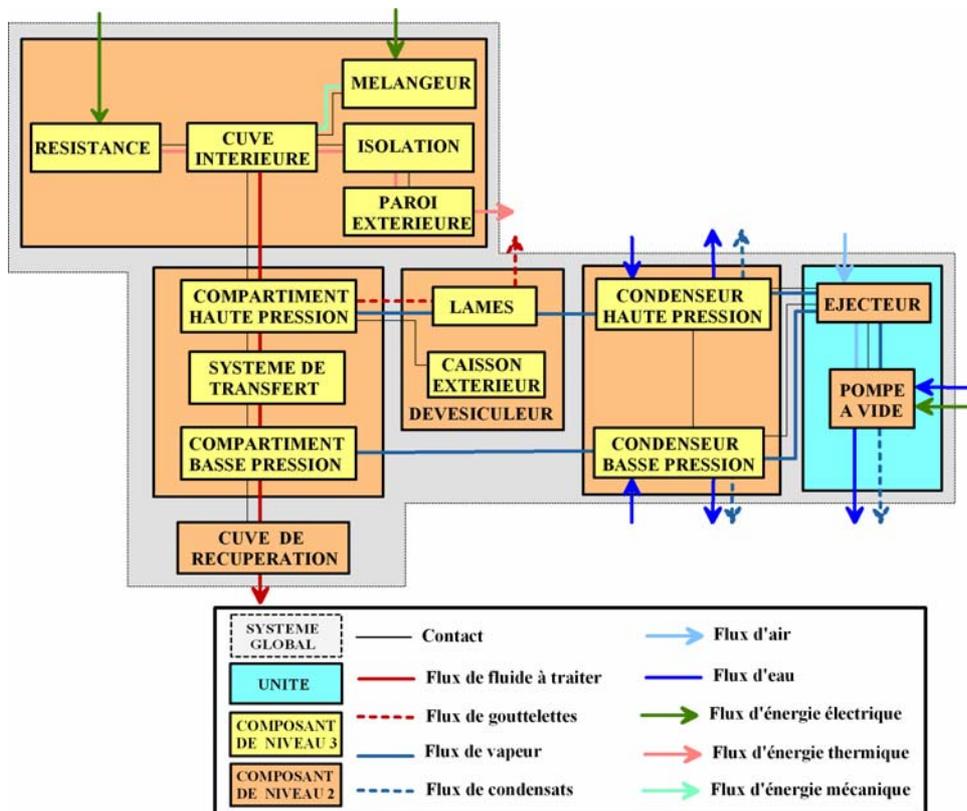


Figure 3.9. Bloc Diagramme Fonctionnel relatif au Pilote 2000.

Pour chaque flux identifié dans ce diagramme, il est possible d'associer une ou plusieurs fonctions, caractérisables par des verbes d'action, à partir desquelles les variables mises en jeu seront identifiées. Ces fonctions sont mises en évidence au travers du graphe substances-champs (GSC). La figure 3.10 présente le GSC relatif à l'unité de détente. Il a été établi en se basant sur l'analyse des flux fonctionnels identifiés dans le BDF.

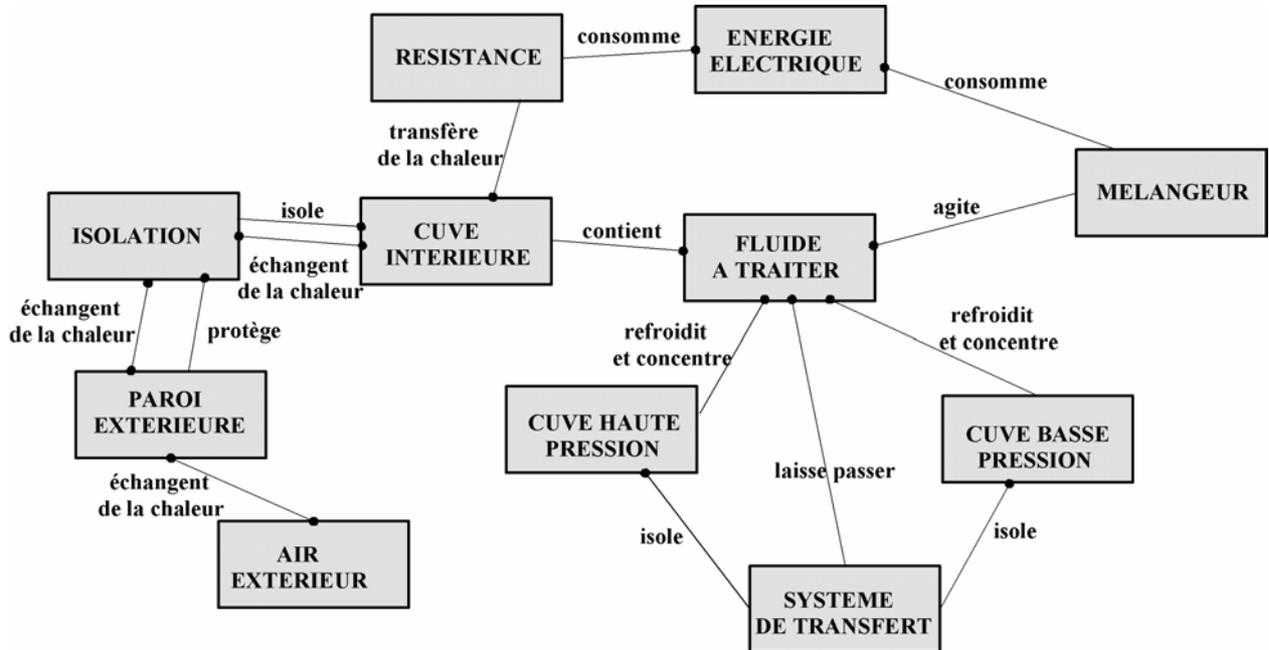


Figure 3.10. Graphe Substances-Champs relatif à l'unité de détente du pilote 2000.

Une fois les fonctions identifiées, il convient, comme dans le cas de l'analyse du besoin ou de l'approche fonctionnelle, de déterminer les variables pertinentes pour la satisfaction des fonctions.

Dans le cas des condenseurs de vapeur, l'analyse physique de niveau 3 ne permet pas d'aboutir à un modèle formalisable, étant donné que leur type n'est pas précisé. Il faut donc descendre au niveau inférieur, jusqu'à ce qu'une formalisation soit possible pour l'ensemble du système. La figure 3.11 présente l'OTé relatif au niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs.

De même que pour celui de niveau 3 (cf. Figure 3.8), cet organigramme technique étendu nous permet d'établir un bloc diagramme fonctionnel mettant en évidence les flux entre composants, et nous conduit donc à l'identification des fonctions et variables mises en jeu lors du fonctionnement de l'unité de traitement des vapeurs.

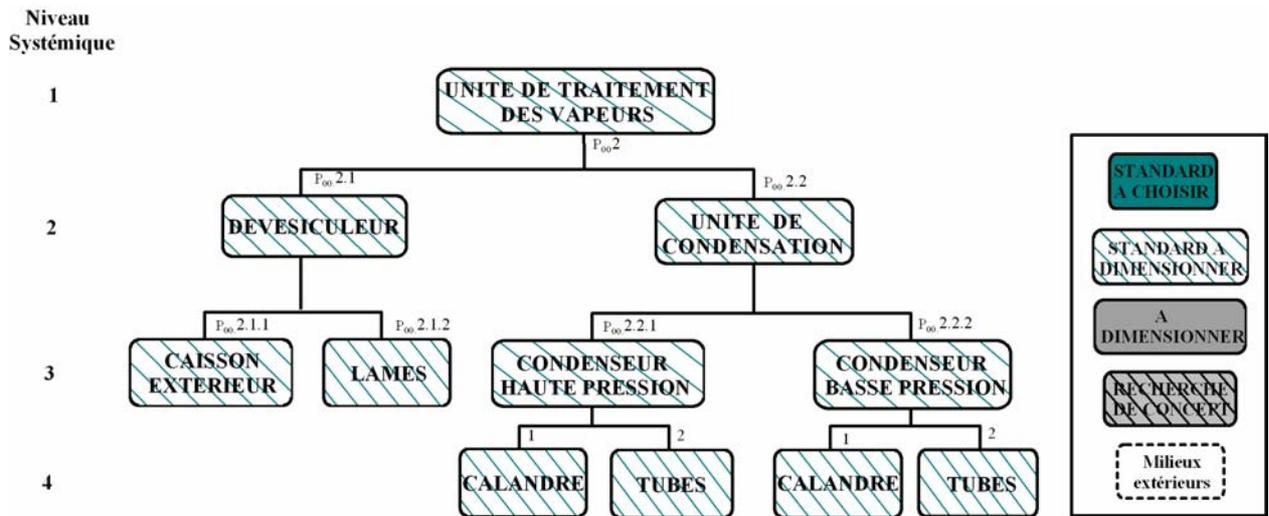


Figure 3.11. Organigramme Technique étendu de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs du pilote 2000.

Le tableau 3.3 résume les résultats de l'analyse physique réalisée pour l'ensemble des composants du pilote 2000, aux niveaux 3 et 4. Il regroupe les fonctions traduites par des verbes d'action, la nature des relations associées à ces fonctions et les variables mises en jeu, pour chaque composant.

Tableau 3.3. Relations et variables mises en jeu entre composants des différentes unités pour le pilote 2000.

Blocs Diagrammes Fonctionnels		⇒ Modèle physique		
Unité / Composant	Action	Composant(s)/Matière	Relation(s)	Variable(s) mises en jeu
Résistance	Consomme	Energie électrique	Loi de Joule	Puissance électrique consommée
	Transfère chaleur	Fluide à traiter	Conservation de l'énergie.	Température initiale du fluide Température de chauffe du fluide (finale) Capacité calorifique Masse de fluide
Isolation	Echange chaleur	Cuve intérieure	Flux conductifs de chaleur (Bilan énergétique)	Conductivités thermiques cuve/isolation Epaisseurs cuve/isolation Surface d'échange Températures cuve/isolation
	Echange chaleur	Paroi extérieure	Flux conductifs de chaleur (Bilan énergétique)	Conductivités thermiques isolation/paroi Epaisseurs isolation/paroi Surface d'échange Températures isolation/paroi
Paroi extérieure	Echange chaleur	Air extérieur	Flux convectif de chaleur et Rayonnement (Bilan)	Coefficient d'échange global de l'air Températures paroi/air Constante de Stefan-Boltzman Emissivité de l'air

			énergétique)	Surface d'échange
Mélangeur	agite	Fluide à traiter	Loi d'agitation	Nombre de Reynolds Nombre de Puissance Vitesse de rotation Caractéristiques géométriques (cuve/hélice) Puissance dissipée
	consomme	Energie électrique	Loi de Joule	Puissance électrique moteur
Cuve Haute Pression	refroidit	Fluide à traiter	Equation de Clapeyron	Pressions initiale et finale Températures initiale et finale
	extrait	Vapeur	Bilan énergétique	Températures initiale et finale Enthalpies initiale et finale Débit d'entrée du fluide Chaleur latente de vaporisation
Système de transfert (Flotteur)	isole	Cuves HP/BP	Egalité	Caractéristiques géométriques cuve HP et flotteur,
	Laisse passer	Fluide à traiter	Principe Fondamental de la Dynamique	Poids du flotteur Force de pression entre étages HP/BP Poussée d'Archimède
Compartiment BP	refroidit	Fluide à traiter	Equation de Clapeyron	Pressions initiale et finale Températures initiale et finale
	extrait	Vapeur	Bilan énergétique	Températures initiale et finale Enthalpies initiale et finale Débit d'entrée du fluide Chaleur latente de vaporisation
Dévésiculeur	arrête	Gouttelettes	Modélisation expérimentale	Débit et température de la vapeur Débit des gouttelettes recueillies
Condenseur Haute Pression	condense	Vapeur formée	Flux thermique	Débit de la vapeur Chaleur latente de vaporisation Titre de vapeur en entrée/sortie
Condenseur Haute Pression	réchauffe	Eau de refroidissement	Flux thermique	Débit de l'eau Températures d'entrée/sortie Capacité calorifique
Condenseur Basse Pression	condense	vapeur	Flux thermique	Débit de la vapeur Chaleur latente de vaporisation Titre de vapeur en entrée/sortie
Condenseur Basse Pression	Réchauffe	Eau de refroidissement	Flux thermique	Débit de l'eau Températures d'entrée/sortie Capacité calorifique
Pompe à vide +éjecteur	aspire	Eau	Courbe de fonctionnement constructeur Courbes constructeur, expériences	-
	aspire	Air extérieur		
	condense	Incondensables (air)		

L'identification de la nature des relations et des variables mises en jeu pour permet alors à la formulation des modèles physiques associés aux composants et aux interactions entre eux. Ces modèles sont présentés sous forme de fiches modèles, comme nous l'avons précisé au paragraphe 3-2.2. A titre d'exemple, le tableau 3.4 présente la fiche du modèle physique de niveau 3 adapté associé aux condenseurs du pilote 2000.

**Tableau 3.4.** Fiche modèle de niveau 3 adapté relative aux condenseurs haute et basse pression du pilote 2000.

Niveau 3	Réf. : P00.2.2.1 et P00.2.2.2		CONDENSEURS HAUTE ET BASSE PRESSION
VCo	Cr	VA	Modèle de composant
$x_{cdsr}$ $L_{cdsr}$ $n_{tubevert}$ $d_{ext}$	$k_{cd}$ $NUT_{lr}$ $\varepsilon$	$\Delta h_{evap}$	<b>Flux de vapeur :</b> $\varphi_v = q_v \cdot \Delta h_{evap} \cdot (X_{ve} - X_{vs}) \cdot \pi \cdot x_{cdsr} \cdot L_{cdsr}$
		$X_{ve}$	<b>Flux d'eau de refroidissement :</b> $\varphi_{lr} = q_{lr} \cdot Cp_{lr} \cdot (T_{lre} - T_{lrs}) \cdot \pi \cdot x_{cdsr} \cdot L_{cdsr}$
		$X_{vs}$	<b>Flux d'énergie thermique :</b> (Egalité entre les flux de vapeur et d'eau de refroidissement)
		$Cp_{lr}$	
		$\mu_{lr}$	$\ln\left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{lr}}\right) = NUT_{lr} \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{lr} = \frac{T_{lrs} - T_{lre}}{T_{v.sat} - T_{lre}} ; NUT_{lr} = \frac{k_{cd} \cdot \pi \cdot x_{cdsr} \cdot L_{cdsr}}{q_{lr} \cdot Cp_{lr}} \quad k_{cd} = \frac{h_{lr,cv} \cdot h_{v,cd}}{h_{lr,cv} + h_{c,vd}} \\ h_{lr,cv} = 1,86 \cdot \frac{\lambda_{lr}}{d_h} \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L_{cdsr}} \right)^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_{lr}}{\mu_{cdst}(T_{pl})} \right)^{0,14} \\ h_{v,cd} = B \cdot \left[ \frac{g \cdot (\rho_{v,liq} - \rho_{v,sat}) \cdot \rho_{v,liq} \cdot \lambda_{v,liq}^3 \cdot \Delta h_{evap}}{\mu_{v,liq} \cdot x_{cdsr} \cdot (T_{v,sat} - T_{ts})} \right]^{0,25} \\ -0,0005769 \cdot T_{ts} + 0,1133 > B > -0,0032 \cdot T_{ts} + 0,6264 \\ x_{cdsr} = n_{tube.vert} \cdot d_{ext} = \frac{2}{P} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot R}{2} \cdot d_{ext}} \end{array} \right.$
		$\mu_{cdst}$	
		$T_{lre}$	
		$T_{lrs}$	
		$T_{v.sat}$	
		$T_{ts}$	
		$\rho_{v.sat}$	
		$\rho_{v,liq}$	
		$\lambda_{v,liq}$	
		$P$	
		$R$	
		$g$	
		$Re$	
		$Pr$	
		$q_{cdst}$	
		$q_v$	
		$h_{lr,cv}$	
		$h_{v,cd}$	

<p><b>P</b> Faible  Forte</p> <p><b>E</b> Faible  Forte</p> <p><b>P</b> Faible  Forte</p> <p><b>S</b> Forte  Faible</p>	<p>Niveau</p>
---	---------------

### 3-3.2.5 Synthèse du cas du pilote 2000.

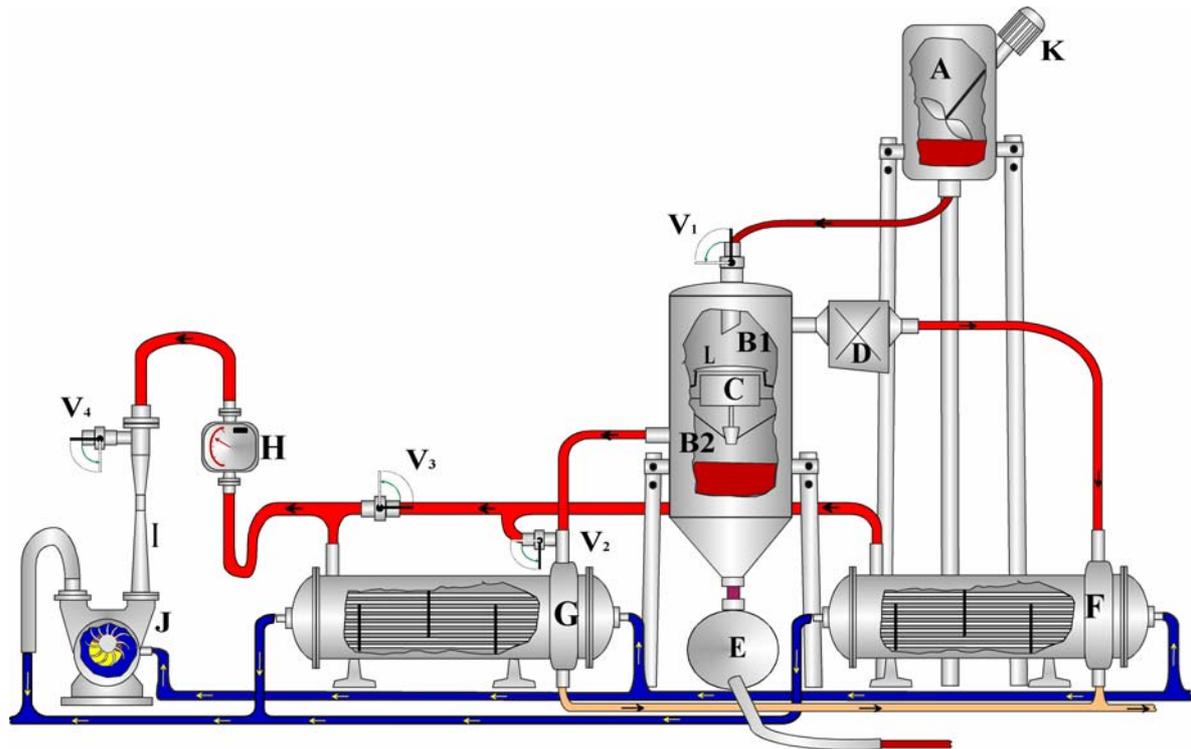
Dans le cas du pilote 2000, seuls les modèles associés au comportement physique du système ont été formalisés. Les résultats obtenus par cette démarche ont été validés par comparaison avec les résultats d'essais expérimentaux [Bou03], dans les conditions décrites ci-après.

La figure 3.12 présente un synoptique du pilote 2000 qui a servi aux essais. Le fluide à traiter est préalablement chauffé à une température comprise entre 70 et 90 °C dans la cuve de chauffe. L'homogénéité de la température est assurée par le mélangeur.

Une fois la température de chauffe atteinte, l'unité de vide est enclenchée, de manière à ce que la pression atteigne environ 25 mbar dans la cuve de détente.

La vanne d'alimentation est alors ouverte. Sous l'effet de la différence de pression, le fluide est aspiré dans l'étage Haute Pression (HP) de la cuve de détente, où il subit une première détente violente. Une partie de sa phase liquide se vaporise, entraînant un refroidissement de la partie non vaporisée à une température d'environ 40°C. La régulation du passage entre les deux étages est assurée par un flotteur. Au démarrage, le flotteur ferme complètement l'ouverture entre les deux étages. La part non vaporisée du fluide traité s'accumule au fond de la cuve haute pression jusqu'à atteindre un niveau qui, par l'action de la poussée d'Archimède, va soulever le flotteur. Le fluide accumulé va alors passer dans l'étage Basse Pression (BP) de la chambre de détente, où il subit une seconde détente, le ramenant presque instantanément à une température d'environ 30°C. La vapeur formée est aspirée, pour chaque étage, vers un condenseur à tubes et calandre. La partie non condensée est évacuée par le biais de la pompe à vide.

Lors de la détente, de nombreuses gouttelettes se forment et constituent un brouillard susceptible d'être emporté par la vapeur vers les condenseurs, ce qui provoquerait leur encrassement et dégraderait leurs performances. Dans l'étage HP, où la détente se fait de façon plus violente, la vitesse de la vapeur et la taille, plus faible, des gouttelettes sont telles qu'il est nécessaire d'avoir recours à un système de filtration.



- : Produit
- : Vapeur
- : Eau de refroidissement des condenseurs et d'approvisionnement de la pompe à vide
- : Condensats
- A : Cuve de chauffe du produit
- B : Chambre de détente, constituée de l'étage haute pression B1 et de l'étage basse pression B2
- C : Flotteur assurant la régulation du débit de produit entre les deux étages B1 et B2
- D : Dévésiculateur permettant la récupération des gouttelettes générées durant le flash
- E : Réservoir de récupération du produit traité
- F : Condenseur tubes et calandre de l'étage haute pression
- G : Condenseur tubes et calandre de l'étage basse pression
- H : Débitmètre à vapeur
- I : Ejecteur air / vapeur
- J : Pompe à vide à anneau liquide
- K : Mélangeur
- L : Chapeau protégeant le flotteur de la chute de produit à l'entrée de la cuve
- V<sub>1</sub> : Vanne d'alimentation
- V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> : Vannes de gestion du circuit de vapeur
- V<sub>4</sub> : Vanne de mise à l'air de l'éjecteur

**Figure 3.12.** Schéma du pilote 2000 de flash détente bi-étagé [Bou03].

Un des objectifs de la démarche utilisée est d'augmenter autant que possible la parcimonie des modèles obtenus. Cette amélioration passe par la réduction des interactions entre composants. Dans le cas du pilote 2000, l'analyse thermodynamique a montré la nécessité de réduire les pertes de charges en amont des condenseurs, donc les interactions, entre la cuve de détente et les condenseurs pour améliorer les performances du système. Ceci nous a conduit à la réalisation d'un second pilote expérimental, le pilote 2003.

### 3-3.3 Application au pilote 2003.

Le pilote 2003 (**P2003**) est une évolution du pilote 2000 visant à optimiser les performances et l'encombrement du système. L'objectif reste donc, ici, la mesure des paramètres pertinents pour la compréhension du comportement physique du système.

Des études antérieures [Seb02, Bou03] ont montré que les condenseurs constituent les éléments structurants du fonctionnement des évaporateurs flash, par l'effet de vide qu'ils créent en condensant les vapeurs. Cet effet de vide est moteur pour l'ensemble du système, car il conditionne l'intensité du phénomène de vaporisation et des transferts thermiques. L'efficacité de ces condenseurs va donc être déterminante pour les performances du système.

Notre choix s'est alors porté sur la technologie des condenseurs à plaques matelassées pour le traitement des vapeurs, afin d'améliorer le coefficient d'échange lors de leur condensation. Les condenseurs à tubes et calandre du pilote 2000 ont donc été remplacés par des condenseurs à plaques matelassées, plus efficaces et plus compacts, pour le pilote 2003.

#### 3-3.3.1 Analyse du besoin et approche fonctionnelle.

Les objectifs de conception du pilote 2003 restent les mêmes que ceux du pilote 2000, puisque les condenseurs, éléments moteurs du fonctionnement global, ont été modifiés. Il s'agit donc ici de mieux appréhender la relation entre fonctionnement et performances du système.

Les étapes d'analyse du besoin et d'approche fonctionnelle sont donc sensiblement les mêmes que dans le cas du pilote 2000. Les critères relatifs à la satisfaction des fonctions identifiées lors de ces deux étapes d'analyse sont résumés dans le tableau 3.5.

**Tableau 3.5.** Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse du besoin et l'approche fonctionnelle du pilote 2003.

Fonction	Critère(s)	Caractérisation	Evaluation quantitative
FS1	Performances attendues	Température finale Taux d'évaporation Débit moyen	$T_{ps} \in [25 ; 30]^\circ\text{C}$ $x = f(q_{pe}, T_{pe}, T_{ps})$ $q_{pe} \in [1 ; 1,5] \text{ t/h}$
FC1	Coût de possession	Consommation énergétique	$Co_{En} \leq 10 \text{ kWh}$
FC2	Performances attendues	Pressions atmosphérique et requise	$P_{atm} \# 1,014 \text{ bar} / P_{\theta} \# 0,025 \text{ bar}$
FC4	Disponibilité des ressources	Débit d'eau Température moyenne de l'eau	$q_{lr} \in [25 ; 30] \text{ L/min}$ $T_{lr} \in [10 ; 30]^\circ\text{C}$
FC5	Caractéristiques de la vapeur formée	Débit moyen de vapeur Titre de la vapeur formée Température de la vapeur	$q_v$ $X_v \in [0,5 ; 1]$ $T_v \in [30 ; 50]^\circ\text{C}$
FC6	Quantité de fluide chaud	Température / Volume	$T_{pe} \in [60 ; 90]^\circ\text{C} / V_{fc} \in [0 ; 200] \text{ L}$
FC7	Quantité de fluide froid	Volume	$V_{ff} \in [0 ; 200] \text{ L}$

### 3-3.3.2 Approche organique.

Comme dans le cas des étapes d'analyse du besoin et d'approche fonctionnelle, les premiers niveaux de l'OTé relatif au pilote 2003 sont identiques à celui du pilote 2000. Ainsi, l'OTé de niveau 3 du pilote 2003 est sensiblement identique à celui du pilote 2000 (cf. Figure 3.8).

La différenciation intervient au niveau 4 de l'OTé, puisque les condenseurs ont été modifiés. La figure 3.13 présente l'OTé de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs pour le pilote 2003.

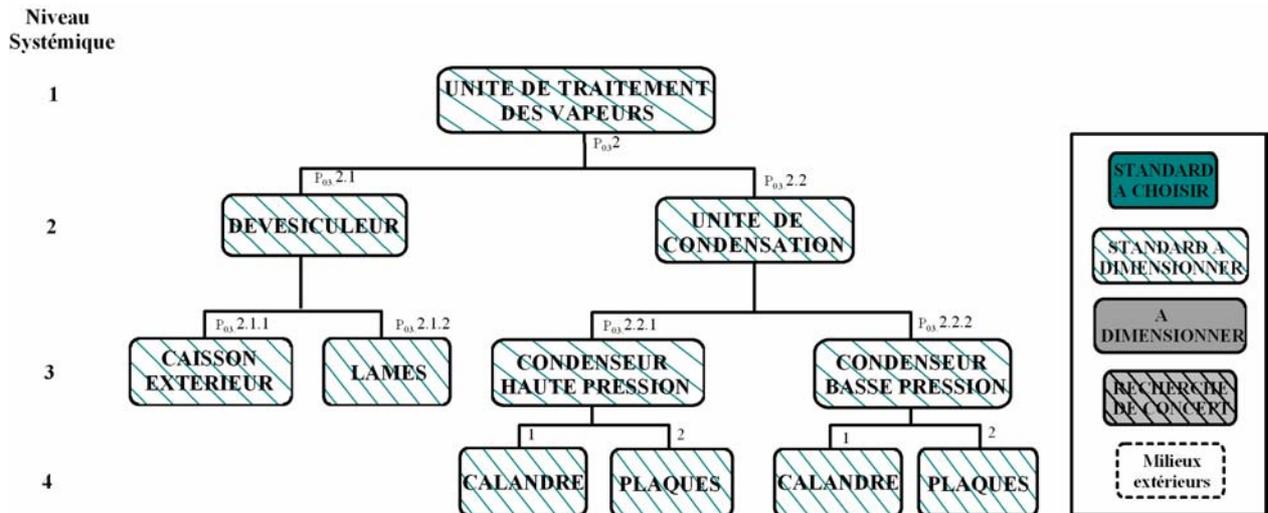


Figure 3.13. Organigramme Technique étendu de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs du pilote 2003.

### 3-3.3.3 Approche physique.

L'approche physique est, elle aussi, très proche de celle effectuée pour le pilote 2000. En effet, la seule différence entre les deux modèles réside dans la formulation du modèle des condenseurs. Le tableau récapitulatif des relations et variables mises en jeu dans le modèle physique du pilote 2000 (cf. Tableau 3.3) reste donc valable pour le pilote 2003. Seule la formulation des modèles des condenseurs mettent en jeu d'autres relations que celles proposées pour le pilote 2000.

Les tableaux 3.6 et 3.7 présentent les fiches modèles de niveau 3 adapté des condenseurs haute et basse pression du pilote 2003, respectivement.

La différence entre les deux modèles peut ainsi être observée par comparaison avec la fiche modèle présentée sur le tableau 3.4, pour les condenseurs du pilote 2000.

L'ensemble de OTé, BDF et GSC établis pour la formulation des modèles du pilote 2003 sont disponibles en annexe A.

**Tableau 3.6.** Fiche modèle de niveau 3 adapté relative au condenseur haute pression du pilote 2003.

Niveau 3	Réf. : P03.2.2.1		CONDENSEUR HAUTE PRESSION
VCo	Cr	VA	Modèle de composant
S-BFU 10/75- 2x6,5/1x12 (Références Fournisseurs)  $n_{HP}$ $A_{HP}$ $L_{pHP}$ $l_{plHP}$ $e_{plHP}$	$h_{v.cdHP}$ $\varepsilon_{lrHP}$ $NUT_{lrHP}$	$H_{lrHP}$	<b>Flux de vapeur :</b> $\varphi_{vHP} = q_{vHP} \cdot \Delta h_v(T_{vHP}) \cdot (X_{veHP} - X_{vsHP}) \cdot A_{HP}$ $q_{vHP} - q_{vsHP} - q_{cdstHP} = 0$
		$H_{vHP}$	<b>Flux d'eau de refroidissement :</b> $\varphi_{lrHP} = q_{lrHP} \cdot C_{p_{lrHP}} \cdot (T_{lrsHP} - T_{lreHP})$
		$l_{vHP}$	<b>Flux d'énergie thermique :</b> (Egalité entre les flux de vapeur et d'eau de refroidissement) $NUT_{lrHP} = \ln\left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{lrHP}}\right) = \frac{k_{cd.HP} \cdot A_{HP}}{q_{lrHP} \cdot C_{p_{lrHP}}}; \quad \varepsilon_{lrHP} = \frac{T_{lreHP} - T_{lrsHP}}{T_{lreHP} - T_{vHP}};$
		$q_{vHP}$	$\frac{1}{k_{cd.HP}} = \frac{1}{h_{lrHP}} + \frac{1}{h_{v.cd.HP}} \quad ; \quad A_{HP} = 2 \cdot n_{HP} \cdot L_{HP} \cdot (l_{lrHP} + e_{plHP})$
$q_{cdstHP}$	$q_{lrHP}$	$C_{p_{lrHP}}$	$h_{lrHP} = 0,031 \cdot G_{lrHP} \cdot C_{p_{lrHP}} \cdot Re_{lrHP}^{-0,2} \cdot Pr_{lrHP}^{2/3}$
$h_{lrHP}$	$C_{p_{lrHP}}$	$h_{lrHP}$	$h_{v.cdHP} = (0,000711 \cdot T_{vHP}^3 - 0,67517 \cdot T_{vHP}^2 + 213,73839 \cdot T_{vHP} - 22552,5)$
$C_{p_{lrHP}}$	$h_{lrHP}$	$h_{lrHP}$	$\times 1,47 \cdot \lambda_{cdstHP} \cdot Re_{cdstHP}^{-1/3} \cdot \left[ \frac{\mu_{cdstHP}^2}{\rho_{cdstHP} \cdot (\rho_{cdstHP} - \rho_{vHP}) \cdot g} \right]^{-1/3}$
$h_{lrHP}$	$\lambda_{cdstHP}$	$\rho_{cdstHP}$	<b>Flux de condensats :</b> $q_{cdstHP} = q_{vHP} (X_{veHP} - X_{vsHP})$ avec $X_{ve} = 1$ et $X_{vs} = \frac{q_{vHP}}{q_{vsHP}}$
$\lambda_{cdstHP}$	$\rho_{vHP}$	$\rho_{vHP}$	
$\rho_{cdstHP}$	$Re_{cdstHP}$	$Re_{cdstHP}$	
$\rho_{vHP}$	$\mu_{cdstHP}$	$\mu_{cdstHP}$	
$Re_{cdstHP}$	$g$	$g$	
$\mu_{cdstHP}$	$T_{lreHP}$	$T_{lreHP}$	
$g$	$T_{lrsHP}$	$T_{lrsHP}$	
$T_{lreHP}$	$T_{vHP}$	$T_{vHP}$	
$T_{lrsHP}$	$G_{lrHP}$	$G_{lrHP}$	
$T_{vHP}$	$Pr_{lrHP}$	$Pr_{lrHP}$	
$G_{lrHP}$	$k_{cdHP}$	$k_{cdHP}$	
$Pr_{lrHP}$			
$k_{cdHP}$			

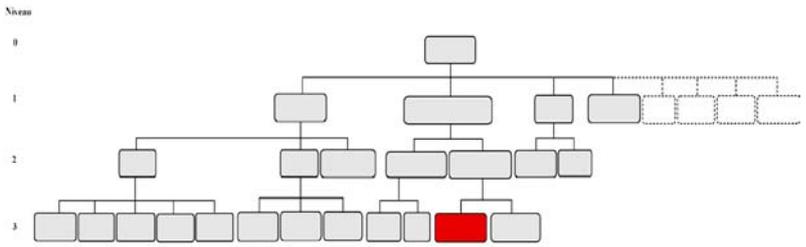
<b>P</b> Faible  Forte	
<b>E</b> Faible  Forte	
<b>P</b> Faible  Forte	
<b>S</b> Forte  Faible	

Tableau 3.7. Fiche modèle de niveau 3 adaptée relative au condenseur basse pression du pilote 2003.

Niveau 3	Réf. : P03.2.2.2		CONDENSEUR BASSE PRESSION
VCo	Cr	VA	Modèle de composant
S-BFU10/75- 2x4 / 1x7 (Références constructeur)  $n_{BP}$ $L_{BP}$ $l_{BP}$ $H_{lrBP}$ $H_{vBP}$ $l_{lrBP}$ $l_{vBP}$	$k_{cond.BP}$ $A_{BP}$ $T_{lreBP}$ $T_{lrsBP}$ $T_{vBP}$ $Cp_{lrBP}$ $NUT_{lrBP}$ $\epsilon_{lrBP}$ $h_{lrBP}$ $h_{v.cdBP}$ $X_{veBP}$ $X_{vsBP}$ $g$ $\lambda_{cdstBP}$ $\rho_{cdstBP}$ $\rho_{vBP}$ $Re_{cdstBP}$ $\mu_{cdstBP}$ $k_{cdBP}$	$S_{lrBP}$	<b>Flux de vapeur :</b> $\varphi_{vHP} = q_{vHP} \cdot \Delta h_v(T_{vHP}) \cdot (X_{veHP} - X_{vsHP}) \cdot A_{HP}$
		$S_{vBP}$	$q_{vHP} - q_{vsHP} - q_{cdstHP} = 0$
		$q_{vBP}$	<b>Flux d'eau de refroidissement :</b> $\varphi_{lrBP} = q_{lrBP} \cdot Cp_{lrBP} \cdot (T_{lrsBP} - T_{lreBP})$
		$q_{cdstBP}$	<b>Flux d'énergie thermique :</b> (Egalité entre les flux de vapeur et d'eau de refroidissement) $NUT_{lrBP} = \ln\left(\frac{1}{1 - \epsilon_{lrBP}}\right) = \frac{k_{cd.BP} \cdot A_{BP}}{q_{lrBP} \cdot Cp_{lrBP}}; \quad \epsilon_{lrBP} = \frac{T_{lreBP} - T_{lrsBP}}{T_{lreBP} - T_{vBP}};$
		$T_{vBP}$	$\frac{1}{k_{cd.BP}} = \frac{1}{h_{lrBP}} + \frac{1}{h_{v.cd.BP}}; \quad A_{BP} = 2 \cdot n_{BP} \cdot L_{BP} \cdot l_{BP}$
		$Cp_{lrBP}$	$h_{lrBP} = 0,034 \cdot G_{lrBP} \cdot Cp_{lrBP} \cdot Re_{lrBP}^{-0,2} \cdot Pr_{lrBP}^{2/3}$
		$NUT_{lrBP}$	$h_{v.cdBP} = (-0,00085 \cdot T_{vBP}^3 + 0,78902 \cdot T_{vBP}^2 - 245,4622 \cdot T_{vBP} + 25450,13163) \times 1,47 \cdot \lambda_{cdstBP} \cdot Re_{cdstBP}^{-1/3} \cdot \left[ \frac{\mu_{cdstBP}^2}{\rho_{cdstBP} \cdot (\rho_{cdstBP} - \rho_{vBP}) \cdot g} \right]^{-1/3}$
		$\epsilon_{lrBP}$	<b>Flux de condensats :</b> $q_{cdstBP} = q_{vBP} (X_{veBP} - X_{vsBP}) \text{ avec } X_{veBP} = 1 \text{ et } X_{vsBP} = \frac{q_{vsBP}}{q_{veBP}}$
		$h_{lrBP}$	
		$h_{v.cdBP}$	

<b>P</b>	Faible		Forte
<b>E</b>	Faible		Forte
<b>P</b>	Faible		Forte
<b>S</b>	Forte		Faible

Niveau	0	
1	1	
2	2	
3	3	

### 3-3.3.4 Synthèse du cas du pilote 2003.

Le pilote 2003, présenté sur la figure 3.14, comporte les mêmes unités que le pilote 2000, à la différence que les condenseurs à tubes et calandre ont été remplacés par des condenseurs à plaques matelassées, plus efficaces et plus compacts. Certaines singularités, telles que les coudes entre la chambre de détente et les condenseurs ont également pu être éliminées, réduisant ainsi les pertes de charge dans le système, d'où une amélioration des performances globales. Ce nouveau pilote autorise en effet des débits de traitement de l'ordre de 3 tonnes par heure contre 1,5 tonnes par heure pour le pilote 2000, avec un volume global du système diminué.

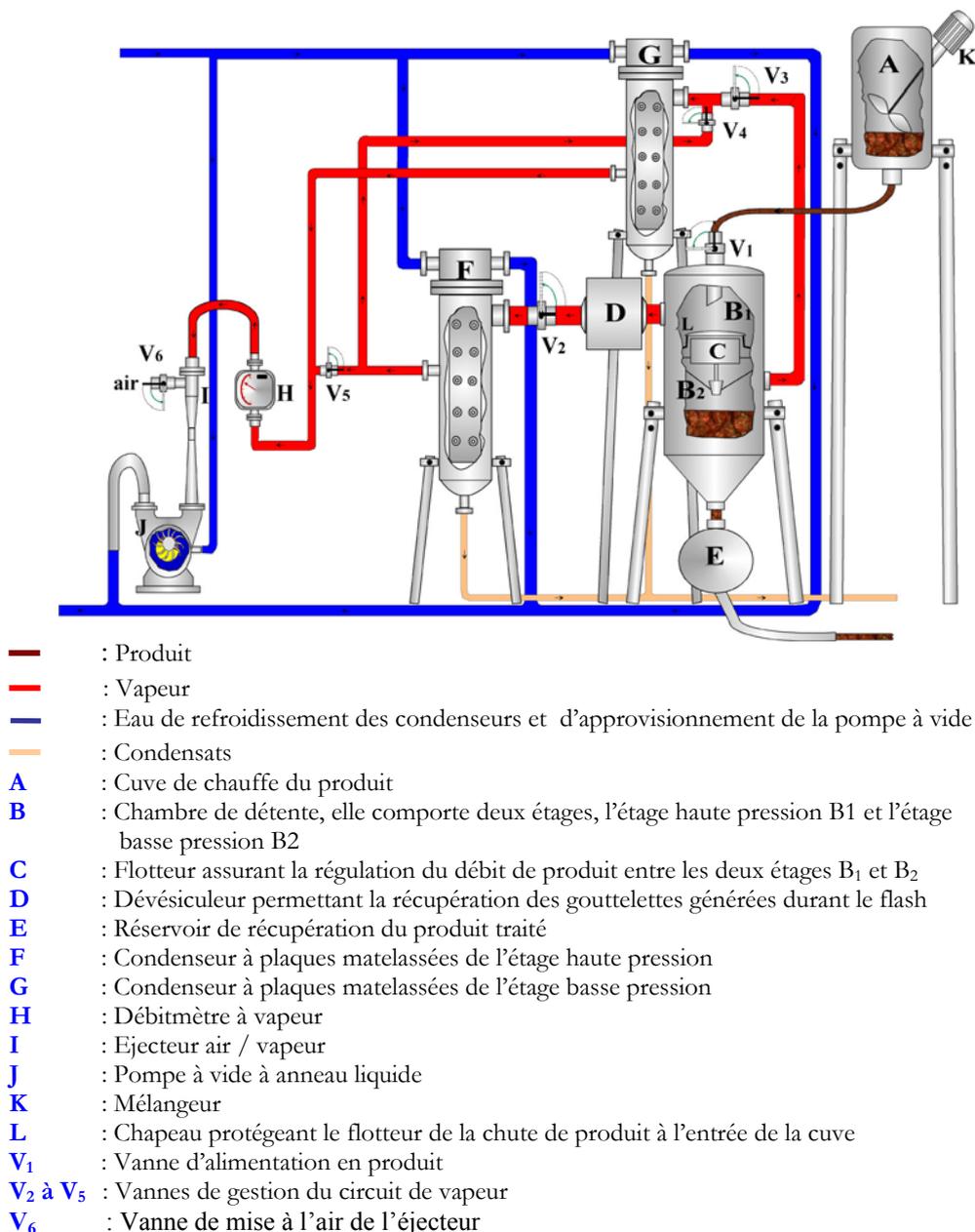


Figure 3.14. Schéma du Pilote 2003 de flash détente bi-étagé.

Il nous a, en outre, permis, dans le cadre de ce travail, de valider l'utilisation de la technologie des condenseurs à plaques pour ce type d'application, par des mesures expérimentales, et d'aboutir à un nouveau concept pour des prototypes industriels bi-étagés d'évaporation flash.

### **3-3.4 Application au prototype industriel.**

Le prototype industriel ( $P_{IND}$ ) est une version industrialisable du procédé d'évaporation flash bi-étagé présenté. Sa conception n'est donc plus limitée à la seule compréhension du phénomène physique, et doit prendre en compte des contraintes qui ont été négligées pour la formulation des modèles des deux précédents systèmes.

Le concept qui a été retenu est issu des études effectuées sur les pilotes 2000 et 2003. Le fluide, qui est préalablement chauffé dans une entité extérieure au système, arrive dans l'installation par l'intermédiaire d'une cuve tampon, qui doit permettre de compenser une interruption de 5 minutes ou une variation du débit d'alimentation. Cette cuve est munie d'un mélangeur qui permet de conserver une température homogène du produit et d'empêcher la sédimentation, dans le cas de liquides chargés.

Une première détente se produit dans l'étage HP, puis une seconde dans l'étage BP, dans les mêmes conditions que dans le cas des pilotes 2000 et 2003. Un dévésiculateur à lames est également prévu pour l'étage HP afin d'arrêter les éventuelles gouttelettes emportées avec la vapeur. A chaque étage, un condenseur est prévu pour traiter la vapeur formée et maintenir le vide dans l'installation. Une pompe à vide couplée à un éjecteur à air permet l'évacuation des incondensables.

Au niveau des condenseurs, les condensats s'écoulent par gravité vers un vase de récupération, à partir duquel ils sont envoyés dans une cuve à pression atmosphérique par le biais d'une pompe. Une fois dans cette cuve, ils pourront, au choix de l'opérateur, être évacués ou réinjectés dans le fluide, au niveau de l'étage HP, pour en faciliter l'évacuation. Le fluide refroidi est évacué en direction d'une cuve de stockage par l'intermédiaire d'une pompe d'extraction qui garantit l'étanchéité du système lors de la mise sous vide.

Le pilotage du système est assuré par un automate programmable.

Ce nouveau concept d'évaporateurs flash intègre donc une unité de commande en plus des unités retrouvées sur le concept précédent.

### 3-3.4.1 Analyse du besoin.

L'objectif principal de la conception du prototype industriel reste lié à sa fonction principale, qui est de refroidir et de concentrer un fluide de 70°C à 30°C. L'assurance de la réalisation de cette fonction dans les meilleures conditions passe par l'établissement de critères de qualification traduits par des contraintes pour le système.

Dans l'étude des pilotes 2000 et 2003, seules les contraintes liées au fonctionnement ont été prises en compte, puisqu'il s'agissait de comprendre le phénomène. Pour le prototype industriel, des contraintes autres que technologiques sont intégrées au modèle de conception.

D'une part, le système doit :

- être transportable par camion, de manière à être utilisable sur différents sites.
- pouvoir s'adapter aux ressources disponibles (eau de refroidissement).
- permettre le traitement de 5 à 30 t/h de fluide, en considérant une interruption possible de 5 minutes ou une variation du débit d'alimentation.

D'autre part, la démarche de formalisation des modèles doit permettre une estimation des coûts de revient et de possession et de l'impact du système sur l'environnement, dans une optique de minimisation. Le tableau 3.8 résume les critères mis en évidence lors de l'analyse du besoin pour le prototype industriel, ainsi que les contraintes à traduire pour vérifier la satisfaction de ces critères. En ce qui concerne l'impact environnemental, les critères proposés sont présentés dans le paragraphe suivant.

**Tableau 3.8.** Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'analyse du besoin pour le prototype industriel.

Critère(s)	Caractérisation	Variable(s) mise(s) en jeu	Contrainte à traduire
Performances attendues	Température initiale	$T_{pe}$	$T_{pe} \in [70;90] \text{ } ^\circ\text{C}$
	Température finale	$T_{ps}$	$T_{ps} \leq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$
	Taux d'évaporation	$x$	$x=f(q_{pe}, T_{pe}, T_{ps})$
	Débit moyen traité	$q_{pe}$	$q_{pe} = [ 5; 30 ] \text{ t/h}$
Masse	Masse totale du système	$M_S$	$M_S < PTAC_{limite} \text{ kg}$
Encombrement	Surface au sol du système	$S_{Sys}$	$S_S < S_{limite} \text{ m}^2$
	Hauteur totale du système	$H_{Sys}$	$H_S < H_{limite} \text{ m}$
Coûts de revient	Coût de revient	$C_{rev}$	–
Coûts de possession	Coût énergétique	$C_{En}$	–
	Coût de l'eau	$C_{Eau}$	–
Impact environnemental	Consommation d'eau	$CO_{En}$	–
	Consommation énergétique	$CO_{Eau}$	
	Indicateur d'impact	$EI_{Sys}$	

### 3-3.4.2 Impact environnemental.

Avec le réchauffement climatique observé depuis quelques années et les prévisions de dérèglements à venir, les notions de préservation de l'environnement ont pris une importance non négligeable. Différents concepts et outils ont été développés pour faciliter la prise en compte de l'impact environnemental des produits et systèmes [Mil00; Pre04]. Deux principaux courants ont émergé de ces nombreux travaux, l'un axé autour de l'évaluation a posteriori des émissions liées au cycle de vie d'un système pour faire ressortir des voies d'amélioration des performances environnementales, et un autre, orienté vers le management des connaissances en matière d'environnement. Compte tenu des objectifs de notre démarche de formalisation, nous nous sommes principalement intéressé à ce dernier courant, orienté vers la prise en compte des connaissances environnementales dans les processus de conception, ou écoconception.

Selon Sweatman et Simon [Swe96], il existe différents champs d'écoconception, liés aux étapes du cycle de vie et des objectifs visés :

- Optimisation de l'efficacité énergétique et réduction des impacts pendant l'utilisation.
- Optimisation des techniques de production.
- Sélection de matériaux de moindre impact.
- Réduction de la quantité de matériau.
- Optimisation des techniques de production.
- Optimisation du système d'emballage, de transport et de distribution (réduction des volumes et du poids, utilisation de matériaux recyclés, etc.).
- Optimisation de la durée de vie (maintenance, réparation,...).
- Optimisation de la phase de fin de vie et de recyclage (récupération et désassemblage facilités, qualité des matériaux, ...).

La méthode la plus connue pour évaluer les impacts environnementaux d'un système est l'Analyse du Cycle de Vie (**ACV**) [Pre04; Sau96; Set93], qui consiste à évaluer les risques au travers d'indicateurs de dommages. Bien que très efficace, cette méthode demande une certaine expertise et est difficile à appliquée à des systèmes complexes. Ceci a conduit certains auteurs à proposer d'autres types d'indicateurs pour estimer l'efficacité environnementale d'un système [Rai05]. D'autres auteurs, considérant que l'impact environnemental des systèmes est principalement lié à la production des matériaux de constitution, ont orienté leurs travaux vers la formulation de bases de connaissances liées à leur sélection [Tre98; Sap01]. Giudice et al. [Giu05] proposent même de relier ces connaissances à celles liées aux performances des systèmes, de manière à optimiser la sélection des matériaux.

En terme de management des connaissances, Jacqueson et al. [Jac03] proposent un outil de pilotage de l'apprentissage des connaissances environnementales, permettant leur capitalisation et leur adaptation.

Face à cette émergence de l'écoconception dans le secteur industriel, la prise en compte de la notion d'impact environnemental pour le prototype industriel s'est faite sur la base de deux constats :

- d'une part, nous disposons d'une méthodologie permettant d'intégrer simultanément des critères tels que les critères environnementaux et d'autres liés au comportement physique réel du système, donc d'influer sur la conception a priori,
- d'autre part, les évaporateurs flash sont des systèmes qui consomment énormément d'énergies, de matières et de flux.

Nous avons donc cherché à caractériser les consommations en énergies, en matières et en flux de ces systèmes.

Dans notre cas, la seule énergie consommée par le système est l'énergie électrique. Nous avons donc choisi de caractériser la consommation en énergies par une évaluation de la consommation en énergie électrique et par le calcul des puissances frigorifiques pour chacun des étages de détente. Nous évaluons l'énergie électrique consommée en kilowattheure (kWh), en totalisant les produits des puissances des différents composants électriques au temps d'utilisation, comme le montre l'équation 3.2 :

$$Co_{En} = \sum_i Puiss_i \cdot t_u \quad (3.1)$$

où  $Puiss_i$  représente la puissance du composant considéré exprimée en kilowatt et  $t_u$  le temps moyen d'utilisation du système en heures. Les puissances frigorifiques aux étages de détente sont évaluées en faisant un bilan enthalpique entre l'entrée et la sortie du fluide, pour chaque étage :

$$Puiss_{Frigo\_HP} = q_{pe} (Cp_{Tpe} T_{pe} - Cp_{Tv_{HP}} T_{vHP}) \quad (3.2)$$

$$Puiss_{Frigo\_BP} = q_{pinter.} (Cp_{Tv_{HP}} T_{vHP} - Cp_{Tv_{BP}} T_{vBP}) \quad (3.3)$$

Pour ce qui est des flux liés au fonctionnement du système, ils sont caractérisés par la consommation en eau au niveau des condenseurs de vapeur. Cette consommation est évaluée par rapport à la puissance frigorifique produite, pour chaque étage, en  $kW_{th}$  d'énergie produite par le refroidissement du fluide. L'équation 3.4 présente l'expression de la consommation en eau du système :

$$Co_{Eau} = \sum_{i=HP}^{BP} \frac{q_{lri}}{q_{vi} \cdot \Delta h_v(T_{vi}) \cdot (X_{vei} - X_{vsi})} \quad (3.4)$$

où  $q_{lr}$  représente le débit de liquide de refroidissement exprimé en litre par heure (L/h),  $q_v$  est le débit de vapeur en kilogramme par seconde (kg/s),  $\Delta h_v(T_v)$  représente la chaleur latente de vaporisation à la température de la vapeur exprimée en kJ/kg et  $X_{ve}$ ,  $X_{vs}$  sont les titres de vapeur en entrée et sortie des condenseurs, respectivement.

Pour ce qui est des matières, nous avons cherché à relier leur consommation à leur impact sur l'environnement. Notre choix s'est porté sur la méthodologie de l'EcoIndicateur 99 [Pré00a; Pré00b; Pré01], qui est une méthode Ecoscore permettant de représenter l'impact environnemental d'une matière ou d'une opération par des indicateurs chiffrés. Ces indicateurs sont ensuite normalisés, pondérés et sommés jusqu'à obtention d'un score unique caractérisant l'impact global.

La méthodologie de l'EcoIndicateur 99 permet ainsi de prendre en compte l'impact lié à la fabrication du système sur l'environnement en terme de ressources (minéraux, carburants fossiles, terres utilisées), de qualité de l'écosystème (acidification, toxicité) et de santé humaine (changements climatiques, réduction de la couche d'ozone, etc.) en inventoriant les émissions et ressources consommées, comme le montre la figure 3.15.

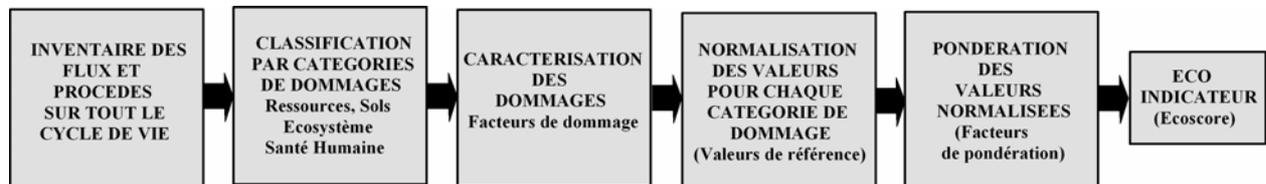


Figure 3.15. Schéma descriptif de la méthodologie de l'EcoIndicateur 99.

Certains auteurs, comme Bovea et Gallardo [Bov06], soulignent le danger de l'utilisation de telles méthodes qui, bien que plus faciles à appréhender que l'Analyse du Cycle de Vie, peuvent entraîner des pertes d'informations importantes. Nous avons considéré qu'au stade de conception préliminaire, où se situe notre étude, cette considération a peu d'importance, étant donné qu'il s'agit de faire une sélection entre différentes solutions de conception, pour des problèmes encore mal définis.

### 3-3.4.3 Approche fonctionnelle.

Comme dans le cas des critères de qualification, la conception du prototype industriel nécessite la prise en compte d'un plus grand nombre de situations de vie. Celles qui ont été retenues

comme pertinentes sont celles de *fabrication*, d'*utilisation*, d'*arrêt*, de *nettoyage*, de *maintenance préventive* et de *transport*. La situation de vie maintenance préventive n'est cependant pas prise en compte dans ce travail.

La figure 3.16 présente le résultat de l'analyse fonctionnelle externe établie pour la situation de vie *Utilisation* du prototype industriel.

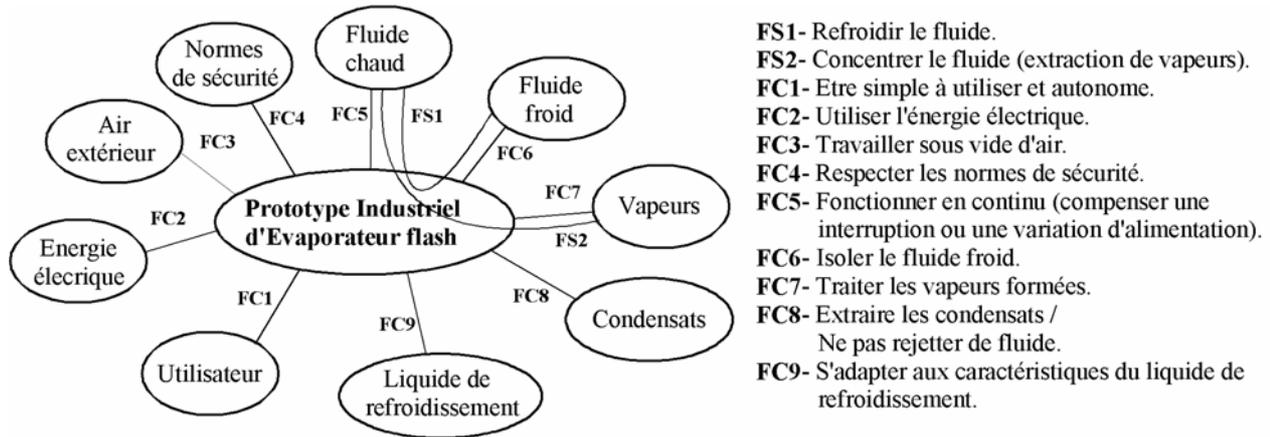


Figure 3.16. Approche fonctionnelle externe de la situation de vie *Utilisation* pour les prototypes industriels.

Cette analyse, effectuée pour chaque situation de vie, a permis d'aboutir à un ensemble de fonctions structurantes pour la conception du prototype industriel. Ces fonctions, ainsi que les critères associés à leur satisfaction, sont résumées dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9. Caractéristiques structurantes identifiées lors de l'approche fonctionnelle externe pour le prototype industriel.

Situation de vie	Fonction	Critère(s)	Caractérisation	Contrainte à traduire
Fabrication	FC1- Utiliser des matériaux	Type de matériaux Coût de revient	Acier inoxydable, aluminium, etc. Quantité de matériau nécessaire Prix du (des) matériau(x) Coût de mise en forme	– $M_{mat}$ [kg] $C_{mat}$ [€/kg] $C_{MF}$ [€/kg]
	FC3- Maîtriser l'impact sur l'environnement	Impact environnemental	Eco Indicateur 99	$EI_{Sys}$
Utilisation	FS1- Refroidir le fluide	Performances attendues	Température initiale Température finale Débit moyen d'entrée du fluide	$T_{pe} \in [60 ; 90] ^\circ C$ $T_{ps} \in [25 ; 30] ^\circ C$ $q_{pe} \in [5 ; 30] t/h$
	FS2- Concentrer le fluide.	Performances attendues	Taux d'évaporation	$x=f(q_{pe}, T_{pe}, T_{ps})$
	FC1- Etre simple à utiliser et autonome	Evaluation qualitative	–	–
	FC2- Utiliser l'énergie électrique	Coût énergétique	Consommation énergétique	$Co_{En} < 10 kWh$

	<b>FC3-</b> Travailler sous vide d'air	Performances attendues	Pression atmosphérique Pression intérieure requise Choix pompe à vide	$PAV = f(P_{atm}, P_0)$
	<b>FC4-</b> Respecter les normes de sécurité	Réglementation CODAP	Epaisseur des cuves ( $e$ )	$e \geq \frac{P \cdot D_{cuve}}{2 \cdot f \cdot z - P}$
	<b>FC5-</b> Fonctionner en continu	Capacité cuve tampon	Volume cuve Masse volumique fluide Variation débit compensée Temps interruption max. Temps de remplissage	$V_{Cint} = f(t_{rempl.}, t_{interr.}, q_{pe}, \Delta q_p)$ $\rho_p = f(T)$ $\Delta q_p \pm 1 \text{ t/h}$ $t_{interr.} = 5 \text{ min}$ $t_{rempl.} = 30 \text{ min}$
	<b>FC6-</b> Isoler le fluide refroidi	Débits fluide/aspiration pompe	Débits fluide/aspiration pompe	$q_{Pextr.} = q_{ps}$
	<b>FC7-</b> Traiter les vapeurs formées	Caractéristiques vapeur formée	Débit moyen Titre Température	$q_v$ $X_v \in [0,5 ; 1]$ $T_v \in [30 ; 50] \text{ }^\circ\text{C}$
	<b>FC8-</b> Extraire les condensats sans rejet vers l'extérieur	Débit de condensats	Débit de condensats	$q_{cdst} = f(q_v)$
	<b>FC9-</b> S'adapter aux caractéristiques du liquide de refroidissement	Caractéristiques des ressources	Débit disponible Température	$q_{tr} \in [40 ; 170] \text{ L/min}$ $T_{tr} \in [10 ; 30] \text{ }^\circ\text{C}$
Arrêt	<b>FS1-</b> Visualiser l'état du produit	Position des capteurs	Hauteur capteur niveau bas  Hauteur capteur niveau moyen  Hauteur capteur niveau haut	$H_{CN3} = 0$  $H_{CN2} = \frac{t_{interr.} \cdot q_{pe}}{\rho_f \cdot S_{CT}}$  $H_{CN1} = H_{CN2} + \frac{t_{rempl.} \cdot \Delta q_p}{\rho_f \cdot S_{CT}}$
	<b>FC1-</b> Conserver une configuration de démarrage	Niveau de fluide	Hauteur de fluide	$H_f \geq H_{CN2}$
Nettoyage	<b>FS1-</b> Permettre un accès facile aux zones à nettoyer	Dimensions et position des portes de nettoyage	Evaluation qualitative	-
	<b>FC2-</b> Optimiser la quantité de produit restant en fin de cycle	Niveau de fluide restant	Hauteur capteurs dans cuves	$H_{CN} = \frac{H_{co}}{2}$
Transport	<b>FS1-</b> Etre transportable et faciliter la maintenance	Masse Encombrement	Masse totale du système ( $M_{S_{sys}}$ ) Surface au sol de l'ensemble ( $S_{S_{sys}}$ ) Hauteur de l'ensemble ( $H_{S_{sys}}$ )	$M_{S_{sys}} < 19000 \text{ kg}$ $S_{S_{sys}} < 16 \text{ m}^2$ $H_{S_{sys}} < 3 \text{ m}$
	<b>FC1-</b> Supporter les contraintes du transport (vibrations, etc.)	Limites en élasticité et en charge	Contrainte normale Charge maximale	$\sigma \leq R_{p0,2}$ $F \leq F_c$

### 3-3.4.4 Approches organique et physique.

Le concept du prototype industriel est relativement similaire à celui des pilotes 2000 et 2003. Il comporte les unités de détente, de traitement des vapeurs, de vide et de commande. C'est surtout dans l'organisation structurelle de ces unités que vont apparaître des différences.

En effet, le passage à une application industrielle implique certaines modifications, afin de satisfaire les contraintes imposées par le respect des critères de qualification. La fonction principale d'un évaporateur flash est de refroidir un fluide. Ce fluide est donc considéré comme déjà chauffé lorsqu'il pénètre dans l'enceinte du système. Dans le cas des pilotes 2000 et 2003, où il s'agissait d'étudier le phénomène, une cuve avait été prévue pour le chauffage du fluide. Dans le cas du prototype industriel, une cuve est prévue pour assurer un fonctionnement en continu, même dans le cas d'une variation du débit d'alimentation ou d'une interruption de celle-ci. Le problème de la gestion des condensats s'est également posé pour assurer le fonctionnement en continu du système. Nous avons choisi d'adopter un système permettant aussi bien l'évacuation des condensats que leur réinjection dans l'étage haute pression. Ce système est constitué d'un vase de récupération, dans lequel les condensats s'écoulent directement par gravité depuis les condenseurs. A partir de ce vase, les condensats sont ensuite acheminés vers une cuve à pression atmosphérique, par le biais d'une pompe centrifuge. En outre, pour répondre au souci d'encombrement minimum, le produit refroidi n'est plus stocké dans une cuve prévue à cet effet, mais directement extrait de l'enceinte du système par le biais d'une pompe d'extraction.

#### ➤ Analyse de niveau 2 :

La figure 3.17 présente l'OTé de niveau 2 du prototype industriel.

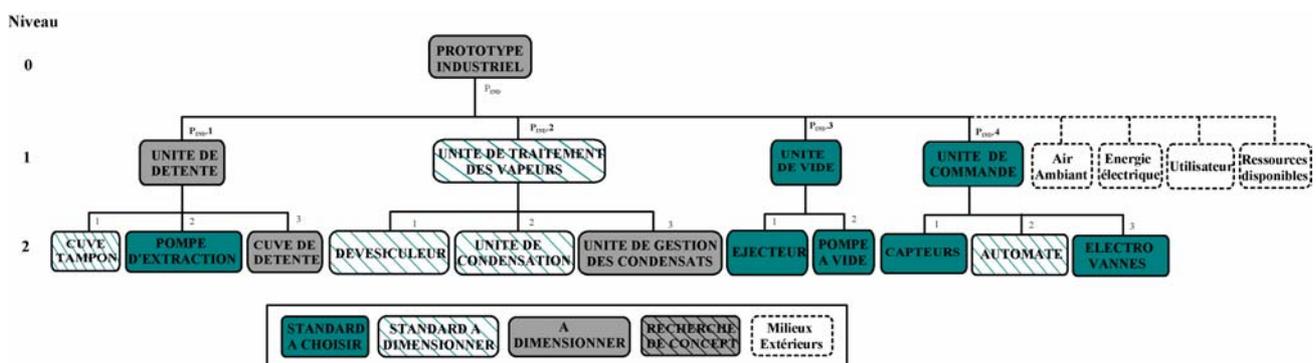


Figure 3.17. Organigramme Technique étendu de niveau 2 du prototype industriel.

Comme nous l'avons évoqué au chapitre 1, cet organigramme permet de distinguer différents types de blocs fonctionnels :

- Les blocs fonctionnels standard à choisir, dont les variables caractéristiques sont imposées et doivent être sélectionnées parmi un ensemble défini, à partir de catalogues, de courbes ou de tableaux fournis par le constructeur. On y retrouve, dans notre cas, les différentes pompes, ainsi que les composants de l'unité de commande. Tous ces blocs fonctionnels imposent des règles d'utilisation considérées comme des éléments pertinents pour la conception.
- Les blocs fonctionnels standard à dimensionner, dont la géométrie et le type sont à choisir parmi un ensemble standard, mais pour lesquels les dimensions sont à évaluer en fonction de l'application. C'est le cas du dévésiculeur pour la filtration des gouttelettes, de l'éjecteur couplé à la pompe à vide et des condenseurs.
- Les blocs fonctionnels à dimensionner, pour lesquels il n'existe pas de standard. Leur concept a déjà été établi, mais les caractéristiques et les dimensions restent à établir. C'est le cas des différentes cuves et de l'unité de gestion des condensats.
- Les blocs fonctionnels en recherche de concept, pour lesquels une recherche de concept s'impose afin de trouver une solution adaptée. Dans notre cas, aucun bloc fonctionnel n'est concerné.
- Les blocs fonctionnels correspondant aux milieux extérieurs, qui sont les éléments de l'environnement extérieur au système qui vont avoir une influence sur lui ou dont il va dépendre.

L'utilisation du BDF permet de mettre en évidence les flux fonctionnels existant entre ces blocs, selon le niveau de décomposition. La figure 3.18 présente le BDF de niveau 2 associé au fonctionnement du prototype industriel. Nous distinguons ainsi :

- Le flux de fluide à traiter (**FFT**), qui circule depuis la cuve tampon, jusqu'à la pompe d'extraction, en passant par la cuve de détente.
- Le flux de vapeur (**FV**), qui se crée dans la cuve de détente. Il passe ensuite par le dévésiculeur, où il est filtré, et par l'unité de condensation, qui en transforme la majeure partie en flux de condensat (**FC**). La part non transformée est entraînée vers l'unité de vide où elle est évacuée sous la forme d'un flux d'eau liquide (**FE**).
- Un flux de gouttelettes (**FG**) circule entre la cuve de détente et le dévésiculeur. Il s'agit de fines gouttes formées lors de l'évaporation et emportées par le flux de vapeur.

- Un flux d'eau (**FE**), pour l'alimentation de l'anneau liquide de la pompe à vide et le refroidissement de l'unité de condensation.
- Un flux d'énergie électrique (**FEE**), qui permet l'alimentation en énergie de la pompe à vide.
- Un flux de liquide de refroidissement (**FLR**) transite dans l'unité de condensation pour permettre la transformation du flux de vapeur. Il y a donc interaction entre les flux de vapeur et de liquide de refroidissement au niveau de cette unité.
- Un flux d'énergie thermique (**FET**), qui correspond au transfert de chaleur entre la cuve tampon qui contient le fluide à traiter chaud et l'extérieur.
- Un flux d'information (**FI**), qui va des capteurs vers l'automate programmable de l'unité de commande et de cet automate vers les électrovannes.

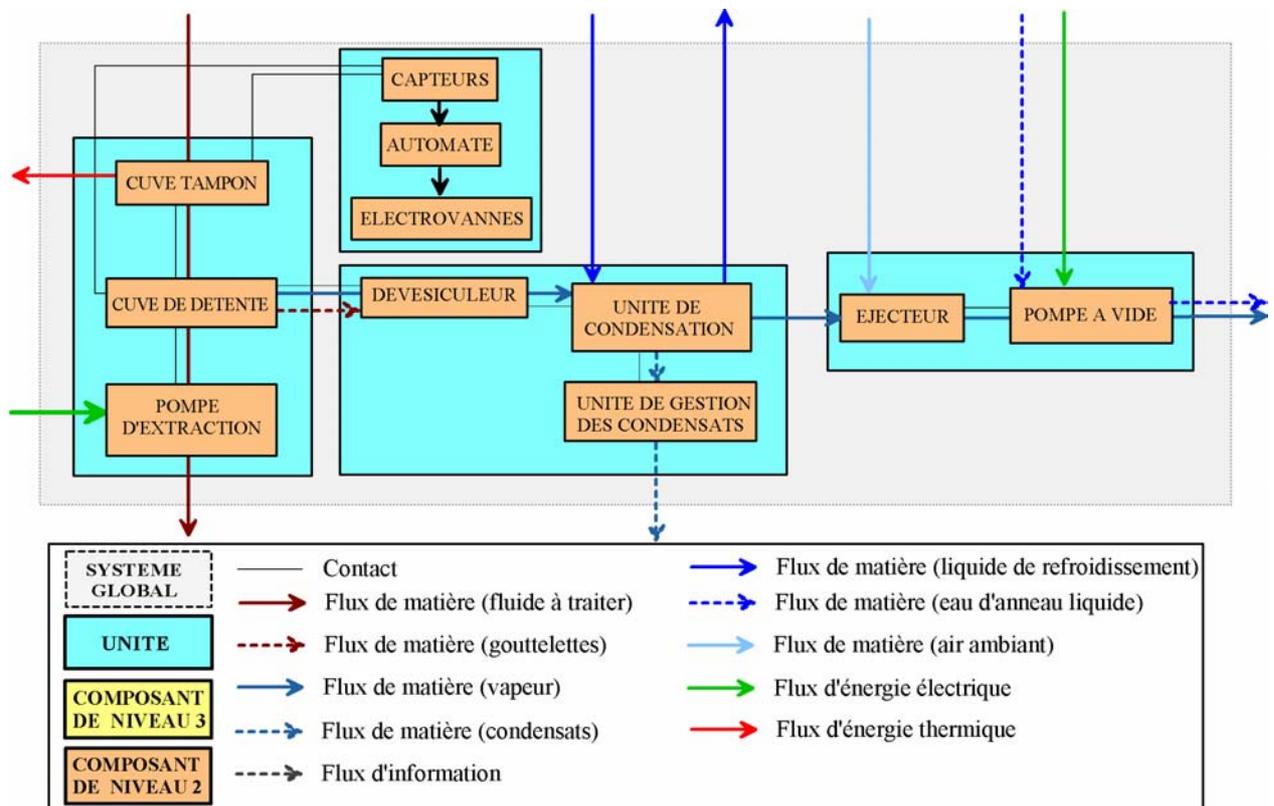


Figure 3.18. Bloc Diagramme Fonctionnel de niveau 2 du prototype industriel.

Ces flux, extrêmement couplés du fait de la complexité des phénomènes intervenant dans le fonctionnement du système, impliquent un modèle de composant pour chaque bloc fonctionnel qu'ils traversent, et un modèle d'interaction entre chacun de ces blocs. Les différents modèles obtenus doivent être cohérents entre eux, quelque soit leur niveau de représentation.

Pour chaque composant apparaissant dans le BDF, une analyse est faite par rapport à chacun de ces flux, afin de savoir s'il est possible de modéliser le phénomène observé. Toute absence de modèle pour l'un des composants ou pour une interaction impose de descendre au niveau inférieur.

Les tableaux 3.10 à 3.14 présentent le résultat de l'analyse physique effectuée au niveau 2 pour l'unité de détente.

Dans le cas du flux de fluide à traiter, les modèles se limitent aux débits d'entrée et de sortie des différents composants de l'unité. L'interaction entre la cuve tampon et la cuve de détente (cf. Tableau 3.11) est caractérisée par une équivalence entre le débit en sortie de la cuve tampon et celui en entrée de la cuve de détente. La détermination des modèles pour les flux de vapeur et de gouttelettes dans la cuve de détente, et d'énergie thermique dans la cuve tampon nécessite de passer à un niveau inférieur de représentation. L'interaction entre la cuve de détente et la pompe d'extraction (cf. Tableau 3.13) est caractérisée par une équivalence entre débits et pression. Le débit d'aspiration de la pompe doit, en effet être au moins égal à celui en sortie de la cuve. Il en est de même pour la pression. La pression de refoulement de la pompe est imposée par le constructeur.

La pompe d'extraction étant un bloc fonctionnel standard à choisir, ses variables de conception se résument à sa référence catalogue. Cette référence est généralement associée à des valeurs définies pour les critères, ainsi qu'à une courbe débit-pression.

**Tableau 3.10.** Fiche modèle de niveau 2 de la cuve tampon du prototype industriel.

Niveau 2		Réf: Pind.1.1	CUVE TAMPON	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant	
		$q_{pe_0}$	<b>Flux de Fluide à Traiter</b>	$q_{pe_0} = q_{pe} + I$
		$q_{pe}$	<b>Flux d'Energie Thermique:</b> (Convection, rayonnement)	$\varphi_{CT} = h_{air} \cdot A \cdot (T_{CT} - T_{air}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_{CT}^4 - T_{air}^4)$ $A = f(\text{Dimensions cuve})$
		$\varphi_{CT}$		
		$h_{air}$		
		$T_{CT}$	<b>Dimensionnement</b>	Pas de modèle disponible à ce niveau
		$T_{air}$		
		$\sigma$		
		$\varepsilon$		
<b>P</b>	<i>Faible</i>		<i>Forte</i>	
<b>E</b>	<i>Faible</i>		<i>Forte</i>	
<b>P</b>	<i>Faible</i>		<i>Forte</i>	
<b>S</b>	<i>Forte</i>		<i>Faible</i>	

**Tableau 3.11.** Fiche modèle de niveau 2 de l'interaction entre la cuve tampon et la cuve de détente.

Niveau 2		Pind.1.1/Pind.1.3		CUVE TAMPON / CUVE DE DETENTE	
Vco	Cr	VA	Modèle d'interaction		
		$q_{pe}$ $T_{pe}$	Flux de Fluide à Traiter	$(q_{pe}, T_{pe})_{CuveTampon} = (q_{pe}, T_{pe})_{CuveDetente}$	
			Dimensionnement	Pas de modèle disponible à ce niveau	
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>E</b>	Faible		Forte		
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>S</b>	Forte		Faible		

**Tableau 3.12.** Extrait de la fiche modèle de niveau 2 de la cuve de détente du prototype industriel.

Niveau 2		Réf: Pind.1.3		CUVE DE DETENTE	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
		$q_{pe}$ $q_v$ $q_{ps}$ $T_{pe}$ $T_v$ $Cp_l$ $\Delta h_v$	Flux de Fluide à Traiter	$q_{pe} - q_{ps} - q_v = 0$	
			Flux de vapeur	$q_v = f(q_{pe}, T_{pe}, T_v, Cp_l, \Delta h_v)$	
			Flux de gouttelettes	$q_g = f(q_v, T_v)$	
			Dimensionnement	Pas de modèle disponible à ce niveau	
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>E</b>	Faible		Forte		
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>S</b>	Forte		Faible		

**Tableau 3.13.** Fiche modèle de niveau 2 de l'interaction entre la cuve de détente et la pompe d'extraction.

Niveau 2		Pind.1.3/Pind.1.2		CUVE DE DETENTE/ POMPE D'EXTRACTION	
Vco	Cr	VA	Modèle d'interaction		
		$q_{ps}$ $P_{CD}$	$q_{ePE}$ $P_{aspPE}$	Flux de Fluide à Traiter	$q_{ePE} = q_{ps}$ $P_{aspPE} = P_{CD}$
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>E</b>	Faible		Forte		
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>S</b>	Forte		Faible		

Tableau 3.14. Fiche modèle de niveau 2 de la pompe d'extraction.

Niveau 2		Réf : Pind.1.2		POMPE D'EXTRACTION	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
Références catalogue de la pompe (PNM MOINEAU MR45 IVA Inox)	$q_{max PE}$		Flux de fluide à Traiter	$q_{max PE} \geq q_{ps}$	
	$P_{aspPE}$		Flux d'énergie électrique	$Puiss_{PE} = \frac{q_{max PE} \cdot (P_{refPE} - P_{aspPE})}{\eta_{PE}}$	
	$P_{refPE}$				
	$N_{PE}$				
	$Puiss_{PE}$				
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>E</b>	Faible		Forte		
<b>P</b>	Faible		Forte		
<b>S</b>	Forte		Faible		

L'analyse de niveau 2 de l'unité de traitement des vapeurs, ne permet pas, elle non plus, d'aboutir à un modèle exploitable.

Dans le cas de l'unité de vide, le groupe "pompe à vide +éjecteur" est considéré comme un bloc fonctionnel standard à choisir. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer une analyse plus approfondie, ce bloc étant caractérisé par sa référence dans le catalogue constructeur, compte tenu de l'interaction avec le reste du système.

➤ Analyse de niveau 3 :

Les figures 3.19 et 3.20 représentent, respectivement, les OTé de niveau 3 des unités de détente, de traitement des vapeurs pour le prototype industriel.

Niveau

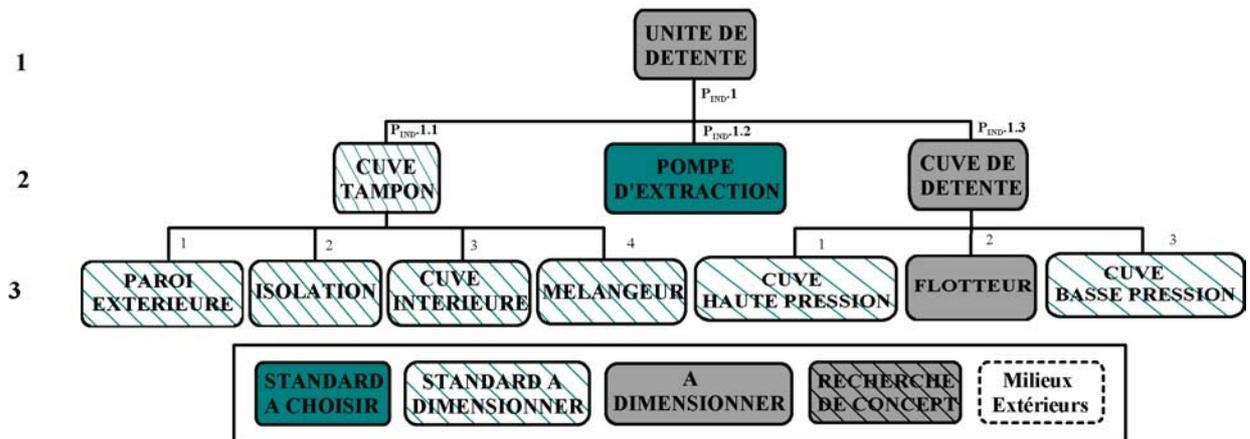


Figure 3.19. Organigramme technique étendu de niveau 3 de l'unité de détente du prototype industriel.

## Niveau

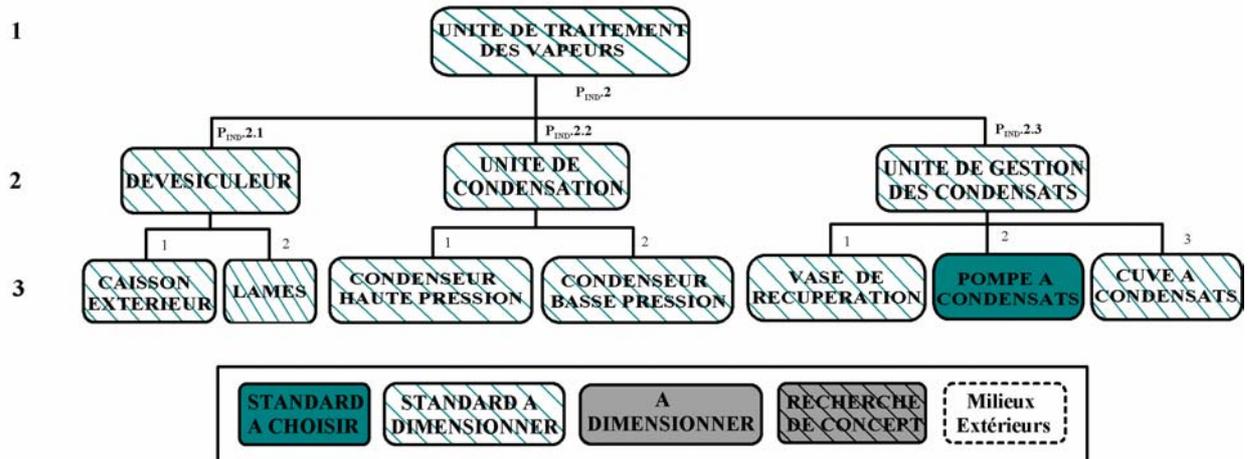


Figure 3.20. Organigramme technique étendu de niveau 3 de l'unité de traitement des vapeurs du prototype industriel.

De même que dans le cas du BDF de niveau 2, le BDF de niveau 3 du prototype industriel, représenté sur la figure 3.21, permet la caractérisation des différents flux entre les blocs fonctionnels.

Au niveau de la cuve tampon, un flux supplémentaire d'énergie électrique est identifié pour l'alimentation en énergie du mélangeur. Les différents éléments constitutifs de la cuve étant distingués à ce niveau, il est également possible d'évaluer les variables associées au flux d'énergie thermique et au dimensionnement pour ce bloc fonctionnel.

Comme pour les pilotes 2000 et 2003, l'unité de condensation est composée de deux condenseurs. Ces condenseurs sont, en outre, reliés à une unité de gestion des condensats par le biais d'un vase de récupération. Ce flux de condensats est ensuite envoyé vers une cuve à condensats par le biais d'une pompe centrifuge. Il peut être envoyé dans la cuve haute pression pour faciliter l'écoulement du flux de fluide à traiter.

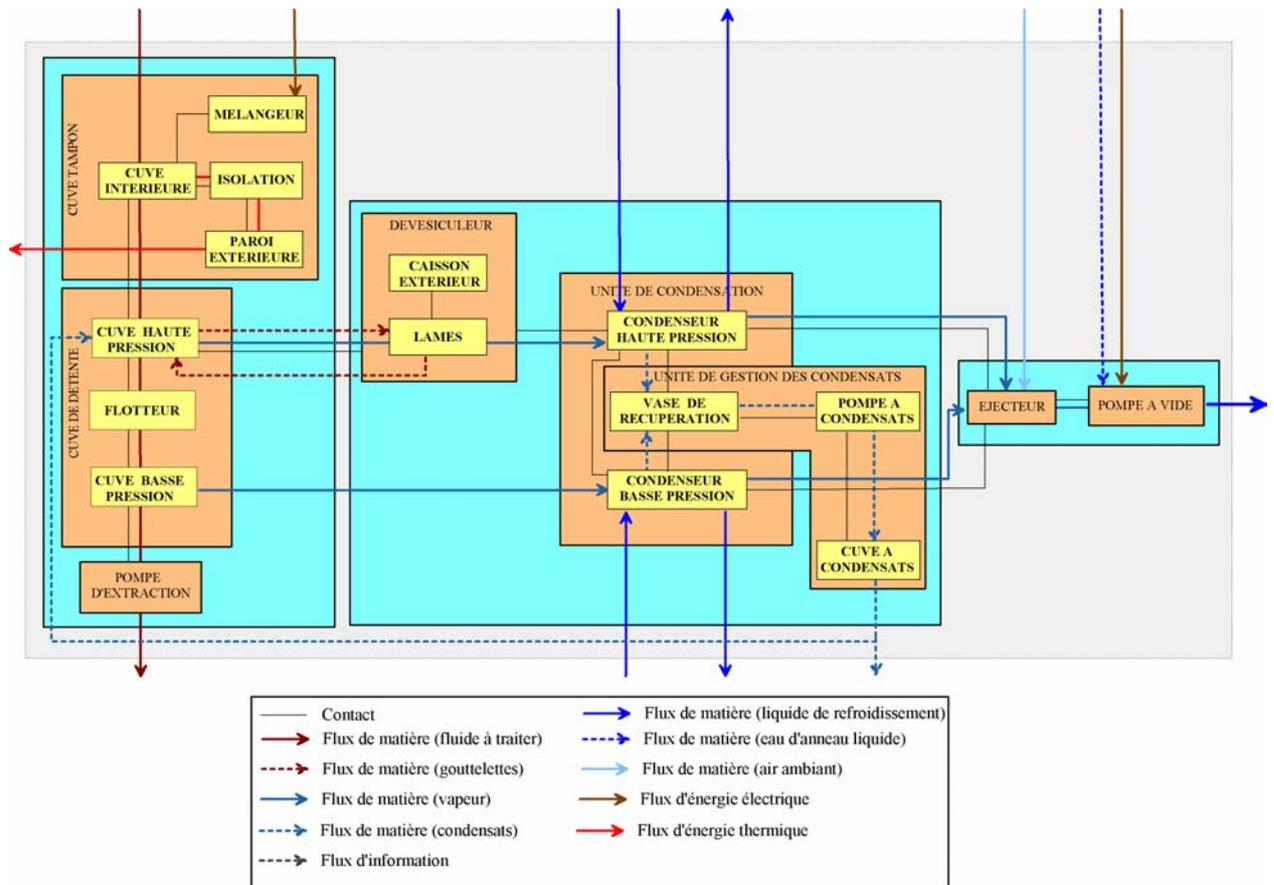
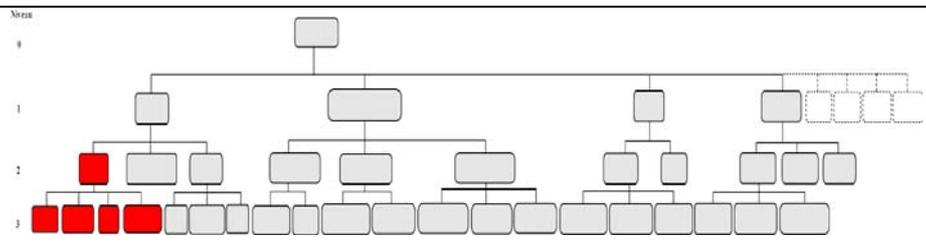


Figure 3.21. Bloc Diagramme Fonctionnel de niveau 3 du prototype industriel.

L'analyse à ce niveau a permis d'aboutir à des modèles cohérents pour l'ensemble des composants de l'unité de détente. Ces modèles sont représentés sur les tableaux 3.15 à 3.17. La fiche modèle de niveau 3 de la cuve basse pression n'est pas représentée, puisqu'elle est similaire à celle de la cuve haute pression (les indices HP deviennent BP).

**Tableau 3.15.** Extrait de la fiche modèle de niveau 2 adapté de la cuve tampon.

Niveau 2 (adapté)	Réf: Pind.1.1		CUVE TAMPON	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant	
$D_{c.int}$ $H_{c.int}$ $H_{cocint}$ $e_{c.int}$ $e_{iso}$ $e_{p.ext}$	$q_{pe}$ $M_{CT}$ $T_{p.ext}$ $P_{mél}$ $N$ $y$	$V_{c.int}$ $t_{interr.}$ $t_{rempl.}$ $\Delta q_p$ $\rho_p$ $\rho_{iso}$ $\rho_{p.ext}$ $co_{c.int}$ $\lambda_{c.int}$ $\lambda_{iso}$ $\lambda_{p.ext}$ $N_p$ $Re_p$ $T_{p.ext}$ $T_{air}$	<p><b>Flux de Fluide à Traiter</b></p> $q_{pe_0} = q_{pe} + I$	<p><b>Flux d'Energie Thermique:</b> (Conduction, Convection, Rayonnement)</p> $\varphi_{cond} = k.A.(T_{pe} - T_{air}) = (h_{air}.A.(T_{p.ext} - T_{air}) + (\sigma.\varepsilon.A.(T_{p.ext}^4 - T_{air}^4)))$ <p>avec</p> $\frac{1}{k.A} = \frac{1}{\ln\left(\frac{\frac{D_{c.int} + e_{c.int}}{2}}{\frac{D_{c.int}}{2}}\right) + \frac{1}{\ln\left(\frac{\frac{D_{c.int} + e_{c.int} + e_{iso}}{2}}{\frac{D_{c.int} + e_{c.int}}{2}}\right) + \frac{1}{\ln\left(\frac{\frac{D_{c.int} + e_{c.int} + e_{iso} + e_{p.ext}}{2}}{\frac{D_{c.int} + e_{c.int} + e_{iso}}{2}}\right)}}$ $A = A_{c.int} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int}\right) \cdot H_{c.int}$
			<p><b>Dimensionnement</b></p> $V_{c.int} = \left(t_{interr} \cdot q_{pe} \cdot \frac{1}{\rho_p}\right) + \left(t_{rempl} \cdot \Delta q_p \cdot \frac{1}{\rho_p}\right); \quad H_{c.int} = \frac{V_{c.int}}{\pi \cdot \frac{D_{c.int}^2}{4}}$ $e_{iso} \rightarrow cf. \text{ Flux d'Energie Thermique} \quad H_{cocint} = \frac{D_{c.int}}{2 \cdot \sin(co_{c.int})}$ $H_{iso} = H_{c.int} + H_{cocint}$ $e_{p.ext} = 0,001$ $H_{p.ext} = H_{c.int} + H_{cocint}$ $D_{hélice} \approx \frac{D_{c.int}}{3}; \quad y \approx \frac{D_{c.int}}{3}$ $M_{CT} = M_{c.int} + M_{iso} + M_{p.ext}$ $= (\pi \cdot D_{c.int} \cdot e_{c.int} \cdot \rho_{c.int} \cdot (H_{c.int} + H_{cocint})) + (\pi \cdot e_{iso} \cdot \rho_{iso} \cdot H_{iso} \cdot (D_{c.int} + 2 \cdot e_{c.int})) + (\pi \cdot e_{p.ext} \cdot \rho_{p.ext} \cdot H_{p.ext} \cdot (D_{c.int} + 2 \cdot e_{c.int} + 2 \cdot e_{iso}))$	
<p><b>P</b> Faible  Forte</p> <p><b>E</b> Faible  Forte</p> <p><b>P</b> Faible  Forte</p> <p><b>S</b> Forte  Faible</p>				

Pour ce qui est de l'unité de traitement des vapeurs, le fonctionnement du dévésiculateur est traduit par une relation de type expérimental, qui est explicitée dans le modèle de la cuve haute

pression. Ce modèle est donc cohérent avec celui obtenu pour les composants de l'unité de détente. La modélisation des condenseurs nécessite, elle, de descendre au niveau inférieur, pour remonter au niveau 3 par une adaptation.

**Tableau 3.16.** Extrait de la fiche modèle de niveau 3 de la cuve haute pression.

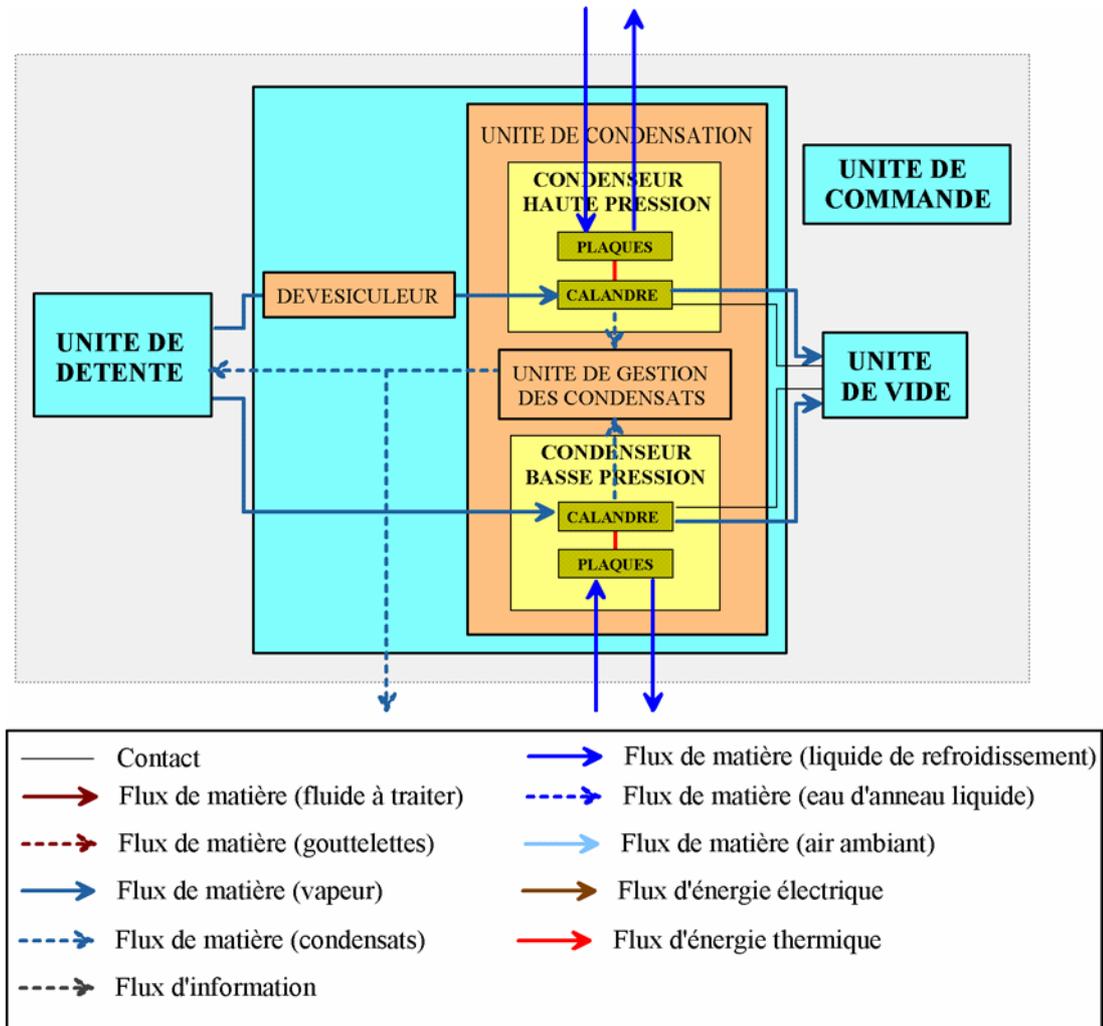
Niveau 3	Réf: Pind.1.3.1		CUVE HAUTE PRESSION	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant	
$D_{cHP}$ $e_{cylHP}$ $e_{coHP}$ $e_{fdHP}$ $co_{HP}$	$T_{vHP}$ $q_{vHP}$ $q_{pe}$	$\mu_v$ $\rho_v$ $\rho_g$ $\rho_{mat.}$ $\sigma(T)$ $P_{sat}(T_{vHP})$ $P_{sat}(T_{pe})$ $f_3$ $z$ $R$ $r$ $q_{p12}$ $T_{p12}$ $\Delta h_v(T_{vHP})$ $Cp_{lpe}$ $Cp_{ll}$ $T_{pe}$ $H_{cylHP}$	Flux de Fluide à Traiter	$q_{pe} - q_{vHP} - q_{p12} = 0$ $T_{p12} = T_{vHP}$
			Flux de vapeur	$q_{vHP} \Delta h_v(T_{vHP}) = q_{pe} (Cp_{lpe} T_{pe} - Cp_{ll} T_{vHP})$
			Flux de gouttelettes modélisation expérimentale	$q_g = -0,153 \cdot 10^{-4} + 0,0138 \cdot 10^{-4} \cdot q_{vHP} + 0,00048 \cdot 10^{-4} \cdot T_{vHP}$
			Dimensionnement	$D_{cHP} \geq \sqrt{\frac{72 \cdot \mu_v \cdot q_{vHP}}{g \cdot \rho_v \cdot \pi \cdot d_g^2 \cdot (\rho_g - \rho_v)}} \text{ avec } d_g = \frac{4 \cdot \sigma(T)}{P_{sat}(T_{vHP}) - P_{sat}(T_{pe})}$ $e_{cylHP} = e_{coHP} = \frac{P_{HP} \cdot D_{cHP}}{2 \cdot f_3 \cdot z - P_{HP}}$ $e_{fdHP} = \max [(e_s); (e_y); (e_b)]$ avec $e_s = \frac{P_{HP} \cdot R}{2 \cdot f_3 \cdot z - 0,5 \cdot P_{HP}}$ ; $R = D_{cHP}$ et $r = \frac{D_{cHP}}{10}$ $e_y = \beta \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{cHP}) \cdot \frac{P_{HP}}{f_3}$ , $\beta = f\left(\frac{r}{D_{cHP}}\right)$ $e_b = 0,0433 \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{cHP}) \cdot \left(\frac{D_{cHP}}{r}\right)^{0,55} \cdot \left(\frac{P_{HP}}{f_3}\right)^{0,667}$ Pour les aciers inox.austénitiques (316L): $f_3 \approx 207 \text{ N/mm}^2$ et $z = 0,85$ $M_{cHP} = \pi \cdot D_{cHP} \cdot \rho_{mat} \cdot \left[ (H_{cylHP} \cdot e_{cylHP}) + \left( \frac{D_{cHP}}{2 \cdot \sin(co_{HP})} \cdot e_{coHP} \right) \right] + M_{fdHP}$
<b>P</b> Faible → Forte <b>E</b> Faible → Forte <b>P</b> Faible → Forte <b>S</b> Forte → Faible				

**Tableau 3.17.** Extrait de la fiche modèle de niveau 3 du le flotteur.

Niveau 3	Réf : Pind.1.3.2		FLOTTEUR	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant	
$D_{fl}$ $V_{fl}$ $H_{fl}$ $e_{fl}$ $co_{fl}$	$H_{ni}$	$S_{fl}$ $d_{ouv}$ $g$ $\rho_{fl}$ $\rho_p$ $P_{HP}$ $P_{BP}$ $H_{ni}$	Flux de Fluide à Traiter	$\frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4} \cdot (P_{HP} - P_{BP}) = g \cdot \rho_v \cdot \left( V_{fl} - \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \cdot H_{ni} \right) - g \cdot e_{fl} \cdot \rho_{fl} \cdot S_{fl}$
			Dimensionnement	$S_{fl} = \pi \cdot D_{fl} \cdot H_{fl} + \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \cdot \left( 1 + \frac{l}{\sin(co_{fl})} \right) - \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4 \cdot \sin(co_{fl})}$ $V_{fl} = \pi \cdot \frac{D_{fl}^2}{4} \cdot H_{fl} + \frac{\pi \cdot (D_{fl}^3 - d_{ouv}^3)}{24 \cdot \tan(co_{fl})}$ $H_{fl} = \frac{\left[ (g \cdot e_{fl} \cdot \rho_{fl}) \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \cdot \left( 1 + \frac{l}{\sin(co_{fl})} \right) - \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4 \cdot \sin(co_{fl})} \right) \right] + \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4} \cdot (P_{HP} - P_{BP}) - \frac{g \cdot \rho_p \cdot \pi \cdot (D_{fl}^3 - d_{ouv}^3)}{24 \cdot \tan(co_{fl})}}{\left( g \cdot \rho_p \cdot \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \right) - (g \cdot e_{fl} \cdot \rho_{fl} \cdot \pi \cdot D_{fl})}$ $M_{fl} = S_{fl} \cdot e_{fl} \cdot \rho_{fl}$
<b>P</b>	Faible		Forte	
<b>E</b>	Faible		Forte	
<b>P</b>	Faible		Forte	
<b>S</b>	Forte		Faible	

La figure 3.22 présente le BDF de niveau 4 pour les condenseurs de l'unité de condensation. Ce BDF fait apparaître 3 flux au niveau des condenseurs de l'unité de condensation: un flux de vapeur, un flux de liquide de refroidissement et un flux de condensats.

En faisant les hypothèses de pression constante dans l'enceinte des condenseurs (hypothèse simplificatrice), d'un coefficient d'échange global constant (hypothèse simplificatrice) et de vapeur saturée (hypothèse simplificatrice et spécialisée), ces trois flux sont caractérisés par les variables présentées dans les tableaux 3.18 et 3.19.



*Figure 3.22.* Bloc Diagramme fonctionnel de niveau 4 de l'unité de condensation.

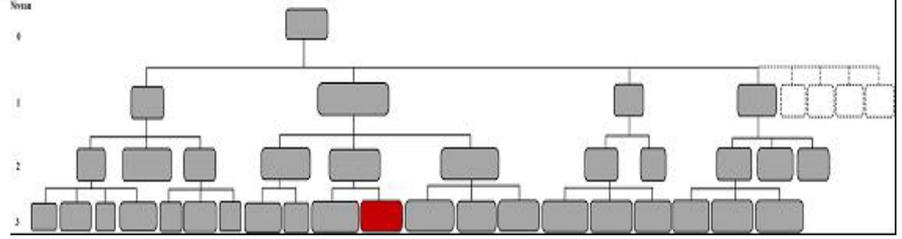
En ce qui concerne l'unité de gestion des condensats, le flux de condensats tombe par gravité dans un vase de récupération, qui permet d'assurer une hauteur suffisante pour le fonctionnement de la pompe à condensats. Cette pompe refoule le flux vers une cuve à pression atmosphérique à partir de laquelle il est possible d'extraire les condensats récupérés ou de les réinjecter dans la cuve haute pression pour faciliter l'évacuation du fluide traité. La modélisation physique de cette unité se limite donc à celle de la pompe à condensats, considérée comme un bloc fonctionnel standard. Les variables de conception correspondent donc à ses références dans le catalogue constructeur, comme pour la pompe d'extraction.

**Tableau 3.18.** Fiche Modèle de niveau 3 du condenseur haute pression du prototype industriel.

Niveau 3		Réf: Pind.2.2.1		CONDENSEUR HAUTE PRESSION		
Vco	Cr	VA	Modèle de composant			
Réf. Fournisseur	$k_{cd.HP}$	$S_{lrHP}$	<b>Flux de vapeur</b>	$q_{vHP} - q_{vHPs} - q_{cdstHP} = 0$		
$n_{HP}$		$S_{vHP}$		$\varphi_{vHP} = q_{vHP} \cdot \Delta h_{evap} \cdot (X_{veHP} - X_{vsHP})$		
$L_{HP}$		$A_{HP}$	<b>Flux de liquide de refroidissement</b>	$\varphi_{lrHP} = q_{lrHP} \cdot Cp_{lrHP} \cdot (T_{lrHP} - T_{reHP})$		
$l_{HP}$		$T_{lrHP}$				
$H_{lrHP}$		$T_{vHP}$				
$H_{vHP}$		$Cp_{lrHP}$	$NUT_{lrHP}$	<b>Flux de condensats</b>	$q_{cdstHP} = q_{vHP} (X_{veHP} - X_{vsHP})$	
$l_{lrHP}$		$\varepsilon_{lrHP}$	$NUT_{lrHP} = \frac{l}{1 - \varepsilon_{lrHP}} = \frac{k_{cd.HP} \cdot A_{HP}}{q_{lrHP} \cdot Cp_{lrHP}}; \quad \varepsilon_{lrHP} = \frac{T_{lrHP} - T_{lrHP}}{T_{lrHP} - T_{vHP}}$			
$l_{vHP}$		$h_{lrHP}$	$h_{v.cdHP}$	<b>Flux d'énergie thermique</b> (égalité des flux de matières)	$\frac{l}{k_{cd.HP}} = \frac{l}{h_{lrHP}} + \frac{l}{h_{v.cdHP}}$	
		$X_{veHP}$	$X_{vsHP}$		$h_{lrHP} = 0,031 \cdot G_{lrHP} \cdot Cp_{lrHP} \cdot Re_{lrHP}^{-0,2} \cdot Pr_{lrHP}^{2/3}$	
		$g$	$\lambda_{cdstHP}$		$h_{v.cdHP} = (-4,57310^4 \cdot T_{vHP} + 1,131) \cdot 1,47 \cdot \lambda_{cdstHP} \cdot Re_{cdstHP}^{-1/3} \left[ \frac{\mu_{cdstHP}^2}{\rho_{cdstHP} (\rho_{cdstHP} - \rho_{vHP}) \cdot g} \right]^{-1/3}$	
	$\rho_{cdstHP}$	$\rho_{vHP}$				
	$Re_{cdstHP}$					
	$\mu_{cdstHP}$					
			<b>Dimensionnement</b>	$S_{lrHP} = \frac{n_{HP}}{2} \cdot l_{lrHP} \cdot H_{lrHP}$		
				$S_{vHP} = (n_{HP} - 1) \cdot l_{vHP} \cdot H_{vHP}$		
				$A_{HP} = 2 \cdot n_{HP} \cdot L_{HP} \cdot l_{HP}$		
<b>P</b>	Faible		Forte			
<b>E</b>	Faible		Forte			
<b>P</b>	Faible		Forte			
<b>S</b>	Forte		Faible			

Tableau 3.19. Fiche Modèle de niveau 3 du condenseur basse pression du prototype industriel.

Niveau 3		CONDENSEUR BASSE PRESSION	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant
Réf. Fournisseur	$k_{cd.BP}$	$S_{lrBP}$	<b>Flux de vapeur</b> $q_{vBP} - q_{vBP_s} - q_{cdstBP} = 0$ $\varphi_{vBP} = q_{vBP} \cdot \Delta h_{evap} \cdot (X_{veBP} - X_{vsBP})$
$n_{BP}$	$A_{BP}$	$S_{vBP}$	<b>Flux de liquide de refroidissement</b> $\varphi_{lrBP} = q_{lrBP} \cdot Cp_{lrBP} \cdot (T_{lrsBP} - T_{lreBP})$
$L_{BP}$	$T_{lreBP}$	$q_{vBP}$	<b>Flux de condensats</b> $q_{cdstBP} = q_{vBP} (X_{veBP} - X_{vsBP})$
$l_{BP}$	$T_{lrsBP}$	$q_{cdstBP}$	<b>Flux d'énergie thermique</b> (égalité des flux de matières)  $NUT_{lrBP} = \frac{1}{1 - \varepsilon_{lrBP}} = \frac{k_{cd.BP} \cdot A_{BP}}{q_{lrBP} \cdot Cp_{lrBP}}; \quad \varepsilon_{lrBP} = \frac{T_{lreBP} - T_{lrsBP}}{T_{lreBP} - T_{vBP}};$  $\frac{1}{k_{cd.BP}} = \frac{1}{h_{lrBP}} + \frac{1}{h_{v.cd.BP}}$  $h_{lrBP} = 0,034 \cdot G_{lrBP} \cdot Cp_{lrBP} \cdot Re_{lrBP}^{-0,2} \cdot Pr_{lrBP}^{2/3}$  $h_{v.cdBP} = (0,0137 \cdot T_{vBP}^2 - 8,456 \cdot T_{vBP} + 1300,403) \times 1,47 \cdot \lambda_{cdstBP} \cdot Re_{cdstBP}^{-1/3} \cdot \left[ \frac{\mu_{cdstBP}^2}{\rho_{cdstBP} \cdot (\rho_{cdstBP} - \rho_{vBP}) \cdot g} \right]^{-1/3}$
$H_{lrBP}$	$T_{vBP}$	$Cp_{lrBP}$	
$H_{vBP}$	$Cp_{lrBP}$	$NUT_{lrBP}$	
$l_{lrBP}$	$\varepsilon_{lrBP}$	$h_{lrBP}$	
$l_{vBP}$	$h_{lrBP}$	$h_{v.cdBP}$	
	$X_{veBP}$	$X_{vsBP}$	
	$X_{vsBP}$	$g$	
	$g$	$\lambda_{cdstBP}$	
	$\lambda_{cdstBP}$	$\rho_{cdstBP}$	
	$\rho_{cdstBP}$	$\rho_{vBP}$	
	$\rho_{vBP}$	$Re_{cdstBP}$	
	$Re_{cdstBP}$	$\mu_{cdstBP}$	
	$\mu_{cdstBP}$		
			<b>Dimensionnement</b> $S_{lrBP} = \frac{n_{BP}}{2} \cdot l_{lrBP} \cdot H_{lrBP}$ $S_{vBP} = (n_{BP} - 1) \cdot l_{vBP} \cdot H_{vBP}$ $A_{BP} = 2 \cdot n_{BP} \cdot L_{BP} \cdot l_{BP}$
<b>P</b>	Faible		Forte
<b>E</b>	Faible		Forte
<b>P</b>	Faible		Forte
<b>S</b>	Forte		Faible

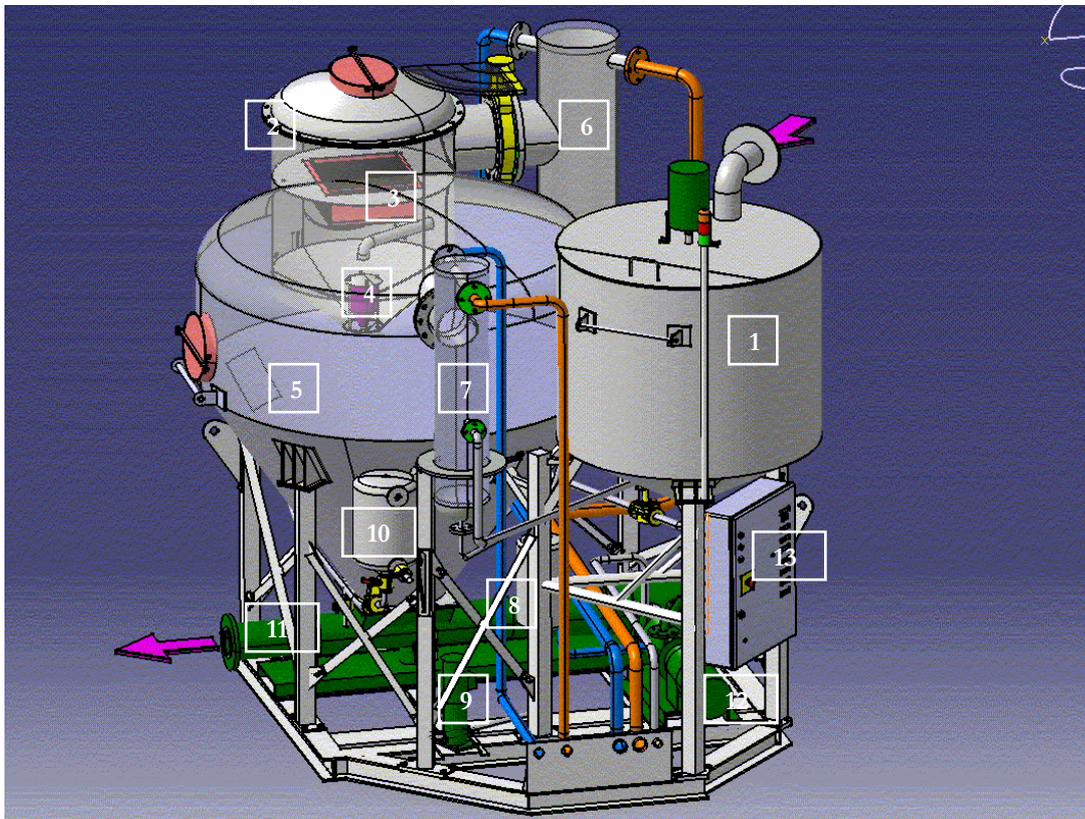


### 3-3.4.5 Synthèse du cas du prototype industriel.

Nous avons réalisé une étude complète d'un concept de prototype industriel, qui a permis d'aboutir à un modèle prenant en compte les contraintes liées au comportement physique du système, mais aussi celles liés à sa conception. Les graphes substances-champs et les fiches modèles non présentées dans ce chapitre sont disponibles en annexe B de ce document.

La figure 3.23 présente une maquette de ce prototype industriel, réalisée sous Catia V5, sur laquelle on distingue :

- la cuve tampon (1),
- la cuve de détente haute pression (2), dans laquelle le dévésiculeur (3) et le flotteur (4) sont intégrés,
- la cuve de détente basse pression (5),
- les condenseurs haute pression (6) et basse pression (7),
- le vase de récupération (8), la pompe à condensats (9) et la cuve à condensats (10),
- la pompe d'extraction (11), la pompe à vide couplée à un éjecteur à air (12) et l'automate programmable (13) permettant la régulation de l'ensemble.



*Figure 3.23.* Maquette du prototype industriel bi-étagé d'évaporation flash, réalisée sous Catia V5.

---

---

# CHAPITRE 4

---

---

**VALIDATION EXPERIMENTALE,  
QUALIFICATION ET  
EXPLOITATION DES MODELES**



## **4-1 INTRODUCTION**

Nous avons présenté, au chapitre précédent, l'application de la démarche de formalisation à trois cas d'évaporateurs flash bi-étagés, et notamment celui du prototype industriel. Les modèles qui ont été formalisés doivent être validés et qualifiés en terme d'aide à la décision avant de pouvoir être exploités.

La validation passe par la vérification de la complétude et de la cohérence du modèle, et la qualification suppose d'évaluer la pertinence des connaissances impliquées dans les modèles. Nous présentons ici la démarche adoptée pour la qualification des modèles, ainsi que son application au prototype industriel.

## **4-2 DEMARCHE DE QUALIFICATION DES MODELES**

L'étape de conception architecturale doit permettre, par le biais des modèles de conception, le choix entre différents concepts de solutions. Comme nous l'avons évoqué au chapitre 2, l'étape de qualification a pour objet d'évaluer l'aide apportée par les modèles de conception pour la prise de décision.

Il s'agit donc de pouvoir estimer la confiance que l'on peut mettre dans les choix faits à partir des résultats de ces modèles, donc de qualifier les connaissances qu'ils impliquent afin de prendre des décisions à partir des résultats fournis par l'exploitation du modèle, en connaissant la part de risque liée à ces décisions. Cette qualification se fait relativement aux critères d'appréciation du besoin, de manière à savoir s'il est atteint, et avec quel degré de satisfaction.

L'opération de qualification d'un modèle consiste, pour nous, à estimer la valeur des quatre paramètres de Parcimonie, d'Exactitude, de Précision et de Spécialisation ou PEPS, présentés au chapitre 2, afin d'évaluer le caractère exploitable des modèles pour l'aide à la décision.

La méthodologie d'évaluation des paramètres de PEPS a été proposée par [Ver04]. Nous en rappelons ici les principaux points.

### 4-2.1 Estimation de la Parcimonie.

La Parcimonie est définie comme un élément caractérisant la capacité d'un modèle à décrire le comportement du système qu'il représente avec un nombre minimum de relations et de variables. Nous avons donc choisi d'estimer la parcimonie d'un modèle exprimé sous forme de Problème de Satisfaction de Contraintes comme étant l'inverse du nombre de relations et de variables impliquées dans ce modèle, soit :

$$Pa = \frac{I}{n_{rel} + n_{var}} \quad (4.1)$$

Cette procédure d'estimation de la parcimonie présente l'avantage d'être simple à appliquer et de permettre une comparaison rapide entre différents modèles. Néanmoins, elle n'est pas adaptée à d'autres types de modèles que ceux exprimés à l'aide de relations algébriques. Elle ne permet donc que la comparaison entre ce type de modèles.

De plus, l'estimation du nombre d'équations est intimement liée à la formalisation, qui peut varier pour un même modèle. Il est donc important d'associer à cette procédure d'estimation de la parcimonie, une notion de minimisation des variables intermédiaires allégeant l'écriture des relations.

### 4-2.2 Estimation de l'Exactitude.

L'exactitude est définie, pour nous, comme une mesure de la distance entre l'espace de solutions du modèle et un comportement de référence. Cette définition suppose d'explicitier l'espace de solution, la référence et son comportement, ainsi que le mode de mesure de l'écart entre les deux.

L'objectif principal de la modélisation est de permettre un choix entre différentes solutions, caractérisées par des combinaisons de variables de conception (VCo), en se basant sur l'évaluation de critères (Cr). Ceux sont ces critères qui, par comparaison avec des valeurs de référence, vont permettre de vérifier l'exactitude d'un modèle.

Parallèlement, il convient de définir les points de l'espace de solution pour lesquels ces Cr seront comparées aux valeurs de référence. Nous avons choisi, pour cela, d'utiliser la stratégie des plans d'expériences, notamment des plans d'expériences numériques, qui permettent de sélectionner des combinaisons de points limitant au maximum les erreurs de mesures.

Le choix des valeurs de référence se fait sur la base de l'expertise du concepteur parmi les critères d'appréciation du cahier des charges.

La mesure de l'écart entre valeurs de référence et résultats du modèle peut se faire à une échelle locale ou à une échelle globale. Une évaluation globale ayant tendance à minimiser l'influence

des valeurs extrêmes, nous avons choisi de mesurer cette distance par le biais d'un calcul de l'erreur maximale à l'échelle locale :

$$E_M = \max_i |\tilde{X}_i - X_i|, \quad (4.2)$$

où  $\tilde{X}_i$  représente la valeur en un point "i" de l'espace de solutions et  $X_i$  est la valeur de la grandeur de référence à comparer à  $\tilde{X}_i$ .

Cette méthode présente également l'avantage de permettre une évaluation dans un contexte imprécis, en ne considérant plus  $\tilde{X}_i$  et  $X_i$  comme des valeurs, mais comme des intervalles de valeurs.

L'estimation de l'exactitude d'un modèle suppose donc:

- la définition d'une référence,
  - la définition des variables de comparaison pour le modèle (Critères) et pour la référence,
  - la définition, par le biais de plans d'expériences si nécessaire, des points de l'espace de solutions qui serviront de point d'évaluation,
  - le calcul de l'erreur maximale pour chaque variable de comparaison.

### 4-2.3 Estimation de la Précision.

Nous définissons la précision d'un modèle comme l'étendue du domaine des valeurs possibles pour une variable donnée. La précision est donc à dissocier de l'exactitude, puisqu'elle est une mesure de la justesse avec laquelle le résultat est déterminé, sans lien avec une valeur de référence.

L'imprécision d'un modèle peut être due à l'incertitude sur les valeurs de certaines variables ou à l'incertitude sur une relation entre plusieurs variables. Les Critères (Cr) étant considérés comme les variables de sortie du modèle, nous avons choisi d'évaluer la précision d'un modèle par la fluctuation des valeurs des Cr associés aux variables sources d'imprécision.

La précision correspond donc à une mesure de la longueur de l'intervalle des valeurs possibles pour des Cr continus, et au cardinal du domaine de variation pour des Cr discrets.

L'estimation de la précision se fait donc par :

- l'identification des variables source d'imprécisions dans les résultats du modèle,
- le choix des critères qui serviront de variables de calcul,
- la définition des points de calcul dans l'espace de solutions,

- le calcul de la précision pour chaque variable de calcul choisie.

#### 4-2.4 Estimation du niveau de Spécialisation.

La spécialisation d'un modèle caractérise l'ensemble des hypothèses et des informations qui restreignent la généralité de son utilisation. Bien qu'étant indépendantes, la décomposition en niveaux de modélisation et les hypothèses émises pour la formulation du modèle contribuent à diminuer son champ d'application, donc à augmenter sa spécialisation.

La spécialisation d'un modèle sera donc caractérisée par le niveau systémique le plus bas utilisé pour sa formalisation, et par les hypothèses les plus restrictives auxquelles il est associé, en terme de généralité d'utilisation.

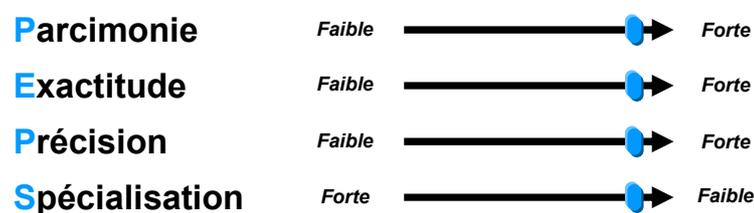
L'estimation proposée n'est pas chiffrée. Elle est qualitative et subjective. Elle permet de départager des modèles ayant des niveaux équivalents pour les trois autres paramètres.

#### 4-2.5 Qualification des modèles.

Bien que l'estimation de chacun des paramètres soit indépendante, la qualification d'un modèle passe par une analyse globale des quatre paramètres de Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation. Un modèle de conception architecturale idéal est un modèle :

- très parcimonieux, pour permettre un traitement rapide et peu coûteux,
- très exact, pour être le plus proche possible du comportement réel,
- très précis, pour minimiser le risque lié à la décision,
- très peu spécialisé, pour couvrir au maximum l'espace de conception.

Pour illustrer cette caractéristique, nous avons choisi de représenter le PEPS d'un modèle par quatre curseurs, à l'instar de la figure 4.1.



*Figure 4.1.* Schéma de représentation du PEPS d'un modèle de conception architecturale idéal [Ver04].

## **4-3 VALIDATION ET QUALIFICATION DU MODELE PHYSIQUE**

Nous avons vu précédemment que l'utilisation d'un modèle dans un outil d'aide à la décision suppose que celui-ci soit validé et que les connaissances auxquelles il fait référence soient qualifiées.

Pour ce qui est du modèle physique traduisant le comportement du système, la qualification passe par la validation expérimentale des principales hypothèses sur lesquelles il repose, ainsi que des résultats auxquels il conduit, en comparant les critères de qualification choisis à des valeurs de référence. Dans notre cas, les valeurs de référence sont issues de résultats d'essais réalisés sur le prototype 2003.

### **4-3.1 Présentation du dispositif expérimental.**

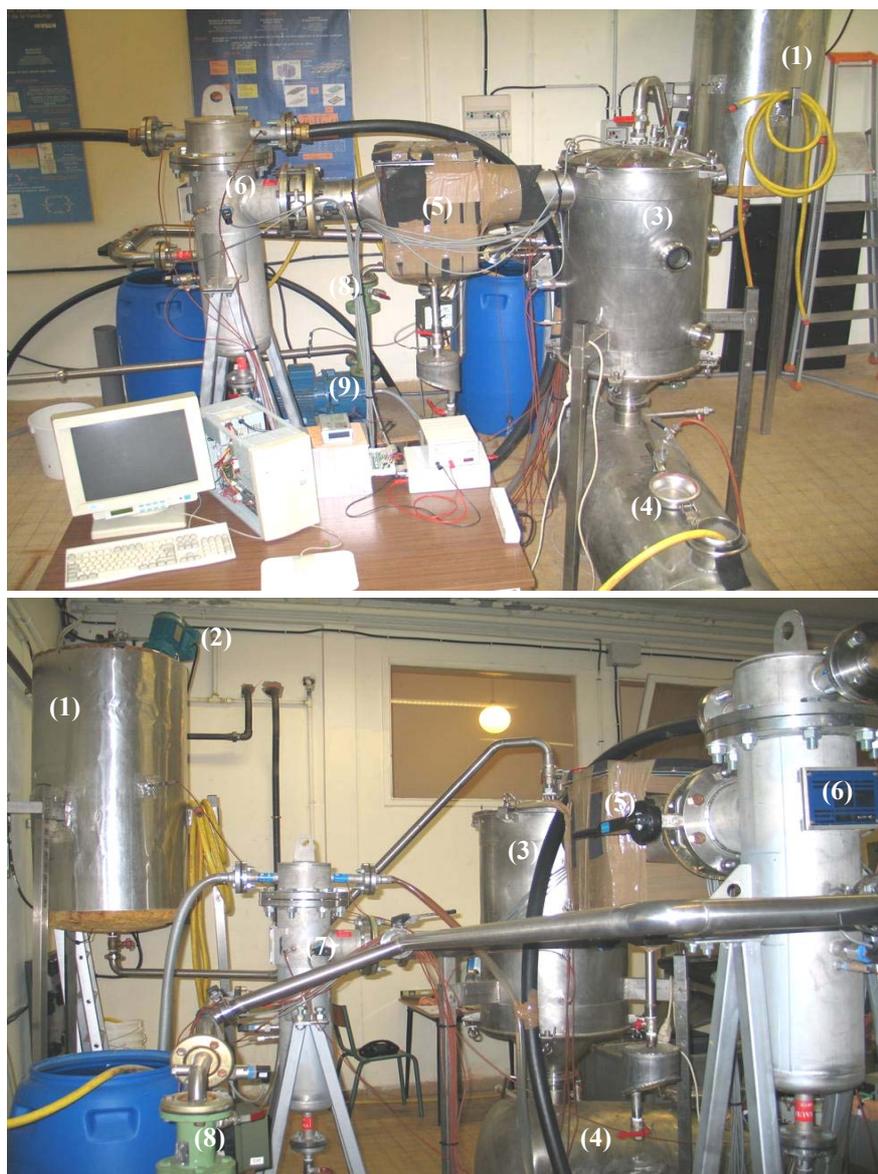
Le dispositif expérimental correspond à la description du pilote 2003, proposée au chapitre précédent. Il est présenté sur la figure 4.2.

La cuve de chauffe (1) est une cuve cylindrique dont l'isolation est assurée par une épaisseur de laine de roche et une paroi fine en aluminium. Le chauffage est assuré par une résistance électrique, et un mélangeur (2) permet d'homogénéiser la température de chauffe. L'unité de détente (3) est composée d'une cuve séparée en deux par une partie conique perforée en son centre. Ce trou est obturé par un cône, relié à un flotteur. L'ensemble assure la séparation entre les 2 étages de détente en exploitant le principe d'Archimède. Le fluide traité tombe ensuite par gravité dans la cuve de récupération (4) située en dessous de la cuve de détente.

L'unité de traitement des vapeurs comporte un dévésiculateur à lames (5) relié d'un côté à l'étage haute pression de la cuve de détente, et de l'autre à un condenseur à plaques matelassées vertical (6) qui assure la condensation de la vapeur issue de l'étage. La vapeur formée dans l'étage basse pression est condensée par un second condenseur à plaques matelassées vertical (7), de plus petite taille, qui peut être relié en parallèle ou en série avec le condenseur de l'étage haute pression.

L'unité de vide est constituée d'un éjecteur à air (8) couplé à une pompe à vide à anneau liquide (9), qui sont reliés au reste du système et permettent sa mise sous vide et l'évacuation des incondensables pour un maintien du vide.

La commande se fait manuellement, par le biais de vannes situées aux points de fonctionnement du système (cf. Figure 3.14). Les fiches techniques relatives au mélangeur, au dévésiculateur et aux condenseurs sont disponibles en annexe C de ce document.



*Figure 4.2.* Vues de face et de côté du dispositif expérimental (pilote 2003).

### 4-3.2 Déroulement des essais.

La mise en place des nouveaux condenseurs verticaux, par rapport au pilote 2000 [Bou03], a nécessité une mise au point qui a duré environ 9 mois :

- délais liés aux autorisations de travaux pour l'installation de nouvelles arrivées d'eau pour l'alimentation en eau de refroidissement des condenseurs,
- délais de réception des différentes pièces d'adaptation du système (tuyauteries, vannes, mise en forme),

- tests de mise au point du fonctionnement du nouveau système.

La mise au point du nouveau pilote, l'installation des nouveaux éléments, ainsi que les différents essais ont été réalisés avec l'aide précieuse de Dimitri Jaupart, technicien à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) de Bordeaux et au laboratoire TREFLE.

Le protocole de réalisation des essais est présenté en annexe D de ce document. Le fluide à traiter (de l'eau pour les essais réalisés), est préalablement chauffé à une température comprise entre 60 et 90 °C. L'essai débute par la mise sous vide du système, jusqu'à ce que la cuve de détente atteigne une pression comprise entre 25 et 30 mbar.

La vanne d'alimentation à l'entrée de l'étage haute pression est alors ouverte. Le fluide chaud y est aspiré dans l'enceinte et subit une vaporisation violente, le faisant passer presque instantanément à une température d'environ 40 °C. La pression dans l'étage augmente alors jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre d'environ 100 mbar. Le fluide refroidi s'accumule dans le fond de l'étage haute pression jusqu'à atteindre un niveau qui actionne le flotteur, sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il passe alors dans l'étage basse pression où il subit une seconde détente, moins violente, le ramenant à une température comprise entre 25 et 30°C, pour une pression de l'ordre de 40 mbar.

Lors des tests de mise au point du pilote, nous avons constaté un retour du flux de vapeur issu du condenseur haute pression vers le condenseur basse pression, lorsque ceux-ci étaient reliés en parallèle. Tous les résultats présentés sont donc relatifs à des essais réalisés avec les condenseurs en série.

Les différents essais ont été menés sur la base de mesures de pressions, de températures et de débits dans l'ensemble du système. Les capteurs utilisés sont:

- des thermocouples chemisés de type T pour la température, d'une précision de 0,5 °C pour gamme de mesure comprise entre -45 et 125 °C.
- des capteurs de pression passifs à chambre piézoélectrique d'une gamme de mesure de [0-200] mbar pour l'étage haute pression et de [0-100] mbar pour l'étage basse pression. Leurs précisions sont de 1 % de la borne supérieure de gamme de mesure.
- un débitmètre à vapeur mesurant des débits de vapeur allant de 36 à 360 m<sup>3</sup>/h et dont la précision est de 1,6% du débit maximum mesuré.

L'ensemble de ces capteurs est relié à un système d'acquisition composé d'un PC (UC : 250 Mhz, Ram : 64 Mo) et d'une centrale d'acquisition *SCXI National Instrument* à 32 voies.

Pour chaque essai réalisé, les températures et pressions aux différents points de fonctionnement ont été relevées, ainsi que les volumes de condensats pour chaque étage et le volume de gouttes récupérées au dévésiculeur.

Les figures 4.3 et 4.4 présentent l'allure des relevés de températures, de pressions et du débit de vapeur en entrée de l'éjecteur réalisés pour un essai.

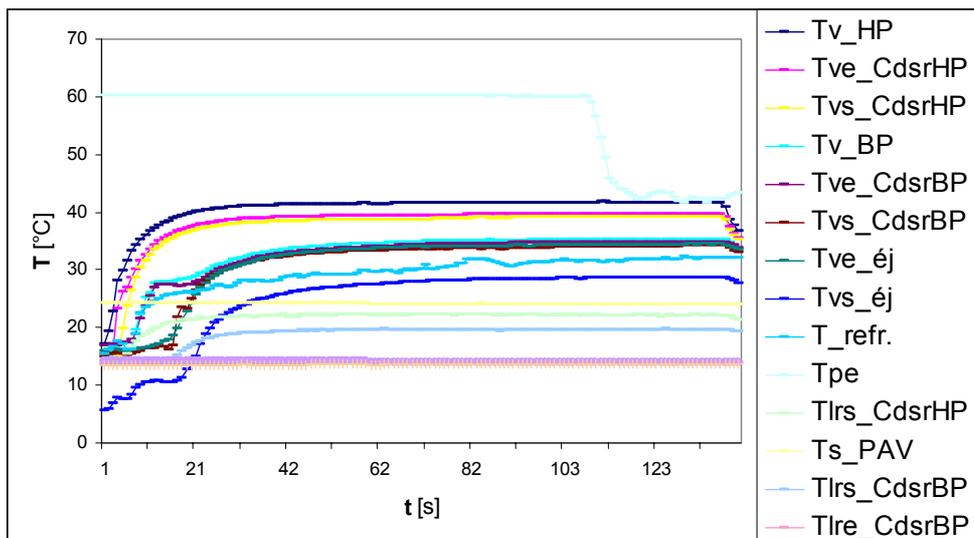


Figure 4.3. Températures relevées lors du fonctionnement du pilote 2003.

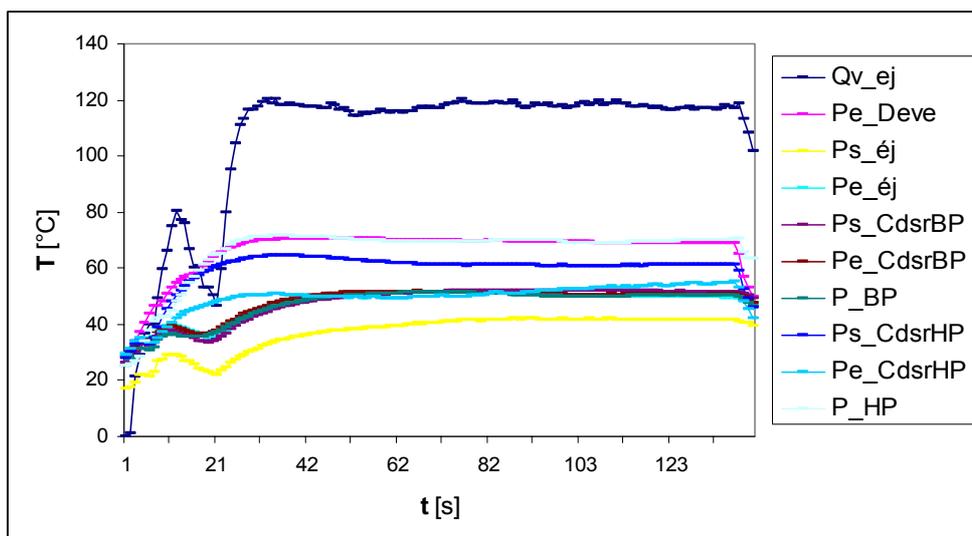


Figure 4.4. Débit de vapeur et pressions relevées lors du fonctionnement du pilote 2003.

Du fait de sa masse thermique, essentiellement due aux matériaux de constitution, le système passe par une période transitoire pendant laquelle les températures, pressions et débits augmentent de manière exponentielle. Après environ 50 secondes, le système s'équilibre à des valeurs quasi-constantes, qui sont seules prises en compte pour l'identification des variables expérimentales.

Le travail de validation et de qualification du modèle physique est présenté en deux étapes. La première étape consiste à valider les hypothèses liées à son écriture. Dans les graphes présentés, chaque point représente la valeur moyenne de la grandeur considérée pour un essai réalisé.

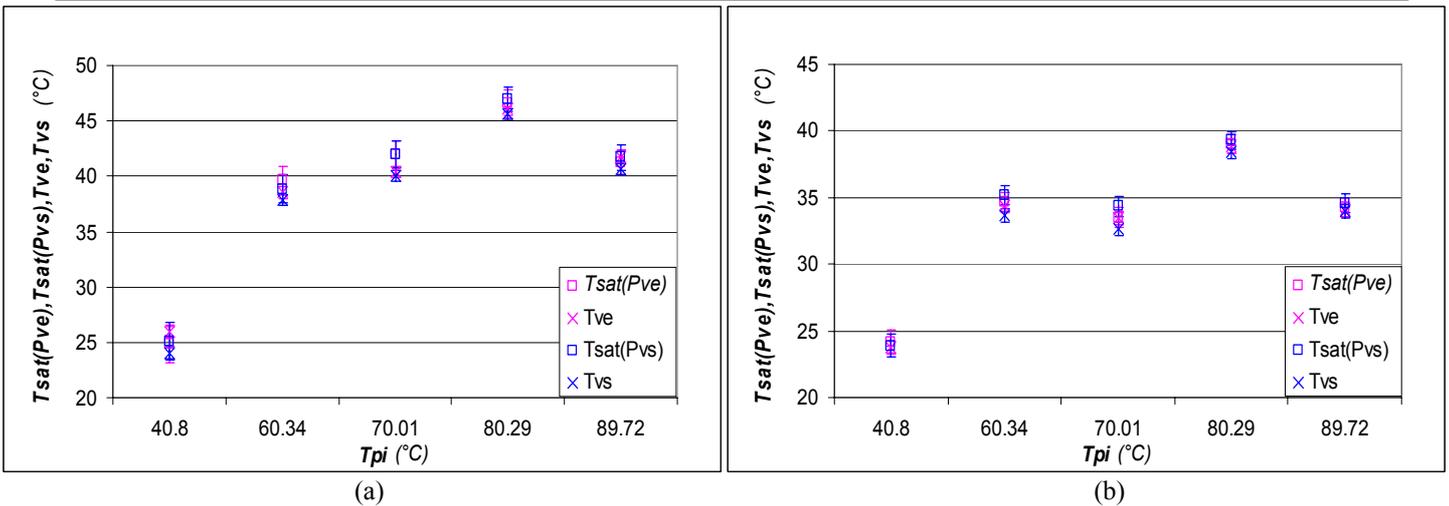
La seconde étape concerne l'analyse en terme de parcimonie, exactitude, précision et spécialisation des critères de qualification qui lui sont associés. L'outil de traitement que nous utilisons est *Constraint Explorer* (CE), présenté au chapitre 2.

### **4-3.3 Validation des hypothèses.**

Lors de la formulation du modèle physique au chapitre précédent, nous avons fait un certain nombre d'hypothèses liées au fonctionnement du système, qu'il convient de valider expérimentalement pour justifier son utilisation.

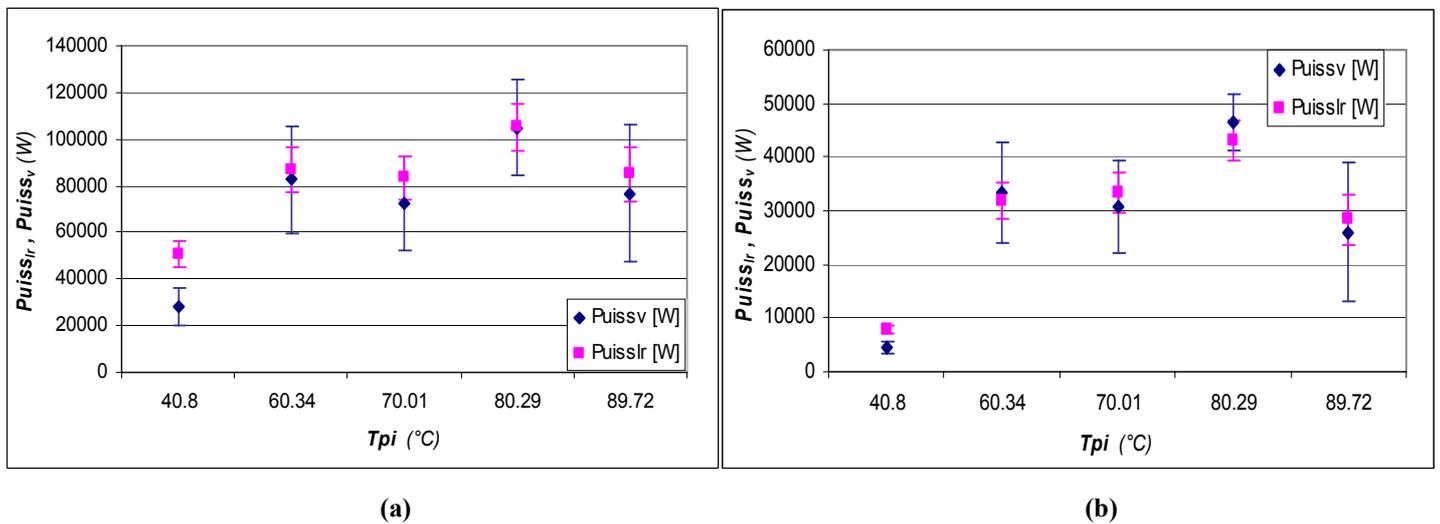
La première hypothèse sur laquelle repose les modèles physiques que nous utilisons est celle de vapeur saturée. Nous supposons en effet que, du fait de la forme des cuves, la surchauffe de la vapeur est négligeable, et que celle-ci est quasiment à l'état de saturation [Seb02]. Pour valider cette hypothèse, nous avons comparé les températures de saturation correspondant aux pressions relevées par les capteurs, aux températures mesurées par les thermocouples, pour l'ensemble des essais réalisés. Cette comparaison a été effectuée pour tous les points de fonctionnement identifiés lors du fonctionnement du système. La figure 4.5 présente les températures de saturation correspondant aux pressions mesurées et les températures relevées par les thermocouples aux entrées et sorties des condenseurs, en fonction de la température de chauffe du fluide.

Les températures mesurées et calculées étant quasiment égales, aux incertitudes de mesure près. L'hypothèse de saturation de la vapeur est donc validée. Cette comparaison permet, en outre, de valider également l'hypothèse de pertes de charges négligeables dans les condenseurs, puisque les températures de saturation calculées à partir des pressions en entrée/sortie des condenseurs sont elles aussi quasiment égales.



**Figure 4.5.** Températures mesurées par les thermocouples ( $T_{ve}, T_{vs}$ ) et températures de saturation calculées à partir des mesures de pression ( $T_{sat}(P_{ve}), T_{sat}(P_{vs})$ ) en entrée et sortie des condenseurs haute (a) et basse (b) pression, en fonction de la température de chauffe du fluide.

La seconde hypothèse qui a permis la modélisation du transfert de chaleur dans les condenseurs est que toute l'énergie libérée pendant la condensation de la vapeur est transmise au liquide de refroidissement. Cette hypothèse est vérifiable en comparant les puissances des condenseurs côté vapeur et côté liquide de refroidissement. La Figure 4.6 présente l'évaluation de ces puissances pour différentes températures de chauffe, ainsi que les incertitudes liées à cette évaluation (incertitudes de mesure sur les débits et températures).



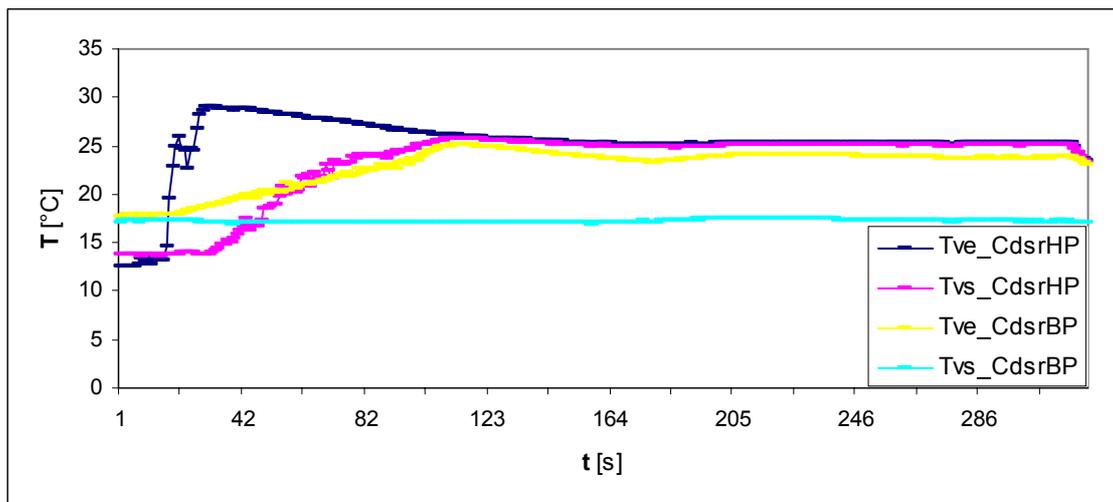
**Figure 4.6.** Puissance générée par la condensation ( $P_{uiss_v}$ ) et puissance transmise au liquide de refroidissement ( $P_{uiss_{lr}}$ ) en fonction de la température de chauffe du fluide, pour les condenseurs haute (a) et basse (b) pression.

Nous constatons que la puissance générée par la condensation de la vapeur est quasiment égale à celle transmise au liquide de refroidissement, hormis dans le cas où la température de chauffe est de l'ordre de 40 °C.

Pour un débit de vapeur réel très faible, comme c'est le cas ici, nous avons pu observer que les températures relevées par les capteurs en sortie des condenseurs étaient inférieures aux valeurs réelles de saturation. La vapeur sortant des condenseurs est aspirée par la pompe à vide. Dès lors que le taux de vapeur est très faible, la température relevée par le thermocouple tarde à atteindre la valeur réelle, d'où une sous évaluation du débit de vapeur par le biais du bilan énergétique de près de moitié.

En considérant la valeur de la puissance libérée par la condensation de la vapeur supérieure d'environ 50% dans le cas de faibles débits de vapeur, l'hypothèse de pertes d'énergie à travers la calandre des condenseurs négligeables est alors vérifiée.

La figure 4.7 présente l'évolution des températures de vapeur relevées par les thermocouples en entrée et en sortie des condenseurs haute et basse pression au cours de l'essai réalisé avec une température d'entrée du fluide à traiter de  $T_{pe} = 40,8$  °C. Nous constatons que les températures en sortie des condenseurs tardent à atteindre la valeur de saturation, correspondant aux températures en entrée.



**Figure 4.7.** Evolution des températures de vapeur en entrée/sortie des condenseurs haute pression (cdsrHP) et basse pression (cdsrBP) au cours de l'essai réalisé avec  $T_{pe}=40,8$  °C.

Dans le cas du condenseur basse pression, où le taux de vapeur en sortie est très faible, la température en sortie reste bloquée à sa valeur initiale, sans présence de vapeur. Ces observations confirment l'hypothèse de sous évaluation du débit de vapeur dans le cas de débits réels faibles, surtout si l'on se réfère au tableau 4.1 présentant les moyennes de ces températures, qui ont servi à l'évaluation du débit de vapeur.

**Tableau 4.1.** Valeurs moyennes des températures d'entrée et de sortie de la vapeur aux condenseurs haute et basse pression pour l'essai réalisé à  $T_{pe} = 40,8$  °C.

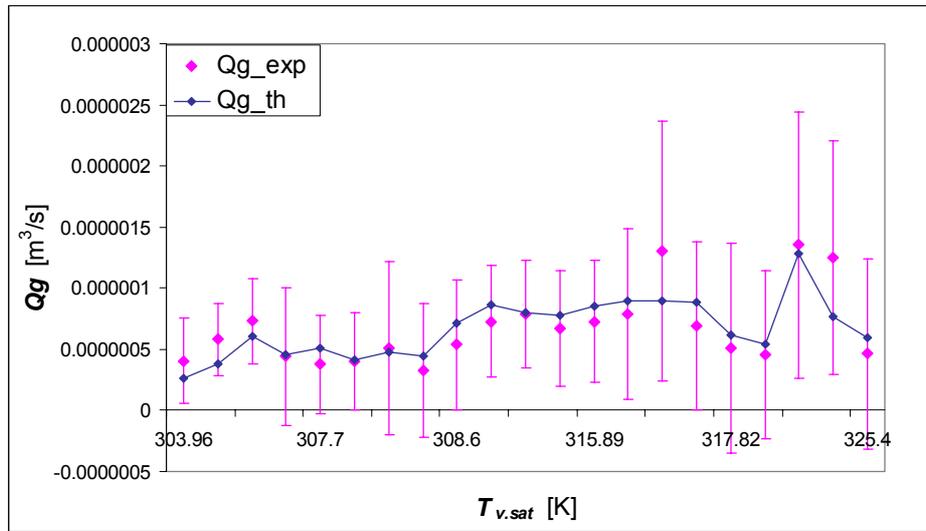
Tve_CdsrHP	Tvs_CdsrHP	Tve_CdsrBP	Tvs_CdsrBP
Valeurs moyennes			
25,95	24,05	23,34	17,18
Variances			
1,32	6,14	1,95	0,03

Les deux principales hypothèses sur lesquelles se base le modèle physique que nous avons développé sont donc ici validées expérimentalement. La partie du modèle relative au comportement physique peut donc être exploitée et comparée aux valeurs issues des essais.

#### 4-3.4 Qualification du modèle physique.

La qualification des modèles est basée sur la comparaison des critères de qualification aux valeurs issues des essais. Nous avons mis en œuvre, au chapitre précédent, la méthodologie qui a permis la formulation du modèle physique pour les évaporateurs flash. Ce modèle est relatif aux différents flux de matières et d'énergies circulant entre l'unité de détente et l'unité de condensation.

Le phénomène de flash, à l'origine du flux de vapeur a été modélisé par un bilan enthalpique, dont l'utilisation a été validée par les travaux de Sébastien et al. [Seb02] et de Bouchama [Bou03]. Le débit de gouttes récupérées par le dévésiculateur a été modélisé expérimentalement, en fonction du débit et de la température de la vapeur. La figure 4.8 présente les résultats de la comparaison entre le débit de gouttes issu des mesures expérimentales et celui issu du modèle. Les incertitudes sur les valeurs expérimentales ont été évaluées en tenant compte des incertitudes de mesure du volume (volume relevé au bécher) et du temps (temps relevé au chronomètre).

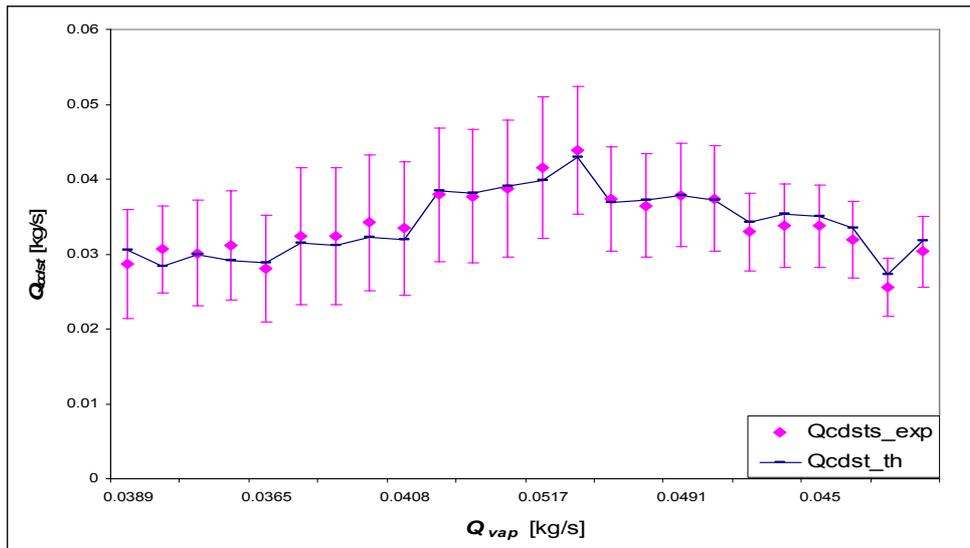


**Figure 4.8.** Débits de gouttes relevées au dévésiculateur expérimental et théorique en fonction de la température de saturation.

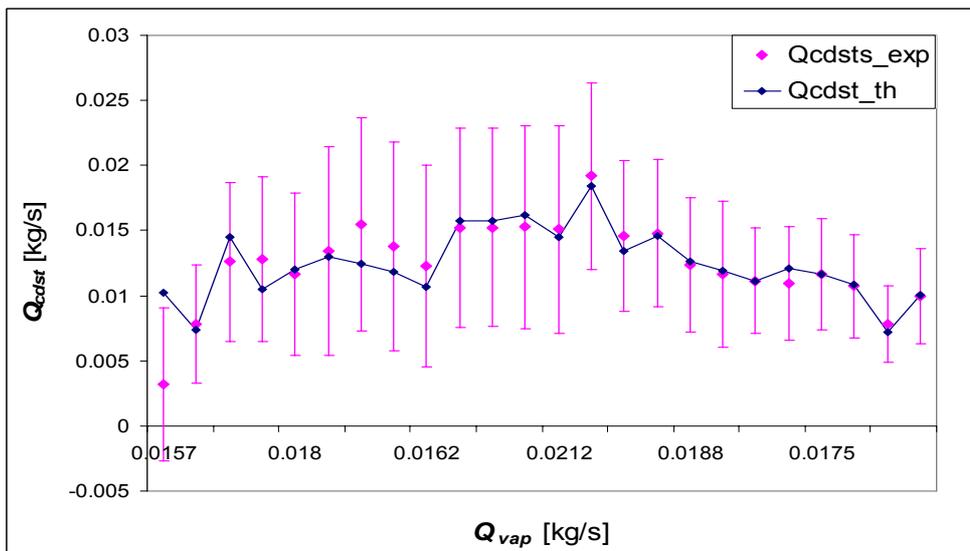
Le débit de gouttes théorique est exprimé comme une fonction du débit et de la température de la vapeur dans l'étage haute pression. Les valeurs théoriques et expérimentales, représentées en fonction de la température de saturation de la vapeur, suivent globalement la même évolution : les valeurs ont tendance à augmenter avec la température de la vapeur. Le volume de gouttes récupéré dépend donc de la température et du débit de la vapeur formée. Etant donné la relation définissant le débit de vapeur dans la cuve de détente, le volume de gouttes récupérées au dévésiculateur sera d'autant plus important que la température d'entrée du fluide à traiter sera élevée et que sa chaleur latente de vaporisation sera faible.

En condensant les vapeurs, les condenseurs créent un effet de vide qui constitue un effet moteur dans le fonctionnement du système. Nous nous intéresserons donc plus particulièrement au flux circulant au niveau des condenseurs. L'étude précédemment effectuée a permis d'identifier un flux de vapeur, un flux de condensats et un flux d'énergie thermique au niveau de ces composants.

Les figures 4.9 et 4.10 présentent l'évolution des débits de condensats expérimental et théorique au niveau des condenseurs haute et basse pression. Ces évolutions sont représentées en fonction du débit de vapeur. La précision des valeurs expérimentales tient compte des incertitudes de mesure sur les débits de condensats (durée de l'essai, volume récupéré).



**Figure 4.9.** Valeurs expérimentales et théoriques du débit de condensats en fonction du débit de vapeur expérimental pour le condenseur haute pression.



**Figure 4.10.** Valeurs expérimentales et théoriques du débit de condensats en fonction du débit de vapeur expérimental pour le condenseur basse pression.

Les débits théoriques sont exprimés comme des fonctions polynomiales de degré 3 du débit de vapeur. Nous retrouvons bien une évolution similaire entre les valeurs expérimentales et théoriques. Ceci confirme le fait que le coefficient d'échange moyen en condensation, lui-même fonction du débit de condensat, dépend du débit de vapeur.

Les critères de qualification qui sont associés au modèle physique des condenseurs sont les coefficients d'échange moyens en condensation. Il s'agit donc ici, pour qualifier le modèle physique, de comparer les coefficients d'échange en condensation obtenus à partir de modèles théoriques à ceux issus des valeurs expérimentales.

Le coefficient d'échange expérimental a été évalué en utilisant un modèle algébrique réduit de type NUT- $\varepsilon$ , obtenu en partant de l'échelle d'un élément différentiel du condenseur pour remonter à l'échelle du composant [Bou03].

En effet, l'équation de conservation de l'énergie à l'échelle du condenseur s'écrit :

$$q_v \cdot \Delta h_{evap} \cdot (X_{ve} - X_{vs}) = q_{lr} \cdot Cp_{lr} \cdot (T_{lrs} - T_{lre}) \quad (4.3)$$

où  $X_{ve}$  et  $X_{vs}$  représentent le titre de vapeur en entrée et en sortie du condenseur,  $q_v$  le débit moyen de vapeur entrant dans le condenseur,  $\Delta h_{evap}$  la chaleur latente de vaporisation,  $q_{lr}$  le débit moyen de liquide de refroidissement,  $Cp_{lr}$  la capacité calorifique du liquide de refroidissement et  $T_{lre}$  et  $T_{lrs}$  sont les températures d'entrée et de sortie du liquide de refroidissement.

L'hypothèse de saturation de la vapeur ayant été vérifiée, le titre de vapeur en entrée du condenseur est maximal, soit  $X_{ve}=1$ . Si, d'autre part, nous considérons que la condensation de la vapeur n'est pas totale, nous pouvons écrire que  $X_{vs}=q_{vs}/q_{ve}$ . Ainsi, en remplaçant  $X_{ve}$  et  $X_{vs}$  par leur expression dans l'équation 4.3, et en divisant le tout par  $(T_{v.sat} - T_{lre})$ , nous arrivons à l'équation 4.4 :

$$\frac{T_{lrs} - T_{lre}}{T_{v.sat} - T_{lre}} = \frac{q_v \Delta h_{evap} \left(1 - \frac{q_{vs}}{q_{ve}}\right)}{q_{lr} Cp_{lr} (T_{v.sat} - T_{lre})} \quad (4.4)$$

où  $\frac{T_{lrs} - T_{lre}}{T_{v.sat} - T_{lre}} = \varepsilon_{lr}$  représente l'efficacité de chauffage du liquide de refroidissement.

Parallèlement, le transfert de chaleur à travers une plaque du condenseur s'écrit :

$$q_{lr} Cp_{lr} dT_{lr} = k_{cd} (T_{v.sat} - T_{lr}) dA \quad (4.5)$$

En intégrant l'équation 4.5 sur l'ensemble des plaques et en introduisant la définition du Nombre d'Unités de Transferts (équation 4.6), nous aboutissons à l'équation 4.7, reliant les températures d'entrée/sortie du condenseurs au coefficient global d'échange :

$$\ln\left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{lr}}\right) = NUT_{lr} \quad (4.6)$$

$$NUT_{lr} = \ln\left(\frac{T_{v.sat} - T_{lre}}{T_{v.sat} - T_{lrs}}\right) = \frac{k_{cd} A}{q_{lr} Cp_{lr}} \quad (4.7)$$

$$\text{avec } k_{cd} = \frac{h_{lr,cv} h_{v,cd}}{h_{lr,cv} + h_{c,vd}} \quad (4.8)$$

Il est ainsi possible de déduire des mesures de températures une valeur expérimentale du coefficient d'échange global en condensation. Connaissant la valeur du coefficient d'échange du côté du liquide de refroidissement, nous pouvons alors déduire une valeur expérimentale du coefficient d'échange local en condensation.

Les équations 4.9 et 4.10 présentent les corrélations utilisées pour l'évaluation du coefficient d'échange moyen côté liquide de refroidissement pour les condenseurs haute et basse pression respectivement. Ces corrélations ont été obtenues à partir de données fournies par Kapp France, fournisseur des condenseurs :

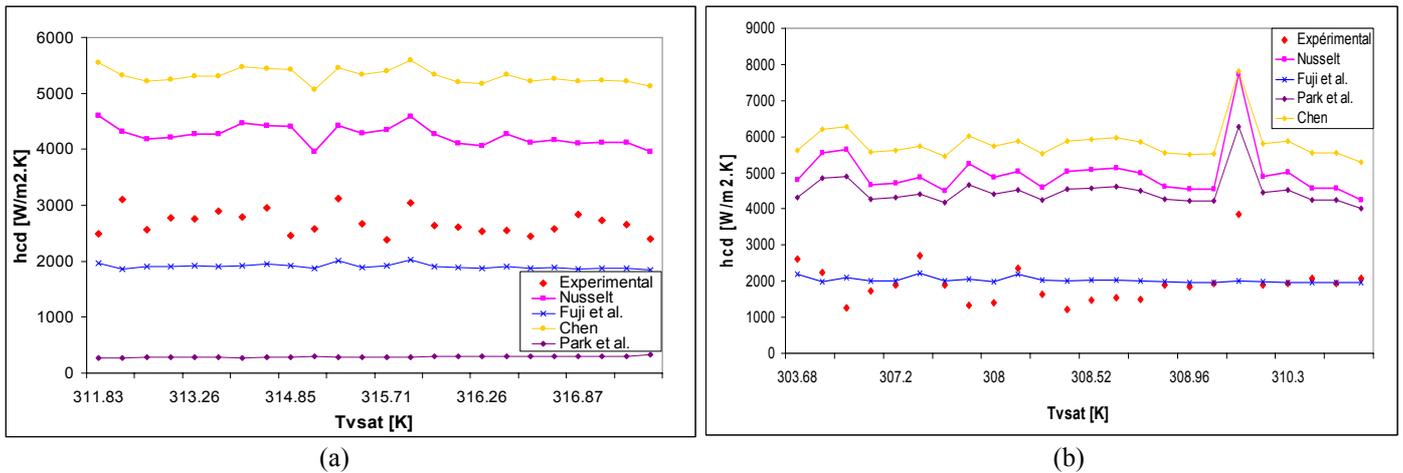
$$h_{lr,cv} = 0,031 \cdot Re_{lr}^{-0,2} \cdot G_{lr} \cdot Cp_{lr} \cdot Pr_{lr}^{-2/3} \quad (4.9)$$

$$h_{lr,cv} = 0,034 \cdot Re_{lr}^{-0,2} \cdot G_{lr} \cdot Cp_{lr} \cdot Pr_{lr}^{-2/3} \quad (4.10)$$

Pour le coefficient d'échange moyen côté vapeur et film de condensat, différentes corrélations, valables pour la condensation de vapeur sur une paroi plane verticale, ont été testées [Del90, Fuj72, Par96, Che61]. Ces corrélations sont présentées en annexe E. La Figure 4.11 présente les résultats de cette comparaison pour les condenseurs haute (a) et basse (b) pression.

L'écart observé entre les valeurs expérimentales et celles issues des modèles théoriques de Nusselt, Chen et Park et al. est due à la présence d'air, qui constitue un film incondensable créant une résistance thermique au transfert de chaleur entre la vapeur et le liquide de refroidissement. Le coefficient d'échange local en est donc diminué [Chu04].

Pour la corrélation de Fujii et al. [Fuj72], les résultats obtenus sont plus proches des valeurs expérimentales, en ordre de grandeur, mais les variations ne sont pas similaires.



**Figure 4.11.** Coefficients d'échange locaux obtenus pour différentes corrélations pour la condensation dans les condenseurs haute pression (a) et basse pression (b).

Lors de leurs travaux sur la condensation d'un mélange vapeur et incondensables le long d'un tube vertical, Kuhn et al. [Kuh97] ont comparé trois méthodes d'évaluation du coefficient d'échange en condensation à partir de valeurs expérimentales :

- celle du facteur de dégradation, qui est le rapport entre le coefficient d'échange expérimental et celui issu de la théorie de Nusselt, inspirée des travaux de Peterson et al. en 1933, Vierow et Schrock en 1991 et Siddique en 1992,
- celle de la théorie de la couche de diffusion, considérant l'interface entre le film de condensat et la couche formée par les incondensables comme une résistance thermique supplémentaire, inspirée des travaux de Siddique et al. en 1994, qui ont abouti à un facteur de 1,28 pour la corrélation de Nusselt,
- celle de la conductance de transfert de masse, qui utilise une analogie entre les transferts de chaleur et ceux de masse.

Ces trois méthodes s'étant avérées équivalentes, nous avons choisi d'adopter la méthode du facteur de dégradation pour évaluer le coefficient d'échange moyen en condensation à partir du modèle de Nusselt tenant compte de la production linéaire de condensat [Del90].

Les essais réalisés nous ont permis de constater que le phénomène de condensation est conditionné par la température et le débit de vapeur, et par la température et le débit du liquide de refroidissement. Afin de se rapprocher le plus possible du comportement réel des condenseurs, le facteur de dégradation a donc été évalué en fonction des valeurs expérimentales de température de saturation de la vapeur.

Le coefficient théorique d'échange moyen côté vapeur+film de condensat a donc la structure suivante :

$$h_{cd.th} = B_{th} \cdot 1,47 \cdot \lambda_l \cdot Re_l^{-1/3} \cdot \left[ \frac{\mu_l^2}{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g} \right]^{-1/3} \quad (4.11)$$

avec  $B_{th} = 0,00071 \cdot T_{v.sat}^3 - 0,67517 \cdot T_{v.sat}^2 + 213,73839 \cdot T_{v.sat} - 22552,5$  pour le condenseur haute pression, et  $B_{th} = -0,000845 \cdot T_{v.sat}^3 + 0,78902 \cdot T_{v.sat}^2 - 245,46221 \cdot T_{v.sat} + 25450,1$  pour le condenseur basse pression.  $\lambda_l$  représente la conductivité thermique,  $Re_l$  le nombre de Reynolds,  $\mu_l$  la viscosité dynamique,  $\rho_l$  la masse volumique du film de condensat,  $\rho_v$  représente la masse volumique de la vapeur, et  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

#### 4-3.4.1 Evaluation de la parcimonie du modèle physique.

Le modèle physique regroupe toutes les variables et relations relatives au fonctionnement du système dans sa situation de vie *Utilisation*, c'est-à-dire aux flux fonctionnels de matières (fluide à traiter, gouttelettes, vapeur, condensats) et aux flux d'énergie thermique dans la cuve de détente et au niveau des condenseurs. Ce modèle, dont la formulation implique de se placer au niveau 3 de modélisation (niveau systémique de l'organigramme technique), regroupe :

- 49 variables, dont 34 correspondent à des variables permettant des calculs intermédiaires (caractéristiques physiques),
- 47 relations, dont 30 sont des relations permettant des calculs intermédiaires.

Sa parcimonie est donc de  $\frac{1}{96}$ .

A titre comparatif, l'association de modèles classiques d'évaporation et de condensation de vapeur et d'incondensables sur une paroi plane verticale nécessiterait de descendre au niveau 4 voire au niveau 5 de modélisation afin de mettre en évidence toutes les variables nécessaires, ce qui implique nécessairement un nombre supérieur de variables à prendre en compte dans le modèle. Sa parcimonie serait donc plus faible. Le modèle physique que nous proposons d'utiliser est donc plus parcimonieux que les modèles classiques.

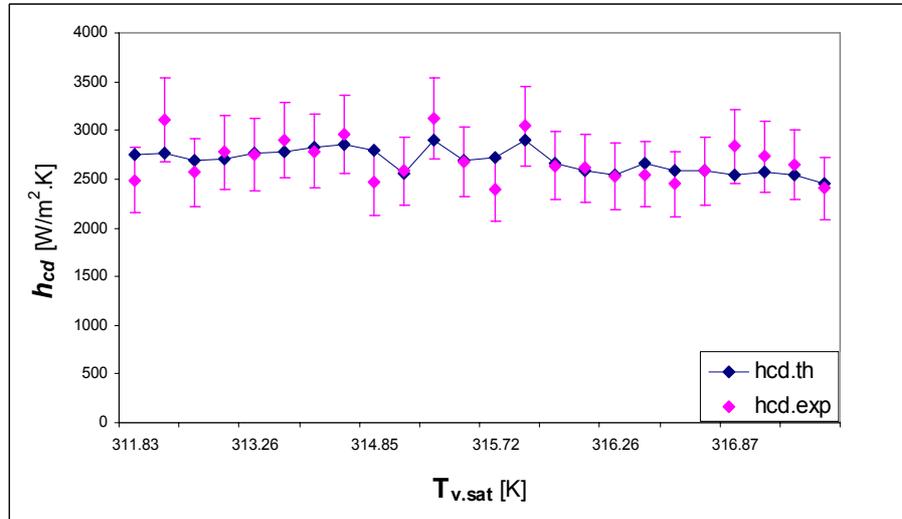
#### 4-3.4.2 Evaluation de l'Exactitude du modèle physique.

Nous présentons sur les figures 4.12 et 4.13, une comparaison entre les coefficients d'échange en condensation expérimental et théorique des condenseurs haute et basse pression en fonction de la température de saturation de la vapeur. Ces coefficients ont été obtenus pour différents essais réalisés sur le pilote 2003.

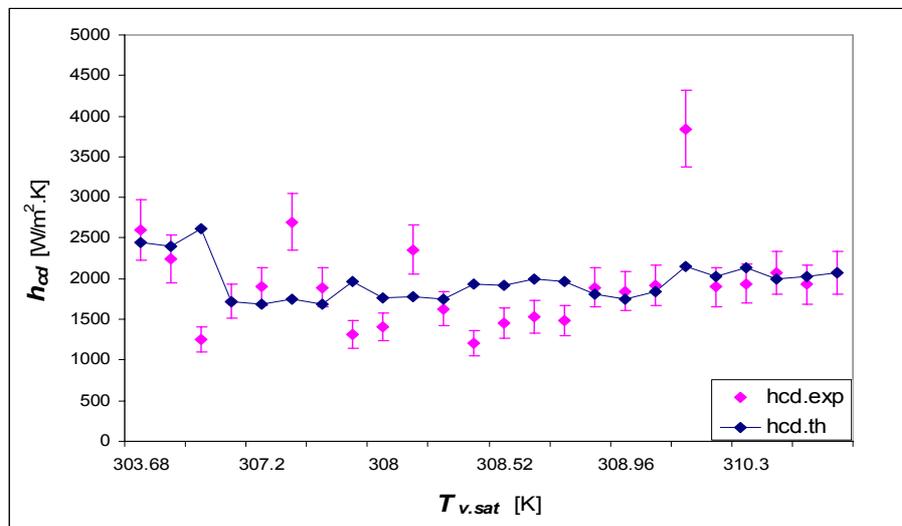
Nous constatons, comparativement à la figure 4.11, que la prise en compte d'un facteur de dégradation permet de ramener les valeurs théoriques et expérimentales aux mêmes ordres de grandeur. Pour le condenseur haute pression, les valeurs théoriques sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Les différences observées entre les deux séries de valeurs restent en effet acceptables, compte tenu des incertitudes sur les valeurs expérimentales, et leur tendance est relativement similaire. De plus, l'écart mesuré entre ces deux séries de valeurs (cf. Tableau 4.2), correspondant au rapport entre la différence des deux séries de valeurs et la valeur expérimentale, n'excède pas les 15 % et descend même, pour certaines valeurs, en dessous des 1 %. Le modèle théorique est donc exact.

Pour le condenseur basse pression, les valeurs théoriques suivent globalement la tendance des valeurs expérimentales, bien que certaines soient très éloignées. Les écarts mesurés entre les deux séries de valeurs, présentés dans le tableau 4.2 sont de l'ordre de 5 à 25 % pour la majorité des valeurs, ce qui est acceptable. Il atteint néanmoins près de 60 % pour certaines valeurs.

En observant les résultats expérimentaux, nous constatons que ceux-ci sont très irréguliers, notamment pour quatre valeurs particulièrement éloignées des autres. Ces valeurs correspondent à des essais pour lesquels le débit de vapeur est faible, ce qui fait que les températures relevées par les capteurs sont inférieures aux températures réelles, ce qui fausse la valeur du coefficient d'échange expérimental. Nous considérons donc, qu'en ne tenant pas compte de ces valeurs, le modèle théorique du coefficient d'échange en condensation pour le condenseur basse pression est d'une exactitude acceptable.



**Figure 4.12.** Comparaison des coefficients d'échange expérimental et théorique côté vapeur+film de condensât pour le condenseur haute pression.



**Figure 4.13.** Comparaison des coefficients d'échange expérimental et théorique côté vapeur+film de condensât pour le condenseur basse pression.

**Tableau 4.2.** Valeurs théoriques et expérimentales du coefficient d'échange en condensation des condenseurs.

Condenseur haute pression				Condenseur basse pression			
$T_{v, \text{sat}}$ [K]	$h_{\text{cdexp}}(\text{réf})$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$h_{\text{cdth}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Ecart [%]	$T_{v, \text{sat}}$ [K]	$h_{\text{cdexp}}(\text{réf})$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$h_{\text{cdth}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Ecart [%]
311,83	2485,211	2752,977	10,77	303,68	2603,06	2441,98	-6,19
312,5	3108,066	2764,888	-11,04	304,49	2248,94	2400,78	6,75
312,66	2569,863	2686,948	4,56	305,19	1254,53	2611,75	108,18
312,74	2776,386	2703,35	-2,63	307	2724,45	1723,12	-0,08
313,26	2753,972	2758,672	0,17	307,2	1897,12	1687,34	-11,06
314,49	2899,594	2778,084	-4,19	307,29	2700,47	1751,5	-35,14
314,13	2786,525	2823,414	1,32	307,53	1894,09	1683	-11,14
314,58	2959,674	2858,783	-3,41	307,62	1317,88	1960,81	48,78
314,85	2466,632	2790,988	13,15	308	1407,35	1770,35	25,79
315,43	2583,361	2559,496	-0,92	308,09	2355,29	1786,66	-24,14
315,62	3121,397	2892,274	-7,34	308,16	1629,04	1746,85	7,23
315,66	2675,364	2692,785	0,65	308,46	1208,26	1935,58	60,19
315,71	2388,34	2725,118	14,1	308,52	1458,99	1923,6	31,84
315,73	3044,296	2900,234	-4,73	308,76	1537,27	1990,2	29,46
315,89	2639,186	2665,554	0,99	308,9	1482,94	1960,09	32,18
316,06	2616,043	2586,817	-1,12	308,94	1891,42	1814,88	-4,04
316,26	2531,066	2547,868	0,66	308,96	1846,49	1756,21	-4,89
316,33	2546,528	2656,253	4,31	309,67	1926,9	1837,29	-4,65
316,35	2447,239	2592,237	5,92	309,8	3843,16	2145,33	-44,18
316,51	2583,839	2590,763	0,27	309,84	1898,81	2029,39	6,88
316,87	2837,072	2538,079	-10,57	310,3	1937,96	2134,68	10,15
316,89	2729,476	2575,095	-5,66	310,48	2077,86	1995,52	-3,96
316,93	2649,336	2545,238	-3,93	310,57	1930,11	2024,12	4,87
320,14	2403,119	2446,421	1,8	311,2	2074,48	2070,89	-0,17

#### 4-3.4.3 Evaluation de la Précision du modèle physique.

Les figures 4.14 et 4.15 présentent les coefficients théoriques d'échange en condensation pour les condenseurs haute et basse pression, tenant compte de l'incertitude absolue sur les valeurs obtenues.

Que ce soit pour le condenseur haute pression ou pour le condenseur basse pression, la dispersion des valeurs est de l'ordre de 8 à 12 %, ce qui est représenté une bonne précision.

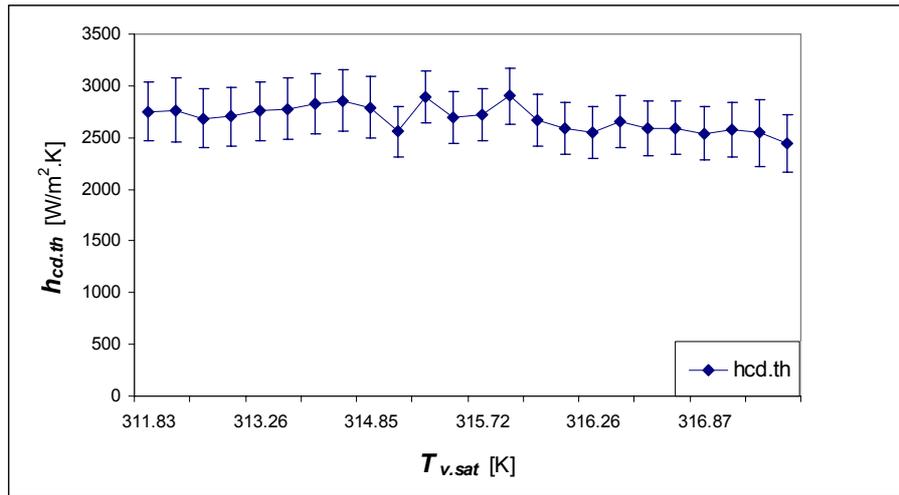


Figure 4.14. Coefficient théorique d'échange en condensation pour le condenseur haute pression.

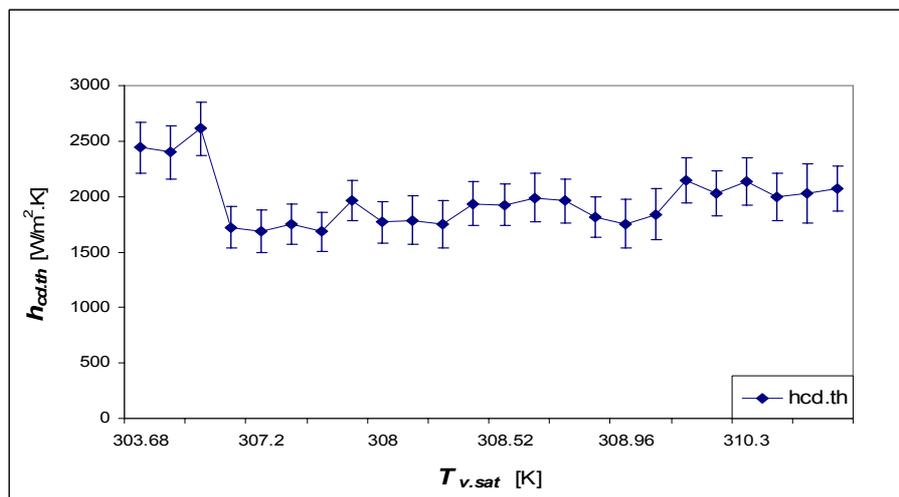


Figure 4.15. Coefficient théorique d'échange en condensation pour le condenseur basse pression.

L'observation des figures 4.12 à 4.15 permet de mieux appréhender la distinction entre exactitude et précision des modèles. Nous sommes ici dans le cas de modèles exacts et très précis.

#### 4-3.4.4 Evaluation du niveau de Spécialisation du modèle physique.

Nous avons vu, préalablement, que la spécialisation d'un modèle était liée à son niveau systémique et aux hypothèses de modélisation auxquelles il est rattaché. Comme nous l'avons stipulé lors de l'évaluation de la parcimonie, le modèle physique que nous proposons est associé au niveau 3 de modélisation. En ce qui concerne les hypothèses de modélisation, nous avons d'abord considéré que la vapeur est saturée. Il s'agit là d'une hypothèse spécialisante, puisqu'elle conditionne

l'expression du coefficient d'échange local. Néanmoins, cette hypothèse est à la base de nombreux problèmes de condensation de vapeur, ce qui fait nous pouvons considérer qu'elle ne contribue que très partiellement à l'augmentation de la spécialisation de notre modèle.

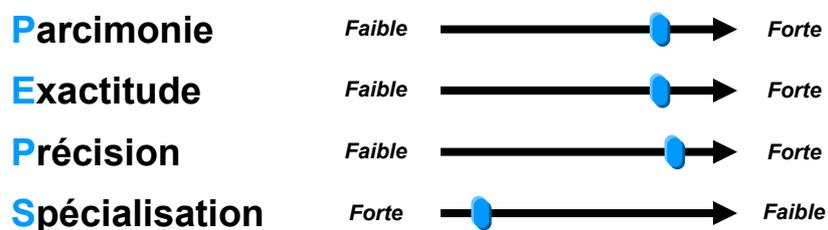
La topologie des condenseurs nous impose de considérer le cas de la condensation de vapeur sur une plaque plane verticale, ce qui constitue une autre hypothèse spécialisante. Les modèles basés sur cette hypothèse sont généralement applicables aux cas de condensation à l'intérieur de tubes verticaux. Le modèle utilisé pour l'estimation des coefficients moyen d'échange côté liquide de refroidissement a cependant été établi à partir de données fournies par le constructeur des condenseurs installés sur le pilote, à savoir des condenseurs à plaques matelassées verticaux, ce qui les rend très spécialisés.

Pour ce qui est de l'estimation du débit de gouttes récupérées au dévésiculeur, des débits de condensats dans les condenseurs haute et basse pression, les modèles proposés ont été établis à partir de résultats d'essais réalisés sur le pilote 2003. Ils présentent l'avantage d'être très exacts, relativement précis, mais ils ne sont cependant valables que dans le contexte particulier de fonctionnement de ce pilote.

Il s'agit donc d'un modèle très spécialisé, utilisable dans le cas d'évaporateurs flash à jet tombant, fonctionnant avec des condenseurs verticaux à plaques ou à tubes.

#### 4-3.4.5 Conclusion.

Les quatre paramètres de Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation ont ainsi été évalué pour le modèle physique des évaporateurs flash. Sa parcimonie, son exactitude et sa précision ont été estimées comme bonnes, mais sa spécialisation reste élevée. La figure 4.16 résume les conclusions de l'étape de qualification du modèle physique.



*Figure 4.16.* Représentation du PEPS du modèle physique du pilote 2003.

## **4-4 QUALIFICATION DES MODELES DE DIMENSIONNEMENT, COÛTS ET ECOCRITERES DU PROTOTYPE INDUSTRIEL.**

### **4-4.1 Présentation du modèle et des valeurs de référence.**

L'application de la démarche d'analyse et de structuration au problème de conception d'évaporateurs flash a permis de mettre en évidence les caractéristiques structurantes, qui doivent être intégrées au modèle de conception architecturale, pour que celui-ci puisse aider à la décision.

La validation et la qualification des caractéristiques structurantes liées au comportement physique des évaporateurs flash ont été réalisées au paragraphe précédent. Nous développons ici la validation et la qualification des caractéristiques des modèles des évaporateurs flash intégrant les contraintes dimensionnelles, économiques et environnementales.

#### **4-4.1.1 Description du modèle.**

Les tableaux 3.8 et 3.9 du chapitre 3 présentent les caractéristiques structurantes identifiées pour les étapes d'analyse du besoin et d'approche fonctionnelle. Ces caractéristiques sont, comme nous l'avons évoqué précédemment, relatives aux critères de qualification techniques, économiques et environnementaux.

- **Critère de Masse** : Le système devant être transportable sur un camion, sa masse est limitée par le Poids Total Admissible en Charge (**PTAC**) de celui-ci. Nous avons basé nos calculs sur des camions de type porteur avec plateau, simples ou avec grue de levage. Pour ce type de camions, le PTAC varie entre 19000 et 26000 kg. Pour conserver une marge d'erreur possible acceptable, nous avons choisi comme valeur limite de la masse du système, celle du PTAC le plus faible, à savoir 19000 kg. La masse totale du système est évaluée en additionnant les masses des composants identifiés dans les organigrammes techniques étendus (cf. Fiches modèles disponibles au chapitre 3 et en annexe B).
- **Critère d'Encombrement** : De même que dans le cas de la masse, les dimensions du système sont limitées par la capacité d'accueil du plateau du camion. Généralement, pour le type de camion précédemment décrit, la surface du plateau est de l'ordre de  $6,4 \times 2,5 = 16 \text{ m}^2$ . Nous avons donc choisi de limiter la surface au sol du système par cette valeur limite.
- **Critère de Séparation Haute Pression/Basse Pression** : La technologie d'évaporateurs flash que nous développons est basée sur une division de la chambre de détente en deux étages. Ces deux

étages sont séparés par un dispositif de flotteur (cf. Figure 4.17), qui a été breveté (Brevet CNRS/Les Vignobles André Lurton, 05-12-2002, WO 02096530).

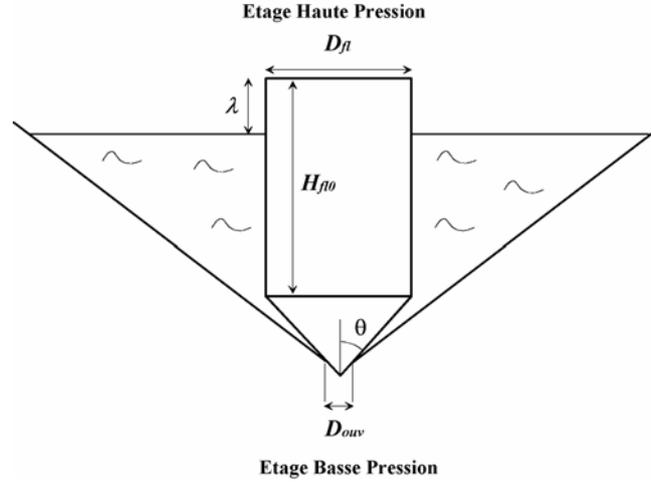


Figure 4.17. Schéma représentatif du flotteur entre les étages haute et basse pression.

Ce dispositif doit assurer une séparation hermétique entre les deux étages. Son dimensionnement va donc dépendre des efforts qui lui sont appliqués :

- son poids,  $P = \rho_{mat} \cdot e_{fl} \cdot g \cdot S_{fl}$ , (4.12)

- la force de pression entre les deux étages,  $F_p = \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4} \cdot (P_{HP} - P_{BP})$ , (4.13)

- la poussée d'Archimède due au niveau de fluide dans l'étage haute pression,

$$F_A = \rho_p \cdot g \cdot \left( V_{fl} - \frac{\pi \cdot D_{fl}^2 \cdot \lambda_{fl}}{4} \right). \quad (4.14)$$

$S_{fl}$  représente la surface du flotteur, définie par l'équation 4.15,  $V_{fl}$  est son volume, défini par l'équation 4.16,  $\lambda$  représente la hauteur non immergée du flotteur,  $D_{fl}$  est son diamètre,  $\theta$  la conicité de sa partie conique,  $H_{fl0}$  sa hauteur.

$$S_{fl} = \pi \cdot D_{fl} \cdot H_{fl0} + \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\sin(\theta)} \right) - \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4 \cdot \sin(\theta)} \quad (4.15)$$

$$V_{fl} = \pi \cdot \frac{D_{fl}^2}{4} \cdot H_{fl0} + \frac{\pi \cdot (D_{fl}^3 - d_{ouv}^3)}{24 \cdot \tan(\theta)} \quad (4.16)$$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique aux efforts appliqués au flotteur, nous arrivons à l'équation 4.17, définissant la hauteur totale du flotteur :

$$H_{fl} = \frac{g \cdot e_{fl} \cdot \rho_{mat} \cdot \left(1 + \frac{l}{\sin \theta}\right) \cdot \frac{D_{fl}}{4} + \frac{d_{ouv}^2}{4 \cdot D_{fl}} \cdot (P_{HP} - P_{BP}) - g \cdot \rho_p \cdot \frac{D_{fl}^2}{24 \cdot \tan \theta} + \frac{D_{fl} - d_{ouv}}{2 \cdot \tan \theta}}{\frac{D_{fl}}{4} \cdot g \cdot \rho_p - g \cdot e_{fl} \cdot \rho_{mat}} \quad (4.17)$$

Cette équation conduit, en choisissant une conicité, à la définition d'une relation de proportionnalité entre  $H_{fl}$  et  $D_{fl}$ . Le diamètre optimal du flotteur correspond alors à la valeur minimale de  $H_{fl}$ , soit :

$$D_{fl} = D_{fl}(H_{fl\_Min}) \quad (4.18)$$

Connaissant ce diamètre, la valeur de la portion non immergée du flotteur est obtenue en appliquant l'équation 4.19 :

$$\lambda_{fl} = -\frac{l}{\pi \cdot g \cdot \rho_p \cdot \frac{D_{fl}^2}{4}} \times \left[ \left( g \cdot e_{fl} \cdot \rho_{mat} \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \cdot \left(1 + \frac{l}{\sin \theta}\right) + \pi \cdot D_{fl} \cdot H_{fl0} - \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4 \cdot \sin \theta} \right) \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{\pi \cdot d_{ouv}^2}{4} \cdot (P_{HP} - P_{BP}) \right) - \left( G \cdot \rho_p \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_{fl}^2}{4} \cdot H_{fl0} + \frac{\pi \cdot (D_{fl}^3 - d_{ouv}^3)}{24 \cdot \tan \theta} \right) \right) \right] \quad (4.19)$$

La hauteur du flotteur  $H_{fl0}$  du flotteur est alors obtenue en appliquant l'équation 4.20 :

$$H_{fl0} = H_{fl\_Min} - \frac{D_{fl}(H_{fl\_Min}) - d_{ouv}}{2 \cdot \tan \theta} \quad (4.20)$$

- Critère de Capacité de traitement/Autonomie : Ce critère suppose que le système puisse s'adapter à une variation ou une interruption de l'alimentation de 5 minutes. La cuve tampon a été introduite dans ce but. Son volume est donc évalué par le biais de l'équation suivante :

$$V_{Cint} = \left( t_{repl.} \cdot q_{pe} \cdot \frac{l}{\rho_p} \right) + \left( t_{interr.} \cdot (q_{p0} - q_{pe}) \cdot \frac{l}{\rho_p} \right) \quad (4.21)$$

où  $t_{repl}$  représente le temps de remplissage de la cuve,  $t_{interr}$  le temps d'interruption,  $q_{pe}$  le débit d'entrée du fluide à traiter dans le système,  $\Delta q_p$  la variation de débit entre l'entrée et la sortie de la cuve tampon,  $\rho_p$  la masse volumique du fluide à traiter.

- Critère de Coût de revient : Le coût de revient traduit les coûts associés à l'acquisition d'un produit. Dans notre cas, ils correspondent au coût de fabrication.

D'après F. Marechal [Mar03], le coût total d'un système doit également prendre en compte le coût d'installation sur site. Dans ce but, nous multiplions le coût total de fabrication obtenu par la somme des coûts des différents composants, par un facteur appelé **Facteur de Lang**, égal à

3,1 dans le cas de solides. Le coût total de mise en œuvre et d'installation du système est donc calculé par le biais de l'équation 4.22 :

$$C_{Sys} = 3,1 \cdot \left( \begin{array}{l} Coût_{CuveTampon} + Coût_{CuveDetente} \\ + Coût_{Devesiculeur} + Coût_{condenseurHP} \\ + Coût_{condenseurBP} + Coût_{tubes} \\ + Coût_{PAV} + Coût_{PC} + Coût_{PE} + Coût_{Str.} \end{array} \right) \quad (4.22)$$

Les coûts relatifs aux différents composants du système (cuve tampon, cuve de détente, etc.) ont été modélisés à partir de données de prix au poids de divers fournisseurs. Ces modèles sont explicités en annexe F de ce document.

- Critère de Coûts de possession : Les coûts de possession sont relatifs aux dépenses liées à l'utilisation du système. Les évaporateurs flash fonctionnent sur le principe des pompes à chaleur, c'est-à-dire qu'ils utilisent l'énergie électrique pour fournir de la chaleur. La différence réside dans le fait que la chaleur créée par le refroidissement du fluide est transmise à l'eau de refroidissement et n'est donc pas, à ce stade, réutilisée. Cette eau de refroidissement a elle aussi un coût, puisqu'il s'agit d'eau provenant du réseau urbain. Les coûts de possession correspondent donc, dans notre cas, à la somme des dépenses énergétique et en eau. Ces dépenses sont calculées en euros (€) à partir des consommations en eau et en énergie électrique, représentées par les équations 4.23 et 4.24, respectivement.

$$C_{Eau} = C_{m^3} \cdot Co_{Eau} = C_{m^3} \cdot \left( \frac{q_{lrHP}}{Puiss_{HP}} + \frac{q_{lrBP}}{Puiss_{BP}} \right) \quad (4.23)$$

$$C_{Energ} = C_{kWh} \cdot Co_{En} = C_{kWh} \cdot t_{fct} \cdot (Puiss_{PAV} + Puiss_{PE} + Puiss_{PC} + Puiss_{mél}) \quad (4.24)$$

où  $C_{m^3}$  est le prix du mètre cube d'eau,  $C_{kWh}$  est le prix du kilowattheure,  $q_{lrHP}$  et  $q_{lrBP}$  sont les débits d'eau de refroidissement aux condenseurs haute et basse pression (respectivement),  $Puiss_{HP}$  et  $Puiss_{BP}$  sont les puissances dégagées au niveau des cuves de détente,  $Puiss_{PAV}$  est la puissance de la pompe à vide,  $Puiss_{PE}$  celle de la pompe d'extraction,  $Puiss_{PC}$  celle de la pompe à condensats et  $Puiss_{mél}$  celle du mélangeur.

Les coûts relatifs au transport et au traitement des condensats ne sont pas pris en compte.

- Critère de Réglementation : La réglementation impose de respecter les règles de calculs du code de CONstruction des Appareils à Pression non soumis à l'action de la flamme (CODAP). Ce code impose, dans le cas de cuve cylindrique sous pression, que leur épaisseur respecte la définition de l'équation 4.25 :

$$e \geq \frac{P \cdot D_{cuve}}{2 \cdot f \cdot z - P} \quad (4.25)$$

où  $P$  représente la pression maximale susceptible de régner dans la cuve [ $Pa$ ],  $D_{cuve}$  est le diamètre intérieur de la cuve [ $m$ ],  $z$  est le coefficient de soudure et  $f$  correspond à la contrainte nominale de calcul du matériau de constitution [ $N/m^2$ ], définie par :

$$f = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}^t}{1,6}; \frac{R_m}{3} \right\} \quad (4.26)$$

où  $R_{p0,2}^t$  est la valeur minimale garantie de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% à la température de calcul, et  $R_m$  est la valeur minimale garantie de la résistance à la traction à la température ambiante.

Pour les évaporateurs flash, en considérant un fluide à traiter considéré comme non dangereux et des cuves en acier inoxydable,  $z = 0,85$  et  $f = \frac{R_{p0,2}^t}{1,6} = 207.10^6$  [ $N/m^2$ ].

Dans notre cas, nous n'avons pas pris en compte la deuxième relation à vérifier dans le cas des appareils soumis à pression extérieure (CODAP C4).

- **Critère d'Impact environnemental** : Nous avons montré, au chapitre précédent, que l'impact environnemental d'un système peut être évalué à différents niveaux. Nous avons choisi de représenter l'impact des évaporateurs flash sur l'environnement par trois paramètres : la consommation en eau, la consommation énergétique et l'EcoIndicateur 99. Les consommations en eau et en énergie sont explicitées dans les équations 4.23 et 4.24, respectivement.

La méthodologie d'évaluation de l'EcoIndicateur 99 a été présentée au chapitre 3. Cette méthode permet d'estimer l'impact environnemental du système, en prenant en compte ses effets sur les ressources, exprimés en MégaJoule d'énergie supplémentaire nécessaire à l'extraction, sur la qualité de l'écosystème, mesurés en PDF (Potentially Disappeared Fraction) par mètre carré par an, et sur la santé, évalués en DALY (Disability Adjusted Life Years).

L'acier étant le matériau de constitution prépondérant dans la fabrication des évaporateurs flash, nous avons évalué, à partir de données industrielles disponibles [webDiox; webGES; webMEF; webREC; Duq05a; Duq05b], la nature et la quantité des substances rejetées lors de la production, la mise en forme et le recyclage de l'acier, ainsi que les substances utilisées pour son élaboration. Pour chaque catégorie d'impact, nous avons associé à chaque substance un facteur de dommage, pondéré et normalisé issu des données liées à la méthodologie de l'Eco Indicateur 99, dans le but d'aboutir à une valeur uniformisée. La concaténation des valeurs uniformisées ainsi

obtenues pour chaque catégorie d'impact a alors conduit à une valeur de l'Eco Indicateur pour les évaporateurs flash.

Un tableau récapitulatif des substances prises en compte pour l'évaluation de l'Eco Indicateur 99 est proposé en annexe G.

Le tableau 4.3 résume les contraintes à prendre en compte selon les critères de qualification considérés, en précisant, pour les variables mises en jeu, s'il s'agit de variables de conception (VCo), de critères (Cr) ou de variables auxiliaires (VA).

**Tableau 4.3.** Contraintes dimensionnelles, économiques et environnementales intégrées au modèle global des évaporateurs flash.

Critère de qualification	Caractérisation	Variables associées			Contrainte(s) à traduire
		VCo	Cr	VA	
Masse	Masse totale du système [kg]	$M_{Sys}$	$M_{Sys}$		$M_{Sys} = \sum_i M_{composant\ i} \leq 19000$
Encombrement	Surface au sol [m <sup>2</sup> ] Hauteur totale [m]	$S_{Sys}$ $H_{Sys}$	$S_{Sys}$		$S_{Sys} \leq 16$ $H_{Sys} \leq 3$
SéparationHP/ BP	Poids [N] Pression entre les deux étages [N] Poussée d'Archimède [N] Diamètre du flotteur [m] Hauteur totale du flotteur [m] Hauteur du cylindre du flotteur [m] Epaisseur de la paroi du flotteur [m] Surface du flotteur [m <sup>2</sup> ] Volume du flotteur [m <sup>3</sup> ] Diamètre ouverture HP/BP[m] Hauteur non immergée du flotteur [m] Conicité [°]	$D_{fl}$ $e_{fl}$ $S_{fl}$ $V_{fl}$ $d_{ouv}$		$P$ $F_p$ $F_A$ $\lambda_{fl}$ $H_{fl}$ $H_{fl0}$ $\theta$	$\vec{P} + \vec{F}_p + \vec{F}_A = \vec{0}$ et Equations 4.12 à 4.20
Capacité de traitement/ Autonomie	Volume cuve intérieure Cuve Tampon [m <sup>3</sup> ]	$V_{Cint}$ $q_{pe}$		$\rho_p$ $\Delta q_p$ $t_{interr.}$ $t_{rempl.}$	Equation 4.21
Coûts de revient	Coût total d'installation [€]		$C_{Sys}$		Equation 4.22
Coûts de possession	Dépense énergétique [€] Dépense en eau [€]		$C_{En.}$ $C_{Eau}$	$C_{kWh}$ $Co_{En}$ $C_{m^3}$ $Co_{Eau}$	$C_{Energ} = C_{kWh} \cdot Co_{En}$ $C_{Eau} = C_{m^3} \cdot Co_{Eau}$
Règlementation	Epaisseur des cuves sous pression [m] (CODAP)	$e$			Equation 4.25
Impact environnemental	Consommation en eau [L./h.kW <sub>th</sub> ] Consommation énergétique [kWh] Indicateur d'impact [adim.]		$Co_{Eau}$ $Co_{En}$ $El_{Sys}$	$q_{trHP}$ $q_{trBP}$ $Puiss_{HP}$ $Puiss_{BP}$ $Puiss_{PAV}$ $Puiss_{PE}$ $Puiss_{PC}$ $Puiss_{mél}$	Equations 4.23 et 4.24

#### 4-4.1.2 Description de la référence.

Dans le but de qualifier les modèles présentés précédemment, en terme d'exactitude, il est nécessaire de définir les critères qui serviront de références. Ces critères sont choisis par rapport à ceux identifiés dans le cahier des charges, pour permettre d'estimer le degré de satisfaction du besoin. Dans le cas de notre travail, ces critères correspondent aux critères mis en évidence dans le tableau 4.3 :

- masse et surface au sol du système,
- coût objectif (fabrication et installation du système),
- coût de possession,
- consommations énergétique et en ressources,
- indicateur d'impact environnemental.

Pour ce qui est de la masse et de la surface au sol du système, les valeurs de référence sont relatives aux données disponibles sur les camions destinés au transport du système. Ces valeurs ont été présentées précédemment. Elles sont exploitées dans le modèle pour limiter les solutions possibles.

L'évaluation du coût de revient s'est faite à partir de données obtenues auprès de fournisseurs, pour les composants standard (condenseurs, dévésiculateur, pompes) et d'une estimation du coût global du système selon des données fournies par la société IMECA. L'ensemble de ces valeurs est regroupé dans les tableaux 4.4 à 4.6.

**Tableau 4.4.** Valeurs de référence pour l'estimation du coût des condenseurs.

Coût des condenseurs				
Origine	Référence	Surface d'échange [m <sup>2</sup> ]	Masse [kg]	Prix [€]
Société KAPP FRANCE	S - BFU 25/150 – 2 x 11,5 / 1 x 22 (Haute Pression Prototype Industriel)	17,3	650	14400
	S - BFU 15/100 – 2 x 6 / 1 x 11 (Basse Pression Prototype industriel)	3,6	650	6650
	S – BFU 10/75 – 2 x 6,5 / 1 x 12 (Haute pression P2003)	2	115	5630
	S – BFU 10/75 – 2 x 6,5 / 1 x 12 (Basse pression P2003)	1,2	80	3980

**Tableau 4.5.** Valeurs de référence pour l'estimation du coût du dévésicuteur.

Coût du dévésicuteur				
Origine	Référence	Surface d'échange [m <sup>2</sup> ]	Masse [kg]	Prix [€]
Société LECHLER	LTH 400.25 (Prototype industriel)	0.2	50	1880
	LTH 603.25 (Pilote 2003)	0.076	22	1356

**Tableau 4.6.** Valeurs de référence pour l'estimation du coût des composants à dimensionner et des pompes.

Composant	Matériau / Fournisseur	Masse [kg]	Prix des matériaux [€]	Coût de mise en forme [€]	Coût total [€]
Cuve Tampon	Acier 316 L / Laine de roche / Aluminium	150	2250	2200	4450
Cuve Haute Pression	Acier 316 L	125	1625	2000	3625
Cuve Basse Pression	Acier 316 L	300	4500	4500	9000
Tuyauterie	Acier 316 L	20	800	4000	4800
Structure	Acier E 360	650	1950	4000	5950
Pompe à vide + Ejecteur	STERLING FLUID SYSTEMS	200	–	–	5250
Pompe d'extraction	PCM	200	–	–	10000
Pompe à condensats	POMPES ANDRE BODIN	20	–	–	350
Mélangeur	MIXEL	–	–	–	1000

Pour les modèles de consommations en ressources et d'impact environnemental, la traduction des critères de référence est faite, comme dans le cas de la masse et de la surface au sol du système, par une majoration. Pour le calcul du coût de possession, les coûts des ressources pris en compte sont les suivants :

$$C_{m^3} \in [1,49;4,38] \text{ €/m}^3 \text{ d'eau}$$

$$C_{kWh} = \begin{cases} 0,0644 \text{ € en heures creuses} \\ 0,1057 \text{ € en heures pleines} \end{cases}$$

## 4-4.2 Qualification des modèles.

Comme dans le cas du modèle physique, l'étape de qualification consiste à évaluer les paramètres de Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation du modèle utilisé pour traduire les contraintes de dimensionnement, de coûts et d'impact environnemental.

### 4-4.2.1 Evaluation de la Parcimonie.

Nous avons préalablement défini la parcimonie comme étant l'inverse du nombre de relations et de variables mises en jeu dans le modèle. Le modèle traduisant les contraintes de dimensionnement, de coûts et d'impact environnemental nécessite de descendre au niveau 3 de modélisation de l'organigramme technique étendu (cf. Figures 3.17, 3.19 et 3.20). Il comprend :

- 31 variables,
- 25 relations.

Sa parcimonie est donc égale à  $\frac{1}{56}$ .

### 4-4.2.2 Evaluation de l'Exactitude et de la Précision.

Les modèles utilisés pour l'évaluation du coût de revient ont été établis à partir de données correspondant au marché actuel. Ces modèles sont donc exacts et précis, compte tenu de leur origine.

### 4-4.2.3 Evaluation du niveau de Spécialisation.

Le modèle proposé pour l'estimation des coûts et l'évaluation de l'impact environnemental du système a été établi relativement à des données de masse, de surface ou de débits. Il est donc exploitable dans n'importe quel contexte. Néanmoins, certaines données de prix ou de puissances, notamment pour celles des pompes ont été établies à partir de valeurs fournies pour le cas précis d'utilisation du prototype industriel. Ils ne sont donc valables que dans ce cas précis d'utilisation, d'où une forte spécialisation. En effet, ces éléments sont déterminants dans l'évaluation du coût de revient, et le fait que leur choix soit sélectif entraîne une forte spécialisation du modèle.

#### 4-4.2.4 Conclusion.

Les quatre paramètres de Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation ont ainsi été évalué pour le modèle regroupant les contraintes dimensionnelles, économiques et environnementales. La figure 4.18 résume les conclusions de l'étape de qualification de ce modèle.

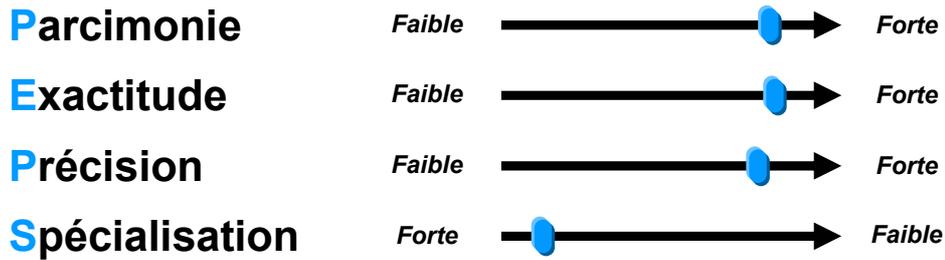


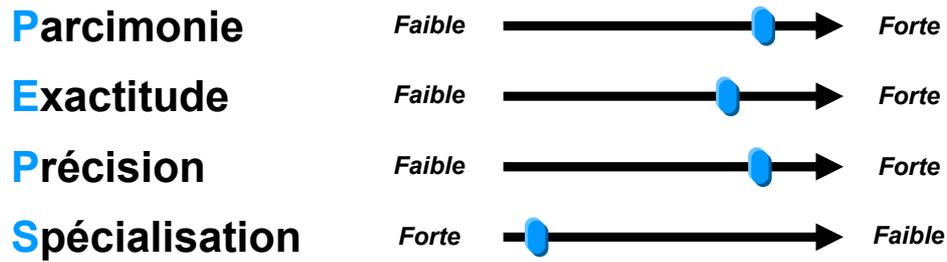
Figure 4.18. Représentation du PEPS du modèle physique du pilote 2003.

## 4-5 QUALIFICATION DU MODELE GLOBAL.

Un modèle global est constitué d'un ensemble de modèles interagissant entre eux, chacun de ces modèles ayant préalablement été qualifiés. La procédure d'évaluation de la Parcimonie, de l'Exactitude, de la Précision et de la Spécialisation d'un modèle global peut donc se faire soit de façon indépendante des PEPS des modèles constitutifs, soit en définissant une loi de composition des PEPS de ces modèles.

Vernat [Ver04] préconise d'utiliser la même méthodologie d'évaluation pour le modèle global que pour les modèles constitutifs, sans tenir compte de leur PEPS. Il considère, en effet, qu'une fois les modèles formulés et qualifiés, le modèle global n'est pas une simple addition de ces modèles constitutifs. Souvent, afin de limiter le nombre de relation et de variables mises en jeu, plusieurs relations peuvent être intégrées en une seule, plus générale, qui conserve néanmoins tout l'information nécessaire à la conception.

Le modèle global pour les évaporateurs flash consiste ici en une concaténation des contraintes relatives au comportement physique, ou modèle physique, et des contraintes dimensionnelles, économiques et environnementales. Nous avons donc choisi d'estimer le PEPS de ce modèle global à partir de l'évaluation des PEPS des deux modèles présentés précédemment. La figure 4.19 présente le résultat de cette estimation.



*Figure 4.19.* Schéma de représentation du PEPS du modèle global des évaporateurs flash bi-étagés.

Le modèle global des évaporateurs flash bi-étagés apparaît donc comme étant très parcimonieux, très précis, exact et très spécialisé. Dans un contexte d'aide à la décision en conception préliminaire, ce modèle est donc exploitable, mais l'étendue de son domaine d'utilisation reste limité.

## 4-6 EXPLOITATION DU MODELE GLOBAL.

### 4-6.1 Introduction.

Dans les chapitres précédents, nous avons développé un modèle global par contraintes de conception préliminaire pour les évaporateurs flash bi-étagés. Ces modèles, intégrés dans la version 4.1 du solveur *Constraint Explorer*, présenté au chapitre 2, constituent la base de connaissance de l'outil d'aide à la décision pour la conception préliminaire de ces systèmes.

Nous proposons ici de développer la résolution de ces modèles et l'exploitation de l'outil par l'évaluation de différents critères de qualification pour les solutions obtenues, afin de faire ressortir les éléments déterminants dans les choix de conception du procédé d'évaporation flash bi-étagé.

### 4-6.2 Définition des indices de qualité et des indicateurs de performances.

L'exploitation de la résolution des modèles se fait par l'analyse de 3 types de caractéristiques, évaluées pour chaque solution (cf. Chapitre 2) :

- les indices de qualité, pour la comparaison des solutions obtenues entre elles,
- les indicateurs de performances, pour l'évaluation de la variabilité des solutions par rapport à une référence,

- l'utilisation de la méthode des Fronts de Pareto, pour la détermination de l'ensemble des solutions qui ne sont pas meilleures les unes par rapport aux autres, relativement à un indicateur de performance.

Ces caractéristiques sont relatives aux critères de performance du système, afin de faire ressortir les solutions qui satisfont le mieux le besoin exprimé. Parmi les critères identifiés durant l'analyse et la structuration des modèles, nous ne retiendrons que ceux qui fourniront les informations nécessaires à la prise de décision :

- la puissance frigorifique du système,
- sa masse totale,
- son impact sur l'environnement,
- ses coûts de revient et de possession.

Nous avons ainsi défini un indice de qualité relatif à la puissance frigorifique du système, égal au rapport entre cette puissance et la somme de ses coûts de revient et de possession (cf. Equation 4.27). La fiabilité, relative à la qualité de conception et de fabrication, est ici supposée égale à 1.

$$IQ_{PuissFrigo} = \frac{\text{Puissance Frigorifique}_{Sys}}{C_{rev} + C_{Po}} \quad (4.27)$$

Parallèlement, les indicateurs de performance relatifs à la consommation en eau, à celle en énergie électrique, à l'EcoIndicateur 99 et à la masse totale du système ont également été définis comme suit :

$$IP_{CoEau} = \frac{Co_{Eau}}{Co_{Eau\ ref}} \quad (4.28)$$

$$IP_{CoEn} = \frac{Co_{En}}{Co_{En\ ref}} \quad (4.29)$$

$$IP_{M_{Sys}} = \frac{M_{Sys}}{M_{ref}} \quad (4.30)$$

$$IP_{EI99} = \frac{EI_{Sys}}{EI_{ref}} \quad (4.31)$$

La valeur de référence considérée pour la consommation énergétique a été établie à partir de résultats issus d'une campagne de mesures effectuée de février à mars 1995 sur un évaporateur sous vide de la société GEYSERS, utilisé pour le traitement d'eaux usées par la société RABOURDIN Industries [EDF95]. Cette consommation s'élève à 230 kWh par tonne d'eau évaporée.

Le tableau 4.7 présente les caractéristiques de cet évaporateur.

**Tableau 4.7.** Caractéristiques techniques de l'évaporateur sous vide GEYSERS-WTSE 2000.

Puissance installée [kW]	Capacité évaporatoire [L/h]	Taux d'évaporation [%]	Puissance Frigorifique [kW]
22	80	16	9

La consommation en eau de référence correspond à la consommation moyenne d'eau de refroidissement des condenseurs, en circuit à passage unique (comme dans notre cas), pour des systèmes de production de froid dans le milieu agro-alimentaire industriel et tertiaire [Ber04]. Cette valeur a été évaluée à 1,433 L/min.kW<sub>th</sub>.

La masse de référence correspond, comme nous l'avons indiqué plus avant, au PTAC relevé pour les camions permettant le transport du système, à savoir 19000 kg.

Pour ce qui est de l'indicateur d'impact environnemental, la valeur de référence pour l'Ecoscore est basée sur les données fournies dans l'annexe de la méthodologie de l'Eco Indicateur 99 [Pré01]. En effet, les facteurs normalisés et pondérés, utilisés pour l'évaluation de l'EcoIndicateur, sont relatifs à une valeur de référence de 1000 points. La valeur obtenue pour les évaporateurs flash sera d'autant meilleure qu'elle se rapprochera de cette valeur de référence de 1000 points.

### 4-6.3 Résolution du modèle.

Nous avons vu au chapitre 2 que les variables de conception (VCo), parce qu'elles définissent une architecture donnée, vont permettre de différencier une solution d'une autre.

Dans notre cas, les variables de conception du procédé d'évaporation flash bi-étagé sont les suivantes : débit de fluide traité ( $q_{pe}$ ), température d'entrée du fluide ( $T_{pe}$ ), débits de liquide de refroidissement aux condenseurs ( $q_{lrHP}$ ,  $q_{lrBP}$ ), température d'entrée du liquide de refroidissement aux condenseurs ( $T_{lreHP}$ ,  $T_{lreBP}$ ). La température de refroidissement ( $T_{ps}$ ) a été imposée à 30 °C.

La résolution du modèle global s'est faite par pavés d'exploration, ou domaines de variation, pour chacune des variables de conception, chaque pavé étant défini par un intervalle et un pas.

Le solveur recherche alors, pour chaque intervalle de valeurs des variables de conception ainsi défini, les valeurs des autres variables du modèle qui satisfont l'ensemble des contraintes exprimées.

Le tableau 4.8 présente les intervalles de définition et les pas relatifs aux pavés d'exploration pour les variables de conception.

**Tableau 4.8.** Intervalles de définition et pas des pavés d'exploration considérés pour les variables de conception du procédé d'évaporation flash bi-étagé.

Variables de conception	Représentation	Domaine de variation	pas	Nombre de pavés testés
Débit d'entrée du fluide traité	$q_{pe}$	[5; 10] t/h	5 t/h	1
Température d'entrée du fluide traité	$T_{pe}$	[70; 90] °C	10 °C	4
Température de la vapeur dans l'étage HP	$T_{vl}$	[40; 50] °C	2 °C	5
Débit d'entrée du liquide de refroidissement dans le condenseur HP	$q_{lrHP}$	[170; 550] L/min	95 L/min	4
Température d'entrée du liquide de refroidissement dans le condenseur HP	$T_{lrHP}$	[10; 30] °C	10 °C	3
Débit d'entrée du liquide de refroidissement dans le condenseur BP	$q_{lrBP}$	[40; 300] L/min	65 L/min	4
Température d'entrée du liquide de refroidissement dans le condenseur BP	$T_{lrBP}$	[10; 30] °C	10 °C	3

Les tableaux 4.9 et 4.10 présentent un extrait des résultats de cette résolution.

**Tableau 4.9.** Extrait des résultats obtenus pour la simulation avec les VCo correspondant aux valeurs du tableau 4.8.

N°	$q_{pe}$ [kg/s]	$T_{pe}$ [K]	$T_{vHP}$ [K]	$q_{lrHP}$ [L/min]	$q_{lrBP}$ [L/min]	$T_{lrHP}$ [K]	$T_{lrBP}$ [K]	$M_{sys}$ [×1000 kg]	$Co_{Eau}$ [L/min.kWh]	$Co_{En}$ [kWh]	$EI_{sys}$ [×1000 pts]	
1	1.39	1.82	343.15	314.1	170	40	303.15	283.15	1.433	0.99	9.92	11.48
2	1.39	1.91	343.15	314.1	170	235	303.15	283.15	1.475	3.87	9.92	12.2
3	1.39	1.74	343.15	314.1	265	40	303.15	283.15	1.429	1.62	9.92	11.65
4	1.39	1.79	343.15	314.1	265	235	303.15	283.15	1.45	4.87	9.92	11.86
5	1.39	1.79	343.15	314.1	360	40	303.15	283.15	1.445	2	9.92	11.88
6	1.39	1.86	343.15	314.1	360	235	303.15	283.15	1.481	4.87	9.92	12.19
7	1.39	1.66	343.15	314.1	455	40	303.15	283.15	1.455	2.75	9.92	11.87
8	1.39	1.72	343.15	314.1	455	235	303.15	283.15	1.48	5.87	9.92	11.98
9	1.39	2.08	343.15	319.5	170	40	283.15	283.15	1.419	0.87	9.92	11.6
10	1.39	1.96	343.15	320.1	170	235	303.15	303.15	2.153	1.25	9.92	20.32
11	1.39	2.08	343.15	319.5	265	40	283.15	283.15	1.418	1.25	9.92	11.51
12	1.39	1.83	343.15	320.1	265	235	303.15	303.15	2.076	2	9.92	19.56
13	1.39	2.08	343.15	319.5	360	40	283.15	283.15	1.427	1.62	9.92	11.56
14	1.39	1.75	343.15	320.1	360	235	303.15	303.15	2.039	2.75	9.92	19.1
15	1.39	2.08	343.15	319.5	455	40	283.15	283.15	1.442	2	9.92	11.49
16	1.39	1.79	343.15	320.1	455	235	303.15	303.15	2.143	3	9.92	19.82
17	1.39	2.08	344.4	323.15	170	40	283.15	283.15	2.968	0.99	9.92	30.11
18	1.39	2.08	350	323.15	170	235	303.15	303.15	2.88	0.99	9.92	31.83

19	1.39	1.87	344.4	323.15	265	40	283.15	283.15	4.812	2.12	9.92	34.16
20	1.39	2.08	350	323.15	265	235	303.15	303.15	2.62	1.37	9.92	29.11
21	1.39	2.08	344.4	323.15	360	40	283.15	283.15	2.633	2.12	9.92	28.24
22	1.39	2.08	350	323.15	360	235	303.15	303.15	2.824	1.87	9.92	31.1
23	1.39	1.89	344.4	323.15	455	40	283.15	283.15	4.839	4.12	9.92	34.4
24	1.39	2.08	350	323.15	455	235	303.15	303.15	2.657	2.25	9.92	29.21
25	1.39	1.56	363.15	314.1	170	40	303.15	283.15	1.428	1.62	9.9	11.48
26	1.39	1.89	363.15	314.1	170	235	303.15	303.15	1.5	3.87	9.9	12.16
27	1.39	2.03	363.15	314.1	265	40	303.15	283.15	1.512	0.99	9.9	12.6
28	1.39	1.78	363.15	314.1	265	235	303.15	303.15	1.472	4.62	9.9	12.02
29	1.39	1.66	363.15	314.1	360	40	303.15	283.15	1.463	2	9.9	11.87
30	1.39	1.86	363.15	314.1	360	235	303.15	303.15	1.486	4.63	9.9	12.22
31	1.39	1.86	363.15	314.1	455	40	303.15	283.15	1.506	1.62	9.9	12.18
32	1.39	1.84	363.15	314.1	455	235	303.15	303.15	1.525	4.87	9.9	12
33	1.39	2.08	363.15	315.5	170	40	283.15	283.15	1.202	0.75	9.9	8.69
34	1.39	1.49	363.15	316.1	170	235	303.15	303.15	1.609	5.36	9.9	13.28
35	1.39	2.08	363.15	315.5	265	40	283.15	283.15	1.169	0.99	9.9	8.25
36	1.39	1.48	363.15	316.1	265	235	303.15	303.15	1.618	5.71	9.9	13.34
37	1.39	2.08	363.15	315.5	360	40	283.15	283.15	1.168	1.37	9.9	8.22
38	1.39	1.48	363.15	316.1	360	235	303.15	303.15	1.625	6.13	9.9	13.38
39	1.39	2.08	363.15	315.5	455	40	283.15	283.15	1.168	1.62	9.9	8.21
40	1.39	1.46	363.15	316.1	455	235	303.15	303.15	1.647	6.57	9.9	13.58

Tableau 4.10. Extrait des résultats obtenus pour la simulation avec les VCo correspondant aux valeurs du tableau 4.8.

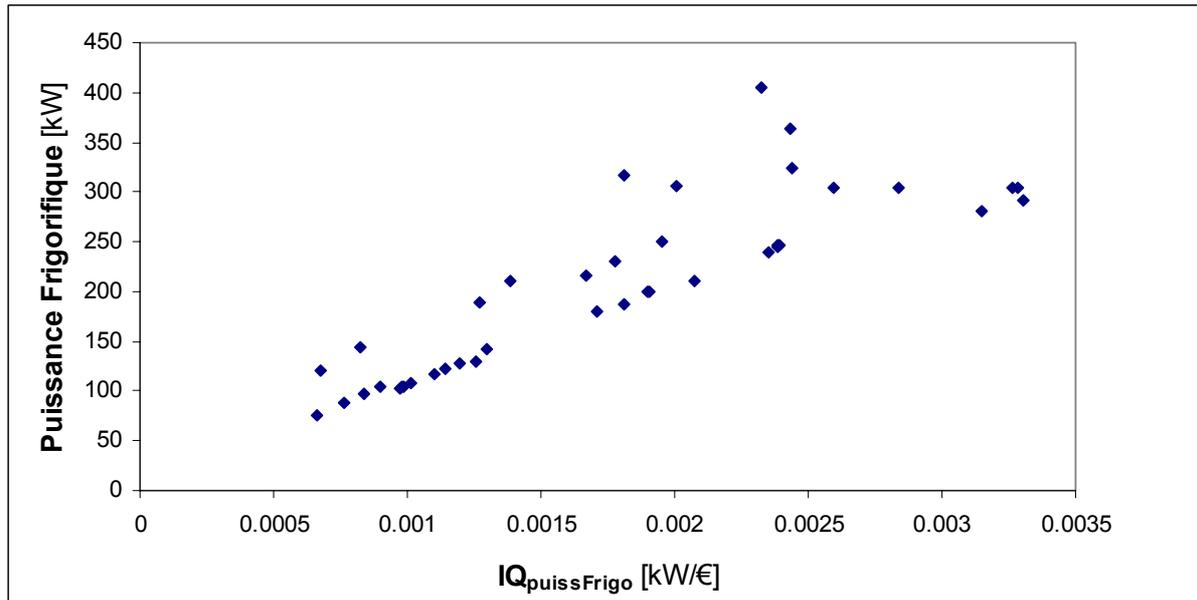
N°	Puissance Frigorifique [kW]	C <sub>Po</sub> max [€/h]	C <sub>Sys</sub> max [€]	I <sub>Q</sub> <sup>PuissFrigo</sup> [kW/€]	I <sub>P</sub> <sup>COEau</sup> [%]	I <sub>P</sub> <sup>COEn</sup> [%]	I <sub>P</sub> <sup>MSys</sup> [%]	I <sub>P</sub> <sup>EISys</sup>
1	210	1.31	101375.86	0.0141	69.78	0.75	7.54	11.48
2	104.52	2.07	105717.85	0.0139	270.41	0.73	7.76	12.2
3	187.69	1.47	103666.39	0.0138	113.4	0.77	7.52	11.65
4	102.56	2.33	105075.09	0.0138	340.19	0.75	7.63	11.86
5	200	1.57	104870.66	0.0138	139.57	0.75	7.61	11.88
6	122.05	2.33	106659.55	0.0139	340.19	0.74	7.8	12.19
7	180	1.77	105110.85	0.0138	191.91	0.79	7.66	11.87
8	117.45	2.59	106362.36	0.0139	409.98	0.77	7.79	11.98
9	240	1.28	102066.36	0.0139	61.06	0.69	7.47	11.6
10	324	1.38	132688.64	0.0162	87.23	0.71	11.33	20.32
11	244	1.38	102237.38	0.0139	87.23	0.69	7.46	11.51
12	250	1.57	127859.04	0.0162	139.57	0.74	10.93	19.55
13	246.15	1.47	102882.544	0.0139	113.4	0.69	7.51	11.56
14	216.36	1.77	129390	0.0158	191.91	0.76	10.73	19.1
15	247.5	1.57	103690.83	0.0139	139.57	0.69	7.59	11.49

16	230	1.84	129344.59	0.0166	209.35	0.75	11.28	19.82
17	210	1.31	151263.66	0.0196	69.78	0.69	15.62	30.11
18	405	1.31	174267.27	0.0165	69.78	0.69	15.16	31.83
19	143.53	1.61	173632.51	0.0277	148.29	0.73	25.32	34.16
20	363.64	1.41	149378.04	0.0175	95.95	0.69	13.79	29.11
21	188.23	1.61	148328.46	0.0177	148.29	0.69	13.86	28.24
22	317.33	1.54	175294.19	0.0161	130.84	0.69	14.86	31.1
23	200	2.13	177310.71	0.0273	287.86	0.73	25.47	34.41
24	306.67	1.64	152580.16	0.0174	157.01	0.69	13.98	29.21
25	129.23	1.47	103033.31	0.0139	113.4	0.81	7.52	11.48
26	104.52	2.06	106523.62	0.0141	270.41	0.73	7.89	12.16
27	305	1.31	107574.64	0.014	69.78	0.7	7.96	12.6
28	108.11	2.26	106352.26	0.0138	322.75	0.75	7.75	12.02
29	200	1.57	105424.25	0.0139	139.57	0.78	7.7	11.87
30	128.65	2.26	107420.798	0.0138	322.75	0.74	7.82	12.22
31	304.61	1.47	117330.22	0.0128	113.4	0.74	7.93	12.18
32	141.54	2.33	109080.06	0.014	340.19	0.74	8.03	12
33	280	1.24	88985.46	0.0135	52.34	0.69	6.33	8.69
34	75.49	2.46	114056.06	0.0141	374.37	0.83	8.47	13.28
35	305	1.31	92850.98	0.01259	69.78	0.69	6.15	8.25
36	87.59	2.55	114914.29	0.0141	398.34	0.83	8.52	13.34
37	290.91	1.41	88067.79	0.0133	95.95	0.69	6.14	8.22
38	97.05	2.66	115546.83	0.0141	427.83	0.83	8.55	13.38
39	304.61	1.47	93247.77	0.0125	113.4	0.69	6.15	8.21
40	104.98	2.77	117105.91	0.0141	458.65	0.84	8.67	13.58

La figure 4.20 présente la puissance frigorifique obtenue pour l'ensemble des solutions présentées en fonction de l'indice de qualité de cette puissance. L'évolution observée est quasi-linéaire, ce qui vérifie bien le fait que plus la température de chauffe sera élevée et plus la puissance frigorifique sera élevée, pour un même débit. Nous constatons également que l'indice de qualité augmente d'un facteur 7 avec la puissance frigorifique. Etant donnée la définition de la puissance frigorifique (cf. Equations 3.2 et 3.3), l'évolution observée de l'indice de qualité traduit le fait que les coûts de revient et de possession du système seront d'autant mieux rentabilisés que, à débit équivalent, la différence de température du fluide entre l'entrée et la sortie de l'étage de détente sera grande.

Par ailleurs, l'augmentation de la température de chauffe du fluide semble ne pas avoir d'influence notable sur la masse totale du système, puisque l'indice de performance relatif à cette caractéristique reste quasiment constante, aux environs de 8 %. Il y a donc grand intérêt à chauffer le

plus possible le fluide en amont de son traitement par l'évaporateur flash, pour rentabiliser le système.



**Figure 4.20.** Puissance frigorifique de l'ensemble des solutions en fonction de l'indice de qualité de puissance.

Pour toutes les solutions présentées, l'indicateur de performance relatif à la consommation énergétique reste relativement proche de 0,8 %. Cette stabilité est due au fait que les puissances des moteurs des différentes pompes ont été fixées dans le modèle global, à des valeurs correspondant à un débit maximal de 10 t/h. De plus, l'indicateur de performance restant à une valeur très faible, il apparaît que la consommation énergétique du procédé d'évaporation flash est très inférieure à celle du procédé de référence, à savoir l'évaporateur de la société GEYSERS, tout en ayant une meilleure puissance frigorifique. Ceci est dû au fait que l'évaporateur GEYSERS fonctionne de manière couplée avec une pompe à chaleur. Sa consommation énergétique est donc liée aux différentes pompes d'aspiration et également au compresseur de la pompe à chaleur, d'où une consommation supérieure.

Le procédé d'évaporation flash fonctionne, lui, comme une pompe à chaleur. Il ne nécessite donc pas l'ajout d'une pompe à chaleur annexe. Le nombre de composants consommateurs d'énergie électrique est donc réduit. De plus, l'efficacité énergétique étant améliorée, le refroidissement du fluide nécessitera une quantité moindre d'énergie électrique.

Nous proposons, dans [Hok05] une étude comparative entre le procédé d'évaporation flash et deux autres systèmes concurrents de refroidissement, dont une pompe à chaleur, sur la base de leur efficacité frigorifique, leur masse et le temps de séjour du fluide traité dans l'enceinte du système.

L'indicateur de performance relatif à la consommation en eau du système traduit une consommation élevée de l'évaporateur flash par rapport aux systèmes de refroidissement industriels, dont la consommation est de l'ordre de 1,433 L/min.kW<sub>th</sub>. Les figures 4.21 et 4.22 présentent l'évolution de cet indicateur en fonction des débits de liquide de refroidissement des condenseurs haute et basse pression, respectivement.

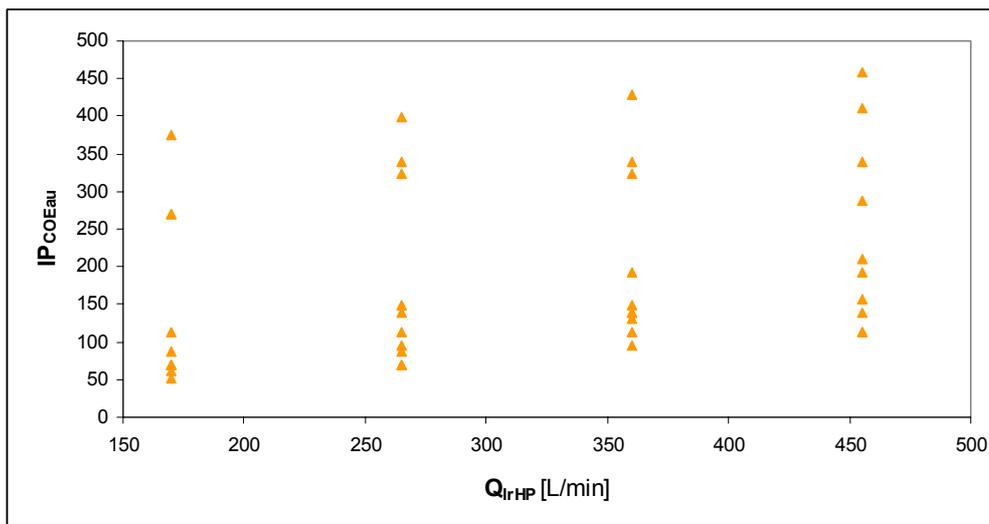


Figure 4.21. Evolution de l'indice de performance de consommation en eau par rapport au débit de liquide de refroidissement au condenseur haute pression.

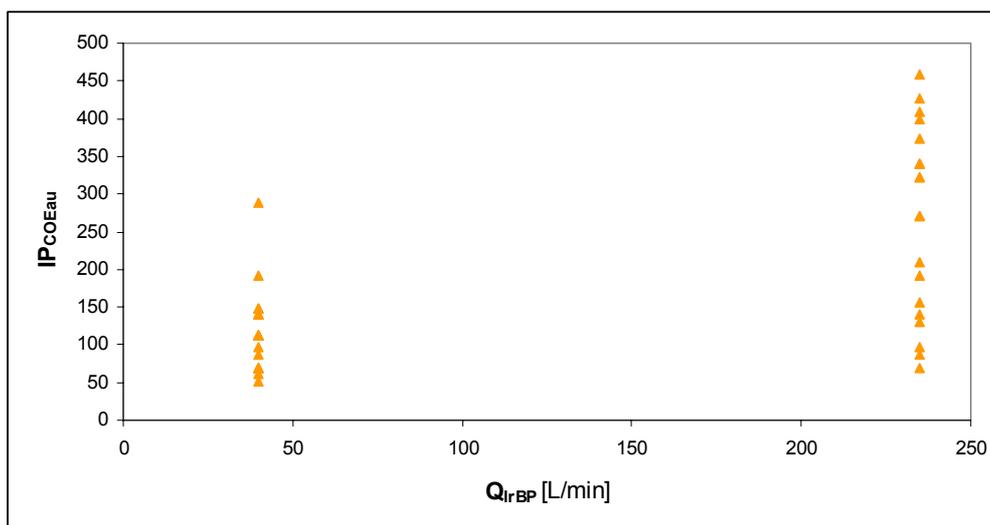
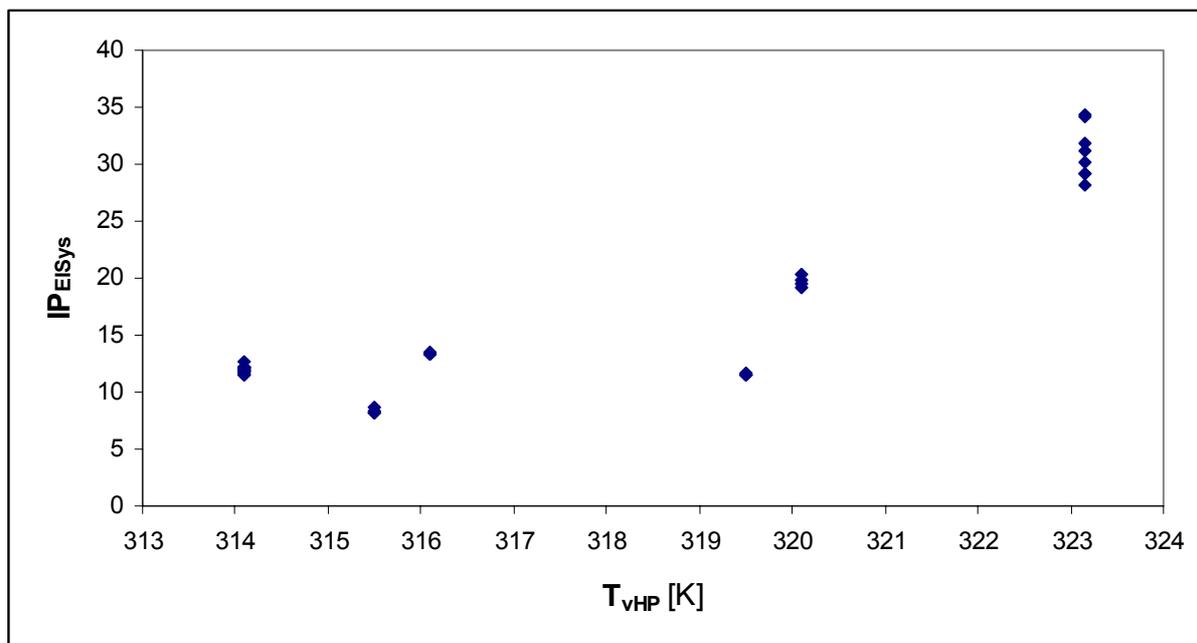


Figure 4.22. Evolution de l'indice de performance de consommation en eau par rapport au débit de liquide de refroidissement au condenseur basse pression.

Dans les deux cas, nous constatons une évolution linéaire de l'indice de performance de consommation d'eau avec les débits de liquide de refroidissement. Cette observation découle de la définition de la consommation en eau. Néanmoins, nous constatons que la variation de l'indice est plus marquée lorsque le débit de liquide de refroidissement au condenseur basse pression augmente que lorsque celle au condenseur haute pression augmente. Cette observation vient du fait que la différence de pression entre les étages haute et basse pression est moins grande, ce qui fait que la puissance frigorifique créée à l'étage basse pression est moins importante comparativement au débit d'eau nécessaire. Nous pouvons donc conclure que la consommation en eau du système peut être diminuée en réduisant le débit de liquide de refroidissement à l'étage basse pression.

Pour ce qui est de l'impact environnemental du système, la valeur de l'EcoIndicateur pour l'évaporateur flash oscille entre 8000 et 35000 points. Ces valeurs sont mises en rapport à une valeur de référence de 1000 points dans l'évaluation de l'indicateur de performance d'impact environnemental. Ainsi, plus la valeur de l'EcoIndicateur se rapproche de cette valeur de référence, et plus son impact sur l'environnement sera réduit. Cet indicateur est relatif aux émissions liées à la production, à la mise en forme et au recyclage de l'acier utilisé pour la fabrication des différents composants à dimensionner.

La figure 4.23 présente son évolution en fonction de la température de la vapeur à l'étage haute pression.



**Figure 4.23.** Evolution de l'indicateur de performance d'impact environnemental par rapport à la température de la vapeur dans l'étage haute pression.

Nous constatons que les valeurs maximales de l'indice de performance sont obtenues pour les températures de vapeur à l'étage haute pression les plus élevées, avec une augmentation de l'ordre de 20 000 points pour une variation de 9 K de la température.

Cette évolution vient du fait que la température de la vapeur à l'étage haute pression correspond à la température de refroidissement du fluide dans cet étage. Elle correspond donc à la température d'entrée du fluide à l'étage basse pression. Ainsi, plus cette température sera élevée, plus la différence de température et donc de pression entre l'entrée et la sortie de l'étage basse pression sera élevée, d'où un flash plus violent. Ce flash plus violent va entraîner la formation de gouttelettes de plus grosse taille, si on se réfère à l'équation de Laplace :

$$d_g^2 = \frac{4 \cdot \sigma}{P_{\text{sat}}(T_{\text{vHP}}) - P_{\text{sat}}(T_{\text{vBP}})} \quad 4.32$$

La cuve basse pression a été dimensionnée en appliquant le principe fondamental de la dynamique à une gouttelette soumise à des forces de gravité et de frottement ainsi qu'à la poussée d'Archimède, sur la base qu'aucune goutte ne soit emportée par la vapeur, comme le montre l'équation 4.33.

$$d_{\text{C}_{\text{BP}}} = \sqrt{\frac{72 \cdot \mu_{\text{fl}} \cdot q_{\text{vBP}}}{g \cdot \rho_{\text{fl}} \cdot \pi \cdot d_g^2 \cdot (\rho_{\text{vBP}} - \rho_{\text{fl}})}} \quad 4.35$$

Ainsi, plus le diamètre de gouttelettes formées à l'étage basse pression sera grand, plus le diamètre de la cuve sera grand, ainsi que l'épaisseur, elle-même calculée en fonction du diamètre de la cuve (cf. Equation 4.25), d'où une consommation en matière (acier) augmentée.

L'EcoIndicateur étant estimé en fonction de la quantité de matière consommée, sa valeur sera donc d'autant plus élevée que la température de la vapeur à l'étage haute pression sera élevée.

#### 4-6.4 **Conclusion.**

Le modèle global a été résolu à l'aide du solveur *Constraint Explorer*, pour des débits compris entre 5 et 10 t/h. Les résultats obtenus montrent que l'indice de qualité relatif à la puissance frigorifique produite par les évaporateurs flash augmente avec la température de chauffe du produit.

La consommation énergétique de ces systèmes est très faible, comparativement à celle de systèmes de refroidissement industriels pour une puissance frigorifique élevée.

La consommation en eau est élevée, comparativement à ces mêmes systèmes, mais peut être améliorée en minimisant le débit d'eau consommée à l'étage basse pression.

L'impact environnemental des procédés d'évaporation flash est également évalué, par rapport à une valeur de référence de 1000 points. Cet impact est grandement influencé par la température d'évaporation à l'étage haute pression, puisque celle-ci conditionnera le diamètre de la cuve basse pression, donc la consommation en matériau.

---

---

# CHAPITRE 5

---

---

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES



## **5-1 CONCLUSION GENERALE**

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une démarche globale de formalisation de modèles par contraintes, initialement développée par D. Scaravetti [Sca04a] et Y. Vernat [Ver04]. Nous avons mis en oeuvre un outil d'aide à la décision pour la conception préliminaire de systèmes de refroidissement par évaporation flash. Cet outil intègre des connaissances liées au comportement physique du système, ainsi que des contraintes dimensionnelles, économiques et environnementales, et permet ainsi de ramener à l'échelle des décisions, les informations nécessaires et pertinentes pour la conception.

Notre contribution s'est donc faite à différents niveaux :

- développement de la démarche de formalisation,
- formulation sous forme de Problèmes de Satisfaction de Contraintes, et qualification de modèles pour la conception préliminaire de systèmes de refroidissement par évaporation flash,
- résolution des modèles.

### **5-1.1 Développement de la démarche de formalisation des modèles.**

La démarche de formalisation des modèles est divisée en trois phases principales d'analyse et de structuration du problème, de formulation puis de qualification des modèles. L'apport du travail de thèse à cette démarche concerne les aspects liés à la formulation des modèles et à la définition de leur cadre de validité, par l'énumération, la classification et la hiérarchisation des hypothèses qui leur sont associées.

La formalisation des modèles de systèmes aussi complexes que les évaporateurs flash implique nécessairement des changements d'échelle. Ces systèmes sont généralement composés d'un grand nombre de composants, dont la complexité, variable, implique de descendre à des niveaux systémiques différents pour définir tous les paramètres nécessaires à la formulation des modèles (cuve de détente, condenseurs de vapeur).

Nous avons vu, au cours de ce travail, que la cohérence du modèle global suppose que tous les modèles constitutifs aient des interfaces correspondantes. Ceci implique que, pour certains modèles, la formulation obtenue à un niveau systémique donné doit être adaptée à un niveau supérieur (ou inférieur), pour s'accorder à un autre modèle. Ceci suppose une gestion des hypothèses associées à la formulation des modèles, en tenant compte du type d'information perdue ou apportée par le changement d'échelle.

Nous avons donc proposé un système de classification des hypothèses qui permet de pallier le problème de leur énumération : elles sont hiérarchisées en fonction du type de modification qu'elles induisent. Nous distinguons ainsi, parmi les hypothèses de généralisation qui permettent la modélisation des systèmes, les hypothèses simplificatrices qui vont augmenter la parcimonie des modèles et en diminuer l'exactitude, les hypothèses spécialisantes qui vont diminuer la généralité d'utilisation des modèles et les hypothèses flouifiantes, qui vont en diminuer la précision. D'autres types d'hypothèses, hiérarchiquement inférieures, ont également été définies.

Ce travail de hiérarchisation apporte, en outre, des informations supplémentaires facilitant l'estimation du niveau de spécialisation des modèles lors de l'étape de qualification.

### **5-1.2 Formulation par contraintes, qualification des modèles de conception architecturale pour les évaporateurs flash et résolution des modèles.**

La démarche de formalisation a été appliquée à trois cas d'évaporateurs flash bi-étagés, conduisant à l'élaboration d'une base de modèles formulés par contraintes, adaptés à l'aide à la décision en conception préliminaire. Ces modèles regroupent les informations pertinentes nécessaires à la détermination de solutions satisfaisant un maximum de critères de conception : contraintes physiques et d'ingénierie (coefficients d'échange, débits), contraintes économiques (coût de revient, consommations), contraintes dimensionnelles (taille des cuves, poids du système) et contraintes environnementales (consommations en ressources, EcoIndicateur).

L'apport de ce travail, par rapport à ceux de D. Scaravetti [Sca04a] et Y. Vernat [Ver04], réside donc dans la formulation et l'intégration de différents types de contraintes, puisque des exigences économiques et environnementales ont été intégrées au modèle global. Ceci a permis de valider l'intérêt de la démarche de formalisation pour l'intégration de contraintes généralement prises en compte en aval, dès la phase de conception préliminaire.

De plus, le fonctionnement des évaporateurs flash met en jeu des technologies complexes (vide, transferts de chaleur et de masse, dévésiculage) dont la modélisation a nécessité la prise en compte d'un nombre supérieur de contraintes. Nous avons donc proposé un mode de numérotation des composants dans l'organigramme technique étendu, de manière à faciliter la gestion des modèles de composants et d'interactions, dans un contexte d'ingénierie concourante et dans un souci de capitalisation des connaissances en vue de leur réutilisation.

Les modèles associés au comportement physique du système ont été validés et qualifiés à partir de résultats expérimentaux d'essais réalisés sur un pilote instrumenté. Ces essais ont permis la validation de l'utilisation de condenseurs verticaux à plaques matelassés pour ce type d'application,

puisque la capacité de traitement a été multipliée par deux pour un même volume, par rapport à l'emploi de condenseurs à tubes et calandre [Bou03].

L'ensemble des modèles associés aux évaporateurs flash a également été qualifié en terme d'aide à la décision, par l'évaluation des quatre paramètres de Parcimonie, d'Exactitude, de Précision et de Spécialisation (PEPS). Ils se sont avérés exploitables, mais très spécialisés et donc limités au contexte d'évaporation flash par jet tombant, pour une utilisation dans le domaine agroalimentaire.

Les modèles formulés ont été traités par le biais du solveur *Constraint Explorer*. Ils ont permis une première analyse des caractéristiques influençant la conception des procédés d'évaporation flash. Une étude sur un domaine plus large de débits et de températures reste cependant à effectuer, pour pouvoir disposer d'un outil d'aide à la décision plus global.

## **5-2 PERSPECTIVES DE RECHERCHE**

Les perspectives de recherche autour de ce travail de développement d'un outil d'aide à la décision en conception préliminaire de procédés d'évaporation flash se situent à plusieurs niveaux.

### **5-2.1 Extension du champ d'application de l'outil.**

Nous avons vu au chapitre 4 que la spécialisation élevée de ces modèles est essentiellement due au choix des composants standard (pompes, mélangeur). En effet, les modèles associés à ces composants sont, pour le moment, définis pour un contexte particulier d'application : ils sont liés à une référence, un coût, une courbe fournie par le constructeur et/ou une puissance données.

Nous envisageons l'intégration, dans la base de connaissances, de catalogues constructeurs pour les différents composants standard comme un bon moyen de pallier ce problème de spécialisation trop élevée. En effet, l'intégration de ces catalogues permettrait d'optimiser le choix de ces composants compte tenu des contraintes imposées. Ces composants ayant une influence non négligeable sur les coûts de revient, l'optimisation de leur choix permettrait, en outre, de minimiser ces coûts.

## 5-2.2 Intégration de contraintes supplémentaires.

Les modèles présentés dans ce travail intègrent des contraintes liées au comportement physique des évaporateurs flash bi-étagés, à leurs coûts de revient et de possession et à leur impact sur l'environnement.

Pour ce qui est des contraintes liées au comportement physique, la validation expérimentale a permis d'aboutir à des modèles exacts, qui traduisent bien le comportement réel de ces systèmes.

L'évaluation du coût de revient du système s'est faite sur la base de modélisations des prix en fonction du poids de matériau utilisé, et la prise en compte du coût d'installation s'est faite par le biais du Facteur de Lang, proposé par F. Maréchal [Mar03]. Ce modèle permet d'aboutir à des résultats convenables, mais dont l'exactitude pourrait être améliorée. Parallèlement à l'intégration des catalogues de composants standard, qui permettrait d'optimiser le coût de ces composants, la prise en compte de contraintes liées aux processus de fabrication conduirait à une amélioration notable de l'exactitude de ce modèle. Ce travail a été envisagé par la mise en place d'une thèse portant sur la prise en compte des processus de fabrication dans la conception préliminaire (thèse en cours de Serge Mouton).

Les seuls éléments d'interactions pris en compte dans l'évaluation du coût de revient sont les tuyauteries. La prise en compte du lien existant entre les flux identifiés aux interactions entre composants et les éléments d'interaction associés permettrait de faciliter leur intégration dans le modèle global et donc d'améliorer son exactitude en conséquence. Ce travail a été initié par le biais de la thèse de Mohammed Sallaou [Sal07], débutée en 2004, portant sur la mise en place d'une base de données de modèles de conception mécanique exprimés sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes, et qualifiés en terme de PEPS.

Parallèlement, l'intégration de contraintes liées à la maintenance du système permettrait également d'améliorer l'exactitude du modèle des coûts de possession.

Pour ce qui est de l'évaluation de l'impact environnemental, les critères proposés sont relativement sommaires. Toutes les étapes du cycle de vie n'ont pas été prises en compte dans l'évaluation des consommations en ressources, et l'évaluation des émissions pour le calcul de l'EcoIndicateur 99 doit être étendue à tous les matériaux impliqués dans la fabrication du système ainsi qu'à son transport.

### **5-2.3 Evaluation de la Parcimonie, et du niveau de spécialisation dans le PEPS.**

L'évaluation de l'aide apportée par un modèle pour la prise de décision se fait par l'évaluation de sa Parcimonie, de son Exactitude, de sa Précision et de sa Spécialisation ou PEPS.

Lors de l'évaluation de la parcimonie, nous avons souligné la difficulté liée à la comparaison des modèles entre eux. Ce paramètre étant relatif au nombre de variables et de relations mises en jeu, son estimation peut varier en fonction de la formulation adoptée pour le modèle. Y. Vernat [Ver04] souligne, en effet, le fait qu'un même modèle puisse être formalisé de différentes manières, induisant un nombre différent de variables et de relations. De plus, les travaux relatifs à la thèse de Raphael Chenouard [Che07] portant sur les techniques de satisfaction de contraintes appliquées à la conception préliminaire, initiée en 2004, ont montré que le temps de résolution n'est pas nécessairement lié au nombre de relations et de variables incluses dans le modèle, mais à la manière dont le solveur traite les variables. R. Chenouard [Che06] a proposé une heuristique de résolution permettant de minimiser ce temps de résolution. Cependant, cette heuristique concerne l'outil de traitement. La mise en place d'une méthode d'évaluation différente de la parcimonie d'un modèle, traduisant de façon irrévocable son impact sur la résolution de ce modèle (temps de calcul, etc.), est donc à envisager.

L'évaluation du niveau de spécialisation s'est faite, jusqu'ici, de manière qualitative et subjective. Le développement d'un mode d'évaluation quantitatif de ce paramètre permettrait de faciliter la comparaison entre les modèles. Différentes voies sont envisagées, avec, notamment, l'approfondissement du lien entre la définition des hypothèses et l'impact sur le PEPS ou l'emploi de techniques liées à la logique floue [Bou02, Gar99] ou au raisonnement qualitatif.

Le mode de représentation du PEPS devra évidemment évoluer en conséquence, vers une représentation basée sur des échelles quantitatives.



---

---

# NOMENCLATURE

---

---



# NOMENCLATURE

## Acronymes, abréviations

<b>ACV</b>	Analyse de Cycle de Vie
<b>BDF</b>	Bloc Diagramme Fonctionnel
<b>Cr</b>	Critère
<b>CdCF</b>	Cahier des Charges Fonctionnel
<b>DALY</b>	Disability Adjusted Life Years
<b>FAST</b>	Function Analysis System Technique
<b>FC</b>	Fonction Contrainte
<b>FS</b>	Fonction de service
<b>FT</b>	Fonction Technique
<b>GSC</b>	Graphe Substances-Champs
<b>MC</b>	Modèle de Composant
<b>MI</b>	Modèle d'Interaction
<b>OTé</b>	Organigramme Technique étendu
<b>PDF</b>	Potentially Disappeared Fraction
<b>PEPS</b>	Parcimonie, Exactitude, Précision, Spécialisation
<b>PSC</b>	Problème de Satisfaction de Contraintes
<b>RNTL</b>	Réseau National des Technologies Logicielles
<b>VA</b>	Variable Auxiliaire
<b>VCo</b>	Variable de Conception

## Variables

<b><i>T</i></b>	Température [K]
<b><i>x</i></b>	Taux d'évaporation [%]
<b><i>P</i></b>	Pression [bar]
<b><i>Co<sub>En</sub></i></b>	Consommation en électricité [kWh]
<b><i>Co<sub>Eau</sub></i></b>	Consommation en eau [L/h.kW <sub>th</sub> ]
<b><i>C</i></b>	Coût/Prix [€]
<b><i>X</i></b>	Titre
<b><i>Cp</i></b>	Capacité calorifique [J/kg.K]

<b><i>V</i></b>	Volume [m <sup>3</sup> ]
<b><i>M</i></b>	Masse [kg]
<b><i>S</i></b>	Surface [m <sup>2</sup> ]
<b><i>A</i></b>	Surface d'échange [m <sup>2</sup> ]
<b><i>L</i></b>	Longueur [m]
<b><i>NUT</i></b>	Nombre d'Unité de Transfert
<b><i>k</i></b>	Coefficient global d'échange [W/m <sup>2</sup> .K]
<b><i>h</i></b>	Coefficient moyen d'échange [W/m <sup>2</sup> .K]
<b><i>H</i></b>	Hauteur [m]
<b><i>D</i></b>	Diamètre [m]
<b><i>d</i></b>	Diamètre [m]
<b><i>d<sub>h</sub></i></b>	Diamètre hydraulique [m]
<b><i>Re</i></b>	Nombre de Reynolds
<b><i>Pr</i></b>	Nombre de Prandtl
<b><i>G</i></b>	Nombre de Grashoff
<b><i>q</i></b>	Débit [kg/s]
<b><i>q<sub>tr</sub></i></b>	Débit du liquide de refroidissement [L/min]
<b><i>N</i></b>	Nombre ou vitesse de rotation [tr/min]
<b><i>n</i></b>	Nombre de plaques
<b><i>l</i></b>	Largeur [m]
<b><i>e</i></b>	Epaisseur [m]
<b><i>g</i></b>	Accélération de la pesanteur [m/s <sup>2</sup> ]
<b><i>t</i></b>	temps [s]
<b><i>EI</i></b>	EcoIndicateur
<b><i>Puiss</i></b>	Puissance [kW]
<b><i>f</i></b>	Contrainte nominale de calcul [N/m <sup>2</sup> ]
<b><i>z</i></b>	Coefficient de soudure
<b><i>co</i></b>	Conicité [°]

### Lettres grecques

<b><math>\varphi</math></b>	Flux de chaleur [W]
<b><math>\Delta h_{evap}</math></b>	Chaleur latente de vaporisation [J/K]
<b><math>\Delta h_v(T_v)</math></b>	Chaleur latente de vaporisation à la température $T_v$ [J/Kg]

$\varepsilon$	Emissivité/efficacité
$\lambda$	Conductivité thermique [W/m.K]
$\mu$	Viscosité dynamique [kg/m.s]
$\rho$	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]

### Indices

<i>p</i>	Produit (fluide à traiter)
<i>f</i>	Fluide à traiter
<i>fl</i>	Flotteur
<i>e</i>	Entrée
<i>s</i>	Sortie
<i>atm</i>	Atmosphérique
<i>0</i>	Initial
<i>lr</i>	Liquide de refroidissement
<i>v</i>	Vapeur
<i>fc</i>	Fluide chaud
<i>ff</i>	Fluide froid
<i>Sys</i>	Système
<i>sat</i>	Saturation
<i>cv</i>	Convection
<i>cd</i>	Condensation
<i>cond.</i>	Conduction
<i>liq</i>	Liquide
<i>ts</i>	Tube
<i>pl</i>	Plaque
<i>HP</i>	Haute pression
<i>BP</i>	Basse pression
<i>rev</i>	Revient
<i>interr.</i>	Interruption
<i>rempl.</i>	Remplissage
<i>u</i>	Utilisation
<i>cdst</i>	Film de condensat

<b><i>mat</i></b>	Matériau
<b><i>mél</i></b>	Mélangeur
<b><i>Cint</i></b>	Cuve intérieure
<b><i>iso</i></b>	Isolation
<b><i>p.ext</i></b>	Paroi extérieure
<b><i>I2</i></b>	Etat intermédiaire entre HP et BP
<b><i>MF</i></b>	Mise en forme
<b><i>PE</i></b>	Pompe d'extraction
<b><i>PAV</i></b>	Pompe à vide
<b><i>PC</i></b>	Pompe à condensats
<b><i>CN</i></b>	Capteur de niveau
<b><i>co</i></b>	Partie conique
<b><i>cyl</i></b>	Partie cylindrique
<b><i>fd</i></b>	Fond de cuve
<b><i>CT</i></b>	Cuve tampon
<b><i>air</i></b>	Air
<b><i>ref</i></b>	Refoulement
<b><i>asp</i></b>	Aspiration
<b><i>ouv</i></b>	Ouverture entre les étages HP et BP
<b><i>var</i></b>	Variables
<b><i>rel</i></b>	Relations

---

---

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

---

---



- [Aug06] Augeraud M., Collé F., Sarramia D., Boussier J.M., Aide à la décision pour la conception de systèmes complexes : une approche multi-agents, 6<sup>e</sup> conférence francophone de Modélisation et SIMulation, MOSIM'06, 3-5 avril 2006, "Modélisation, Optimisation, Simulation des systèmes: défis et opportunités, Maroc.
- [Bal96] Balistrrou M., Harmand S., Desmet B., "Etude des phénomènes de transferts thermiques dans les stérilisateur à vapeur", Revue générale de thermique, 35, (418-419), 686-692, 1996.
- [Ben97] Benhamou F., Older W., 1997, "Applying interval arithmetic to real, integer and Boolean constraints", Journal of Logic Programming, 32 (1) 1-24.
- [Ber88] Berliner C., Brimson J., "Cost management for Today's Advanced Manufacturing", Harvard Business Press, Boston, 1988.
- [Ber04] Bertrand Alex, La production de froid dans le milieu agro-alimentaire, industriel et tertiaire, Impacts environnementaux et applications techniques, Centre de Recherche Publique Henri Tudor, Les cahiers de la production propre publiés par le Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE), cahier n°4, Luxembourg, Juin 2004.  
[http://www.crte.lu/mmp/online/website/content/clean/guidelines/file\\_2143/crte\\_cpp04.pdf](http://www.crte.lu/mmp/online/website/content/clean/guidelines/file_2143/crte_cpp04.pdf)
- [Bou02] Bouchon-Meunier B., Marsala C., Logique floue, principes, aide à la décision, Informatique et systèmes d'information, Information – Commande – Communication, HERMES, Lavoisier, Paris, 2002.
- [Bou03] Bouchama A., "Refroidissement en cascade par flash détente, modélisation par contraintes et aide à la décision", mémoire de thèse de l'école doctorale Mécanique des métiers de l'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2003.
- [Bov06] Bovea M.D., Gallardo A., The influence of impact assessment methods for materials selection for eco design, Materials and Design, 27-3 (2006) 209-215.
- [Che61] Chen M.M., An analytical study of laminar film condensation: part.2-Single and multiple horizontal tubes, Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, vol.83, pp.55-60, 1961.
- [Che06] Chenouard R., Granvilliers L., Sebastian P., Mixed CSP techniques applied to embodiment design, Constraint Programming Conference CP 2006, Doctoral Program, 25-29 September 2006, Nantes.

- [Che07] Chenouard R., Techniques de satisfaction de contraintes appliquées à la conception préliminaire, thèse de doctorat de l'ENSAM, soutenance prévue pour décembre 2007.
- [Chu04] Chung B.J., Kim S., Kim M.C., An experimental investigation of film condensation of flowing mixtures of steam and air on a vertical flat plate, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol.31, n°5, 703-710, 2004.
- [Cle87] Cleary J.G., 1987, "Logical Arithmetic", *Future Computing Systems*, 2 (2) 125-149.
- [Cor03] Corre C., 2003, "Optimisation par algorithmes génétiques, Applications en sciences de l'ingénieur", Ecole Doctorale ENSAM, Paris.
- [Del90] Delhaye J.M., Transferts de chaleurs: ébullition ou condensation de corps purs, Ed. Techniques de l'Ingénieur, n° A-1560, 1990.
- [Des97] Desderi U., Bidini G., "Study of possible optimisation criteria for geothermal power plants, *Energy Convers. Mgmt*", 38, (15-17), 1681-1691, 1997.
- [Duh06] Duhem P., 1906, "La théorie physique, son objet, sa structure", 2ème éd. augmentée, Paris, 1914; rééd. Vrin, 1981.
- [Duq05a] Duquet B., Environnement et fonderie – Air, Editions Techniques de l'Ingénieur, Mars 2005.
- [Duq05b] Duquet B., Environnement et fonderie – Eau, Editions Techniques de l'Ingénieur, Mars 2005.
- [EDF95] Fiche technique EDF Industrie :  
<http://www.tris-online.com/09.php>
- [Fuj72] Fujii T., Uehara H., Oda K., Film condensation on a surface with uniform heat and body force convection, *Heat Transfer Japanese Research*, vol.4, p.76-83, 1972.
- [Gar99] Garavelli A.C., Gorgoglione M., Scozzi B., Fuzzy logic to improve the robustness of decision support systems under uncertainty, *Computer and Industrial Engineering*, 37, 477-480, 1999.
- [Gir01] Girard P., Eynard B., Merlo C., Modélisation des connaissances pour la conduite de la conception, "Dynamique des connaissances en conception : acquisition, capitalisation, réutilisation", Journée AIP PRIMECA, Grenoble, 22 mai 2001.
- [Gra00] Granvilliers L., Monfroy E., 2000, "Declarative Modelling of Constraint Propagation Strategies", *Proceedings of the First Biennial International Conference on Advances in Information Systems (ADVIS'2000)*, Izmir, Turkey, 232-238.

- [Giu05] Giudice F., La Rosa G., Risitano A., Materials selection in life-cycle design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choices, *Materials and Design*, 26 (2005) 9-20.
- [Het06] Hétreux G., Theyry R., Olivier N., Le Lann J.M., Exploitation de la simulation dynamique hybride pour la conduite de procédés semi-continus, 6<sup>e</sup> conférence francophone de Modélisation et SIMulation, MOSIM'06, 3-5 avril 2006, "Modélisation, Optimisation, Simulation des systèmes: défis et opportunités, Maroc.
- [Hok05] Ho Kon Tiat V., Sebastian P., Nadeau J.P., Decision support system for high performance flash evaporators, *Heat transfer in Components and systems for Sustainable Energy Technologies*, Heat SET 2005, 5-7 April 2005, Grenoble.
- [Jac03] Jacqueson L., Millet D., Aoussat A., Integration of the environment in product design by learning process: proposal of a piloting tool, *International Journal of Environment and Pollution*, 19-4 (2003) 317-335.
- [Jau01] Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E., 2001, "Applied interval analysis", Springer-Verlag.
- [Kuh97] Kuhn S.Z., Schrock V.E., Peterson P.F., An investigation of condensation from steam-gas mixtures flowing downward inside a vertical tube, *Nuclear Engineering and Design*, vol.177, 53-69, 1997.
- [Lho93] Lhomme O., 1993, "Consistency techniques for numeric CSPs", *Proceedings of International Joint Conferences of Artificial Intelligence (IJCAI'93)*, Chambéry, France, 232-238.
- [Lot99] Lottaz C., Clément D., Faltings B.V., Smith I.F.C., 1999, "Constraint-based support for collaboration in design and construction", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13 (1) 23-35.
- [Mar03] Marechal F., Définition du problème thermo-économique : estimation des investissements et calcul du coût opératoire pour les systèmes industriels, calcul des émissions et coûts des émissions, notes de cours, Laboratoire d'Energétique Industrielle, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Canada, 2003.
- [Mer00] Merino J.M., Leon M., Rueda F., Diaz R., "Flash evaporation of chalogenide thin films", *Thin Solid Films*, vol. 361-362, p. 22-27, 2000.
- [Mil00] Millet D., Prise en compte de l'environnement en conception: quel processus pour intégrer une notion floue dans un univers hyper-contraint?, Journée

- PRIMECA Méthodes de conception, Outils et systèmes de mangement pour l'intégration de l'environnement, ENSAM Chambéry, 2000.
- [Miy01] Miyatake O., Koito Y., Tagawa K., Murata Y., "Transient characteristics and performance of a novel desalination system based on heat storage and spray flashing", *Desalination*, 137,157-166, 2001.
- [Nad06a] Nadeau J.P., Pailhes J., 2006, "Intégration de l'innovation et des sensations utilisateur en conception préliminaire par le biais de l'analyse fonctionnelle", *Ingénierie de la conception et cycle de vie du produit*, Chapitre 2, *Traité IC2*, ISBN : 2-7462-1214-5, Hermès, Paris.
- [Nad06b] Nadeau J.P., Pailhes J., Scaravetti D., "Des outils de l'analyse fonctionnelle vers la créativité technique", *International Journal Of Design and Innovation Research*, 3 (3-4), pp87-106, Paris, 2006.
- [Pah96] Pahl G., Beitz W., 1996, "Engineering design- A systematic approach", 2<sup>nd</sup> edition, Springer Verlag, Londres.
- [Par96] Park S.K., Kim M.H., Yoo K.J., Condensation of pure steam and steam-air mixture with surface waves of condensate film on a vertical wall, *International Journal of Multiphase Flow*, 22, 5, 893-908, 1996.
- [Poi03] Poincaré H., 1903, "La science et l'hypothèse", Ed. Flammarion, 1943. Ouvrage en accès libre sur <http://abu.cnam.fr/cgi-bin/go?scihyp2>
- [Pre04] Prek M., Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study, *Energy and Buildings*, 36 (2004) 1021-1027.

Disponibles sur : <http://www.pre.nl/eco-indicator99/ei99-reports.htm>

- [Pré00a] PréConsultants b.v., The Eco Indicator 99: a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology report, Ministry of Housing, Spatial planning and the Environment, Communications directorate, The Netherlands, October 2000.
- [Pré00b] PréConsultants b.v., Eco Indicator 99: a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, report, Manual for designers, Spatial planning and the Environment, Communications directorate, The Netherlands, October 2000.
- [Pré01] PréConsultants b.v., The Eco Indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology annex, Third Edition, Ministry of Housing, Spatial planning and the Environment, Communications directorate, The Netherlands, June 2001.

- [Rai05] Raizer Neto E., Mariotte M.T., Hinz R.T.P., Proposal of indicators to measure sustainability of an industrial manufacturing, CIRP Life Cycle Engineering, Grenoble, 2005.
- [Sal07] Sallaou M., Mise en place d'une base de données en construction mécanique pour l'expression des modèles de conception préliminaire à base de contraintes, thèse de doctorat, Ecole doctorale de l'ENSAM, soutenance prévue pour décembre 2007.
- [Sam95] Sam J., 1995, "Constraint Consistency Techniques for Continuous Domains", thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [Sap01] Sapuan S.M., A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design, *Materials and Design*, 22 (2001) 687-695.
- [Sau96] Saur K., Life cycle assessment as an engineering tool in the automotive industry, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol.1, 1996.
- [Sav00] Savransky S.D., 2000, "Engineering of creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving", CRC Press.
- [Sca04a] Scaravetti D., "Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire", mémoire de thèse présenté à l'Université Bordeaux I, 2004.
- [Sca04b] Scaravetti D., Pailhes J., Nadeau J.P., Sebastian P., 2004, "Aided decision-making for an embodiment design problem", *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, edited by Alan Bramley, Daniel Brissaud, Daniel Coutellier and Chris McMahan, Kluwer Academic Press.
- [Sca06] Scaravetti D., Sebastian P., Nadeau J.P., 2006, "Structuration d'un problème de conception préliminaire, formulation et résolution par satisfaction de contraintes", *Ingénierie de la conception et cycle de vie du produit*, Chapitre 7, *Traité IC2*, ISBN : 2-7462-1214-5, Hermès, Paris.
- [Seb02] Sebastian P., Nadeau J.P., Experiments and modeling of falling jet flash evaporators for vintage treatment, *Int. J. Therm. Sci.*, 41-3 (2002) 269–280.
- [Seb03] Sébastien P., 2003, "L'aide à la décision dans le domaine du génie des procédés", *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université Bordeaux 1.
- [Set93] SETAC, Guidelines for life cycle assessment: a code of practice, 1993.
- [Sho97] Shokoumand H., Atashkadi P., "Performance improvement of single, flashing, binary, combined cycle for geothermal power plant", *Energy*, 22, (7), 637-643, 1997.
- [Suh90] Suh N.P., 1990, "The principle of design", Oxford University Press, New York.

- [Swe96] Sweatman A., Simon M., Design for environment tools and product innovation, CIRP, 3<sup>rd</sup> International life cycle Engineering ECO Performance, Zurich, Suisse, 1996.
- [Tas03] Tassinari R., 2003, "Pratique de l'analyse fonctionnelle", DUNOD, Paris.
- [Tec01] Journée professionnelle Conservation et transformation des fruits : nouveaux enjeux, nouvelles techniques, CIRAD- Flhor, 5 septembre 2001, Montpellier, <http://technofruits2001.cirad.fr>
- [Tho96] Thornton A., 1996, "The Use of Constraint-based Design Knowledge to Improve the Search for Feasible Designs", Engineering Application of Artificial Intelligence, 9, 393-402.
- [Tra97] Trave-Massuyes L., Dague P., Guerrin F., "Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur", HERMES série diagnostic et maintenance, ISBN 2-86601-611-4, Paris, 1997.
- [Tre98] Trethewey K.R., Wood R.J.K., Puget Y., Roberge P.R., Development of a knowledge-based system for material management, Materials and Design, 19 (1998) 39-56.
- [Tre04a] Site Web Laboratoire TREFLE (site ENSAM, Opérations de recherche, Systèmes Energétiques et Conception), <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr>
- [Tre04b] Site Web Laboratoire TREFLE (site ENSAM, Valorisation, MALIN), <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/malin>, 2004.
- [Ver04] Vernat Y., "Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire ", Thèse de doctorat, ENSAM, 2004.
- [Ver06] Vernat Y., Nadeau J.P., Sebastian P., Fischer X., 2006, "Démarche de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire, Evaluation et décision dans le processus de conception", Chapitre 1, ISBN 2-7462-1394-X, Hermès, Paris.
- [webDiox] Emissions de dioxines dans l'atmosphère  
<http://www.ping.be/~ping5859/Fr/ChloreDiMat.html#Diox>
- [webGES] Emissions de gaz à effet de serre  
<http://www.manicore.com/documentation/serre/dechets.html>
- [webMEF] Emissions liées à la mise en forme des aciers inoxydables  
<http://www.aida.ineris.fr/bref/metauxferreux.htm>
- [webREC] Document ADEME sur un bilan environnemental sur les filières de recyclage  
<http://www.ademe.fr/collectivites/dechets-new/sante/acv.htm>

- [Woo00] Woods A., Bloom F., "Modelling of flash evaporation i: Formulation of the mathematical model", *Mathematical and Computer modelling*, 32, 1153-1169, 2000.
- [Woo01] Woods A., Bloom F., Orloff D., "Modelling of flash evaporation ii: Numerical solutions of the model equations", *Mathematical and Computer modelling*, 33, 385-406, 2001.
- [Zab01] Zablit P., Zimmer L., "Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis", *CEAS Conference on Multidisciplinary Aircraft Design and Optimization*, Köln, Allemagne, 2001.
- [Zim01] Zimmer L., 2001, "Présentation du projet CO2", *Journées S3P*, Bayonne.
- [Zim04] Zimmer L., Anglada A., Christie M., Granvilliers L., 2004, "Constraint Explorer : A Modelling and Sizing Tool for Engineering Design", *Invited session on Metamodeling and Constraint Based Problem Solving for Embodiment Design Support Systems in SCI*, Orlando.



---

---

# ANNEXES

---

---

- A- Modèles relatifs au pilote 2003.
- B- Modèles relatifs au prototype industriel.
- C- Protocole expérimental de réalisation des essais.
- D- Corrélations pour les coefficients d'échange en condensation.
- E- Modèles de coûts.
- F- Valeurs des émissions pour l'évaluation de l'Eco Indicateur 99.
- G- Modèle global par contraintes exprimé sous Constraint Explorer<sup>®</sup>.



---

---

# **ANNEXE A**

---

---

## **MODELES RELATIFS AU PILOTE 2003**



## Modèles relatifs au pilote 2003

Pour faciliter la compréhension de la démarche proposée, nous présentons, dans cette annexe, les différents modèles relatifs au pilote 2003 qui n'ont pas été explicités dans le mémoire.

### **1. Description du pilote 2003.**

Nous rappelons la description du pilote 2003 par la figure A.1, faisant apparaître la cuve de chauffe (1), le mélangeur (2), la cuve de détente (3), la cuve de récupération (4), le dévésiculeur (5), le condenseur haute pression (6), le condenseur basse pression (7), l'éjecteur (8) et la pompe à vide (9).



*Figure A.1.* Vues de face et de côté du pilote 2003.

Comme il a été expliqué au chapitre 3, nous ne nous intéressons qu'à la modélisation du comportement physique du pilote 2003. Toutes les autres contraintes qui pourraient être pertinentes pour la conception ne sont donc pas prises en compte.

## 2. Organigrammes techniques étendus du pilote 2003.

Puisque nous ne cherchons à modéliser que le comportement physique du système, seule la situation de vie *Utilisation* est prise en compte. L'analyse fonctionnelle de cette situation de vie conduit à un ensemble de fonctions de service et de fonctions contraintes dont la réalisation implique l'emploi de composants particuliers. Les organigrammes techniques étendus permettent de décrire la structuration du système. L'organigramme technique étendu de niveau 3 du pilote 2003 et celui de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs sont représentés sur la figure A.2.

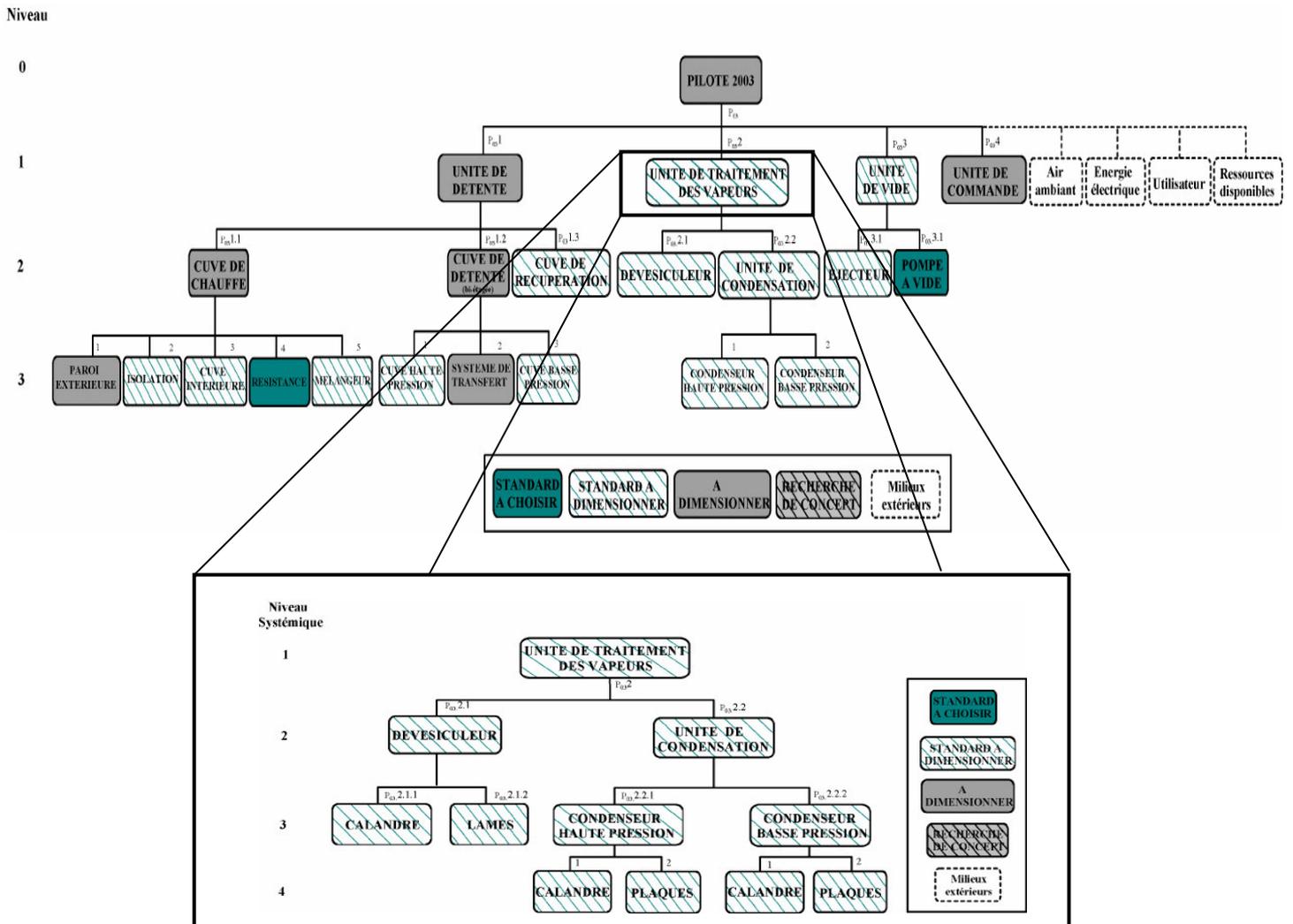


Figure A.2. Organigrammes techniques étendus de niveau 3 du pilote 2003 et de niveau 4 de l'unité de traitement des vapeurs.

Pour parvenir à des modèles formalisables, nous utilisons le système de représentation par bloc diagramme fonctionnel et graphe Substances-Champs pour identifier les flux dans et entre les composants.

### 3. Blocs diagrammes fonctionnels du pilote 2003.

Les figures A.3 et A.4 présentent le bloc diagramme fonctionnel global et le graphe substances-champs de niveau 2 adapté, respectivement, relatifs au pilote 2003.

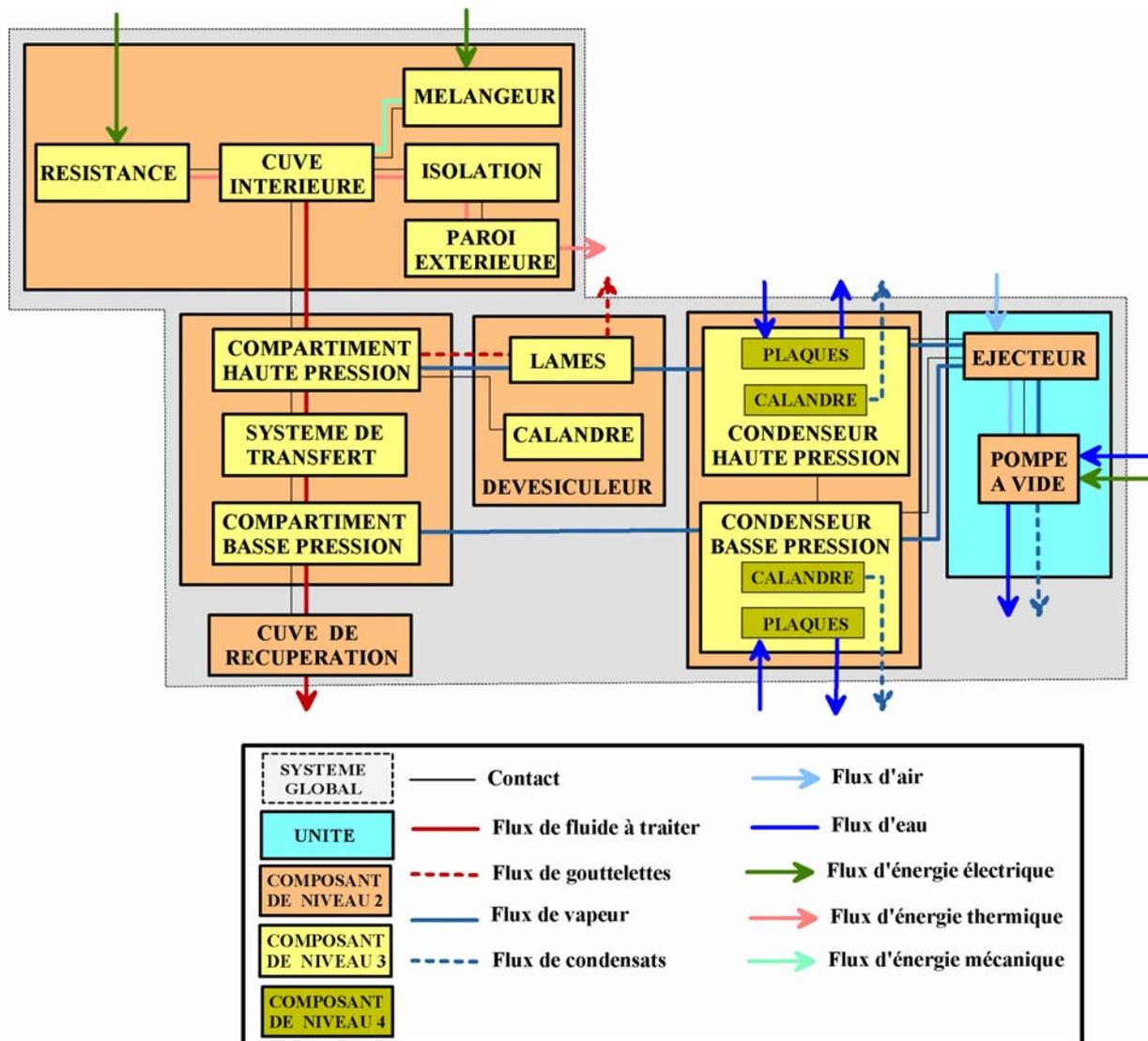


Figure A.3. Bloc Diagramme fonctionnel du pilote 2003.

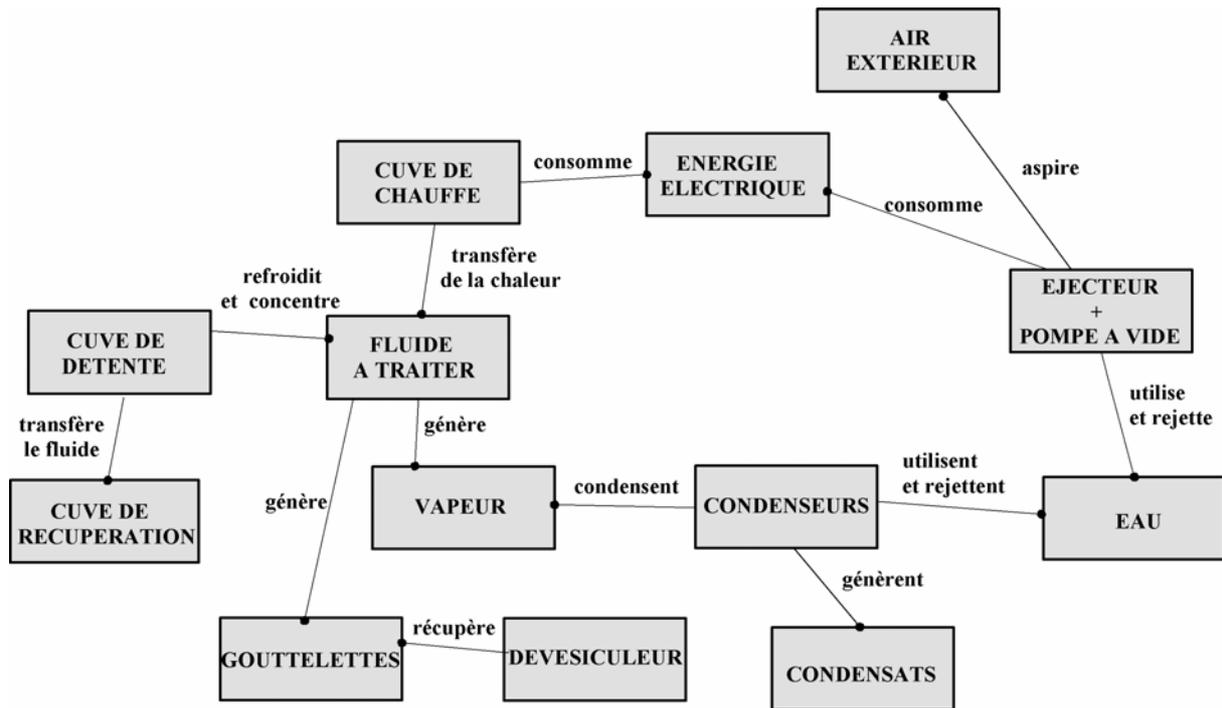


Figure A.4. Graphe Substances-Champs global du pilote 2003.

Ces modes de représentation permettent d'identifier les flux fonctionnels et induits associés au fonctionnement du pilote 2003. Ils permettent donc la formulation de son modèle physique.

#### 4. Fiches modèles du pilote 2003.

Les fiches modèles relatives au pilote 2003 concernent la cuve de chauffe, la cuve de détente (étages Haute et Basse Pression), les condenseurs (Haute et Basse Pression) et le groupe "Ejecteur+Pompe à vide". Celles relatives aux condenseurs haute et basse pression ont été présentées au chapitre 3 de ce document. Nous présentons, sur les tableaux A.1 à A.3, celles relatives à la cuve de chauffe, aux cuve Haute et Basse Pression.

Tableau A.1. Fiche modèle relative à la cuve de chauffe du pilote 2003.

Niveau 2		Réf. P00-1-1		CUVE DE CHAUFFE	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
D H d re rie e	E P <sub>meé</sub>	dQ Cp T <sub>pe</sub> T <sub>i</sub> k S T <sub>isol</sub> T <sub>pext</sub> T <sub>air</sub> σ ε λ	Flux d'énergie électrique :	E = R.I <sup>2</sup> .t P <sub>meé</sub> = N <sub>p</sub> · ρ <sub>f</sub> · N <sup>3</sup> · D <sub>i</sub> <sup>5</sup>	
			Flux d'énergie thermique :	$E = \varphi_{cuve} + \varphi_{pertes} = \frac{\rho}{V} \cdot Cp \cdot (T_{pe} - T_i) + \varphi_{pertes} \text{ avec } \varphi_{pertes} = \varphi_{isol.} + \varphi_{ext.}$ $\varphi_{isol.} = k \cdot S \cdot (T_{isol} - T_{pe}) = \sum_j \left( \frac{\ln(re/ri)}{2\pi \lambda_j \cdot H} \right) \cdot S \cdot (T_{isol} - T_{pe})$ avec $\frac{1}{k} = \frac{e_{cuvant.}}{\lambda_{cuvant.}} + \frac{e_{isolation}}{\lambda_{isolation}}$ et $S = \pi \cdot \frac{d_{cuvant.} + 2e_{cuvant.} + 2e_{isolation}}{2} \cdot H$ $\varphi_{ext} = \varphi_{ext\_cond} + \varphi_{ext\_conv} + \varphi_{ext\_ray} = k_{cond} S (T_{isol} - T_{pext}) + k_{conv} S (T_{pext} - T_{air}) + k_{ray} (T_{pext}^4 - T_{air}^4)$ et $\varphi_{ext} = \left( \frac{\ln(re/ri)}{2\pi \lambda_{pext} H} \right) \cdot S \cdot (T_{isol} - T_{pext}) + \left( \frac{\lambda_{pext} M d}{D} \cdot S \cdot (T_{pext} - T_{air}) \right) + \left( \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_{pext}^4 - T_{air}^4) \right)$	
			Flux d'énergie mécanique :	$\frac{D}{H} \approx 1$ ; $\frac{d}{D} \approx \frac{1}{3}$ ; $y \approx \frac{D}{3}$	
<p>P Faible → Forte</p> <p>E Faible → Forte</p> <p>P Faible → Forte</p> <p>S Forte → Faible</p>			<p>NIVEAU</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>2</p>		

Tableau A.2. Fiche modèle relative à la cuve haute pression du pilote 2003.

Niveau 3		Réf. P03-1.2.1		CUVE HAUTE PRESSION	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
q <sub>pe</sub> T <sub>pe</sub>	q <sub>vHP</sub> q <sub>gHP</sub>	Cp <sub>pe</sub> Cp <sub>gHP</sub> Δh <sub>v</sub> (T <sub>vHP</sub> ) T <sub>vHP</sub> T <sub>gHP</sub>	Flux de fluide à traiter :	q <sub>pe</sub> - q <sub>gHP</sub> - q <sub>vHP</sub> = 0 T <sub>gHP</sub> = T <sub>vHP</sub>	
			Flux de vapeur :	$q_{vHP} = \frac{q_{pe} \cdot ((Cp_{pe} \cdot T_{pe}) - (Cp_{gHP} \cdot T_{vHP}))}{\Delta h_v(T_{vHP})}$	
			Flux de gouttelettes : (modélisation expérimentale)	$q_{gHP} = -0,153 \cdot 10^{-4} + 0,0138 \cdot 10^{-4} \cdot q_{vHP} + 0,00048 \cdot 10^{-4} \cdot T_{vHP}$	
<p>P Faible → Forte</p> <p>E Faible → Forte</p> <p>P Faible → Forte</p> <p>S Forte → Faible</p>			<p>Niveau</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>		

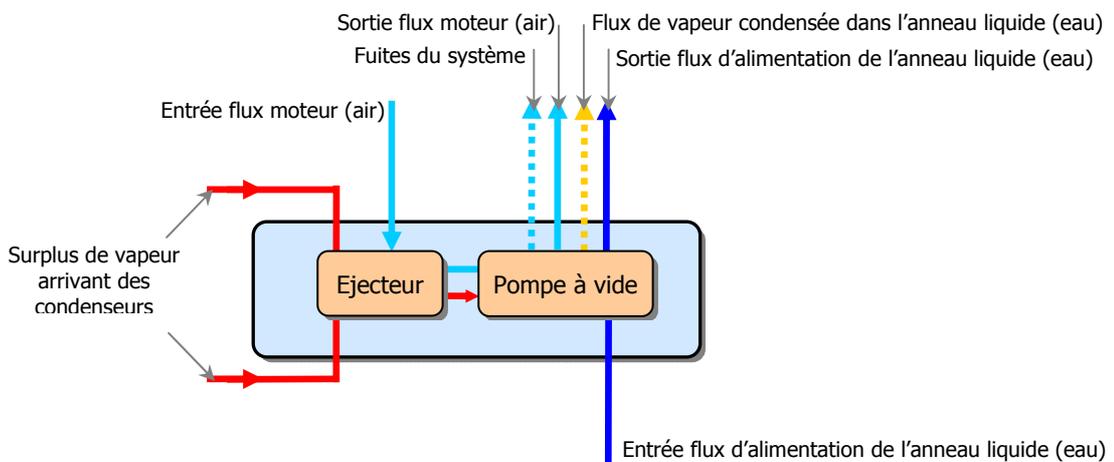
**Tableau A.3.** Fiche modèle relative à la cuve basse pression du pilote 2003.

Niveau 3		Réf. P03-1.2.3	CUVE BASSE PRESSION	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant	
$q_{pht}$ $T_{pht}$	$q_{vBP}$ $q_{gBP}$	$C_{p_{pht}}$ $C_{p_{pBP}}$ $\Delta h_v(T_{vBP})$ $T_{vBP}$ $T_{ps}$	Flux de fluide à traiter :	$q_{pht} - q_{ps} - q_{vBP} = 0$ $T_{ps} = T_{vBP}$
			Flux de vapeur :	$q_{vBP} = \frac{q_{pht} \cdot ((C_{p_{pht}} \cdot T_{pht}) - (C_{p_{pBP}} \cdot T_{vBP}))}{\Delta h_v(T_{vBP})}$
			Flux de gouttelettes : (modélisation expérimentale)	$q_{gBP} = -0,153 \cdot 10^{-4} + 0,0138 \cdot 10^{-4} \cdot q_{vBP} + 0,00048 \cdot 10^{-4} \cdot T_{vBP}$
<p><b>P</b> Faible → Forte</p> <p><b>E</b> Faible → Forte</p> <p><b>P</b> Faible → Forte</p> <p><b>S</b> Forte → Faible</p>			<p>Niveau</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>	

Pour ce qui est du groupe pompe à vide + éjecteur, le modèle est relatif aux courbes de fonctionnement fournies par le fournisseur.

### 5. Modèle du groupe Pompe à vide +éjecteur.

La figure A.5 représente le bloc diagramme fonctionnel de l'unité de vide, regroupant un éjecteur à air et une pompe à vide à anneau liquide.

**Figure A.5.** Bloc Diagramme Fonctionnel de l'unité de vide du pilote 2003.

Le modèle lié à la pompe à vide est une simple courbe Débit-Pression, fournie par le constructeur (cf. Figure A.6).

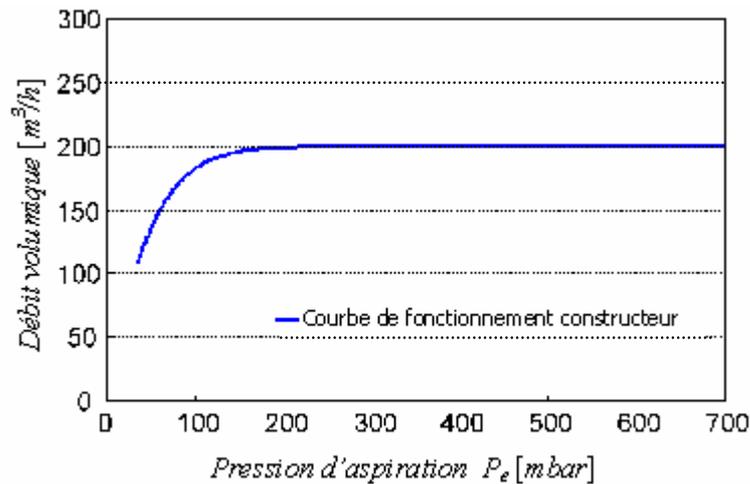


Figure A.6. Courbe Débit-Pression de la pompe à vide du pilote 2003.

Une modélisation de l'écoulement dans l'éjecteur a été réalisée par Bouchama [Bou03] à partir de relations thermodynamique. Ce modèle définit le taux d'entraînement (rapport entre les débits massiques des fluides entraîné et moteur) et la section du mélangeur, en fonction des températures des fluides et de la section dans et en sortie de la tuyère (cf. Figure A.7).

Ce modèle n'a pas été utilisé dans la modélisation du système, car il ne permettait pas d'aboutir à une cohérence du modèle global. Nous avons utilisé, pour la modélisation, la courbe débit-pression fournie par le constructeur.

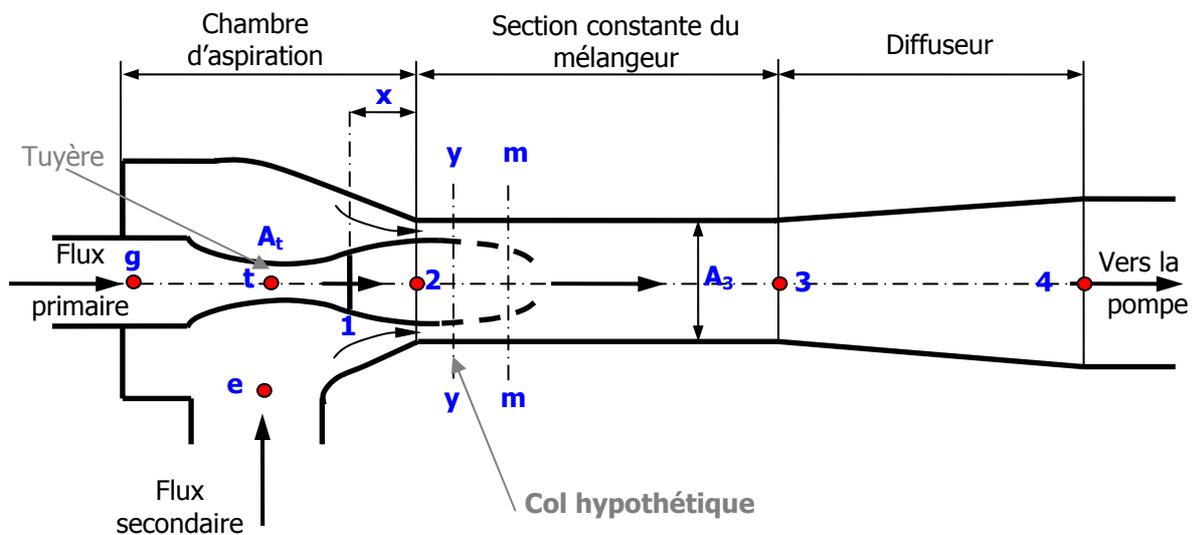


Figure A.7. Processus de mélange des flux et définition des paramètres géométriques pris en compte dans la modélisation.



---

---

# **ANNEXE B**

---

---

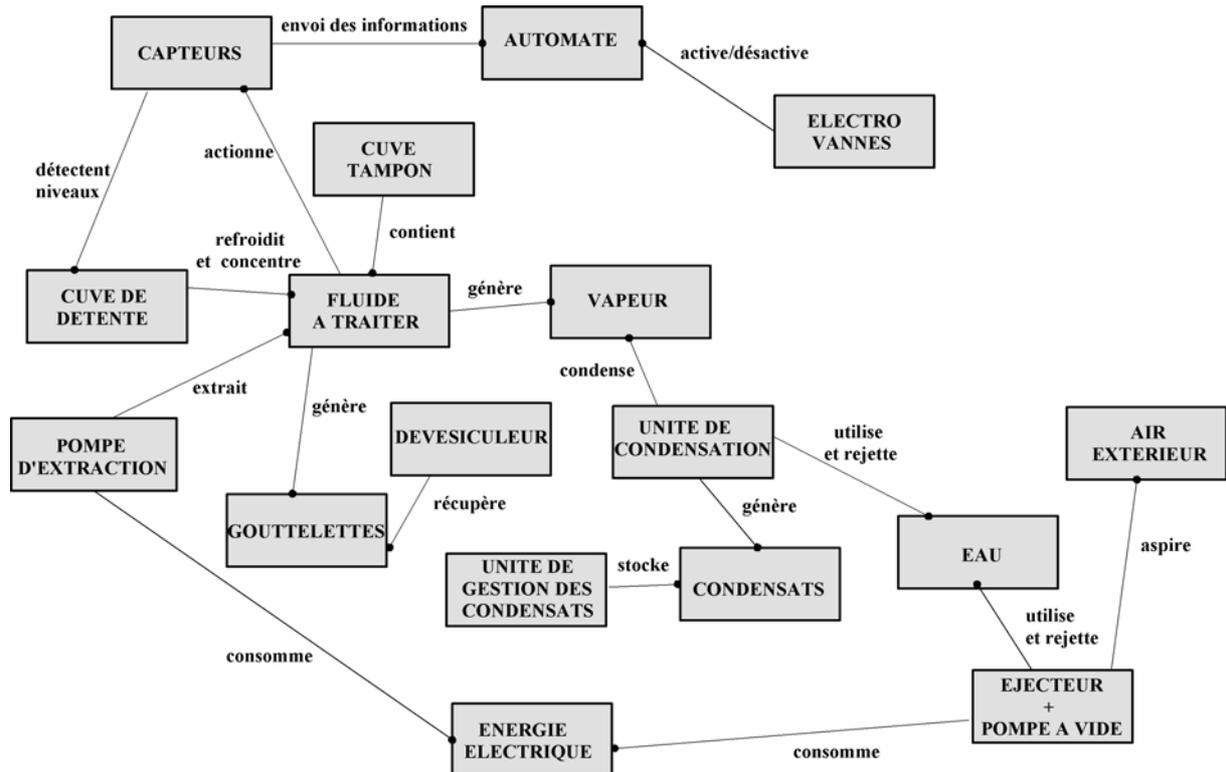
## **MODELES RELATIFS AU PROTOTYPE INDUSTRIEL**



## Modèles relatifs au prototype industriel

Nous présentons dans cette annexe les graphes substances champs de niveaux 2 et 3 relatifs au prototype industriel, qui ont permis la formulation des modèles physiques.

Les fiches modèles des composants de la cuve tampon, qui ont permis d'aboutir au modèle de niveau 2 adapté de la cuve tampon sont également présentées ici.



*Figure B.1.* Graphe Substances-Champs de niveau 2 du prototype industriel.

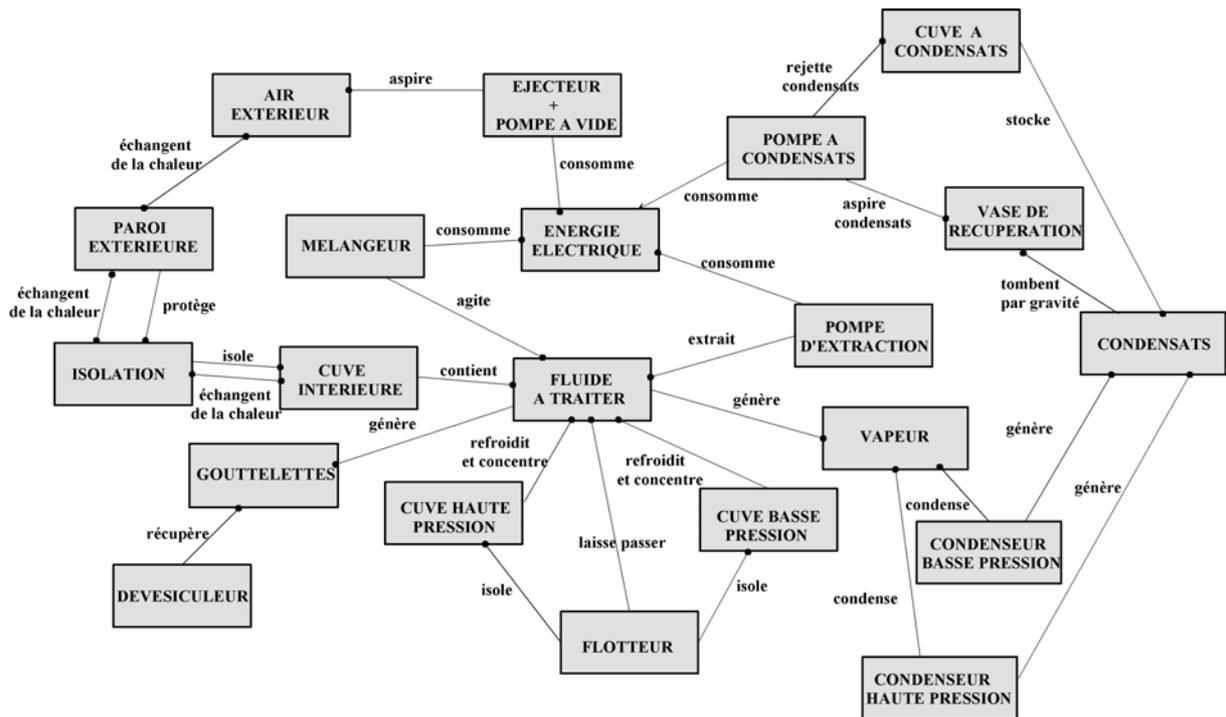


Figure B.2. Graphe Substances-Champs de niveau 3 du prototype industriel.

Tableau B.1. Fiche modèle de la cuve intérieure de la cuve tampon du prototype industriel.

Niveau 3		Réf: Pind-1-1-3		CUVE INTERIEURE	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
$D_{c.int}$ $H_{c.int}$ $H_{cocint}$ $e_{c.int}$	$q_{pe}$ $M_{c.int}$	$V_{c.int}$ $t_{inter}$ $t_{rempi}$ $\Delta q_p$ $\rho_p$ $CO_{cint}$	<b>Topographie</b>	$V_{c.int} = \left( t_{int} \cdot q_{pe} \cdot \frac{1}{\rho_p} \right) + \left( t_{rempi} \cdot \Delta q_p \cdot \frac{1}{\rho_p} \right)$ ; $H_{c.int} = \frac{V_{c.int}}{\pi \cdot \frac{D_{c.int}^2}{4}}$ ; $H_{cocint} = \frac{D_{c.int}}{2 \cdot \sin(cq_{c.int})}$ $M_{c.int} = \pi \cdot D_{c.int} \cdot (H_{c.int} + H_{coc.int}) \cdot e_{c.int} \cdot \rho_{mat}$ ; $D_{c.int} \approx H_{c.int}$	
			<b>Flux de Fluide à Traiter</b>	$q_{pe} \in [10; 30] [t/h]$ $\Delta q_p = q_p - q_{pe} = l [t/h]$	
			<b>Flux d'Energie Thermique (conduction)</b>	$\varphi_{cond.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{c.int} \cdot H_{c.int} \cdot (T_{pe} - T_{iso})}{\ln \left( \frac{\frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int}}{\frac{D_{c.int}}{2}} \right)}$ et $A = A_{e.int} = 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int} \right) \cdot H_{c.int}$	
<p>P Faible <math>\rightarrow</math> Forte</p> <p>E Faible <math>\rightarrow</math> Forte</p> <p>P Faible <math>\rightarrow</math> Forte</p> <p>S Forte <math>\rightarrow</math> Faible</p>					

Tableau B.2. Fiche modèle de l'isolation de la cuve tampon du prototype industriel.

Niveau 3		Réf: Pind-1-1-2		ISOLATION	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
$e_{iso}$ $H_{iso}$	$e_{iso}$ $T_{p.ext}$ $M_{iso}$	$\lambda_{iso}$ $e_{cint}$ $H_{cint}$ $D_{cint}$	<b>Topographie</b>	$e_{iso} \rightarrow cf. FET$ $H_{iso} = H_{c.int} + H_{cocint}$ $M_{iso} = \pi \cdot (D_{c.int} + 2 \cdot e_{c.int}) \cdot H_{iso} \cdot e_{iso} \cdot \rho_{iso}$	
			<b>Flux d'Energie Thermique (conduction)</b>	$\varphi_{cond.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iso} \cdot H_{c.int} \cdot (T_{iso} - T_{p.ext})}{\ln \left( \frac{\frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int} + e_{iso}}{\frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int}} \right)}$	
<p>P Faible <math>\rightarrow</math> Forte</p> <p>E Faible <math>\rightarrow</math> Forte</p> <p>P Faible <math>\rightarrow</math> Forte</p> <p>S Forte <math>\rightarrow</math> Faible</p>					

Tableau B.3. Fiche modèle du mélangeur de la cuve tampon du prototype industriel.

Niveau 3		Réf: Pind-1-1-4		MELANGEUR	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
$D_{hélice}$	$P_{mél}$	$D_{c.int}$	Topographie	$D_{hélice} \approx \frac{D_{c.int}}{3}; \gamma \approx \frac{D_{c.int}}{3}$	
$N$	$N$	$N_p$			
$P_{mél}$	$\gamma$	$\rho_p$	Flux d'Energie Electrique	$P_{mél} = N_p \cdot \rho_p \cdot N^3 \cdot D_{hélice}^5$ $N_p = 3,9576 \cdot Re_p^{-0,2747}$	
		$Re_p$			
<p><b>P</b> Faible ———&gt; Forte</p> <p><b>E</b> Faible — ? —&gt; Forte</p> <p><b>P</b> Faible ———&gt; Forte</p> <p><b>S</b> Forte ———&gt; Faible</p>					

Tableau B.4. Fiche modèle de la paroi extérieure de la cuve tampon du prototype industriel.

Niveau 3		Réf: Pind-1-1-1		PAROI EXTERIEURE	
Vco	Cr	VA	Modèle de composant		
$e_{p.ext}$	$M_{p.ext}$	$H_{c.int}$	Topographie	$e_{p.ext} = 0,001 [m]$ $H_{p.ext} = H_{c.int} + H_{coint}$ $M_{p.ext} = \pi \cdot (D_{c.int} + 2e_{c.int} + 2e_{iso}) \cdot e_{p.ext} \cdot H_{p.ext} \cdot \rho_{p.ext}$	
$H_{p.ext}$	$T_{p.ext}$	$H_{coint}$			
		$D_{c.int}$	Flux d'Energie Thermique (conduction)	$\varphi_{cond.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{p.ext} \cdot H_{c.int} \cdot (T_{p.ext} - T_{air})}{ln \left( \frac{\frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int} + e_{iso} + e_{p.ext}}{\frac{D_{c.int}}{2} + e_{c.int} + e_{iso}} \right)}$	
		$e_{c.int}$			
		$e_{iso}$			
		$\lambda_{p.ext}$			
		$\rho_{p.ext}$			
		$T_{air}$			
<p><b>P</b> Faible ———&gt; Forte</p> <p><b>E</b> Faible — ? —&gt; Forte</p> <p><b>P</b> Faible ———&gt; Forte</p> <p><b>S</b> Forte ———&gt; Faible</p>					

---

---

# **ANNEXE C**

---

---

## **PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE REALISATION DES ESSAIS**



## **PROTOCOLE EXPERIMENTAL DU PILOTE 2003**

### ***A: Remplissage de la Cuve de Chauffe :***

- 1 : Vérifier que la Vanne Entrée de la chambre de séparation est fermée.
- 2 : Remplir la cuve de chauffe.
- 3 : Allumer le mélangeur et la résistance chauffante (compteur situé près de la cuve de chauffe).

Il faut compter entre 3 et 4 heures pour chauffer l'eau de la cuve à 70°C.

### ***B: Mise en route du système d'acquisition :***

- 1 : Allumer l'ordinateur, le boîtier du système d'acquisition et l'alimentation des capteurs (Pas d'ordre spécifique).
- 2 : Ouvrir le logiciel « Measurement & automation Explorer » (MAX).
- 3 : Sous l'onglet "Configuration", dérouler le menu de "voisinage de données". Les différentes voies correspondant aux capteurs apparaissent alors (débit19, P22 à P31, T0 à T18).
- 4 : Se placer sur "T11", faire un clic droit et sélectionner "TEST". Une fenêtre s'ouvre alors, sur laquelle il est possible de visualiser la température de la cuve de chauffe en temps réel.

### ***C: Déroulement des essais :***

#### ***o Avant de commencer l'essai :***

- 1 : Eteindre la résistance de la cuve chauffante, une fois la température voulue atteinte, mais laisser le mélangeur en fonctionnement.
- 2 : Brancher le rotamètre.
- 3 : Remplir les bacs d'alimentation en eau pour la pompe à vide,
- 4 : Mesurer la hauteur d'eau dans la cuve tampon.
- 5 : Remplir les renseignements préliminaires concernant l'essai en cours dans la fiche prévue à cet effet.
- 6 : Configurer le système d'acquisition des données "Virtual Bench Logger" de manière à être opérationnel pour un relevé de données :
  - **Ouvrir le logiciel "Virtual Bench Logger" (Attention à fermer et rouvrir le logiciel pour chaque nouvel enregistrement, sinon les données ne seront pas enregistrées !)**
  - **Charger une configuration:** Edit >Load Setting > WIN98 > Vanessa >Config.VB > fichier ".lgr."
  - **Configurer le fichier pour l'acquisition:** Edit >Settings > File config > choix d'une localisation pour l'enregistrement de "flshpt.log" > overwrite  > 10000 points sample  > enable logger  > Begin logging on start  > OK
  - **Dans la fenêtre d'acquisition :** Vérifier que la case "Logging on

Value  affiche les valeurs des capteurs

Label  affiche le canal d'enregistrement

> Placer le curseur en haut à droite > **Mettre les plages de mesure des voies 26, 27 et 28 à 200 mbar** (capteurs pression BP).

7 : Vérifier la position des vannes : le système doit être hermétique au milieu extérieur.

**Vannes fermées :** Vanne Entrée Chbre Séparation **V2.**

Vanne Sortie Cuve Récupération **V4.**

Vanne Sortie Cdsats HP **V11.**

Vanne Sortie cdsats BP **V12.**

Vanne Vidange Dévésiculeur **V14.**

Vanne Air Ambient Cuve de Récupération **V18.**

Vanne Air Comprimé Cuve de Récupération **V19.**

Vanne Air Ambient Chbre de Séparation **V20.**

Bouchon de la Cuve de Récupération **Boule.**

**Vannes ouvertes :** Vanne Sortie Cuve de Chauffe **V1** (à régler en fonction du débit souhaité).

Vanne Sortie Chbre de Séparation **V3.**

Vanne Entrée Cdsr HP **V5** (à régler selon ouverture souhaitée).

Vanne Entrée Cdsr BP **V6** (à régler selon ouverture souhaitée).

Vanne Air ambient Ejecteur **V17.**

8 : Choisir le réseau des condenseurs et le noter sur la fiche manip :

**V8** ouverte / **V7** fermée : Condenseurs en parallèle.

**V8** fermée / **V7** ouverte : Condenseurs en série.

9 : Ouvrir la vanne d'alimentation de la Pompe à Vide (**V15**).

Mettre le tuyau de sortie de la PAV à l'extérieur.

Allumer la pompe à vide (interrupteur situé près de la grande porte bleue). **Attention à bien surveiller le niveau des cuves d'alimentation de la pompe à vide, il faut toujours qu'elles aient de l'eau sous peine de cavitation de la pompe. Au besoin, ouvrir la Vanne d'eau (V16).**

10 : Mettre les tuyaux des sorties d'eau de refroidissement des condenseurs à l'extérieur.

Ouvrir les vannes d'alimentation en eau de refroidissement HP (**V11**) et BP (**V12**).

11 : Dès que la pression sur le RIA atteint 40 mbar, lancer l'acquisition :

➤ **S'assurer que les fenêtres du logiciel MAX sont toutes fermées (IMPERATIF POUR TOUTE ACQUISITION).**

➤ **Lancer l'acquisition sur Virtual Bench Logger:** Cliquer sur START.

#### ○ Déroulement de l'essai :

12 : Quand la pression sur le RIA atteint **entre 25 et 30 mbar** :

➤ Arrêter le mélangeur.

➤ Ouvrir la vanne Entrée de la cuve de détente (**V2**) et démarrer le **Chronomètre.**

13 : Une fois que le système s'équilibre (**fin du régime transitoire**) :

➤ Fermer la vanne Régime transitoire du Dévésiculeur (**V13**) et **Noter le temps correspondant.** Cette opération permettra de différencier les gouttes formées pendant le régime transitoire de celles créées pendant le fonctionnement normal.

○ **Arrêt de l'essai :**

**14 :** Arrêter la manip lorsque l'eau effleure la partie supérieure de l'hélice. (Le thermocouple T11 étant situé au milieu de la cuve, il faut commencer à surveiller dès que la température relevée par T11 chute brusquement).

- Fermer la vanne d'Entrée de la cuve de détente (V2) et arrêter le **Chronomètre**.
- **Stopper l'acquisition :** Cliquer sur **STOP**.
- Fermer les vannes d'alimentation en eau (V16, V11, et V12).
- Ouvrir précautionneusement les vannes d'Air Ambiant de la cuve de détente (V20) et de la cuve de récupération (V18), pour rétablir la pression atmosphérique.
- Fermer la vanne d'alimentation de la Pompe à Vide (V15).
- Attendre 20 secondes, puis éteindre la PAV.

**15 :** Enregistrer le fichier "flashpt.log" comme fichier ".xls".

- **Pour trouver le fichier enregistré, aller dans :** > Explorer > Vanessa > config > flashpt.log

**16 :** Relever le niveau d'eau dans la cuve de chauffe à la fin de la manip et le reporter sur la fiche manip (hauteur d'eau consommée).

**17 : Mesurer le volume de fluide traité :**

- Fermer les vannes de sortie de la cuve de détente (V3), d'entrée du Cdsr BP (V6), de liaison des Cdsrs HP/BP (V7), d'entrée de l'unité de Vide (V8) et d'Air Ambiant de la cuve de récupération (V18).
- Raccorder le compteur via un tuyau à la vanne de sortie de la cuve de récupération (V4).
- Relier l'autre partie du tuyau à la cuve de chauffe.
- Noter le numéro figurant sur l'affichage du compteur.
- Ouvrir les vannes de sortie de la cuve de récupération (V4), d'Air Comprimé de la cuve de récupération (V19), et d'alimentation en air comprimé (V21) pour faire remonter l'eau de la cuve de récupération vers la cuve de chauffe. **Pour cette opération il faut autant que possible être à 2 personnes, l'une régulant la vanne V21 d'alimentation en air comprimé, l'autre tenant l'extrémité du tuyau. Il suffit d'injecter juste un peu d'air comprimé. Dès que l'eau sort par l'extrémité du tuyau avec une pression suffisante, fermer l'alimentation en air comprimé, pour éviter toute surcharge en air à l'intérieur du système.**
- Fermer la vanne en sortie de la cuve de récupération (V4) dès que l'air s'engouffre dans le tuyau.
- Refermer la vanne d'air comprimé de la cuve de récupération (V19).
- Enlever le tuyau de la cuve de chauffe, ouvrir la vanne V4 en sortie de la cuve de récupération, et récupérer le volume d'eau du tuyau dans un seau.
- Fermer V4.
- Mesurer le niveau d'eau récupérée (avec le bécher).
- Relever le nouveau numéro sur le compteur, afin de mesurer le volume d'eau transvasé. **Penser à ajouter le volume d'eau relevé dans le seau.**
- Mesurer le niveau de l'eau dans la cuve de chauffe après introduction de l'eau traitée et reporter le résultat sur la fiche manip.

**18 : Récupérer l'eau dans le Dévésiculateur :**

- Ouvrir la vanne en sortie de la cuve de détente (V3).
- Fermer les vannes d'entrée du Cdsr HP (V5), du Cdsr BP (V6), de liaison entre les Cdsrs (V7), d'entrée de l'unité de vide (V8), d'air de la cuve de récupération (V18) et d'air ambiant de la cuve de détente (V20).
- Ouvrir la vanne de vidange du dévésiculateur (V14).
- Récupérer et mesurer le volume d'eau (correspondant aux gouttes du régime transitoire).
- Fermer V14.
- Ouvrir la vanne de fin de régime transitoire du Dévésiculateur (V13).
- Attendre un peu, puis ouvrir V14.
- Récupérer et mesurer le volume d'eau (correspondant aux gouttes du régime permanent).
- Fermer V14.
- Rouvrir V5.

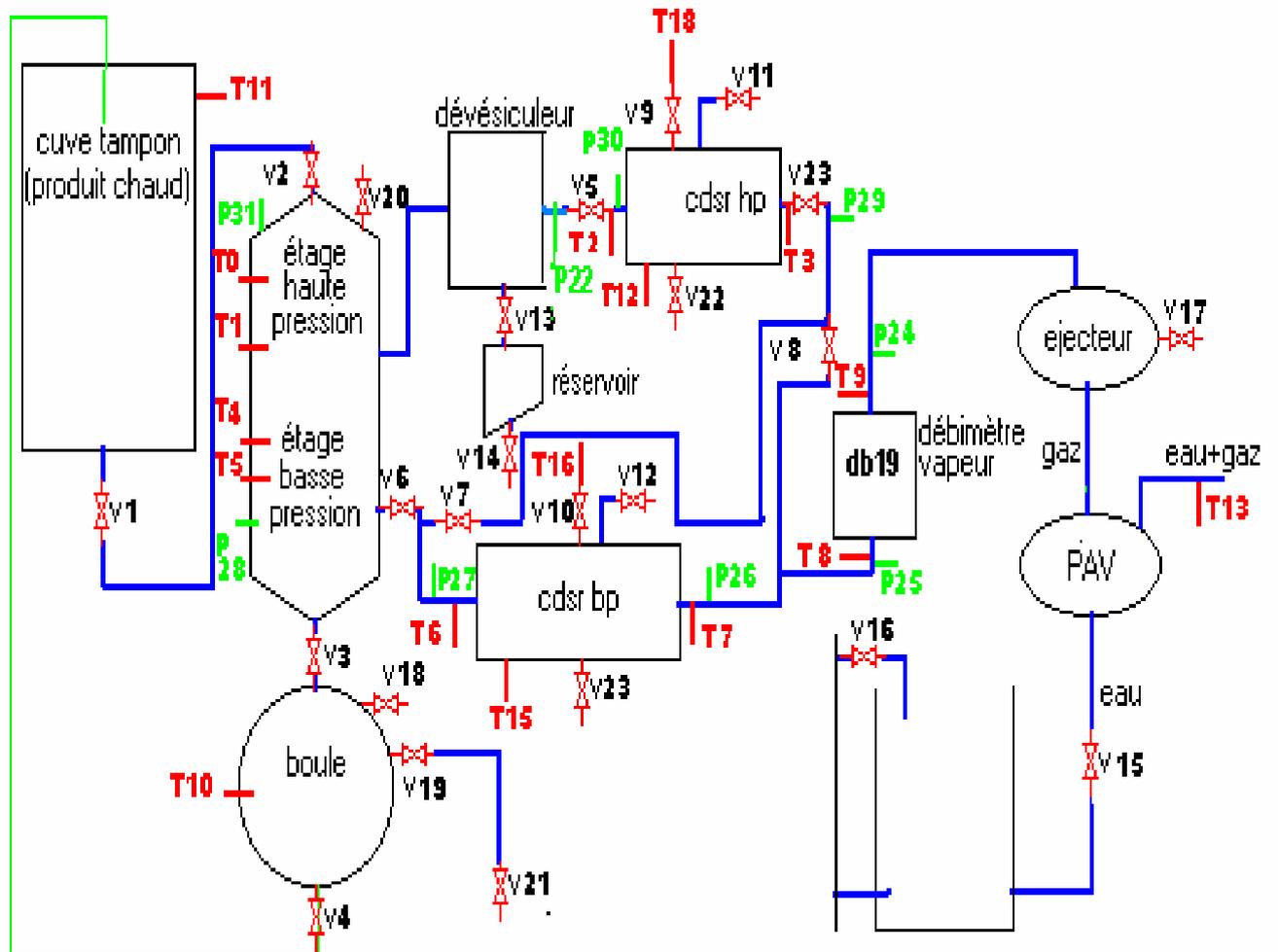
**19 : Mesurer les volumes de condensats HP et BP :**

- Relier la vanne de sortie des condensats HP (V11) au compteur et noter le numéro figurant sur l'affichage de celui-ci.
- Vérifier que les vannes de liaison Cdsrs HP/BP (V7) et d'entrée de l'unité de Vide (V8) sont fermées.
- Ouvrir V11, puis ouvrir les vannes d'air comprimé V19 et V21.
- Fermer les vannes V19 et V21 dès qu'il n'y a plus d'écoulement.
- Noter le nouveau numéro affiché par le compteur (→Volume) et le noter sur la fiche manip.
- Fermer la vanne V11 et celle d'entrée du Cdsr HP (V5), puis ouvrir la vanne d'entrée du Cdsr BP (V6).
- Relier la vanne de sortie des condensats BP (V12) au compteur et noter le numéro affiché sur celui-ci.
- Ouvrir V12, puis ouvrir V19 et V21.
- Fermer V19 et V21 dès qu'il n'y a plus d'écoulement.
- Noter le nouveau numéro affiché par le compteur et le noter sur la fiche manip.
- Ouvrir V5, V6, V7 et V8.
- Fermer V11 et V12.

**20 :** Récupérer le fichier enregistré sur le disque dur sur une disquette pour pouvoir traiter les résultats.

***Avant de quitter la salle, s'assurer que la vanne du circuit d'air comprimé (V21) est fermée et que la résistance chauffante est bien éteinte !***

**D : *Emplacement géographique des différents capteurs et des vannes.***





---

---

# **ANNEXE D**

---

---

## **CORRELATIONS POUR LES COEFFICIENTS D'ECHANGE EN CONDENSATION**



## Corrélations pour les coefficients d'échange en condensation

Nous présentons ici les corrélations qui ont été testées pour la modélisation des coefficients d'échange en condensation côté vapeur + film de condensat. Ces corrélations sont toutes valables en considérant l'hypothèse simplificatrice et spécialisante de vapeur saturée s'écoulant le long de plaques planes verticales.

➤ **Corrélation de Nusselt** [Del90] :

Cette corrélation a été établie en considérant un écoulement laminaire lisse ( $Re_l < 30$ ) d'une vapeur pure saturée le long d'une plaque plane verticale ayant une vitesse faible. Le coefficient d'échange local se détermine par l'équation suivante :

$$h(z) = 1,1 \cdot \lambda_l \cdot Re_l^{-1/3} \cdot \left[ \frac{\mu_l^2}{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g} \right]^{-1/3} \quad (E.1)$$

$$\text{avec } Re_l = \frac{4\Gamma}{\mu_l} = \frac{4Q}{\mu_l \cdot n \cdot (L + l)} \quad (E.2)$$

où  $\lambda_l$  est la conductivité thermique du film de condensat [W/m.K],  $Re_l$  son nombre de Reynolds,  $\mu_l$  sa viscosité dynamique [kg/m.s],  $\rho_l$  sa masse volumique [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_v$  la masse volumique de la vapeur [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>],  $\Gamma$  le débit masse linéique du film de condensat [kg/m.s],  $Q$  est son débit masse [kg/s],  $n$  est le nombre de plaques du condenseur,  $L$  et  $l$  représente la longueur et la largeur des plaques, respectivement, et.

L'équation E.1 conduit, en considérant une hauteur moyenne des plaques, à l'expression suivante du coefficient moyen d'échange en condensation :

$$h_{v.cd} = 1,47 \cdot \lambda_l \cdot Re_l^{-1/3} \cdot \left[ \frac{\mu_l^2}{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g} \right]^{-1/3} \quad (E.3)$$

Pour ces corrélations,  $\lambda_l$  et  $\rho_l$  sont évaluées à  $(T_p + T_{sat})/2$  et  $\mu_l$  est calculée par la formule suivante :

$$\mu_l = \frac{1}{4} \cdot [3 \cdot \mu_l(T_p) + \mu_l(T_{sat})] \quad (E.4)$$

➤ **Corrélation de Fujii et al.** [Fuj72] :

Cette corrélation a été établie en considérant une condensation en film laminaire d'une vapeur descendante en convection forcée sur une paroi verticale, avec l'hypothèse simplificatrice

d'un flux de chaleur uniforme. L'équation E.5 traduit l'expression du coefficient moyen d'échange en condensation côté film de condensat :

$$h_{v.cd} = \frac{\lambda_l}{Dh_l} \cdot Re_l^{1/2} \cdot K \cdot (1 + 0,25 \cdot K^{-4} \cdot F_l)^{-1/4} \quad (E.5)$$

$$\text{avec } K = 0,45 \cdot (1,2 + G^{-1})^{1/3} \quad (E.6)$$

$$F_l = J^{-1} \cdot \left( \frac{Gr_l}{Re_l^2} \right) \quad (E.7)$$

$$J = \frac{\lambda_l \cdot (T_v - T_{pl})}{\mu_l \cdot \Delta h_{evap}} \quad (E.8)$$

$$Gr_l = \frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot Dh_l^3}{\mu_l^2} \quad (E.9)$$

$$G = \left( \frac{\lambda_l \cdot (T_v - T_{pl})}{\mu_l \cdot \Delta h_{evap}} \right) \cdot \left( \frac{\rho_l \cdot \mu_l}{\rho_v \cdot \mu_v} \right)^{1/2} \quad (E.10)$$

où  $\Delta h_{evap}$  est la chaleur latente de vaporisation [J/kg],  $\mu_l$  la viscosité dynamique du film de condensat [kg/m.s],  $\mu_v$  celle de la vapeur,  $\rho_l$  est la masse volumique du film de condensat [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_v$  celle de la vapeur,  $g$  représente l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>],  $\lambda_l$  la conductivité thermique du film de condensat [W/m.K],  $T_v$  la température de la vapeur [K],  $T_{pl}$  celle des plaques et  $Dh_l$  est le diamètre hydraulique du film de condensat [m].

➤ **Corrélation de Chen** [Che61] :

Cette corrélation a été obtenue lors de l'étude de la condensation d'une vapeur pure sur une paroi verticale, avec un nombre de Reynolds du film de condensat supérieur à 30.

$$h_{v.cd} = \lambda_l \cdot \left( \frac{v_l^2}{g} \right)^{-1/3} \cdot \left[ Re_l^{-0,44} + (5,82 \cdot 10^{-6} \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{1/3}) \right]^{1/2} \quad (E.11)$$

où  $\lambda_l$  est la conductivité thermique du film de condensat [W/m.K],  $v_l$  la viscosité cinématique du film de condensat [cSt],  $g$  est l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>],  $Re_l$  le nombre de Reynolds du film de condensat et  $Pr_l$  son nombre de Prandtl. Le nombre de Prandtl est défini par l'équation E.12 :

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} \quad (E.12)$$

où  $\mu$  représente la viscosité dynamique [kg/m.s] et  $Cp$  la capacité calorifique [J/kg.K].

➤ **Corrélation de Park et al. [Par96] :**

Les auteurs présentent un certain nombre de résultats expérimentaux de coefficients de transfert lors de la condensation de vapeur pure et d'un mélange air-vapeur le long d'une plaque plane verticale, avec ou sans entretien du film de condensat. Les essais ont été réalisés pour des températures de saturation de la vapeur comprises entre 76,6 °C et 100 °C, avec des températures de surface de condensation comprises entre 58 °C et 90,8 °C.

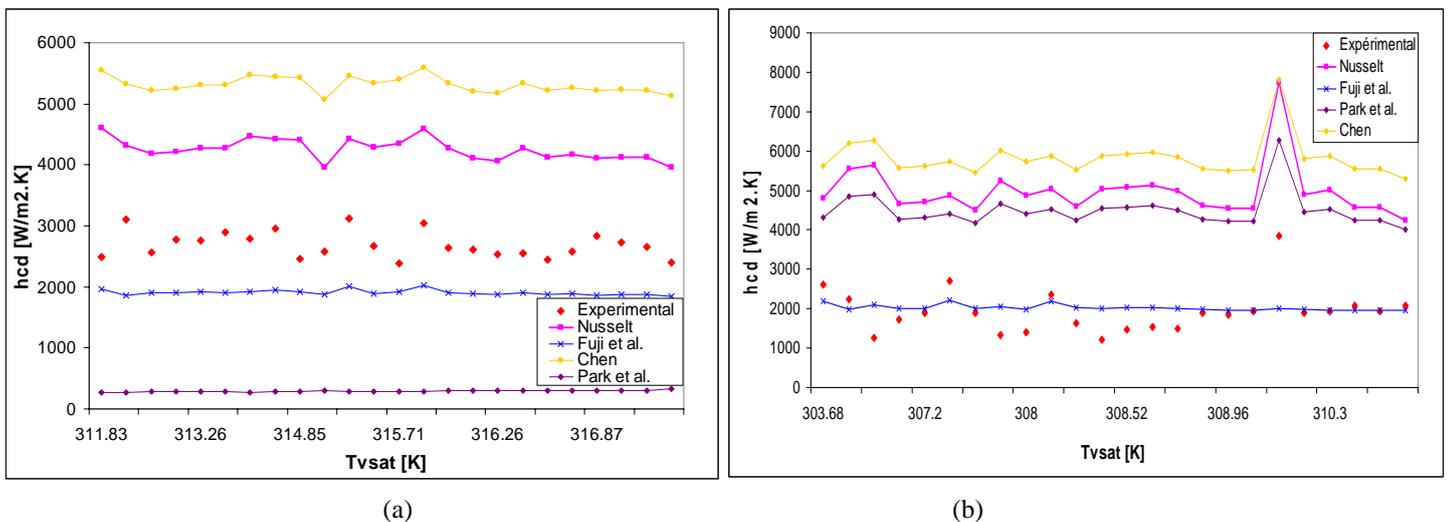
Les résultats expérimentaux ont permis de construire des corrélations du coefficient de transfert de chaleur côté film de condensat en régime laminaire (cf. Equation E.13) et en régime turbulent (cf. Equation E.14) :

$$h_{v.cd} = 0,88 \cdot \lambda_l \cdot \left( \frac{v_l^2}{g} \right)^{-1/3} \cdot Re_l^{-0,25} \quad (E.13)$$

$$h_{v.cd} = 0,0052 \cdot \lambda_l \cdot \left( \frac{v_l^2}{g} \right)^{-1/3} \cdot Re_l^{0,34} \cdot Pr_l^{0,65} \quad (E.14)$$

où  $\lambda_l$  est la conductivité thermique du film de condensat [W/m.K],  $v_l$  la viscosité cinématique du film de condensat [cSt],  $g$  est l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>],  $Re_l$  le nombre de Reynolds du film de condensat et  $Pr_l$  son nombre de Prandtl.

Toutes ces corrélations ont été évaluées avec les valeurs expérimentales des différents paramètres et comparées aux valeurs expérimentales. Cette comparaison est proposée sur la figure suivante, tirée du chapitre 4.



**Figure E.1.** Comparaison entre les valeurs expérimentales et théoriques des coefficients moyens d'échange aux condenseurs haute pression (a) et basse pression (b).



---

---

# **ANNEXE E**

---

---

## **MODELES DE COUT**



## Modèles de coûts

Les modèles de coûts utilisés ont été évalués à partir de l'analyse et la structuration du problème de conception des évaporateurs flash.

Pour les composants standard (mélangeur, dévésiculateur, pompes), ces coûts sont relatifs aux indications fournies par les constructeurs, comme nous l'avons indiqué au chapitre 4 (cf. Tableaux 4.4 et 4.5).

Dans le cas des systèmes à dimensionner (cuves), les coûts proposés englobent les prix des matériaux et de leur mise en œuvre.

### ➤ Evaluation du coût de revient :

Pour l'évaluation du coût de revient, nous avons modélisé les prix des matériaux en fonction du poids, à partir de prix de fournisseurs (ALMET pour les tôles en acier inoxydable, METAPROFIL SUD pour les tôles en aluminium, GALVA SERVICES pour la tuyauterie).

Les modèles obtenus sont résumés par les équations F.1 à F.3.

$$Coût_{tôlesacier}(Poids) = 4,7446 \cdot Poids + 4,7715 \quad (F.1)$$

$$Coût_{tôlealuminium}(Poids) = 20,09 \cdot Poids^{0,6605} \quad (F.2)$$

$$Coût_{tuyauterie}(Poids) = 0,5048 \cdot Poids + 0,0253 \quad (F.3)$$

Le coût de mise en forme a également été modélisé en fonction du poids de matériau. Il s'agit donc d'un coût global approximatif, peu exact et peu précis, compte tenu du fait que le coût réel de mise en forme dépend généralement du type d'opération à effectuer (soudage, formage).

$$Coût_{mise\ en\ forme}(Poids) = 11,287 \cdot Poids + 427,53 \quad (F.4)$$

L'évaluation du coût de revient de la couche d'isolation s'est faite par rapport à la surface, selon la double inégalité suivante :

$$11 \cdot S_{iso.} \leq Coût_{laineroche} \leq 18 \cdot S_{iso.} \quad (F.5)$$

Ainsi, l'évaluation du coût de revient d'une cuve se fait en additionnant les coûts des matériaux et de la mise en forme, relativement à son poids, et les coûts des éventuels composants standards constitutifs.

A titre d'exemple, l'équation F.6 présente le modèle d'évaluation du coût de revient de la cuve tampon.

$$\begin{aligned} \text{Coût}_{\text{CUVETAMPON}} = & \text{Coût}_{\text{Mélangeur}} + \text{Coût}_{\text{acier}}(\text{Poids}_{\text{CuveInt.}}) + \text{Coût}_{\text{laineroche}}(\text{Surface}_{\text{iso.}}) \\ & + \text{Coût}_{\text{aluminium}}(\text{Poids}_{\text{paroiExt.}}) + \text{Coût}_{\text{miseenforme}}(\text{Poids}_{\text{CuveInt.}} + \text{Poids}_{\text{paroiExt.}}) \end{aligned} \quad (\text{F.6})$$

D'après F. Marechal [Mar03], le coût total d'un système doit également prendre en compte le coût d'installation sur site. Dans ce but, nous évaluons le coût total de revient du système en additionnant les coûts des différents composants, et en multipliant le résultat par un facteur appelé **Facteur de Lang**, égal à 3,1 dans le cas de solides :

$$\text{Coût}_{\text{Total}} = 3,1 \cdot \left( \begin{aligned} & \text{Coût}_{\text{CuveTampon}} + \text{Coût}_{\text{CuveDetente}} + \text{Coût}_{\text{Devesiculeur}} + \text{Coût}_{\text{condenseurHP}} \\ & + \text{Coût}_{\text{condenseurBP}} + \text{Coût}_{\text{tubes}} + \text{Coût}_{\text{PAV}} + \text{Coût}_{\text{PC}} + \text{Coût}_{\text{P.Extr}} + \text{Coût}_{\text{structure}} \end{aligned} \right) \quad (\text{F.7})$$

### ➤ Evaluation du coût des composants standard :

Les coûts des composants standard ont été modélisés en fonction de caractéristiques structurantes pour la conception.

Dans le cas du dévésiculeur, il s'agit de la surface d'entrée, qui dépend du débit de vapeur. Le coût du dévésiculeur est ainsi modélisé par l'équation F.8 :

$$\text{Coût}_{\text{devesiculeur}} = 3448,109815 \cdot S_e^{0,78165577} + 900 \quad (\text{F.8})$$

Dans le cas des condenseurs, nous avons modélisé le coût de revient en fonction de la surface d'échange, puisque celle-ci conditionne la valeur du coefficient d'échange global.

$$\text{Coût}_{\text{condenseur}} = 3789,47726 \cdot A_{\text{cdsr}}^{0,46779717} \quad (\text{F.9})$$

Enfin, les prix des pompes et du mélangeur de la cuve tampon ont été conservés comme étant égaux aux valeurs fournies par les constructeur, à savoir :

- Prix du groupe Ejecteur + Pompe à vide : 5200 €
- Prix de la pompe d'extraction : 10 000 €
- Prix de la pompe à condensats : 350 €
- Prix du mélangeur de la cuve tampon : 1000 €

Etant donné que le dimensionnement du vase de récupération et de la cuve à condensat dépendent des caractéristiques d'entrée/sortie de la pompe à condensat, et que leur influence sur le poids total du système et sur son coût est inférieure à 2 %, nous avons choisi de négliger ces deux composants.

➤ **Evaluation du coût de possession :**

Les coûts de possession ont été modélisés à partir de l'estimation des consommations en ressources, et du prix de revient de ces ressources.

Ainsi, le coût lié à la consommation en eau a été évalué par le biais de l'équation F10:

$$Coût_{Eau} = Coût_{m^3} \times Co_{Eau} = Coût_{m^3} \times \left[ \frac{q_{lrHP}}{q_{vHP} \cdot \Delta h_{vHP} \cdot (X_{veHP} - X_{vsHP})} + \frac{q_{lrBP}}{q_{vBP} \cdot \Delta h_{vBP} \cdot (X_{veBP} - X_{vsBP})} \right] \quad (F.10)$$

avec  $C_{m^3} = [1,49; 4,38]$  € selon les régions. Nous avons donc considéré deux coûts du mètre cube d'eau, l'un minimal ( $C_{m^3_1}$ ) et l'autre maximal ( $C_{m^3_2}$ ), pour évaluer le coût de consommation dans le modèle.

Le coût lié à la consommation en énergie électrique est, lui, modélisé par l'équation F.11 :

$$\begin{aligned} Coût_{Energ} &= Coût_{kWh} \times Co_{En} \\ &= Coût_{kWh} \times \frac{(Puiss_{PAV} + Puiss_{PEXtr} + Puiss_{PC} + Puiss_{Mél})}{t_{fct}} \end{aligned} \quad (F.11)$$

avec  $C_{kWh} = 0,0644$  € en heures creuses ( $Ckwh1$ ).

0,1057 € en heures pleines ( $Ckwh2$ ).



---

---

# **ANNEXE F**

---

---

## **VALEURS DES EMISSIONS POUR L'EVALUATION DE L'ECOINDICATEUR 99**



## Valeurs des émissions pour l'évaluation de l'EcoIndicateur 99

Les tableaux suivants résument les valeurs des émissions dans l'air et dans l'eau, considérées pour la production, la mise en forme et le recyclage des aciers et aciers inoxydables. Le scénario le plus pessimiste a été pris en compte, c'est-à-dire que ce tableau présente les valeurs maximales des émissions.

Le passage de l'évaluation du dommage par quantité à celle par tonne d'acier s'est fait en considérant que la production d'acier consomme environ 16400 L d'eau et rejette environ 80 Nm<sub>3</sub> de poussières par tonne d'acier produit. La consommation d'eau lors du recyclage de l'acier est estimée à environ -866 L par tonne d'acier recyclé. Cette valeur est négative, car on considère l'économie effectuée en transport et en procédés divers.

**Tableau G.1.** Evaluation de l'impact de la production, la mise en forme et le recyclage de l'acier sur l'écosystème.

Ecosystème	Effet	Procédé concerné	Milieu atteint	Type de produit concerné	Polluant	Taux d'émission / concentration	Facteur de dommage normalisé et pondéré [PDF*m <sup>2</sup> *yr /kg/qtité matériau]	Dommage [/qtité]	Dommage [/t. acier]	Dommage_Ecosystème [/t. acier]
	Ecosystème	Dommages dus à des émissions toxiques	Production d'acier	Eau	-	Dioxines	8.4E-9 [kg.TEG/t. acier]	1.46E+04	1.23E-4 [t.acier]	1.23E-04
Mise en forme de l'acier inoxydable			Eau	Tôles et Tubes e > 3 mm (Laminage à chaud)	Chrome (Cr)	0.5E-6 [kg/L]	5.36	2.68E-6 [t/L]	0.043952	
					Nickel (Ni)	0.5E-6 [kg/L]	1.12E+01	0.0000056 [t/L]	9.18E-02	
					Zinc (Zn)	2E-6 [kg/L]	1.27	2.54E-6 [t/L]	0.041656	
			Tôles et Tubes e < 3 mm (Laminage à chaud et à froid)	Chrome (Cr)	1E-6 [kg/L]	5.36	5.36E-6 [t/L]	0.087904		
				Nickel (Ni)	1E-6 [kg/L]	1.12E+01	1.12E-5 [t/L]	1.84E-01		
				Zinc (Zn)	4E-6 [kg/L]	1.27	5.08E-6 [t/L]	0.083312		
Recyclage de l'acier			Air	-	Métaux	2E-4 [kg/t. acier]	2.21E+03	0.442 [t.acier]	0.442	
			Eau	-	Dioxines	6E-9 [kg.TEG/t. acier]	1.46E+04	8.76E-5 [t. acier]	8.76E-05	
				-	Métaux	6E-3 [kg/t. acier]	6.82E+01	0.4092 [t.acier]	0.4092	
Sol		-	Métaux	(-) 5E-6 [kg/t. acier]	2.03E+03	(-) 0.01015 [t.acier]	-0.01015			
Dommages dus à l'acidification et à l'eutrophisation		Mise en forme de l'acier inoxydable	Air	Tôles et Tubes e > 3 mm (Laminage à chaud)	NOx	360E-3 [kg/t. acier]	4.45E-01	0.1602 [t.acier]	0.1602	
					SOx	150E-3 [kg/t. acier]	8.12E-02	0.01218 [t.acier]	0.01218	
					Ammoniac	5E-6 [kg/Nm3]	1.21E+00	6.05E-6 [t/Nm3]	0.000484	
				Tôles et Tubes e < 3 mm (Laminage à chaud et à froid)	NOx	900E-3 [kg/t. acier]	4.45E-01	0.4005 [t.acier]	0.4005	
	SOx				150E-3 [kg/t. acier]	8.12E-02	0.01218 [t.acier]	0.01218		
	Ammoniac				5E-6 [kg/Nm3]	1.21E+00	6.05E-6 [t/Nm3]	0.000484		
	Recyclage de l'acier	Air	-	Acidification (NOx+SOx)	(-) 1.01E-1 [kg. eqH+/t. acier]	5.26E-01	(-) 0.053126 [t.acier]	-0.053126		

**Tableau G.2.** Evaluation de l'impact de la production, la mise en forme et le recyclage de l'acier sur la santé humaine.

Santé Humaine	Effet / Dommage	Procédé concerné	Milieu atteint	Type de produit concerné	Polluant / Ressource (*)	Taux d'émission / concentration	Facteur de dommage normalisé et pondéré [DALYs /kg/quantité matériau]	Dommage [quantité]	Dommage [t. acier]	Dommage Santé Humaine [t. acier]	
	Effets cancérogènes	Production de l'acier		Eau	-	Dioxines	8.4E-9 [kg.TEG/t. acier]	5.25E+07	0.441 [t. acier]	0.441	
Mise en forme de l'acier inoxydable			Eau	Tôles et Tubes e > 3 mm (laminage à chaud)	Chrome (total)	0.5E-6 [kg/L]	8.91E+03	0.004455 [L]	73.062		
					Nickel (Ni)	0.5E-6 [kg/L]	8.08E+02	0.000404 [L]	6.6256		
					Chrome (total)	1E-6 [kg/L]	8.91E+03	0.00891 [L]	146.124		
					Nickel (Ni)	1E-6 [kg/L]	8.08E+02	0.000808 [L]	13.2512		
Recyclage de l'acier			Eau	-	Dioxines	6E-9 [kg.TEG/t. acier]	5.25E+08	3.15 [t. acier]	3.15		
			Sol	-	Métaux (As+Cd+Cr+Ni)	(-)5E-6 [kg/t. acier]	7.59E+03	(-)0.03795 [t. acier]	-0.03795		
Effets respiratoires dus à des substances organiques		Production de l'acier		Air	-	Gaz à effet de serre (tous confondus)	850 [kg.EC/t. acier]	2.58E-01	219.3 [t. acier]	219.3	
		Recyclage de l'acier		Air	-	Gaz à effet de serre (tous confondus)	(-)7.76E2 [kg.eqCO2/t. acier]	2.58E-01	(-) 200.208 [t. acier]	-200.208	
Effets respiratoires dus à des substances inorganiques		Production de l'acier		Air	-	Poussières	20E-6 [kg/m3]	2.79E+01	0.000558 [m3]	0.04464	
		Mise en forme de l'acier inoxydable		Air	Tôles e > 3 mm (Laminage à chaud seul)	Poussières	335E-6 [kg/Nm3]	2.79E+01	0.0093465 [Nm3]	0.74772	
						NOx	360E-3 [kg/t. acier]	2.30E+00	0.828 [t. acier]	0.828	
						SO2	150E-3 [kg/t. acier]	1.42E+00	0.213 [t. acier]	0.213	
						Ammoniac	5E-6 [kg/Nm3]	2.21E+00	0.00001105 [Nm3]	0.000884	
					Tubes e > 3 mm (Laminage à chaud + soudage)	Poussières	355E-6 [kg/Nm3]	2.79E+01	0.0099045 [Nm3]	0.79236	
	NOx					360E-3 [kg/t. acier]	2.30E+00	0.828 [t. acier]	0.828		
	SO2					150E-3 [kg/t. acier]	1.42E+00	0.213 [t. acier]	0.213		
	Ammoniac					5E-6 [kg/Nm3]	2.21E+00	0.00001105 [Nm3]	0.000884		
	Tôles e < 3 mm (Laminage à chaud et à froid)				Poussières	365E-6 [kg/Nm3]	2.79E+01	0.0101835 [Nm3]	0.81468		
					NOx	900E-3 [kg/t. acier]	2.30E+00	2.07 [t. acier]	2.07		
					SO2	150E-3 [kg/t. acier]	1.42E+00	0.213 [t. acier]	0.213		
					Ammoniac	5E-6 [kg/Nm3]	2.21E+00	0.00001105 [Nm3]	0.000884		
	Tubes e < 3 mm (Laminage à chaud et à froid + soudage)	Poussières	385E-6 [kg/Nm3]	2.79E+01	0.0107415 [Nm3]	0.85932					
		Nox	900E-3 [kg/t. acier]	2.30E+00	2.07 [t. acier]	2.07					
		SO2	150E-3 [kg/t. acier]	1.42E+00	0.213 [t. acier]	0.213					
		Ammoniac	5E-6 [kg/Nm3]	2.21E+00	0.00001105 [Nm3]	0.000884					
	Recyclage de l'acier		Air	-	Particules en suspension	(-) 5.58E-1 [kg/t. acier]	2.86E+00	(-) 1.59588 [t. acier]	-1.59588		
	Changement climatique	Production de l'acier		Air	-	Gaz à effet de serre (Totaux)	850 [kg.EC/t. acier]	60.41945	51356.5325 [t. acier]	51356.5325	
		Recyclage de l'acier		Air	-	Gaz à effet de serre	(-) 7.76E2 [kg.eqCO2/t. acier]	60.41945	(-) 46885.4932 [t. acier]	-46885.4932	
Recyclage de l'acier		Air	-	Métaux (total)	2E-4 [kg/t. acier]	4.66E-07	9.32E-11 [t. acier]	9.32E-11			
		Eau	-	Métaux (total)	6E-3 [kg/t. acier]	2.13E-08	1.278E-10 [t. acier]	1.28E-10			
Diminution de la couche d'Ozone	Production de l'acier		Air	-	Gaz à effet de serre (total)	850 [kg.EC/t. acier]	1.08E+02	91800 [t. acier]	91800		
	Recyclage de l'acier		Air	-	Gaz à effet de serre (total)	(-) 7.76E2 [kg.eqCO2/t. acier]	1.08E+02	(-) 83308 [t. acier]	-83308		

13233.0615

**Tableau G.3.** Evaluation de l'impact de la production, la mise en forme et le recyclage de l'acier sur les ressources.

Ressources	Catégorie	Procédé concerné	Elément		Substance / Composé	Quantité [kg/tonne de matériau]	Facteur de dommage normalisé et pondéré [MJ d'énergie suppl./kg/quantité matériau]	Dommage [quantité]	Dommage [t.acier]	Dommage_Ressources [t.acier]
	Dommages dus à l'extraction de minéraux	Production d'acier	sol	-	Fer	1700 [kg/t.acier]	6.90E-04	1.173 [t.acier]	1.17E+00	2.26E+00
Dommages dus à l'extraction de	Production d'acier	sol	-	Charbon	170 [kg/t.acier]	5.99E-03	1.0183 [t.acier]	1.02E+00		
			-	coke (houille)	315 [kg/t.acier]	2.04E-04	0.06426 [t.acier]	6.43E-02		

Les facteurs obtenus pour chaque catégorie peuvent alors être additionnés pour constituer le facteur global par tonne d'acier relatif à la production, la mise en forme et le recyclage de l'acier. Ce facteur est donc égal à :

$$EI_{/t.acier} = 2,26 + 1,91 + 13233,0615 = 13237,2315 \quad (G.1)$$

Multiplié au poids du système, ce facteur conduit à l'évaluation de l'EcoIndicateur du procédé d'évaporation flash considéré.

$$EI_{Sys} = 13237,2315 \times M_{sys} \quad (G.2)$$



---

---

# **ANNEXE G**

---

---

**MODELE GLOBAL PAR  
CONTRAINTEs EXPRIME SOUS  
CONSTRAINT EXPLORER<sup>®</sup>**



```
(*****
(* MODELE GLOBAL DES EVAPORATEURS FLASH
*****)
```

```
Constant
(*****
(* Caractéristiques fluide *)
Tv2 = 303.15;
P0 = 1.014;
Pv1m = 0.157;
Pv2m = 0.07;
Tair = 288;
kair = 5;
Rep = 600000;
Qcdst = 0.19; (* Débit en sortie de la cuve à condensats *)
dgmax = 100e-6; (* Diamètre moyen de gouttes contenant de la pulpe *)

(* Dimensions et temps *)
tu = 1; (* h *)
tinterr = 300; (* s *)
tremp = 1800; (* s *)
coCT = 120;
coHP = 100;
coBP = 80;
cofl = 60;
dfl = 0.14;
douv = 0.04;
efl = 0.001;
dCint = 1.3;
(* Hauteur entre la cuve tampon et la cuve de détente *) H1 = 1;
(* Hauteur entre la cuve à condensats et la cuve de détente *) H2 = 2;
(* Longueur de tube entre cuve tampon et cuve de détente [m] *) L1 = 1;
(* Longueur de tube entre cuve de détente et cdsr HP [m] *) L2 = 0.5;
(* Longueur de tube entre cuve de détente et cdsr BP [m] *) L3 = 0.5;
(* Longueur de tube entre vase, cuve à cdsts, cdsrs et éjecteur [m] *) L4 = 1.5;
(* Longueur de tube sortie de la PAV [m] *) L5 = 0.3;
(* Longueur de tube entre cuve à cdsts et cuve de détente [m] *) L6 = 1;
(* Vitesse d'écoulement souhaitée dans le dévésiculeur [m/s] *) Vvap = 20;
(* Epaisseurs standard des tubes *) etube1 = 0.001;
etube2 = 0.0015;
etube3 = 0.004;
etube4 = 0.0045;

(* Epaisseur plaque cdsrs [m] *) e1 = 0.0015;
e2 = 0.0015;
(* Hauteur passage_film cdsat [m] *) h1 = 0.005;
h2 = 0.006;
(* Largeur intérieure plaque [m] *) l1 = 0.25;
l2 = 0.15;
(* Hauteur passage_liq. refr. [m] *) hi1 = 0.003;
hi2 = 0.004;
(* Nombre plaques cdsrs *) np1 = 23;
np2 = 12;
(* Diamètre tubulure sortie cdsrs *) dsdcsr = 0.025;

(* Caractéristiques matériaux et composants standard *)
(* Acier *)
lambdaacier = 16;
roacier = 7800;
f = 207*1e6;
z = 0.85;
(* Alu *)
lambdaalu = 200;
roalu = 2700;
epext = 0.001;
Tpext = 308;
epsilon = 0.5;
(* Isolation = laine de roche *)
lambdaiso = 0.07;
roiso = 70;
(* Mélangeur *)
CoutMel = 1000;
N = 0.56; (* tr/s *)
(* Pompe à vide *)
```

```

PuissPAV = 5.5;
dsPAV = 0.02;
PdsPAV = 275;
CoutPAV = 5200;
(* Pompe d'extraction *)
PuissPE = 3;
PdsPE = 200;
CoutPE = 10000;
(* Pompe à condensats *)
PuissPC = 0.37;
PdsPC = 14;
CoutPC = 350;
(* Coefficients de frottements *)
Xsi = 0.4;
Xsi1 = 0.5;
Xsi2 = 1;

(* Coûts *)
Coutiso1 = 11; (* laine de roche *)
Coutiso2 = 18;
Coutm31 = 1.49;
Coutm32 = 4.38;
Coutkwh1 = 0.0644;
Coutkwh2 = 0.1057;
Ecoscore = 1.32e4; (* /t.acier *)

(** Autres constantes **)
sigma = 5.67e-8;
g = 9.81;
pi = 3.141592654;
Mv = 0.018;
R = 8.314;

Function
(*****)
(* Corrélation de Kapp France pour le liquide de refroidissement *)
hlrHP(_a,_b,_c,_d,_e) := (0.031*_b*_c*( _d^(0.2) )*( _e^(-(2/3) ) ) );
hlrBP(_a,_b,_c,_d,_e) := ( 0.034*_b*_c*( _d^(0.2) )*( _e^(-(2/3) ) ) );
(* Corrélation pour le film de condensat *)
hcdHP(_a,_b,_c,_d,_e,_f,_g) := ((0.000710878974798362*( _a^3 ) )+(-0.675168489469629*( _a^2 )
+(213.738389827325*_a)-22552.5001992965)*(1.47*_b*( _c^(-1/3) ) )*(( _d^2 )/( _e*( _e-f )*_g )^(-1/3) ) );
hcdBP(_a,_b,_c,_d,_e,_f,_g) := ((-0.000845259616924725*( _a^3 ) )+(0.789018718201622*( _a^2 )
+(-245.462212146661*_a)+25450.1316301953)*(1.47*_b*( _c^(-1/3) ) )*(( _d^2 )/( _e*( _e-f )*_g )^(-1/3) ) );
(* Coefficient d'échange global *)
kcd(_a,_b) := (_a*_b)/( _a+_b );
(* Surface d'échange dans les condenseurs *)
Acdsr(_a) := 0.0271*exp(0.0015*_a);
(* Poids des tubes *)
Pdstube(_a) := (23677*_a)-0.0205;
(* Poids des fonds bombés *)
Pdsfd(_a) := (228.377*( _a^3 )+(-14.9013*( _a^2 )+(5.7704*_a)-0.2438;
(* Coûts divers *)
Coutmiseenforme(_a) := (11.287*_a)+427.53;
Coutacier(_a) := (4.7446*_a)+4.7715;
Coutaluminium(_a) := 20.09*( _a^0.6605 );
Couttubesacier(_a) := (0.5048*_a)+0.0253;
CoutCondenseur(_a) := 3789.47726*( _a^0.46779717 );

Variable
(*****)
Qpe:real = [1.39,8.35];
Tpe:real = [343.15,363.15];
Tps:real = [302.15,306.15];
Qlr1:real = [170,550];
Qlr2:real = [40,300];
Tlr1:real = [283.15,303.15];
Tlr2:real = [283.15,303.15];
Tv1:real = [313.15,323.15];
Qv1:real = [0,0.5];
Qv2:real = [0,0.5];
Pinit:real = [0.025,0.03];
hcd1:real = [2000,4000];
hcd2:real = [1000,4000];
Np:real = [0.4,40];
eiso:real = [0,1];

```

## Alias

```

(*****
(* Masse volumique du fluide à traiter *)
#rop := (-0.00358309588811532*(Tpe^2))+(1.88025350225482*Tpe)+754.590105742229;

(* Caractéristiques du liquide de refroidissement *)
#Cplre1 := (-0.00013972067*(Tlre1^3))+(0.148273416311*(Tlre1^2))+(-51.688422361865*Tlre1)+10113.8430819729;
#Cplre2 := (-0.00013972067*(Tlre2^3))+(0.148273416311*(Tlre2^2))+(-51.688422361865*Tlre2)+10113.8430819729;
#lambdalre1 := (-6*(1e-6)*(Tlre1^2))+0.0046*Tlre1-0.2732;
#lambdalre2 := (-6*(1e-6)*(Tlre2^2))+0.0046*Tlre2-0.2732;
#rolre1 := (-0.0036*(Tlre1^2))+1.8803*Tlre1+754.59;
#rolre2 := (-0.0036*(Tlre2^2))+1.8803*Tlre2+754.59;
#mulre1 := 0.1848*exp(-0.0178*Tlre1);
#mulre2 := 0.1848*exp(-0.0178*Tlre2);

(* Coefficients d'échange globaux *)
#kcd1 := kcd(hlr1,hcd1);
#kcd2 := kcd(hlr2,hcd2);
#AcdsrHP := Acdsr(#kcd1);
#AcdsrBP := Acdsr(#kcd2);
#NUTlr1 := (#kcd1*#AcdsrHP)/(((Qlr1*#rolre1)/(1000*60))*#Cplre1);
#NUTlr2 := (#kcd2*#AcdsrBP)/(((Qlr2*#rolre2)/(1000*60))*#Cplre2);
#epsilon1 := 1 - (1/exp(#NUTlr1));
#epsilon2 := 1 - (1/exp(#NUTlr2));
#dhlr1 := (l1*hi1)/((l1/2)+hi1);
#dhlr2 := (l2*hi2)/((l2/2)+hi2);
#Selr1 := np1*(l1/2)*hi1;
#Selr2 := np2*(l2/2)*hi2;
#Glr1 := ((Qlr1*#rolre1)/(1000*60))/#Selr1;
#Glr2 := ((Qlr2*#rolre2)/(1000*60))/#Selr2;
#Prlr1 := #mulre1*#Cplre1/#lambdalre1;
#Prlr2 := #mulre2*#Cplre2/#lambdalre2;
#Relr1 := #Glr1*#dhlr1/#mulre1;
#Relr2 := #Glr2*#dhlr2/#mulre2;

(* Caractéristiques du film de condensat *)
#lambdacdst1 := ((-6*(1e-6)*((Tv1+Tlre1)/2)^2))+0.0046*((Tv1+Tlre1)/2)-0.2732;
#rocdst1 := ((-0.0036)*(((Tv1+Tlre1)/2)^2))+1.8803*((Tv1+Tlre1)/2)+754.59;
#mucdst1 := ((1/4)*((3*(0.1848*exp(-0.0178*((Tv1+Tlre1)/2))))+(0.1848*exp(-0.0178*Tv1))));
#Cpcdst1 := ((-0.00013972067*(Tv1^3))+0.148273416311*(Tv1^2))+(-51.688422361865*Tv1)+10113.8430819729;
#lambdacdst2 := ((-6*(1e-6)*((Tv2+Tlre2)/2)^2))+0.0046*((Tv2+Tlre2)/2)-0.2732;
#rocdst2 := ((-0.0036)*(((Tv2+Tlre2)/2)^2))+1.8803*((Tv2+Tlre2)/2)+754.59;
#mucdst2 := ((1/4)*((3*(0.1848*exp(-0.0178*((Tv2+Tlre2)/2))))+(0.1848*exp(-0.0178*Tv2))));
#Cpcdst2 := ((-0.00013972067*(Tv2^3))+0.148273416311*(Tv2^2))+(-51.688422361865*Tv2)+10113.8430819729;
#Qcdst1 := (0.019338205573213*(Qv1^3))+0.166156061779413*(Qv1^2)+(0.701524417329654*Qv1
+0.00305502893968582;
#Qcdst2 := ( 1733.5524319699*( Qv2^3))+( -104.387070557652 *(Qv2^2))+( 2.84206058008076 *Qv2)
-0.015388518114744;

#Se1 := np1*(l1+2*e1)*h1;
#Se2 := np2*(l2+2*e2)*h2;
#Recdst1 := 4*(#Qcdst1/((l1+2*e1)))/(np1*#mucdst1);
#Recdst2 := 4*(#Qcdst2/((l2+2*e2)))/(np2*#mucdst2);

(* Caractéristiques des gouttes formées *)
#rol1 := (-0.00358309588811532*(Tv1^2))+1.88025350225482*Tv1+754.590105742229;
#rol2 := (-0.00358309588811532*(Tv2^2))+1.88025350225482*Tv2+754.590105742229;

(* Caractéristiques de la vapeur d'eau *)
#muv1 := ((4e-8)*Tv1)-(3e-6);
#muv2 := ((4e-8)*Tv2)-(3e-6);
#rov1 := (((1e-31)*(Tv1^(11.92))));
#rov2 := (((1e-31)*(Tv2^(11.92))));

(* Autres caractéristiques physiques *)
#Tsatinit := ((19.622*ln(Pinit))+94.033)+273.15;
#Dhv0 := (-2455.65261575174*373.15)+3175317.50655936;
#Dhv1 := (-2455.65261575174*Tv1)+3175317.50655936;
#Dhv2 := (-2455.65261575174*Tv2)+3175317.50655936;
#Cppe := (-0.00013972067*(Tpe^3))+0.148273416311*(Tpe^2))+(-51.688422361865*Tpe)+10113.8430819729;
#Cppl := (-0.00013972067*(Tv1^3))+0.148273416311*(Tv1^2))+(-51.688422361865*Tv1)+10113.8430819729;
#Cppl2 := (-0.00013972067*(Tv2^3))+0.148273416311*(Tv2^2))+(-51.688422361865*Tv2)+10113.8430819729;

(* Pressions/débit dans la cuve de détente *)
#Pv1 := Pinit * exp((Mv*#Dhv1/R)*((1/#Tsatinit)-(1/Tv1)));
#Pv2 := Pinit * exp((Mv*#Dhv2/R)*((1/#Tsatinit)-(1/Tv2)));
#Qp12 := Qpe - Qv1;

```

## (\* CONTRAINTES DIMENSIONNELLES \*)

## (\* Cuve tampon \*)

```

#Qp0 := Qpe+(1000/3600);
#eCint := ((PO*10^5)*dCint/((2*f*z)-(PO*10^5)))*10;
#SCint := pi*(dCint^2)/4;
#VCint := (tinterr*Qpe/#rop)+(tremp*(#Qp0-Qpe)/#rop);
#HcoCT := (dCint/2)*(1/sin((coCT/2)*pi/180));
#HCT := #VCint/#SCint;
#ACint := pi*#HCT*(dCint+(2*#eCint));
#Apext := pi*#HCT*(dCint+(2*#eCint)+(2*#eCint));
#StoCint := pi*dCint*(#HCT+(#HcoCT/2));
#StoCint := pi*dCint*(#HCT+(#HcoCT/2));
#PdsCint := #StoCint*#eCint*roacir;
#Pdsiso := (pi*(dCint+(2*#eCint)+(2*#eCint)))*#eCint*roacir*(#HCT+(#HcoCT/2));
#Pdspext := (pi*(dCint+(2*#eCint)+(2*#eCint)+(2*#eCint)))*#eCint*roacir*(#HCT+(#HcoCT/2));

```

## (\* Cuve de détente \*)

```

#si gma1 := ((-0.000212473852594578)*Tv1)+0.137034133034068;
#si gmae := ((-0.000212473852594578)*Tpe)+0.137034133034068;
#si gma2 := ((-0.000212473852594578)*Tv2)+0.137034133034068;
#Psate := exp((4955.7*(-1/Tpe))+24.727);
#Psat1 := exp((4955.7*(-1/Tv1))+24.727);
#Psat2 := exp((4955.7*(-1/Tv2))+24.727);
#dgm nHP := ((4*#si gmae/(#Psate-#Psat1))+4*#si gma1/(#Psate-#Psat1))/2;
#dCHPmax := sqrt((72*#muv1*Qv1)/(g*#rov1*pi*(dgmax^2)*(#rol1-#rov1)));
#dgm nBP := ((4*#si gma1/(#Psat1-#Psat2))+4*#si gma2/(#Psat1-#Psat2))/2;
#dcBPmin := sqrt((72*#muv2*Qv2)/(g*#rov2*pi*(dgmax^2)*(#rol2-#rov2)));
#dcBPmax := sqrt((72*#muv2*Qv2)/(g*#rov2*pi*(dgminBP^2)*(#rol2-#rov2)));
#eHP := ((Pv1m*10^5)*dcHP)/((2*f*z)-(Pv1m*10^5));
#eBP := (((Pv2m*10^5)*dcBP)/((2*f*z)-(Pv2m*10^5)))+0.002;
#efdBP := #eBP+0.003;
#HcoHP := dcHP/(2*tan((coHP/2)*pi/180));
#HcoHPto := dcHP/(2*si n((coHP/2)*pi/180));
#Hcyl HP := 0.92*dcHP;
#HcoBP := dcBP/(2*tan((coBP/2)*pi/180));
#HcoBPto := dcBP/(2*si n((coBP/2)*pi/180));
#Hcyl BP := 0.275*dcBP;
#PdsfdHP := Pdsfd(dcHP);
#PdsfdBP := Pdsfd(dcBP);
#PdschHP := (roacir*#eHP*((pi*dcHP*#Hcyl HP)+(pi*dcHP*#HcoHPto/2)))+#PdsfdHP;
#PdschBP := (roacir*#eBP*((pi*dcBP*#Hcyl BP)+(pi*dcBP*#HcoBPto/2)))+#PdsfdBP;

```

## (\* Dévesi cul eur \*)

```

#Qg := -1.53e-5+((1.38e-6)*Qv1)+((4.79e-8)*Tv1);
#Ldeve := (1.7507*Sdeve)+0.3021;
#Pdsdeve := (200*Sdeve)+10;

```

## (\* Fl otteur \*)

```

#Hcyl fl := (1/(pi*((dfl^2)/4)*g*#rop)-(g*efl*roacir*pi*dfl))
*(((g*efl*roacir)*(((pi*(dfl^2)/4)*(1+(1/sin((cofl/2)*pi/180))))
- ((pi*(douv^2))/4*(4*si n((cofl/2)*pi/180))))
+ ((pi*(douv^2)/4)*((Pv1m*10^5)-(Pv2m*10^5)))
- (g*#rop*pi*((dfl^3)-(douv^3))/(24*tan((cofl/2)*pi/180))))
#Vfl := ((pi*(dfl^2)/4)*#Hcyl fl+(dfl/(6*tan((cofl/2)*pi/180))))
- (pi*(douv^3)/(24*tan((cofl/2)*pi/180)));
#Sfl := ((pi*(dfl^2)/4)*(1+(1/sin((cofl/2)*pi/180)))) + (pi*dfl*#Hcyl fl)
- (pi*(douv^2)/(4*si n((cofl/2)*pi/180)));
#Pdsfl := #Sfl*efl*roacir;

```

## (\* Condenseurs \*)

```

#PdsCdsrHP := (-1.9968*(#AcdsrHP^2))+60.117*#AcdsrHP+7.6399;
#PdsCdsrBP := (-1.9968*(#AcdsrBP^2))+60.117*#AcdsrBP+7.6399;

```

## (\* Tuyauteries \*)

```

#dCuveTampon0CuveDetente := (2*sqrt(Qpe/(#rop*pi*(sqrt(((2*g)/(1+(4*Xsi)+Xsi1+Xsi2))
*(((P0*10^5)-(#Pv1*10^5))/(#rol1*g))-H1)))));
#dCuveDetente0cdsrHP := (0.0734*ln(#AcdsrHP))+0.0956;
#dCuveDetente0cdsrBP := (0.0734*ln(#AcdsrBP))+0.0956;
#dCuveCdstoCuveDetente := (2*sqrt(Qcdst/(#rol1*pi*(sqrt(((2*g)/(1+(4*Xsi)+Xsi1+Xsi2))
*(((P0*10^5)-(#Pv1*10^5))/(#rol1*g))-H2)))));
#PdsTuy := (L1*Pdstube(#dCuveTampon0CuveDetente*etube2))
+(L2*Pdstube(#dCuveDetente0cdsrHP*etube4))
+(L3*Pdstube(#dCuveDetente0cdsrBP*etube3))
+(L4*Pdstube(dscdsr*etube2))
+(L5*Pdstube(dsPAV*etube2))
+(L6*Pdstube(#dCuveCdstoCuveDetente*etube1));

```

## (\* CONTRAINTES ECONOMIQUES \*)

```

#CoutCT1 := Coutacier(#PdsCint)+Coutaluminium(#Pdspext)+(Coutiso1*((#HCT+#HcoCT)*eiso))
+Coutmiseenforme(#PdsCint)+CoutMel;
#CoutCT2 := Coutacier(#PdsCint)+Coutaluminium(#Pdspext)+(Coutiso2*((#HCT+#HcoCT)*eiso))
+Coutmiseenforme(#PdsCint)+CoutMel;
#CoutCuveDetente := Coutacier(#PdschHP+#PdschBP+#Pdsfl)+Coutmiseenforme(#PdschHP+#PdschBP+#Pdsfl);
#CoutDevesiculaire := (3448.109815*(Sdeve^0.78165577))+900;
#CoutCdsrHP := CoutCondenseur(#AcdsrHP);

```

```

#CoutCdsrBP := CoutCondenseur(#AcdsrBP);
#CoutTuy := Couttubesacier(#PdsTuy);
#CoutStr := 8*PdsStr;
#ConsoEnergiePAV := tu* PuissPAV;
#ConsoPC := tu* PuissPC;
#PuissHP := #Qcdst1*#Dhv1/1000;
#PuissBP := #Qcdst2*#Dhv2/1000;
#PuissMel := Np*#rop*(N^3)*(dmel^5);
#ConsoMel := tu*#PuissMel;
#ConsoPE := tu*Pui ssPE;
#ConsoEauHP := Ql r1/#Pui ssHP;
#ConsoEauBP := Ql r2/#Pui ssBP;

```

## Constraint

```

(*****
(*** CUVE TAMPON ***)
ei so = (((#eCint/lambdaaci er)+(ei so/l ambdai so)+(epext/l ambdaal u))/(pi *#HCT*(Tpe-Tpext)))
* (((kai r*#ACi nt*(Tpext-Tai r)) + (si gma*epsi l on*#ACi nt*((Tpext^4)-(Tai r^4)))
- ((#Apext*(Tpe-Tpext))/((#eCint/l lambdaaci er)+(ei so/l ambdai so)
+ (epext/l ambdaal u)))));

(* Mél angeur *)
dmel = dCint/3;
Hmel = dCint/3;
Rep < 4250 -> {Np = (3.9576*(Rep^(-0.2747)))};
Rep > 4250 -> {Np = 0.4};

(*** CUVE DE DETENTE ***)
(* Cuve Haute Pression *)
Tv1 < Tpe;
Tv1 > 303.15;
Qv1 > 0;
Qv1 = (Qpe*(#Cppe*Tpe)-#Cp1*Tv1)/#Dhv1;
dcHP > #Ldeve+dfl;
dcHP < #dcHPmax;

(* Dévési cul eur *)
Sdeve = Qv1/(#rov1*Vvap);

(* Cuve Basse Pressi on *)
Tv2 < Tv1;
Tps = Tv2;
Qv2 > 0;
Qv2 = (#Qp12*(#Cp1*Tv1)-#Cp2*Tv2)/#Dhv2;
dcBP = (#dcBPmi n+#dcBPmax)/2;

(*** CONDENSEURS ***)
(* Condenseur HP *)
h1r1 = h1rHP(Tv1, #G1r1, #Cplre1, #Relr1, #Pr1re1);
hcd1 = hcdHP(Tv1, #lambdacdst1, #Recdst1, #mucdst1, #rocdst1, #rov1, g);

(* Condenseur BP *)
h1r2 = h1rBP(Tv2, #G1r2, #Cplre2, #Relr2, #Pr1re2);
hcd2 = hcdBP(Tv2, #lambdacdst2, #Recdst2, #mucdst2, #rocdst2, #rov2, g);

(*** SYSTEME GLOBAL ***)
PdsSys = #PdsCint+#Pdsi so+#Pdspext+#PdschP+#PdschBP+#Pdsfl +#PdsTuy+#Pdsdeve
+#PdsCdsrHP+#PdsCdsrBP+PdsPAV+PdsPC+PdsPE;
CoutSys1 = 3.1*( #CoutCT1+#CoutCuveDetente+ #CoutDevesiculeur+#CoutCdsrHP+#CoutCdsrBP
+CoutPAV+CoutPC+CoutPE+#CoutStr+#CoutTuy);
CoutSys2 = 3.1*( #CoutCT2+#CoutCuveDetente+ #CoutDevesiculeur+#CoutCdsrHP+#CoutCdsrBP
+CoutPAV+CoutPC+CoutPE+#CoutStr+#CoutTuy);
ConsoEnergieSys = #ConsoEnergiePAV+#ConsoPC+#ConsoMel+#ConsoPE;
CoutEnergieSys1 = Coutkwh1*ConsoEnergieSys;
CoutEnergieSys2 = Coutkwh2*ConsoEnergieSys;
ConsoEauSys = #ConsoEauHP+#ConsoEauBP;
CoutEauSys1 = Coutm31*ConsoEauSys;
CoutEauSys2 = Coutm32*ConsoEauSys;
EcolIndicateurSys = Ecoscore*((#PdsCint+#PdschP+#Pdsfl+#PdschBP+PdsStr)/1000);

(*** STRUCTURE ***)
PdsStr = PdsSys/3.8;
PdsSys < 19000-PdsStr;

```





## **Aide à la décision en conception préliminaire de procédés d'évaporation flash.**

### **Résumé :**

L'évaporation flash est un phénomène qui se caractérise par la vaporisation partielle d'une fraction liquide d'un fluide (chargé ou non en particules solides), provoquant le refroidissement de la matière non vaporisée. Le travail proposé a pour objectif de développer un outil d'aide à la décision pour la conception préliminaire d'un procédé d'évaporation flash bi-étagé. Cet outil est basé sur la mise en œuvre d'une démarche de formalisation en trois étapes. L'analyse et la structuration du problème (étape 1), visent à déterminer et sélectionner les éléments pertinents du problème de conception préliminaire. Les éléments retenus concernent la modélisation des phénomènes physiques liés au comportement des composants, comme les condenseurs, le dévésiculateur, la pompe à vide, etc. Ils se rapportent également à des critères technico-économiques et à des écocritères. La formulation et la qualification des modèles (étape 2) conduisent à l'expression d'un Problème de Satisfaction de Contraintes (CSP) formulé et adapté à un contexte et à des outils d'aide à la décision. La qualification du modèle lié au comportement physique du procédé d'évaporation flash bi-étagé a été réalisée à partir de résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'un pilote instrumenté. Le traitement numérique du problème de conception (étape 3) est ensuite réalisé à l'aide d'un solveur CSP, permettant de résoudre des problèmes hétérogènes (variables définies sur des domaines continus ou énumérés, contraintes égalitaires, inégalitaires ou règles logiques). Les différents problèmes de conception traités dans le cadre de ce travail ont permis la validation de la démarche de formalisation pour la conception préliminaire de procédés d'évaporation flash, en aboutissant à des solutions techniques performantes sur les plans énergétique et environnemental, qui offrent une réduction du volume de l'installation conséquente et permettent une optimisation de l'exploitation de ressources (matériaux, énergie, eau).

### **Mots clés :**

Aide à la Décision, Conception Préliminaire, Eco-conception, Problèmes de Satisfaction de Contraintes, Expérimentations, Evaporation flash.

## **Decision support in the preliminary design of flash evaporation processes.**

### **Abstract:**

Flash evaporation phenomenon is characterized by partial vaporization of the liquid fraction of a fluid (turbid or not), causing the cooling of the non vaporized fraction of this fluid. This work is devoted to the development of a decision support tool for the preliminary design of a two-staged flash evaporation process. This tool is based on the implementation of a formalization approach divided into three stages. Analysis and Structuring of the design problem (first stage) aim to define and select the relevant elements needed for the design problem solving. The selected elements affect the modelling of physical phenomena related to components behaviour (condensers, droplet catcher, vacuum pumps, etc.). They also concern technical, economical and environmental criteria. Formulation and qualification of the models obtained (second stage) lead to the expression of a Constraint Satisfaction Problem (CSP) expressed and adapted to decision support context and tools. The qualification step of the model describing the physical behaviour of the process has been carried out starting from experimental results obtained with an instrumented pilot unit. Numerical processing of the entire design problem (third stage) is carried out using a CSP solver. This solver allows the solving of heterogeneous problems (variables defined on continuous or enumerated fields, equalities, inequalities or logical rules). The different design problems handled in this work prove to validate the formalisation approach by leading to efficient technical solutions regarding energy or environmental levels. These solutions offer a significant reduction in the size of the installations and allow the optimization of resources exploitation, materials, energy or water.

### **Key words:**

Decision support, Preliminary design, Eco design, Constraint Satisfaction Problems, Experimentation, Flash evaporation.