

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU  
MODÈLE DE SIMULATION D'UNE  
SÉCHERIE  
MULTI-CYLINDRIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DES PÂTES ET PAPIERS

PAR  
YANG LI

Août 2001

2001

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## **Remerciements**

Pour construire le nouveau modèle de sécherie, sous la direction de mon directeur Luc Laperrière et de mon co-directeur Robert Lanouette, j'ai fait beaucoup de progrès, c'est pourquoi je leur prie d'accepter tous mes remerciements.

Je remercie aussi mon co-directeur initial Jacques L . Valade qui m'a guidé beaucoup quand j'étais un débutant.

Finalement, mes remerciements iront à toutes les personnes qui m'ont aidé.

## Résumé

Ces dernières années, la simulation dans l'industrie des pâtes et papiers est devenue de plus en plus importante. Cadsim Plus est un logiciel de simulation dynamique utilisé par cette industrie. Il est surtout utilisé pour simuler les divers procédés, les optimiser ou même prédire certains problèmes potentiels dans des scénarios hypothétiques. Durant une simulation, diverses variables calculées par le logiciel sont typiquement affichées à l'écran pour que l'utilisateur les interprète et les analyse.

La structure de la partie sèche ( sécherie ) d'une machine à papier est très grosse et très complexe. Elle ne représente qu'un des nombreux modules ( unité opérationnelle ou équipement ) disponibles dans le logiciel. Cependant, dans sa version actuelle, ce module est très limité au niveau de la modélisation et les résultats de simulation sont grossiers. En effet, une fois que l'utilisateur a spécifié diverses variables à l'entrée de la sécherie ( par exemple l'humidité de la feuille, la température, la pression, etc ... ) et divers paramètres de la sécherie elle-même ( tels que le pourcentage de perte en chaleur ), le module actuel se contente de calculer d'autres composantes de conduite de sortie par l'utilisation de bilans de masse et d'énergie ( par exemple la quantité de vapeur perdue dans l'atmosphère ). Beaucoup d'autres variables importantes relatives à la conception et au fonctionnement de la partie sèche sont négligées, par exemple le nombre de rouleaux, leur diamètres, leurs épaisseurs, leurs matériaux, la largeur du papier, le grammage, etc. Pendant la simulation il manque beaucoup de résultats très importants, tels que la vitesse de la machine, le taux d'évaporation, l'état du condensat, l'état de l'air dans le système de ventilation, le coefficient global d'échange thermique, etc. De plus, le logiciel comporte seulement la ligne de production du papier, les deux autres parties ( ventilation et vapeur ) ne sont pas considérées. En production, toutes ces variables et facteurs sont reliés entre eux par diverses relations fonctionnelles plus ou moins complexes.

Le but de cette recherche est précisément d'inclure ces variables supplémentaires et les relations qui les unit pour que l'utilisateur puisse non seulement simuler un procédé beaucoup plus près de la réalité mais également prédire le fonctionnement de nouveaux designs potentiels de la partie sèche.

La stratégie d'implantation repose sur l'utilisation des Dynamic Link Modules ( DLM ) du logiciel Cadsim. Un DLM est un programme en C qui peut être compilé et rajouté au logiciel de base pour en augmenter les fonctionnalités.

### **Mots Clés**

Sécherie, simulation, module, Cadsim Plus, production du papier, ventilation, vapeur, bilan d'énergie, bilan de masse, équation, résultats simulés.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ia
RÉSUMÉ.....	ib
TABLE DES MATIÈRE .....	i
LISTE DES TABLEAUX .....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ÉQUATIONS .....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	x
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 But du travail .....	1
1.2 Présentation du mémoire.....	2
<b>CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....</b>	<b>3</b>
2. 1 Simulation en pâtes et papiers .....	3
2.1.1 "Control and optimization of mechanical pulping systems" .....	3
2.1.2 "DD - Washer".....	5
2.1.3 "DSS - 100".....	6
2. 2 Simulation de la sécherie.....	7
2.2.1 "Computational modeling of paper drying machines".....	7
2.2.2 "Vision Relese 3.2 (DRC)" .....	9
2.2.3 Séchoir équivalent.....	11
2. 3 La sécherie dans Cadsim Plus .....	16
2. 4 Positionnement de la recherche .....	17
<b>CHAPITRE 3 NOTIONS DE BASE DANS UNE SÉCHERIE .....</b>	<b>19</b>
3. 1 Principes de transfert.....	19
3. 2 Cylindres Multiples .....	21
3. 3 Résistance thermique.....	22

3. 4 État du condensât.....	25
3. 5 Barres et siphon .....	26
3. 6 Le système de vapeur .....	27
3. 7 La hotte .....	29
3. 8 Ventilation de poche.....	31
3. 9 Autres notions dans une sécherie .....	33
<b>CHAPITRE 4 NOUVEAU MODÈLE DE LA SÉCHERIE .....</b>	<b>37</b>
4. 1 Introduction au nouveau modèle .....	37
4. 2 Les variables du nouveau modèle .....	39
4. 3 Construction du modèle.....	40
4.3.1 Dessiner un modèle de la sécherie .....	41
4. 3.2 Choix à faire.....	44
4. 4 Variables calculées .....	45
4.4. 1 Données connues .....	46
4.4. 2 Paramètres principaux.....	46
4.4. 3 Condensât.....	48
4.4. 4 Taux d'évaporation de la sécherie.....	52
4.4. 5 Calculs reliés au système de la ventilation .....	54
<b>CHAPITRE 5 RÉSULTATS DE SIMULATION .....</b>	<b>58</b>
5. 1 Évaluation basée sur des données réelles d'usine .....	58
5. 2 Évaluation basée sur les tables de référence de Tappi .....	59
5. 3 Interactions entre les variables du modèle.....	62
5. 4 Jugements logiques.....	62
5. 5 Système de contrôle.....	63
5. 6 Système d'alarme .....	64
5. 7 La ligne dynamique du taux d'évaporation .....	65
5. 8 Validation des résultats de simulation.....	66
5.8.1 Résultats du système de production du papier.....	66

5.8.2 Résultats du système de ventilation .....	68
5.8.2.1 Les résultats simulés de la hotte ouverte .....	68
5.8.2.2 Les résultats simulés de la hotte fermée .....	69
<b>CHAPITRE 6 CONCLUSIONS.....</b>	<b>71</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>73</b>
<b>I - Les variables spécifiées dans le nouveau modèle.....</b>	<b>73</b>
<b>II - Les résultats représentés par les variables calculées dans le nouveau modèle.....</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>81</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Description du système DSS-100 .....	6
Tableau 2.2 La première section de Vision Release 3.2 .....	10
Tableau 2.1 La troisième section de Vision Release 3.2 .....	10
Tableau 3.1 Les données dans chaque section de sécherie .....	36
Tableau 5.1 Les variables spécifiées dans la section de production du papier.....	66
Tableau 5.2 Les résultats simulés dans la section de production du papier .....	66
Tableau 5.3 Les résultats des taux d'évaporation de sécherie.....	67
Tableau 5.4 Les variables spécifiées de la hotte ouverte.....	68
Tableau 5.5 Les résultats simulés de la hotte ouverte .....	69
Tableau 5.6 Les résultats réels de la hotte ouverte .....	69
Tableau 5.7 Les variables spécifiées de la hotte fermée .....	70
Tableau 5.8 Les résultats simulés de la hotte fermée .....	70
Tableau 5.9 Les résultats réels de la hotte fermée .....	70

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Avec l'utilisation du modèle le pourcentage de Kraft utilisé diminue et la vitesse de la machine augmente.....	4
Figure 2.2	Les résultats obtenus durant la simulation.....	5
Figure 2.3	Les résultats de simulation du système DSS-100 .....	7
Figure 2.4	Modèle d'un élément différentiel de la feuille .....	8
Figure 2.5	Schéma d'une sécherie multi-cylindriques .....	11
Figure 2.6	L'élément de papier dans la section de la sécherie .....	13
Figure 2.7	Le réseau d'électricité simulant la vapeur .....	13
Figure 2.8	Le résultat simulé de l'humidité .....	15
Figure 2.9	Modèle de la sécherie dans CADSIM PLUS PAPDYN .....	16
Figure 3.1	Les transferts dans la feuille de papier.....	19
Figure 3.2	Transfert de chaleur dans un cylindre .....	21
Figure 3.3	Échange thermique entre le cylindre et le papier.....	19
Figure 3.4	Relation entre l'état du condensât et la vitesse de la machine.....	25
Figure 3.5	Vapeur du siphon .....	27
Figure 3.6	Barres .....	27
Figure 3.7	Système de vapeur dans une sécherie multi-cylindriques.....	28
Figure 3.8	Bilan d'énergie de la vapeur .....	28
Figure 3.9	Forme de la hotte .....	30
Figure 3.10	La hotte fermée .....	30
Figure 3.11	La hotte ouverte .....	31
Figure 3.12	Système Grewin.....	32
Figure 3.13	Rouleau de ventilation .....	32
Figure 3.14	Caisse de ventilation .....	32
Figure 3.15	Conduit perforé de ventilation .....	32
Figure 3.16	Le système de vapeur.....	35
Figure 3.17	Le système de vapeur dans la sécherie Yankee .....	36
Figure 4.1	Nouveau modèle de la sécherie.....	38
Figure 4.2	Les distances entre les cylindres et les sections.....	40
Figure 4.3	Schéma du modèle .....	40

Figure 4.4	Les étapes de dessiner le modèle .....	41
Figure 4.5	Les composantes .....	42
Figure 4.6	Une boîte de dialogue .....	42
Figure 4.7	Les variables spécifiées dans une boîte.....	43
Figure 4.8	Les échelles graphiques .....	43
Figure 4.9	Système de Multi-Cylindres .....	44
Figure 4.10	Le système de Yankee .....	44
Figure 4.11	La position de la sécherie dans une machine à papier .....	45
Figure 4.12	La relation entre l'épaisseur du condensât et la vitesse de la machine.....	49
Figure 4.13	Le taux d'évaporation sur le séchoir .....	52
Figure 4.14	La pente du taux d'évaporation.....	53
Figure 4.15	Le taux d'évaporation moyen ( journal ) .....	54
Figure 5.1	Un graphique du taux d'évaporation de la sécherie.....	58
Figure 5.2	Les résultats de simulation ne sont pas un succès.....	59
Figure 5.3	TIS 0404-15 .....	60
Figure 5.4	TIS 0404-14 .....	60
Figure 5.5	TIS 0404-12 .....	61
Figure 5.6	Comparer les résultats de simulation avec TAPPI.....	61
Figure 5.7	Vérification du modèle .....	62
Figure 5.8	Jugement de l'état du condensât .....	63
Figure 5.9	Système de contrôle .....	64
Figure 5.10	Système d'alarme .....	65
Figure 5.11	La ligne dynamique du taux d'évaporation .....	65
Figure 5.12	Les résultats simulés vs les résultats Tappi.....	67
Figure 5.13	Les résultats simulés vs TIS0404-15 .....	68

## LISTE DES ÉQUATIONS

$$P_w = \{ P_s \} \text{ si } M_s \neq M_{sc}$$

$$= \{ P_s * e - kf (1/M_s - 1/M_{sc}) \} \text{ si } M_s < M_{sc}$$

Éq. 2.1 ..... 12

$$(M_s(y + \Delta y) - M_s(y))B_w L \Delta y = -gL \Delta y \Delta t$$

Éq. 2.2 ..... 13

$$(T(y + \Delta y) - T(y))B_w (C_f + M_s(y)C_w)L \Delta y$$

$$= ((T(y) - 273)g - q - gH_s)L \Delta y \Delta t$$

Éq. 2.3 ..... 13

$$M_{ci}(dT_{di} / dt) = Q_{ini} - Q_{outi}$$

Éq. 2.4 ..... 14

$$Q_{ini} = G_i (H_s - H_w)$$

Éq. 2.5 ..... 14

$$Q_{outi} = \beta [(C_f + M_{sini}C_w)(T_{outi} - T_{ini}) +$$

$$(M_{sini} - M_{souti})(H_e - C_w T_{outi})] B_w S_p L$$

Éq. 2.6 ..... 14

$$G_i = Q_{outi} / (H_s - H_w) \quad \text{ou} \quad G_i = (P - P_a) / R_i$$

Éq. 2.7 ..... 14

$$T_{di}(k) = \sum_{i=1}^7 \left( a_m / \sum_{j=1}^7 a_m \right) T_{di}(k)$$

Éq. 2.8 ..... 15

$$= \sum_{i=1}^7 a'_{mi} T_{di}(k)$$

$$R_w = q / \lambda$$

Éq. 3.1 ..... 23

$$q = U(T_{vapeur} - T_{feuille})$$

Éq. 3.2 ..... 23

$$1/U = 1/h_v + X_s/K_s + X_c/K_c + 1/h_a + X_p/K_p$$

Éq. 3.3 ..... 23

$$S = \pi (h R)^{1/2}$$

Éq. 3.4 ..... 27

$P = \text{FiberOut} * 24 * 60 * 60 /$	
$\text{PAPER\_OUT\_CONSISTENCY} / 1000$	Éq. 4.1 ..... 46
$Sm = P * 1000 / 24 / 60 / ( W * B )$	Éq. 4.2 ..... 47
$S = D * 3.1415926 * L$	Éq. 4.3 ..... 47
$Rp = P * 1000 / 24 / S$	Éq. 4.4 ..... 47
$Sm = ( 5720 - 2610 / D ) d_{\text{cond}}$	Éq. 4.5 ..... 48
$f = \sqrt{g\delta} / 2s ; \quad f = V^2 / R ; \quad f = V / 2\pi R$	Éq. 4.6 ..... 49
$X_{\text{air}} = 3.5 * 10e-5 * R * (\mu * V / T) 2 / 3$	Éq. 4.7 ..... 50
$X = 15 * D * P / ( 200 * \sigma )$	Éq. 4.8 ..... 50
$DUTY = EVaporOut - EVaporIn$	Éq. 4.9 ..... 50
$DUTY = ( EPaperOut - EPaperIn + EVentOut - EVentIn ) / HeatLoss$	Éq. 4.10 ..... 51
La quantité de vapeur minimale $Q_{\text{vap}}$ ( en kg / s )	
$= DUTY / \lambda_{\text{vap}}$	Éq. 4.11 ..... 51
La pente de la ligne $= ( R_{w1} - R_{w2} ) / ( T_1 - T_2 )$	Éq. 4.12 ..... 53
la pente de la ligne $= ( R_{w1} - R_{w2} ) / ( P_1 - P_2 )$	Éq. 4.13 ..... 53
$X = \{ 1.0048( V_w - V_d ) +$	
$X_v' ( 2501 - 2.3237V_w ) \} / ( 2501 + 1.86V_d - 4.19V_w )$	Éq. 4.14 ..... 55

$Xv' = 0.62197Pv' / ( P - Pv' )$	Éq. 4.15 ..... 55
$Pv' = \exp\{ 11.78( Vw - 99.64 ) / ( Vw + 230 ) \}$	Éq. 4.16 ..... 55
$Vdp = 99.64 + 329.64 * \ln( Pp ) / \{ 11.78 - \ln( Pp ) \}$	Éq. 4.17 ..... 55
$Pp = X * P / ( X + 0.6222 )$	Éq. 4-18 ..... 55
$\rho = \{ 216.67P( X + 1 ) \} / \{ ( 273.15 + V )( X + 0.622 ) \}$	Éq. 4-19 ..... 56
$Vair = 359 / 28.85 * \{ ( 460 + T ) / ( 460 + 32 ) \}$	Éq. 4-20 ..... 56
$D = Qex / Vair$	Éq. 4.21 ..... 56
$Qex = Qinfiltration + Qalimentation + Qvapeur$	Éq. 4.22 ..... 56

## Liste des Abréviations

CD Le sens travers de la machine

DLM Dynamic Link Module

DLL Dynamic Link library

DRC Drying Reache Centre

MD Le sens machine

MG MG cylindre

P Pressure

PDE Équation partiale différente

T Température

# Chapitre 1 - Introduction

Ces dernières années, le développement des logiciels de simulation devient de plus en plus important. Un bon modèle peut faciliter le travail de recherche, économiser l'investissement, améliorer le procédé et surtout diminuer les impacts négatifs pendant l'expérimentation.

Selon la littérature sur la simulation dans l'industrie des pâtes et papiers, on trouve des modèles de simulation, par exemple, les simulations du procédé TMP<sup>1</sup>, la simulation du contrôle des problèmes dans les directions CD et MD<sup>2</sup> (CD : le sens travers de la machine; MD : le sens de la machine), la simulation des performances dans une usine<sup>3</sup>, le contrôle des sections de presse<sup>4</sup>, la modélisation dynamique de la qualité du papier<sup>5</sup>, la modélisation de la caisse d'arrivée et de la section des presses<sup>6,7,8</sup>. Évidemment, la simulation sur ordinateur est bien acceptée comme un outil spécifique par l'industrie de pâtes et papiers.

Parmi les recherches, on trouve aussi des modèles de la simulation de la sécherie, tel que : modélisation et contrôle de la sécherie<sup>9,10,11</sup>, la simulation du taux d'évaporation dans une sécherie<sup>12</sup>, simulation de la sécherie par rayon infra rouge<sup>13</sup>, etc. Mais, jusqu'à présent, on n'a pas encore trouvé un modèle qui peut simuler dynamiquement toutes les sections de la sécherie multi-cylindrique. En pratique, une sécherie multi-cylindrique est composée de trois sections essentielles, le système de ventilation, le système de vapeur et le système de séchage.

## 1.1 But de travail

La sécherie est la section la plus grosse et la plus longue d'une machine à papier, ainsi que celle qui requiert le plus d'énergie. L'industrie canadienne produit annuellement près de 30 millions de tonnes de pâte et papier par année. Quelques 39 millions de tonnes d'eau sont évaporées pour sécher ces produits et cette opération consomme plus de 50 millions de tonnes de vapeur. Des économies substantielles peuvent être réalisées en simulation pour, par exemple, améliorer l'efficacité de la sécherie<sup>14</sup>.

La sécherie est aussi une section des plus complexe. Quand on évalue le design d'une nouvelle sécherie dans les usines existantes, on étudie les aspects opérationnels et on teste les stratégies de contrôle; dans les trois cas, les calculs sont très complexes. Surtout parfois, il est difficile de juger et de mesurer certains paramètres et données dans une sécherie.

Pour toutes ces raisons, la simulation apparaît comme un outil prometteur, et cela constituera le but de ce travail. En bref, dans ce mémoire, on présentera comment construire complètement un nouveau modèle de sécherie multicylindrique.

## 1.2 Présentation du mémoire

Le deuxième chapitre présentera des articles scientifiques sur les modèles de simulation lesquels sont déjà construits. Le troisième présentera des notions de base dans une sécherie. Le quatrième présentera le nouveau modèle de la sécherie et montrera les données et les variables utilisés dans le modèle. On fera la comparaison entre l'ancien et le nouveau modèle. Le cinquième chapitre discutera les moyens de choisir les données entrées et vérifier les résultats de simulation. On montrera aussi tous les résultats simulés du nouveau modèle dans le chapitre six. Finalement, on résumera complètement notre modèle dans le dernier chapitre de conclusion.

## Chapitre 2 - Revue de la littérature scientifique

En pratique, il existe beaucoup de modèles de simulation en pâtes et papiers, par exemple, utilisation d'une plate-forme de simulateur de ABB Simcons pour simuler le procédé de production du papier<sup>15</sup>; un modèle simulant la machine à papier pour choisir la condition optimum de l'opération<sup>16</sup>; un système utilisé pour analyser et optimiser l'état d'opération dynamique dans la machine à papier<sup>17</sup>; modélisation et contrôle d'une sécherie multi-cylindrique<sup>18</sup>. On présentera ici des modèles typiques et on discutera de leurs qualités et inconvénients à la fin de ce chapitre.

### 2.1 Simulation en pâtes et papiers

On trouve plusieurs articles de simulation en pâtes et papiers, tels que "Control and Optimization of Mechanacal Pulping Systems"<sup>19</sup>, " Improvement of Pulp Strength and Yield By Computer Simulation of Lo-Solids Kraft Cooking"<sup>20</sup>, "., "KCL-Pakka: a Tool for Simulating Paper Properties"<sup>21</sup> et "Use of Simulation Models in the On-Line Control and Optimization of the Refining Process"<sup>22</sup>, etc. Parmi eux on pense que le premier ci-haut et les systèmes DD-washer<sup>23</sup> et DSS-100 sont représentatifs et ils seront expliqués plus en détail.

#### 2.1.1 "Control and optimization of mechanical pulping systems"

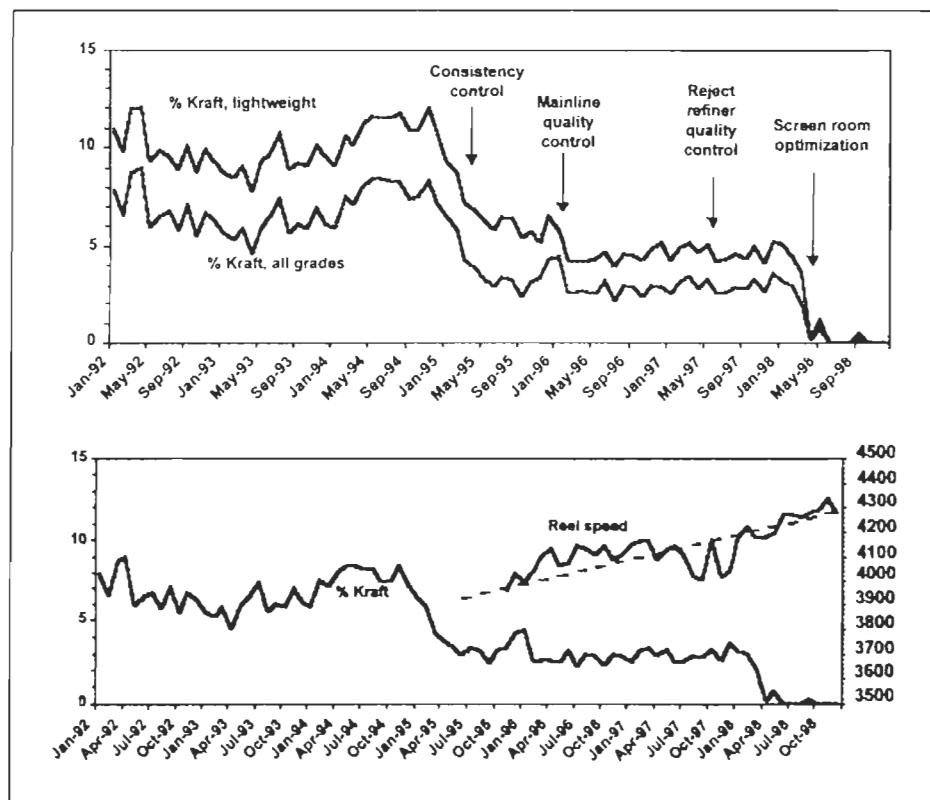
Cet article présente un modèle pour améliorer la qualité de production du papier, et augmenter l'efficience de la machine à papier.

Pendant l'opération de la machine à papier, des variables ne peuvent pas toujours être mesurées directement. De plus, avec un contrôle de type feed-back, la fréquence de mesure est toujours très lente. Dans ce cas les variables doivent être simulées par l'utilisation du modèle mathématique. Le modèle peut prédire les résultats d'opération réelle et calculer les variables à des valeurs optimisées. Tous les contrôleurs de ce

modèle prédictif peuvent traiter la relation interactive entre les variables, considérer les retards et limites et compenser les interférences.

Ce modèle est bien, mais il possède deux lacunes. La première est que le contrôleur ne peut pas fonctionner sous des conditions spéciales, car le contrôleur est composé d'éléments très simples qui ne peuvent générer des actions spéciales; la deuxième est que le contrôleur peut seulement traiter la consistance et l'énergie spécifique aux valeurs spécifiées, il ne peut pas faire les traitements sur les valeurs dans la sphère acceptée.

Les utilisateurs de ce modèle montrent que le pourcentage de la consommation de Kraft est diminué alors que la vitesse de la machine augmente ( figure 2.1).



**Figure 2.1**      **Avec l'utilisation du modèle le pourcentage de Kraft utilisé diminue et la vitesse de la machine augmente**

## 2.1.2 "DD-washer"

Les systèmes de simulation dynamique de DD-washer possède des fonctions pour supporter les opérations suivantes :

- 1.formation;
- 2.contrôle des procédés et opérations ;
- 3.exhibition.

En mode entraînement, l'opérateur peut observer les résultats d'opération et réagir dans les situations spéciales.

Le système peut exécuter la simulation en temps réel<sup>24</sup> , au cours de la simulation il peut transmettre une recommandation à l'opérateur. De plus, il peut tester et évaluer les variables d'opérations<sup>25</sup>.

La figure 2.2 montre les résultats obtenus durant la simulation.

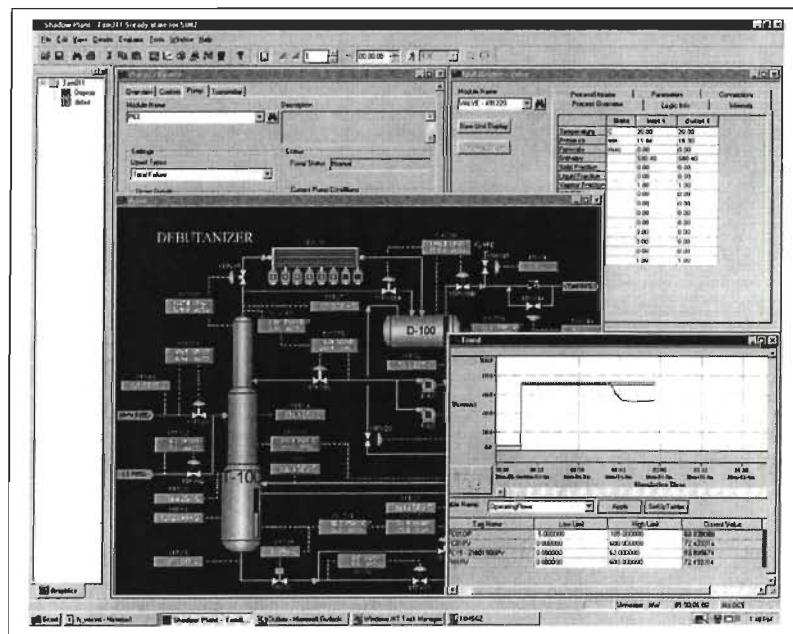


Figure 2.2 Les résultats obtenus durant la simulation

### 2.1.3 "DSS-100"

Un autre système intéressant est le module DSS-100. Le système DSS-100<sup>26</sup> est un système de simulation dynamique développé par la compagnie SIMTRONICS CORPORATION.

C'est un système interactif et dynamique, il peut fournir les modes de fonctionnement suivants:

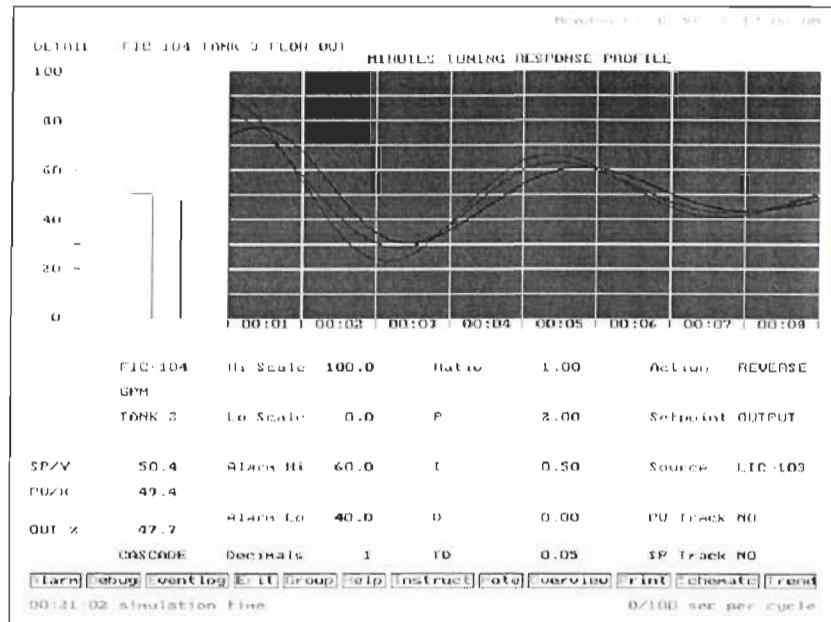
1. entraînement et qualification;
2. simulation;
3. évaluation;
4. éducation.

Il est intuitif et facile d'utiliser ce programme. Des icônes des équipements peuvent être mis à l'écran. L'utilisateur pointe un projet et entre les données. Pendant la simulation, les résultats sont montrés dynamiquement à l'écran. Comme le montre le tableau 2.1, ce programme se compose de trois sections essentielles, opérateur, instructeur et ingénieur.

**Tableau 2.1 Description du système DSS-100**

System description		
Operator Displays	Instructor Displays	Engineering Displays
Alarm	<u>Eventlog</u>	Main Simulator Control
Summary	<u>Eventlog Filters</u>	Debugger
Group	Faults	
Help	Fault Detail	
Instrument	Initial Conditions	
Detail		
Operator		
Logbook		
Overview		
Schematics		
Trends		

La figure 2.3 montre les résultats de simulation du système DSS-100.



**Figure 2.3** Les résultats de simulation du système DSS-100

## 2. 2 Simulation de la sécherie

On trouve aussi des modules sur la simulation de la sécherie, par exemple "Computational Modeling of Paper Drying Machines"<sup>27</sup>, "Single Sided Steam Impingement Drying of Paper, a Modelling Study"<sup>28</sup>, "Modeling Multicylinder Drying-Validation of a New Simulation Program"<sup>29</sup>, etc. Nous allons ici en décrire trois de façon plus exhaustive.

### 2. 2.1 "Computational modeling of paper drying machines"

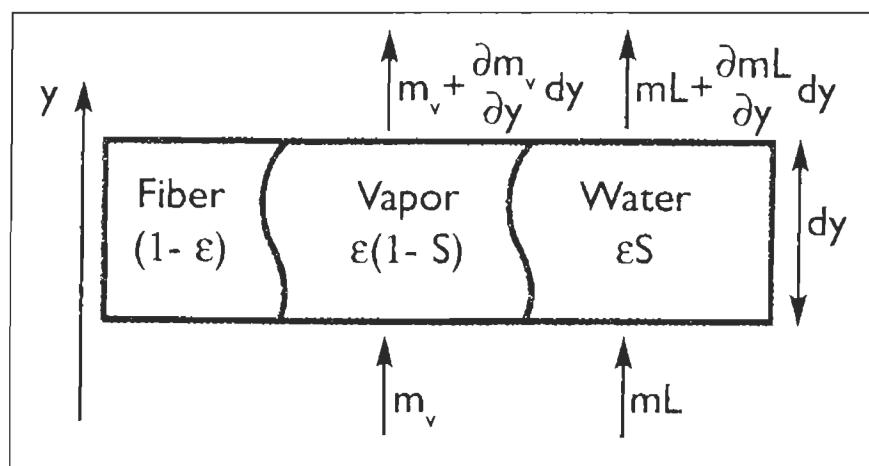
Dans cet article l'auteur présente un modèle mathématique pour simuler l'opération de la sécherie. Ce modèle est appliqué aux sécheries de journaux Australiens et a obtenu un bon résultat sur la réduction de la consommation de l'énergie et de vapeur.

Dans ce modèle, la feuille de papier est considérée comme une matière poreuse et hygroscopique, qui dissémine les moiteurs dans tous les sens. Le courant de liquide dans la feuille de papier est poussé par les pressions différentes causées par les pores

non uniformes dans la structure de papier et cela est contrôlé par le principe de Darcy. La diffusion du courant de vapeur résulte du gradient de vapeur causé par la température non uniformément distribuée traversant la feuille ( principe de Fick ). Pendant l'expérimentation la pression de la vapeur dans la hotte de sécherie est atmosphérique et la température est plus haute que 100 °C.

Une série de simulations sont exécutées pour montrer les effets de la moiteur, le grammage, l'épaisseur de la feuille et la température initiale sur le séchage. Les résultats simulés sont vérifiés par des données réelles de machine à papier.

Les bilans de masse et d'énergie sont établis pour un élément d'épaisseur  $dy$  comme la figure 2.4 le montre.



**Figure 2.4** Modèle d'un élément différentiel de la feuille

Ou :

- $dy$  = l'épaisseur du papier;
- $\varepsilon$  = la porosité;
- $S$  = degré de saturation fractionnelle.

## 2. 2.2 Vision Release 3.2 (DRC)

Vision Release 3.2 (DRC)<sup>30</sup> est un module développé pour simuler la sécherie multi-cylindrique par l'institut de DRC ( Drying Research Center ) de l'université du Texas, U.S. C'est un module intéressant, il peut être installé sous Windows 3.1, Windows 95, ou Windows 98, et avec lequel on peut entrer des données et voir les résultats à l'écran. On peut l'utiliser pour simuler le procédé de la sécherie du papier, et pour résoudre les équations de conservation sur les bilans de masse et d'énergie qui décrivent les procédés de production de papier.

Les équations de conservation sur l'énergie sont de type partielles différentielles (PDE) paraboliques dans le temps et elliptiques dans la direction de épaisseur. Ces équations sont résolues par l'utilisation d'une technique numérique explicite de différences finies.

Le modèle est composé de trois sections: 1) Description générale de la machine et des caractéristiques du papier. Cette section possède beaucoup de lignes comme le tableau 2.2 le montre. 2) les propriétés du cylindre. Dans cette section l'utilisateur peut entrer des informations et paramètres relatifs aux cylindres. 3) les propriétés de "single-tire". Cette section est composé de 17 colonnes, comme le tableau 2.3 les présente.

Vision Release 3.2 est versatile car il permet de changer les conditions d'opération (e.g. distribution de vapeur; températures et humidités perméabilité du papier ...) et il peut traiter plusieurs configurations normalement rencontrées dans une sécherie.

## Tableau 2.2 La première section de Vision Release 3.2

### First Section: General machine layout and paper characteristics

- Line 1. Machine description
- Line 2. Choice of units -1 Units: 0=SI; 1=IP (English)
- Line 3. Number of nodes in the z-direction
- Line 4. Length of time step [ms]
- Line 5. Total time in dryer machine [s]
- Line 6. Air dry paper sheet basis weight [kg/m<sup>2</sup> or lb/ft<sup>2</sup>]
- Line 7. Final paper thickness [mm or mil]
- Line 8. Initial wet basis moisture content [% kg water/kg fiber + water or % lb water/lb fiber + water]
- Line 9. Final wet basis moisture content [% kg water/kg fiber + water or % lb water/lb fiber + water]
- Line 10. Initial temperature [°C or °F]
- Line 11. Atmospheric pressure [kPa abs or psi abs]
- Line 12. Machine speed [m/s or ft/min]
- Line 13. Width – cross machine width [m or in]
- Line 14. Number of Cylinders
- Line 15. Number of unique properties cylinders
- Line 16. Number of unique properties, single-tier cylinders
- # Number of lines of data for single-tier properties to be read below

## Tableau 2.3 La troisième section de Vision Release 3.2

### Third Section: Single-tier properties

This section contains 17 columns. The first three (A-C) are valid for UnoRun as well as for BelChamp machines. The next five columns (D-H) apply for UnoRun only. The last nine columns (I-Q) are specific to BelChamp. No values are required if the machine does not have single-tier section.

Column A. Section - This column indicates the corresponding section of the machine.

Columns B First Cyl -This column indicates the first cylinder number for the given section

Column C. Last Cyl -This column indicates the numbers of the first and last cylinders for the section.

The next five columns (D-H) apply for UnoRun only.

Column D. Ncold -Flag to identify cold cylinders in single-tier UnoRun section options are:

- 0 No UnoRun
- 1 UnoRun

Column E. NcoldSurf - Flag indicating which property or properties are given for calculating single-tier cold cylinders surface temperature.

Choices are:

- # ColdPsteam and ColdTdrop
- # ColdTsrf

Column F. ColdTsrf -Surface temperature of cold, felt contacted s in single-tier [°C or °F].

Column G. ColdPsteam -Steam pressure in cold, felt contacted cylinders in single-tier configuration [kPa abs or psig].

Column H. ColdTdrop -Temperature drop between steam and cylinder surface for cylinders in contact with felt in single-tier configuration  
[°C or °F].

The next 9 columns (I-Q) are for BelChamp type only.

### 2. 2.3 Séchoir équivalent

Un autre module<sup>18</sup> que l'on présente ici est sur la modélisation d'une sécherie multi-cylindrique, dans lequel le modèle de la sécherie est basé sur le bilan de masse et d'énergie. Le modèle mathématique possède trois composantes essentielles : un modèle d'humidité; un modèle de température à la surface du séchoir, et un modèle de séchoir équivalent.

Premièrement, un concept nommé "séchoir équivalent" ( equivalent dryer ) est utilisé pour simuler la sécherie dynamique. Cela facilite l'analyse de la structure du modèle, les résultats sont plus exacts et plus robustes. Le but de ce modèle est d'améliorer le contrôle d'humidité de la feuille, afin d'avoir une performance stable.

Le système de vapeur est simulé par un réseau d'électricité pour faciliter le procédé de modélisation. Tous les facteurs qui influencent l'humidité du papier sont mesurés en termes de température du " séchoir équivalent".

Le papier de cette sécherie multi-cylindriques possède un poids de base de  $10\text{g /m}^2$ . La section de la sécherie dans cette machine à papier se compose de 7 cylindres séchoirs et 7 cylindres de toiles. Le papier est pressé entre la surface du cylindre et la toile. La chaleur est fournie par le système de vapeur. L'humidité du papier à l'entrée de la sécherie est 60-70%, à la sortie est 6-8%. Un diagramme de la sécherie est montré sur la figure 2.5.

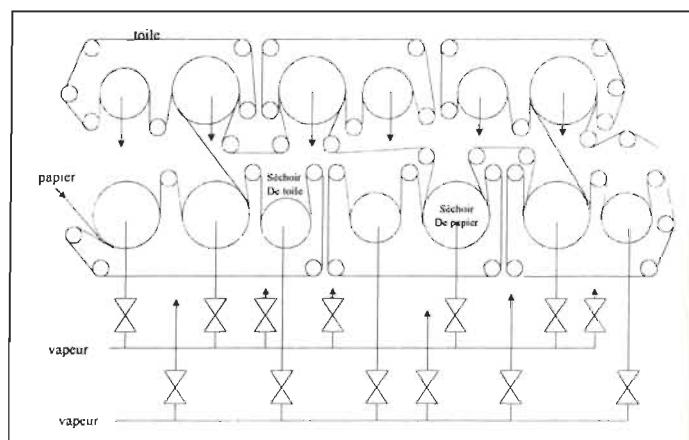


Figure 2.5 Schéma d'une sécherie multi-cylindrique

Il y a certaines hypothèses sur le modèle:

- dans le sens travers, les caractéristiques physiques, telles que la consistance, l'humidité, la température, le poids de base, sont uniformes;
- il n'y a pas de mouvement relatif entre la toile et le papier;
- tout le phénomène intérieur du papier est décrit par la pression de vapeur en surface du papier;
- on suppose que la température du papier est égale à la température en surface du cylindre.

L'eau qui est évaporée de la feuille humide à l'atmosphère peut être divisée en deux phases. Les gradients d'humidité et de pression de vapeur sont essentiellement causés par la diffusion de l'humidité, selon la formule suivante :

$$P_w = \begin{cases} P_s & \text{si } M_s \geq M_{sc} \\ = \{ P_s * e - k_f (1/M_s - 1/M_{sc}) \} & \text{si } M_s < M_{sc} \end{cases} \quad \text{Eq. 2.1}$$

où :

$P_w$  = la pression de vapeur à la surface de la feuille ;

$P_s$  = la pression de vapeur saturée à la température de la feuille ;

$M_{sc}$  = l'humidité critique de la feuille humide ;

$K_f$  = constant qui dépend de la caractéristique de la pâte.

Le modèle utilise aussi les formules du bilan de masse et d'énergie.

$$\text{Le bilan de masse : } (M_s(y + \Delta y) - M_s(y))B_w L \Delta y = -g L \Delta y \Delta t$$

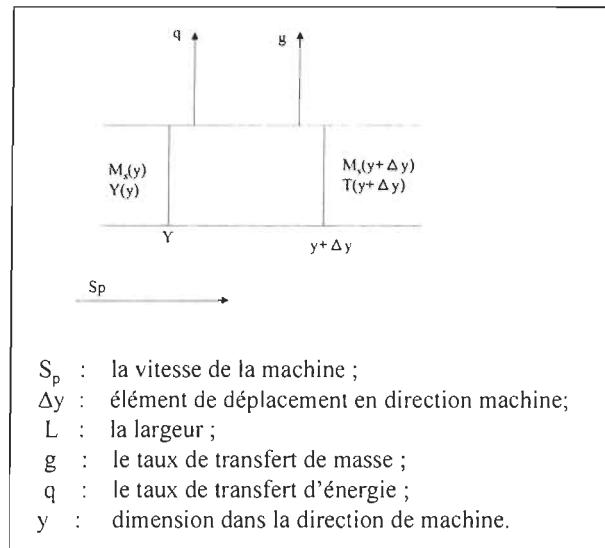
Éq. 2.2

$$\text{Le bilan d'énergie : } (T(y + \Delta y) - T(y))B_w(C_r + M_s(y)C_w)L \Delta y =$$

$$((T(y) - 273)g - q - gH_s)L \Delta y \Delta t$$

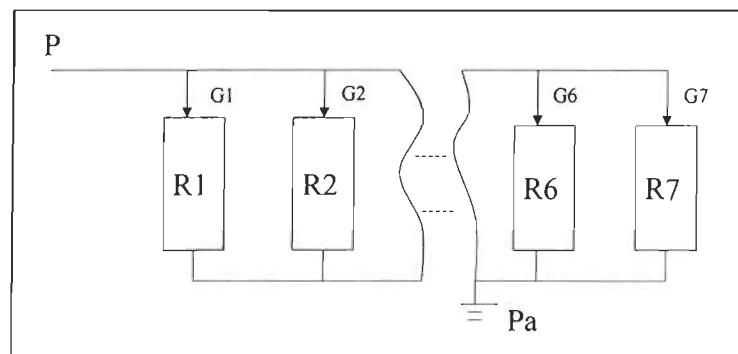
Éq. 2.3

La Figure 2.6 montre un élément de papier dans la section de la sécherie.



**Figure 2.6 L'élément de papier dans la section de la sécherie**

Le modèle de température en surface du cylindre utilise un réseau d'électricité pour simuler le système de l'alimentation de vapeur, figure 2.7.



**Figure 2.7 Le réseau d'électricité simulant la vapeur**

Si la capacité thermique du séchoir de “i” est  $M_{ci}$ , et l'énergie à l'entrée et à la sortie du séchoir sont  $Q_{ini}$  et  $Q_{outi}$ , le bilan thermique sera :

$$M_{ci}(dT_{di} / dt) = Q_{ini} - Q_{outi} \quad \text{Éq. 2.4}$$

$$Q_{ini} = G_i (H_s - H_w) \quad \text{Éq. 2.5}$$

Où :

$G_i$  = taux de la vapeur;

$H_s$  = enthalpie de la vapeur;

$H_w$  = enthalpie du condensât;

$P_a$  = la pression partielle de la vapeur dans l'atmosphère.

$$Q_{outi} = \beta [(C_f + M_{sini}C_w)(T_{outi} - T_{ini}) + (M_{sini} - M_{souti})(H_e - C_w T_{outi})] B_w S_p L \quad \text{Éq. 2.6}$$

Où,

$H_e$  = l'enthalpie de la vapeur à la température de  $T_{outi}$  ;

$\beta$  = 1.23

$$G_i = Q_{outi} / (H_s - H_w) \quad \text{ou} \quad G_i = (P - P_a) / R_i \quad \text{Éq. 2.7}$$

Avec :

$R_i$  = la résistance du courant ;

$P_a$  = la pression de vapeur dans le séchoir.

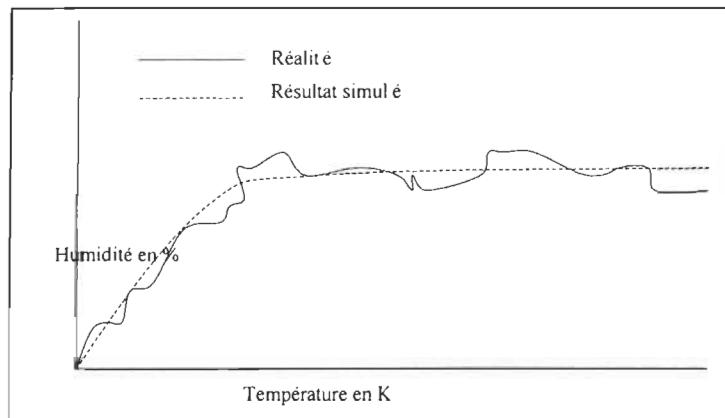
Pour prendre la température en surface du séchoir, le modèle cite beaucoup de formules de différentielles. Par exemple, la température en surface du séchoir sera :

$$\begin{aligned}
 T_d(k) &= \sum_{i=1}^7 \left( a_{mi} / \sum_{j=1}^7 a_{mj} J \right) T_{di}(k) \\
 &= \sum_{i=1}^7 a'_{mi} T_d(k)
 \end{aligned}
 \quad \text{Éq.2.8}$$

avec :  $(a'_{m1}, a'_{m2}, \dots, a'_{m7}) = (0.0809, 0.1061, 0.1211, 0.1721, 0.1625, 0.1781, 0.1832)$ . Le modèle dynamique du « séchoir équivalent » peut être obtenu par les étapes suivantes :

- 1) Premièrement, changer la pression de la vapeur; puis, obtenir  $\Delta P$ ; observer les résultats de  $T_{d1}$  et  $M_{s1}$ ; calculer  $T_{d2} - T_{d1}$  par les formules différentielles.
- 2) Calculer la réponse de la température du « séchoir équivalent » et le changement final  $\Delta T_d(\infty)$ . Le temps de réponse au point de 63.2% du changement final, possède un gain de  $\Delta T_d(\infty) / \Delta P$ .
- 3) Utiliser la même procédure pour calculer le gain de  $T_d$  et des autres variables. En effet, le poids de base et l'humidité ne peuvent pas être obtenus directement et exactement de la sécherie en ligne. Donc, des estimations des valeurs des variables sont requises. Un système de contrôleur à boucle de retour est utilisé pour mesurer les variables en ligne.

La figure 2.8 montre le résultat simulé d'humidité.

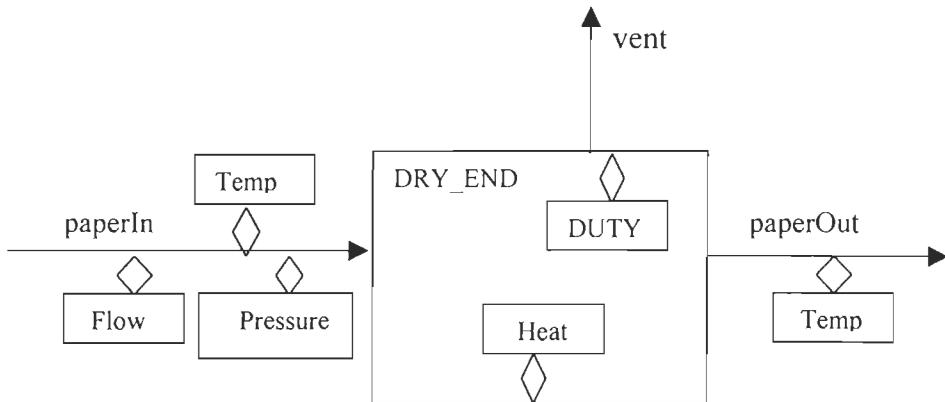


**Figure 2.8** Le résultat simulé de l'humidité

## 2.3 La sécherie dans Cadsim Plus

Au point de vue de la simulation, le programme Cadsim Plus<sup>11</sup> est un programme bien développé, il comporte presque toutes les parties de l'usine de pâtes et papiers, tel que raffineurs, blanchiment, presse, formation, mélangeur, etc.

La figure 2.9 présente le modèle de la sécherie dans Cadsim Plus.



**Figure 2.9 Modèle de la sécherie dans Cadsim Plus**

Avant d'actionner la simulation, on doit spécifier des variables sur les lignes de procédés telles que :

- TEMPERATURE – les températures des composantes, en °C;
- PRESSURE – les pressions des composantes, en kPa;
- MASS\_FLOW – les débits des courants, en kg / s ou en Tonne / jour ;
- CONSISTENCY – la consistance de la feuille humide, en %;

On peut mettre aussi la variable spécifiée :

- HEAT\_LOSS – chaleur perdue, en %.

Pendant la simulation, des paramètres calculés sont montrés, par exemple :

- DUTY – charge de chaleur, en kJ / s;

On peut aussi observer le débit de vapeur à la sortie sur la ligne de procédé "ventOut".

Les modules disponibles dans Cadsim Plus ne modélisent pas parfaitement toutes les parties d'équipements de la machine à papier et le logiciel est très limité au niveau de la modélisation de la sécherie. Durant la simulation, le modèle de sécherie exécute seulement des bilans de masse et d'énergie grossiers. Beaucoup de facteurs qui affectent la fonction de sécherie ne sont pas inclus. De plus, il possède un nombre limité de variables spécifiées ( free unit variable ) et variables calculées ( calculated unit variable). La plupart des paramètres de machine et les données du produit sont absentes. D'un point de vue pratique, il manque des paramètres nécessaires, des équations pratiques, des jugements logiques, un système d'alarme, les systèmes de contrôle, aussi que les deux autres sections essentielles d'une sécherie, i.e. ventilation et vapeur. Bref dans son état actuel il ne peut donner des résultats complets.

## 2. 4 Positionnement de la recherche

Les modèles présentés dans les sections précédentes sont modernes. Dans l'ensemble, ils possèdent les qualités suivantes.

- 1) Les hypothèses sont raisonnables;
- 2) Les logiciels sont bien développés;
- 3) Les modèles sont dynamiques;
- 4) Ils permettent d'observer directement les paramètres et résultats.

Mais ils possèdent des inconvénients, tels que: les modèles sont toujours incomplets; les dessins à l'écran sont souvent fixes; les calculs sont cachés.

Pratiquement, il y a considérablement de facteurs qui affectent la fonction de la sécherie, tels que l'état de la vapeur, l'état du condensat, les données de la ventilation, la forme de la hotte, les paramètres des cylindres ( par exemple, le diamètre, la longueur, l'épaisseur du cylindre séchoir, la matière des cylindres ), le type de feutre, la longueur

de la feuille, la tension du feutre, l'épaisseur du film d'air, le dépôt du condensât, le grammage de papier, etc. *Un modèle complet de la sécherie doit inclure des interactions entre tous ces paramètres.*

De plus, au cours de la production, dans les différentes sections de la sécherie, la plupart des données telles que l'humidité de la feuille, la température et la pression de vapeur, etc..., sont différentes. Parfois, les données d'une même section changent aussi. *Un modèle de la sécherie doit donc prendre cette dynamique en considération.*

Finalement, les modèles actuels ne sont pas très intelligents, en ce sens qu'ils effectuent les calculs sans trop se soucier de la pertinence des résultats. C'est l'utilisateur qui a pour tâche d'interpréter et de juger ces données. *Un modèle de la sécherie devrait comporter un minimum de connaissances au niveau de la validité des résultats qu'il renvoi.*

## Chapitre 3 - Notions de base dans une sécherie

### 3.1 Principes de transfert

Le séchage est un processus de dessiccation de la feuille de papier avec changement d'état de l'eau. Il doit intervenir lorsque les techniques d'essorage mécanique ont atteint leur limite économique.

Deux procédés fondamentaux sont impliqués au cours du séchage et qui amènent un mécanisme double de transfert :

- a) un échange de chaleur ou transfert d'énergie à la feuille de papier de façon à fournir la quantité de chaleur nécessaire au changement d'état de l'eau;
- b) un échange de matière ou transfert de masse sous forme de vapeur d'eau, du milieu donneur, la feuille de papier, au milieu récepteur, l'enceinte du séchoir.

La figure 3.1 montre ces deux transferts.

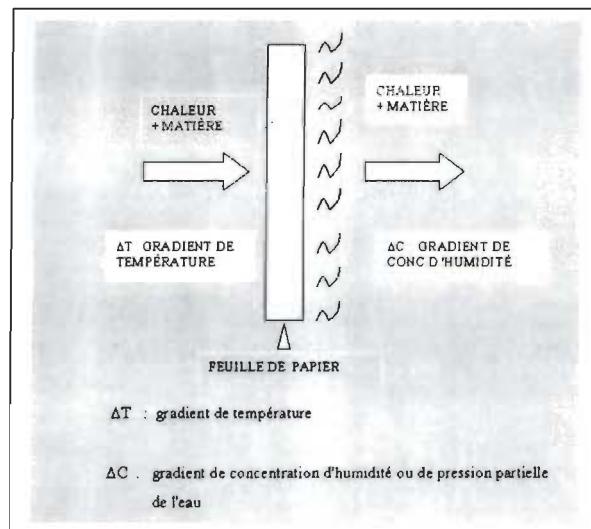


Figure 3.1 Les transferts dans la feuille de papier

Le transfert d'énergie de la vapeur à la feuille de papier se faisant chronologiquement le premier, nous pouvons classer les techniques de séchage en fonction des modes de transfert de l'énergie. Cela nous conduit à distinguer deux grandes classes :

(1) Le transfert de la chaleur fait à l'extérieur de la feuille. Il se compose en trois groupes :

a) transfert de chaleur par contact;

c'est le mode de transfert mis en œuvre sur les sécheries classiques multi- ou mono-cylindriques. Le chauffage de la surface dans la sécherie traditionnelle est assuré par la condensation de vapeur saturée qui présente les avantages suivants:

- isotherme;
- capacité spécifique de transport de chaleur élevée (chaleur latente de condensation de l'ordre de 2000kJ / kg );
- coefficient de transfert élevé du fait de la condensation;
- possibilité de produire dans une turbine d'amont de l'énergie motrice avec un très bon rendement thermodynamique du fait que la source froide qui est la sécherie emploie utilement la chaleur restante.

b) transfert de chaleur par convection;

Il faut distinguer la convection sur la surface externe de la feuille et la convection interne par circulation d'air à travers la feuille.

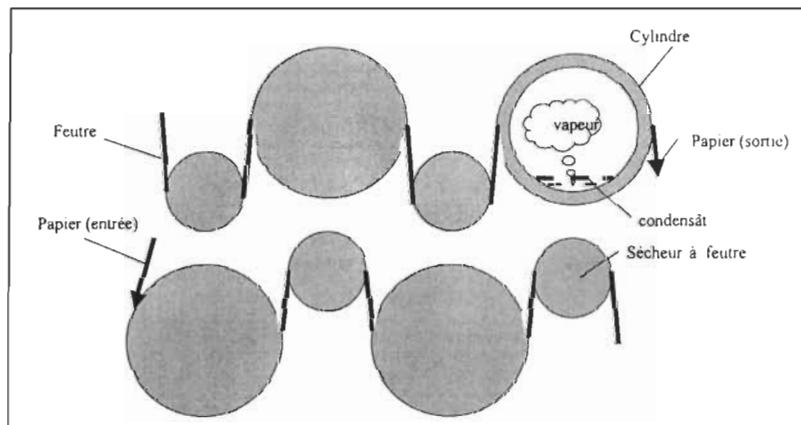
c) transfert de chaleur par rayonnement.

(2) Le transfert de chaleur fait au sein de la feuille. C'est à dire que la convection sur la

surface interne de la feuille, lorsque la porosité le permet, conduit à des taux d'évaporation élevés lorsque le front d'évaporation se situe à l'intérieur du papier. Cependant, pour les derniers points d'humidité à extraire, son efficacité sera limitée par la diffusion calorifique et massique dans la paroi des fibres<sup>32</sup>.

### 3.2 Cylindres multiples

Dans une sécherie ( Figure 3.2 ) la chaleur se transmet d'une région à haute température vers les régions à basse température. Le taux de transfert de chaleur de la vapeur à l'intérieur du cylindre vers le papier à l'extérieur dépend de la différence de température entre la vapeur et le papier et des diverses résistances thermiques qui réduisent l'efficacité du transfert.



**Figure 3.2**      **Transfert de chaleur dans un cylindre**

À partir d'une certaine siccité ( environ 40 à 50% ), seule la chaleur permet, par évaporation, l'élimination de l'eau encore contenue dans la feuille. On peut envisager plusieurs modes de séchage, mais le plus courant est celui par séchage sur cylindres en métal. Ces cylindres sont en fonte dure ou en acier inoxydable, usinés intérieurement et extérieurement, et chauffés à la vapeur. La feuille est pressée contre la surface du cylindre par un feutre. Ce dernier se charge en humidité et est à son tour séché sur un cylindre sèche – feutre.

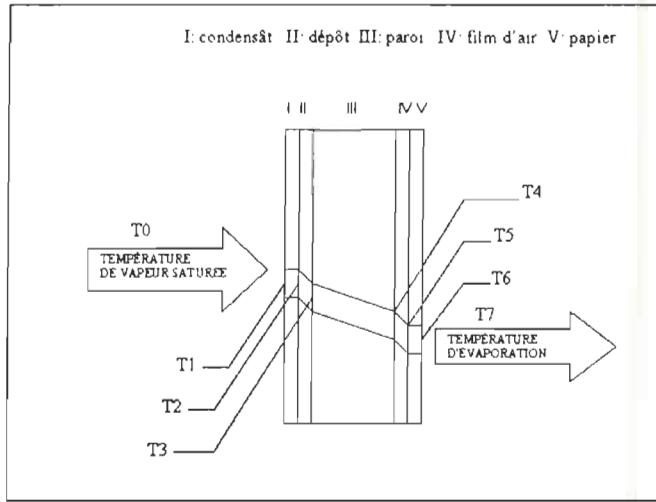
Les cylindres sécheurs sont normalement groupés en batteries, chacune possédant son feutre et son sèche – feutre. ( voir la figure 3.2 ). Les batteries sont généralement disposées sur deux étages: étage supérieur et étage inférieur. Dans la sécherie, la feuille passe successivement d'un cylindre inférieur à un cylindre supérieur, puis inférieur, puis supérieur, etc. En dehors du contact avec les cylindres pendant lequel elle est pressée par le feutre, la feuille est à l'air libre. Des racles sont parfois disposées sur les cylindres pour les maintenir propres et empêcher le feutre de s'enrouler sur eux au moment des casses.

Les sécheries à cylindres sont la plupart du temps ventilées par soufflage d'air chaud soit sous la sécherie, soit directement sur la feuille ou sur les feutres pour empêcher la condensation de la vapeur dans le système. Les buées sont collectées par une hotte qui enveloppe plus ou moins l'ensemble de la sécherie.

On alimente normalement chaque batterie de sécheurs en série. Les derniers qui doivent être les plus chauds reçoivent la vapeur vive qui passe ensuite successivement dans les autres batteries. La vapeur va donc en sens inverse de la marche du papier. Outre l'économie de vapeur, cela permet une montée progressive indispensable de la température dans la sécherie<sup>33</sup>.

### 3.3 Résistance thermique

L'échange thermique entre le cylindre et le papier est montré sur la Figure 3.3. On sait que la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau contenue dans la feuille de papier va être transmise par conduction et convection et un peu par rayonnement de l'intérieur du cylindre sécheur à la feuille de papier. Entre la vapeur et la feuille, il y a des résistances thermiques, telles que la résistance du condensat, du dépôt, de la paroi du cylindre, du film d'air entre le cylindre et la feuille du papier, etc.



**Figure 3.3** Échange thermique entre le cylindre et le papier

La quantité d'eau évaporée peut être calculée par la formule:

$$R_w = q / \lambda \quad \text{Eq. 3.1}$$

$R_w$  = le taux d'évaporation, en  $\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$

$q$  = la densité de flux thermique, en  $\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$

$\lambda$  = la chaleur latente d'évaporation, en  $\text{kJ} / \text{kg}$

" $q$ " peut être calculé, avec la formule:

$$q = U( T_{\text{vapeur}} - T_{\text{feuille}} ) \quad \text{Eq. 3.2}$$

On peut aussi calculer le coefficient global d'échange thermique :

$$1/U = 1/h_v + X_s/K_s + X_c/K_c + 1/h_a + X_p/K_p \quad \text{Eq. 3.3}$$

$T_{\text{vapeur}}$  = la température de la vapeur, en  $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{feuille}}$  = la température de la feuille, en  $^{\circ}\text{C}$

$U$  = le coefficient global d'échange thermique, en  $\text{kJ} / \text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$

$h_v, h_a$  = les coefficients de transfert de chaleur respectivement de la vapeur à la surface interne du cylindre sécheur et cylindre au papier, en  $\text{kJ} / \text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$

$X_s, X_c, X_p$  = les épaisseurs du dépôt, du cylindre et du papier en m

$K_s, K_c, K_p$  = les conductibilités thermiques respectivement du dépôt, du cylindre et du papier, en  $\text{kJ} / \text{h} \cdot \text{m} \cdot {}^\circ\text{C}$

Parmi les facteurs qui influencent la résistance thermique, en note:

1) L'épaisseur du cylindre — le coefficient de transmission de chaleur peut augmenter sensiblement si l'épaisseur du métal est réduite. Mais ce paramètre est naturellement dicté par l'aspect mécanique du cylindre sécheur. Une réduction de l'épaisseur du métal entraîne une diminution de la pression de la vapeur permise à l'intérieur du cylindre, ce qui a pour effet de réduire la quantité de chaleur disponible selon la formule (3.2).

2) Le matériaux du cylindre.

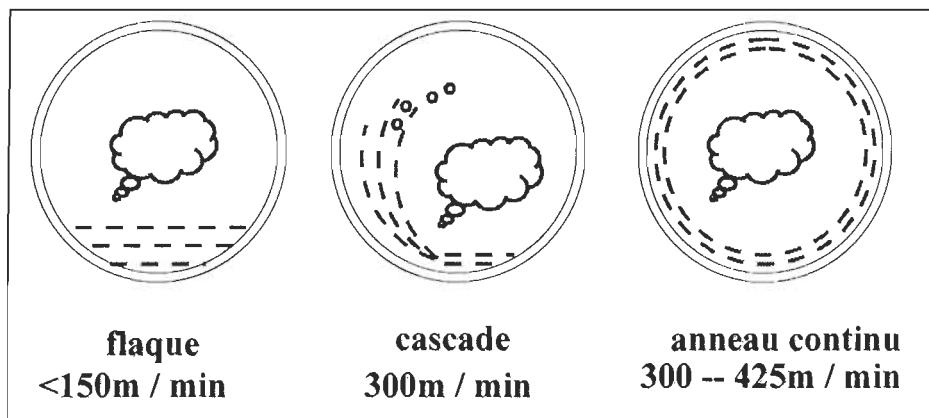
3) La couche d'air à la surface du cylindre — l'efficacité de transmission de la chaleur à travers la couche d'air entre le cylindre et le papier dépend fortement du degré de contact entre les deux. Le feutre a pour but d'appliquer intimement la feuille contre le corps chauffant pour permettre une bonne transmission de la chaleur. En augmentant la tension du feutre, on décroît l'épaisseur de la couche d'air, ce qui réduit sensiblement la résistance à la transmission de la chaleur, et vice versa. Par exemple, si l'épaisseur du film d'air passe de 0.0015 Pouce à 0.005 Pouce dans la formule (3.3), toutes les autres données restant constantes, le coefficient  $U$  décroît de 64 à 31 BTU / hr.  $\text{pi}^3 {}^\circ\text{F}$ . Ceci représente une baisse de transmission de la chaleur d'environ 50%. Une tension maximale du feutre est donc une nécessité pour avoir le meilleur rendement possible.

- 4) Le film du condensât — la distribution du condensât à l'intérieur du cylindre sécheur

prend différentes formes physiques dépendant de la vitesse de la machine et de la quantité de condensât présent. Au point de vue pratique le plus important c'est que la quantité de condensât peut apporter une variation de la vitesse de la machine et affecter la transmission de la chaleur.

### 3.4 État du condensât

Au moment où le cylindre commence à tourner et que sa vitesse augmente, le condensât passe par trois stades, la flaque, la cascade et l'anneau d'eau. Lorsque la vitesse augmente, le condensât remonte la paroi du cylindre et forme généralement une pellicule uniforme. L'anneau d'eau se forme habituellement entre 300 et 425 m / min, selon le diamètre du séchoir. La Figure 3.4 illustre la relation entre l'état du condensât et la vitesse de la machine<sup>34</sup>.



**Figure 3.4** Relation entre l'état du condensât et la vitesse de la machine

En pratique, bien que l'état du condensât soit lié à la vitesse de la machine et au diamètre du cylindre, lesquels affectent l'épaisseur du condensât et l'échange thermique, on utilise toujours un siphon pour drainer et contrôler l'épaisseur du condensât.

### 3. 5 Barres et siphon

Le transfert de chaleur à travers la couche de condensât est le point sur lequel la plupart des recherches des dernières années ont porté. Cela a mené au développement :

- de siphons à espacement plus faible;
- de barres de turbulence;
- de cylindres nervurés;
- de cylindres cannelés.

Les parties principales pour l'évacuation du condensât du séchoir sont le siphon et son joint d'étanchéité de vapeur ( Figure 3.5 ). La vapeur est simplement introduite par une buse dans le joint de vapeur, directement dans le cylindre. Elle se condense et forme le condensât qui est alors siphonné avec la purge de vapeur, puis retourné au système de production de vapeur. Les joints modernes de vapeur sous pression ont généralement des rondelles d'étanchéité de carbone qui sont auto-lubrifiantes, auto-ajustables pour différentes pressions de vapeur. L'étanchéité est même assurée en marche sous vide.

Dans les cylindres modernes, on utilise aussi les barres<sup>35</sup> ( Figure 3.6 ) pour contrôler l'état de turbulence du condensât afin d'augmenter la capacité de séchage. En effet, on sait qu'à des vitesses supérieures à 300 m / min, le condensât à l'intérieur des séchoirs forme généralement un anneau d'eau<sup>36,37</sup>. Cet anneau crée une résistance au transfert de chaleur de la vapeur vers la paroi du séchoir.

Des transferts de chaleur plus grands peuvent être atteints par l'augmentation du niveau de turbulence dans la couche de condensât. C'est le rôle des barres de turbulence<sup>38</sup>.

De manière générale, les barres de turbulence font partie de la catégorie des générateurs de turbulence. Plus précisément, ce sont des ensembles de barres fixées à la surface interne du séchoir, avec un espacement choisi pour générer de la turbulence. En réalité, cette turbulence est causée par l'effet de résonance occasionné par les mouvements de va

et vient du condensat entre les barres. L'espace entre les barres " S " qui vont générer cette turbulence dans la couche de condensat est indépendant de la vitesse du séchoir, et se calcule avec l'équation suivante dans laquelle " R " est le rayon du séchoir et le " h " est l'épaisseur de l'anneau de condensat<sup>39</sup> :

$$S = \pi (h R)^{1/2}$$

Éq. 3.4

Comme il est très difficile de juger exactement de l'état du condensat par la formule 3.4, on prend toujours les valeurs expérimentales de l'épaisseur du condensat.

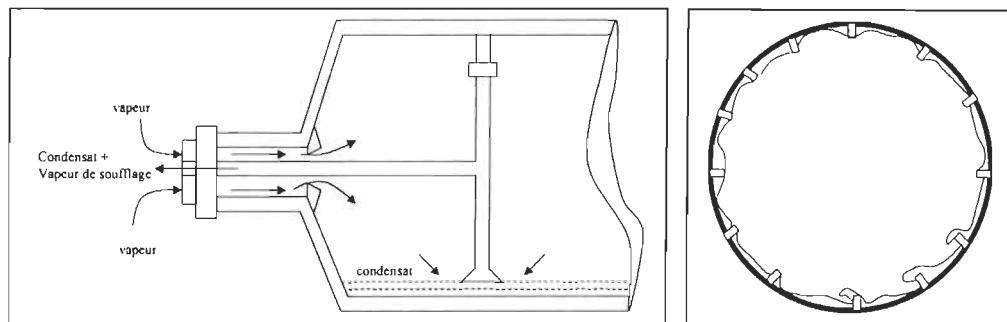


Figure 3.5 Vapeur du siphon

Figure 3.6 Barres

### 3.6 Le système de vapeur

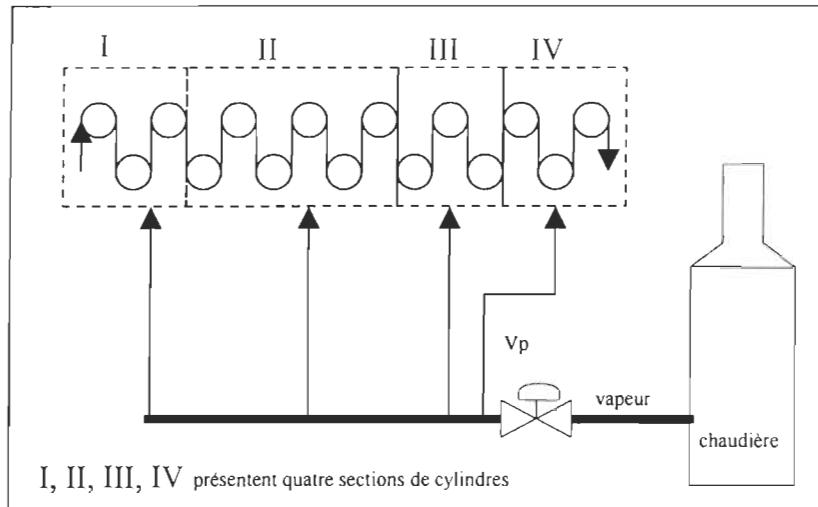
Dans une sécherie multi-cylindrique, la plupart de la vapeur est utilisée pour chauffer le papier humide afin d'évaporer l'eau dans le papier, et le reste de la vapeur est utilisé par le système de ventilation<sup>40,41</sup>.

Le système de vapeur typique est toujours composé de trois étapes. En pratique, pour le journal, les pressions sont entre 200 et 300 kPa. Pour les trois sections, les valeurs typiques sont :

- à la sortie de la section de presse : -20 à 50 kPa;
- à la section intermédiaire : 50 à 100 kPa;

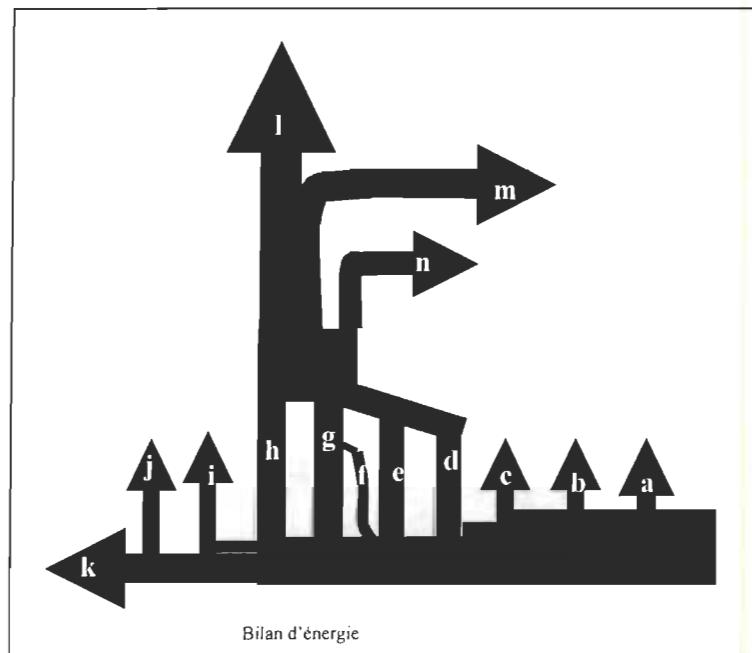
- à la section essentielle : 100 à 250 kPa<sup>42</sup>.

La figure 3.7 montre le système de vapeur dans une sécherie multi-cylindrique.



**Figure 3.7 Système de vapeur dans une sécherie multi-cylindrique**

Le condensât provient de la vapeur. Le reste de la vapeur qui ne change pas de phase sera utilisée par le système de ventilation ou par d'autres équipements. La figure 3.8 présente le bilan d'énergie de la vapeur.



**Figure 3.8 Bilan d'énergie de la vapeur**

Où :

- a – l'énergie perdue par rayonnement et construction;
- b – ventilation naturelle;
- c – évacuation de la partie humide;
- d – chauffer l'air de l'atelier extérieur à l'intérieur;
- e – chaleur utilisée pour évaporer l'eau dans la toile humide;
- f – chaleur utilisée pour chauffer l'air dans le système Grewin<sup>14</sup>;
- g – chauffer l'air de ventilation à la température intérieure de la hotte;
- h – chaleur utilisée pour évaporer l'eau dans le papier humide;
- i – diverse chaleur perdue;
- j – chaleur du condensât retourné à la chaudière;
- k – chaleur pour le système de condenseur;
- l – évacuation;
- m – recirculation par le système de l'eau chaude;
- n – recirculation par le système de l'air économique.

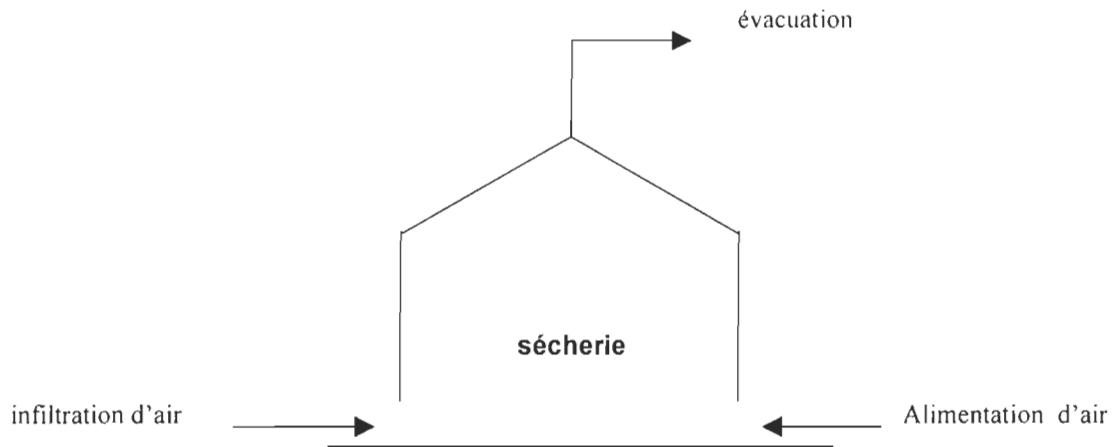
### 3.7 La hotte

La ventilation contrôle l'efficacité d'une sécherie ainsi que le taux d'évaporation en abaissant la pression partielle de l'eau au voisinage de la feuille. En général, il y a deux grandes formes de hotte, la forme fermée et la forme ouverte. Le rôle premier d'un système de hotte de machine à papier est de capter et d'enlever la vapeur d'eau dégagée dans la sécherie de la machine à papier. D'autres considérations essentielles sont :

- a) la nécessité d'obtenir des conditions de l'air afin d'éviter la condensation sur la machinerie et dans les murs de la bâtisse.
- b) des conditions d'air confortables pour le travail.

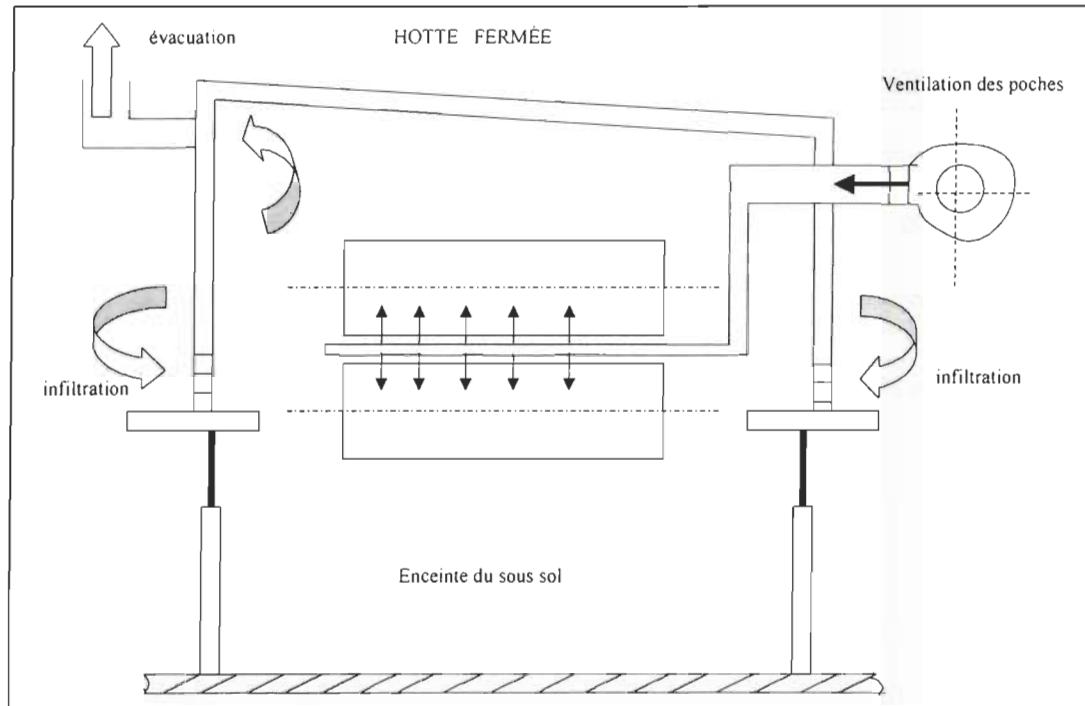
La montée en flèche des coûts d'énergie, combinée aux efforts actuels de l'industrie du papier pour réduire ses coûts de production ont amené le personnel de l'ingénierie à

réévaluer l'opération et la conception de la hotte<sup>43,44</sup>. La figure 3.9 montre la forme de hotte.

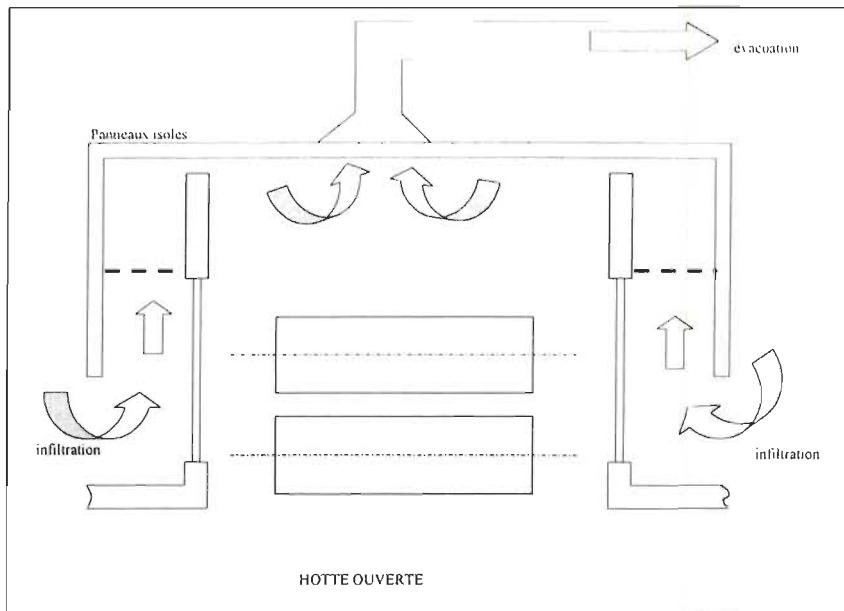


**Figure 3.9 Forme de la hotte**

Les Figures 3.10 et 3.11 présentent plus complètement la hotte fermée et la hotte ouverte. Presque toutes les usines modernes sont équipées de hottes fermées.



**Figure 3.10 La hotte fermée**



**Figure 3.11      La hotte ouverte**

### 3. 8   Système de ventilation

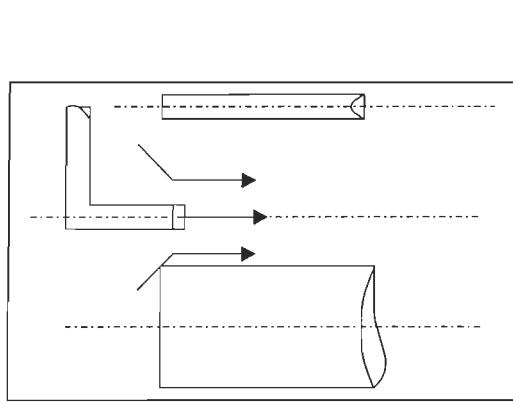
Comme on l'a vu auparavant, le but principal d'une sécherie est d'éliminer l'eau de la feuille jusqu'à ce que celle – ci atteigne une siccité qui réponde aux exigences de son emploi. Pour à peu près tous les genres de papiers, la teneur en eau doit être inférieure à environ 10%, mais doit rester assez élevée afin de préserver ses qualités physiques. Un papier surchauffé est cassant, affaibli et raide. Par exemple, il est désirable d'avoir une siccité d'environ 6 à 8% pour le papier journal. A plus basse teneur, le papier est plus sujet à des casses dans l'imprimerie.

Malgré la nécessité de prévoir une régulation en fonction de l'humidité du papier, il est également vital de sécher la feuille d'une façon uniforme. Une feuille mal séchée affecte sérieusement non seulement l'apprêtage et les autres traitements de finition, mais aussi les qualités qui correspondent aux exigences définies par les normes.

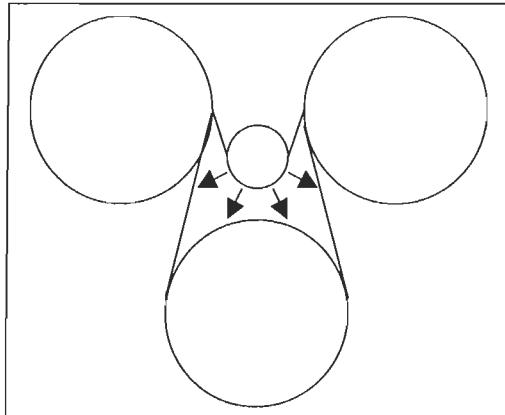
Pour les sécheries modernes, il y a quatre principaux types de systèmes VP( ventilation de poche) :

- i) les système Grewin
- ii) les système par rouleau de ventilation
- iii) par caisse de ventilation
- iv) par conduits perforés de ventilation

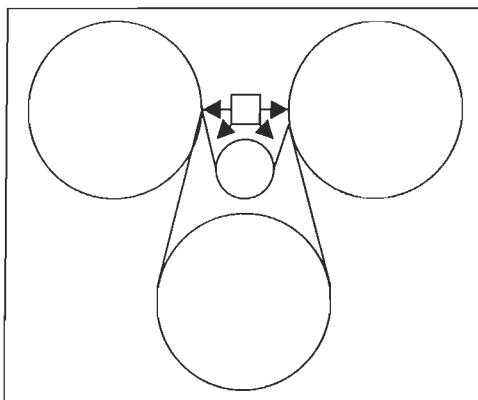
Sauf pour les systèmes Grewin, tous les types peuvent être conçus pour corriger le profil d'humidité.



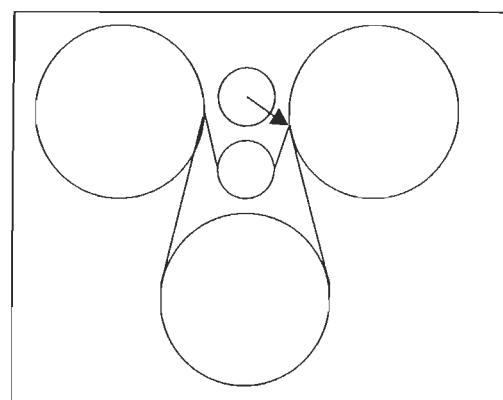
**Figure 3.12** système Grewin



**Figure 3.13** Rouleau de ventilation



**Figure 3.14** Caisse de ventilation



**Figure 3.15** conduit perforé de ventilation

Les systèmes Grewin fonctionnent relativement bien sur les machines où l'accumulation d'humidité dans l'air injecté qui traverse la poche n'est pas trop importante. Avec de tels systèmes, des augmentations de production de l'ordre de 5% ont été rapportées.

Il existe plusieurs sortes de rouleaux de ventilation. Un rouleau régulier a une zone de soufflage pleine largeur. Un rouleau préférentiel est spécialement conçu pour contrôler

l'approvisionnement d'air aux bordures de la feuille. Un rouleau profiteur possède un certain nombre de zones qui peuvent être contrôlées individuellement pour ajuster le profil. Des augmentations de production de l'ordre de 10% à 30% ont été rapportées.

Les systèmes par caisses de ventilation fournissent de l'air sous pression en arrière des deux transferts de la toile. Cet air est distribué à travers les côtés perforés de la caisse vers ces zones. On rapporte des augmentations de production pouvant aller jusqu'à 20% et une correction du profil de 1% à 2% avec ces caisses.

Les systèmes par conduits perforés de ventilation sont aussi localisés à l'extérieur de la poche, au-dessus des rouleaux de la toile. Ils fournissent un jet d'air à la zone de vacuum seulement. Les conduits perforés de ventilation permettraient des augmentations de production de l'ordre de 10% à 20% et une correction du profil de 1% à 2%.

Les différents modes de séchage utilisables sont assez limités. Le mode le plus courant a été l'emploi du cylindre sécheur chauffé à la vapeur. Malgré l'augmentation du rendement thermique déjà réalisé, il devient de plus en plus difficile d'atteindre un profil transversal d'humidité uniforme, surtout sur les machines géantes à haute vitesse. La chaleur est fournie par des gaz de combustion à une température de 600 à 800 °F, dirigés sur la surface de la feuille par une série de buses et à une vitesse très élevée.

### 3. 9 Autres notions dans une sécherie

En pratique, la vitesse de la machine et la température de la feuille doivent être bien contrôlées. Tout cela affecte la qualité du papier<sup>37,45,46,47</sup>.

Le papier dans une sécherie conventionnelle possède toujours une contraction dans le sens CD ( le sens travers de la machine ) et MD ( le sens machine ), voir la figure 3.16. Cela affecte les propriétés du papier, telles que la rigidité, la résistance et l'homogénéité.

Pour améliorer la qualité du papier, on essaie beaucoup de moyens dans les laboratoires pour restreindre la contraction du papier<sup>48</sup>.

Sur la machine à papier, la feuille est en tension dans le sens machine tout le long du processus de fabrication et la contraction effective est contrôlée par le différentiel de vitesse entre les rouleaux.

Tous les cylindres dans un groupe sont conduits à la même vitesse par les engrenages ou contrôlés directement par les conducteurs électriques. Une petite différence de vitesse ( $\approx 0.2\%$ ) est maintenue entre la section de presse et la première section de sécherie.

Le taux d'évaporation sur la section de la sécherie est contrôlé pour ajuster la pression de la vapeur dans chaque section. La pression représentative pour une machine de journal est 1.25 bar sur les 10 premiers cylindres ( $\approx 50$  à  $90$  °C de température en surface), 2.1 bar ( $\geq 107$  °C) sur les 6 autres cylindres suivantes, 2.75 ( $\approx 113$  °C) sur les 10 prochains cylindres, et 3 bar ( $\approx 110$  à  $127$  °C) sur les 16 derniers cylindres. La valeur de pression de la vapeur est un peu augmentée (de 4 à 5 bar) dans les premiers cylindres, cela dépend du grade de papier, de la vitesse de machine, etc. Finalement la pression de vapeur est augmentée (entre 3 et 10 bar) dans la dernière section de sécherie. Pratiquement, le taux d'évaporation de la sécherie est toujours de 15 à 30 kg/hr.m<sup>2</sup>, où la surface réfère à toute la surface superficielle des cylindres, pas seulement la surface de contact<sup>49,50</sup>.

Afin de produire uniformément l'humidité du profil de CD final, parfois certaines sections de cylindres sont équipées d'une série d'équipements qui font jaillir directement l'eau fine sur la toile.

Pour avoir une bonne valeur de taux d'évaporation, dans la dernière section de la sécherie Gas-fired, la température en surface du cylindre peut atteindre une valeur de 200 °C.

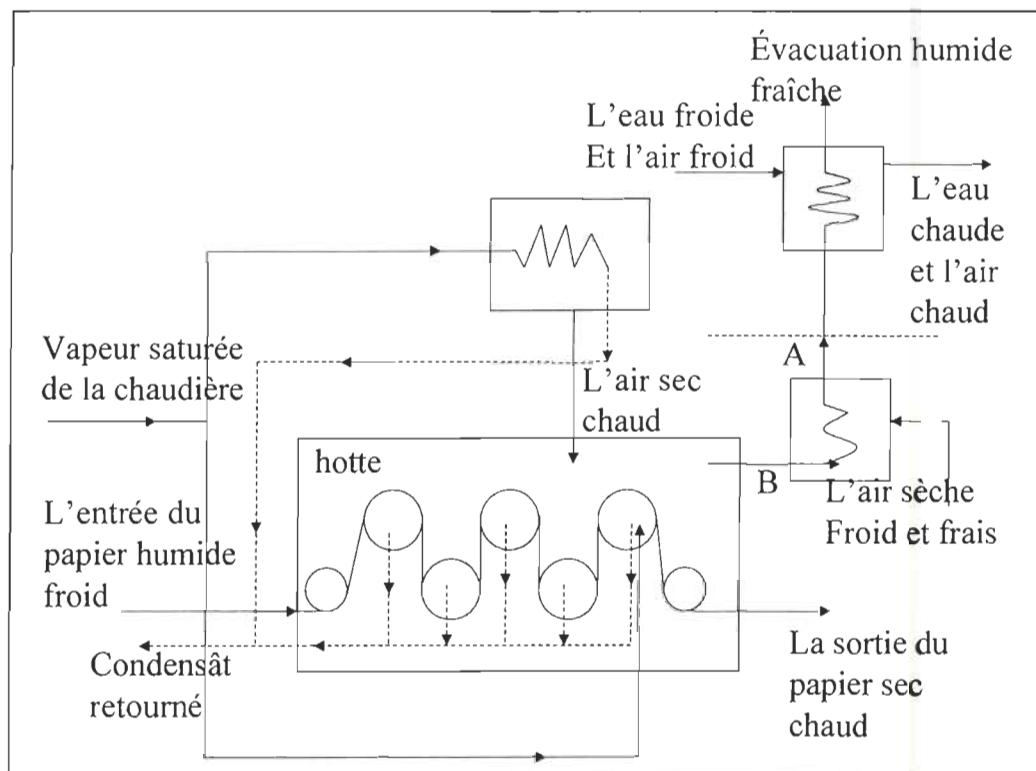
Dans une sécherie moderne, on utilise près de 2965 kJ de chaleur pour évaporer 1 kg eau (on utilise environ 1.4 kg de vapeur pour évaporer 1 kg d'eau dans le papier humide), dont près de 2500kJ sont utilisés pour chauffer la toile humide et évaporer l'eau, et 420kJ pour chauffer l'air.

Presque toute la chaleur est retenue par l'évacuation humide au point B ( voir la figure 3.16 ). Une partie de l'air évacuée peut circuler mais la plupart de l'air passe par l'échangeur de chaleur.

Si on n'utilise pas l'équipement de chaleur récupérée, la consommation de chaleur augmentera de 10 – 15%.

Sur la figure 3.16, l'air évacué sort de la sécherie au point A, diminuant le niveau de chaleur récupérée, mais il ne s'agit pas du séchage.

Dans les systèmes à air chaud et à eau chaude, environ 80% de la chaleur utilisée pour le séchage peut être récupérée, puis utilisée dans le système de séchage ou par d'autres parties de procédés dans l'usine.



**Figure 3.16** Le système de vapeur

Dans un modèle mathématique de la section de séchage pour un carton plat de  $127\text{g} / \text{m}^2$  à une vitesse de  $900\text{m} / \text{min}$ , le séchage calculé sur la section montre une augmentation rapide des cylindres No. 1 à 4 ( les valeurs sont montrées dans la table suivante ).

Tableau 3.1

Les données dans chaque section de sécherie

Cylindre	la température dans cylindre °C	taux d 'évaporation kg / m <sup>2</sup> .hr	humidité %
4-10	146	const 25&50	55 à 51
11-21	181	const 36&70	50 à 39
22-40	181	tomber à 20&35	37 à 5

Les sécheries de Yankee et MG peuvent posséder un taux d'évaporation de 150 à 200 kg / hr.m<sup>2</sup>, beaucoup plus élevé que le séchage par cylindre conventionnel. Le diamètre du cylindre Yankee et MG sont toujours entre 2.5 et 6.7 m, et la vitesse de la machine peut atteindre 2100m/min. La figure 3.17 présente les systèmes Yankee et MG. [B] : brûleur. [F] : aliment.

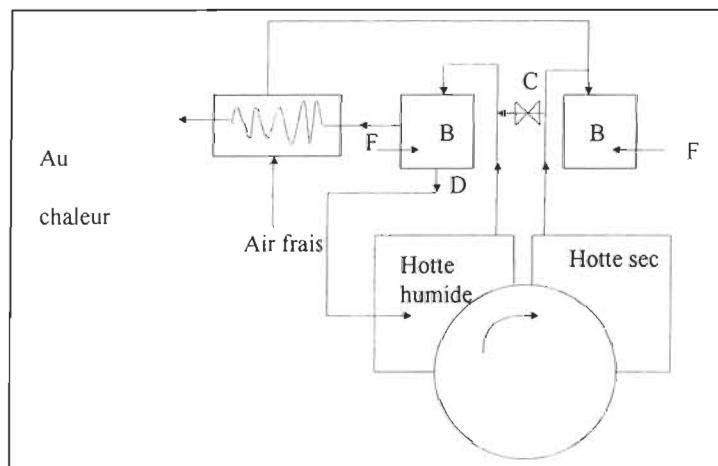


Figure 3.17 Le système de vapeur dans la sécherie Yankee

La toile humide est pressée par le Yankee, l'humidité contenue est entre 60% et 80%. Les taux d'évaporation typiques sont entre 200 et 500 kg / hr-m<sup>2</sup> et des papiers plus lourds sont produits<sup>51</sup>.

## Chapitre 4 - nouveau modèle de la sécherie

### 4.1 Introduction au nouveau modèle

Dans l'usine de pâtes et papiers, une sécherie est composée de trois sections essentielles : le système de la production du papier, le système de la ventilation, et le système de la vapeur. Pendant la production, ces trois sections interagissent. Par exemple, les paramètres de ventilation et vapeur sont ajustés à partir de la section de la production du papier.

Pour simuler la réalité, le modèle se compose aussi des trois sections. De plus, les cylindres du modèle peuvent être séparés en plusieurs sections pour le besoin de la recherche. Des paramètres différents peuvent être associés à chaque section de cylindres.

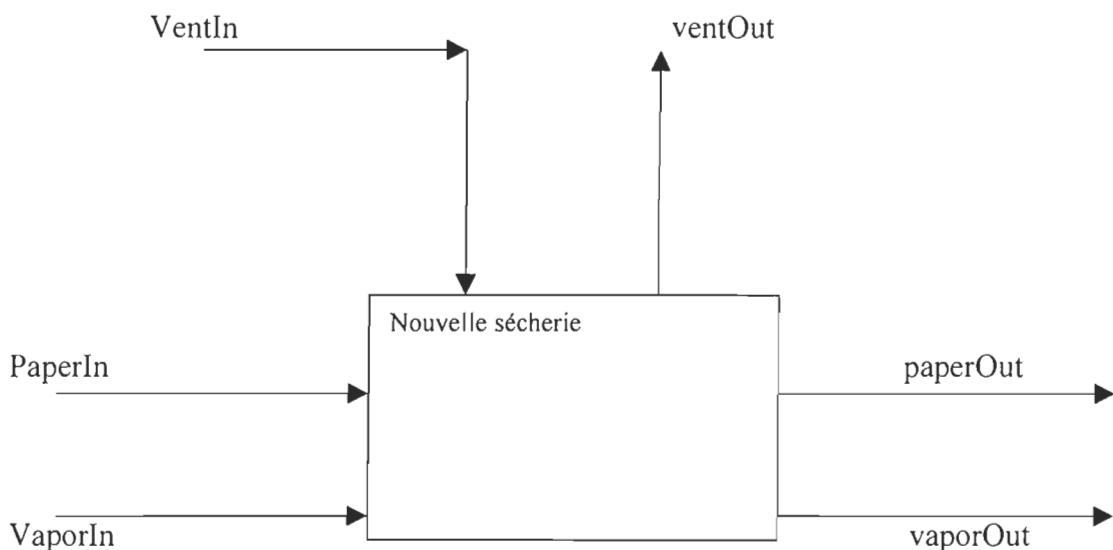
D'abord, le modèle dynamique proposé est bâti sur des hypothèses<sup>52</sup> :

- dans la direction de CD, des caractéristiques physiques, comme la consistance, l'humidité, la température, le poids de base, sont uniformes.
- Il n'y a pas de mouvement relatif entre la toile et le papier.
- Tout le phénomène intérieur du papier est décrit par la pression de vapeur sur la surface du papier.
- La température du papier est égale à la température de la surface du cylindre.
- Les diamètres du cylindre dans chaque section sont les mêmes.
- Le cylindre est toujours en fonte, en bronze ou en acier inoxydable.

Avec ces hypothèses, on utilise la plate-forme de Cadsim Plus pour réaliser la simulation.

Cadsim Plus permet de créer de nouveaux modules en programmant des "DLM", où "Dynamically Linked Modules". Un DLM est donc un bout de programme écrit en C++ sur la plate-forme Borland. Une fois compilé, un exécutable est généré. Ce dernier peut ensuite être reconnu comme un nouveau module lors de l'exécution du programme général de Cadsim Plus.

Après avoir dessiné le module représentant la sécherie, la simulation peut être actionnée. D'abord on met des données initiales dans le modèle, ensuite, le modèle s'exécute. Pendant la simulation, la première étape est de juger si les données d'entrées sont raisonnables. Si elles ne le sont pas, le modèle va donner une alarme. Le modèle attend jusqu'à ce que les données soient raisonnables, puis le processus de simulation commence. Après l'acceptation des données, le modèle calculera les résultats tels que les points de rosée, les températures, la quantité de vapeur, la quantité de ventilation, le taux d'évaporation, la vitesse de la machine, etc. Finalement, les résultats sont présentés dynamiquement sur l'écran d'ordinateur. La figure suivante présente le nouveau modèle de sécherie.



**Figure 4.1** Nouveau modèle de la sécherie

Où :

PaperIn = le papier humide ( 40 – 60 % ) à l'entrée de la sécherie;

PaperOut = le papier sec ( 2 – 10 % ) à la sortie de la sécherie;

VaporIn = la vapeur saturée ou surchauffée à l'entrée du système de la vapeur;

VaporOut = la vapeur et le condensât à la sortie du système de vapeur;

VentIn = l'air de ventilation ( c'est le mélange de l'air d'alimentation et de l'air d'infiltration ) à l'entrée du système de ventilation;

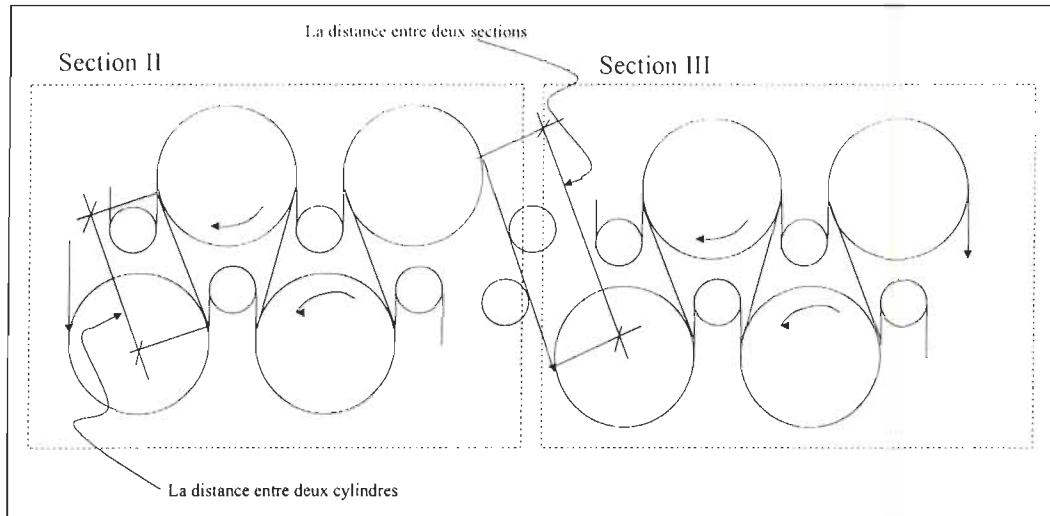
VentOut = l'air d'évacuation à la sortie du système de ventilation.

#### 4. 2 Les variables du nouveau modèle

Par rapport à l'original ( voir section 2.3 ), notre modèle comporte un plus grand nombre de variables spécifiées ( free unit variables ), voir Annexe I.

À noter que dans le modèle les cylindres peuvent être divisés en plusieurs sections. Le nombre maximal de section est 6 et quand on choisit toutes les six sections, le nombre maximal des variables spécifiées est 46. Si on sélectionne un nombre de section moindre, le nombre des variables spécifiées est moindre également. Quand on sélectionne une seule section et avec un seul cylindre, par exemple, la sécherie de type Yankee, alors, le nombre de variables spécifiées est 22.

Pendant la simulation, il y a une trentaine de résultats représentés par les variables calculées ( calculated unit variables ), voir Annexe II. Le nouveau modèle considère aussi les distances entre les cylindres et les sections, comme la figure 4.2 présente.

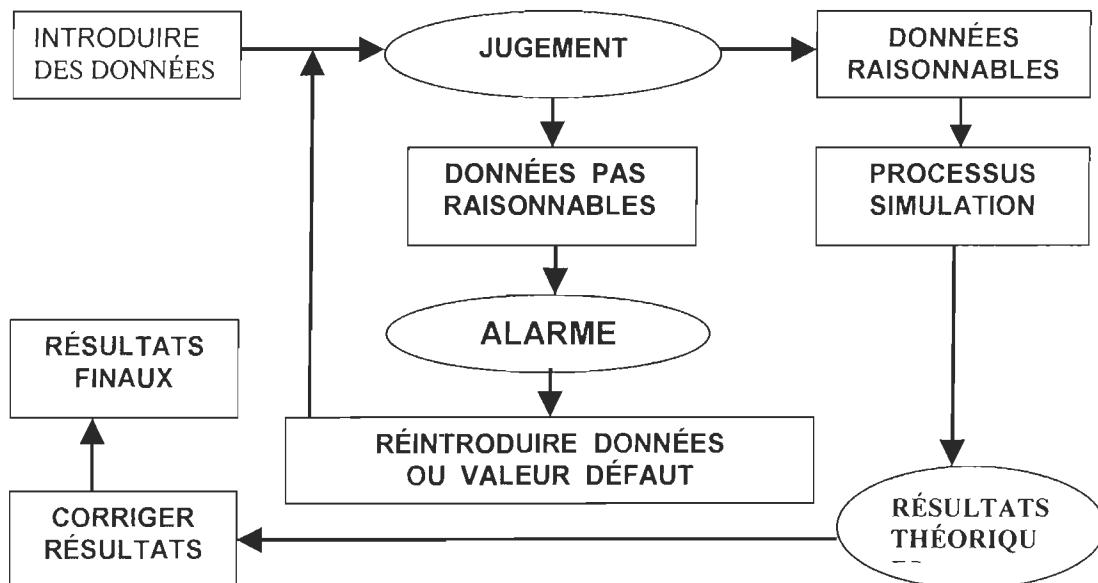


**Figure 4.2 Les distances entre les cylindres et les sections**

On voit que dans notre modèle les variables spécifiées et les variables calculées sont beaucoup plus nombreuses que dans le modèle de Cadsim Plus.

#### 4. 3 Construction du modèle.

La figure 4.3 montre le schéma du modèle.



**Figure 4.3 Schéma du modèle**

### 4.3.1 Dessiner un modèle de la sécherie

Premièrement, on dessine un modèle de la sécherie sur écran d'ordinateur. La sécherie possède trois entrées (paperIn, ventIn et vaporIn) et trois sorties (paperOut, ventOut et vaporOut) comme présenté sur la figure 4.4. Puis, on définit les composantes de conduites et les unités ①. Ensuite, on met les spécifications sur les trois entrées et les trois sorties ② pour définir les débits de masse, température, pression, consistance, etc. Un paramètre de spécification peut être lié à un autre paramètre, comme ⑤ et ⑥. On peut aussi définir les variables libres d'unités sur l'unité ③. S'il y a beaucoup de variables libres d'unités, elles peuvent être définies ensemble dans une spécification qui possède la forme de diamant ④.

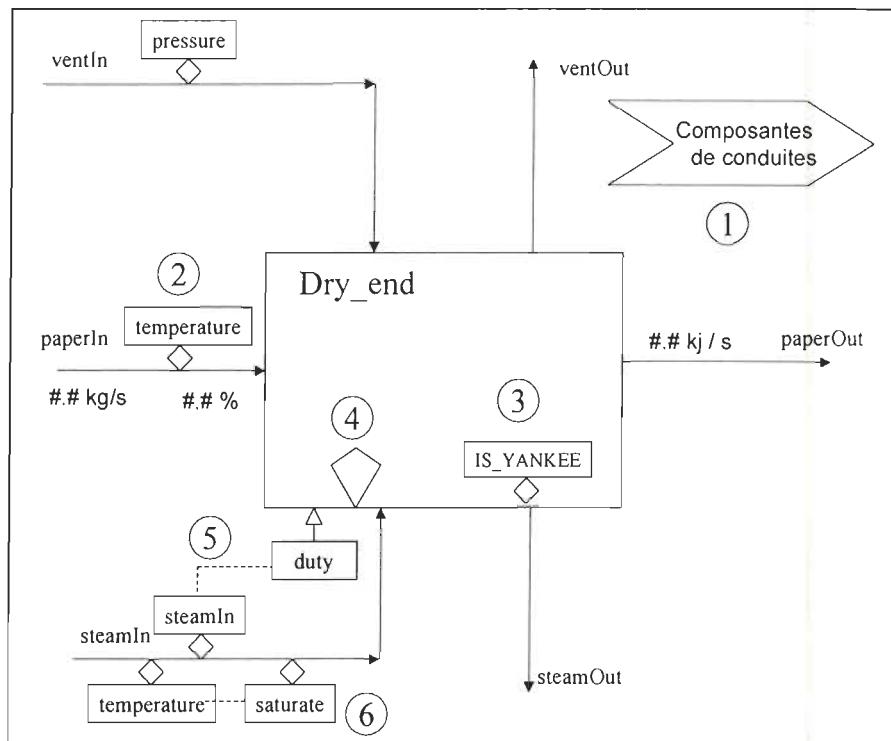


Figure 4.4 Les étapes de dessiner le modèle

Après avoir fini le mode dessin, le mode simulation peut être démarré. Pendant la simulation, le logiciel se sert des valeurs spécifiées pour résoudre les bilans. Les données et les valeurs spécifiées des courants tels que le débit de masse, la température, la pression, le débit d'énergie, etc, sont présentés sur les lignes des trois entrées et des trois sorties. Si on veut observer les variables des courants, on peut simplement cliquer

sur la ligne avec la souris, une boîte de dialogue apparaît. Dans cette boîte, on peut voir beaucoup d'informations de tous les composants sur cette ligne ( voir la figure 4.5 ). Quand on clique sur une spécification, une boîte de dialogue apparaît aussi à l'écran, sur laquelle on peut changer la valeur de la spécification ( voir la figure 4.6 ).

Les variables spécifiées et calculées peuvent être aussi montrées sur les boîtes de dialogue, figure 4.7. Par l'emploi de graphes dynamiques, on peut aussi observer les variables calculées et les variables spécifiées sur les échelles graphiques ( Figure 4.8 ).

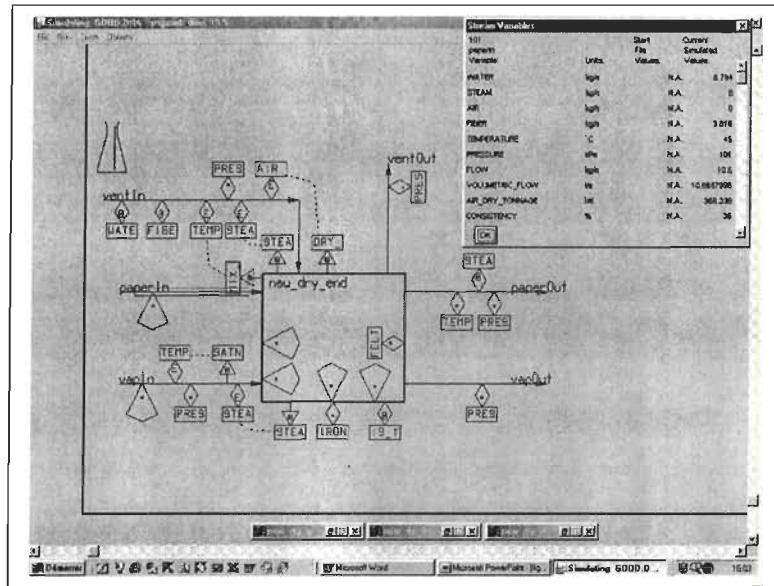


Figure 4.5 Variables des composantes de conduite

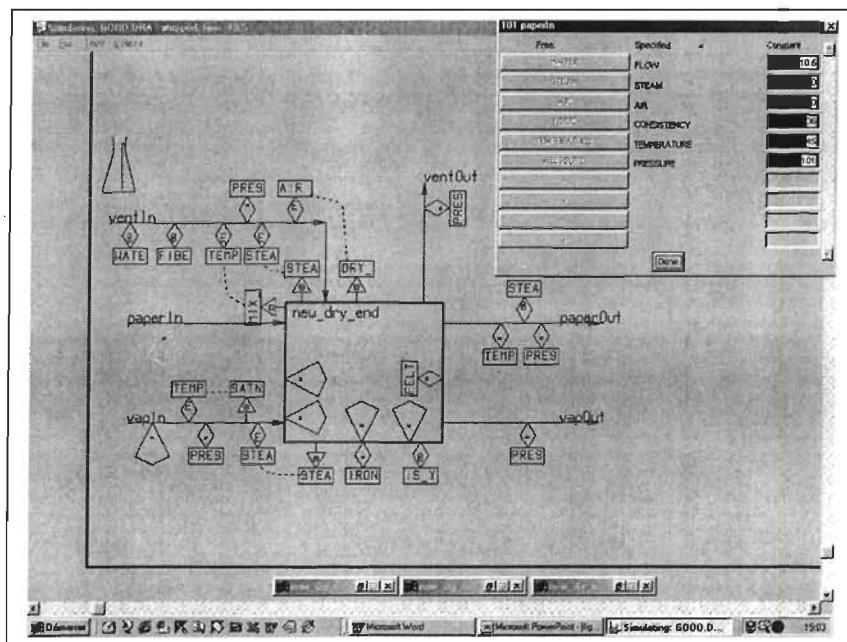


Figure 4.6 Une boîte de dialogue

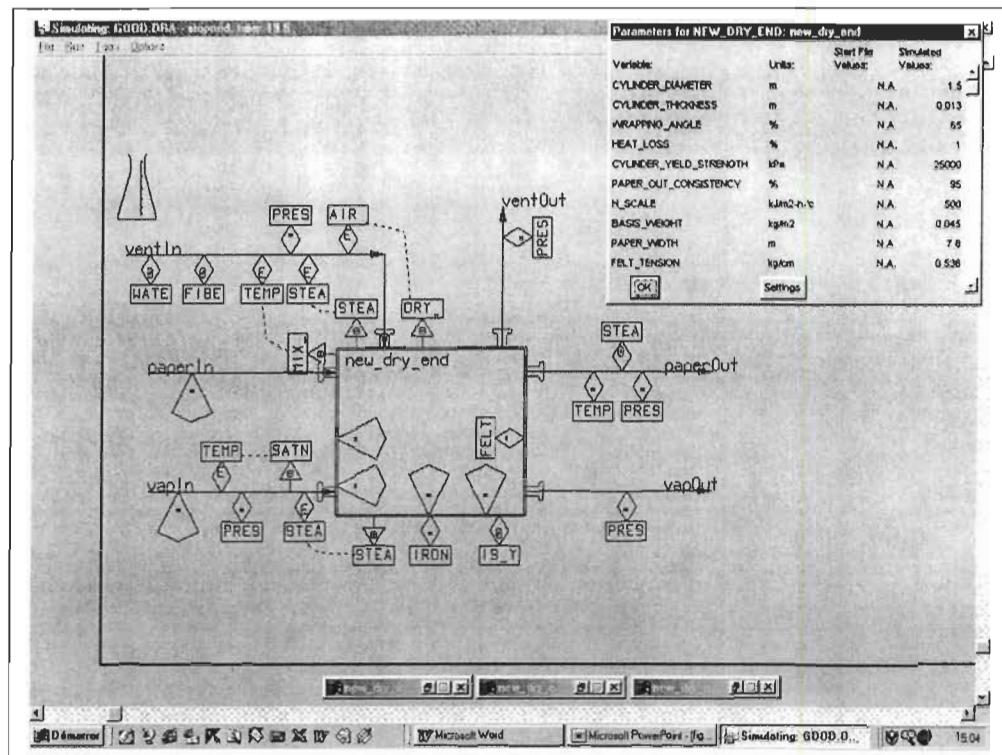


Figure 4.7 Variables de la nouvelle sécherie

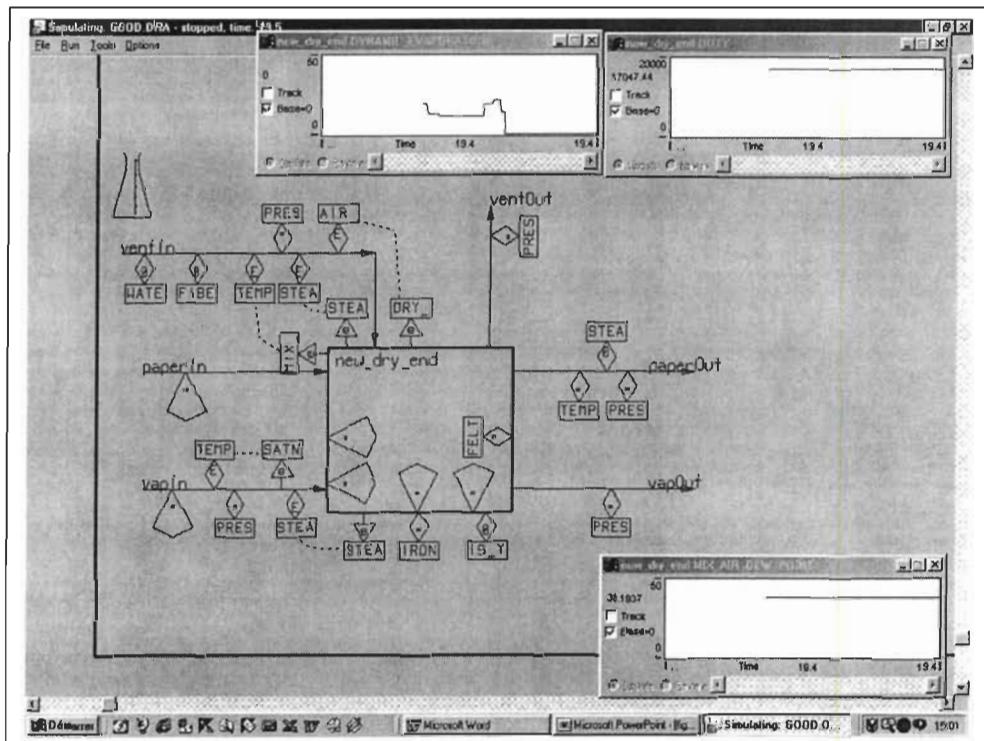


Figure 4.8 Les échelles graphiques

#### 4.3.2 Choix à faire

Notre modèle de la sécherie implique des choix. D'abord on doit choisir le type de la sécherie, i.e. le système de Multi-Cylindre (figure 4.9) ou le système de Yankee ( figure 4.10 ). Avec le système de Multi-Cylindre, on peut choisir des paramètres dans chaque section de la sécherie. Pour le système de Multi-Cylindre moderne, les cylindres sont divisés en 3 à 5 sections. Notre modèle fournit jusqu'à 6 sections ( figure 4.9 ). Chaque section contient les variables comme le diamètre du cylindre, la température et la pression de la vapeur, etc, qui peuvent être différents.

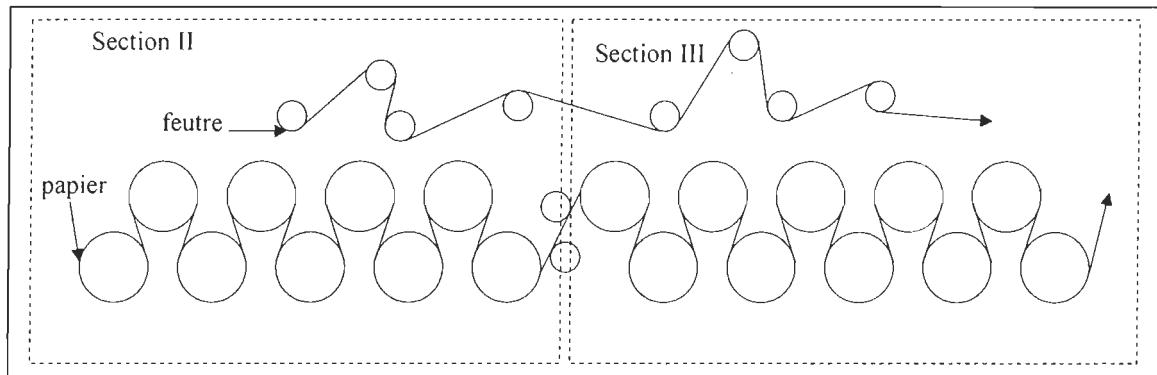


Figure 4.9 Système de Multi-Cylindre

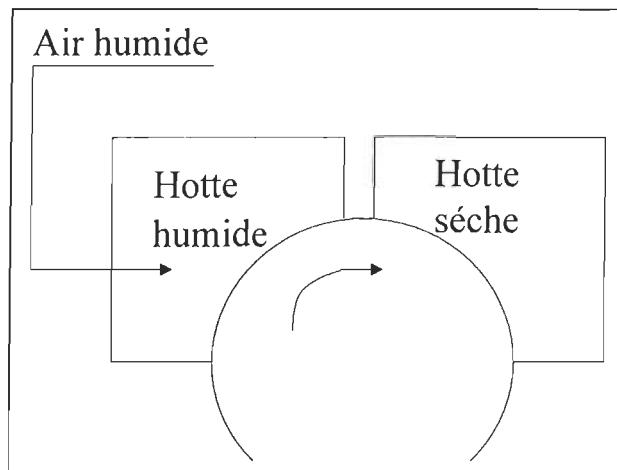


Figure 4.10 Le système de Yankee

On peut aussi choisir le matériau du cylindre, fonte ou acier inoxydable. Si le cylindre est produit en fonte, la conductibilité thermique sera  $47 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$ , si il est en acier inoxydable, la conductibilité thermique sera  $16 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$ .

L'utilisateur doit choisir la distance entre deux séchoirs, la distance entre deux sections, l'angle de contact entre le papier et le séchoir, la longueur de la feuille, la résistance thermique du dépôt calcaire et la tension de toile. S'il ne choisit pas ces variables, le modèle sélectionnera les données par défaut.

Pendant la simulation, le modèle peut juger de l'état du condensat, lequel correspond à la vitesse de la machine. Il peut aussi juger de la pression de vapeur dans le cylindre. Si la pression de la vapeur surpassé la pression maximale de vapeur dans le séchoir, une donnée par défaut est sélectionnée par le modèle, la qui correspond à la pression maximale.

#### 4.4 Variables calculées

Pendant la simulation certains résultats de simulation peuvent être calculés par les bilans de masse et d'énergie, mais il y a encore beaucoup de résultats calculés par les équations pratiques, tels que la vitesse de machine, l'épaisseur de film d'air, le point de rosée, etc. Maintenant, nous allons discuter des équations qu'on utilise dans la simulation de la sécherie multi-cylindrique.

D'abord voyons une sécherie multi-cylindriques à la Figure 4.11. Elle est connectée avec la section de la presse, et la section de bobineuse.

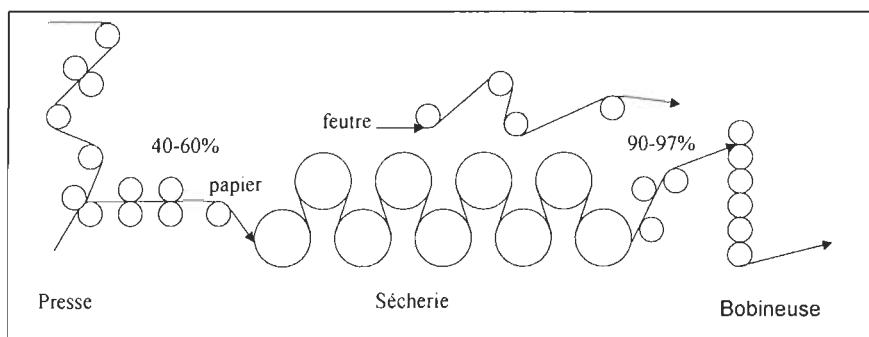


Figure 4.11 La position de la sécherie dans une machine à papier

#### 4.4.1 Données connues

En général, l'humidité de la feuille à l'entrée de la sécherie est d'environ 40 à 60%, l'humidité du papier final à la sortie sera de 10 à 3%.

On sait que dans une sécherie, le papier vient de la sortie de la section de presse, c'est-à-dire que pour la sécherie, les variables des composants du papier à l'entrée sont des données connues. Alors, le modèle de la sécherie peut prendre les composants de courants comme les paramètres d'entrée, tels que la température, la pression, le bilan la quantité d'eau, la quantité de fibre, etc.

#### 4.4.2 Calcul des paramètres principaux

Pour construire le modèle de sécherie, on doit prendre des paramètres principaux, tels que : le diamètre du cylindre, l'épaisseur du métal de cylindre, l'angle de contact du papier avec le cylindre, la distance entre deux cylindres, le métal du cylindre ( fonte, acier inoxydable, ou bronze ), et le papier produit, le poids de base ( grammage ), la largeur de la feuille et la consistance finale du papier.

Si, par hasard, l'utilisateur ignore certaines données, le modèle peut fonctionner quand même. L'utilisateur ne met que « 0 » sur la donnée qu'il ne sait pas, et pendant la simulation, le modèle pourra sélectionner une donnée par défaut correspondante.

Après l'obtention des données, pendant la simulation, le modèle peut calculer la production de papier par l'équation :

$$P = FiberOut * 24 * 60 * 60 / PAPER\_OUT\_CONSISTENCY / 1000 \quad \text{Éq. 4.1}$$

Où :

P = la production du papier en tonnes / jour.

FiberOut = la quantité de fibre à la sortie de la sécherie en kg / s.  
on peut obtenir le FiberOut par le bilan de masse.

PAPER\_OUT\_CONSISTENCY = la consistance finale du papier en %.

Puis, la vitesse de la machine peut être calculée par l'équation : .

$$Sm = P * 1000 / 24 / 60 / ( W * B ) \quad \text{Éq. 4.2}$$

Où :

Sm = la vitesse de la machine en m / min,

P = la production du papier en tonnes / jour,

B = le poids de base, ou grammage, en kg / m<sup>2</sup>.

W = la largeur de la feuille en m.

La surface totale des séchoirs sera :

$$S = D * 3.1415926 * L \quad \text{Éq. 4.3}$$

Où :

S = la surface totale des séchoirs en m<sup>2</sup>.

L = la largeur du papier en m.

Ensuite, on peut obtenir le taux de production de papier.

$$Rp = P * 1000 / 24 / S \quad \text{Éq. 4.4}$$

Où :

$R_p$  = le taux de production de papier, en kg / h-m<sup>2</sup>

$S$  = la surface totale sécheurs papier et feutre en m<sup>2</sup>.

#### 4.4.3 Condensât

Après avoir obtenu la valeur de la vitesse de la machine, on peut calculer l'épaisseur du condensât à la surface interne du cylindre et l'épaisseur du film par la formule :

$$Sm = (5720 - 2610 / D)d_{cond}^{53} \quad \text{Éq. 4.5}$$

Où :

$Sm$  = la vitesse de la machine en pi / min.

$D$  = la diamètre du cylindre en m.

$d_{cond}$  = l'épaisseur du condensât en mm.

L'équation 4.5 est utilisée pour calculer l'épaisseur du condensât à la surface interne du cylindre de la sécherie de YANKEE. Si la sécherie n'est pas de type YANKEE, les résultats qui proviennent de cette formule ne seront pas très exacts. En pratique, il y a toujours des siphons qui se trouvent dans les cylindres pour contrôler l'épaisseur du condensât. Dans les cylindres modernes, on utilise aussi les siphons et les barres pour contrôler l'état du condensât.

Par le graphe de la figure 4.13<sup>54</sup>, on trouve la relation entre l'épaisseur du condensât, la vitesse de la machine et le diamètre du cylindre. Théoriquement, l'état du condensât est lié à la vitesse de la machine. Quand la vitesse de la machine est à 150m / min, l'état du condensât est de type cascade. Si la vitesse est moins que 150m / min, l'état du

condensât est de type flaue. Et si la vitesse de la machine augmente à 300 - 425m / min, l'état du condensât passe de anneau à cascade .

L'épaisseur du condensât est contrôlée aussi par le siphon. En pratique, elle change souvent de 0 à 20mm, ce qui correspond à la vitesse de la machine de 150 à 1000m / min.

De plus, même si les vitesses de la machine et les diamètres du cylindre sont les mêmes, les valeurs des épaisseurs du condensât dans le cylindre traditionnel ( sans les barres ) et le cylindre avec barres sont différentes.

Des formules relient ces paramètres dans le cylindre avec barres<sup>55</sup>:

$$f = \sqrt{g\delta} / 2s ; \quad f = V^2 / R ; \quad f = V / 2\pi R \quad \text{Éq. 4.6}$$

Où :

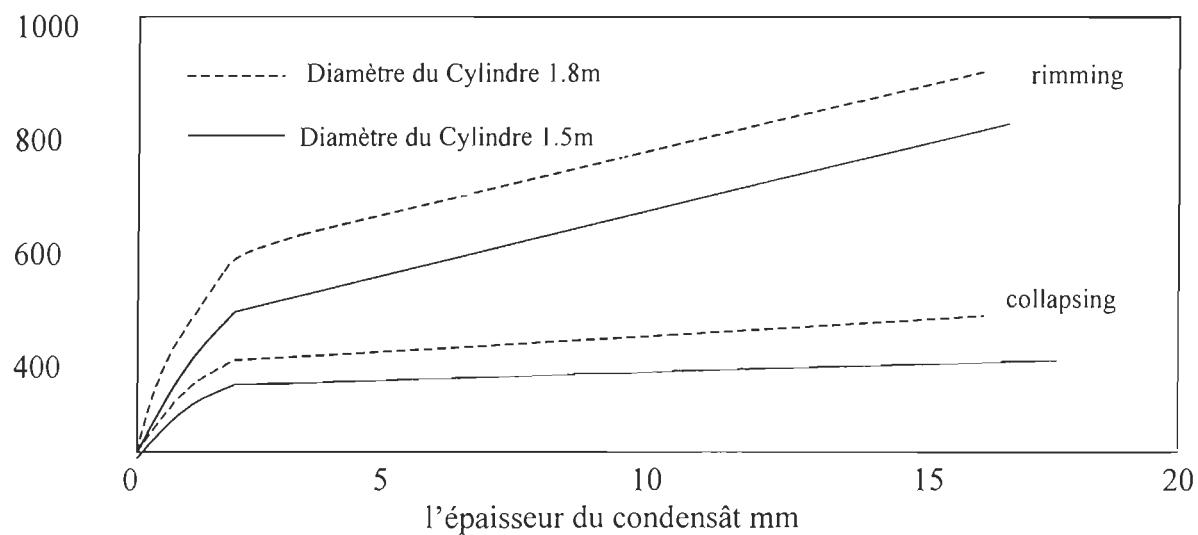
$\delta$  = l'épaisseur de condensât;

$f$  = la fréquence;

$s$  = la longueur de l'arc;

$V$  = la vitesse de machine.

La vitesse de la machine



**Figure 4.12 Relation entre l'épaisseur du condensât et la vitesse de la machine**

$$X_{air} = 3.5 * 10e-5 * R * (\mu * V / T)^{2/3}$$

Éq. 4.7

Où :

$X_{air}$  = l'épaisseur du film en mm;

$R$  = le rayon du cylindre en mm;

$\mu$  = la viscosité de l'air en kg/m-s;

$V$  = la vitesse tangentielle en m/s,  $V \approx Sm$ ;

$T$  = la tension du feutre en kg par cm linéaire, ceci est une variable spécifiée. Si l'utilisateur ne connaît pas cette variable, il est recommandé d'entrer « 0 » et une valeur par défaut sera sélectionnée;

Pour calculer la pression maximale de la vapeur dans le séchoir :

$$X = 15 * D * P / (200 * \sigma)$$

Éq. 4.8

Où :

$X$  = épaisseur du cylindre en m;

$P$  = pression maximale de la vapeur en kg/cm<sup>2</sup>;

$D$  = diamètre du sécheur en m;

$\sigma$  = la résistance à la rupture de la fonte en kg/mm<sup>2</sup>.

Par les bilans de masse et les bilans d'énergie, on peut calculer la charge de chaleur:

$$DUTY = EvaporOut - EvaporIn \quad \text{Éq. 4.9}$$

Où :

DUTY = la charge de chaleur en kJ / s;

EvaporOut = l'énergie sortie du système de la vapeur en kJ / s;

EvaporIn = l'énergie entrée du système de la vapeur en kJ / s.

Les valeurs pour EvaporOut et EvaporIn sont obtenues par le bilan d'énergie.

On peut aussi calculer la charge de chaleur par la formule ( 4.10 ).

$$DUTY = ( EpaperOut - EpaperIn + EventOut - EventIn ) / HeatLoss \quad \text{Éq. 4.10}$$

Où :

EpaperOut = l'énergie à la sortie du papier en kJ / s;

EPaperIn = l'énergie à l'entrée du papier en kJ / s;

EVentOut = l'énergie à la sortie du système de la ventilation en kJ / s;

EVentIn = l'énergie à l'entrée du système de la ventilation en kJ / s;

HeatLoss = perte de chaleur %, cette valeur est une variable spécifiée.

Pendant la simulation, le modèle peut calculer les EpaperOut, EpaperIn, EventOut, EventIn par les bilans d'énergie.

La quantité de vapeur minimale est calculée par :

$$Qvap (\text{ en kg / s }) = DUTY / \lambda_{vap} \quad \text{Éq. 4.11}$$

Où :

$\lambda$  = la chaleur latente de la vapeur en kJ / kg ;

#### 4.4.4 Taux d'évaporation de la sécherie

Pratiquement le taux d'évaporation réel sur chaque séchoir peut être présenté comme à la figure 4.13.

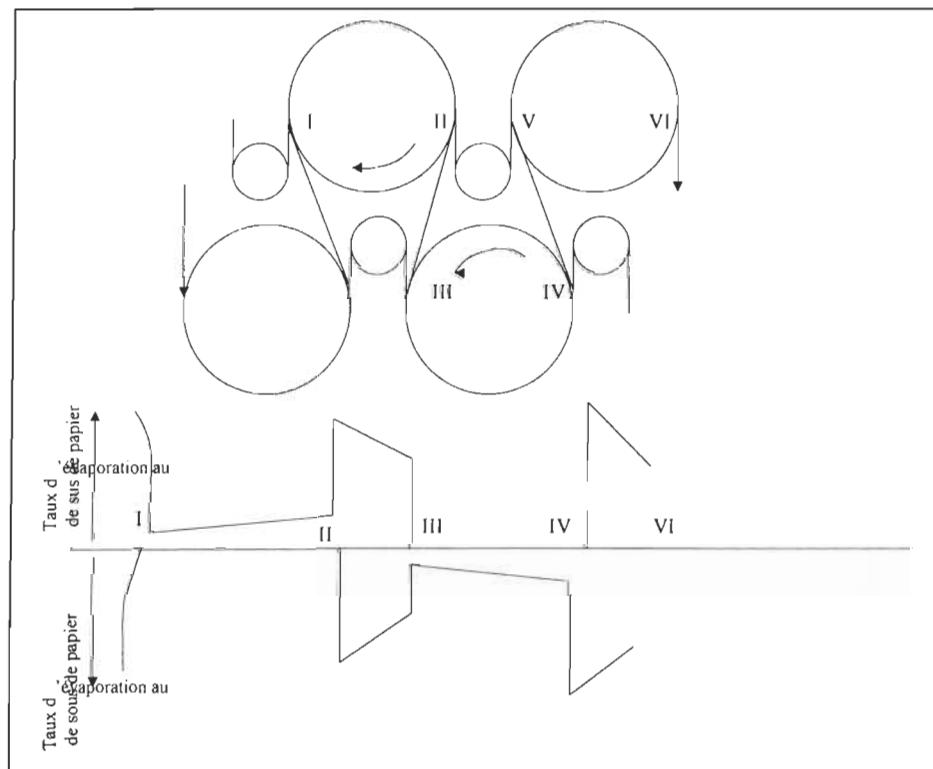


Figure 4.13 Le taux d'évaporation sur le séchoir

Dans notre modèle, nous utilisons le taux d'évaporation moyen de chaque section de la sécherie ou le taux d'évaporation moyen de toute la sécherie comme paramètre du taux d'évaporation de chaque séchoir pendant la simulation.

En pratique, il est difficile de trouver une formule pour calculer très exactement le taux d'évaporation de la sécherie. Donc, on doit choisir les données du système réel pour évaluer le taux d'évaporation.

D'abord, on connaît les valeurs des températures saturées ou des pressions saturées dans chaque section de la sécherie. On peut donc trouver les relations entre la température, la pression et le taux d'évaporation de la sécherie. On peut obtenir les informations dans Tappi.

Le taux d'évaporation de la sécherie peut être obtenu par la figure 4.14.

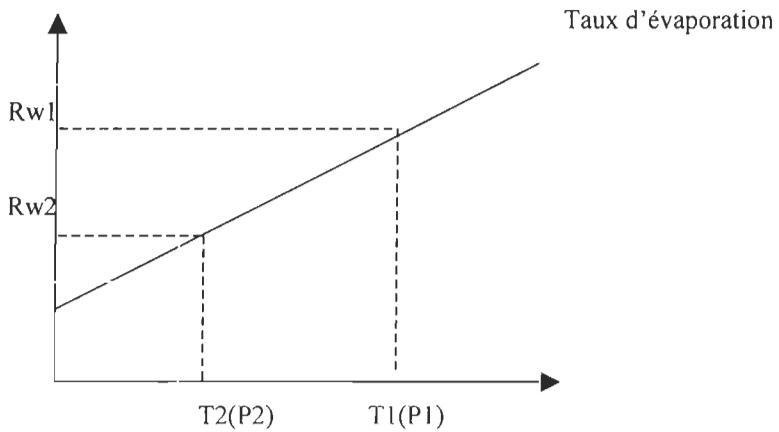
Sur cette figure, on trouve qu'à chaque point de température ( ou chaque point de la pression ) correspond un taux d'évaporation. Alors, on peut calculer les relations entre la température, la pression et le taux d'évaporation de la sécherie.

On peut calculer la pente de la ligne de taux d'évaporation:

$$\text{La pente de la ligne} = ( R_{w1} - R_{w2} ) / ( T_1 - T_2 ) \quad \text{Éq. 4.12}$$

$$\text{ou la pente de la ligne} = ( R_{w1} - R_{w2} ) / ( P_1 - P_2 ) \quad \text{Éq. 4.13}$$

Où :  $R_{w1}$ ,  $R_{w2}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  sont présentés sur la figure 4.14.



**Figure 4.14      La pente du taux d'évaporation**

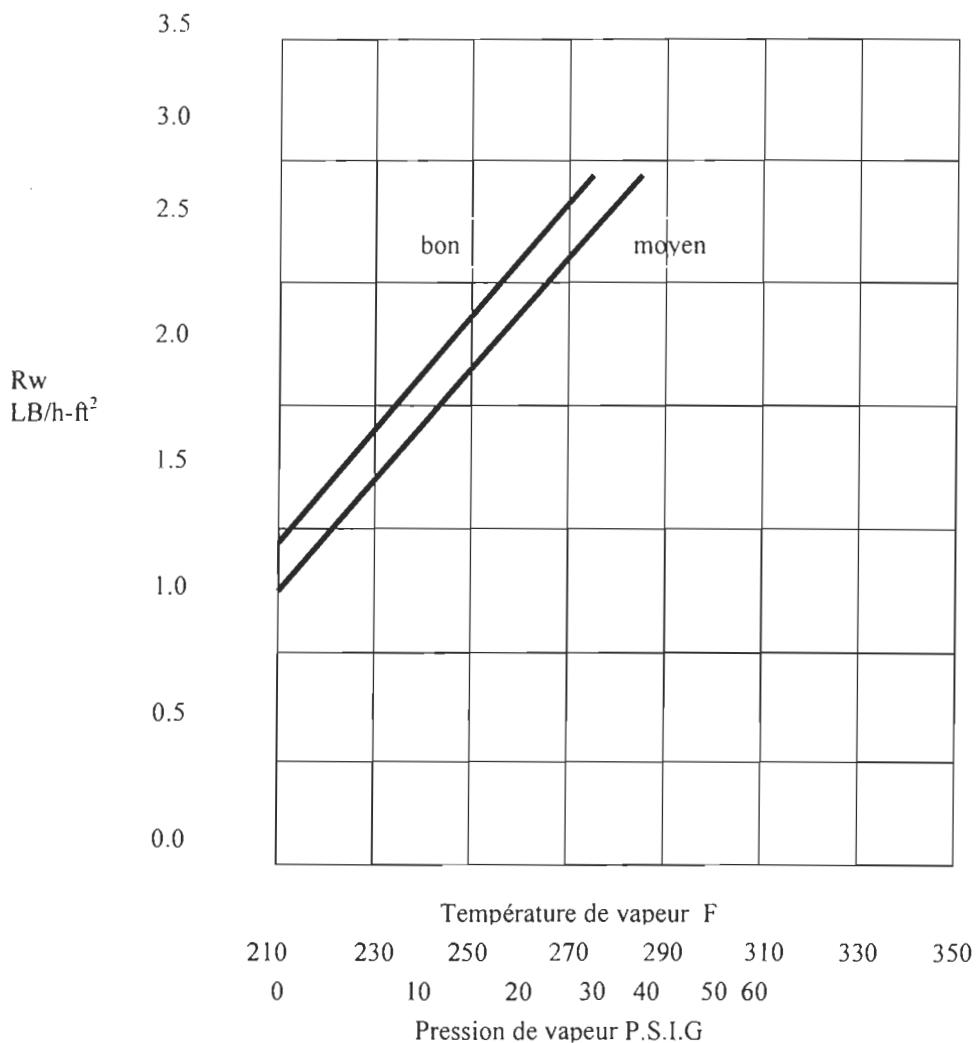


Figure 4.15 Le taux d'évaporation moyen ( papier journal )<sup>56</sup>

On voit que si la valeur de la température et de la pression du séchoir sont connus, on peut trouver le taux d'évaporation sur la figure 4.15.

#### 4.4.5 Calculs reliés au système de ventilation

On sait que le système de ventilation se compose toujours de trois sections essentielles: l'alimentation, l'infiltration, et l'évacuation. Comme utilisateur, on connaît toujours les données suivantes :

- 1) Les températures sèches de l'air d'infiltration, de l'air d'alimentation et de l'air d'évacuation.
- 2) Les températures humides de l'air d'infiltration, de l'air d'alimentation et de l'air d'évacuation.

Pendant la simulation, le modèle calculera les températures de point de rosée, les humidités relatives, les humidités absolues, etc.

L'humidité de l'air peut être calculée par la formule<sup>57</sup> suivante:

$$X = \{ 1.0048(Vw - Vd) + Xv' (2501 - 2.3237Vw) \} / (2501 + 1.86Vd - 4.19Vw) \quad \text{Éq. 4.14}$$

$$Xv' = 0.62197Pv' / (P - Pv') \quad \text{Éq. 4.15}$$

$$Pv' = \exp\{ 11.78(Vw - 99.64) / (Vw + 230) \} \quad \text{Éq. 4.16}$$

Où :

$P$  = la pression atmosphérique en bar (au niveau de la mer 1.013bar);

$X$  = l'humidité de l'air en kg H<sub>2</sub>O / kg d.a.;

$Vw$  = la température humide en °C;

$Vd$  = la température sèche en °C.

Pour calculer le point de rosée :

$$Vdp = 99.64 + 329.64 * \ln(Pp) / \{ 11.78 - \ln(Pp) \} \quad \text{Éq. 4.17}$$

$$Pp = X * P / (X + 0.6222) \quad \text{Éq. 4.18}$$

Où :

$V_{dp}$  = le point de rosée en  $^{\circ}\text{C}$ ;

$P$  = la pression atmosphérique en bar ( au niveau de la mer 1.013bar );

$X$  = l'humidité de l'air en  $\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg d.a.}$

La densité de l'air :

$$\rho = \{ 216.67P( X + 1 ) \} / \{ ( 273.15 + V )( X + 0.622 ) \}$$

Éq. 4.19

Où :

$\rho$  = la densité de l'air en  $\text{kg} / \text{m}^3$  ( l'air humide );

$P$  = la pression d'atmosphère en bar ( au niveau de la mer 1.013bar );

$X$  = l'humidité de l'air en  $\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg d'air sec.}$

$V$  = la température en  $^{\circ}\text{C}$ .

Le volume spécifique de l'air à la température  $T$  et pression atm est :

$$V_{air} = 359 / 28.85 * \{ ( 460 + T ) / ( 460 + 32 ) \}$$

Éq. 4.20

Où :

$V_{air}$  = le volume spécifique de l'air à la température  $T$  et pression atm en  $\text{pi}^3 / \text{air.sec.}$

$T$  = la température de l'air en  $^{\circ}\text{F.}$

Le débit massique d'air:

$$D = Q_{ex} / V_{air}$$

Éq. 4.21

$$Q_{ex} = Q_{infiltration} + Q_{alimentation} + Q_{vapeur} \quad \text{Éq. 4.22}$$

Où :

$D$  = le débit massique d'air en kg sec / s.

$V_{air}$  = le volume spécifique de l'air à la température  $T$  et pression atm en  $\text{pi}^3 / \text{air.sec.}$

$Q_{ex}$  = l'évacuation d'air en kg / s.

$Q_{infiltration}$  = l'infiltration d'air en kg /s.

$Q_{alimentation}$  = l'alimentation d'air en kg /s.

$Q_{vapeur}$  = la quantité de vapeur qui est enlevée du papier en kg /s.

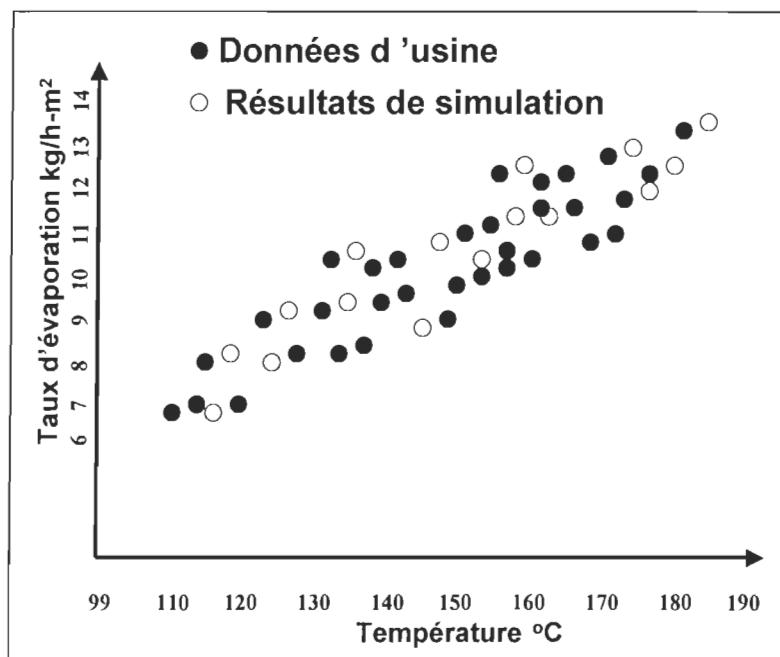
## Chapitre 5 - Résultats de simulation

Généralement, il existe beaucoup de méthodes pour juger des résultats de simulation. Dans ce mémoire nous allons évaluer les résultats de simulation en utilisant des données réelles d'usine et des données tirées des normes de Tappi.

### 5.1 Évaluation basée sur des données réelles d'usine

Premièrement, on peut obtenir les données nécessaires réelles d'usine, par exemple, les paramètres de machine, les données du produit, etc, puis prendre ces données comme les variables spécifiées du modèle.

On compare ensuite les résultats de simulation aux résultats réels d'usine. Pour observer clairement les résultats, on utilise un graphique du taux d'évaporation de la sécherie, comme la figure 5.1 le montre.

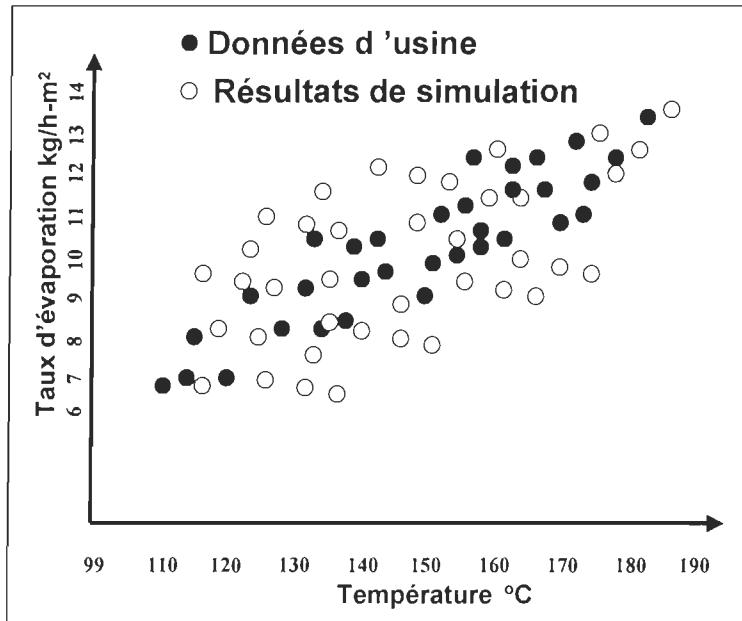


**Figure 5.1 Graphique du taux d'évaporation de la sécherie**

Dans la figure 5.1 les résultats de simulation sont dans la sphère des données d'usine.

Dans ce cas, on peut dire que les résultats de simulation sont un succès.

Si les résultats sont comme à la figure 5.2, le plupart des résultats ne sont pas dans la sphère des données d'usine. Évidemment, les résultats de simulation sont alors douteux. On doit vérifier et corriger le modèle jusqu'à ce que l'on obtienne des résultats satisfaisants. Les figures 5.1 et 5.2 sont des exemples, elles ne représentent pas les résultats de notre simulateur.

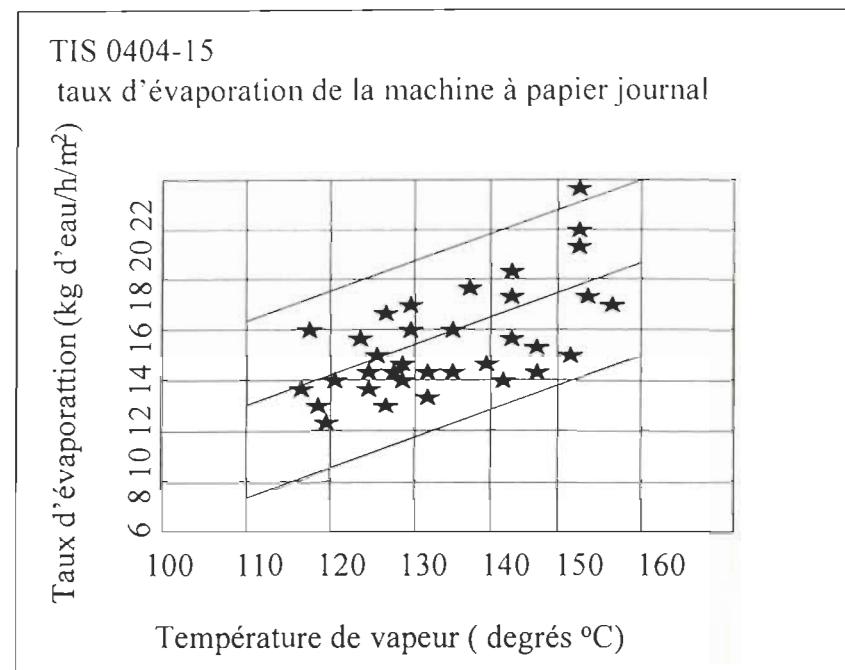


**Figure 5.2** Les résultats de simulation ne sont pas un succès

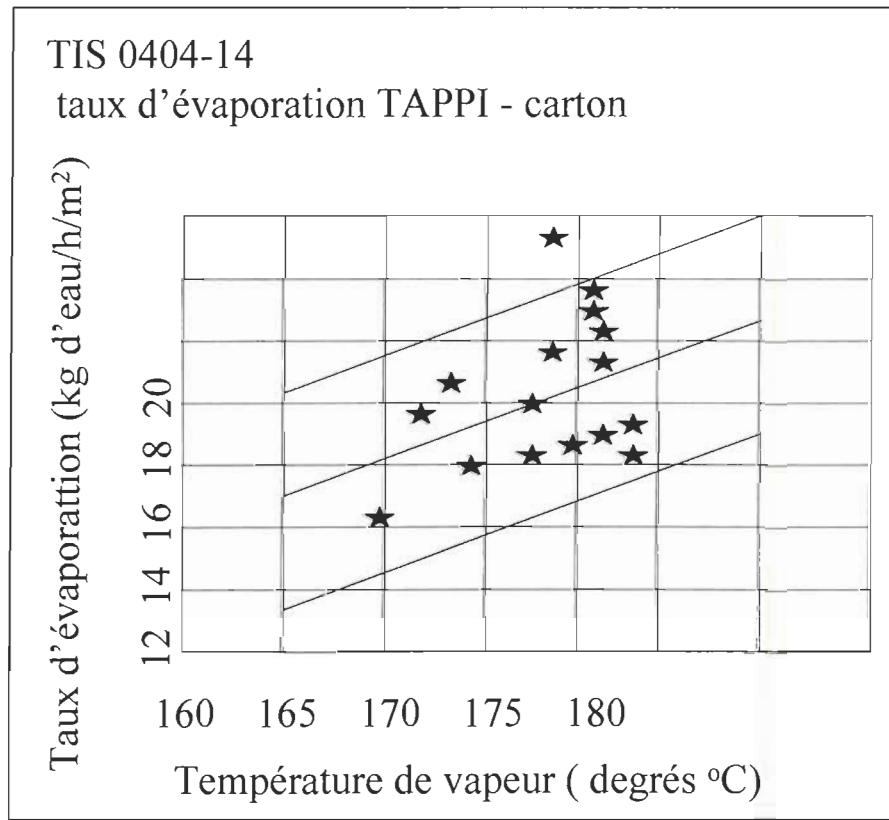
## 5.2 Évaluation basée sur les tables de référence de Tappi

Parfois, il est difficile d'obtenir les données des usines, les usines ne voulant pas publier les données de machine et les résultats importants du produit. Alors, dans ce cas, on peut vérifier le modèle à l'aide de données fournies par Tappi.

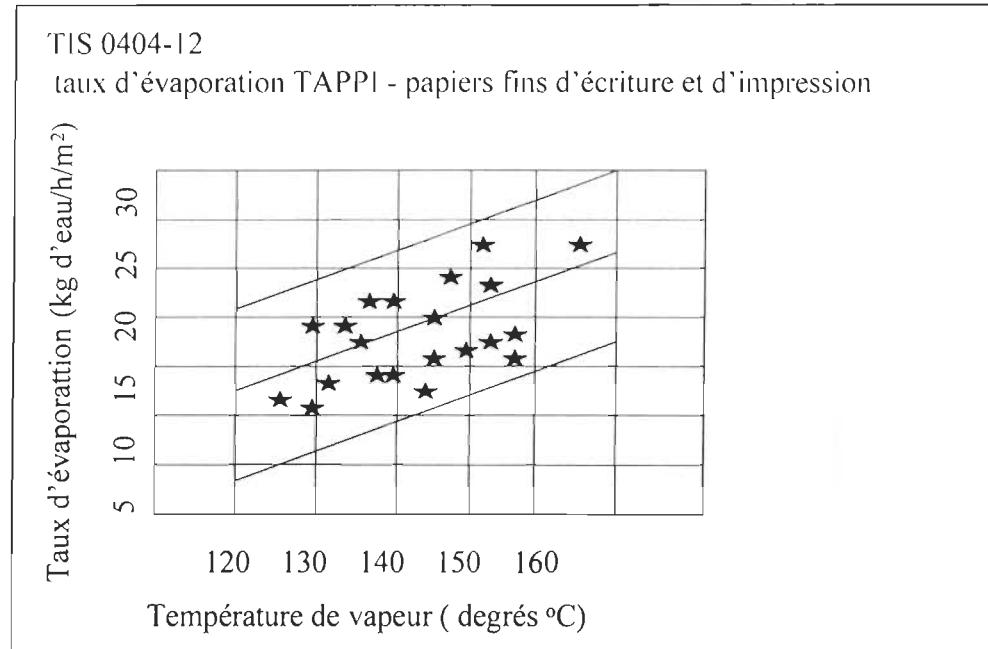
Pratiquement, il y a beaucoup de documents disponibles de Tappi, tels que sur les condensats<sup>58</sup>, la tension<sup>59</sup>, le séchage, la ventilation<sup>60</sup> et le taux d'évaporation<sup>61</sup>. Tous ces résultats présentent des données normales. On peut les trouver facilement dans les bibliothèques. Les figures 5.3 à 5.5<sup>62,63</sup> présentent les taux d'évaporation normaux des différents papiers.



Figures 5.3 TIS 0404-15

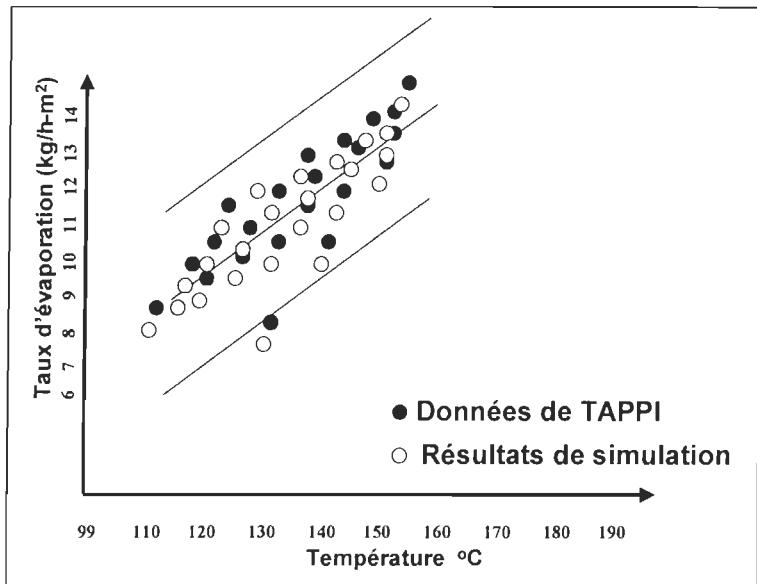


Figures 5.4 TIS 0404-14



**Figures 5.5      TIS 0404-12**

La figure 5.6 présente les résultats standards.



**Figure 5.6      Comparaison des résultats de simulation avec les données de Tappi**

Pour valider les résultats de simulation, on prend les données de Tappi comme variables spécifiées à entrer dans le modèle, de façon à obtenir les résultats. Si les résultats de simulation sont dans la sphère des données de Tappi, on peut dire que les résultats de

simulation sont acceptables. Sinon, les résultats de simulation ne sont pas qualifiés. Dans ce cas, on devra vérifier et corriger le modèle.

### 5.3 Interactions entre les variables du modèle

Durant la simulation, si l'on change les variables spécifiées, on peut observer que les résultats de simulation seront changés. Par exemple, lorsque l'on change la consistance du papier à l'entrée de la sécherie de 60% à 36%, on voit que le DUTY, la vapeur dans VentOut, la production du papier et la vitesse de la machine sont changés ( figure 5.7 ).

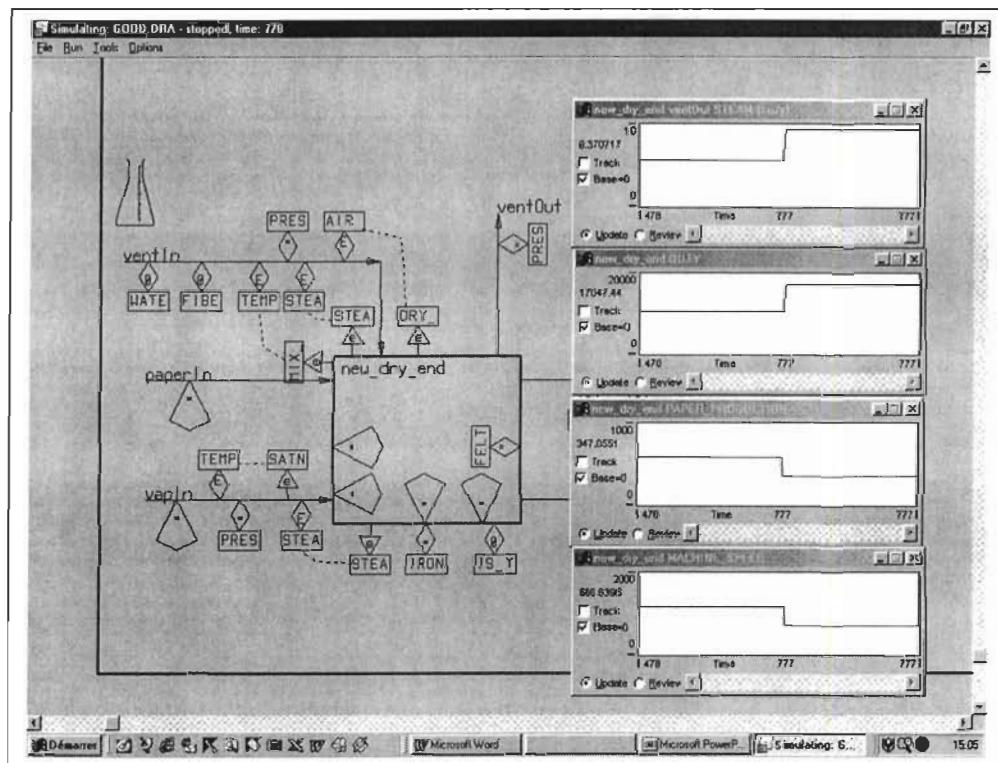
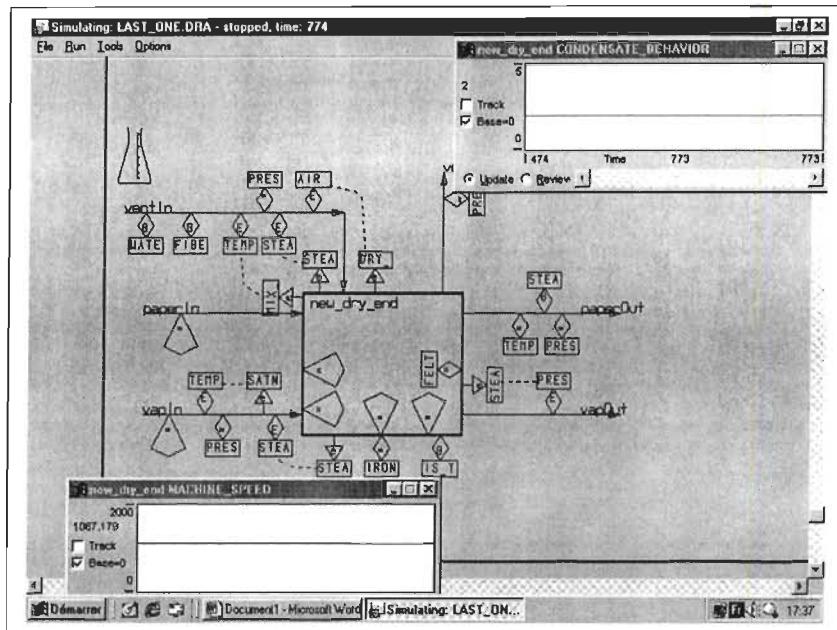


Figure 5.7      Interactions des variables

### 5.4 Jugements logiques

Le nouveau modèle possède des jugements logiques, par exemple, il peut juger de l'état du condensât et de l'épaisseur du condensât par les vitesses de machine. La figure 5.8

montre le résultat de l'état du condensât.

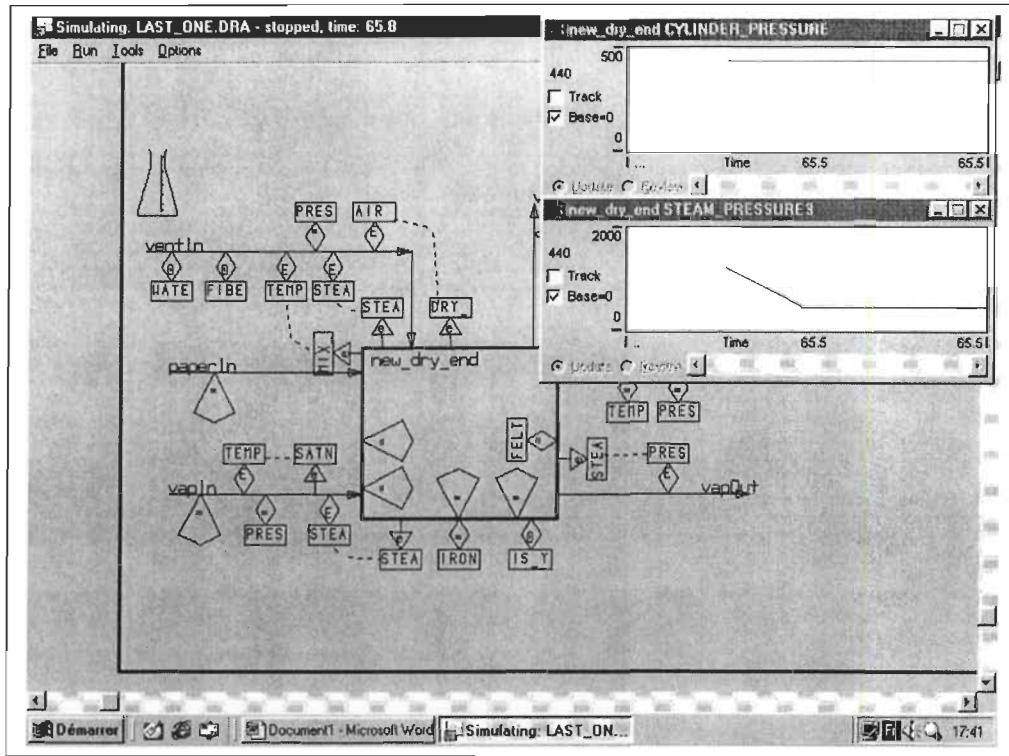


**Figure 5.8 Jugement de l'état du condensât**

Dans la figure 5.8 un résultat de l'état du condensât de 2 veut dire que l'état du condensât est anneau. Si le résultat est 1, l'état du condensât est cascade. Quand il est 0, l'état du condensât est flaque.

## 5.5 Système de contrôle

Le modèle possède aussi des systèmes de contrôle, par exemple, il peut contrôler la pression de vapeur dans les cylindres. Quand la pression de vapeur dans les cylindres est plus haute que la pression maximale, le modèle peut diminuer la pression de vapeur, jusqu'à ce que la pression de vapeur soit admissible, comme la figure 5.9 présente.



**Figure 5.9 Système de contrôle de pression de vapeur**

## 5.6 Système d'alarme

Au cours de la simulation, s'il y a des phénomènes anormaux, le modèle peut émettre une alarme. Par exemple, si la température de l'air d'évacuation est plus basse que la température du point de rosée ( c'est toujours une mauvaise situation pour le procédé de production du papier ) ou si la quantité de vapeur à l'entrée de sécherie n'est pas suffisante, dans ces deux cas, le modèle va émettre une alarme. La figure 5.10 montre le système d'alarme. Si la ligne est droite, il n'y a pas d'alarme; quand une onde sinusoïdale apparaît, dans ce cas, on dit que le modèle émet un alarme.

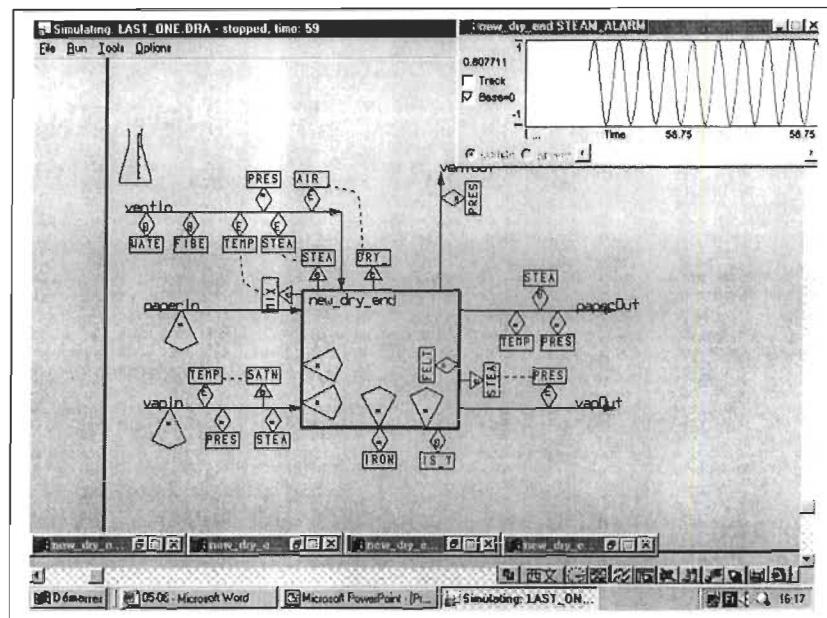


Figure 5.10 Système d'alarme

## 5.7 La ligne dynamique du taux d'évaporation

Pendant la simulation on peut observer le taux d'évaporation total de la sécherie ( figure 5.11 ). Chaque palier correspond au taux d'évaporation dans chaque section de sécherie.

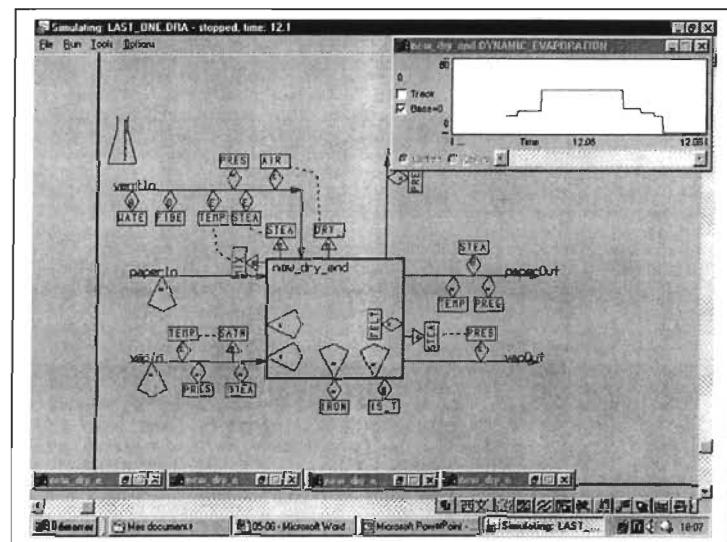


Figure 5.11 La ligne dynamique du taux d'évaporation

## 5.8 Validation des résultats de simulation

### 5.8.1 Résultats du système de production du papier

Le tableau 5.1 présente les variables spécifiées.

**Tableau 5.1** Les variables spécifiées dans la section de production du papier

Données du papier		
À l'entrée de sécherie		64% d'humidité
À la sortie de sécherie		6% d'humidité
Largeur de feuille		7.8 m
Grammage		0.048 kg/m <sup>2</sup>
Données de la sécherie		
Sécheurs	Nombre des cylindres	T de vap . Sat
1 - 7	7	113 °C
8 - 37	30	124 °C
38 - 50	13	119 °C
feutre	6	134 °C

Le tableau 5.2 présente les résultats simulés.

**Tableau 5.2** Les résultats simulés dans la section de production du papier

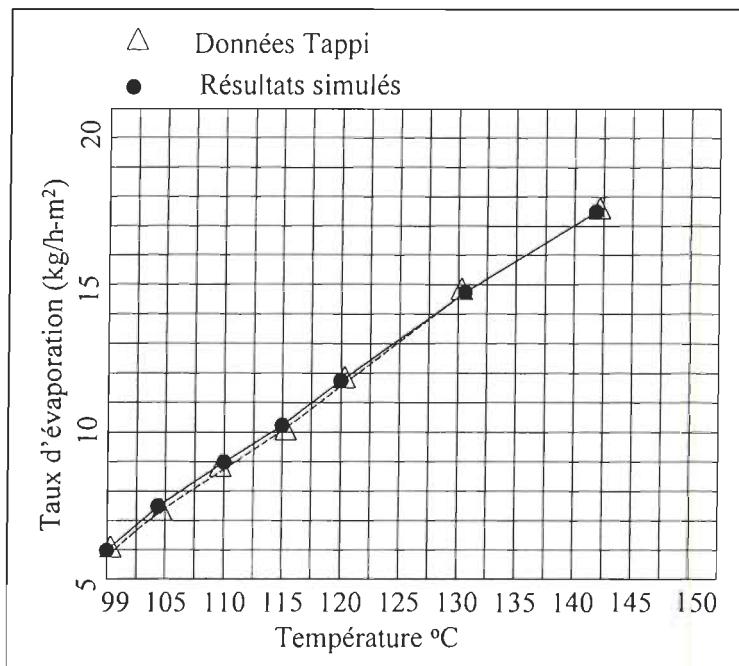
	Résultats réalité	Résultats modèle	Unité	%
Rw	11.23	11.34	kg / h-m <sup>2</sup>	9.8e-3
Sm	670	669.87	m / min	-1.9e-4
P	375	375	Tonnes / jour	0
Pmax	30	30	KPa	0
Film d'air	0.01371	0.01369	mm	-1.5e-4

Pendant la simulation on obtient les résultats des taux d'évaporation de sécherie comme le tableau 5.3 les présente.

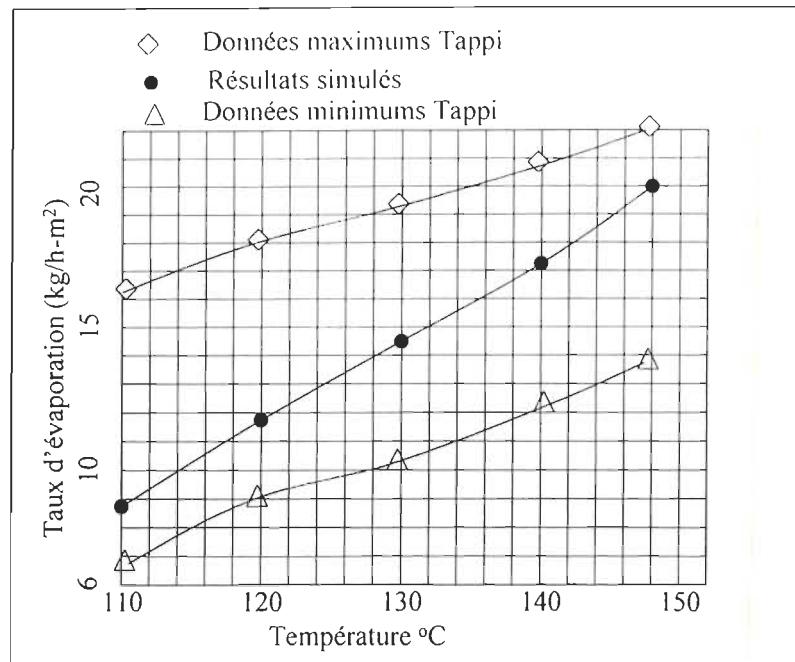
**Tableau 5.3 Les résultats des taux d'évaporation de la sécherie**

T °C	Taux d'évaporation kg/h-m <sup>2</sup>		%
99.0	6.1	6.1	0.000
104.4	7.3	7.5	0.027
110.0	8.8	8.9	0.011
115.6	10.1	10.3	0.020
121.1	11.8	11.8	0.000
132.2	14.5	14.6	0.007
143.3	17.4	17.4	0.000
Variables spécifiées	Résultats deTAPPI	Résultats simulés	Differences

Les figures 5.12 et 5.13 montrent les résultats simulés du taux d'évaporation de sécherie.



**Figure 5.12 Les résultats simulés vs les résultats Tappi**



**Figure 5.13** Les résultats simulés vs TIS0404-15

## 5.8.2 Résultats du système de ventilation

### 5.8.2.1 Les résultats simulés de la hotte ouverte

Le tableau 5.4 présente les variables spécifiées.

**Tableau 5.4** Les variables spécifiées de la hotte ouverte

Variables spécifiées	infiltration	alimentation	évacuation	unité
Temp.sèche	50%	50%		
Temp.Hum	24.4	67.8	54.4	°C
	17.8	31.7	42.8	°C

Les tableaux 5.5 et 5.6 présentent les résultats simulés et les résultats réels. Les résultats entre parenthèses représentent le pourcentage d'erreur entre les résultats simulés et les résultats réels.

**Tableau 5.5 Les résultats simulés de la hotte ouverte**

Variables calculées	infiltration	alimentation	l'air mélangé	évacuation	unité
Temp.sèche			46.1		°C
Temp.Hum			24.8		°C
Point de rosée	14.1	20.2	17.1	41.1	°C
Hum.rel	52	8	19	50	%
Hum.absolue	0.01	0.0149	0.011	0.0522	kg.eau/kg.a.s

**Tableau 5.6 Les résultats réels de la hotte ouverte**

Variables calculées	infiltration	alimentation	l'air mélangé	évacuation	unité
Temp.sèche			46.1 (0%)		°C
Temp.Hum			25.6 (-3.13%)		°C
Point de rosée	13.9 (1.4%)	19.5 (3.6%)	17.2 (-0.6%)	41.1 (0%)	°C
Hum.rel	52 (0%)	8 (0%)	19 (0%)	50 (0%)	%
Hum.absolue	0.01 (0%)	0.0143 (4.2%)	0.012 (-8.3%)	0.0522 (0%)	kg.eau/kg.a.s

### 5.8.2.2 Les résultats simulés de la hotte fermée

Le tableau 5.7 présente les variables spécifiées.

**Tableau 5.7 Les variables spécifiées de la hotte fermée**

Variables spécifiées	infiltration	alimentation	évacuation	unité
		90%		
<b>Temp.sèche</b>	22.2	81.1	82.2	°C
<b>Temp.Hum</b>	14.4	46.1	60.6	°C

Le tableau 5.8 et 5.9 présentent les résultats simulés et les résultats réels. Les résultats entre parenthèses représentent le pourcentage d'une entre les résultats simulés et les résultats réels.

**Tableau 5.8 Les résultats simulés de la hotte fermée**

Variables calculées	infiltration 10%	alimentation	l'air mélangé	évacuation	unité
<b>Temp.sèche</b>			75.2		°C
<b>Temp.Hum</b>			42.9		°C
<b>Point de rosée</b>	8.9	41.5	38.2	59.2	°C
<b>Hum.rel</b>	43	17	18	37	%
<b>Hum.absolue</b>	0.07	0.053	0.044	0.015	kg.eau/kg.a.s

**Tableau 5.9 Les résultats réels de la hotte fermée**

Variables calculées	infiltration	alimentation	l'air mélangé	évacuation	unité
<b>Temp.sèche</b>			77.8 (-3.3%)		°C
<b>Temp.Hum</b>			45.6 (-6.0%)		°C
<b>Point de rosée</b>	8.9 (0%)	42.2 (-1.7%)	40.6 (-6.0%)	59.4 (0.34%)	°C
<b>Hum.rel</b>	43 (0%)	17 (0%)	18 (0%)	37 (0%)	%
<b>Hum.absolue</b>	0.07 (0%)	0.053 (0%)	0.044 (0%)	0.015 (0%)	kg.eau/kg.a.s

## Chapitre 6 - Conclusions

Comme on a discuté dans les chapitres précédents, la structure d'une sécherie est très compliquée, et les trois systèmes ( ventilation, vapeur, production du papier ) qu'elle possède sont interactifs. Au cours de la production, la plupart des données changent dans les différentes sections, et parfois les données d'une même section changent aussi. Cela augmente la difficulté de construire un modèle dynamique.

Bien qu'il existe des modèles qui peuvent simuler la fonction de la sécherie, ils sont toujours incomplets et parfois les résultats sont grossiers. Par exemple, ils comportent les résultats des taux d'évaporation de la sécherie, d'humidité de la feuille et de quantité de chaleur. Cependant beaucoup de facteurs qui affectent la fonction de la sécherie ne sont pas considérés, tels que la forme de la hotte, les paramètres dans l'air de ventilation, l'état et l'épaisseur du condensat, les pressions de vapeur dans chaque section de la sécherie, etc. De plus il manque trois fonctions essentielles : jugement, contrôle et alarme.

Le nouveau modèle de sécherie est construit sur la plate-forme Cadsim Plus et programmé en Borland C++. Par rapport à l'original, il est plus complet, i.e. il comporte les systèmes de ventilation, de vapeur, et de production du papier; il est plus proche de la réalité, i.e. on peut diviser les cylindres en plusieurs sections; finalement, il est plus exact, i.e. on utilise beaucoup d'équations pratiques pour calculer et juger les résultats de simulations.

Au point de vue de la résolution de problèmes pratiques, on peut dire que le modèle est intelligent. Parfois, si l'on ne connaît pas bien les variables spécifiées, on met zéro pour le paramètre que l'on ne connaît pas et au cours de la simulation le modèle sait comment choisir des valeurs de défaut. Par exemple, quand l'on met le nombre des cylindres d'une section à zéro, pendant la simulation il peut déduire que toutes les températures, les pressions et les distances entre les cylindres dans cette section sont nuls; il sait quand sélectionner les équations pratiques pour la sécherie de type Yankee et quand choisir celles pour une sécherie multi-cylindres; il sait aussi comment juger les conditions de

procédé de la production et contrôler la pression de vapeur; il peut finalement émettre une alarme pour tout phénomène anormal.

Après avoir comparé les résultats de simulation avec les résultats réels d'usine et les données de Tappi, on conclut que les résultats du modèle sont fidèles.

Dans l'ensemble le nouveau modèle possède les caractéristiques suivantes :

- 1) la structure du modèle est similaire à la sécherie réelle;
- 2) par rapport aux modèles existants il est plus complet;
- 3) il possède trois nouvelles fonctions : jugement logique, contrôle et alarme;
- 4) il comporte beaucoup d'équations pratiques;
- 5) on peut voir presque tous les paramètres de la sécherie et observer presque tous les résultats;

On peut donc croire que si le modèle développé est utilisé dans l'industrie des pâtes et papiers, il sera sûrement considéré comme un outil performant et productif.

Mais on ne peut dire que le nouveau modèle est parfait. Par exemple, il est un peu rigide en ce qui concerne les sections de cylindres: il faut toujours mettre tous les paramètres dans toutes les six sections, même si on en utilise moins que six. Les types de papier sont limités, le modèle peut obtenir des résultats seulement pour le papier journal ou kraft. De plus, il y a des aspects que l'on n'a pas considéré. Par exemple, une sécherie est toujours composée des économiseurs ( qui peuvent affecter essentiellement les paramètres dans le système de ventilation ) et de la chaudière ( qui offre la vapeur à la sécherie ). Une sécherie réelle possède aussi les lignes des Presse\_Taille, Presse\_Ruiné, Sec\_Taille, Sec\_Ruiné, Presse\_Eau; les cylindres en barres; les sortes de caisse de ventilation; les siphons.

Éventuellement tous ces facteurs devront être considérés dans une nouvelle version du modèle.

## Annexes

### Annexe I les variables spécifiées dans le nouveau modèle

1. **CONSISTENCY** – la consistance de la feuille sèche en %;
2. **HEAT\_LOSS** – perte thermique en %;
3. **CYLINDER\_DIAMETER** – le diamètre du cylindre en m;
4. **CYLINDER\_THICKNESS** – l'épaisseur de la paroi du cylindre en m;
5. **WRAPPING\_ANGLE** – l'angle de contact de la feuille avec le séchoir en %;
6. **CYLINDER\_YIELD\_STRENGTH** – la résistance à la rupture du métal du cylindre en  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;
7. **PAPER\_OUT\_CONSISTENCY** – la consistance finale du papier en %;
8. **H\_SCALE** - la résistance thermique du dépôt intérieur du cylindre en  $\text{kJ}/\text{m}^2\text{-h-}^\circ\text{C}$ ;
9. **BASIS\_WEIGHT** – le grammage du papier en  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;
10. **FELT\_CYL\_DIAM** – le diamètre du cylindre avec le feutre en m;
11. **NUMBER\_OF\_FELT\_CYL** – le nombre de sécheurs à feutre;
12. **PAPER\_WIDTH** – la largeur de la feuille en m;
13. **FELT\_CYL\_TEMP** – la température dans le cylindre avec le feutre en  $^\circ\text{C}$ ;

14. N\_OF\_SECTION\_01 – le nombre de cylindres dans la première section;
15. T\_OF\_SECTION\_01 – la température moyenne dans la première section en °C;
16. N\_OF\_SECTION\_02 – le nombre de cylindres dans la 2<sup>e</sup> section;
17. T\_OF\_SECTION\_02 – la température moyenne dans la 2<sup>e</sup> section en °C;
18. N\_OF\_SECTION\_03 – le nombre de cylindres dans la 3<sup>e</sup> section;
19. T\_OF\_SECTION\_03 – la température moyenne dans la 3<sup>e</sup> section en °C;
20. N\_OF\_SECTION\_04 – le nombre de cylindres dans la 4<sup>e</sup> section;
21. T\_OF\_SECTION\_04 – la température moyenne dans la 4<sup>e</sup> section en °C;
22. N\_OF\_SECTION\_05 – le nombre de cylindres dans la 5<sup>e</sup> section;
23. T\_OF\_SECTION\_05 – la température moyenne dans la 5<sup>e</sup> section en °C;
24. N\_OF\_SECTION\_06 – le nombre de cylindres dans la 6<sup>e</sup> section;
25. T\_OF\_SECTION\_06 – la température moyenne dans la 6<sup>e</sup> section en °C;
26. DISTANCE\_BETWEEN\_CYLINDERS01 – la distance entre deux cylindres dans la première section en m ( voir la figure 4-2 );
27. DISTANCE\_BETWEEN\_CYLINDERS02 – la distance entre deux cylindres dans la 2<sup>e</sup> section en m ;
28. DISTANCE\_BETWEEN\_CYLINDERS03 – la distance entre deux cylindres dans la 3<sup>e</sup> section en m ;

29. DISTANCE\_BETWEEN\_CYLINDERS04– la distance entre deux cylindres dans la 4<sup>e</sup> section en m ;
30. DISTANCE\_BETWEEN\_CYLINDERS05– la distance entre deux cylindres dans la 5<sup>e</sup> section en m ;
31. DISTANCE\_BETWEEN\_CYLINDERS06– la distance entre deux cylindres dans la 6<sup>e</sup> section en m ;
32. DISTANCE\_BETWEEN\_SECTION1\_2 – la distance entre les deux sections de la première à la 2<sup>e</sup> section en m ( voir la figure 4.2 );
33. DISTANCE\_BETWEEN\_SECTION2\_3 – la distance entre les deux sections de la 2<sup>e</sup> à la 3<sup>e</sup> section en m ;
34. DISTANCE\_BETWEEN\_SECTION3\_4 – la distance entre les deux sections de la 3<sup>e</sup> à la 4<sup>e</sup> section en m ;
35. DISTANCE\_BETWEEN\_SECTION4\_5 – la distance entre les deux sections de la 4<sup>e</sup> à la 5<sup>e</sup> section en m ;
36. DISTANCE\_BETWEEN\_SECTION5\_6 – la distance entre les deux sections de la 5<sup>e</sup> à la 6<sup>e</sup> section en m ;
37. SUPPLY\_AIR – l'air d'alimentation dans le système de ventilation en % d'air total;
38. WET\_TEMP\_INFILTRATION – la température humide de l'air d'infiltration en °C;
39. DRY\_TEMP\_INFILTRATION – la température sèche de l'air d'infiltration en °C;

40. WET\_TEMP\_SUPPLY – la température humide de l'air d'alimentation en °C;
41. DRY\_TEMP\_SUPPLY – la température sèche de l'air d'alimentation en °C;
42. WET\_TEMP\_EXHAUST – la température humide de l'air d'évacuation en °C;
43. DRY\_TEMP\_EXHAUST – la température sèche de l'air d'évacuation en °C;
44. IS\_YANKEE – juge si la sécherie est Yankee ou multicylindre normale. Si elle est Yankee, on doit entrer « 1 », sinon entrer « 0 ».
45. IRON\_OR\_STAINLESS\_STEEL – si le métal du cylindre est en fonte, on doit entre « 1 », si il est en acier inoxydable on entre « 0 ».
46. FELT\_TENSION - la tension de toile en kg /cm.

**Annexe II      Les résultats représentés par les variables calculées dans le nouveau modèle**

- 1.DUTY – la charge de chaleur utilisée pour évaporer l'eau dans le papier humide en kJ / s;
- 2.VENT\_OUT – le débit de l'évacuation à la sortie du système de la ventilation en kg / s;
- 3.CYLINDERS\_AREA – la surface totale des cylindres en m<sup>2</sup>;
- 4.CYLINDER\_PRESSURE – la pression maximale de la vapeur dans cylindre en kg/m<sup>2</sup>;
- 5.MACHINE\_SPEED – la vitesse de la machine en m / min;
- 6.EVAPORATION\_RATE – le taux d'évaporation moyen des cylindres totals en kg/m<sup>2</sup>-h;
- 7.DYNAMIC\_EVAPORATION\_RATE – tous les taux d'évaporation moyen dans toutes les sections en kg/m<sup>2</sup>-h;
- 8.MINIMUM\_STEAM\_IN – le débit minimal de la vapeur à l'entrée du système de la vapeur en kg/s;
- 9.EVAP\_RATE1 – le taux d'évaporation moyen dans la première section en kg/m<sup>2</sup>-h;
10.     EVAP\_RATE2 – le taux d'évaporation moyen dans la 2<sup>e</sup> section en kg/m<sup>2</sup>- h;

11. EVAP\_RATE3 – le taux d'évaporation moyen dans la 3<sup>e</sup> section en kg/m<sup>2</sup>-h;
12. EVAP\_RATE4 – le taux d'évaporation moyen dans la 4<sup>e</sup> section en kg/m<sup>2</sup>-h;
13. EVAP\_RATE5 – le taux d'évaporation moyen dans la 5<sup>e</sup> section en kg/m<sup>2</sup>-h;
14. EVAP\_RATE6 – le taux d'évaporation moyen dans la 6<sup>e</sup> section en kg/m<sup>2</sup>-h;
15. PAPER\_PRODUCTION – la production du papier en tonnes / jour;
16. AIR\_FILM\_THICKNESS – l'épaisseur du film d'air en m;
17. CONDENSATE\_THICKNESS – l'épaisseur du condensât dans le cylindre en m;
18. CONDENSATE – la quantité de condensât en kg/s;
19. U – le coefficient global d'échange thermique en kJ / h·m<sup>2</sup>·°C;
20. DRY\_AIR – l'air sec dans le système de la ventilation en kg/s;
21. INFILTRATION\_HUMIDITY – l'humidité de l'air d'infiltration en kgH<sub>2</sub>O/kg d.a;
22. SUPPLY\_HUMIDITY – l'humidité de l'air d'alimentation en kgH<sub>2</sub>O/kg d.a;
23. EXHAUST\_HUMIDITY – l'humidité de l'air d'évacuation en kgH<sub>2</sub>O/kg d.a;

24. DEW\_POINT\_INFILTRATION - le point de rosée de l'air d'infiltration en °C;
25. DEW\_POINT\_SUPPLY - le point de rosée de l'air d'alimentation en °C;
26. MIX\_AIR\_WET\_T - la température humide de l'air mélangé en kg/s ;
27. MIX\_AIR\_DRY\_T - la température sèche de l'air mélangé en kg/s;
28. MIX\_AIR\_DEW\_POINT - le point de rosée de l'air d'alimentation en °C;
29. MIX\_AIR\_HUMIDITY - l'humidité de l'air mélangé en kgH<sub>2</sub>O/kg d.a;
30. DEW\_POINT\_EXHAUST - le point de rosée de l'air d'évacuation en °C;
31. MIX\_AIR - la quantité de mélange ( l'air d'alimentation et l'air d'infiltration ) en kg/s;
32. STEAM\_IN\_VENTIN - la vapeur dans l'air mélangé à l'entrée en kg/s;
33. PASS\_TIME – le temps écoulé entre l'entrée et la sortie du papier, en s ( seconde ) ;
34. CONDENSATE\_BEHAVIOR – l'état du condensât, 0 représente flaque, 1 représente cascade, 2 représente anneau;
35. STEAM\_PRESSURE1 – la pression de vapeur saturée dans la 1<sup>e</sup> section en kPa ;
36. STEAM\_PRESSURE2 – la pression de vapeur saturée dans la 2<sup>e</sup> section en kPa ;

37. STEAM\_PRESSURE3 – la pression de vapeur saturée dans la 3<sup>e</sup> section en kPa ;
38. STEAM\_PRESSURE4 – la pression de vapeur saturée dans la 4<sup>e</sup> section en kPa ;
39. STEAM\_PRESSURE5 – la pression de vapeur saturée dans la 5<sup>e</sup> section en kPa ;
40. STEAM\_PRESSURE6 – la pression de vapeur saturée dans la 6<sup>e</sup> section en kPa ;
41. STEAM\_OUTLET\_PRESSURE – la pression de vapeur saturée à la sortie de sécherie en kPa ;
42. INFILTRATION\_AIR – l'air d'infiltration dans le système de ventilation en %;
43. STEAM\_ALARM – si la pression de vapeur dans le cylindre est plus haute que la pression maximale, le modèle peut émettre une alarme ;
44. VENTILATION\_ALARM – si la température dans la hotte est moins que la température de rosée, le modèle peut émettre une alarme.

## Bibliographie

1. D. Di Ruscio., J. G. Balchen., "State Space Model for the TMP Process", CONTROL SYSTEMS'92 Dream vs . Reality : Modern Process Control in the Pulp and Paper Industry, Chateau Whistler Resort Whistler, B.C. 45 (17): 107-114 ( 1992 )
2. P. E. Wellstead., W. P. Heath., " TW-Dimension Control Systems : Application to the CD and MD Control Problem", CONTROL SYSTEMS'92 Dream vs . Reality : Modern Process Control in the Pulp and Paper Industry, Chateau Whistler Resort Whistler, B.C. 45 (7): 39-44 ( 1992 )
3. S. A. DeWitt., P. H. Wang., "Adaptive Predictive Nonlinear Control – Part 3 : Advanced Control Development, Simulation Testing and Mill", CONTROL SYSTEMS'92 Dream vs . Reality : Modern Process Control in the Pulp and Paper Industry, Chateau Whistler Resort Whistler, B.C. 45 (21): 135-148 ( 1992 )
4. A. J. Niemi., C . Bäckström ., "Automatic Observation of Dry Lin on Wire for Wet End Control of the Paper Machine", CONTROL SYSTEMS'92 Dream vs . Reality : Modern Process Control in the Pulp and Paper Industry, Chateau Whistler Resort Whistler, B.C. 45 (38): 261-266 ( 1992 )
5. J. Saltin., "Dynamic modeling of paper quality", CONTROL SYSTEMS'96, Session 11-Paper Machine III pp. 217-220 ( 1996 )
6. M. S. Laurikkala., M. T. Vuoti., T. J. Huhtelin., H. N. Koivo., "Paper Quality Control by Utilizing New Consistency Measurement Capabilities", CONTROL SYSTEMS'96, Session 5-Headbox and Wet-End pp. 91-94 ( 1996 )
7. A. I. Nissinen., H. N. Koivo., T. J. Huhtelin., "Headbox Control Using Multivariable PI Controller Implemented in Distributed Automation System", CONTROL SYSTEMS'96, Session 5-Headbox and Wet-End pp. 95-98 ( 1996 )
8. A. Tuladhar., M. Davies., C. Yim., G. R. Woods., "Headbox Modeling and Wet End Pressure Pulsation Analysis", CONTROL SYSTEMS'96, Session 5-Headbox and Wet-End pp. 99-106 ( 1996 )
9. Karlsson, M., "On-Line Study And Mathematical Modeling of A Paper Dryer Section", Ph. D. thesis, Univ. Abo Akademi, Turku, Finland ( 1984 ).
10. Knight, R.L., L. A. Kirk., "Simulation of The Paper Machine Drying Section", International Water Removal Symposium British Paper and Board Industries Federation, London ( 1975 )
11. Lemaitre., J. Veyre., B. Lebeau., C. Foulard., "Method For Systematic Analysis of Paper Machine Multivariable Identification of A Paper Plant Under Non-Steady Condition", Proc 1980 IEEE Conf. On Adaptive Control. ( 1980 )

12. Xia,Q.J., et Y.X.Sun., "Compute Control of Basis Weight and Moisture Content for A Condenser Paper Machine", Chinese Pulp and Paper. 21 (3): 5-9 ( 1989 )
13. Rajeera Sharma., "Using Infrared Selectively for Improving Paper Quality and Production", 1986 Practical Aspects of Pressing and Drying Seminar, TAPPI Press Technology Park/Atlanta, USA. 27 (17) pp.171-178 ( 1986 )
14. I.I. Pikulik., F.Léger ., P. Bonin., P. Lavoie., F.Léger ., "Sécherie d'une Machine À Papier Étude et Dépannage", Avant- Propos, pp. 1 ( Révision, août 1997 )
15. Dahlquist., Erik Ekwall., Hakan., "Dynamic Simulators for Pulp and Paper Applications, Operator Training and Process Engineering", Proceedings of the 1998 Conference On Control Systems: Information Tools to Match the Evolving Operator Role. ( 1999 )
16. Jones, G.L., "Use of A Paper Machine Simulation Model to Determine The Constrained Optimum Operating Conditions and Sheet Mechanical Properties for Corrugating Medium," Seminar pp. 87-91 ( June 8-11, 1992 )
17. Martz., Wesley Maltais., Daniel., "Dryer Section Expert System for Dynamic Optimization of The Paper Machine", Proceedings of the 1998 TAPPI International Engineering Conference. Part 3 ( 1999 )
18. Q. J Xia., M. Rao., Y. Q. Ying., "Modeling and Control for Drying Section of Paper Machine", Whistler, B. C. CONTROL SYSTEMS'92 Dream vs . Reality : Modern Process Control in the Pulp and Paper Industry, , Chateau Whistler Resort Whistler, B.C. 45 (2) ( 1992 )
19. William. C. Strand., Tom Reichert., et Andy Filler "Control and Optimization of Mechanacal Pulping Systems" TAPPI Journal ( September 2000 )
20. Takanori Miyanishi., et Hirotaka Shimada., "Improvement Of Pulp Strength And Yield By Computer Simulation of Lo-Solids Kraft Cooking" TAPPI Journal June 2001; Vol. 84; No. 6
21. Niko Nilsen., Mari Zabihian., et Kaarlo Niskanen., "KCL-Pakka: A Tool for Simulating Paper Properties" TAPPI Journal May 1998; Vol. 81; No. 5
22. William C. Strand., Olof Ferritsius., et Anders V. Mokust "Use of Simulation Models in the On-Line Control and Optimization of the Refining Process" TAPPI Journal November 1991; Vol. 74; No. 11
23. Koponen, J., Tervola, P., "Dynamic Simulation of a DD-washer (in Finnish)", Seminar on Simulation in Pulp and Paper Industry, Ammattien Edistämislaitos Vantaa, 9-10.4 ( 1997 )

24. Martin Ollus., Kalle Kuhakoski., Anne Niemenmaa., "Systems for Support of Process Operations", <http://ims.toyo-cng.co.jp/pub> ( 2000-07 )
25. Koskinen, K., Kuhakoski, K., Niememmaa, A., Ollus, M., Koponen, J., Mönkkönen, M., Pulkkinen, E., Tervola, P., and Uusitalo, M., "A Support System for Start – Up, Operation and Maintenance (in Finnish)", Automation 97 Seminar 23-25.9 (1997), Finnish Society of Automation, Helsinki. ( 1997 )
26. " Simulation, A Powerful Tool for Industry ", <http://www.Simtronics.com> ( 2000-05 )
27. Shaun A. Reardon., Michael R. Davis., et Peter E. Doe " Computational Modeling of Paper Drying Machines" TAPPI Journal Septembre 2000.
28. Riepen. M., Kiiskinen H., Talja. R. et Timofeev. O "Single Sided Steam Impingement Drying of Paper, a Modelling Study" TAPPI Journal May 2000; Vol. 83; No. 5
29. BjÖrn Wilhelmsson, Stig StenstrÖm, Lars Nilsson, Rikard Krook, HÅkan Persson, et Roland Wimmerstedt " Modeling Multicylinder Drying-Validation of a New Simulation Program" TAPPI Journal April 1996; Vol. 79; No.4
30. " VISION RELEASE 3.2 (DRC) ", Centre Recherche en Sécherie à Université Texas A&M. <http://drc.tamu.edu> ( 2000-10 )
31. "CADSIM Plus - The Dynamic Process Simulator...Running the Example Drawings", <http://www.aurel.bc.ca> ( 1999-05 )
32. H .- C . Lavallée ., "Opérations fondamentales des pâtes et papiers Volume II – Séchage" Notes de Cours pp. 3-20 ( Hiver 1994 )
33. R . G . LeBel ., "Pressage et Séchage du Papier", Université LAVAL pp. 2-12 ( 1970 )
34. K.C.Hill., "Paper Drying", Pulp and Paper Manufacture Volume 7, 3è éd., Paper Machine Operations, chapter 12, pp. 282-305 ( 1991 )
35. White, R . E., "Residual Condensate, Condensate Behavior, and Siphoning in Paper Dryers", Tappi 31 (4) : 228 ( 1956 )
36. White, R . E., et Higging, T . W., "Effect of Fluid Properties on Condensate Behavior," Tappi 41 ( 2 ) : 71 ( 1958 )
37. Rounds, D.A., "Ribbed Shell Heat Transfer", International Water Removal Symposium, pp. 35- 39 (1982)
38. Appel, D. W., Hong, S . H., "Portray Drying Drum," U . S . Patent 3, 724, 094 ( April 3, 1973 )

39. R. D. Wiedenbeck., "Steam Heated Dryers", Practical Aspects Of Pressing and Drying Seminar pp. 149 (1984 )
40. Horace P. Fishwick., "Paper Machine Steam and Condensate System", 1984 Practical Aspects of Pressing and Drying Seminar pp. 163
41. Jarmo Pudas ., "Steam and Condensate Systems", a series of books book 9, Papermaking Part 2, Drying chapter 8, published by Fapet OY Finland, pp. 238 (2000 )
42. Peter J. Walker., "The Functions of Air and Air Systems in The Drying of Paper", 1984 Practical Aspects of Pressing and Drying Seminar. pp. 127
43. J . A. Villalobos., "Air Hoods and Types of Dryers," 1984 Practical Aspects of Pressing and Drying Seminar. pp. 141
44. Gunnar, Gavelin., "Paper Machine Design and Operation", Chapter 6 Drying of Paper, Angus Wilde Publications Inc, Canada, pp. 149-197 ( 1998 )
45. Torbjörn Hansson., Christer Fellers., Myat Htun., "Drying Strategies and A New Restraint Technique to Improve Cross – Directional Properties of Paper", Fondamental of Paper Making pp. 742 – 781 ( 1989 )
46. D.H.Page., P.A.Tydeman., "Physical Processes Occurring During The Drying Phase", Fundamental of Paper Making pp. 371 – 396 ( 1989 )
47. H. S. Welsh., Clupak Inc., "Fundamental Properties of High Stretch Paper", Fundamental of Paper Making pp. 397- 409 ( 1989 )
48. Michel Barbe., "Note de Cour Physique des Fibres et du Papier." PNA-6004-PNA-1006 U.Q.T.R (1999)
49. "Paper Machine Drying Rate", TAPPI 1992 Technical in Formation Sheets, Sheet 0404 publié 1986, 1984TAPPI". ( 1992 )
50. Leiviskä, K., "Control Systems", In Leiviskä K., (editor): Process Control. Papermaking Science and Technology, Book 14, Fapet Oy, Jyväskylä, Finland, pp. 13-17 (1999)
51. John D . Peel., "Drying and The Dryer Section", Paper Science and Paper Manufacture chapter 11 pp. 171-186 ( 1997 )
52. W.G.Corboy, Jr., "Paper Machine Operations", Pulp and Paper Manufacture Volume 7, 3è éd., pp. 323-325 ( 1991 )
53. Jarmo Pudas ., "Steam and Condensate Systems", Paper Making Part 2, Drying Chapter 8 pp. 235-295 ( 2000 )

54. Gregory L. Wedel., "Spoiler Bars", 1986 Practical Aspects of Pressing and Drying Seminar pp. 207-213 ( 1987 )
55. "1951 TAPPI data sheets," Average Evaporation Drying Rates, TAPPI 1992 Technical in Formation Sheets. ( 1992 )
56. Hans Sundqvist ., "Dryer Section Ventilation and Heat Recovery," Paper Making Part 2, Drying Chapter 9 pp. 295-333 ( 2000 )
57. 0404-03 measurement of dryer condensing rates ( Continuous Method ) TAPPI 1990 – 2000 ( 2001 )
58. 0404-04 Recommended Tensions in Dryer Fabrics TAPPI 1990 - 2000
59. 0404-06 Drying and Related Ventilation Terminology TAPPI 1990 - 2000
60. TIP 0404 – 07 publié – 1970 révisé – 1994 ancien numéro. 014-17 © 1994 TAPPI approuvé par le "Water Committee of Engineering Division", ( 1994 )
61. TIS 0404 – 15 publié – 1974 révisé – 1986 ancien numéro TIS 014 – 42 © 1986 TAPPI approuvé par le "Water Committee of Engineering Division", ( 1986 )
62. TIS 0404 – 16 publié – 1974 révisé – 1988 ancien numéro TIS 014 – 42 © 1988 TAPPI approuvé par le "Water Committee of Engineering Division", ( 1988 )
63. TIS 0404 – 12 publié – 1974 révisé – 1988 ancien numéro TIS 014 – 42 © 1988 TAPPI approuvé par le "Water Committee of Engineering Division", ( 1988 )