

N° D'ORDRE : 745

50376
1979
84

50376
1979
84

THESE

présentée
à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

PAR

Abderrahman TOUZANI

OPTIMISATION DU RENDEMENT THERMODYNAMIQUE
DES SECHOIRS TEXTILES (RAMES PLANES)



SOUTENUE LE 2

030 050908 4

COMMISSION D'EXAMEN :

MEMBRES DU JURY : MM. P. VIDAL
C. MELIN
M. STAROSWIECKI
L. POVY
M. NAJIM
J. LANERES

PRÉSIDENT
RAPPORTEUR
"
EXAMINATEUR
"
INVITÉ.

إِلَىٰ أَرْبَابٍ وَرُءُوسٍ

عِزِّ الْعَرَبِ

فَرِيدَةٍ

A mes parents

Az-el-Arabe

Farida

- AVANT - PROPOS - -----

Le travail que nous présentons a été effectué au Laboratoire d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille 1 et à l'Institut Textile de France - Nord, dans le cadre du contrat CREATI-I.T.F. Nord : "Optimisation du rendement des rames sécheuses".

Nous adressons notre plus grande reconnaissance à Monsieur le Professeur Pierre VIDAL pour l'excellent accueil qu'il nous a réservé au sein de son laboratoire et pour le précieux enseignement qu'il a su nous dispenser.

Nous tenons à le remercier tout particulièrement d'avoir accepté la présidence de notre jury de thèse.

Nous sommes très heureux de pouvoir exprimer ici toute notre gratitude à Monsieur Christian MELIN, Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Compiègne, qui nous a suivi et guidé durant toute cette étude, avec intérêt et sympathie et nous a fait profiter largement de son expérience.

Que Monsieur Marcel STAROSWIECKI, Maître-Assistant à l'Université des Sciences & Techniques de Lille 1, qui nous a conseillé et dirigé tout au long de nos travaux, trouve ici l'expression de notre amicale gratitude.

Que Monsieur Lucien POVY, Maître de Conférences à l'Université des Sciences & Techniques de Lille 1, trouve ici l'expression de notre profonde gratitude pour les encouragements qu'il nous a toujours prodigués, nous faisant profiter de son expérience et de son amitié et pour avoir accepté de participer au jury de notre thèse.

Nous remercions très vivement Monsieur Mohamed NAJIM, Professeur à l'Université MOHAMED V de RABAT (Maroc), de s'être intéressé à nos travaux et de nous avoir fait l'honneur de participer à la Commission d'Examen.

Nous adressons nos remerciements à Monsieur J. LANERES, Directeur de Recherches à I.T.F.-Nord pour nous avoir apporté son expérience en matière de séchage des produits textiles, pour la coopération et l'intérêt qu'il a sans cesse porté à ce travail et de nous avoir fait l'honneur de participer à cette Commission d'Examen.

Notre travail n'a pu être mené à bien que grâce à la coopération et l'aide amicale de Monsieur J. PERRIN, Ingénieur et l'ensemble du Personnel de l'I.T.F.-Nord et de la Société URGE.

Qu'il nous soit permis ici de remercier également la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique sous les auspices de laquelle notre travail a été effectué.

Enfin, nous rendons hommage à l'esprit d'équipe qui règne dans le laboratoire où nous avons travaillé et nous adressons à chacun nos plus vifs remerciements.

- TABLE DES MATIERES -

. CHAPITRE I

- INTRODUCTION ET GENERALITE 1.1
- BIBLIOGRAPHIE..... 1.5

. CHAPITRE II

- PRESENTATION DU PROCESSUS ET ANALYSE THERMODYNAMIQUE
DE FONCTIONNEMENT

II.1. Introduction..... 11.1

II.2. Définition..... 11.1

II.3. Présentation du processus

II.3.1. Description de la rame..... 11.2

II.3.2. Les cheminées..... 11.2

II.4. Analyse du fonctionnement

II.4.1. Période d'évaporation de surface..... 11.7

II.4.2. Période d'évaporation interne..... 11.8

II.4.3. Zones de séchage..... 11.8

II.5. Analyse thermodynamique

II.5.1. Hypothèses..... 11.9

II.5.2. Cycle de l'air de séchage dans un
caisson..... 11.10

II.5.3. Bilans massiques dans un caisson..... 11.11

II.5.3.1. Transfert de masse dans un
caisson..... 11.11

II.5.3.1.1. Transfert de masse dans
un caisson..... 11.11

II.5.3.1.2. Mélangeur..... 11.12

II.5.3.1.3. Echangeur..... 11.12

II.5.4. Bilan énergétique pour un caisson.....	II.12.
II.5.4.1. Séchage du tissu.....	II.12.
II.5.4.1.1. Variation d'enthalpie du tissu entre l'entrée et la sortie du caisson.....	II.13
II.5.4.1.2. Variation d'enthalpie de l'air de séchage.....	II.13
II.5.4.1.3. Bilan enthalpique.....	II.14
II.5.4.2. Mélangeur.....	II.15
II.5.4.3. Echangeur.....	II.15
II.5.5. Cycle de l'air dans le diagramme de Mollier.....	II.16
II.6. <u>Conclusion</u>	II.18
Bibliographie.....	II.20

CHAPITRE III

- MODELISATION DU PROCEDE

III.1. <u>Introduction</u>	III.1
III.2. <u>Modélisation des échanges Air-Tissu</u>	III.3
III.2.1. Caractérisation du tissu.....	III.4
III.2.2. Construction du modèle.....	III.4
III.2.2.1. Echange de chaleur dans les couches sèches.....	III.4
III.2.2.2. Echange de chaleur dans la couche humide.....	III.6
III.2.2.3. Variation du taux d'humidité.....	III.8
III.2.2.3.1. Vitesse de séchage du tissu.....	III.8
III.2.2.3.2. Modèle.....	III.10

III.2.3. Conclusion.....	III.11
III.3. <u>Modélisation de l'état de l'air secondaire.....</u>	III.12
III.3.1. Intérêt.....	III.12
III.3.2. Modèle de l'état de l'air secondaire..	III.13
III.3.2.1. Bilan d'échange de masse.....	III.13
III.3.2.2. Bilan enthalpique de l'air de séchage.....	III.14
III.3.2.3. Modèle mathématique complet...	III.16
III.4. <u>Modèle de processus de recyclage.....</u>	III.17
III.5. <u>Conclusion.....</u>	III.20
Bibliographie.....	III.21

CHAPITRE IV

- IDENTIFICATION PARAMETRIQUE

IV.1. <u>Introduction.....</u>	IV.1
IV.2. <u>Mesures nécessaires à la validation du modèle</u>	IV.2
IV.3. <u>Campagne de mesures.....</u>	IV.3
IV.3.1. Matériel utilisé, emplacement des capteurs.....	IV.3
IV.3.2. Protocole expérimental.....	IV.5
IV.3.3. Résultats expérimentaux obtenus.....	IV.5
IV.3.3.1. Température du tissu.....	IV.5
IV.3.3.2. Humidité du tissu.....	IV.5
IV.3.3.3. Etat de l'air primaire.....	IV.10
IV.4. <u>Méthodes d'identification utilisées.....</u>	IV.11
IV.4.1. Présentation du problème.....	IV.11
IV.4.2. Algorithme d'adaptation.....	IV.13
IV.4.2.1. Méthode de gradient.....	IV.14
IV.4.2.2. Méthode axe par axe.....	IV.15

IV.5. <u>Mise en oeuvre de la procédure d'identi-</u> <u>tion</u>	IV.19
IV.5.1. Les données.....	IV.19
IV.5.2. Résultats.....	IV.20
IV.6. <u>Conclusion</u>	IV.22
Bibliographie.....	IV.35

. CHAPITRE V

- SIMULATION DU PROCESSUS - DETERMINATION DES POINTS DE CONSIGNE OPTIMAUX EN REGIME PERMANENT	
V.1. <u>Introduction</u>	V.1
V.2. <u>Modélisation du critère d'optimalité</u>	V.2
V.2.1. Transformation air primaire - air secondaire.....	V.3
V.2.2. Transformation air secondaire - air primaire.....	V.4
V.3. <u>Simulation</u>	V.8
V.4. <u>Commande optimale</u>	V.13
V.4.1. Variables de commande.....	V.13
V.4.2. Condition finale.....	V.14
V.4.3. Conditions nécessaires d'optimalité....	V.14
V.4.4. Algorithmes de minimisation.....	V.15
V.4.5. Mise en oeuvre des algorithmes.....	V.15
V.5. <u>Conclusion</u>	V.21
Bibliographie.....	V.23
- CONCLUSION GENERALE	
- ANNEXES.	

C H A P I T R E I

INTRODUCTION ET GÉNÉRALITÉS

Sous le terme "Séchage" /1,2/, on comprend généralement dans l'industrie textile, l'extraction de l'eau superficielle et de l'eau de gonflement, tout en conservant l'humidité naturelle des fibres.

A l'origine, les méthodes de séchage ont été dominées par un empirisme total, par l'emploi exclusif, dans le processus industriel, des sources d'énergie naturelles : soleil et vent.

Ce n'est qu'au début de ce siècle, qu'on a réuni et concrétisé les principes scientifiques du phénomène complexe de séchage. L'application de ces principes dans la pratique a permis l'introduction de la machine et des méthodes nouvelles dans le séchage du tissu ; Il y a apparition des premières rames sécheuses.

Actuellement, les séchoirs les plus courants sont répartis en trois types, suivant leur mode de transfert d'énergie :

- * transfert d'énergie par rayonnement : séchoirs à rayonnement
- * transfert d'énergie par contact : séchoirs à cylindres
- * transfert d'énergie par convection : rame élargisseuse qu'on appellera, par la suite, rame plane, séchoir à tambour perforé, rame à étage,....

Le tableau suivant présente les différents types de séchoirs textiles classiques./1/

Mode de sèchage	Transfert d'énergie	Guidage du milieu de sèchage	Déplacement de la matière sèche	avec/sans suralimenta-tion	Contrôle de tension	Conditions de Traitement.
Séchoir par rayonnement	rayonnement	-	Rouleaux de traction	sans	sans	à la continue
Séchoir à cylindres	par contact	-	Rouleaux/ cylindre	sans	sans	à la continue
Séchoir à tambour perforé	convection	Ventilation à travers les matrices.	Tambour perforé	avec	partiel	à la continue
Rame élargisseuse à tambour perforé	convection	Ventilation à travers les matrices	Tambour perforé	avec	avec	à la continue
Séchoir oscillant	convection	Projection d'air par tuyère	Rouleaux de traction	sans	sans	à la continue
Rame élargisseuse	convection	Projection d'air par tuyère	Chaînes de tension	avec	avec	à la continue
Séchoir à bande perforée	convection	Projection d'air par tuyère/ventil. à travers les mat.	bande perforée	avec	sans	à la continue
Hotflue	convection	Projection d'air partielle	rouleaux	sans	sans	à la continue
Séchoir à plis suspendus	convection	Circulation d'air non orientée	Barres porteuses	sans	sans	à la continue

On s'intéresse, dans le cadre de ce travail, aux séchoirs à convection. Dans ce type de machines, l'humidité est extraite par l'intermédiaire d'un gaz (généralement un mélange d'air sec et de vapeur d'eau) et évacuée à l'extérieur par des ventilateurs placés dans des cheminées.

Tous ces séchoirs sont à fonctionnement thermique et se caractérisent par une importante consommation d'énergie, dont seulement une partie est destinée à l'évaporation d'eau (de 40 à 70 % selon le tissu qu'on traite). Le problème se pose pour les industriels, d'une possibilité de réduire cette consommation, avec le souci de maintenir la "qualité" du tissu au plus haut niveau./3,4/

Sur le plan économique, les paramètres importants du processus de séchage sont définis de la façon suivante :

- **vitesse de séchage** : exprimée en masse d'eau évaporée par unité de temps.
- **rendement de séchage** : exprimé en masse d'eau évaporée par unité d'énergie fournie au séchoir.

Le but de notre recherche consiste à optimiser le rendement de séchage, tout en conservant une vitesse de défilement du tissu suffisante, de façon à ne pas engorger l'atelier de séchage et en respectant la contrainte définissant la teneur en eau résiduelle du tissu à la sortie de la rame. Celle-ci est définie par le taux de reprise de tissu, c'est-à-dire par sa teneur en eau correspondant à l'équilibre du tissu avec l'air atmosphérique.

La première partie de ce travail est consacrée à l'analyse thermodynamique du fonctionnement de la rame étudiée. Celle-ci permet de reconnaître les différentes composantes de la consommation énergétique totale et de définir les différents régimes de fonctionnement du système.

Nous établissons ensuite un modèle statique de fonctionnement de la rame, permettant d'obtenir les profils de température et d'humidité du tissu à l'intérieur de celle-ci. Celui-ci est complété par un modèle de l'évolution de l'état de l'air secondaire le long de la rame, toujours en régime stationnaire.

Dans une troisième partie, nous présentons deux méthodes d'adaptation de ce modèle aux mesures relevées sur le site. La qualité du modèle est définie au moyen d'un coût quadratique mesurant l'écart entre les valeurs réelles observées et les valeurs calculées à partir du modèle.

Le modèle obtenu est utilisé, dans une quatrième partie, suivant deux directions.

D'une part la simulation permet d'obtenir un certain nombre de courbes exprimant la consommation énergétique en fonction des paramètres d'action, d'autre part, à partir de la définition d'un critère de consommation, on détermine des points de consigne optimaux pour le processus en régime statique.

- BIBLIOGRAPHIE -

/1/ J.P. DAMBROTH

"Les différents types de séchoirs et la technique de séchage"
I.T.B. 3/1976 - Teinture/Impression/Finissage - p. 221-242.

/2/ E.O. SCHODEL

"Die Stücktrocknereigestern - heute - morgen - Textile Trockenprozesse in spannahmen"
Textilbetrieb - juillet/août 1972 - p. 63.

/3/ G. FLORIN - M. SCHOLAERT

"Analyse énergétique du séchage de tissu sur rame"
Mémoire scientifique de fin d'études - ICAM V - 1975.

/4/ J. LANERES, J. PERRIN, M. STAROSWIECKI, A. TOUZANI.

"Etude du fonctionnement des séchoirs textiles"
Bulletin Scientifique I.T.F. - Vol. 7 - N° 27 - p. 393 - août 1978.

C H A P I T R E I I

PRÉSENTATION DU PROCESSUS ET ANALYSE THERMODYNAMIQUE DE FONCTIONNEMENT

II.1 - INTRODUCTION

Nous présentons ici une analyse de fonctionnement d'une rame plane menée à l'aide d'un bilan thermique, dans le but de définir les différentes composantes de la consommation énergétique.

Le bilan thermique est effectué caisson par caisson et prend en compte les termes suivants :

- transfert de masse entre le tissu et l'air
- transfert de chaleur par convection entre le tissu et l'air
- recyclage de l'air de séchage
- pertes de chaleur.

II.2 - DEFINITION /2-2, 2-3/

Le séchage est une opération qui consiste à enlever totalement ou partiellement un liquide, en général de l'eau, d'un matériau.

Deux modes de séchage peuvent être distingués :

- . Le séchage mécanique : l'expulsion du liquide est réalisée par des forces purement mécaniques (centrifugation, compression, etc...) Ces méthodes exigent la connaissance des forces qui retiennent le liquide dans le matériau.

. Le séchage thermique : comporte deux phases

- la transformation du liquide en vapeur
- l'évacuation de la vapeur.

II.3 - PRESENTATION DU PROCESSUS

Le séchage des tissus dans l'industrie textile est réalisé dans des rames sécheuses, plusieurs types de rames (rames planes, rames à étages,...) étant employés.

Dans le cadre de cette étude, on ne s'intéresse qu'à des rames planes (fig. 11.1)

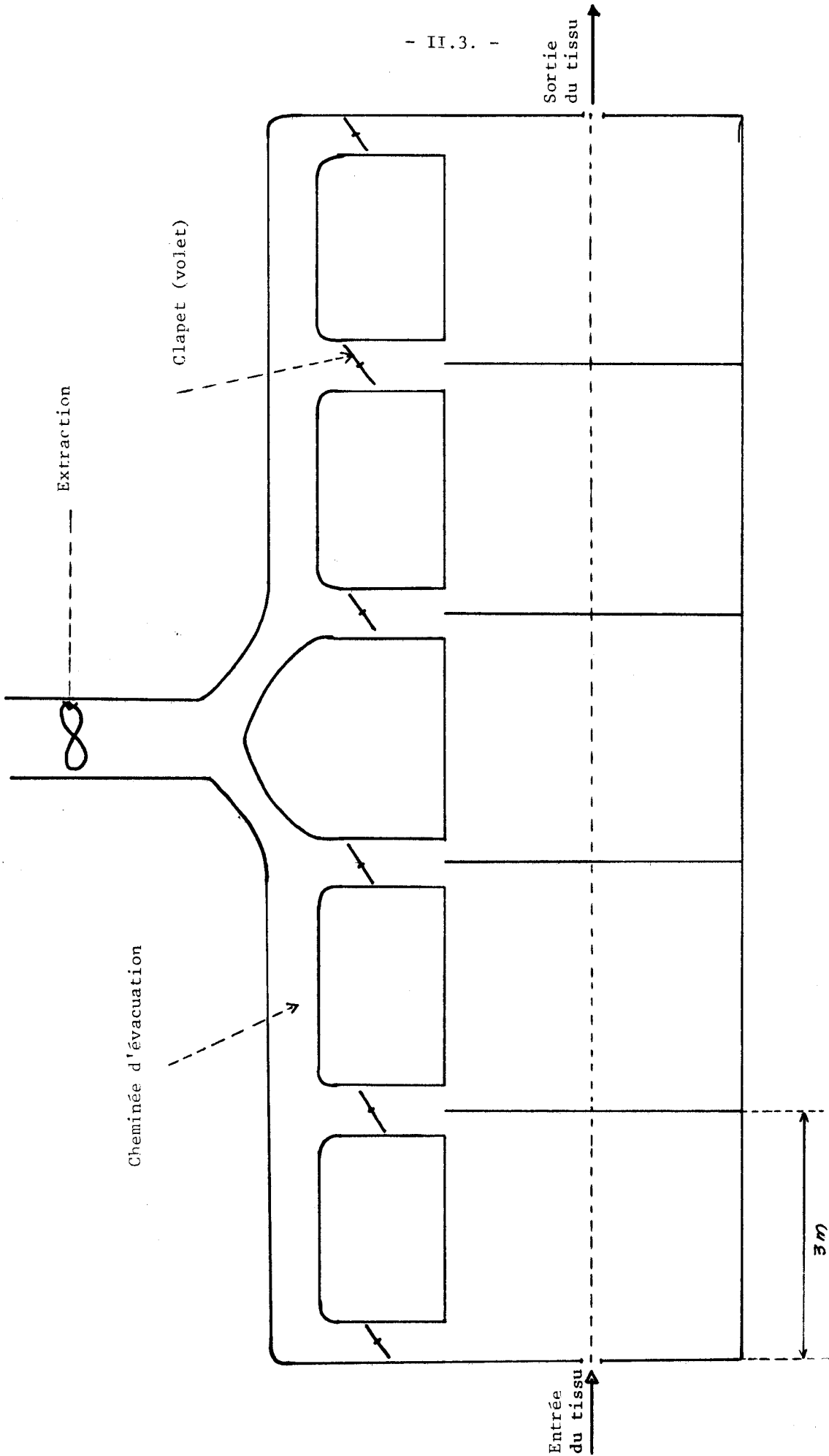
11.3.1. Description de la rame

Une rame plane (fig. 1.1) peut-être schématiquement divisée en compartiments, traversés horizontalement par le tissu. Dans chacun de ces compartiments un mélange d'air sec et de vapeur d'eau est réchauffé à travers deux échangeurs (1x1, de part et d'autre du tissu), puis projeté perpendiculairement au tissu par l'intermédiaire des buses convergentes (fig. 11.2, 11.3). Ce mélange gazeux cède au contact du tissu une partie de sa chaleur sensible, pour se charger en vapeur d'eau, avant d'être en partie évacué par des cheminées, le reste étant recyclé à l'aide de ventilateurs. L'énergie nécessaire au séchage est fournie par un fluide thermique circulant dans les échangeurs, issu d'une chaudière au fuel.

L'ensemble de l'installation est présenté figure 11.4.

11.3.2. Les cheminées

La rame étudiée possède sept cheminées. A l'exception de la première et de la dernière, elles sont situées "à cheval" entre deux compartiments, ce qui permet l'évacuation d'un mélange d'air de deux compartiments contigus. Chaque cheminée est équipée d'un volet (clapet), dont la position doit permettre le recyclage du débit d'air humide (après séchage) vers l'extérieur.



- FIGURE - II.1. -



COUPE D'UNE RAME PLANE

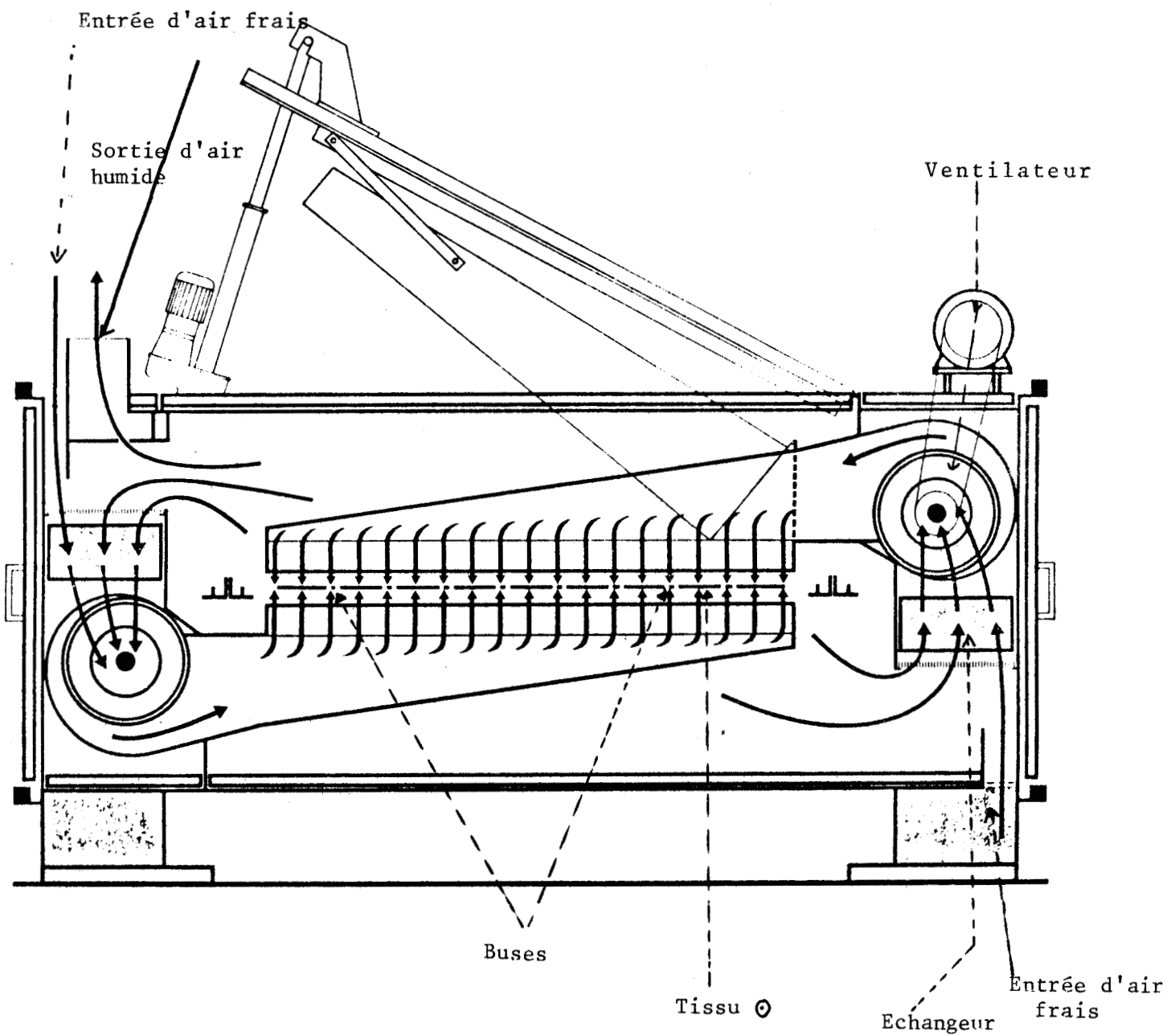


FIGURE - II.2. -



BUSES DE SOUFFLAGE

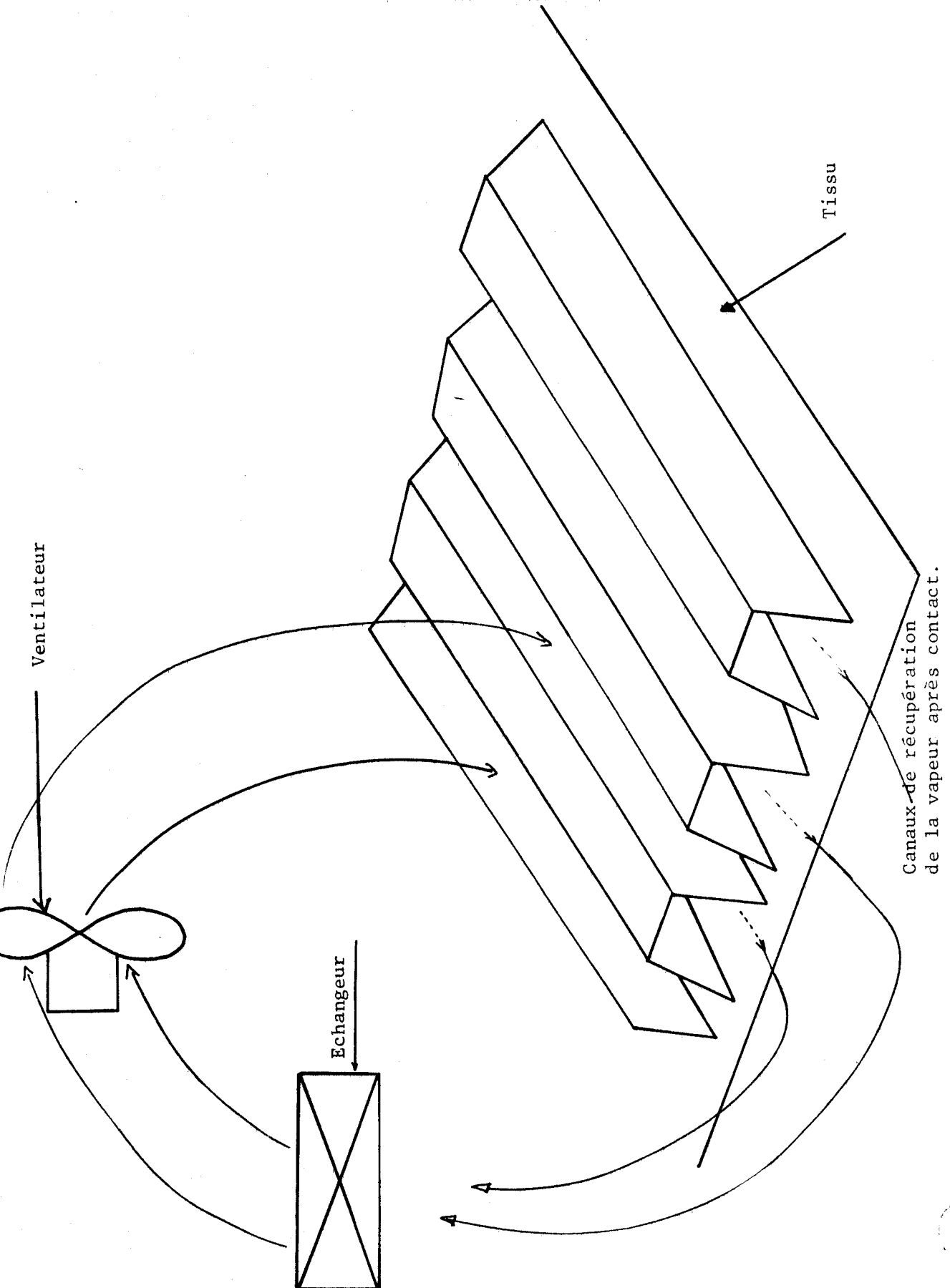


FIGURE - II.3. -

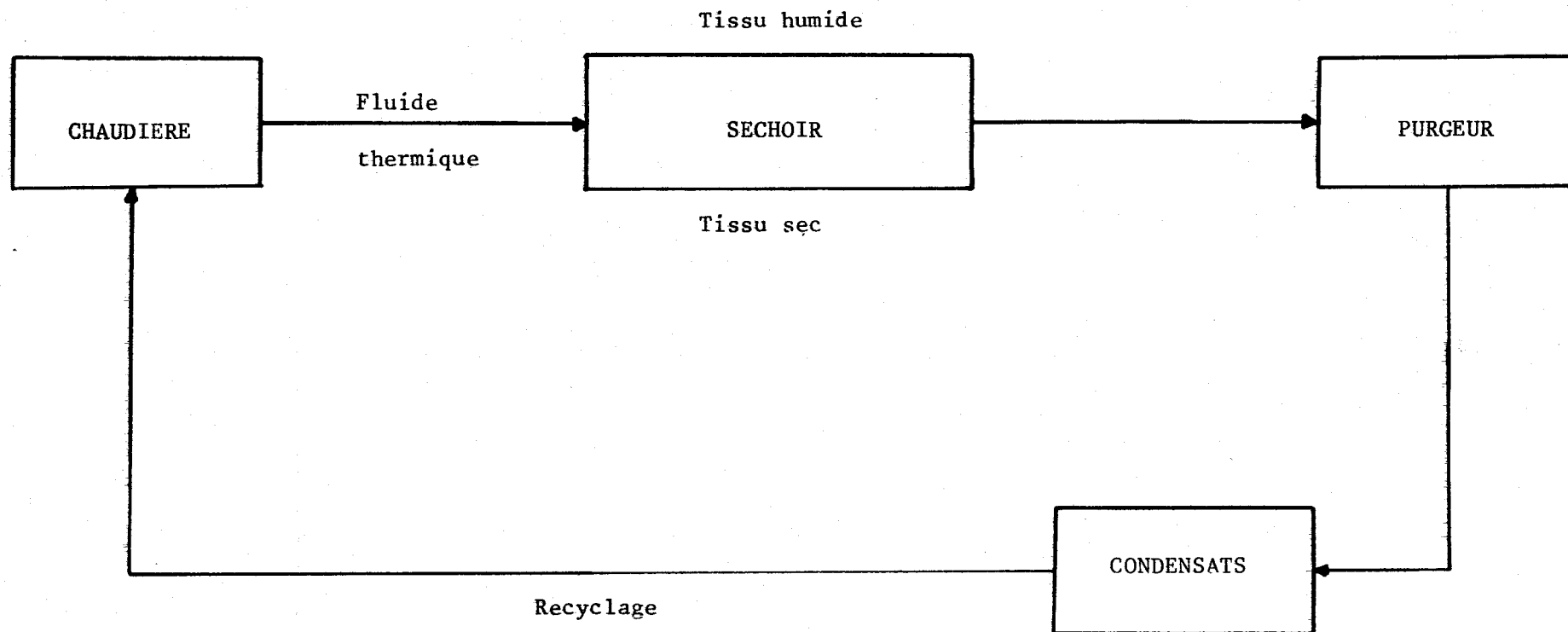


FIGURE - II.4. -



II.4 - ANALYSE DU FONCTIONNEMENT

Une première analyse du processus d'évaporation conduit à distinguer deux périodes durant la traversée du séchoir par le tissu /2-4, 2-5/

II.4.1. Période d'évaporation de surface

Le tissu est supposé suffisamment gorgé d'eau pour que, dans la période considérée, le flux de vapeur quittant la surface, quelle que soit son importance, soit égal au flux d'eau se dirigeant vers la surface. La température du régime du tissu est alors T_0 , égale à la température humide de l'air de séchage ; la tension de la vapeur à la surface : Pv_0 , est la pression de vapeur saturée à la température T_0 . Le flux de vapeur quittant la surface est donné par : /2-5/

$$(2-1) \quad \Phi_v = KS (Pv_0 - Pv)$$

où

K est un coefficient de transfert ($\text{kg/m}^2 \text{ min}$)

S la surface d'échange considérée (m^2)

Pv est la tension de vapeur moyenne de l'air de séchoir
(Pat ou mbar)

La relation (2-1) n'est valable que lorsque le tissu est effectivement porté à la température T_0 . Or il entre dans le séchoir à la température atmosphérique ; Dans ces conditions, le rôle du premier caisson est essentiellement un rôle de chauffage de tissu humide jusqu'à la température T_0 . De plus, tant que la tension de saturation à la surface du tissu est inférieure à la tension de vapeur moyenne dans l'air de séchage, il y a condensation de l'eau contenue dans l'air de séchage sur la surface du tissu.

II.4.2. Période d'évaporation interne

Pendant la période d'évaporation de surface, le flux de vapeur issu des faces du tissu est maximal. On rencontre ensuite une période transitoire qui correspond à une évaporation de surface freinée par la réduction du flux d'eau provenant de l'intérieur du tissu. Celle-ci est suivie d'une période pendant laquelle l'évaporation s'effectue à l'intérieur du tissu. Il se forme une couche sèche d'épaisseur croissante à partir de la surface et le flux de vapeur traversant la partie sèche est /2-5/

$$(2-2) \quad \Phi_v = K(e).S (P_{v_c} - P_v)$$

ou

$K(e)$ est un coefficient dépendant de l'épaisseur de la couche sèche

P_{v_c} tension de vapeur correspondant à la température T_c de la séparation entre la couche sèche et la couche encore humide du tissu.

II.4.3. Zones de séchage

L'analyse précédente conduit à proposer quatre zones de régimes thermiques pour le séchoir, chacune correspondant à un régime particulier.

- . première zone : La température du tissu humide s'élève jusqu'à la température humide de l'air de séchage. Suivant les conditions rencontrées, sa teneur en eau augmente légèrement par condensation de la vapeur contenue dans l'air.
- . deuxième zone : Elle correspond à la période d'évaporation de surface. La vitesse de séchage est constante pour des conditions constantes de température et d'humidité de l'air de séchage.

- . troisième zone : Elle correspond à la période transitoire, évaporation de surface freinée par la réduction du flux d'eau provenant de l'intérieur du tissu. La température superficielle du tissu est encore la température humide de l'air de séchage, mais la vitesse d'évaporation diminue.
- . quatrième zone : C'est la zone dans laquelle l'évaporation s'effectue à l'intérieur du tissu. La température superficielle du tissu s'élève, tandis que la vitesse d'évaporation est de plus en plus faible.

La figure (II.5) représente les différentes zones, dans l'hypothèse d'une atmosphère de séchage constante (température, teneur en eau, débit) sur toute la longueur de la rame.

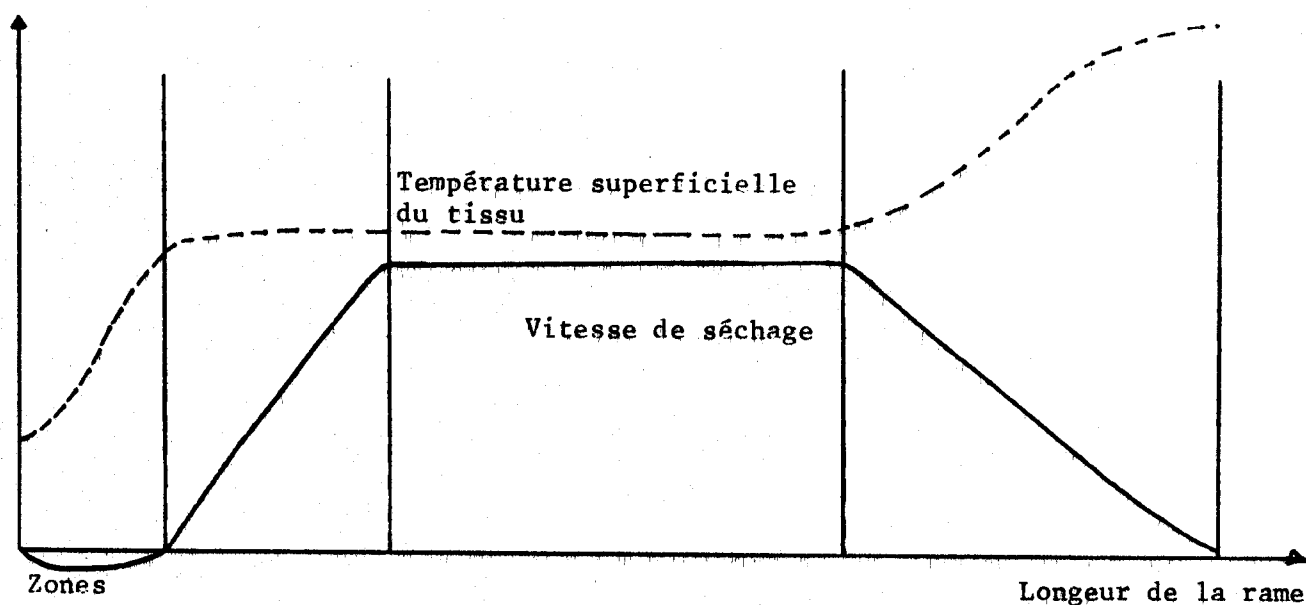


FIGURE - II.5. -

II.5 - ANALYSE THERMODYNAMIQUE GLOBALE

II.5.1. Hypothèses

Au niveau de l'étude d'un caisson, nous faisons les hypothèses simplificatrices suivantes.

- H1 - L'air de séchage est homogène avant et après contact avec le tissu.
- H2 - La température superficielle du tissu varie peu le long du caisson.
- H3 - Une fraction $(1 - \alpha)$ de l'air du caisson est recyclée après contact avec le tissu. Les échanges avec l'air atmosphérique et avec les autres caissons sont résumés par la fraction (α) d'air destinée à remplacer celui évacué par les cheminées. Ces échanges sont supposés être localisés dans un mélangeur situé avant l'échangeur.

II.5.2. Cycle de l'air de séchage dans un caisson

La figure(II.6) présente le cycle subi par l'air de séchage dans le caisson.

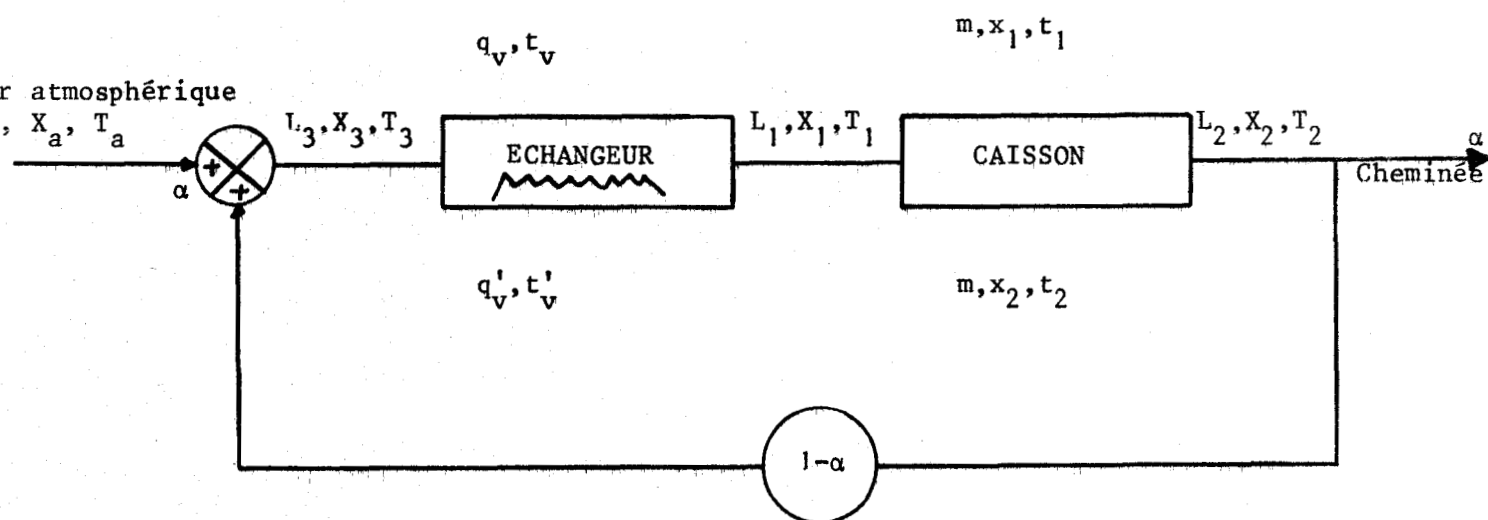


FIGURE - II.6. -

Les lettres majuscules représentent l'état de l'air de séchage, les minuscules celui de la matière à sécher.

Les humidités sont X (ou x) exprimées en kg d'eau par kg d'air sec (ou tissu sec).

(L_1, X_1, T_1) définit l'état de l'air de séchage avant contact avec le tissu : débit d'air sec (kg air sec/min), humidité (kg eau/kg air sec), température ($^{\circ}\text{C}$)

(L_2, X_2, T_2) : état de l'air de séchage après passage sur le tissu, on a évidemment $L_2 = L_1$.

(L_3, X_3, T_3) : état de l'air de séchage avant l'échangeur, on a $L_3 = L_1$

(L_0, X_0, T_0) : état de la fraction de l'air de séchage qui vient remplacer la partie évacuée par les cheminées.

(m, x_1, t_1) ; (m, x_2, t_2) état du tissu avant et après le caisson : débit du tissu sec (kg/min), humidité (kg eau/kg tissu sec) température ($^{\circ}\text{C}$).

$(qv, tv), (qv, t'v)$: état du fluide thermique avant et après l'échangeur : débit, température ($^{\circ}\text{C}$).

II.5.3. Bilans massiques dans un caisson

II.5.3.1. Transfert de masse dans un caisson

II.5.3.1.1. Echange air séchage tissu

La quantité d'eau enlevée au tissu par unité de temps est : $m (x_1 - x_2)$ avec $(x_2 < x_1)$, cette eau se retrouve à l'état de vapeur dans l'air de séchage, après passage sur le tissu et on a :

$$L_2 = L_1 = L$$

$$(2-3) \quad X_2 - X_1 = \frac{m}{L} (x_1 - x_2)$$

$T_2 < T_1$ la température de l'air après séchage est inférieure à la température de l'air avant séchage.

II.5.3.1.2. Mélangeur

A l'intérieur de la rame, le mélangeur n'a pas d'existence réelle ; nous faisons l'hypothèse que l'air évacué d'un caisson est remplacé par une quantité d'air atmosphérique suivant les règles :

Le débit d'air humide recyclé est $(1 - \alpha) L (1 + X_2)$,
le débit d'air sec étant inchangé $L_3 = L$
d'où

$$(2-4) \quad X_3 = (1 - \alpha) X_2 + \alpha X_a$$

II.5.3.1.3. Echangeur

Il n'y a pas de transfert de masse, le débit d'air sec, traversant l'échangeur ne varie pas $L_3 = L$ ainsi que son humidité

$$(2-5) \quad X_3 = X$$

et, en utilisant (2-3), (2-4) et (2-5) on obtient l'équation suivante :

$$(2-6) \quad X_1 - X_a = \frac{m}{L} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (x_1 - x_2)$$

$\frac{m}{L} ((1 - \alpha)/\alpha)$: est constant et ne dépend que des caractéristiques physiques de la matière à sécher et de la rame. L'équation ci-dessus exprime la variation de l'humidité de l'air en fonction de l'eau évaporée provenant du tissu.

II.5.4. Bilan énergétique pour un caisson

Nous faisons l'hypothèse que toutes les transformations s'effectuent à pression constante, égale à la pression atmosphérique.

II.5.4.1. Séchage du tissu

II.5.4.1.1. Variation d'enthalpie du tissu entre l'entrée et la sortie du caisson

Le tissu humide est considéré comme un mélange de tissu sec et d'eau. Mais il existe une action physique entre les deux constituants du mélange qui se traduit, en particulier, par l'existence d'une énergie de liaison entre les molécules d'eau et les fibres du tissu. Dans ce sens, l'énergie d'une masse $m(1+x)$ du tissu humide est supérieure à l'énergie d'une masse (m) de tissu sec et d'une masse (mx) d'eau libre, la différence constituant la chaleur de désorption de l'eau contenue dans le tissu. Si celle-ci peut-être négligée lorsque le tissu est gorgé d'eau, il n'en est plus de même lorsque sa teneur en eau diminue. La chaleur de désorption ne sera pas prise en compte au niveau de l'enthalpie du tissu, mais seulement de façon globale au niveau de l'équation du bilan enthalpique de l'échange air-tissu. Dans ces conditions, on écrira l'enthalpie du tissu à l'entrée et à la sortie du caisson comme :

$$(2-7) \quad \begin{cases} H_{t1} = m(C_{pt} + x_1 C_{pe})t_1 \\ H_{t2} = m(C_{pt} + x_2 C_{pe})t_2 \end{cases}$$

avec C_{pt} chaleur spécifique du produit anhydre (k cal/kg °C)

C_{pe} chaleur spécifique de l'eau liquide (k cal/kg °C)
dans les conditions du caisson.

II.5.4.1.2. Variation d'enthalpie de l'air de séchage

$$(2-8) \quad \begin{cases} H_1 = L (C_{pa} T_1 + X_1(\lambda_0 + C_{pv} T_1)) \\ H_2 = L (C_{pa} T_2 + X_2(\lambda_0 + C_{pv} T_2)) \end{cases}$$

avec C_{pa} , C_{pv} chaleurs spécifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau dans les conditions du caisson.

λ_0 : chaleur latente d'évaporation de l'eau à 0°C sous la pression atmosphérique.

II.5.4.1.3. Bilan enthalpique

La variation d'enthalpie de l'air de séchage peut-être décomposé en trois termes :

- variation d'enthalpie du tissu humide
- chaleur de désorption de l'eau évaporée
- pertes par les parois.

$$(2-9) \quad H_2 - H_1 = H_{t1} - H_{t2} + C.D + H \text{ pertes}$$

En supposant que la chaleur de désorption de l'eau est une fonction de l'humidité et de la température du tissu, le bilan enthalpique prend la forme :

$$(2-10) \quad L (C_{pa} (T_2 - T_1) + \lambda_0 (X_2 - X_1) + C_{pv} (T_2 X_2 - T_1 X_1)) =$$

$$m (C_{pt} (t_1 - t_2) + \Phi (t, x) (x_1 - x_2) + C_{pe} (x_1 t_1 - x_2 t_2) + H \text{ pertes})$$

avec (t, x) température et humidité moyennes du tissu dans le caisson.

Remarques :

Si l'on se place dans une zone où l'on observe une évaporation de surface, la température du tissu ne varie pas et est égale à la température humide moyenne de l'air de séchage T_H . On a dans ces conditions :

$$(2-11) \quad L (C_{pa} (T_2 - T_1) + \lambda_0 (X_2 - X_1) + C_{pv} (T_2 X_2 - T_1 X_1)) =$$

$$m(x_1 - x_2) \left[\Phi \left(T_H, \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + C_{pe} T_H \right] + H \text{ pertes}$$

- * Le débit d'air sec L , ne dépend que des caractéristiques du ventilateur et de l'état de l'air de séchage.
- * Le débit de tissu anhydre m , dépend de la vitesse d'avance du tissu dans la rame et de ses caractéristiques
- * La chaleur de désorption peut-être négligée lorsque le tissu est gorgé d'eau.

11.5.4.2. Mélangeur

H_2 est l'enthalpie de l'air recyclé. Soit H_a l'enthalpie de l'air de remplacement on a :

$$(2-12) \quad H_3 = (1-\alpha) H_2 + \alpha H_a$$

en explicitant les termes de (2-12), on obtient :

$$(2-13) \quad L(C_{pa}^3 T_3 + X_3(\lambda_0 + C_{pv}^3 T_3)) = (1-\alpha) L(C_{pa}^2 T_2 + X_2(\lambda_0 + C_{pv}^2 T_2)) + \alpha L(C_{pa}^a + X_a(\lambda_0 + C_{pv}^a T_a))$$

avec C_{pa}^i , C_{pv}^i chaleurs spécifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau à la température T_i

Compte-tenu de (2-4) on obtient :

$$(2-14) \quad C_{pa}^3 T_3 + C_{pv}^3 T_3((1-\alpha) X_2 + \alpha X_a) = (1-\alpha) (C_{pa}^2 + C_{pv}^2 X_2) T_2 + \alpha (C_{pa}^a + C_{pv}^a X_a) T_a$$

11.5.4.3. Echangeur

Compte-tenu des hypothèses, la composition d'air de séchage ne varie plus après l'échangeur. On a donc simplement ici une élévation de température qui se traduit par une augmentation de l'enthalpie du mélange.

$$(2-15) H_1 - H_3 = L(C_{pa}(T_1 - T_3) + X_1(\lambda_0 + C_{pv}(T_1 - T_3)))$$

Cette augmentation d'enthalpie est égale à l'énergie fournie par le fluide thermique diminuée des pertes (rayonnement, chaînes....)

On représente schématiquement le mouvement de l'air à l'intérieur de la rame, aux différentes étapes (fig. II.7)

- échange tissu air de séchage
- évacuation de l'air secondaire par les cheminées et recyclage
- mélangeur
- échangeur
- ventilateur

II.5.5. Cycle de l'air dans le diagramme de Mollier

Le diagramme de Mollier permet de représenter aisément la variation d'enthalpie de l'air humide notée H , en fonction de la teneur en humidité X , de la température T et de l'humidité relative, qu'on appellera ϕ , /2-6,2-8/

Les points définis dans le paragraphe (II.5.4.), reportés sur le diagramme de Mollier, permettent de définir le cycle thermodynamique de l'air de séchage (fig. II.8).

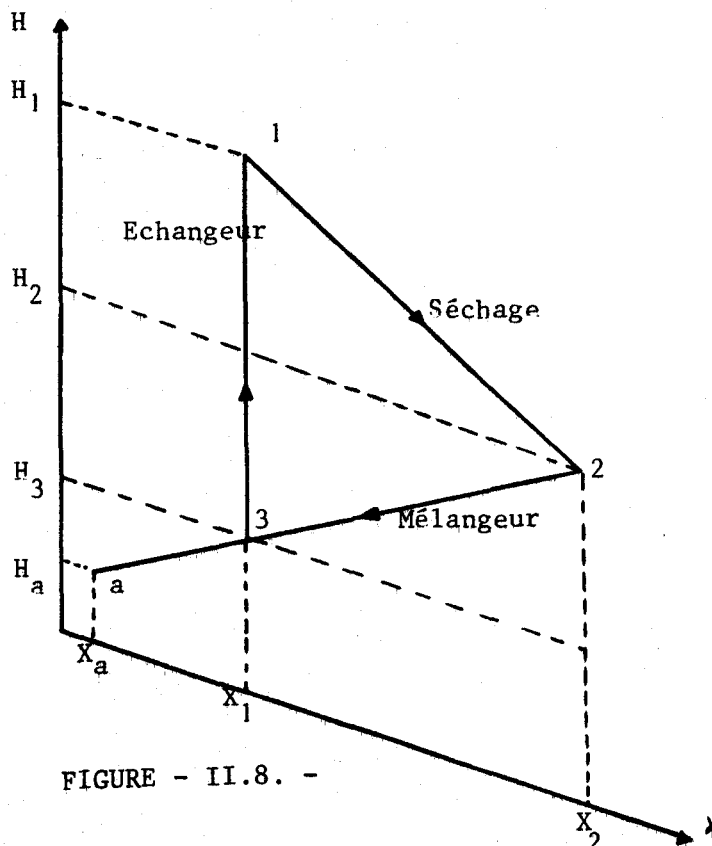


FIGURE - II.8. -

MOUVEMENT DE L'AIR A L'INTERIEUR
DU CAISSON AUX DIFFERENTES ETAPES.

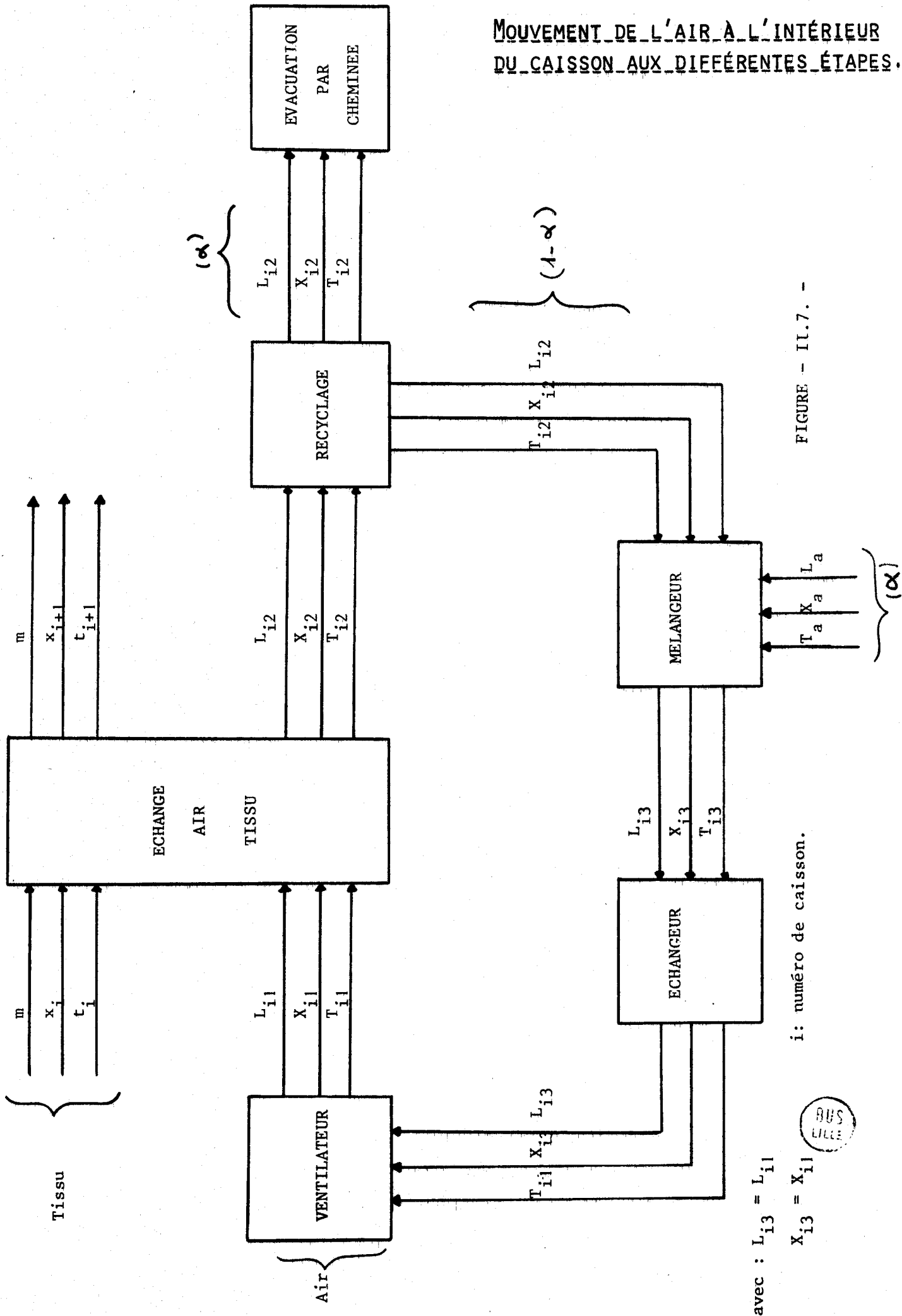


FIGURE - II.7. -

De plus nous avons :

- débit d'eau évaporée : $m(x_1 - x_2) = L(X_2 - X_1)$
- dépense énergétique : $Q = H_1 - H_3 + p \text{ ventilateurs}$
- rendement de séchage : $\rho = \frac{m(x_1 - x_2)}{Q}$ (pour un caisson)

- 1 - Le point 1 est défini par la donnée de la température et de l'humidité de l'air de séchage auxquelles correspondent la pression de saturation P_{v0} et la pression de vapeur moyenne P_v en période d'évaporation de surface, on peut, alors connaissant l'humidité initiale du tissu, calculer la variation de celle-ci le long du caisson (si l'on identifie le coefficient de transfert $K(x)$).
- 2 - Connaissant le temps de séjour de la matière dans le caisson (vitesse d'avance du tissu) ainsi que les pertes (chaînes, parois...) on en déduit le point 2.
- 3 - La position du point 3 dépend du taux de recyclage $(1-\alpha)$ ainsi que des conditions (température et humidité) de l'air "frais". Celui-ci peut provenir de l'extérieur (air atmosphérique), mais aussi des autres caissons et il est souhaitable d'étudier l'influence des cheminées au point de vue couplage entre les caissons.
- 4 - L'énergie fournie par le fluide thermique permet le passage du point 3 au point 1.

II.6 - CONCLUSION

Le bilan thermodynamique caisson par caisson permet le calcul de la consommation énergétique à partir des mesures définissant l'état de l'air de séchage aux points 1, 2, 3 de son cycle dans le diagramme de Mollier. Mais il faut bien remarquer qu'en aucun cas les équations du bilan

ne peuvent constituer un modèle du processus. En effet, il faudrait alors leur adjoindre les équations de transfert de masse (2-1) (2-2). Si ceci semble possible dans la phase d'évaporation de surface, il n'en est rien pour la phase d'évaporation interne. En effet, les hypothèses ayant servi à l'établissement du bilan ne prennent pas en compte de gradients de températures aussi bien dans l'épaisseur du tissu, que le long du caisson. On ne possède ainsi aucune équation permettant de calculer l'échauffement du tissu, ni le flux de vapeur quittant sa surface. Par ailleurs, il est difficile de caractériser les taux de recyclage $(1-\alpha)$ et les conditions de l'air "frais" qui dépendent d'autres paramètres, en particulier la position des volets d'extraction.

Par contre, à partir des mesures citées plus haut et des mesures de débit et d'humidité dans chacune des cheminées, il est possible d'exprimer, pour un régime de fonctionnement déterminé, la vitesse moyenne et le rendement de séchage.

- BIBLIOGRAPHIE -

-
- /2-1/ C. MELIN, M. STAROSWIECKI, A. TOUZANI.
"Optimisation du rendement thermodynamique des séchoirs textiles
(rames planes)"
Rapport d'avancement des travaux - décembre 1977 - CREATI/ITF-Nord.
- /2-2/ A. DASCALESCU.
"Le séchage et ses applications industrielles"
Editions Méridiennes - DUNOD-Paris - 1969.
- /2-3/ O. KRISCHER - KROLL.
"Bases scientifiques de la technique de séchage"
Techn. de séchage - 2ème Edition, springer-verlag. - Tomes 1 et 2 - 1963
- /2-4/ C.COMARIN.
"Technique du séchage"
Courrier des Etablissements NEU - N° 67 - septembre 1975.
- /2-5/ R. GOENAGER.
"Séchage des solides et des liquides"
Technique de l'Ingénieur J3 - 1965.
- /2-6/ SOLIGNAC.
"Diagramme de Mollier et séchage par air chaud"
E.D.F. 1974, HC 342 T 208.
- /2-7/ KNEULE.
"Le séchage" - Eyrolles 1964.
- /2-8/ C. COMARIN.
"Diagramme de l'air humide (Mollier H,X)
Courrier NEU - 1972.
- /2-9/ R. BURGHOLZ.
"Le réglage de l'humidité de l'air évacué des sècheuses à parcours de
matière textile".
Textil praxis, novembre-décembre 1960 - p. 1151-1157, 1271-1279.

CHAPITRE III

MODÉLISATION DU PROCÉDÉ

III.1. INTRODUCTION

De manière très générale, on peut définir un modèle comme un instrument capable de se substituer au procédé réel, et permettant de réaliser plus facilement les expériences adaptées à des études précises [3-1, 3-2]

Dans ce sens, un modèle peut être constitué par un système d'équations dont la réalisation (sur ordinateur par exemple) permet de prédire l'évolution de grandeurs caractéristiques de procédé réel.

En règle générale, on construit un modèle afin d'améliorer le contrôle que l'on désire exercer sur le processus. Cette amélioration peut être obtenue de différentes manières, en particulier par :

- Simulation et constatation de l'"état" du processus par rapport à son fonctionnement nominal.
- Formulation d'un problème de contrôle optimal : minimisation d'un critère mathématique contraint par les équations du modèle.

Le succès de ces approches repose sur la qualité du modèle, plus particulièrement sur son aptitude à prédire les fonctionnements réels du procédé. Suivant la précision désirée, le modèle sera plus ou moins complexe, et fera appel à des concepts plus ou moins élaborés (équations différentielles ordinaires, à paramètres répartis, modèle statique ou dynamique, déterministe ou stochastique,...) [3-3].

.../...

La rame sécheuse qui fait l'objet de cette étude est essentiellement un processus à paramètres répartis de nature dynamique :

- Au niveau du tissu, l'humidité en entrée de rame est variable, non seulement dans le temps, mais aussi sur sa largeur. Les caractéristiques du tissu ne sont constantes ni en longueur ni en largeur.
- Au niveau de l'air de séchage, les humidités et les températures différentes aux différents points de la rame (fuites d'air, etc...) causent des courants de convection.
- Au niveau de la rame, la chaleur rayonnée par les parois et les chaînes a tendance à sursécher le tissu sur les lisières.

La prise en compte de ces caractéristiques conduisait à un modèle de fonctionnement très complexe, invérifiable et inutilisable. En effet, la validité d'un tel modèle ne pourrait être testée faute de mesures fiables sur le procédé, son optimisation serait très complexe et conduirait à des commandes irréalisables.

Dans ce sens, nous avons procédé à la construction d'un modèle stationnaire limité à une seule distribution spatiale dans le sens de la longueur de la rame. Son but est de prédire la distribution spatiale moyenne des grandeurs caractéristiques du tissu (température et humidité) pour une distribution spatiale donnée de l'état de l'air de séchage.

Deux modèles sont présentés. Le premier, limité aux échanges thermiques et massiques du système air tissu, utilise une caractérisation particulière du tissu due à J.N. Beard [3-4], et permet de prendre en compte la vitesse d'avance comme grandeur de réglage. Le modèle que nous développons ensuite constitue une amélioration du modèle précédent, notamment par une prise en compte plus générale de la vitesse de séchage au cours des différentes phases d'évaporation. De plus l'adjonction d'un modèle d'évolution de l'état de l'air après contact avec le tissu est proposée.

III.2. MODELISATION DES ECHANGES AIR - TISSU

La construction d'un modèle stationnaire, limité aux échanges tissu - air de séchage, a pour but de prédire les régimes stationnaires de la température et de l'humidité du tissu à l'intérieur de la rame en fonction des différents paramètres de réglage que constituent la vitesse d'avance et l'état de l'air.

De manière très classique un modèle de ce type est obtenu par l'application du principe général de la conservation d'une grandeur connue : la masse, la quantité de chaleur, la quantité de mouvement, etc.,...

Cependant dès ce niveau nous introduisons des hypothèses simplificatrices destinées à réaliser un compromis entre la complexité du modèle et la précision de ses prédictions.

h_1 : l'état de l'air humide de séchage ne varie que dans une seule direction spatiale confondue avec l'axe longitudinal de la rame.

Nous construisons donc un modèle stationnaire à une seule grandeur indépendante, l . (fig.III.1)

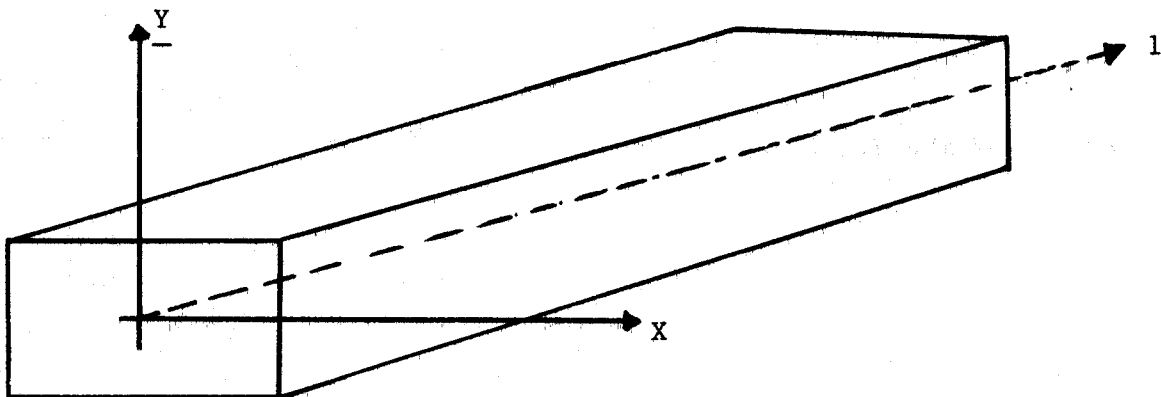


FIGURE III.1

III.2.1. Caractérisation du tissu [3-4 3-5 3-6]

A nouveau, dans le but de satisfaire un compromis entre complexité et précision, nous faisons les hypothèses suivantes relatives à l'état du tissu :

- h_2 : Il n'y a pas de gradient transversal de température ou d'humidité.
- h_3 : Le tissu est assimilé à deux couches de matières sèches séparées par une couche de matière humide fig. III.2
- h_4 : La vaporisation a lieu dans la couche humide.
- h_5 : Il n'existe pas de gradient de température ni de gradient d'humidité dans la couche humide.
- h_6 : Les couches sèches n'offrent aucune résistance à l'écoulement de vapeur vers l'extérieur.
- h_7 : Toutes les transformations à l'intérieur de la rame se font à pression constante égale à la pression atmosphérique.

III.2.2. Construction du modèle.

Compte tenu des hypothèses précédentes et du principe général de conservation, le modèle devra prendre en compte les bilans suivants :

- échange de chaleur entre les couches sèches et l'air de séchage (primaire),
- échange de chaleur entre les couches sèches et la couche humide.
- échange de masse entre le tissu et l'air.

III.2.2.1. Echanges de chaleur dans les couches sèches.

L'application du principe de conservation fournit la relation suivante :

$$(3-1) \left[\begin{array}{l} \text{chaleur} \\ \text{entrant dans} \\ \text{les couches} \\ \text{sèches} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{chaleur ajoutée} \\ \text{par l'air chaud} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{chaleur} \\ \text{sortant dans} \\ \text{les couches} \\ \text{sèches} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{chaleur} \\ \text{conduite à la} \\ \text{couche humide} \end{array} \right]$$

Le développement des termes entre crochets conduit à :

- Chaleur entrant dans les couches sèches

$$(3-2) \quad V_p S C_{pt} t_e(l)$$

représente la chaleur sensible des couches sèches à la température superficielle du tissu $t_e(l)$, l est l'abscisse de la section différentielle mesurée par rapport à l'entrée de la rame.

$C_{pt} \triangleq$ chaleur spécifique du tissu sec (k cal/kg °C)

$V_p S \triangleq$ débit du tissu sec pénétrant dans la rame (kg/min)

$\rho \triangleq$ densité surfacique du tissu sec, constante indépendante de la température du produit (kg/m²)

$S \triangleq$ surface d'échange considérée (m²/m linéaire)

$V \triangleq$ vitesse d'avance du tissu dans la rame (m/min)

- Chaleur ajoutée par l'air chaud

$$(3-3) \quad h(T_a(l) - t_e(l)).S.dl$$

représente le flux de chaleur transmis par l'air chaud de séchage, par convection aux couches sèches.

$h \triangleq$ coefficient de transfert de chaleur entre l'air chaud et le tissu (k cal/min.m².°C)

$T_a(l) \triangleq$ température sèche de l'air primaire (°C), à l'abscisse l .

- Chaleur sortant dans les couches sèches.

$$(3-4) \quad V_p S C_{pt} (t_e(l) - \delta t_e(l))$$

est la quantité de chaleur sortant par les couches sèches à l'abscisse $l + dl$.

- Chaleur conduite à la couche humide.

$$(3-5) \quad h_1 (t_e(l) - t_i(l)).S.dl$$

est le flux de chaleur transmis des couches sèches vers la couche humide, dans l'unité de volume ($S.dl$) où h_1 et $t_i(l)$ désignent respectivement le

coefficient de transfert de chaleur entre la couche sèche et la couche humide, il dépend uniquement des structures du produit, où a lieu le transfert ($k \text{ cal/min.m}^2.\text{°C}$) et de la température de la couche humide (°C).

Le rapprochement des relations (3-2) à (3-5) fournit :

$$(3-6) \quad \begin{aligned} &SV\rho C_p t_e(l) + h (T_a(l) - t_e(l)) S dl = \dots \\ &\dots = V\rho S C_p t (t_e(l) + \delta t_e(l)) + h_1 (t_e(l) - t_i(l)) S dl \end{aligned}$$

Les hypothèses classiques de continuité conduisent alors à l'équation différentielle.

$$(3-7) \quad \frac{dt_e(l)}{dl} = \frac{h}{V\rho C_p} (T_a(l) - t_e(l)) - \frac{h_1}{V\rho C_p} (t_e(l) - t_i(l))$$

III.2.2.2. Echange de chaleur dans la couche humide

La couche humide reçoit de la chaleur à partir des couches sèches suivant le processus résumé, . (fig. III.2)

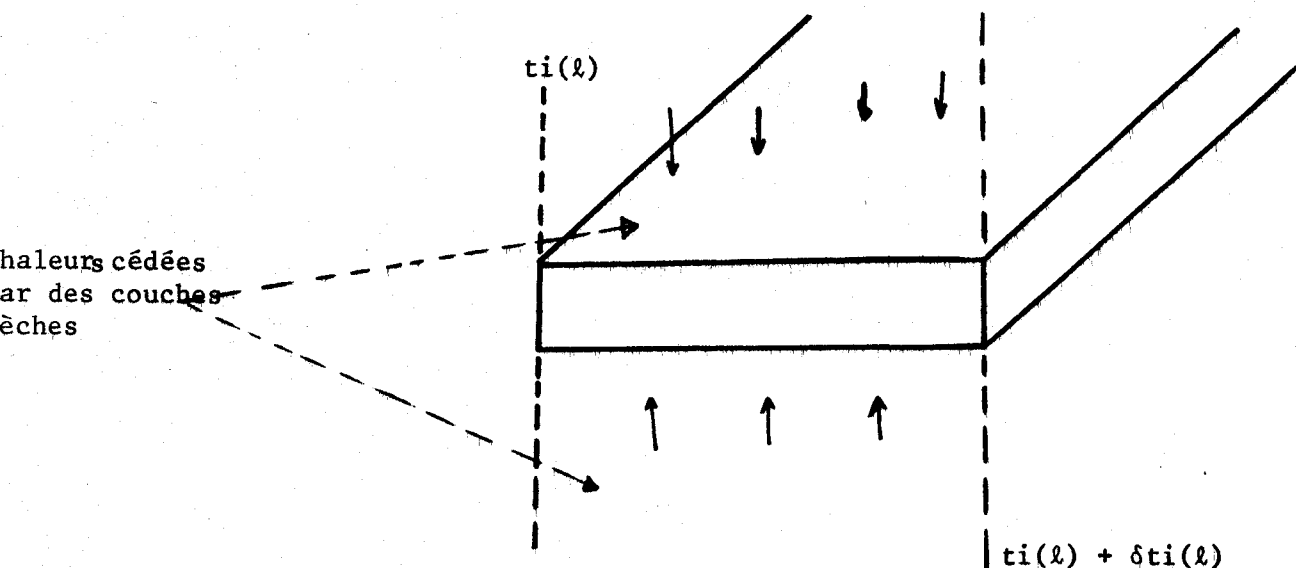


FIGURE III.2

Le principe de conservation conduit à la relation suivante :

$$\left[\begin{array}{l} \text{chaleur entrant} \\ \text{sur les faces} \\ \text{internes des} \\ \text{couches sèches} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{chaleur entrant} \\ \text{avec la couche} \\ \text{humide} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{chaleur ajoutée} \\ \text{par conduction} \\ \text{à la couche} \\ \text{humide} \end{array} \right] =$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{chaleur sortant} \\ \text{sur les faces} \\ \text{internes des} \\ \text{couches sèches} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{chaleur sortant} \\ \text{avec la couche} \\ \text{humide} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{chaleur contenue} \\ \text{dans l'eau} \\ \text{vaporisée} \end{array} \right]$$

- Chaleur entrant sur les faces internes des couches sèches,

$$(3-8) \quad V_p S \dot{C}_p t_i(l)$$

est la chaleur sensible de la couche humide à la température interne $t_i(l)$ au point d'abscisse l .

- Chaleur entrant avec la couche humide.

$$(3-9) \quad V_p S \ x(l) \ C_{pe} \ t_i(l)$$

est la quantité de chaleur transportée par la quantité d'eau associée au tissu où

$x(l) \triangleq$ taux d'humidité absolu du tissu (kg eau/kg tissu sec),

$C_{pe} \triangleq$ chaleur spécifique de l'eau à pression constante (k cal/kg °C).

- Chaleur conduite par la couche sèche modélisée par

$$(3-10) \quad h_1 (t_e(l) - t_i(l)) \cdot S \cdot dl$$

est le flux de chaleur transmis par la couche sèche vers la couche humide.

- La chaleur sortant avec la couche humide au point d'abscisse $l+dl$ est donnée par

$$(3-11) \quad S V_p C_{pe} (t_i(l) + \delta t_i(l)) (x(l) + \delta x(l))$$

Tandis que, la chaleur contenue dans l'eau vaporisée est :

$$(3-12) \quad -(V_p S C_{pe} t_i(l) \delta x(l) + V S p \lambda \delta x(l))$$

où $\lambda \triangleq$ chaleur latente de vaporisation de l'eau prise à la température de zéro absolue (k cal/kg)

En négligeant les termes de second ordre introduits par le produit $(x(l) + \delta x(l)).(t_i(l) + \delta t_i(l))$, on obtient l'équation différentielle suivante :

$$(3-13) \quad \frac{d t_i(l)}{dl} = \phi(x(l)) \left[\frac{h_1}{V_p} (t_e(l) - t_i(l)) + \lambda \cdot \frac{dx(l)}{dl} \right]$$

$$\text{avec } \phi(x(l)) = \frac{1}{C_{pt} + x(l) \cdot C_{pe}}$$

$\frac{dx(l)}{dl}$ représente la variation du taux d'humidité du tissu par unité de longueur (kg eau/kg tissu sec. min. m).

La résolution des deux équations différentielles (3-7) et (3-13) définissant les températures de la couche externe et de la couche interne du tissu, nécessite l'élaboration d'une troisième équation donnant l'évolution de l'humidité du tissu à l'intérieur de la rame.

III.2.2.3. Variation du taux d'humidité.

La variation du taux d'humidité du tissu par unité de longueur est définie par : [3-4, 3-5]

$$(3-14) \quad \frac{dx(l)}{dl} \triangleq \frac{V_s}{V_p}$$

où $V_s \triangleq$ vitesse de séchage du tissu exprimé en kg eau par m² et par minute,

III.2.2.3.1. Vitesse de séchage du tissu

Dans des conditions extérieures constantes, le séchage se déroule en deux phases [3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9] .

Première phase de séchage : La vitesse d'évaporation est constante jusqu'au moment où est atteinte une certaine humidité correspondante au point de transition.

Deuxième phase de séchage : Au delà du point de transition, il se produit une très forte diminution de la vitesse de séchage. Le niveau sec du produit se déplace vers l'intérieur du corps en conditionnant l'évolution vers la fin du séchage, la vitesse de séchage tend vers une limite dépendante de l'humidité finale du tissu, qui n'est pas nécessairement nulle.

Le point de transition entre la première phase et la deuxième phase de séchage correspond à une humidité particulière du produit mouillé, cette humidité est dite "humidité critique du produit" et la symbolise par x_c , et elle dépend des propriétés physiques du produit.

La courbe générale exprimant la vitesse de séchage en fonction du taux d'humidité du produit à section est présenté par la figure III.3 (3-11, 3-12, 3-13)

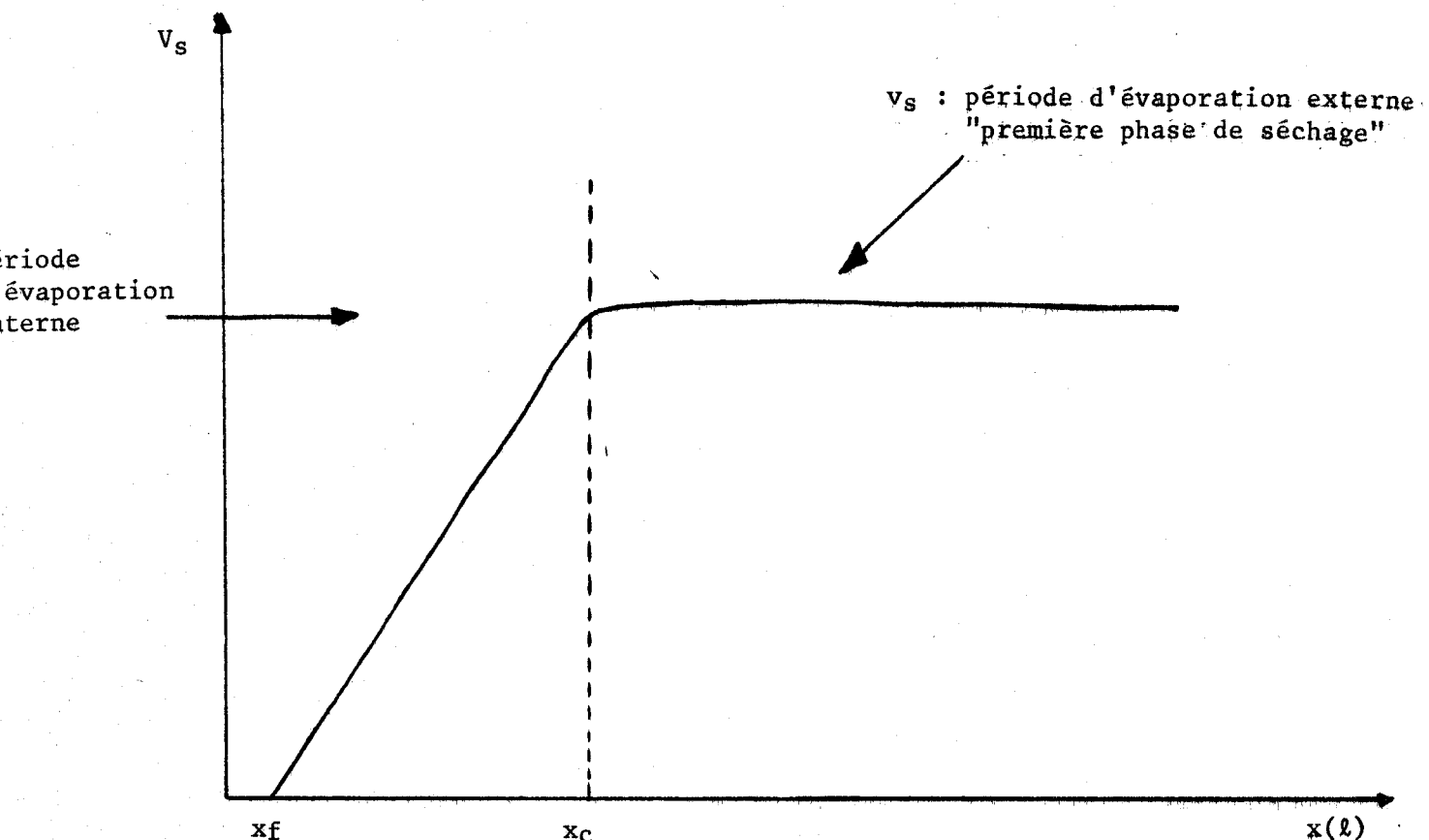


FIGURE III.3

Nous proposons l'équation, donnant la vitesse de séchage, V_s , suivante : (3-4, 3-12, 3-13,)

$$(3-5) \quad V_s = h_2 \cdot (X_2(l) - X(l)) \cdot 1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}$$

L'équation ci-dessus décrit les deux phases de séchage ; h_2 est le coefficient de transfert de masse (kg eau/Evap/m²min), $X(l)$ est l'humidité de l'air de séchage (primaire), indexée par caisson, $X_2(l)$ est l'humidité de l'interface air-eau qui dépend de la température $t_i(l)$ et de la pression du milieu de séchage [3-6] .

Propriétés de v_s

si $x(l) > x_c$, le terme $e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}$ est petit devant 1, alors la vitesse de séchage devient équivalente au terme défini par

$h_2 (X_2(l) - X(l))$, c'est la première phase de séchage , $V_s \approx \text{Cte.}$

Dès que l'humidité du tissu devient inférieure à l'humidité critique, $x(l) < x_c$, alors la vitesse de séchage diminue à cause du terme $(1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}})$ qui diminue, jusqu'à une valeur finale dépendante de l'humidité finale du tissu (x_f).

L'équation donnant la variation du taux d'humidité du tissu est :

$$(3-16) \quad \frac{dx(l)}{dl} = - \frac{h_2}{V_p} (X_2(l) - X(l)) \left(1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}\right)$$

III.2.2.3.2. Modèle

Le rapprochement des équations (3-7) à (3-16) fournit un modèle stationnaire des échanges tissu-air de séchage, sous la forme d'un système de trois équations différentielles du premier ordre.

Introduisons les notations suivantes :

$$A \triangleq \frac{h}{\rho V} \quad B \triangleq \frac{h_1}{V_p} \quad C \triangleq \frac{h_2}{V_p}$$

Le modèle devient

$$(3-12) \quad \begin{cases} \frac{dt_e}{dl} = \frac{A}{Cp_t} (T_a(l) - t_e(l)) - \frac{B}{Cp_t} (t_e(l) - t_i(l)) \\ \frac{dt_i}{dl} = \phi(x(l)) \cdot B(t_e(l) - t_i(l)) - C \lambda (X_2(l) - X(l)) \left(1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}\right) \\ \frac{dx}{dl} = - C (X_2(l) - X(l)) \left(1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}\right) \end{cases}$$

où $\phi(x(l)) = \frac{1}{C_{pt} + x(l) C_{pe}}$

Les conditions aux limites associées au système (3-17) sont :

$$(3-18) \begin{cases} t_e(l) = t_i(l) = t_0 & l = 0 \\ x(l) = x_0 > x_c & l = 0 \end{cases}$$

III.2.3. Conclusion.

Le modèle stationnaire présenté décrit l'évolution de l'état du tissu au cours des deux phases de séchage :

- phase d'évaporation externe,
- phase d'évaporation interne.

(alors que le modèle proposé en [3-4] ne décrit que la phase d'évaporation interne).

La simulation de ce modèle fournit les profils des trois variables caractérisant l'état du tissu :

- $t_e(l)$ température superficielle
- $t_i(l)$ température de la couche humide interne
- $x(l)$ teneur en eau.

La résolution du système différentiel (3-17), (3-18) nécessite la connaissance des grandeurs suivantes :

- a) Variables de commande : vitesse d'avance du tissu, profils de température et d'humidité de l'air primaire le long de la rame.
- b) Paramètres h , h_1 et h_2 (au A, B, C). Ceux-ci doivent être identifiés, pour chaque type de tissu, à partir d'observations relevées sur le procédé réel.
- c) Humidité à l'interface air-eau : $X_2(l)$. Sa détermination repose sur l'hypothèse suivante [3-5, 3-6] : "L'air à l'interface air-eau est saturé à la température de la couche humide", ce qui se traduit par :

$$X_2(l) = \frac{M_a}{M_b} \frac{P_{H_2O}(t_i(l))}{P_a - P_{H_2O}(T_i(l))}$$

avec M_a masse molaire de l'eau

M_b masse molaire de l'air

P_a pression atmosphérique (mm Hg)

$P_{H_2O}(t_i)$ pression de la vapeur saturée à la température $t_i(l)$ (mm Hg)

III.3. MODELISATION DE L'ETAT DE L'AIR SECONDAIRE.

III.3.1. Intérêt.

Le modèle stationnaire étudié, est essentiellement une représentation mathématique des échanges thermiques au niveau du tissu et d'une atmosphère de séchage donnée, faisant intervenir les paramètres de l'air de séchage avant contact avec le tissu.

Ce modèle limité aux échanges tissu-air de séchage, ne prend pas en compte les entrées définies par le recyclage d'air secondaire, ne permet pas de prévoir l'état de l'air secondaire et ne fournit aucune donnée concernant la dépense énergétique associée au recyclage et au réchauffage de l'air par l'échangeur, après le mélangeur.

Dans ce sens une amélioration de ce modèle consiste à construire une représentation de l'état de l'air après contact avec le tissu (air secondaire) ainsi qu'une représentation enthalpique au niveau de l'échangeur d'un compartiment et du recyclage de l'air.

L'élaboration d'un tel modèle doit permettre de prendre en compte :

- La consommation de vapeur au niveau de l'échangeur en régime stationnaire.
- L'influence de la fraction d'air humide recyclé, donc la position des clapets des cheminées.

.../...

III.3.2. Modèle de l'état de l'air secondaire.

Le modèle des échanges au niveau tissu-air primaire permet le calcul des trois variables $t_e(l)$, $t_i(l)$ et $x(l)$ caractérisant l'état du tissu à l'abscisse l . Nous avons vu que ce modèle devait être complété par celui donnant l'état de l'air après contact avec le tissu. Dans ce sens, nous considérons, aux abscisses l et $l + dl$, le "sandwich" formé par l'air primaire, le tissu, l'air secondaire fig. III.4

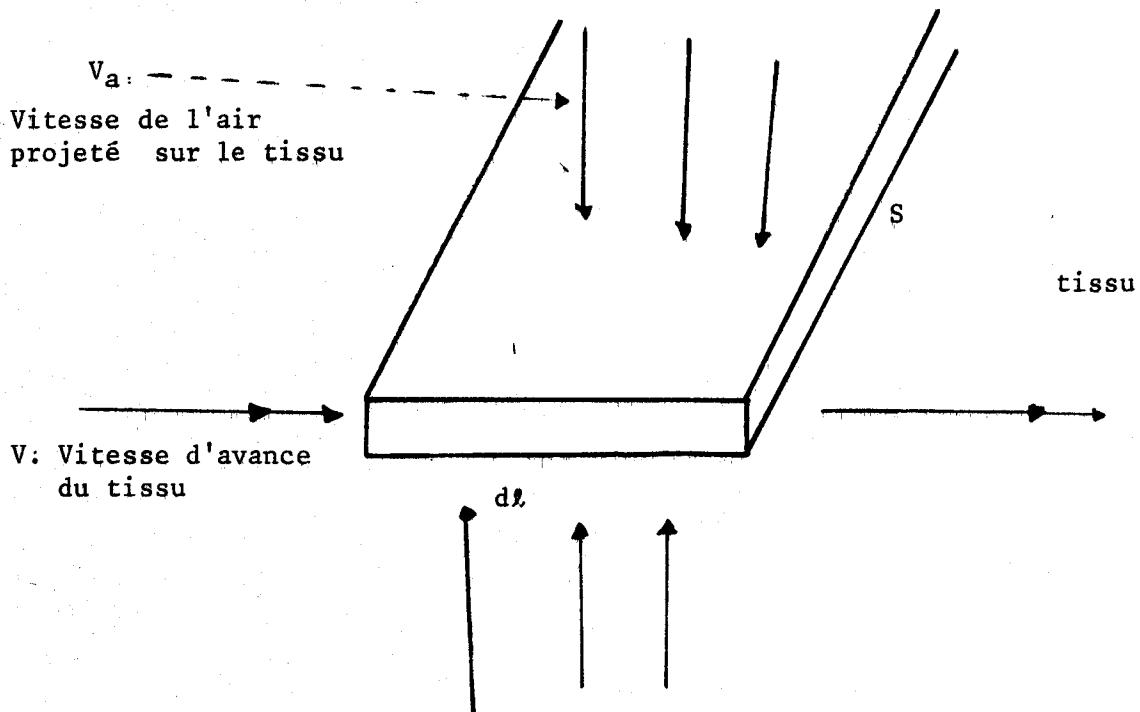


FIGURE III.4

III.3.2.1. Bilan d'échange de masse.

Notons X' , T_a' le taux d'humidité et la température de l'air après séchage.

Le débit massique d'air sec projeté sur le tissu au cours de séchage est :

$$V_a \rho_a S dl$$

Le débit massique du tissu sec

$$V_p S$$

Tous deux exprimés en (kg/min).

$V_a \triangleq$ vitesse de l'air de séchage projeté sur le tissu (m/min)

$\rho_a \triangleq$ densité volumique de l'air sec projeté sur le tissu (kg/m³)

L'équation de conservation de la masse d'eau, au cours de l'échange entre l'air de séchage et le tissu nous donne alors :

$$(3-19) \quad X'(l) - X(l) = \frac{V_p}{V_a \rho_a} \cdot \frac{dx(l)}{dl}$$

Le taux de variation de la teneur en eau est alors :

$$(3-20) \quad \frac{dX'(l)}{dl} = \frac{dX(l)}{dl} - \frac{V_p}{\rho_a V_a} \frac{d^2X}{dl^2}$$

III.3.2.2. Bilan enthalpique de l'air de séchage.

Nous envisageons deux sections différentielles voisines de l'air de séchage.

Ta	Ta + dTa
X	X + dX
Ta'	Ta' + dTa'
X'	X' + dX'

L'état du tissu dans les deux sections est défini par (te(l), ti(l), x(l)) et par (te(l) + dte(l), ti(l) + dti(l), x(l) + dx(l)).

Notons Cpa, Cpv les chaleurs massiques de l'air sec et de la vapeur d'eau.

Dans chacune des sections différentielles, le bilan enthalpique s'établit comme suit :

- Chaleur entrant avec l'air primaire

$$\rho_a V_a S dl \left[C_{pa} T_a(l) + X(l) \cdot (\lambda + C_{pv} T_a(l)) \right]$$

- Chaleur cédée à la couche sèche du tissu par l'air de séchage

$$h S (T_a(l) - t_e(l)) \cdot dl$$

- Chaleur récupérée sous forme de vapeur provenant de la couche humide

$$V \rho S dx(\ell).(\lambda + C_{pv} ti(\ell))$$

- Chaleur sortant avec l'air secondaire

$$V_{pa} S d\ell (C_{pa} Ta'(\ell) + X(\ell) (\lambda + C_{pv} Ta'(\ell)))$$

A l'abscisse ℓ et $\ell + d\ell$, nous obtenons les deux équations du bilan enthalpique.

$$(3-21) \quad V_a \rho_a d\ell \left[C_{pa} Ta'(\ell) + X'(\ell) (\lambda + C_{pv} Ta'(\ell)) \right] = V_a \rho_a \left[C_{pa} Ta(\ell) + \dots \right. \\ \left. \dots + X(\ell) (\lambda + C_{pv} Ta(\ell)) \right] - h d\ell \left[Ta(\ell) - te(\ell) \right] + \dots \\ \dots + V \rho S dx(\ell).(\lambda + C_{pv} ti(\ell))$$

(3-22)

$$V_a \rho_a d\ell \left[C_{pa} (Ta'(\ell) + dTa'(\ell)) + (X'(\ell) + dX'(\ell)) (\lambda + C_{pv} (Ta'(\ell) + dTa'(\ell))) \right] = \dots \\ \dots = V_a \rho_a d\ell \left[C_{pa} (Ta(\ell) + dTa(\ell)) + (X(\ell) + dX(\ell)) (\lambda + C_{pv} (Ta(\ell) + dTa(\ell))) \right] \dots \\ \dots h d\ell [Ta(\ell) + dTa(\ell) - te(\ell) - dte(\ell)] + \\ \dots + V \rho S dx(\ell + d\ell) (\lambda + C_{pv} (ti(\ell) + dti(\ell)))$$

La différence entre ((3-21) - (3-20)) fournit une équation différentielle linéaire lorsqu'on néglige les termes du second ordre.

$$(3-23) \quad (C_{pa} + X'(\ell).C_{pv}).\frac{dT_a'(\ell)}{d\ell} + (\lambda + C_{pv} Ta'(\ell)) \frac{dX'(\ell)}{d\ell} = \dots \\ \dots = (C_{pa} + X(\ell).C_{pv} - \frac{h}{V_a \rho_a}).\frac{dT_a(\ell)}{d\ell} + (\lambda + C_{pv} Ta(\ell)).\frac{dX(\ell)}{d\ell} + \dots \\ \dots + \frac{h}{V_a \rho_a} \cdot \frac{dte(\ell)}{d\ell} + K.C_{pv} \frac{dti(\ell)}{d\ell} \cdot \frac{dx(\ell)}{d\ell} + K(\lambda + C_{pv} ti(\ell)) \frac{d^2x(\ell)}{d\ell^2}$$

où $K = \frac{V \ell}{V_a \rho_a}$

Lorsque les conditions d'état de l'air primaire sont constantes, celle-ci se simplifie.

$$\frac{dX(l)}{dl} = 0 \quad \frac{dT_a(l)}{dl} = 0$$

$$(3-24) \quad (C_{pa} + X'(l) C_{pv}) \cdot \frac{dT_a'(l)}{dl} + (\lambda + C_{pv} \cdot T_a'(l)) \cdot \frac{dX'(l)}{dl} = -\frac{h}{V_a \rho_a} \frac{dte}{dl}(l) + \dots$$

$$\dots + K \cdot C_{pv} \frac{d+i(l)}{dl} \cdot \frac{dx(l)}{dl} + K (\lambda + C_{pv} \cdot +i(l)) \cdot \frac{d^2x(l)}{dl^2}$$

C'est sous cette hypothèse que nous développons le modèle complet.

III.3.2.3. Modèle mathématique complet.

En introduisant les constantes :

$$A = \frac{h}{V \cdot \rho} \quad B = \frac{h_{11}}{V \cdot \rho} \quad C = \frac{h_2}{V \cdot \rho} \quad K = \frac{V \cdot \rho}{V_a \rho_a}$$

Et en réunissant le système d'équation différentielle (3-17) à (3-23) on obtient le modèle stationnaire complet, tenant compte de l'échange entre le tissu et l'air de séchage et l'état de l'air secondaire après contact.

$$(3-25) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dte(l)}{dl} = \frac{A}{C_{pt}} (T_a(l) - te(l)) - \frac{B}{C_{pt}} (Te(l) - +i(l)) \\ \frac{d+i(l)}{dl} = B \cdot \phi(x(l)) \left[(te(l) - +i(l)) - C \cdot \lambda \cdot (x(l)) (X_2(l) - X(l)) \right. \\ \quad \left. (1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}) \right] \\ \frac{dx(l)}{dl} = -C \cdot (X_2(l) - X(l)) (1 - e^{-\frac{x(l) - x_f}{x_c - x_f}}) \\ \frac{dX'(l)}{dl} = K \cdot \frac{d^2x(l)}{dl^2} \\ \frac{dT_a'(l)}{dl} = \psi(X(l)) \cdot \left[K \cdot C_{pv} (+i(l) - T_a'(l)) \frac{d^2x(l)}{dl^2} + A \cdot K \cdot \frac{dte(l)}{dl} \right. \\ \quad \left. + K C_{pv} \frac{d+i(l)}{dl} \cdot \frac{dx(l)}{dl} \right] \end{array} \right.$$

.../...

$$\text{avec } \phi(x(\ell)) = \frac{1}{C_{pt} + x(\ell) \cdot C_{pe}}$$

$$\psi(x(\ell)) = \frac{1}{C_{pa} + X(\ell) \cdot C_{pv}}$$

$$X(\ell) = 0,62 \frac{Pa(t_i(\ell))}{760 - Pa(t_i(\ell))}$$

Ces équations sont valables pour $T_a = \text{cte}$
 $X = \text{cte}$

Dans le cas où T_a et X sont variables de ℓ , alors on remplacera la dernière équation du système (3-24) par l'équation (3-25), où on tient compte de la variation de $T_a(\ell)$ et $X(\ell)$ le long de la rame.

III.4 - MODELE DU PROCESSUS DE RECYCLAGE.

Dans le processus réel, l'air primaire est obtenu, pour un caisson donné, par réchauffage d'un mélange d'air atmosphérique et d'air secondaire provenant de tous les autres caissons.

Une première hypothèse simplificatrice consiste à considérer que l'air recyclé en provenance d'un caisson donné est dans un état moyen constant en régime permanent. Compte tenu du brassage dû aux ventilateurs cette hypothèse semble être réaliste.

Cependant, les proportions du mélange des airs secondaires recyclés sont fonctions de la position des volets de chaque compartiment et des clapets des cheminées d'extraction.

Le problème consiste donc à déterminer les couplages existant entre les différents caissons du point de vue de recyclage d'air.

Nous allons présenter un modèle de ce processus, ainsi que les difficultés qui en découlent. Soit L_j le débit d'air sec brassé par les ventilateurs du compartiment n°j, une fraction α_j de ce débit est évacuée par les cheminées, et la fraction $(1 - \alpha_j)$ est recyclée.

Le débit masse d'air humide évacué par l'ensemble des cheminées est alors :

$$(3-26) \quad \sum_{j=1}^5 L_j \alpha_j (1 + X'_j)$$

où X'_j désigne le rapport de mélange moyen de l'air secondaire dans le caisson N°j.

Soit X_a le rapport de mélange de l'air atmosphérique. La masse d'air humide évacuée par les cheminées et remplacée par une masse égale d'air atmosphérique. En notant L_a le débit d'air atmosphérique ainsi introduit,

on a :

$$(3-27) \quad L_a(1 + X_a) = \sum_{j=1}^5 \alpha_j L_j (1 + X'_j)$$

Soit β_0^i , la proportion d'air atmosphérique introduite dans le caisson N°i, soit β_j^i la proportion d'air secondaire en provenance du caisson n°j introduite dans le caisson n°i, on a :

$$(3-28) \quad \sum_{i=1}^5 \beta_0^i = 1$$

$$(3-29) \quad \sum_{j=1}^5 \beta_j^i = 1$$

$$\text{et } L_i = \beta_0^i L_a + \sum_{j=1}^5 \beta_j^i L_j (1 - \alpha_j) \quad (3-30)$$

$$X_i = \beta_0^i X_a + \sum_{j=1}^5 \beta_j^i X'_j (1 - \alpha_j) \quad (3-31)$$

avec X_i = rapport de mélange de l'air primaire dans le caisson n°i.

Les équations précédentes ne constituent en aucun cas un modèle du processus de recyclage. Tout au plus peuvent elles être considérées comme une approche permettant de montrer les difficultés liées à l'obtention d'un tel modèle. En effet, les coefficients de couplage β_j^i sont conditionnés par les dépressions existant au niveau des différentes

cheminées, elles mêmes fonction de la position des volets du réglage, qui constituent en dernier ressort les variables de commande du processus de recyclage. La relation entre ces variables de commande et les coefficients β_j^i semble impossible à obtenir. Par ailleurs, une mesure directe des coefficients de couplage est exclue de par la nature distribuée du processus, les turbulences, les fuites d'air, etc... De plus, ils varient avec les conditions atmosphériques qui influent sur le tirage des cheminées.

Dans ce sens, nous serons amenés à poser l'hypothèse très simplificatrice que l'air recyclé dans un caisson ne provient que du caisson considéré. Cette hypothèse se traduit par :

$$\begin{aligned}\beta_j^i &= 1 & j &= 1, \dots, 5 \\ \beta_j^i &= 0 & i &\neq j \\ \beta_0^j &\propto \alpha_j & j &= 1, \dots, 5\end{aligned}$$

III.5 - CONCLUSION

Le modèle relatif au processus de séchage des tissus en régime permanent, se traduit par un système d'équations différentielles du premier ordre.

Il permet d'obtenir les profils suivants :

- température et humidité du tissu à l'intérieur de la rame,
- température et humidité de l'air secondaire de long de la rame,

en fonction des différents paramètres de réglage.

Rappelons que ce modèle a été établi sous les hypothèses du paragraphe (III.2.1.).

Le modèle complet (3-24) reste valable pour un profil de température et d'humidité de l'air primaire constant le long de la rame qui est utilisé pour la simulation. Dans le cas où on considère une variation de l'état de l'air primaire, nous remplaçons la dernière équation du modèle complet par l'équation (3-25).

- BIBLIOGRAPHIE -

- /3-1/ G. FOULARD, S. GENTIL, J.P. SAUDRAZ.
"Commande et régulation par ordinateur numérique de la théorie
aux applications".
Editions Eyrolle 1977.
- /3-2/ R. CHAUSSARD, R. PERRET, J. RICHALET.
"Automatique et économie d'énergie".
Automatisme - mai 1976.
- /3-3/ M. ATHANS.
"The role and use of the stochastic linear Quadratic - Gaussian
problem in control system design".
IEEE transaction in automatic control.
Volume AC - 16 N° 6, décembre 1971.
- /3-4/ J.N. BEARD.
"More efficient transfer operations through mathematical
modeling".
Chemical engineering, volume 8 N° 3, mars 1976.
p. 30/47 - 50/33.
- /3-5/ R.E. TREYBAL.
"Mass - Transfer Operations"
2^e éd. Mac - Graw - Hill - Book Co.
New York 1968.
- /3-6/ HUGEN, K.M. WATSON, R.A. RACATZ.
"Chemical process principles"
partie 1, John Wiley and Sons
New York 1963.
- /3-7/ O. KRISCHER, KRÖLL.
"Bases scientifiques de la technique de séchage".
Technique de séchage.
2^e éd. Springer - Verlag Tomes 3 et 4, 1963

- /3-8/ PETER KRÖTZCH, KARSRUHE.
"The optimisation of spray dryers"
Vérfahrenstechnik 4 N° 7, 1970
p. 291 - 294.
- /3-9/ P. NORDON, N.W. BAINBRIDGE.
"An analysis of the process of through drying of wet textile materials"
Applied polymer symposium N° 18.
By John Wiley and sons. inc., 1971.
- /3-10/ H. LANDGRAF.
"Utensiwierung von texliveredlungsprozon durch anwendung du prallströmung".
Textil technik 27, 1977.
p. 35 - 40.
- /3-11/ A.K. CHAKRAVARTY, P. FERGUSON, W. RETTIFER.
"A. New technique for measuring the moisture content of fabrics during the drying process".
Chemical Engeneering, Vol. 8 N° 11, novembre 1976;
p. 40 - 44.
- /3-12/ M.D. YOUNG, M.S. NOSSAR, M. CHAIKIN.
"The uniformity of distribution of moisture in drying beds of loose fibers".
Pat. II, the effect of air velocity and perforated plate insertion on rate of frying.
Textile research journal, mai 1976.
p. 347 - 355.
- /3-13/ A.H. NISSAN, W.G. KAY, J.R. BELL.
"Mechanism of drying thick porous bodies during the falling rate period".
Part. 1, the pseudo-wet - bulb température.
A.I. ch.E, J. 5 N°1, journal mars 1959.
p. 103 - 110.

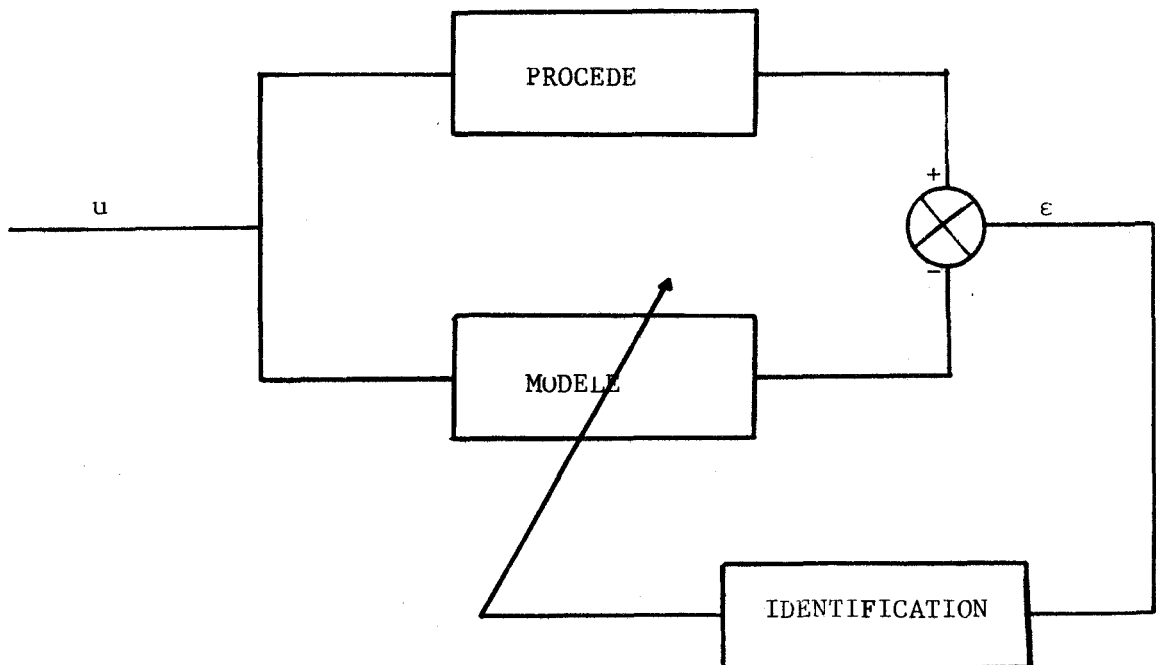
CHAPITRE IV

IDENTIFICATION PARAMÉTRIQUE

IV.1 - INTRODUCTION

L'utilisation du modèle que nous avons proposé nécessite, pour chaque type de tissu, la détermination de ses coefficients. Ceux-ci sont obtenus au moyen d'une procédure d'identification paramétrique dont le but est de déterminer leurs valeurs optimales vis à vis d'un critère de minimisation de l'écart entre sorties réelles du procédé et sorties calculées par le modèle, tous deux étant soumis aux mêmes entrées/4-1,4-2,4-3/. Il convient ensuite de déterminer si les valeurs numériques des coefficients ainsi obtenues sont indépendantes des conditions de fonctionnement du procédé.

La procédure d'identification, en général itérative, est schématisée sur la figure suivante :



Dans une première phase, nous présenterons les différentes mesures nécessaires à la validation du modèle et les problèmes posés par leur obtention. Nous exposerons ensuite les deux méthodes d'identification utilisées et les résultats obtenus.

IV.2 - MESURES NECESSAIRES A LA VALIDATION DU MODELE

Le but de la campagne de mesures est l'obtention des valeurs numériques des grandeurs permettant de valider le modèle de la rame établi précédemment.

Celui-ci est un modèle stationnaire et, dans la mesure du possible, les mesures nécessaires à sa validation doivent être relevées lorsque la rame est en régime permanent.

Dans ce sens, il convient de travailler dans les conditions suivantes :

- type de tissu donné, taux d'humidité constant en entrée de rame
- profil de température de l'air primaire stationnaire le long de la rame
- profil d'humidité de l'air primaire stationnaire, ceci implique une position constante des clapets de cheminée.
- vitesse d'avance du tissu constante
- débit des ventilateurs constant

Les entrées du modèle sont constituées par :

V vitesse d'avance du tissu

$T_a(l)$ température de l'air primaire le long de la rame

$X(l)$ humidité de l'air primaire le long de la rame.

Lorsque les entrées du modèle sont connues, il permet, à partir de conditions initiales, de calculer les grandeurs suivantes :

$t_e(l)$ température superficielle du tissu le long de la rame

$t_i(l)$ température interne du tissu le long de la rame

- IV.3. -

$x(1)$ humidité du tissu le long de la rame

$T_a'(1)$ température de l'air secondaire le long de la rame

$X'(1)$ humidité de l'air secondaire le long de la rame

L'ajustement du modèle nécessite donc une connaissance, la plus précise possible, de toutes les grandeurs d'entrée et du plus grand nombre possible de grandeurs de sortie.

IV.3. - CAMPAGNE DE MESURES

IV.3.1. Matériel utilisé, emplacement des capteurs

. Température du tissu

De toute évidence, la mesure de la température interne $t_i(1)$ n'est pas possible.

Le profil de la température superficielle du tissu le long de la rame est mesuré à l'aide d'un capteur (WIRA) sous forme de "galette" mobile, en contact avec le tissu. Ce dispositif renferme un thermocouple, Chromel-Alumel. Le capteur est introduit dans la rame auquel on a adapté un très long fil constitué des mêmes métaux que le thermocouple, de façon à ne pas introduire d'erreur de mesure. Il "parcourt" la rame mètre par mètre, attaché au bout d'une ficelle. On obtient ainsi le profil de température superficielle mètre par mètre.

Un capteur de même type a été installé à poste fixe en sortie de rame.

Une étude précise de ces capteurs et des mesures réalisées est reportée en Annexe 3.

. Humidité du tissu

Cette mesure n'est accessible qu'en sortie de rame où nous avons installé deux capteurs à infra-rouge et à micro-ondes.

Dans le but d'étalonner ces deux capteurs, des prélèvements d'échantillons de tissu en entrée et en sortie de rame ont été également réalisés. La détermination de l'humidité étant obtenue par pesée avant et après séjour dans une étuve.

Compartiments et cheminées

Dans chaque compartiment nous avons installé une canne pyrométrique à thermo-couple fournissant la température sèche et la température humide. Cette sonde est utilisée successivement pour les mesures au niveau de l'air primaire (AP), de l'air secondaire (AS), des cheminées (CH).

Compte-tenu des problèmes de fuites rencontrés précédemment, lors de l'installation de ces sondes dans les portes de la rame, nous avons ici percé le toit de la rame, de façon à localiser les sondes au niveau des bases de soufflage de l'air primaire et de récupération de l'air secondaire.

La Figure IV-1 donne pour un compartiment l'emplacement des capteurs.

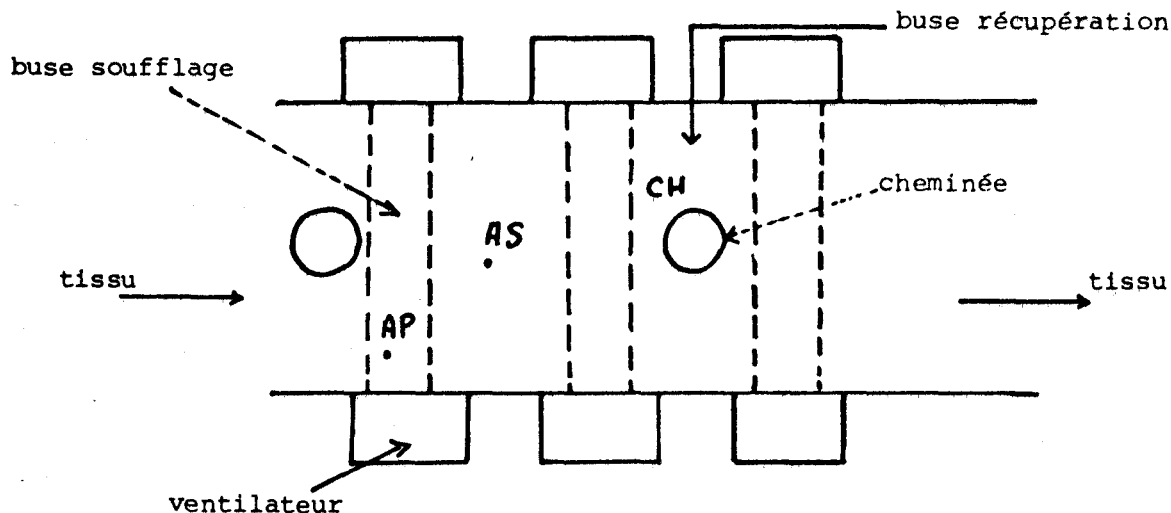


FIGURE - IV.1. -

Enfin, dans chaque cheminée, un tube de pitot permet la mesure du débit d'air évacué.

IV.3.2. Protocole expérimental

Le protocole expérimental comprend deux phases.

Dans la première sont effectués différents étalonnages et essais permettant de corriger l'influence du rayonnement sur les mesures ultérieures. La rame est ensuite stabilisée en régime permanent. Le détail de ces manipulations préliminaires est reporté en Annexe 3.

Dans la deuxième phase, on effectue les mesures proprement dites.

IV.3.3. Résultats expérimentaux obtenus

IV.3.3.1. Température du tissu

Les mesures effectuées mettent en évidence l'évolution de la température du tissu à l'intérieur de la rame. On vérifie que le profil des courbes obtenues correspond globalement à la courbe théorique présentée au Chapitre II (fig. II.5)

Les pages suivantes donnent quelques exemples de profils relevés.

IV.3.3.2. Humidité du tissu

Aucun des deux capteurs installés en sortie de rame n'a pu donner de résultat concernant l'humidité du tissu.

Le capteur à infra-rouges, travaillant dans des conditions pour lesquelles il n'est pas prévu (température du tissu nettement supérieure à 35° C) fournissait des indications d'humidité négatives.

Le capteur à micro-ondes présentait le même problème et de plus, marquait fortement le tissu.

Les seules mesures exploitables ont été obtenues par prélèvement d'un échantillon de tissu en entrée et en sortie de rame. Elles sont bien évidemment en nombre limité.

Il faut signaler, par ailleurs, que les mesures d'humidité effectuées à l'entrée de la rame ont fait apparaître une différence systématique d'environ 10 % entre les deux extrémités de la laize.

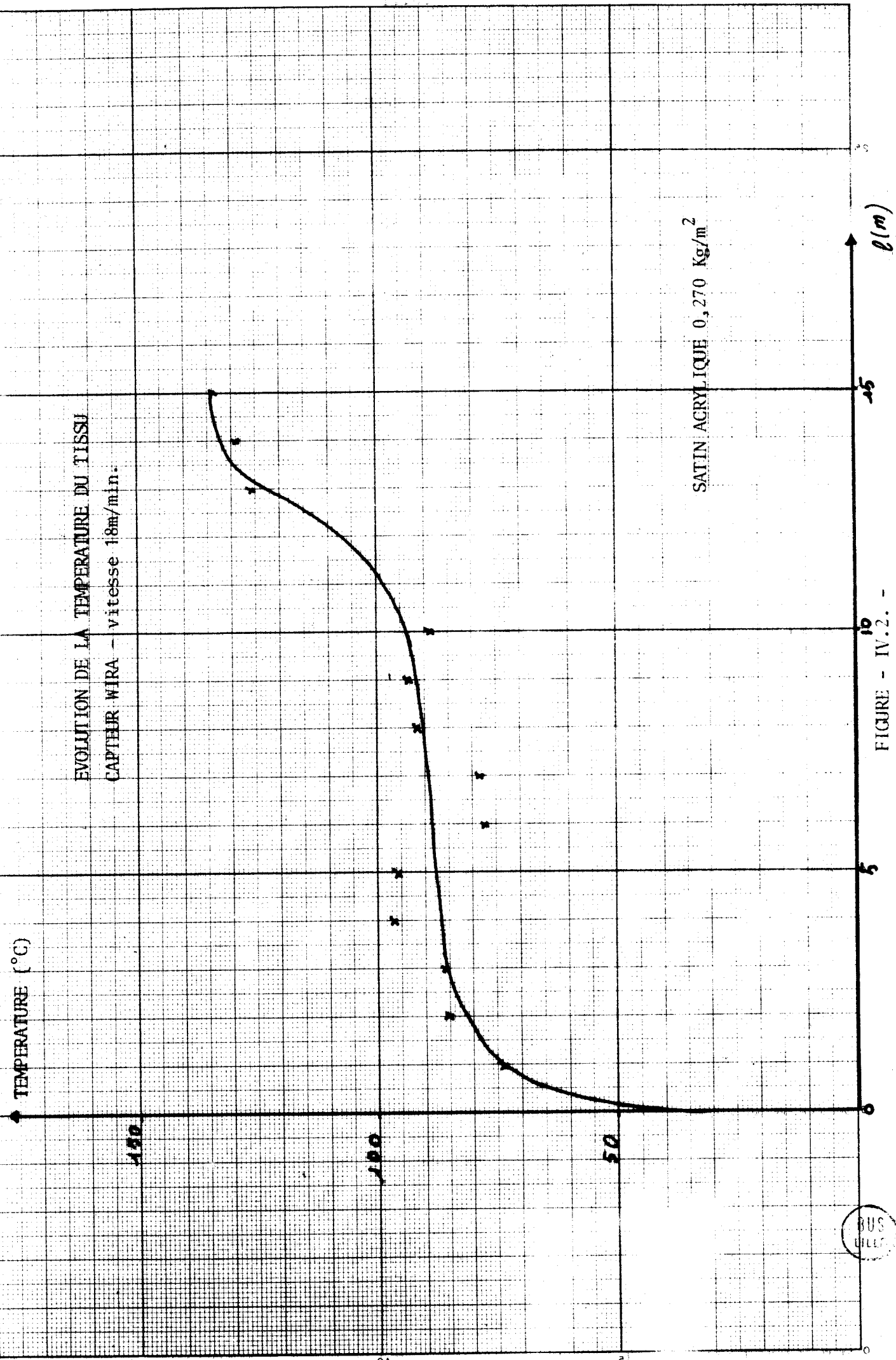


FIGURE - IV.2. -



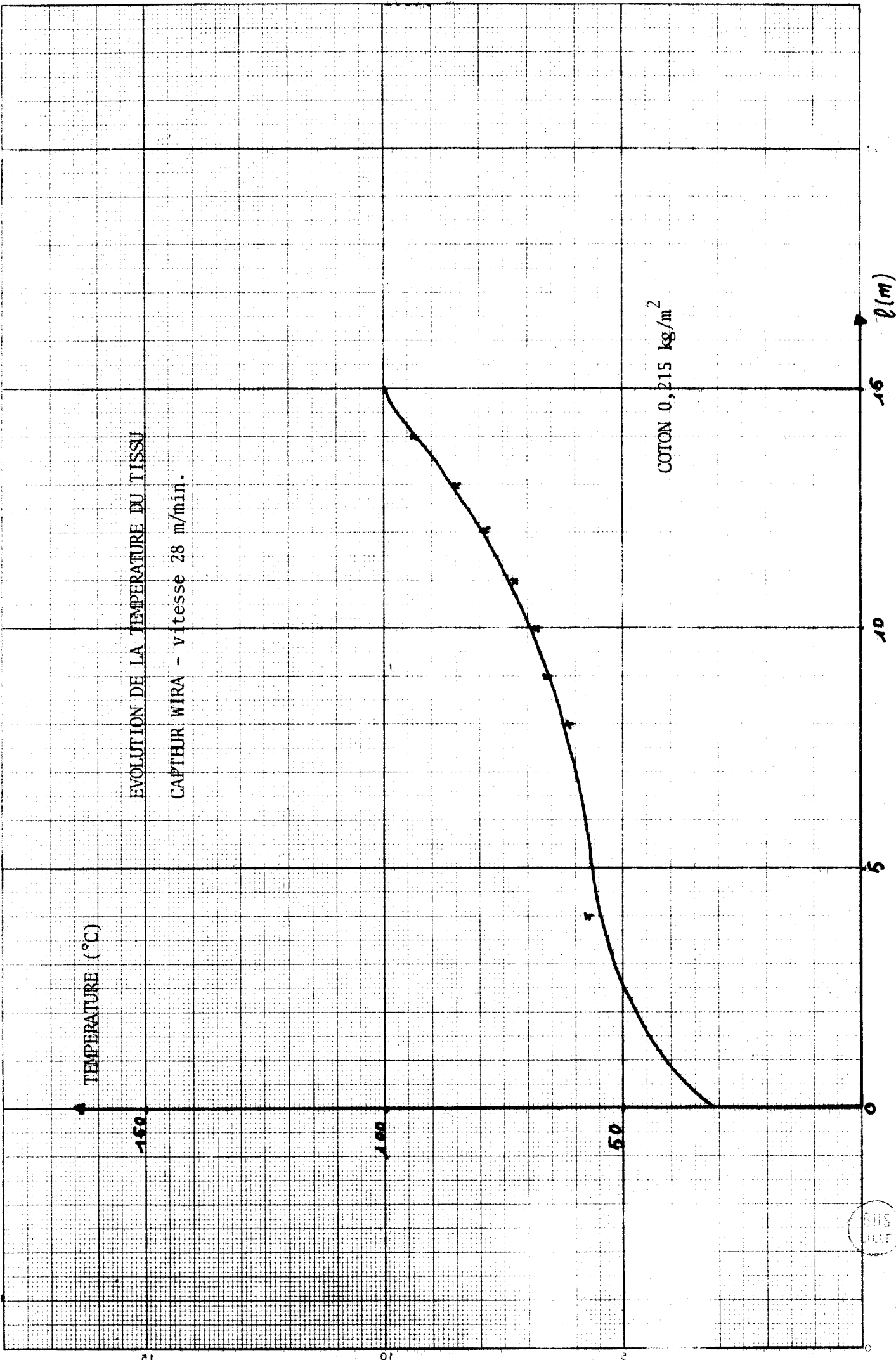


FIGURE - IV.3. -

TEMPERATURE (°C)

COMPARAISON DES CAPTEURS MIRA et I.T.F.
INOTECHNIQUE.

WIRA

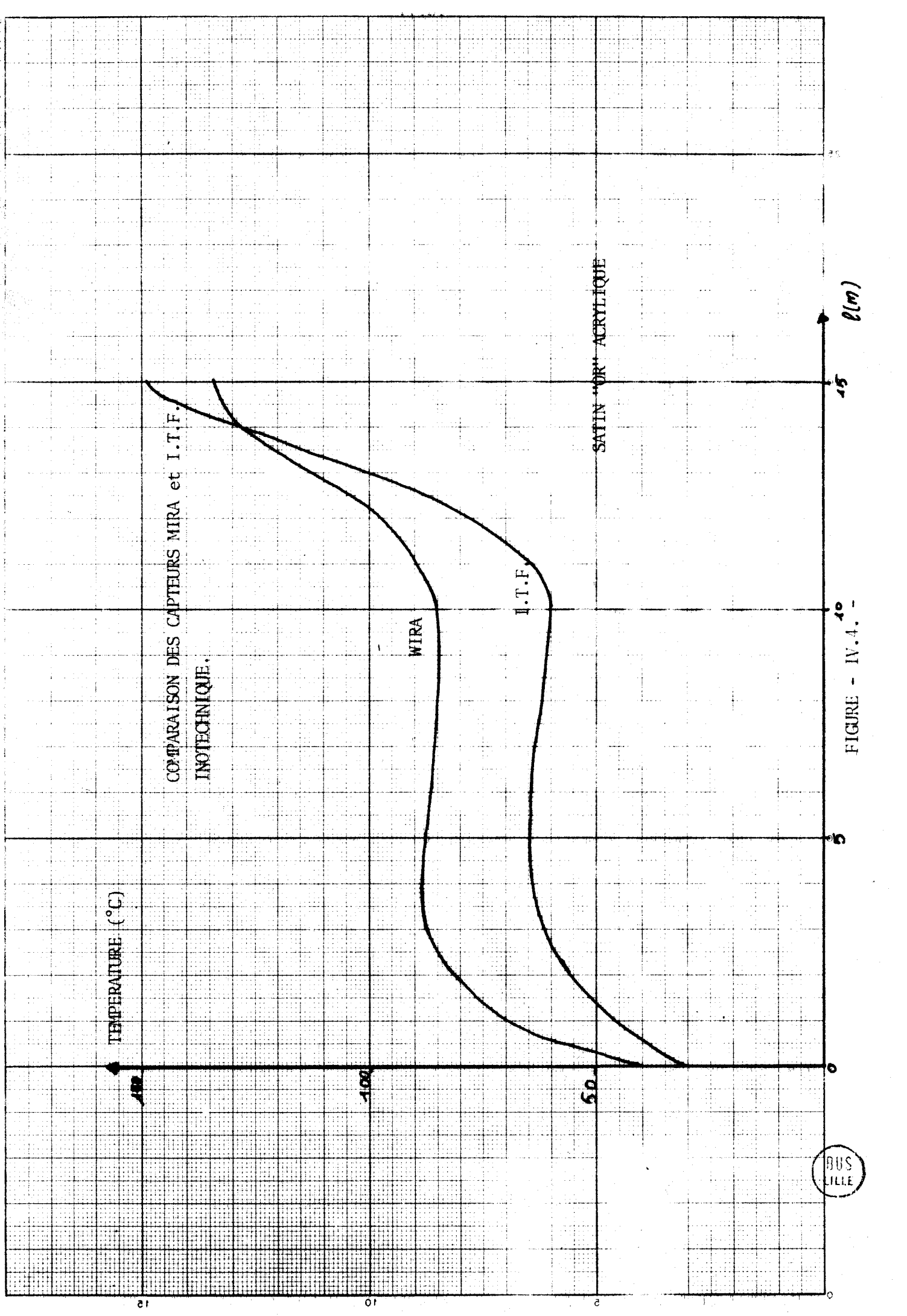
I.T.F.

SATIN "OR" ACRYLIQUE

l(m)

FIGURE - IV.4. -

BUS
LILLE



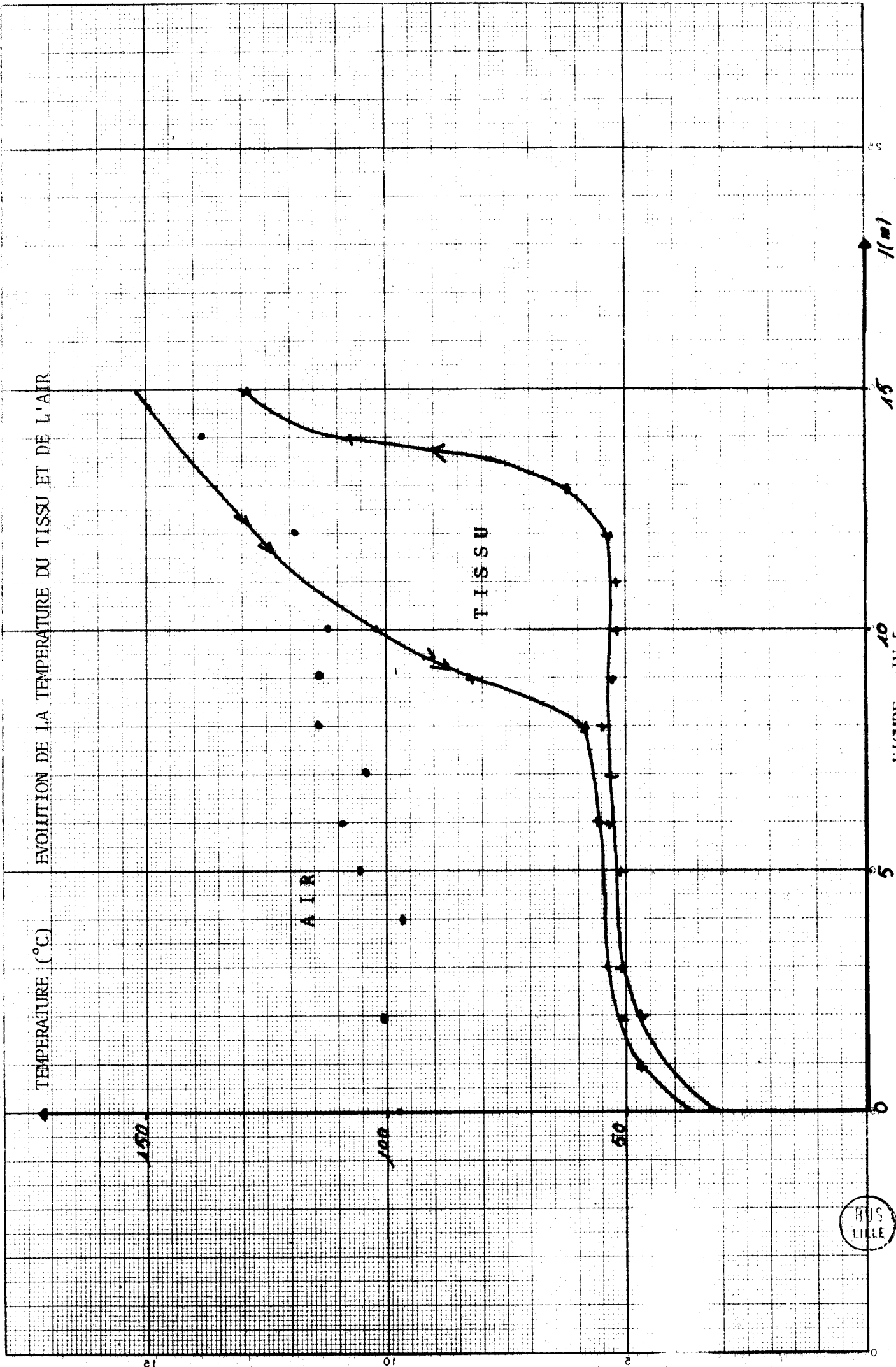


FIGURE - IV.5. - ¹⁰

De plus, certains essais dans des conditions "économiques" ont fait apparaître que le tissu sortait sec sur les lisières, mais mouillé au centre de la laize.

IV.3.3.3. Etat de l'air primaire

La température de l'air de séchage avant contact est indexée par zones dans la rame étudiée. Cependant les thermomètres secs placés aux différents points de mesure ont toujours donné des indications sensiblement différentes des points de consigne affichés.

Pour certains compartiments, nous avons observé des températures sèches d'air secondaire supérieure à celles de l'air primaire.

De la même façon, aucune mesure d'humidité n'a donné de résultat fiable ni pour l'air primaire, ni pour l'air secondaire, la courbe de réponse du thermomètre humide ne présentant, en effet, aucun palier nettement appréciable.

IV.3.4. Utilisation des mesures pour la validation du modèle

La validation du modèle nécessite la connaissance :

- a) des variables de commande
- b) des variables de sortie

L'ensemble des mesures nécessaires peut-être décomposé en deux classes, suivant qu'elles s'appliquent au tissu ou à l'air de séchage.

Si les problèmes rencontrés par les mesures au niveau du tissu semblent être en voie de solution, il n'en est pas de même pour ceux relatifs aux mesures des températures humides de l'air de séchage.

Dans ce sens, les mesures exploitées par la procédure d'identification paramétrique sont les suivantes :

- profil de température sèche de l'air de séchage, obtenu au moyen d'un thermocouple supplémentaire intégré sur la face supérieure du capteur mobile (nouveau capteur développé par I.T.F. - Nord).

- profil d'humidité de l'air de séchage, estimé approximativement à partir des rares mesures semblant fiables et de l'expérience du conducteur de la rame.

- profil de température superficielle du tissu, relevé au moyen du galet mobile.

L'humidité du tissu en entrée a été estimée en faisant la moyenne des humidités relevées sur la largeur.

Dans tous les essais on a délibérément surséché de façon à obtenir une humidité en sortie connue.

IV.4 - METHODES D'IDENTIFICATION UTILISEES

IV.4.1. Présentation du problème

Compte-tenu des difficultés liées à la mesure de l'état de l'air secondaire, nous n'avons pu obtenir de courbe de référence concernant celui-ci. Dans ce sens, l'identification du modèle est limitée au niveau des échanges tissu - air de séchage.

Sous la forme discrète, le modèle à identifier est le suivant :

$$\begin{aligned}
 t_e(k+1) &= t_e(k) + \frac{h \Delta l}{V_p C_{pt}} |T_a(k) - t_e(k)| - \frac{h_1 \Delta l}{V_p C_{pt}} |t_e(k) - t_i(k)| \\
 t_i(k+1) &= t_i(k) + \frac{h_1 \Delta l}{V_p} \phi(x(k)) |t_e(k) - t_i(k)| - \frac{h_2 \Delta l}{V_p} \phi(x(k)) |X_2(k) - X(k)| \dots \\
 x(k+1) &= x(k) - \frac{h_2 \Delta l}{V_p} |X_2(k) - X(k)| \left| 1 - e^{\frac{-x(k) - x_f}{x_c - x_f}} \right| \dots \left| 1 - e^{\frac{-x(k) - x_f}{x_c - x_f}} \right|
 \end{aligned}$$

$$\text{avec } \phi(x(k)) = \frac{1}{C_{pt} + x(k) C_{pe}}$$

$$X_2(k) = 0,62 \frac{P_a(k)}{760 - P_a(k)}$$

Δl = pas d'échantillonnage.

Le vecteur de commande est défini par les trois composantes :

V : vitesse d'avance du tissu

$T_a(k)$: température sèche de l'air primaire à l'abscisse $k\Delta l$

$X(k)$: taux d'humidité de l'air primaire à l'abscisse $k\Delta l$

Le vecteur des paramètres à identifier est : $A^T = (A_1, A_2, A_3)$ avec :

$$A_1 = \frac{h}{V\rho} \quad A_2 = \frac{h_1}{V\rho} \quad A_3 = \frac{h_2}{V\rho}$$

L'identification de ces paramètres revient à déterminer :

h : coefficient d'échange de chaleur entre l'air et la couche sèche

h_1 : coefficient d'échange de chaleur entre la couche sèche et la couche humide

h_2 : coefficient d'échange de masse entre le tissu et l'air

Le critère d'identification est défini par :

$$J(A_1, A_2, A_3) = \frac{1}{2} (x(N) - \tilde{x}(N))^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N q_k (t_e(k) - \tilde{t}_e(k))^2$$

q_k : coefficient de pondération positif, $k = 1, \dots, N$

$\tilde{x}(N)$: teneur en eau finale du tissu

$x(N)$: teneur en eau finale du tissu donnée par le modèle

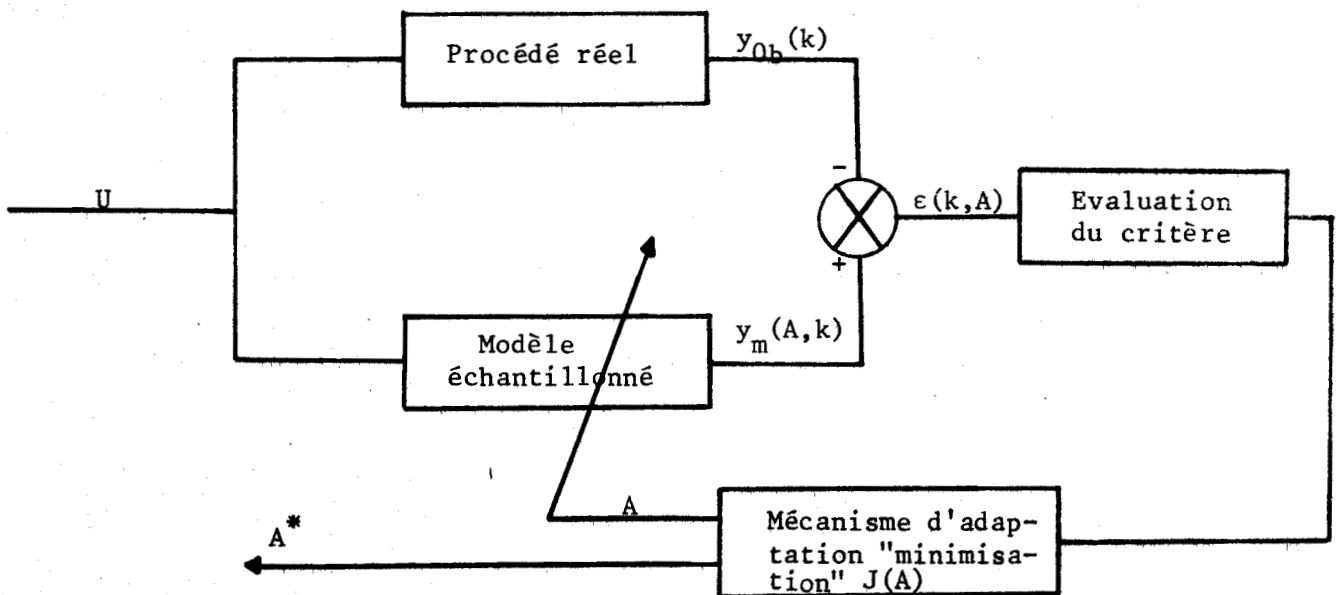
$\tilde{t}_e(k)$: température superficielle du tissu à l'abscisse k

$t_e(k)$: température superficielle du tissu à l'abscisse k donnée par le modèle

N : nombre de points de mesure relevés sur le tissu le long de la rame.

Le problème est de calculer la valeur optimale du vecteur des paramètres A , au sens de la minimisation du critère $J(A)$, sous les contraintes définies par les équations du modèle.

Dans ce sens, il faut définir un algorithme qui, partant de valeurs initiales estimées (A_1^0, A_2^0, A_3^0), améliore à chaque itération la valeur du critère. Le schéma de la procédure est le suivant :



IV.4.2. Algorithmes d'adaptation

Le problème d'identification des paramètres A a été présenté comme un problème d'optimisation. Plusieurs méthodes de résolution de ce problème sont envisageables : méthode du gradient, méthodes heuristiques,....

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les deux algorithmes suivants :

- Méthode du gradient et de l'état adjoint /4-9,4-10/
- Méthode heuristique axe par axe /4-1,4-4,4-8/

IV.4.2.1. Méthode du gradient

La méthode du gradient conduit, à l'itération n^oi, à calculer le vecteur des paramètres A^{i+1} au moyen de la relation :

$$A^{i+1} = A^i - \tau \frac{\partial J}{\partial A} (A^i)$$

où $\frac{\partial J}{\partial A} (A^i)$ est le vecteur gradient de J, calculé pour le vecteur des paramètres A^i , et τ un coefficient d'itération positif.

Le calcul du gradient $\frac{\partial J}{\partial A}$ fait intervenir, à chaque itération, l'intégration des équations d'état et celle des équations adjointes.

Ecrivons le problème sous la forme suivante :

$$J(A) = \frac{1}{2} ||y(N) - \tilde{y}(N)||_H + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N ||y(k) - \tilde{y}(k)||_{Q_k}$$

avec $y(k+1) = f(y(k), u(k), k, A)$

$y(k)$: vecteur d'état à l'abscisse $k\Delta t$

$u(k)$: vecteur de commande à l'abscisse $k\Delta t$

$|| \cdot ||_H, || \cdot ||_{Q_k}$: formes quadratiques relatives aux matrices H et Q_k ,
symétriques, définies non négatives.

Si A^i est le vecteur des paramètres à l'itération n^oi, l'algorithme se déroule suivant les phases suivantes :

1 - Connaissant A^i et $u(k)$, $k = 1, \dots, N$, on résout les équations d'état à partir de la condition initiale $y(0) = y_0$ connue, la trajectoire obtenue est donc telle que :

$$y^i(k+1) = f(y^i(k), u(k), k, A^i), y^i(0) = y_0$$

2 - Connaissant A^i , $u(k)$ et $y^i(k)$, $k = 1, \dots, N$, on résout les équations adjointes à rebours, c'est-à-dire à partir de la condition finale :

$$p^i(N) = -H(y^i(N) - \hat{y}(N))$$

La trajectoire obtenue est telle que :

$$p^i(k) = -\left| \frac{\partial f}{\partial y} (y^i(k), u(k), k, A^i) \right| p^i(k+1) + Q(k) |y^i(k) - \hat{y}(k)|$$

3 - Le vecteur des paramètres A^{i+1} est déterminé par la relation :

$$A^{i+1} = A^i - \tau \sum_{k=0}^{N-1} \left| \frac{\partial f}{\partial A} (y^i(k), u(k), k, A^i) \right|^T p^i(k+1)$$

On montre dans ces conditions /4-9, 4-10/ que si que, si $\|A^{i+1} - A^i\|$ est suffisamment petit pour que l'approximation du 1er ordre soit vérifiée, on définit une suite $J(A^i)$ décroissante, qui converge vers un minimum local de J .

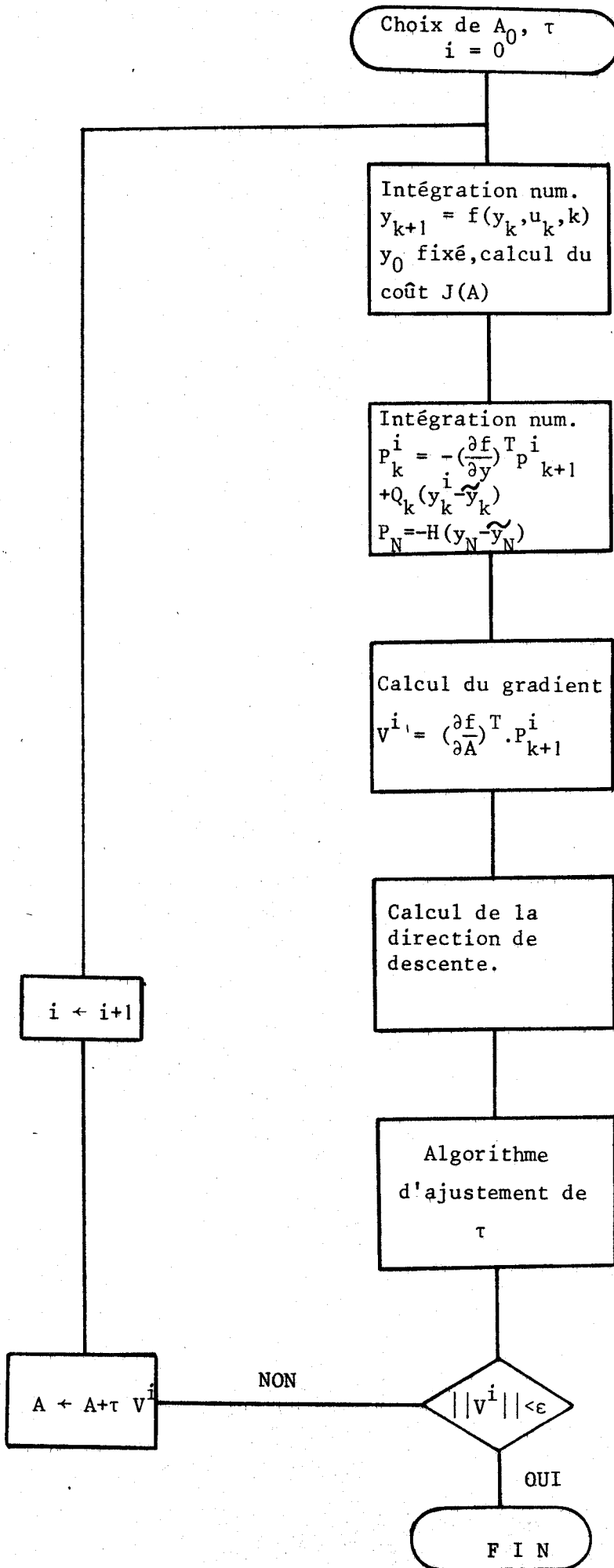
En général, un mécanisme d'adaptation du coefficient d'itération est appliqué de façon à réduire l'importance des calculs nécessaires et à accélérer la convergence au voisinage d'un minimum /4-10/

IV.4.2.2 Méthode axe par axe

Cette méthode ne nécessite pas à chaque itération le calcul du gradient. Le principe en est le suivant :

Soit $A = (A_1, \dots, A_p)$ le vecteur des paramètres à identifier, on fait varier successivement chaque paramètre, en explorant l'espace paramétrique suivant les axes de coordonnées. La recherche de l'optimum se fait sur chaque axe en utilisant une méthode à pas constant.

ORGANIGRAMME DE LA MÉTHODE DU GRADIENT



La figure 6 illustre la méthode dans le cas de deux paramètres. Elle en montre aussi les limites. En effet, au point A^* différent de l'optimum, l'algorithme s'arrête, aucune des deux directions définies par les axes ne permettant plus d'améliorer le critère, pour le pas considéré. A partir d'un tel point, on peut alors soit diminuer le pas de progression /4-4/, soit définir de nouvelles directions de recherche par changement de base /4-11, 4-12/.

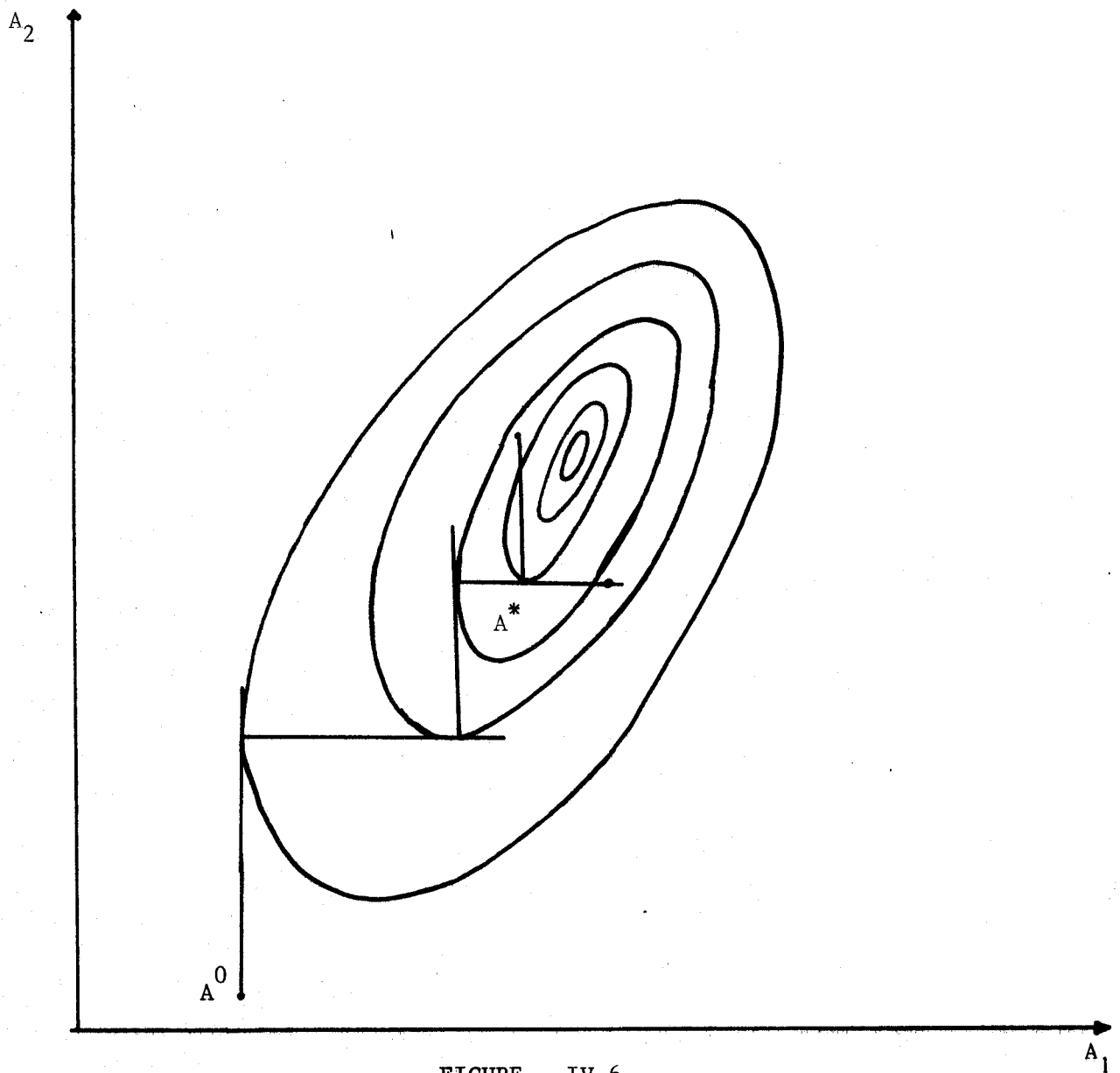
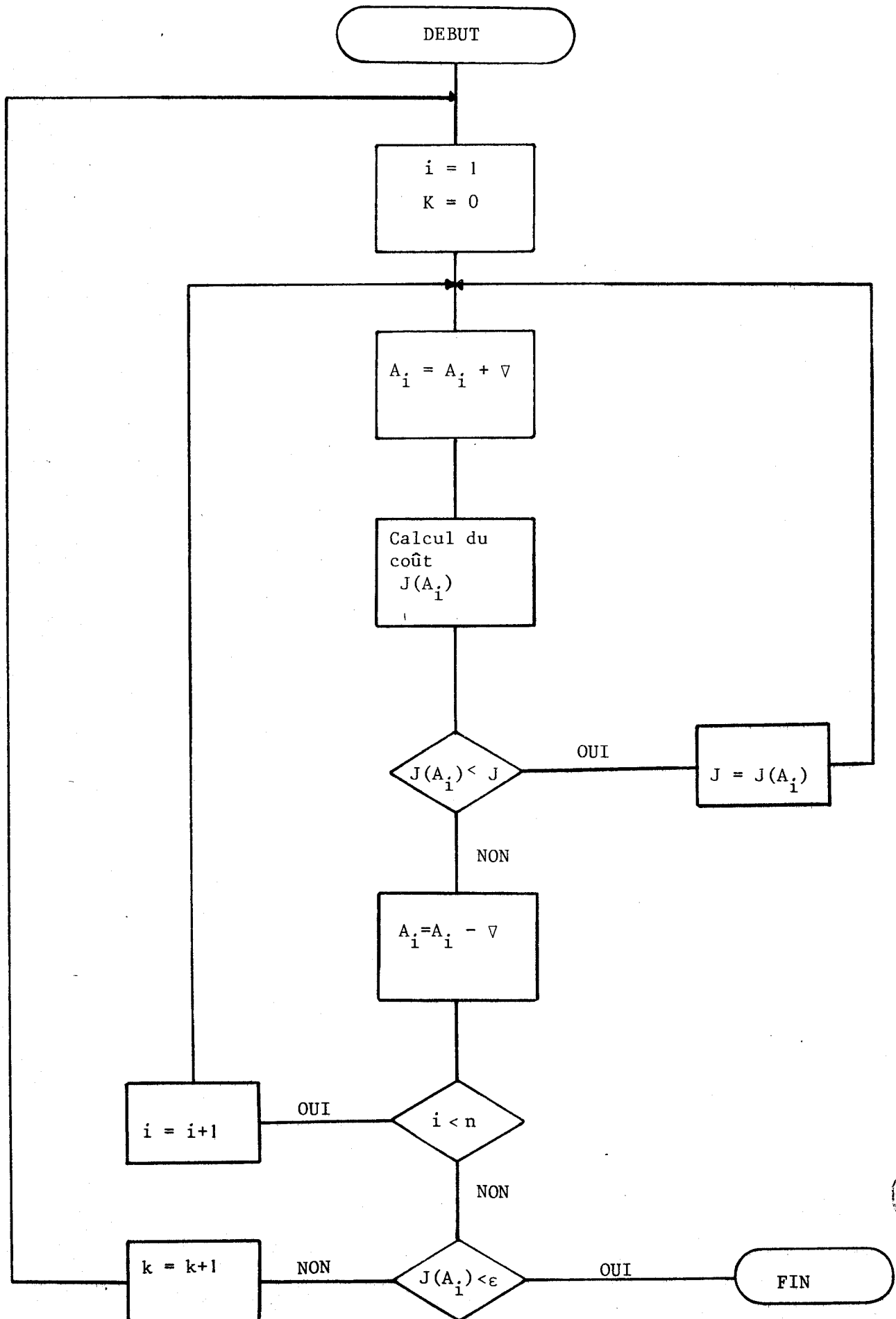


FIGURE - IV.6. -

ORGANIGRAMME DE LA MÉTHODE AXE PAR AXE



IV.5 - MISE EN OEUVRE DE LA PROCEDURE D'IDENTIFICATION

La méthode du gradient et la méthode axe par axe ont été utilisées. Dans les deux cas, l'intégration numérique des équations a été faite par la méthode récurrente /4-6,4-7/ en utilisant l'écriture du modèle sous sa forme discrète. Compte-tenu des incertitudes sur les données, le manque de précision de cette méthode est compensé par sa facilité de programmation, son peu d'exigence en place mémoire et son faible temps d'exécution.

Nous donnons ci-dessous un exemple d'identification du modèle de séchage d'un tissu synthétique.

IV.5.1. Les données

Les mesures ont été relevées sur un passage de tissu synthétique du type "satin or", de densité $\rho = 250 \text{ gr/m}^2$ de tissu sec. Les valeurs moyennes de l'humidité initiale et de la température d'entrée étaient respectivement : $x(0) = 0,8 \text{ kg d'eau/kg de tissu sec}$ et $t(0) = 30^\circ\text{C}$.

La vitesse d'avance du tissu était : $V = 18 \text{ m/mn}$.

La température de consigne de l'air primaire affichée était : $T_a(k) = 140^\circ\text{C}$, $\forall k$. Cependant, les thermomètres secs placés aux différents points de mesure fournissaient des indications comprises entre 120 et 150°C . Pour certains compartiments, les températures sèches de l'air secondaire étaient même supérieures à celles de l'air primaire. Nous avons gardé pour l'identification la valeur $T_a(k) = 140^\circ\text{C}$. De la même façon, il s'est avéré pratiquement impossible d'obtenir une mesure correcte de l'humidité de l'air primaire. La rame étant placée dans ses conditions de fonctionnement habituelles, nous avons adopté pour $X(k)$ une estimation fournie par les utilisateurs : $X(k) = 0,03 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$, $\forall k$. Les appareils de mesure de l'humidité résiduelle du tissu ne fournissant aucune indication lorsque celle-ci est trop faible, nous avons délibérément surséché le tissu de façon à avoir $\tilde{x}(N) = 0$. Le profil de la température superficielle du tissu à l'intérieur de la rame a été relevé mètre par mètre, en utilisant deux capteurs différents. La figure 4 montre les profils obtenus. On peut remarquer que ceux-ci sont sensiblement différents d'un capteur à l'autre. Ils sont, de plus, entachés

d'erreurs, en particulier rien ne peut expliquer la décroissance de $t_e(k)$ dans la zone $4 \leq k \leq 10$. Par ailleurs, pour une même sonde, les profils sont sensiblement différents selon qu'ils sont relevés à l'aller ou au retour, c'est-à-dire dans le sens d'avance du tissu ou à contre-sens (figure 5).

Deux identifications ont été effectuées à partir des deux relevés de la figure 4.

IV.5.2. Résultats

Les tableaux (7 et 8) donnent les résultats obtenus par les deux méthodes utilisées, d'abord pour les données issues du capteur W I R A pour celle obtenues avec le capteur I.T.F.

Les différences constatées entre les vecteurs des paramètres optimaux relatifs à chacun des capteurs sont dues à la différence des profils de température superficielle du tissu mesurés par ceux-ci.

La figure (9) donne l'évolution du coût en fonction du nombre d'itérations pour les deux méthodes.

. CAPTEUR W I R A

	Valeurs initiales	Valeurs finales Gradient	Axe par axe
A_1	2,776	3,665	3,775
A_2	5,634	7,280	8,660
A_3	2,350	0,690	0,520
$J(A)$	30,31	0,607	0,538

. CAPTEUR I.T.F.

	Valeurs initiales	Gradient	Valeurs finales Axe par axe
A_1	2,776	2,480	2,471
A_2	5,634	13,248	14,798
A_3	2,350	2,138	1,928
$J(A)$	53	0,90	0,033

- Tableau - 8 -

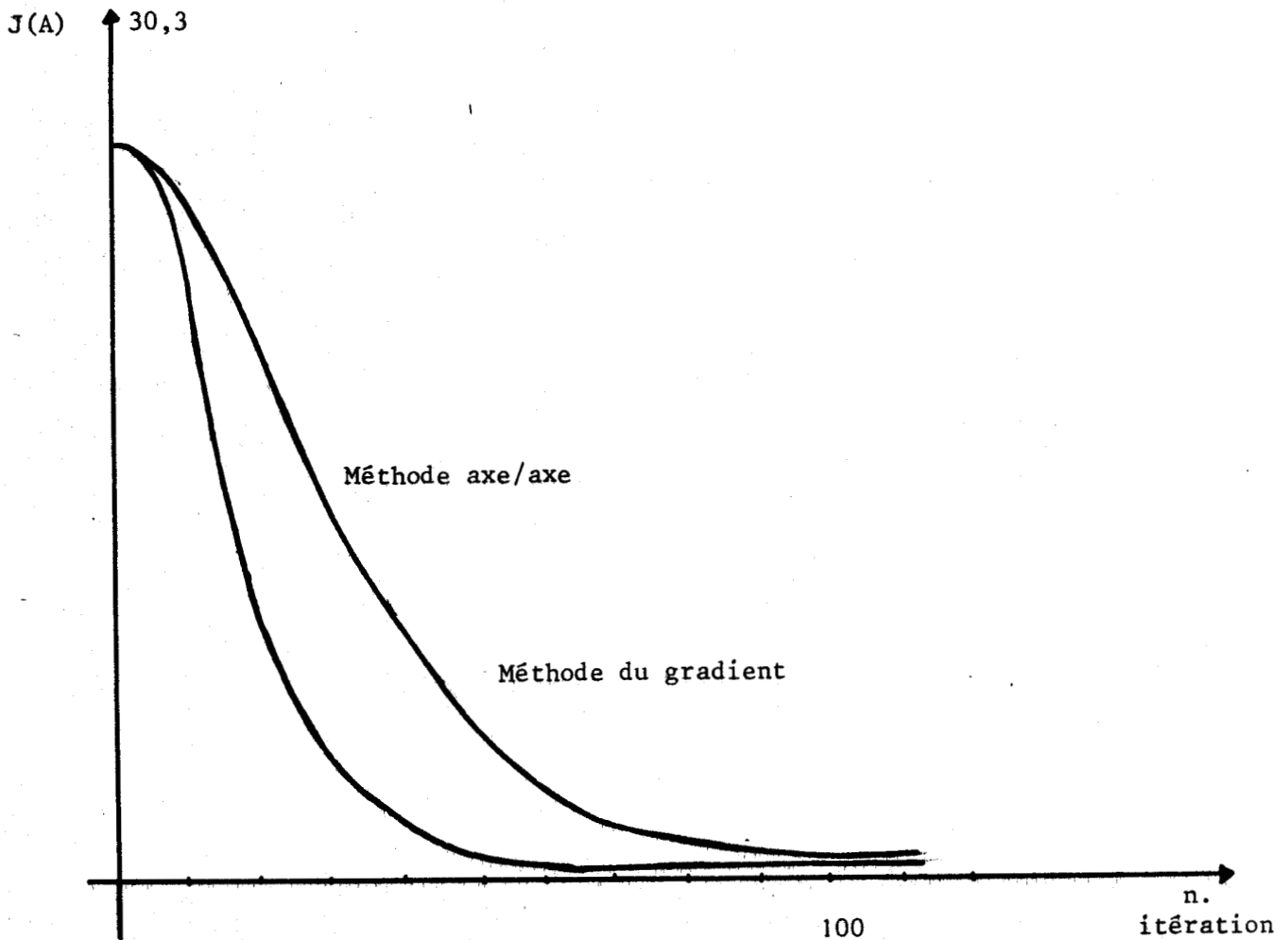


FIGURE - IV.9. -



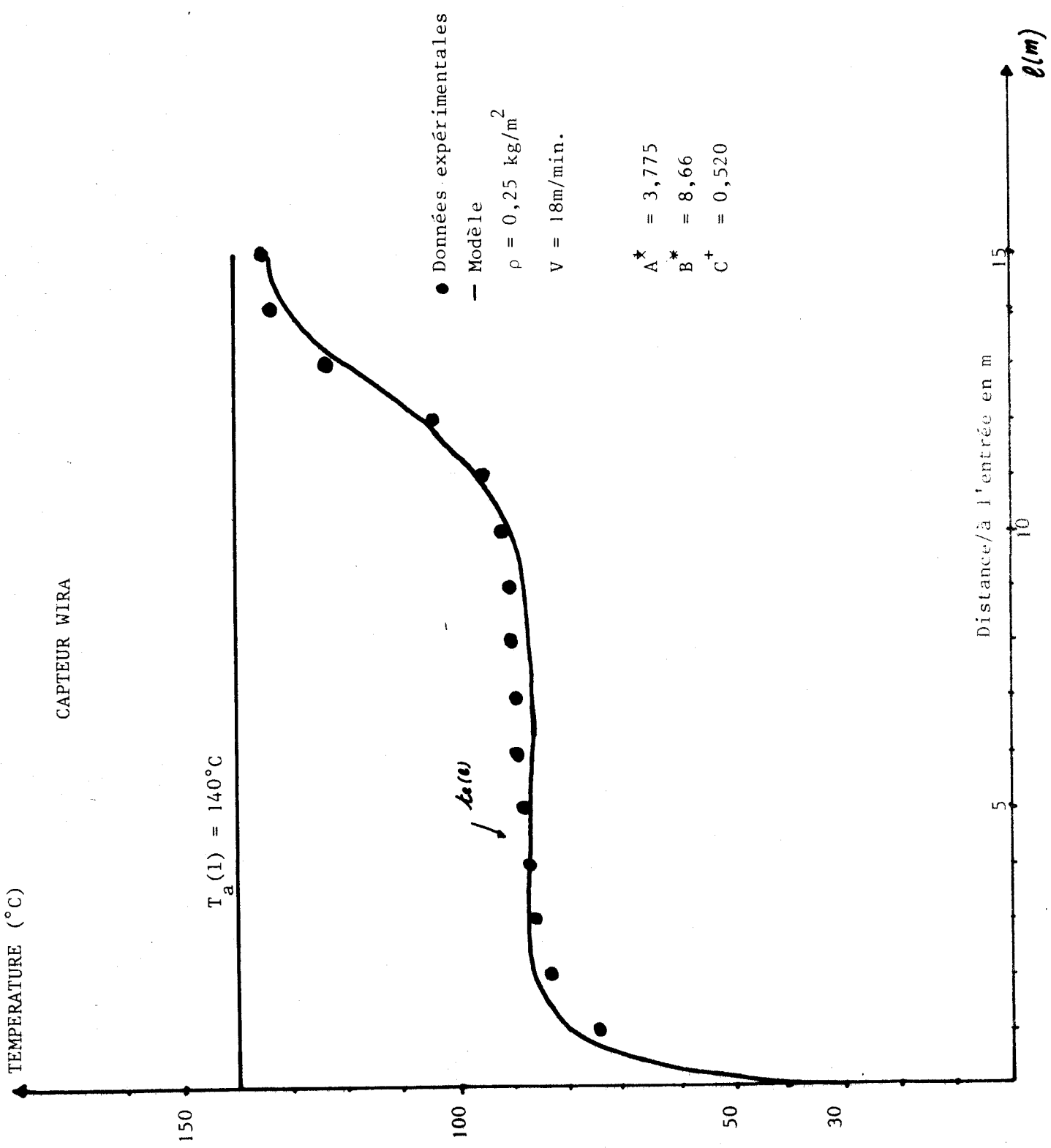
IV.6 - CONCLUSION

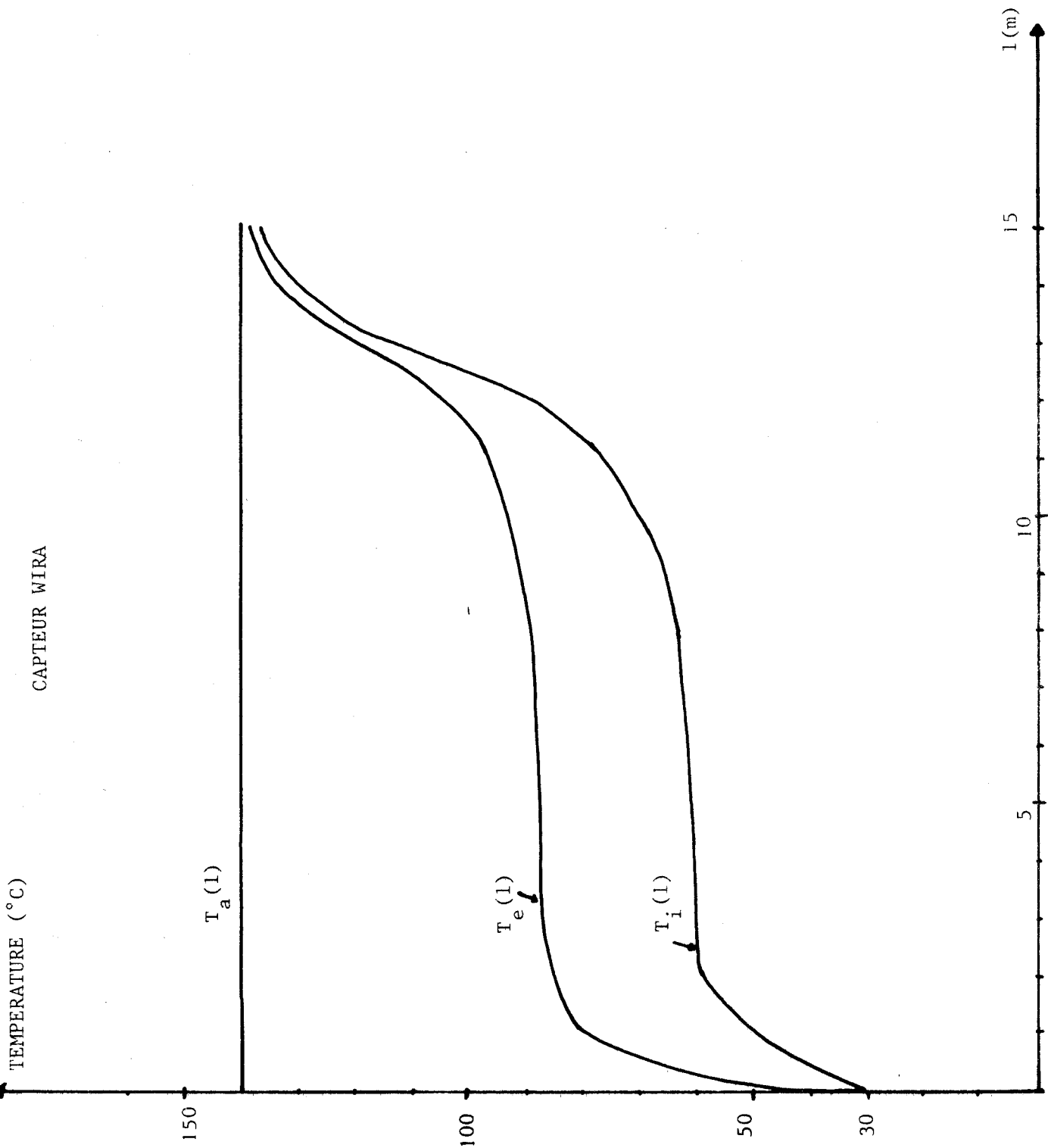
Les deux algorithmes d'identification utilisés ont donné des résultats satisfaisants. La convergence de la méthode axe par axe semble toutefois meilleure, la définition des coûts induisant en effet un gradient très important.

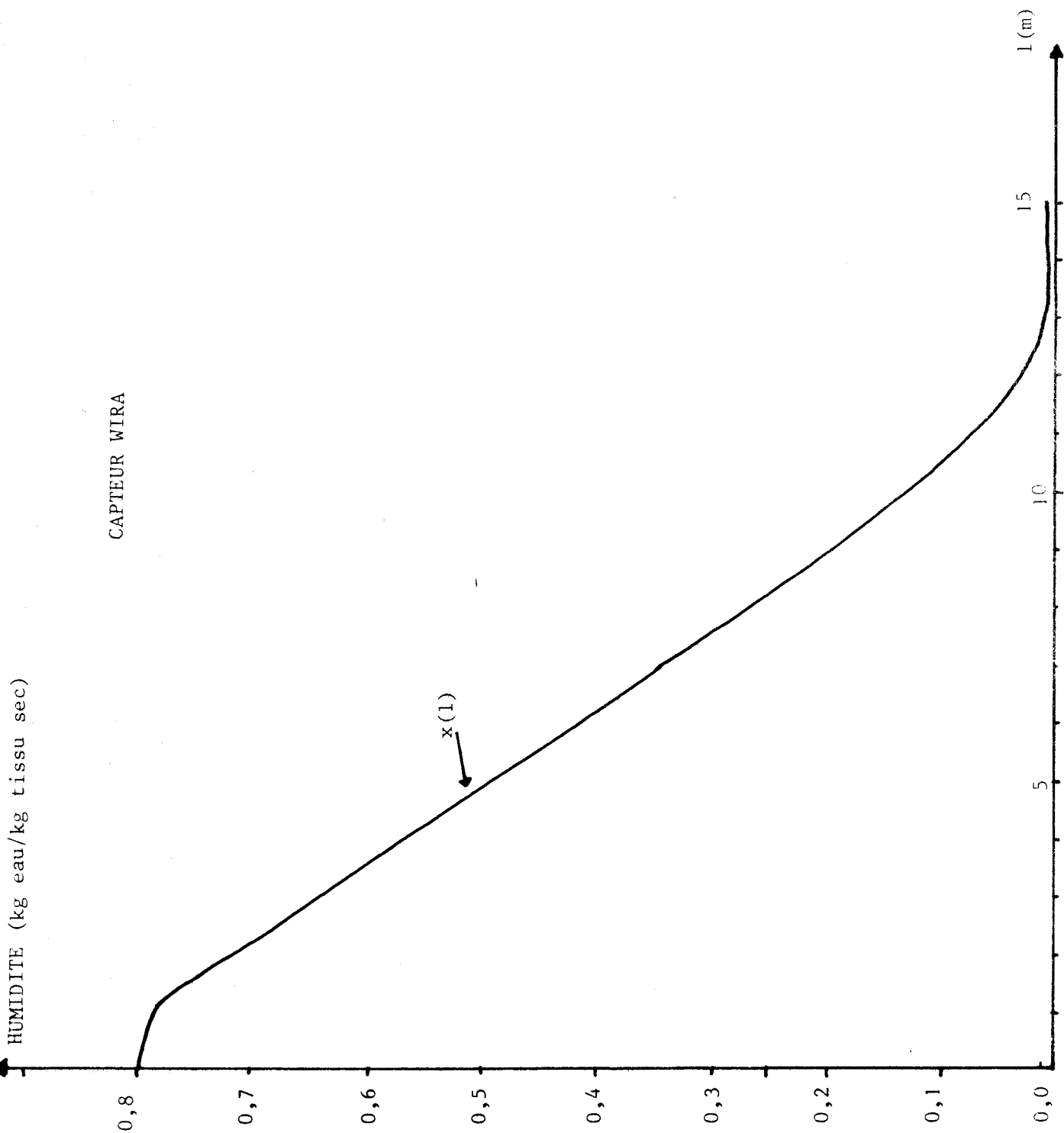
Les résultats obtenus sont naturellement très dépendants de la qualité des mesures réalisées sur le processus réel. Comme on a pu le constater, celle-ci est encore nettement insuffisante pour que les paramètres du modèle obtenu puissent être considérés comme valables.

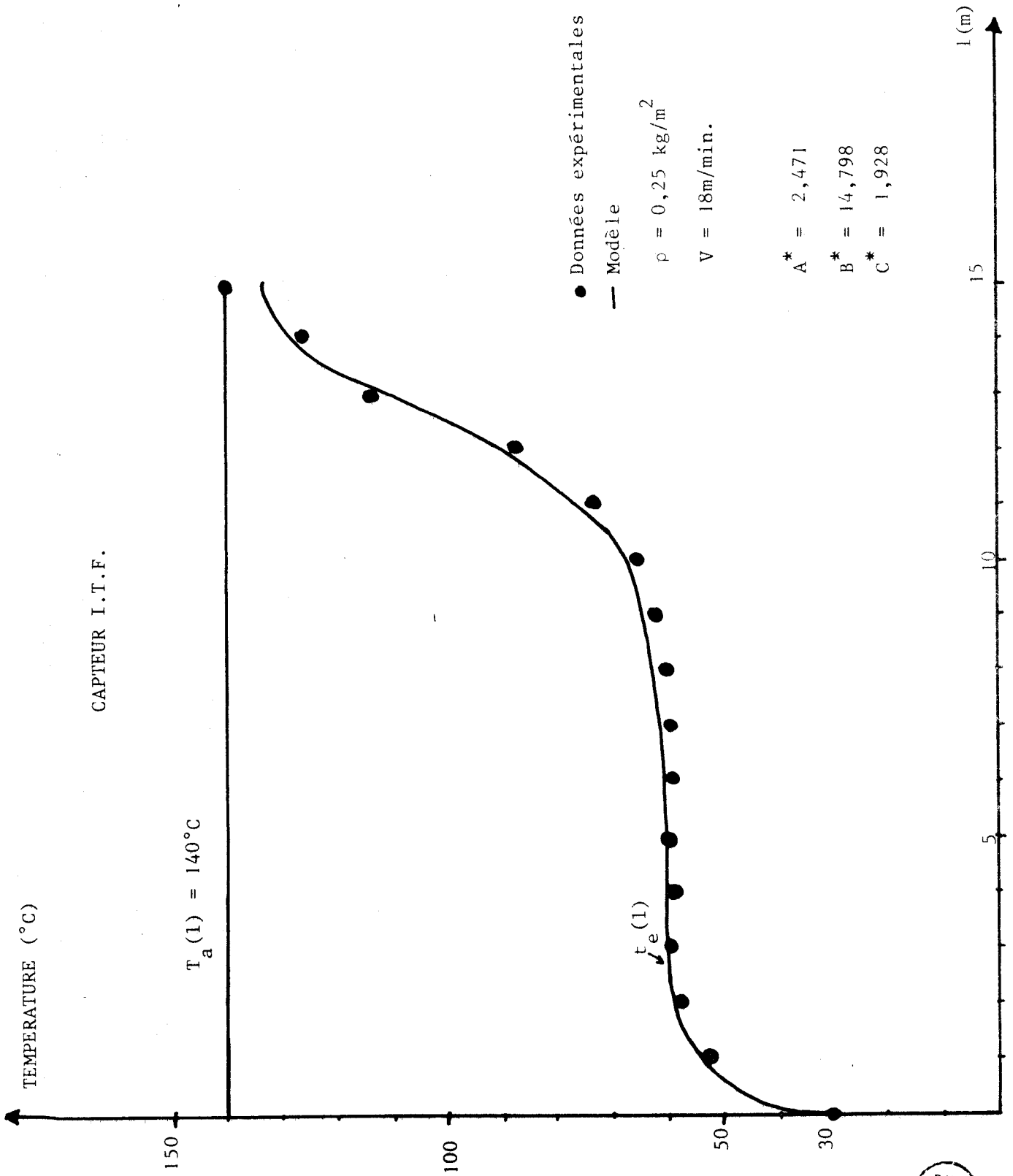
L'obtention de données plus fiables est donc une condition nécessaire à la validation d'un modèle pour chaque type de tissu. Le modèle validé semble donner des résultats précis, comme le montrent les figures suivantes qui font apparaître les profils de température superficielle mesurés et obtenus par le modèle validé.

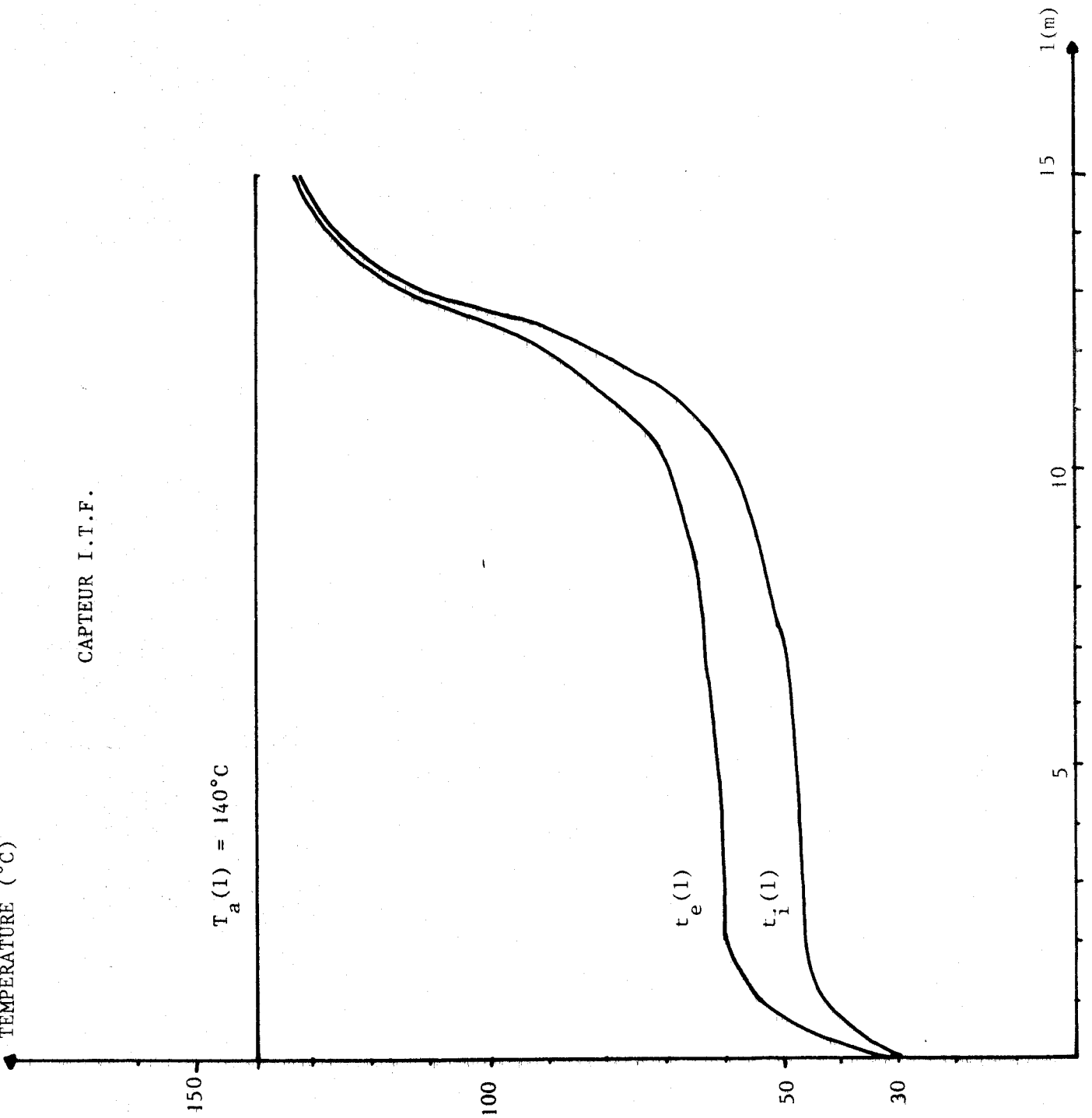
Pour chaque exemple d'identification, nous présentons les courbes de températures externes et internes du tissu, ainsi que la courbe exprimant l'évolution de l'humidité à l'intérieur de la rame. Nous y portons également les paramètres identifiés.



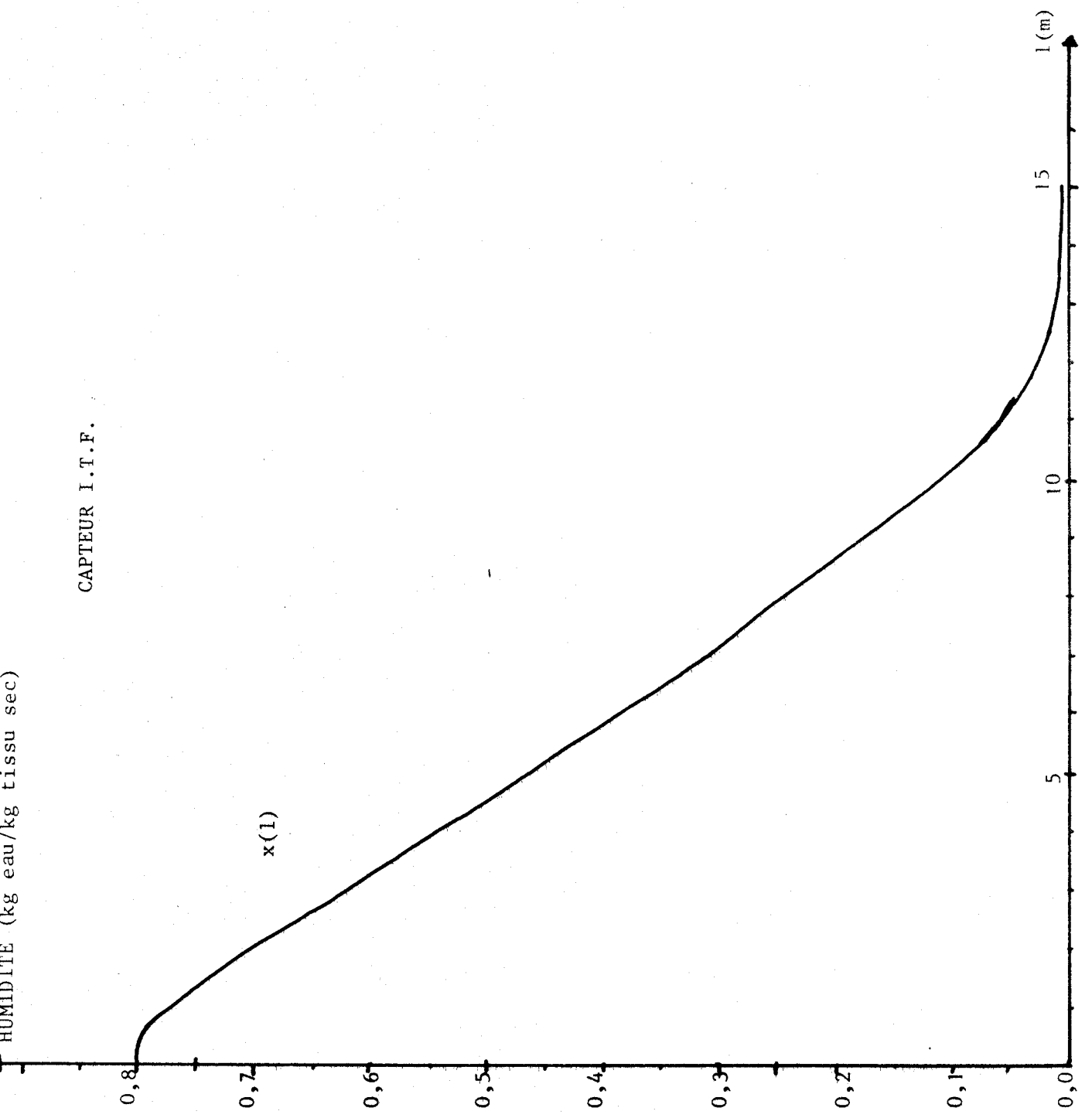


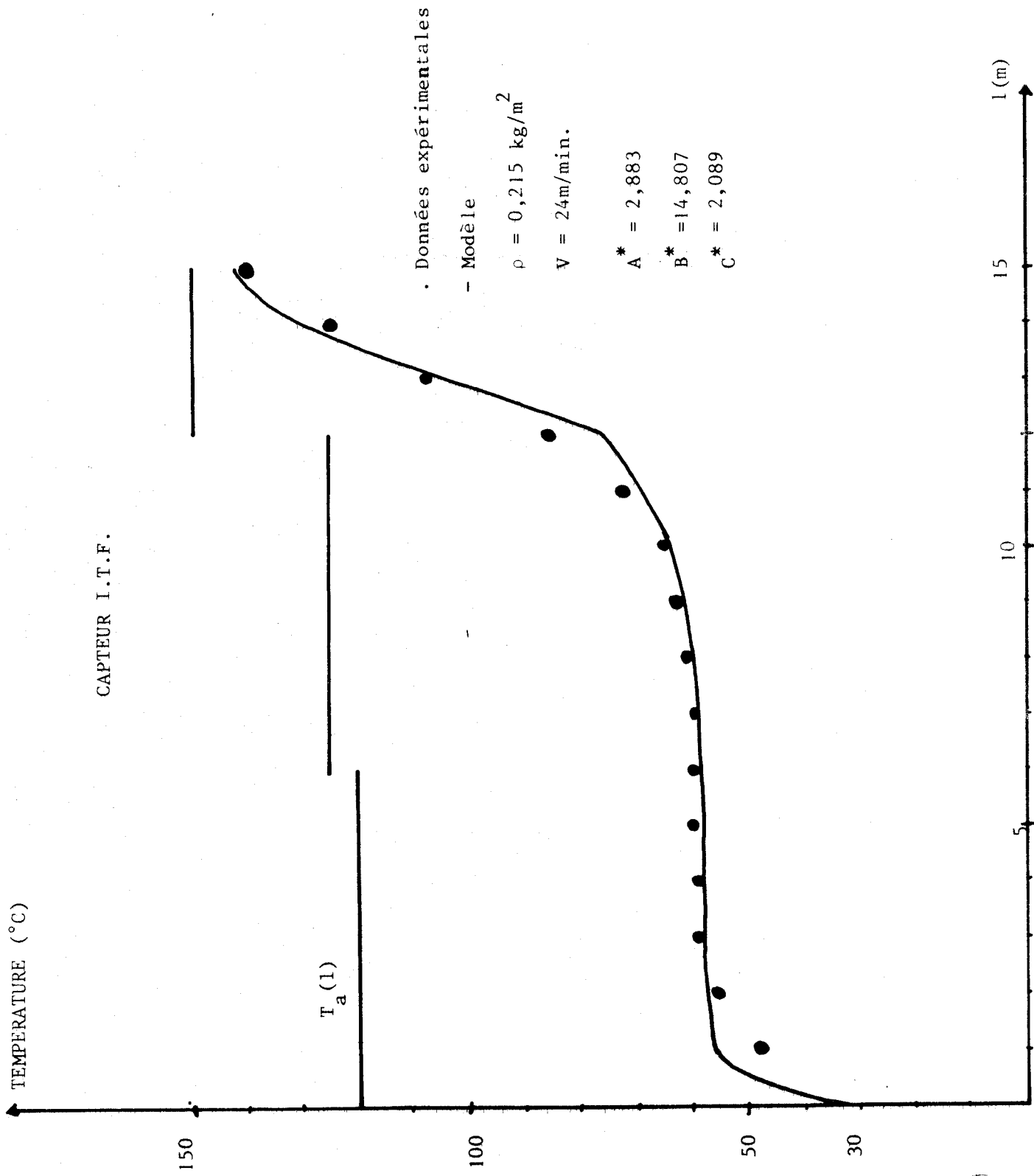


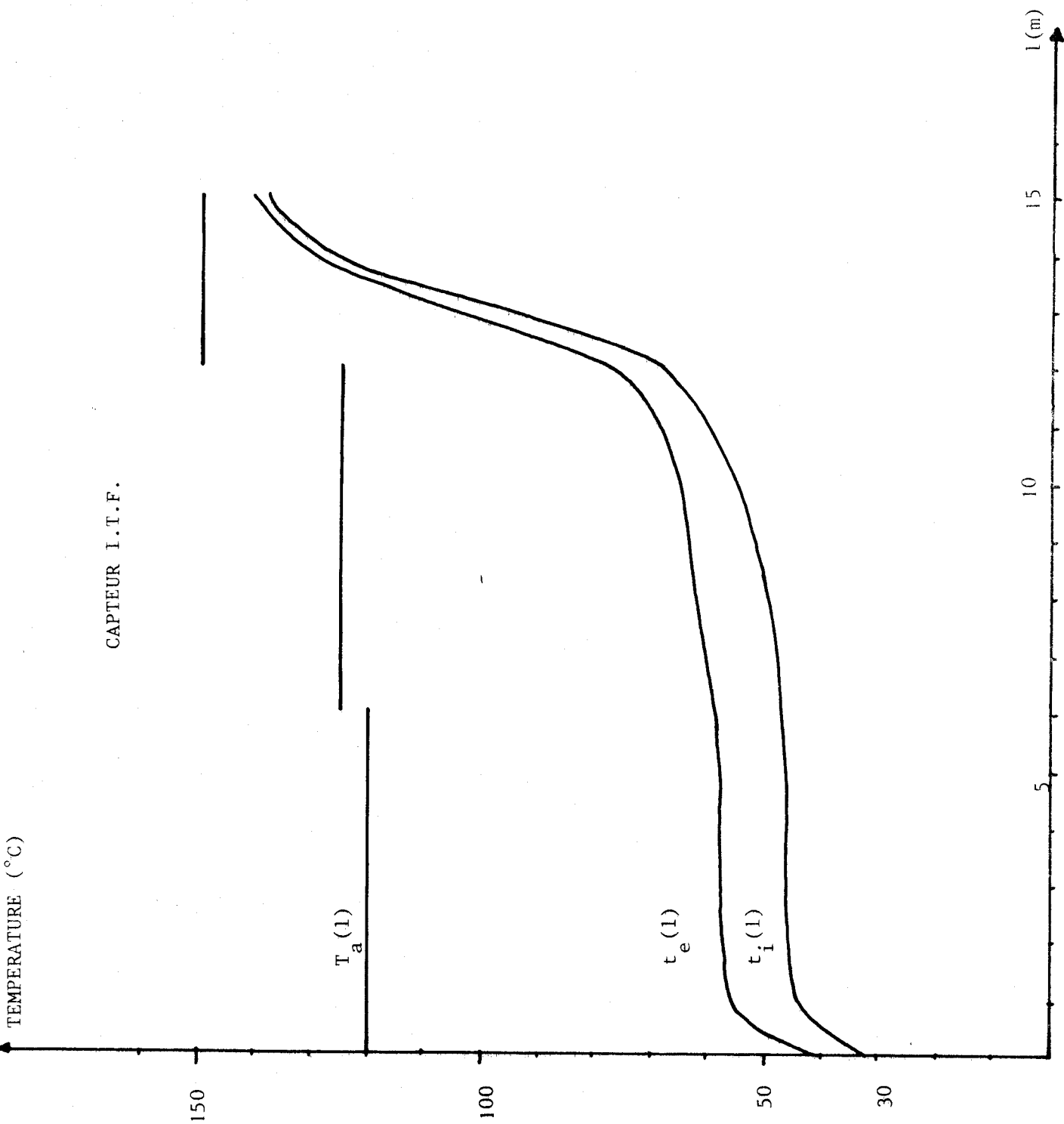


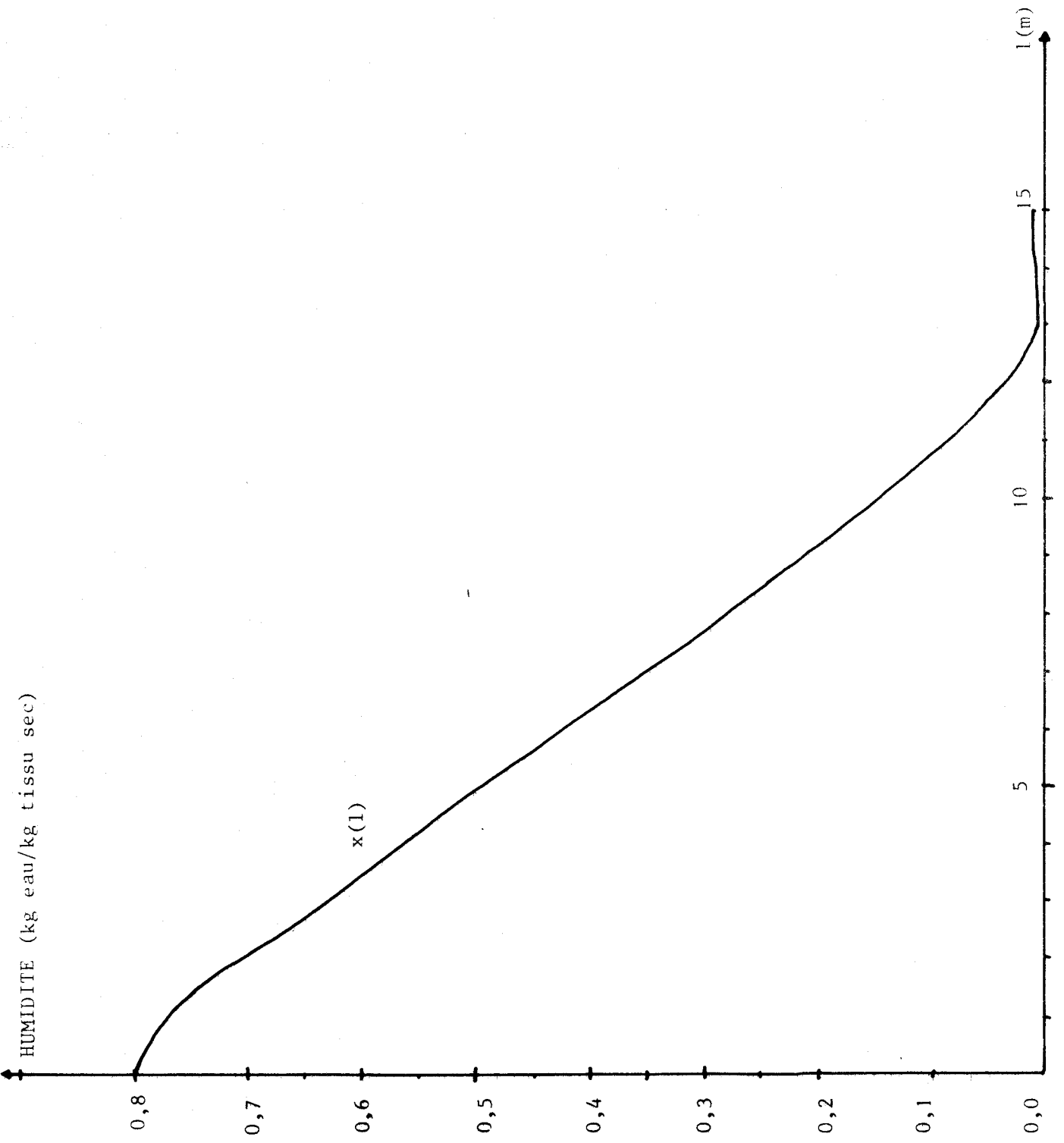


BUS
LILLE



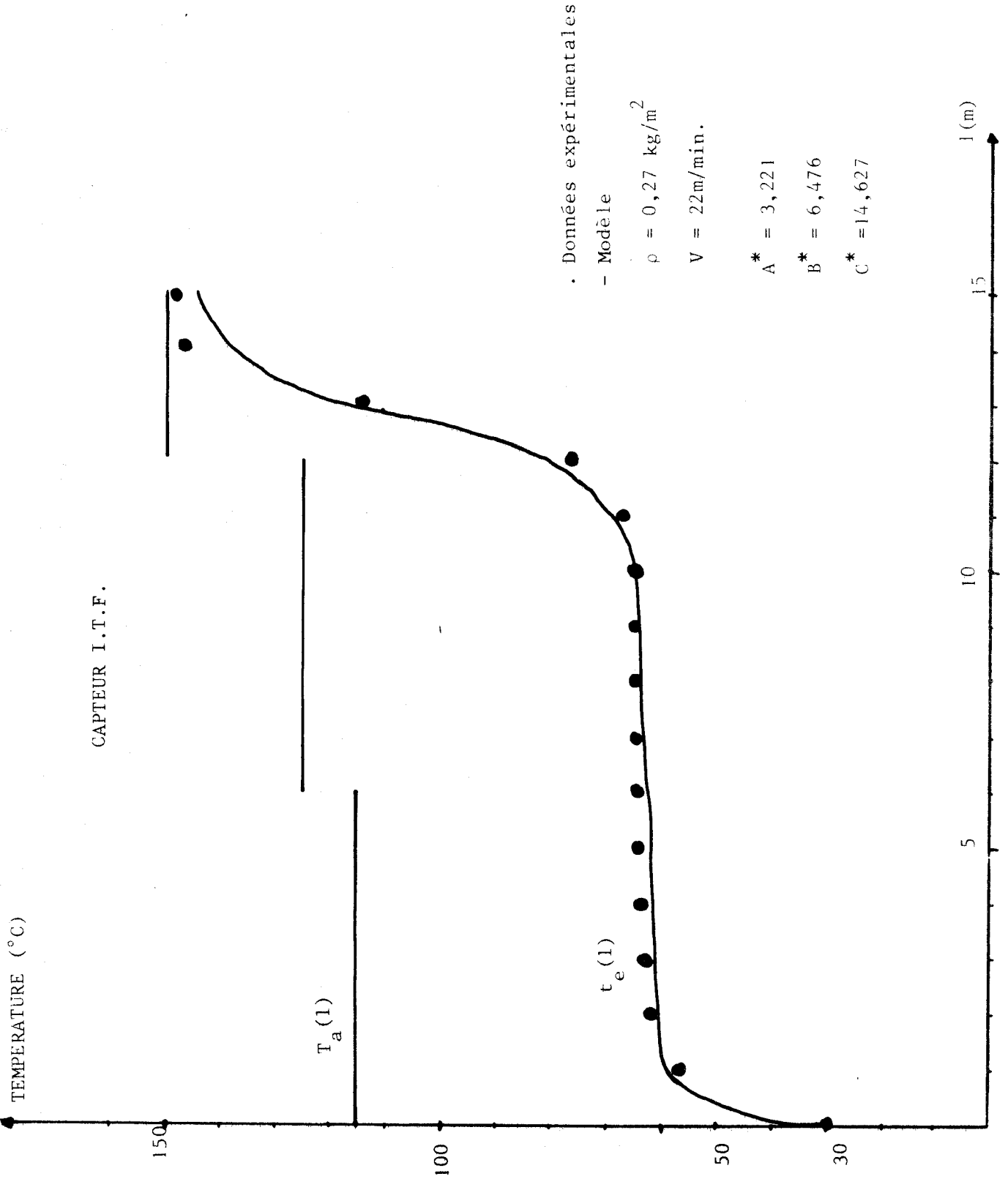




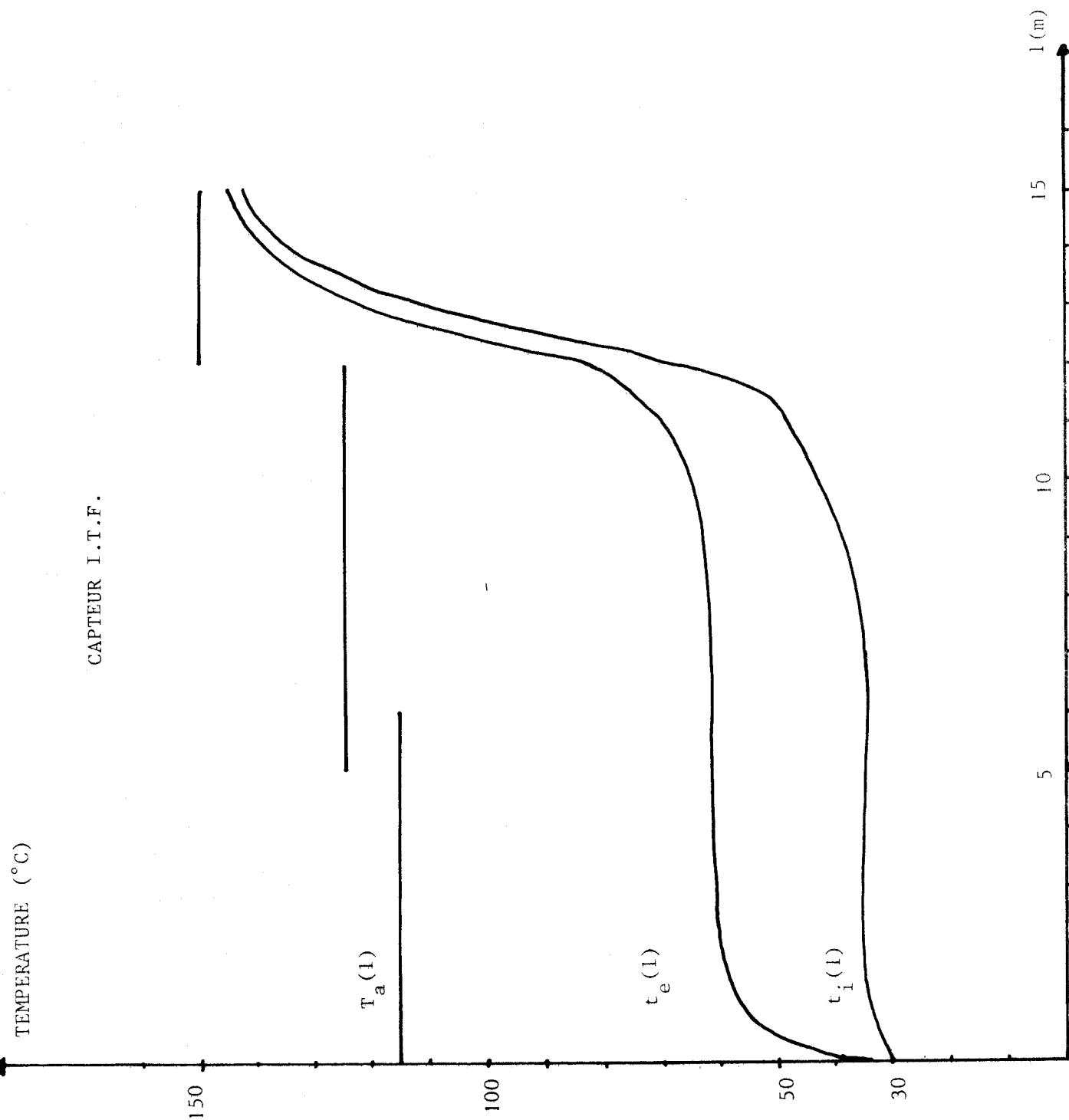


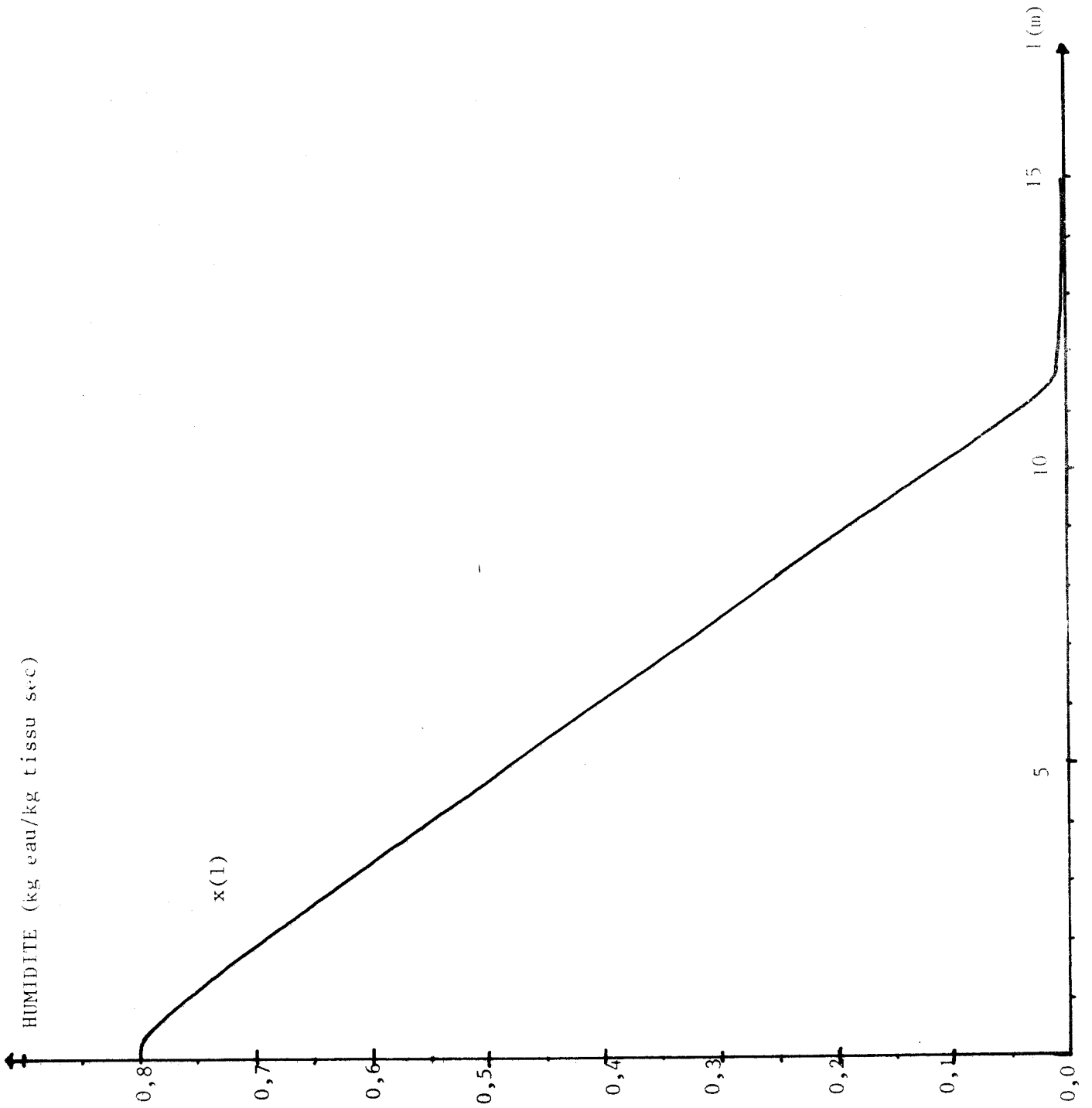
AMS
EURE

CAPTEUR I.T.F.



BHS
LILLE





BUS
LILLE

- BIBLIOGRAPHIE -

- /4-1/ J. RICHALET, A. RAULT, R. POULIQUEN
"Identification des processus par la méthode du modèle"
Théorie des systèmes - V. 4 - 1971 - Gordon and Breach.
- /4-2/ A.P. SAGE, J.L. MELSA
"System Identification"
Math. in Science and Engineering - V. 8 - Ac. Press - 1971.
- /4-3/ P. EYKHOFF
"System Identification"
John Wiley 1974.
- /4-4/ F. PIERRONE
"Modélisation et identification d'un processus de séchage"
Thèse de 3ème Cycle - 16.06.77 - Univ. de Bordeaux - N° 1346.
- /4-5/ L. POVY
"Identification des processus"
Dunod-Université - Bordas - 1975.
- /4-6/ A.C. BAJPAI, I.H. CALUS, J.A. FAIRLEY
"Numerical methods for engineers and Scientists"
A. Students Course Book - Taylor and Francis - London 1975.
- /4-7/ F. CESCHINO, J. KUNTZMAN
"Méthodes numériques - Problèmes différentiels de condition initiale"
DUNOD - 1963.
- /4-8/ S.G. BEVERIDGE, R.S. SCHESTER
"Optimization : Theory and Practice"
Mac Graw-Hill - Book Company - 1970.
- /4-9/ D.E. KIRK
"Optimal control theory"
Networks Service - Robert W. New. Comp. - Edition 1970.
- /4-10/ P. BERNHARD.
"Commande optimale, décentralisation et jeux dynamiques"
Dunod-Automatique - Paris 1976.
- /4-11/ H.H. ROSENBROCK
"An Automatic Method for finding the greatest or least value of a function"
Comput. J. 3 - p. 175-184. - octobre 1960.
- /4-12/ R. HOOK, A.T. JEEVES
"Direct search solution of numerical and statistical problems"
J. Assoc. Comp. Mach. 8.2. - p. 212-229 - avril 1961.

CHAPITRE V

SIMULATION DU PROCESSUS - DÉTERMINATION DES POINTS DE CONSIGNE OPTIMAUX EN RÉGIME PERMANENT.

V.1. INTRODUCTION

La plupart des rames sécheuses rencontrées dans l'industrie textile sont pilotées en maintenant les grandeurs de commande constantes le long de la rame. Les points de consigne affichés pour ces grandeurs sont choisis de manière empirique, et conduisent souvent au surséchage du tissu, c'est-à-dire à une dépense énergétique inutile.

Le problème qui se pose est alors celui de la détermination de profils de commandes au long de la rame, de sorte que l'opération de séchage soit la plus efficace possible.

Nous avons abordé ce problème de deux façons différentes :

. D'une part, la simulation des équations du modèle permet d'étudier le comportement des variables de sortie pour différentes configurations de variables de commande et de calculer, en particulier, la consommation énergétique associée à chaque configuration. L'évolution de celle-ci en fonction des commandes admissibles peut-être reportée sur des abaques permettant de définir approximativement un régime de fonctionnement optimal.

. D'autre part, une caractérisation plus rigoureuse des points de consigne optimaux est obtenue en appliquant au modèle du processus et à celui de la consommation énergétique, les méthodes d'optimisation.

Dans les deux cas, il convient avant tout de définir un modèle de la consommation énergétique.

V.2 - MODELISATION DU CRITERE D'OPTIMALITE

La détermination des points de consigne optimaux pour le réglage de la rame sécheuse suppose la définition précise d'un critère d'optimalité permettant de comparer les différentes solutions possibles.

Nous avons souligné plus haut (chap I Introduction) les critères permettant d'apprécier le fonctionnement du processus.

- 1) Vitesse de séchage, qui conditionne la vitesse de cheminement du tissu dans la rame.
- 2) Rendement de séchage, qui conditionne, pour une masse d'eau totale évaporée, la dépense énergétique.

Il apparait immédiatement qu'on ne peut à la fois maximiser la vitesse de défilement du tissu et minimiser la consommation énergétique. En effet, plus la vitesse de défilement augmente et moins l'on dispose de temps pour évaporer une masse d'eau donnée. Ceci impose des conditions de température et d'humidité plus strictes sur l'air de séchage et conduit donc à une consommation énergétique accrue.

Le schéma d'optimisation retenu consiste à supposer imposée la vitesse du tissu et à chercher dans ces conditions les points de consigne optimaux vis à vis de la consommation. Cette approche est justifiée par la réalité, en effet, le planning de production impose pour chaque rame un tableau des charges, et conduit à un temps de fabrication imposé :

Une première analyse de la consommation énergétique conduit à distinguer trois termes :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{pertes}} + Q_{\text{ventilateurs}} + Q_{\text{air}}$$

- Q pertes comprend les différentes quantités de chaleur perdues par les fuites, le rayonnement, les chaînes, etc... Ce terme est difficilement modélisable, de plus, dans le domaine de réglage des différentes commandes, il varie relativement peu et peut donc être négligé dans la procédure d'optimisation.

- . Q ventilateurs représente la dépense énergétique liée à la circulation de l'air de séchage à l'intérieur des compartiments de la rame. Le débit des ventilateurs n'ayant pas été retenu comme variable de commande, (principalement à cause de son influence non connue sur l'état de surface du tissu), cette dépense est pratiquement indépendante des variables de commande et, comme précédemment, on n'en tiendra pas compte dans la procédure d'optimisation.
- . Q air est la quantité de chaleur fournie à l'air de séchage. Compte tenu du cycle de l'air dans le diagramme de Mollier, on peut écrire :

$$(5.2) \quad Q_{\text{air}} = Q_1 + Q_2$$

$Q_1 \triangleq$ Quantité de chaleur perdue dans la transformation air primaire $\rightarrow$ air secondaire. Cette transformation ne fait intervenir que les échanges au niveau du tissu, dont le modèle est fourni par les équations du système (3-25) du chapitre III).

$Q_2 \triangleq$ Quantité de chaleur perdue dans la transformation : air secondaire $\rightarrow$ air primaire. Cette transformation fait intervenir le processus de recyclage : à partir des airs secondaires des différents compartiments (dont l'état est fourni par le système (3-25) Chap. III) le mélangeur constitue un mélange de gaz qui sera transformé en air primaire par passage sur l'échangeur.

V.2.1. Transformation air primaire $\rightarrow$ air secondaire.

La quantité de chaleur correspondante est calculée à partir de l'analyse des échanges tissu air de séchage dans une section différentielle (les symboles ont la même signification que dans les chapitres précédents).

.../...

1) Chaleur cédée par l'air primaire à la couche sèche:

$$(5-3) \quad h.(T_a(l) - t_e(l)).S.dl$$

2) Chaleur récupérée par l'air secondaire sous forme de vapeur:

$$(5-4) \quad V.S.p (\lambda + C_{pv} t_i(l))dX(l)$$

d'où

(5-5)

$$dQ_1 = h(T_a(l) - t_e(l)).S.dl - VpS(\lambda + C_{pv} t_i(l)).dx(l)$$

et en utilisant l'équation d'état donnant $\frac{dx}{dl}$:

$$(5-6) \quad Q_1 = S \int_0^L \left\{ h(T_a(l) - t_e(l)) - h_2(\lambda + C_{pv} t_i(l)).(X_2(l) - X(l)) \right. \\ \left. \left(1 - e^{-\frac{x(l)-x_f}{x_c-x_f}} \right) \right\} dl$$

Remarque : A partir de l'équation (3-20, chap. III) donnant le bilan enthalpique de l'air dans la section différentielle considérée, on peut encore écrire Q_1 sous la forme suivante :

(5-7)

$$Q_1 = V_a p_a S \int_0^L \left\{ (C_{pa} T_a(l) + X(l)(\lambda + C_{pv} T_a(l))) - (C_{pa} T_a'(l) + X'(l)(\lambda + C_{pv} T_a'(l))) \right\} dl$$

V.2.2. Transformation air secondaire → air primaire.

L'impossibilité pratique d'identifier un modèle donnant l'état de l'air secondaire, nous a conduit à approcher celui-ci, en simplifiant les équations du processus de recyclage.

Nous posons :

$$(5-8) \quad \begin{cases} \beta_o^i = 1 & i = 1, 5 \\ \beta_j^i = 0 & i \neq j \\ \beta_o^j = \alpha_j & j = 1, 5 \end{cases}$$

Ainsi, pour définir le coefficient de recyclage, nous ne tenons pas compte des couplages existants entre les différents caissons de la rame.

Soit $\alpha(X, \ell)$ la proportion d'air secondaire évacuée par les cheminées au point d'abscisse ℓ , et fonction de l'humidité de l'air primaire ; $(1-\alpha(X, \ell))$ est la proportion d'air secondaire recyclé.

Le processus de recyclage est alors assimilé à un mélangeur (chap. III) à la sortie duquel l'humidité de l'air est égale à celle de l'air primaire. On a alors l'équation suivante :

$$(5-9) \quad (1-\alpha(X, \ell)) X'(\ell) + \alpha(X, \ell) X_0 = X(\ell)$$

$X'(\ell)$: taux d'humidité de l'air secondaire (après contact), fonction de l'humidité de l'air primaire et de la quantité d'eau enlevée au tissu à l'abscisse ℓ (kg eau/kg airsec).

X_a Δ : taux d'humidité de l'air atmosphérique (kg eau/kg airsec).

$X(\ell)$: taux d'humidité de l'air primaire (kg eau/kg airsec)

Le coefficient de recyclage est donc :

$$(5-10) \quad \alpha(X, \ell) = \frac{X(\ell) - X(\ell)}{X'(\ell) - X_0}$$

de plus, il vérifie la relation $0 \leq \alpha(X, \ell) \leq 1$

Le mélange d'air secondaire recyclé et d'air atmosphérique ainsi obtenu est réchauffé par passage sur un échangeur. A l'entrée de l'échangeur, on peut écrire l'enthalpie d'1 kg d'air sec associée à $X(\ell)$ kg d'eau.

$$(5-11) \quad H_2 = (1-\alpha(X, \ell)) H' + \alpha(X, \ell) \cdot H_a$$

avec

H' Δ enthalpie de l'air secondaire.

$$(5-12) \quad H' = C_{pa} T_a'(\ell) + X'(\ell) \cdot (\lambda + C_{pv} T_a'(\ell))$$

H_a Δ enthalpie de l'air atmosphérique.

$$(5-13) \quad H_a \Delta C_{pa} T_0 + X_0 (\lambda + C_{pv} T_0)$$

T_0 Δ température de l'air atmosphérique.

L'enthalpie de l'air atmosphérique ne dépend que des conditions atmosphériques invariables au cours de l'opération.

En utilisant les équations (5-10), (5-12) et (5-13), l'enthalpie de l'air mélangé devient alors :

(5-14)

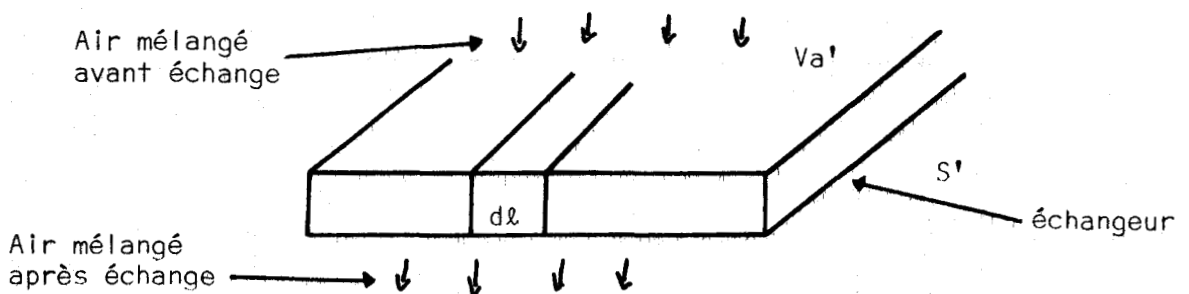
$$H_2 = \left(1 - \frac{X'(\ell) - X(\ell)}{X'(\ell) - X_0}\right) (C_{pa} Ta'(\ell) + X'(\ell)(\lambda + C_{pv} Ta'(\ell))) \\ + \frac{X'(\ell) - X(\ell)}{X'(\ell) - X_0} (C_{pa} T_0 + X_0(\lambda + C_{pv} T_0))$$

Dans les mêmes conditions, l'enthalpie de l'air primaire après échangeur s'écrit :

$$(5-15) \quad H_1 = C_{pa} Ta(\ell) + X(\ell) \cdot (\lambda + C_{py} Ta(\ell))$$

et on peut calculer la variation d'enthalpie de mélange lors de son passage sur l'échangeur.

Dans une section différentielle, $d\ell$, la quantité d'air sec qui traverse l'échangeur est :



$$(5-16) \quad v_a' \text{ pa } S' d\ell = D_a d\ell$$

V_a' $\triangleq$ vitesse de l'air au niveau de l'échangeur (m/min)

S' $\triangleq$ largeur de l'échangeur (m)

pa $\triangleq$ densité volumique de l'air (kg air/m³)

La quantité de chaleur fournie par l'échangeur à l'air mélangé s'écrit :

$$(5-17) \quad dQ_2 = Da (H_2 - H_1) d\ell$$

Dans ces conditions, la quantité de chaleur à l'air de séchage s'écrit finalement :

(5-18)

$$Q_{\text{air}} = S \int_0^L \left\{ h [T_a(\ell) - t_e(\ell)] + h_2 [\lambda + C_{pv} t_i(\ell)] [X_2(\ell) - X(\ell)] \dots \left[\dots 1 - e^{-\frac{X(\ell) - X_f}{X_c - X_f}} \right] \right\} d\ell + \dots$$

$$\dots + D_a \int_0^L \left\{ [C_{pa} T_a(\ell) + X(\ell)(\lambda + C_{pv} T_a(\ell))] - (1 - \alpha(X, \ell)) [C_{pa} T'_a(\ell) + \dots \dots + X'(\ell)(\lambda + C_{pv} T'_a(\ell))] + \alpha(X, \ell) H_a \right\} d\ell$$

La quantité de chaleur Q_1 ne dépend que des variables de commande :

$T_a(\ell)$, $X(\ell)$: profils de température et d'humidité de l'air primaire

V : vitesse d'avance du tissu.

La quantité Q_2 , quant à elle, dépend de ces mêmes variables mais aussi, par l'intermédiaire du coefficient de recyclage, de la position des volets de cheminée.

.../...

V.3 - SIMULATION

Les différentes simulations ont été effectuées en laissant constantes deux variables de commande et en explorant le domaine de variation de la troisième, dans les conditions suivantes :

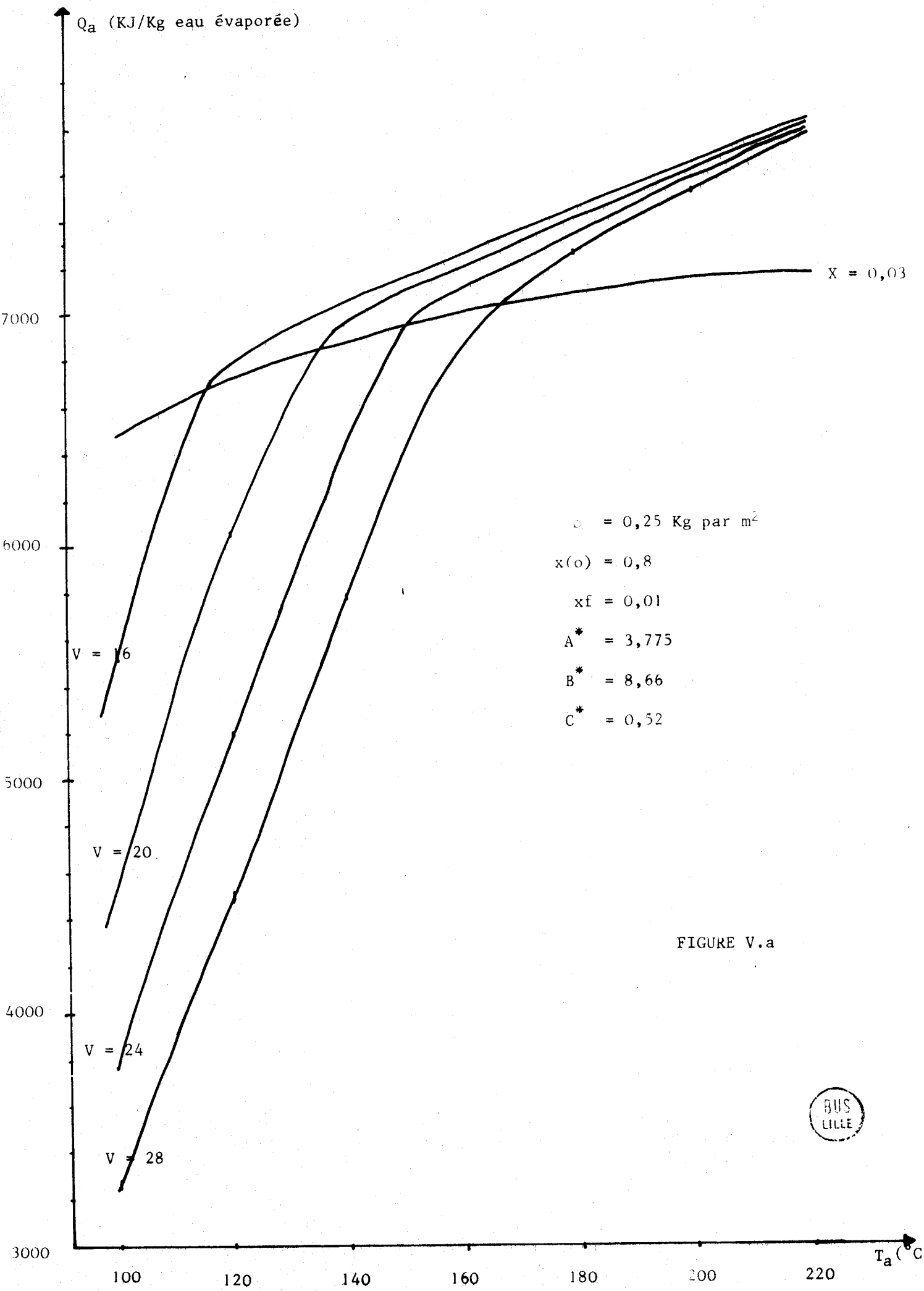
- L'humidité du tissu à l'entrée de la rame est constante et homogène sur toute sa largeur.
- La température et l'humidité de l'air primaire sont constantes le long de la rame.

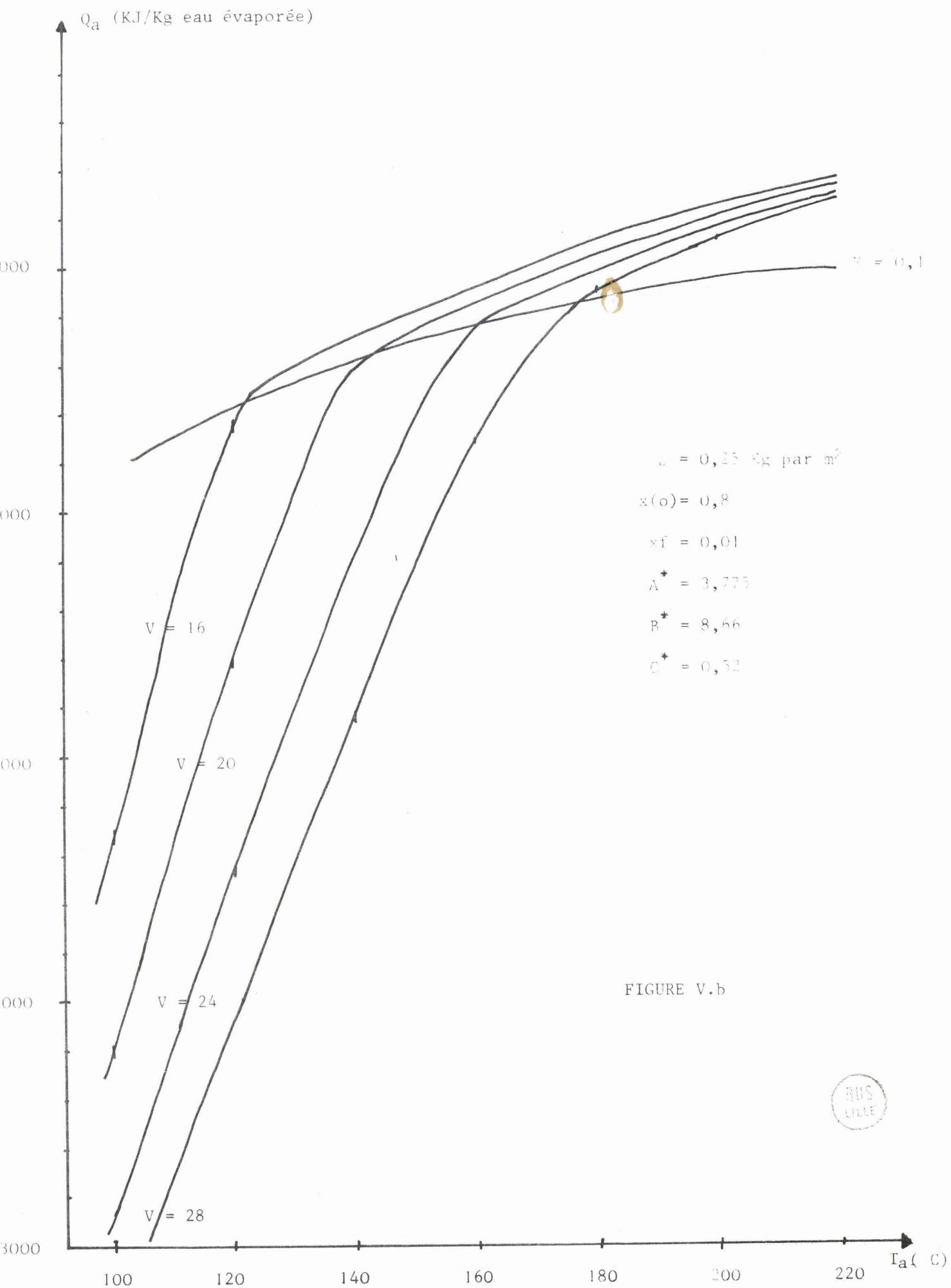
Pour chaque simulation on calcule la dépense énergétique (plus exactement la partie Q_{air} de cette dépense) ; on peut alors tracer des abaques de séchage, dont les figures suivantes donnent quelques exemples.

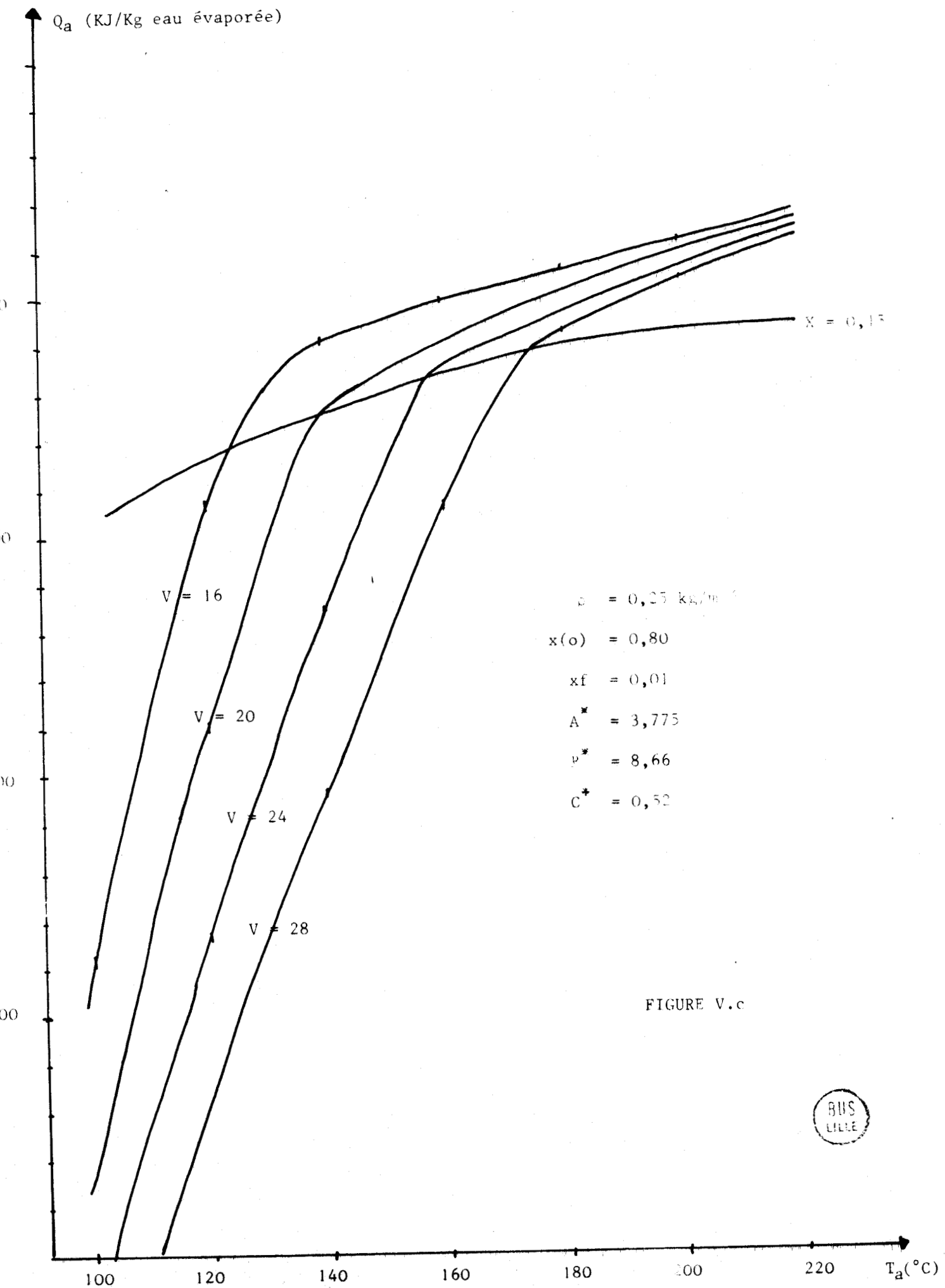
Pour une humidité donnée de l'air primaire, on trace, pour différentes vitesses d'avance du tissu, les courbes de consommation énergétique par kg d'eau évaporée en fonction de la température de l'air primaire. Ces courbes peuvent être graduées suivant les humidités de sortie du tissu, et il convient de situer, sur chacune d'elles, le point au delà duquel la contrainte d'humidité finale est satisfaite. Ce point sépare la portion de la courbe pour laquelle le tissu sort mouillé de celle où il est surséché. L'ensemble de ces points définit une courbe caractéristique du tissu considéré. Celle-ci donne, pour une humidité de l'air primaire fixée, la consommation optimale d'énergie par kg d'eau évaporée en fonction de la température de l'air primaire. Elle est graduée en vitesses. Pour l'humidité initiale considérée, on est alors sûr que l'humidité finale désirée est atteinte au moindre coût.

Les abaques permettent de se faire une idée de l'influence des différents paramètres de commande sur le coût du séchage. Cependant leur utilisation pour la détermination de points de consignes optimaux suppose que les conditions de température et d'humidité de l'air primaire sont constantes le long de la rame. Cette limitation peut être levée par une étude directe d'optimisation.

La consommation énergétique est alors minimisée en cherchant les points optimaux, caisson par caisson.









V.4 - COMMANDE OPTIMALE

Le problème d'optimisation se formule de la façon suivante :

$$(5-19) \quad \min_u J(u) = \sum_{k=0}^N g(U_k, y_k, k)$$

$J(u)$: quantité de chaleur fournie pour évaporer 1kg d'eau sous la contrainte.

$$(5-20) \quad y(k+1) = f(y_k, U_k, k)$$

y_k Δ représente le vecteur d'état du système sous forme discret.

U_k Δ représente le vecteur de commande du système sous forme discret.

V.4.1 Variables de commande

Les différents variables de commande ne sont pas réglables dans les mêmes conditions.

v Δ vitesse d'acheminement du tissu est constante le long de la rame.

$T_a(k)$ Δ température de l'air primaire est indexée en deux zones.

$X(k)$ Δ taux d'humidité de l'air primaire est indexé en cinq zones correspondant aux cinq caissons.

Donc le problème d'optimisation revient à chercher huit variables de commande, soient :

$$(5-21) \quad \underline{U}^{*T} = (V^*, Ta_1^*, Ta_2^*, X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*, X_5^*)$$

tel que $J(\underline{U}^*) \leq J(U)$.

Ces variables sont soumises aux contraintes suivantes :

- Le taux d'humidité de l'air primaire ne peut être inférieur au taux d'humidité de l'air atmosphérique X_0 :

$$X_i \geq X_0 \quad i = 1, \dots, 5$$

.../...

- Pour des raisons mécaniques, la vitesse d'avance du tissu à l'intérieur de la rame ne peut dépasser une limite supérieure :

$$V \leq V_{\max}$$

- La température de l'air primaire ne peut dépasser celle du fluide caloporteur au niveau de l'échangeur :

$$T_{aj} \leq T_{a\max} \quad j = 1, 2$$

V.4.2. Condition finale

La contrainte concernant l'humidité du tissu en sortie de rame est traitée par la méthode de pénalisation [5-1, 5-2]. Le critère s'écrit alors :

$$(5-22) \quad J(u) = \frac{1}{2} K \left\| y(N) - \tilde{y} \right\|_Q^2 + \sum_{k=0}^N g(y_k, u_k, k)$$

où : K est un coefficient de pénalisation positif,

$\tilde{y}$ définit un état désiré en sortie de rame,

Q est une matrice symétrique, définie non négative, telle que seuls les écarts en humidité de sortie du tissu se trouvent pénalisés.

Le problème est alors de minimiser le critère J(u) sous les contraintes définissant les commandes admissibles et les équations d'état.

V.4.3. Conditions nécessaires d'optimalité

Notons H_k l'hamiltonien du système sous forme discrète [5-3, 5-4].

$$(5-23) \quad H_k(y_k, u_k, \lambda_k, k) = g(y_k, u_k, k) + \lambda_{k+1}^T f(y_k, u_k, k)$$

λ vecteur adjoint du système.

Les conditions nécessaires d'optimalité s'écrivent alors :

$$(5-24) \quad y_{k+1}^* = \frac{\partial H_k}{\partial y_k}(y_k^*, u_k^*, \lambda_k^*, k)$$

.../...

$$(5-25) \quad \lambda_k^* = \frac{\partial H_k}{\partial y_k} (y_k^*, u_k^*, \lambda_k^*, k)$$

$$(5-26) \quad H_k (y_k^*, u_k^*, \lambda_k^*, k) = \max_{u_k \text{ admissible}} H_k (y_k^*, u_k, \lambda_k^*, k)$$

avec les conditions aux limites :

$$(5-27) \quad y_0 = y(0) \text{ fixé}$$

$$(5-28) \quad \lambda_N = KQ (y(N) - \hat{y})$$

V.4.4. Algorithmes de minimisation

L'algorithme du gradient appliqué à ce problème conduit, à partir d'une commande initiale arbitraire u_0 , à résoudre les équations (5-24) et (5-25) compte-tenu des conditions aux limites (5-27) (5-28). En général, la condition (5-26) n'est pas vérifiée, u_0 est alors ajusté suivant la direction de la plus grande pente, et le processus est itéré jusqu'à la convergence.

Comme dans le cas de l'identification du modèle, nous avons de plus utilisé une méthode axe par axe [5-5] .

V.4.5. Mise en oeuvre des algorithmes

Pour notre application, les équations d'état du système s'écrivent :

$$t_e(k+1) = t_e(k) + \frac{A^*}{C_{pt}} (T_a(k) - t_e(k)) - \frac{B^*}{C_{pt}} (t_e(k) - t_i(k))$$

$$t_i(k+1) = t_i(k) + \frac{B^*}{\phi(x(k))} (t_e(k) - t_i(k)) - C^* \lambda \phi(x(k))$$

$$(X_2(k) - x(k)) \left(1 - e^{-\frac{x(k) - x_f}{x_c - x_f}}\right)$$

$$x(k+1) = x(k) - C^* (X_2(k) - x(k)) \left(1 - e^{-\frac{x(k) - x_f}{x_c - x_f}}\right)$$

.../...

avec

$$\phi(x(k)) = \frac{1}{C_{pt} + x(k) \cdot C_{pe}}$$

$$X_2(k) = 0,62 \frac{Pa(k)}{760 - Pa(k)}$$

A^* , B^* , C^* sont les paramètres obtenus lors de l'identification du tissu considéré.

Les profils de température $T_a(k)$ et d'humidité $X(k)$ sont tels que :
 $\forall k$ tel que $k\Delta t$ appartient à la zone d'indexation j , $T_a(k) = T_{aj}$ ($j = 1, 2$)
 $\forall k$ tel que $k\Delta t$ appartient au caisson n°i, $X(k) = X_i$ $i = 1, \dots, 5$

Les variables de commande sont soumises aux contraintes :

$$X_i \geq X_0 \geq 0,006 \text{ kg d'eau/kg d'air sec} \quad i = 1, \dots, 5$$

$$T_{aj} \leq 220^\circ\text{C} \quad j = 1, \dots, 5$$

$$V \leq 40 \text{ m/mn}$$

Le critère à minimiser est défini par :

$$J = \frac{1}{2} K (x(N) - \tilde{x})^2 + \sum_{k=1}^N g(t_e(k), t_i(k), x(k), V, T_a(k), X(k), k)$$

$$\text{avec } g(.) = \frac{1}{M_e} \Delta Q_a(k)$$

où M_e est le débit massique d'eau évaporée au cours du séchage :

$$M_e = VpS (x(0) - x(N)). \quad (\text{kg eau/min})$$

$\Delta Q_a(k)$ est le débit énergétique dans la $k^{\text{ième}}$ "tranche" de la rame (kJ/min) calculé d'après le modèle établi au § V.2.

.../...

$$\Delta Q_a(k) = S \left\{ h [T_a(k) - t_e(k)] + h_2 [\lambda + C_{pv} t_l(k)] \left[X_2(k) - X(k) \right] \right. \\ \left. \left[1 - e^{-\frac{x(k)-x_f}{x_c-x_f}} \right] \right\} \Delta \ell \\ + D_a \left\{ C_{pa} T_a(k) + X(k) [\lambda + C_{pv} T_a(k)] - (1 - \alpha(k)) [C_{pa} T_a'(k) + X'(k) \right. \\ \left. (\lambda + C_{pv} T_a'(k)) + \alpha(k) H_a \right\} \Delta \ell$$

Nous présentons ci-dessous les résultats de l'optimisation appliqués à trois types de tissu différents.

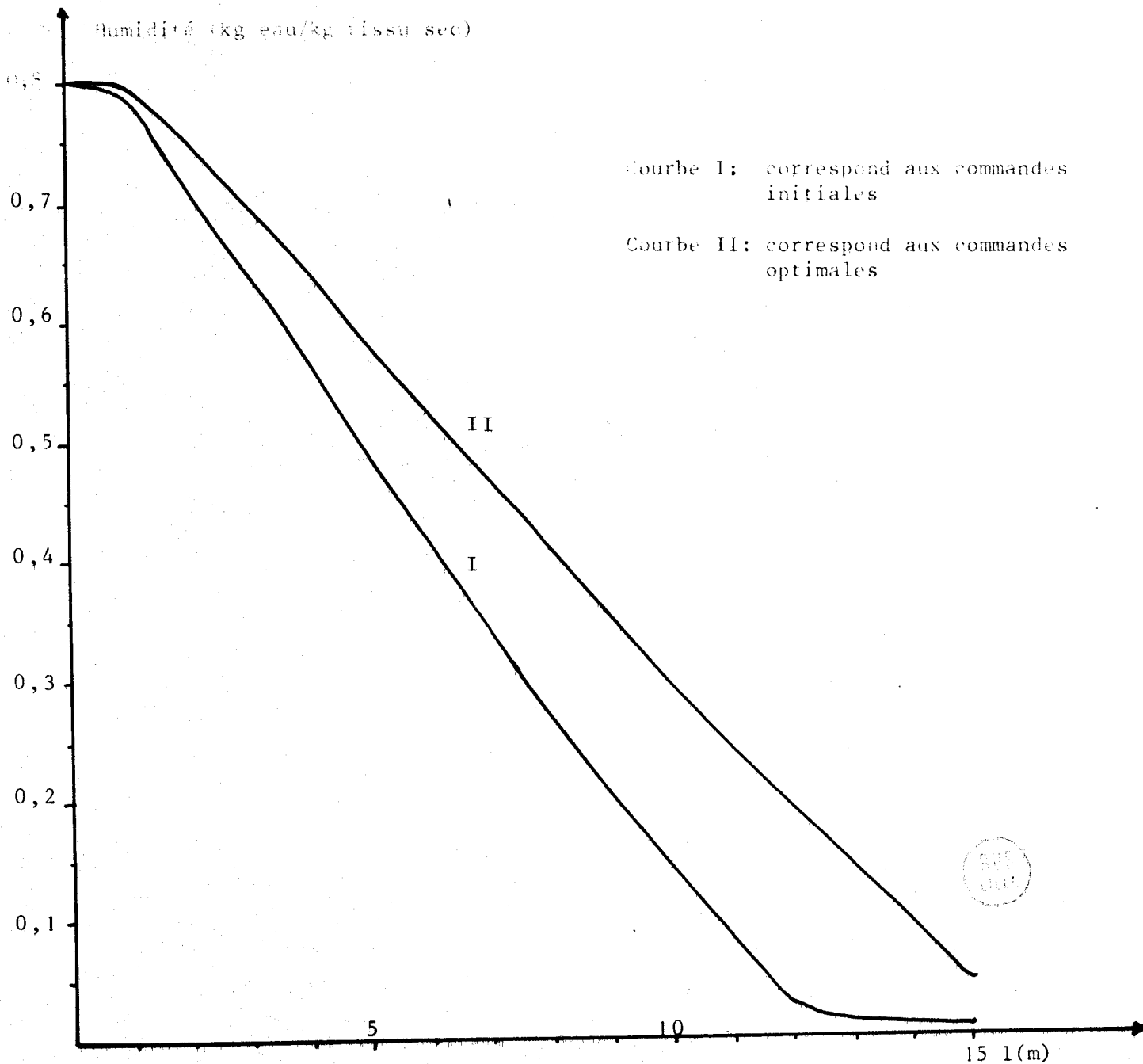
.../...

I - Tissue acrylique : $\rho = 0,25 \text{ kg/m}^2$ $A^* = 3,775$
 $S = 1,5 \text{ m}^2/\text{m}$ $B^* = 8,66$
 $x(0) = 80\%$ $C^* = 0,52$
 $x_f = 4\%$

Le tableau donne les valeurs initiales des commandes et celles obtenues à la convergence, ainsi que les consommations.

	V_m/mn	$T_{a1} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{a2} \text{ } ^\circ\text{C}$	$x_1 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg air}}$	x_2	x_3	x_4	x_5	$J(u) \text{ kJ/kg eau}$
U_0	18	140	140	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	7500
U^*	22,8	140	147,8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	6800

L'évolution de la teneur en eau du tissu le long de la rame est représentée sur la figure suivante :



2 - Tissu coton

$$\rho = 0,215 \text{ kg/m}^2$$

$$A^* = 2,88$$

$$S = 1,5 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$B^* = 14,807$$

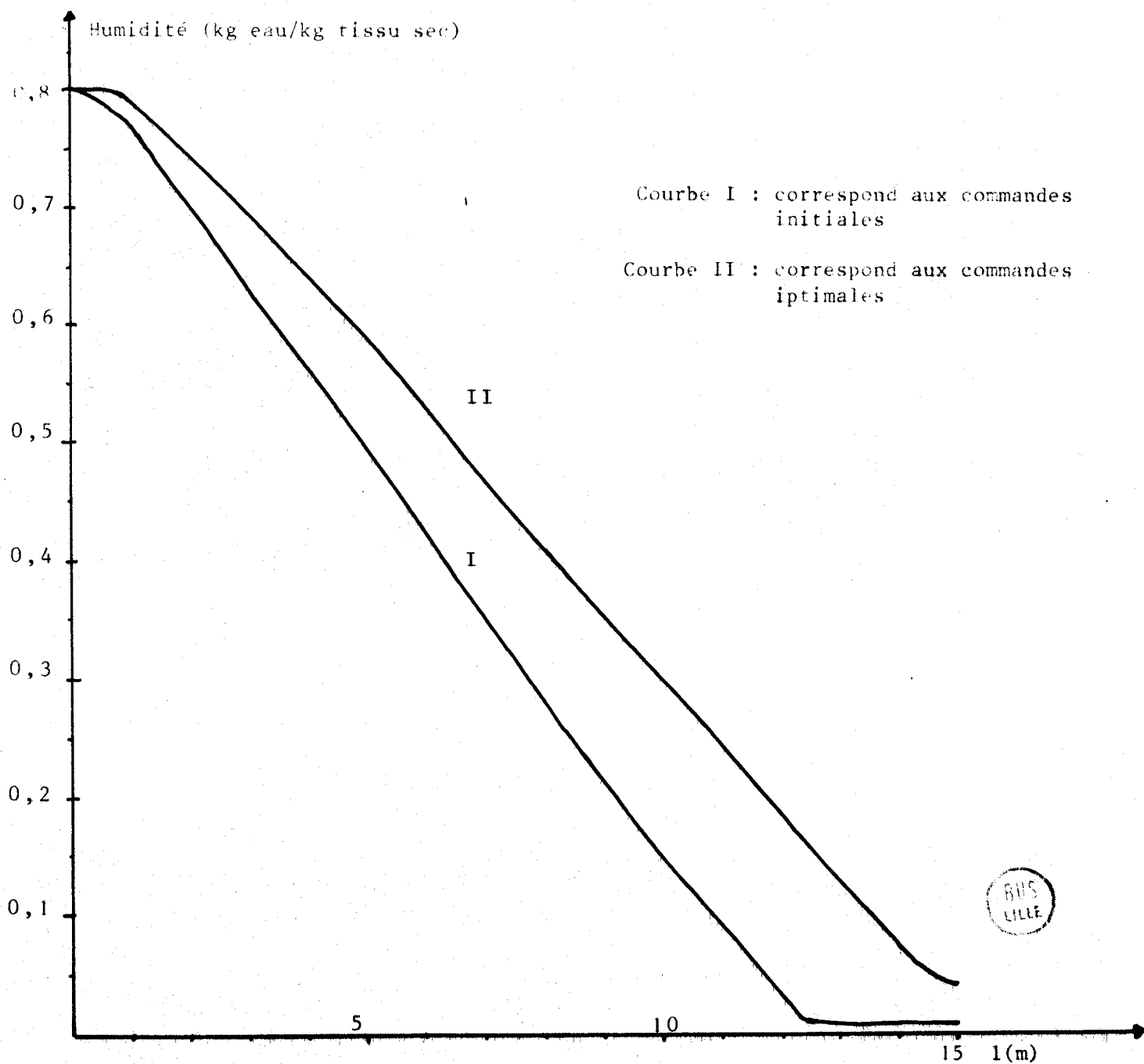
$$x(o) = 80\%$$

$$C^* = 2,089$$

$$x_f = 4\%$$

	V	T _{a1}	T _{a2}	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	J(u)
u _o	18	140	140	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	7300
u*	32,8	132	139	0,059	0,070	0,072	0,068	0,055	6152

L'évolution de la teneur en eau du tissu le long de la rame est représentée sur la figure suivante :



3 - Tissu acrylique.

$$\rho = 0,27 \text{ kg/m}^2$$

$$A^* = 3,221$$

$$S = 1,5 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$B^* = 6,476$$

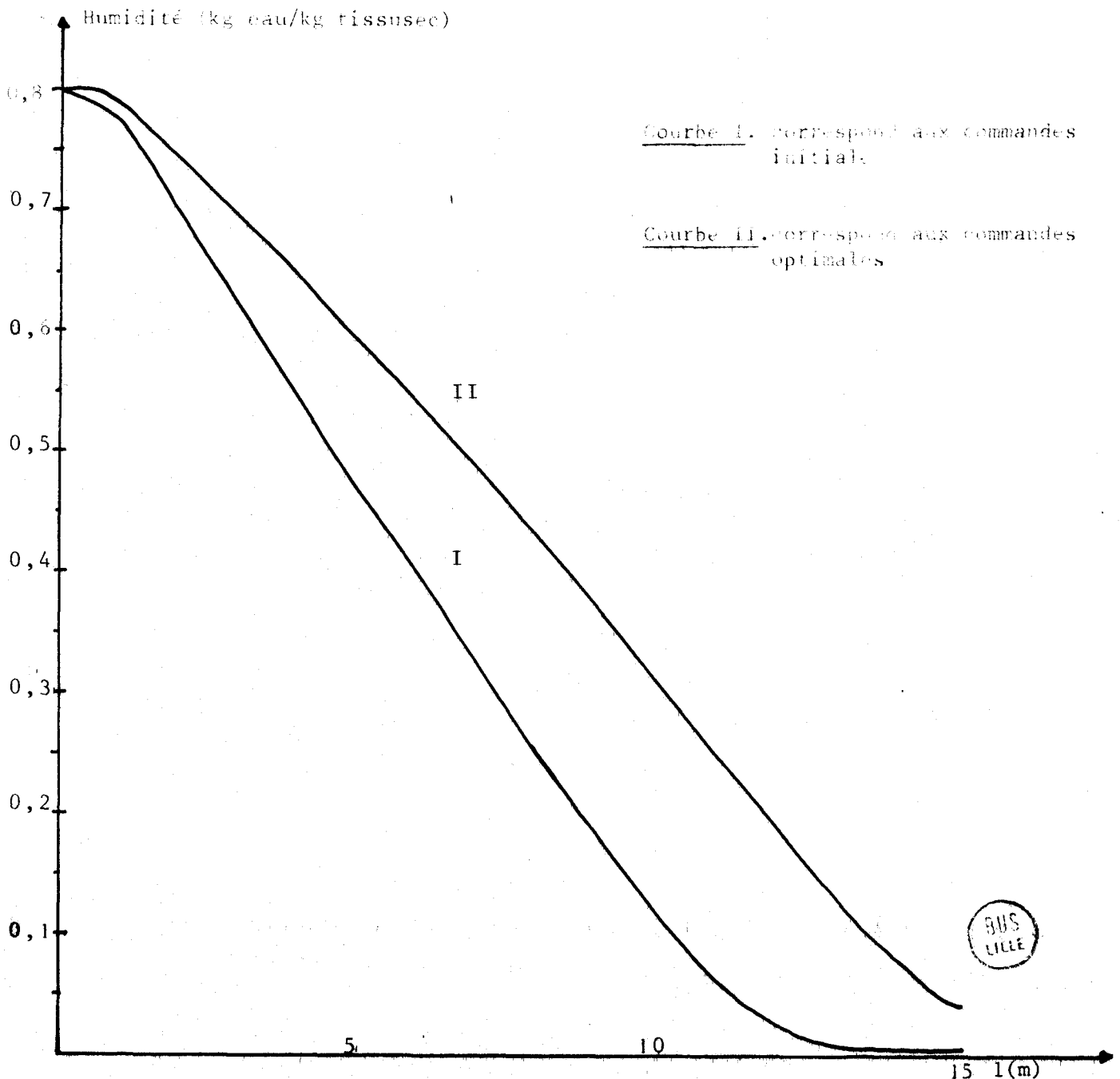
$$x(0) = 80\%$$

$$C^* = 14,627$$

$$x_f = 4\%$$

	V	T _{a1}	T _{a2}	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	J(u)
u ₀	18	140	140	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	7100
u [*]	30	161	138	0,086	0,068	0,060	0,062	0,053	5700

L'évolution de la teneur en eau du tissu le long de la rame est représentée sur la figure suivante :



V.5 - CONCLUSION

La simulation dans différentes conditions de fonctionnement nous a permis de caractériser la rame par ses courbes de consommation énergétique en fonction des différentes variables de commande (pour un type de tissu donné).

Ces courbes permettent la définition de points de consigne optimaux dans l'hypothèse où les variables de commande restent constantes au long de la rame. Cela est évidemment le cas pour la vitesse d'avance du tissu, mais constitue une limitation en ce qui concerne la température et la teneur en eau de l'air primaire. La température de l'air primaire est en effet, indexée sur deux zones, la teneur en eau dépend, dans chaque compartiment, de la position des volets de cheminée.

Malgré cet inconvénient, les abaques obtenus permettent de visualiser l'influence de différentes variables de commande sur la consommation énergétique. Leur définition caisson par caisson, associée à un processus d'optimisation du type programmation dynamique, peut-être envisagée pour la recherche des points de consigne optimaux. Cependant, les couplages entre caissons rendent cette approche assez complexe, et nous avons préféré avoir recours à un processus d'optimisation directe, contraint par les équations du modèle.

Les solutions donnent alors les points de consigne optimaux :

- . vitesse d'avance du tissu,
- . Température de l'air primaire dans les deux zones d'indexation,
- . humidité de l'air primaire dans chacun des caissons.

.../...

Il faut remarquer que, si la réalisation des deux premières variables de commande pose peu de problèmes, il n'en est pas de même en ce qui concerne l'humidité de l'air primaire. En effet, celle-ci n'est pas directement contrôlable, et il faut passer par l'intermédiaire des volets de cheminées, pour lesquels nous n'avons pu trouver de modèle satisfaisant. Par ailleurs, tout système physique de régulation de cette humidité suppose que l'on soit capable de mesurer celle-ci, et l'on a vu tous les problèmes rencontrés à ce niveau, pour l'obtention de mesures fiables.

- BIBLIOGRAPHIE -

- /5-1/ K. OKAMURA.
"Some mathematical theory of the penalty method for solving optimum control problems"
J. SIAM, Control, Vol. 2, N° 3, 1965
- /5-2/ D. EFTHYMIATOS.
"Methodes numériques d'optimisation de certains systèmes en boucle fermée"
Thèse docteur ingénieur, 20 juin 1969.
Université Paris.
- /5-3/ A.P. SAGE.
"Optimum systems control"
Prentice - Hall, INC , 1968
Séries in Networks.
- /5-4/ P. BERNHARD.
"Commande optimale, décentralisation et jeux dynamiques".
Dunod automatique, Paris 1976.
- /5-5/ S.G. BEVERIDGE, R.S. SCHESTER.
"Optimisation : theory and practice".
Mac - Graw - Hill - book company - 1970
- /5-6/ A.V. BALAKRISHNAN, L.W. NEUSTADT.
"Mathematical theory of control".
A. Press, New York and London, 1967.
- /5-7/ R. BOUDAREL, J. DELMAS, P. GUIHET.
"Commande optimale des processus. Programmation non linéaire et ses applications".
Tome 2, Ed. Dunod, 1967.
- /5-8/ V. BOLTIANSKI.
"Commande optimale des systèmes discrets".
Editions MIR, Moscou, 1976

- CONCLUSION GÉNÉRALE -

Les résultats qui se dégagent de cette étude concernent essentiellement l'analyse thermodynamique du fonctionnement de la rame, la modélisation et l'identification du processus et la recherche des points de consigne optimaux en régime statique.

L'analyse du fonctionnement thermodynamique de la rame, fondée sur des bilans massiques et thermiques globaux au niveau de chaque compartiment permet de mettre en évidence les paramètres qui influent sur le rendement énergétique. La méthode de calcul de la consommation énergétique proposée a été adoptée par I.T.F.-Nord et appliquée à un certain nombre de séchoirs de divers modèles, en fonctionnement dans l'industrie. Elle a mis en évidence une grande disparité entre les consommations spécifiques et permis de chiffrer les économies d'énergie escomptables par optimisation du fonctionnement (Réf. 4 - Chapitre I).

La modélisation du procédé en régime permanent propose, d'une part, la prise en compte des deux régimes de séchage (phase d'évaporation externe et phase d'évaporation interne), d'autre part, celle de l'évolution de l'état de l'air après son contact avec le tissu, dans le but d'approcher une description du processus de recyclage.

L'adéquation du modèle au procédé étudié a été réalisée en utilisant deux méthodes classiques d'identification. L'accord entre les courbes théoriques et les points expérimentaux est tout à fait satisfaisant au niveau de la température superficielle du tissu et à celui de sa teneur en eau résiduelle. Cependant, l'adaptation du modèle est limitée au plan des échanges tissu-air de séchage, ceci étant dû à l'impossibilité d'obtenir les mesures concernant la température et la teneur en eau de l'air secondaire.

.../...

Différentes simulations du modèle ainsi validé ont permis d'étudier le comportement des variables de sortie pour divers profils de température et d'humidité de l'air de séchage et pour différentes vitesses d'avance du tissu. Cette approche permet l'élaboration d'abaques donnant le rendement énergétique en fonction des variables de commande. Le calcul de ce rendement suppose une modélisation de la consommation énergétique, et donc du processus de recyclage, qui a nécessité des hypothèses très simplificatrices.

Enfin, la détermination des points de consigne optimaux en régime permanent a été faite en résolvant les conditions nécessaires d'optimalité par une méthode de gradient. Une méthode de recherche axe par axe a aussi été utilisée. Les résultats obtenus font apparaître la teneur en eau de l'air de séchage comme une variable importante. Cependant, les travaux réalisés ne permettent pas encore de contrôler et de réaliser sur le procédé un profil imposé pour cette teneur en eau, les limitations provenant d'une part de la difficulté à élaborer un modèle suffisamment réel du processus de recyclage, d'autre part des difficultés liées aux mesures concernant l'état de l'air secondaire.

ANNEXE 1

ANNEXE 1

DEFINITIONS ET RELATIONS

Teneur en eau $\equiv$ rapport de mélange $\equiv$ humidité :

C'est le quotient de la masse d'eau contenue dans le produit humide par la masse du corps solide ramené à l'état de siccité.

$$X = \frac{m_H - m_S}{m_S} = \frac{m_e}{m_S}$$

m_S : masse du produit sec (kg).

m_H : masse totale du produit humide (kg).

m_e : masse d'eau contenue dans le produit humide (kg).

X exprimée en (kg eau/kg produit sec).

Humidité relative de l'air humide:

est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide (P_v) et la pression de saturation (P_s) de la vapeur d'eau en contact avec une surface liquide, à la même température.

$$\phi = \frac{P_v}{P_s}$$

P_v et P_s exprimées en (mmHg ou atm).

ANNEXE 2

ANNEXE 2

RELATIONS MATHÉMATIQUES

La détermination théorique du coefficient de transfert de chaleur entre l'air de séchage avant contact et le tissu (couche sèche) est donnée par la relation suivante (TREYBALE, chapitre 12, séchage) [2-1].

$$(1) \quad h = 0,57 G^{0,37} \quad (\text{kcal/min})$$

où G est le débit d'air sec circulant dans la rame ($\text{kg air/m}^2 \text{ min}$).
Le débit est donné par la formule suivante [2-1].

$$(2) \quad G = \frac{V_a (60) \cdot (1+X)}{(0,0252 + 0,0405X)(T+273)}$$

T : température de l'air en ($^{\circ}\text{C}$)

V_a : vitesse de l'air (m/S)

X : teneur en eau de l'air (kg eau/kg air sec)

Cette relation est valable dans les conditions de pression atmosphérique. (760 mmHg).

La relation qui détermine le taux d'humidité à l'interface air de séchage - eau $X_2(t)$ est donnée par HOUGEN.

$$X_2(t) = \frac{18}{29 \cdot 760 - P_a(t)} \cdot P_a(t)$$

.../...

$P_a(t_i)$: est la pression de vapeur de l'eau à la température t_i qui est donnée par la relation suivante [2-2].

$$\ln (P_a(t_i)) = \left(-\frac{a}{T_r}\right) + b - e^{-20 \cdot (T_r \cdot c)^2}$$

T_r : température réduite de la couche humide du tissu [] tel que :

$$T_r = \frac{t_i + T_o}{T_c} \quad \left[\begin{matrix} (^\circ K) \\ T_o \end{matrix} \right] : 273,2^\circ K.$$

T_c : 647,2 : température critique de l'eau [2-2]

a , b et c : sont appelés constantes de l'eau [2-2] ;

avec $a = 3,1423$

$b = 8,361$

$c = 0,163$

REFERENCES.

/2-1/ R.E. TREYBAL.

"Mass transfer operations"

chapitre 12 (Drying), 2^e édition,

Mc. Graw Hill, book.CO. N.Y., 1968.

/2-2/ HUGEN, K.M. WATSON, R.A. RAGATZ.

"Chemical process principles"

Tome 1, John Wiley and sons, New York 1943.

ANNEXE 3

ETUDE DES CAPTEURS ET MANIPULATIONS

CAPTEUR DE MESURE DE TEMPERATURE DU TISSU.

. Présentation du capteur.

Le capteur utilisé est construit par WIRA (Wool International Research Authority). Il a une forme de "galette" d'épaisseur égale à 2,5 cm, et est destiné à être en contact sous son propre poids, avec le tissu.

La surface de contact est constituée d'un revêtement lisse en Téflon. Au centre de cette surface, on distingue une pastille en aluminium. Au dos de celle-ci est collé un thermocouple chargé de détecter les variations de température de la pastille métallique. Le thermocouple est du type K (notation normalisée) et il est constitué des métaux suivants : nickel-chrome-nickel (chromel-nickel).

L'intérieur du capteur est garni d'un peu de laine de Téflon destinée au calorifugeage de l'ensemble. Le capteur est muni d'une patte métallique articulée, destinée à sa fixation.

L'étude du calorifugeage du capteur a montré que celui-ci est influencé par la température de l'air ambiant et la variation peut aller dans certain cas jusqu'à 10°C. Dans ce sens il est apparu nécessaire, dans une première étape, d'améliorer la qualité du calorifugeage interne.

Les points de mesures recueillis par l'intermédiaire de ce capteur tendent à définir un profil général de la température du tissu, mais on observe certaines variations. Ceci est dû à deux facteurs (fig. 3-1) :

- Il y a suralimentation de tissu à l'entrée de la rame ce qui provoque des ondulations. Lorsque le capteur rencontre ces ondulations, il a tendance à "décoller" de la surface du tissu et n'indique plus la température de ce dernier.

- Il arrive que le capteur se trouve juste au-dessous de l'orifice d'une tuyère. Dans ce cas, le flux d'air chaud est tellement fort que la mesure de la température du tissu est perturbée, malgré le calorifugeage.

Commentaire :

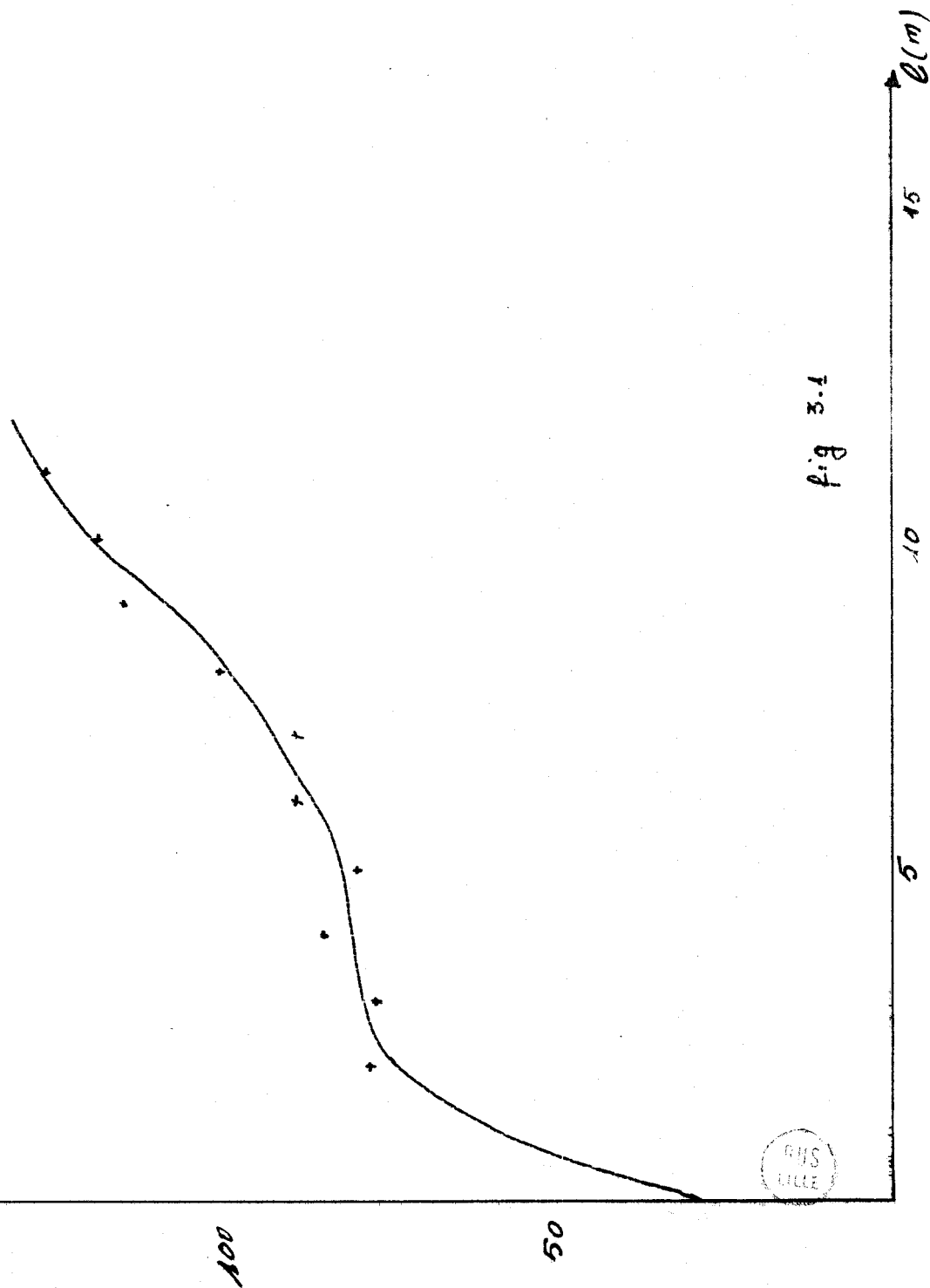
Les capteurs WIRA présentent une inertie thermique importante, et il n'est pas rare d'attendre cinq minutes avant de constater une stabilisation de la mesure. Un essai réalisé sur une plaque chauffante thermostatée a montré qu'il fallait huit secondes pour que la température du capteur s'élève de (1°C).

Les défauts de ce capteur sont :

- Inertie thermique trop importante.
- Calorifugeage d'origine insuffisant.
- Plaque métallique de fermeture de capteur néfaste pour une isolation de thermocouple situé dans le capteur.
- Poids trop élevé (marques sur le tissu).

Pour cela l'ITF Nord et la Société Inotechnique ont développé un prototype de capteur qui semble donner des résultats nettement supérieurs en qualité à ceux que l'on a obtenus avec le capteur WIRA.

Evolution de la température du tissu
capteur WIRA



$\rho = 0,25 \text{ kg/m}^2$
 $\dot{V} = 15 \text{ m/min.}$

fig 3.1



Les objectifs atteints par ce capteur sont :

- Faible inertie thermique.
- Calorifugeage réalisé de façon à amoindrir l'influence de l'air chaud de la rame sur les mesures de température du tissu.
- Profil étudié afin de permettre un meilleur contact entre le capteur et le tissu.
- Poids diminué par rapport aux capteurs WIRA de façon à ne pas marquer le tissu.

Les figures suivantes, représentent certaines courbes obtenus lors des expériences effectuées sur le site par l'intermédiaire des deux capteurs, ainsi qu'une comparaison entre ces deux capteurs (WIRA et ITF).

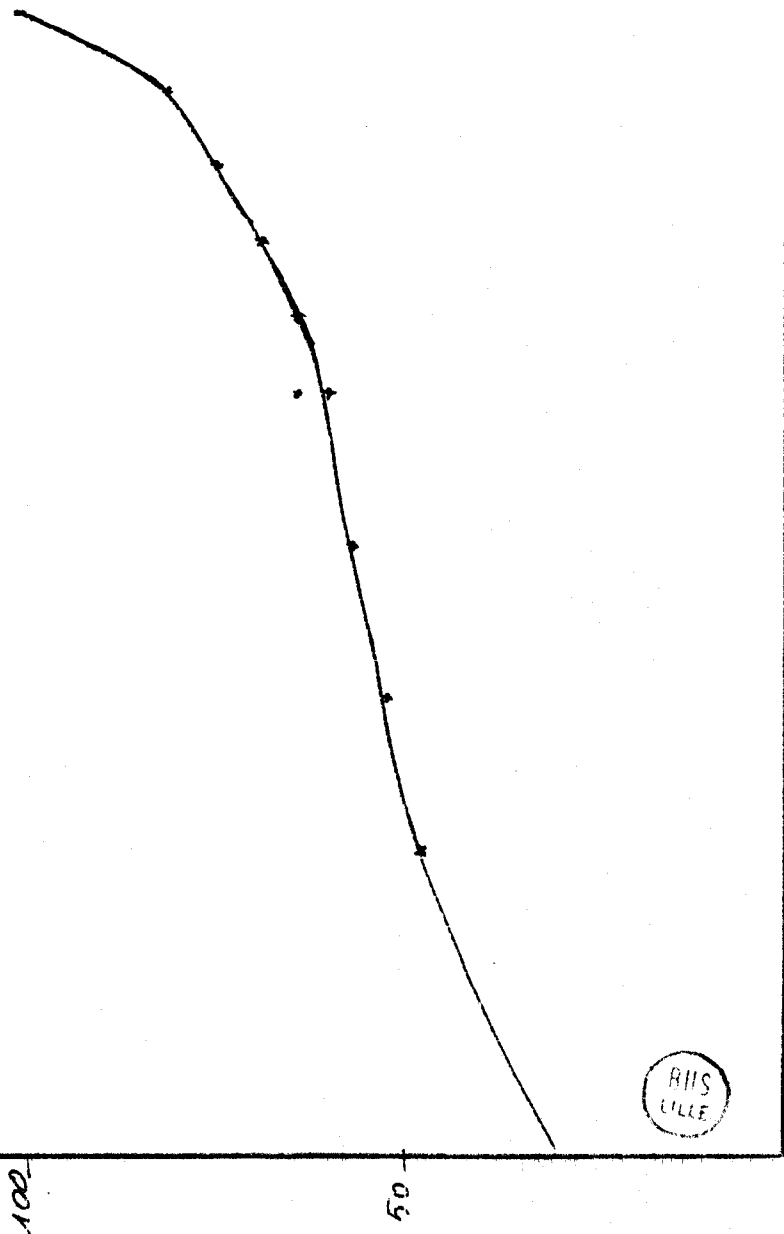
(T°C)

evolution de la temperature du tissu
Capteur WIRA

$$\rho = 0,215 \text{ kg/m}^2$$
$$V = 28 \text{ m/min}$$

RIIS
LILLE

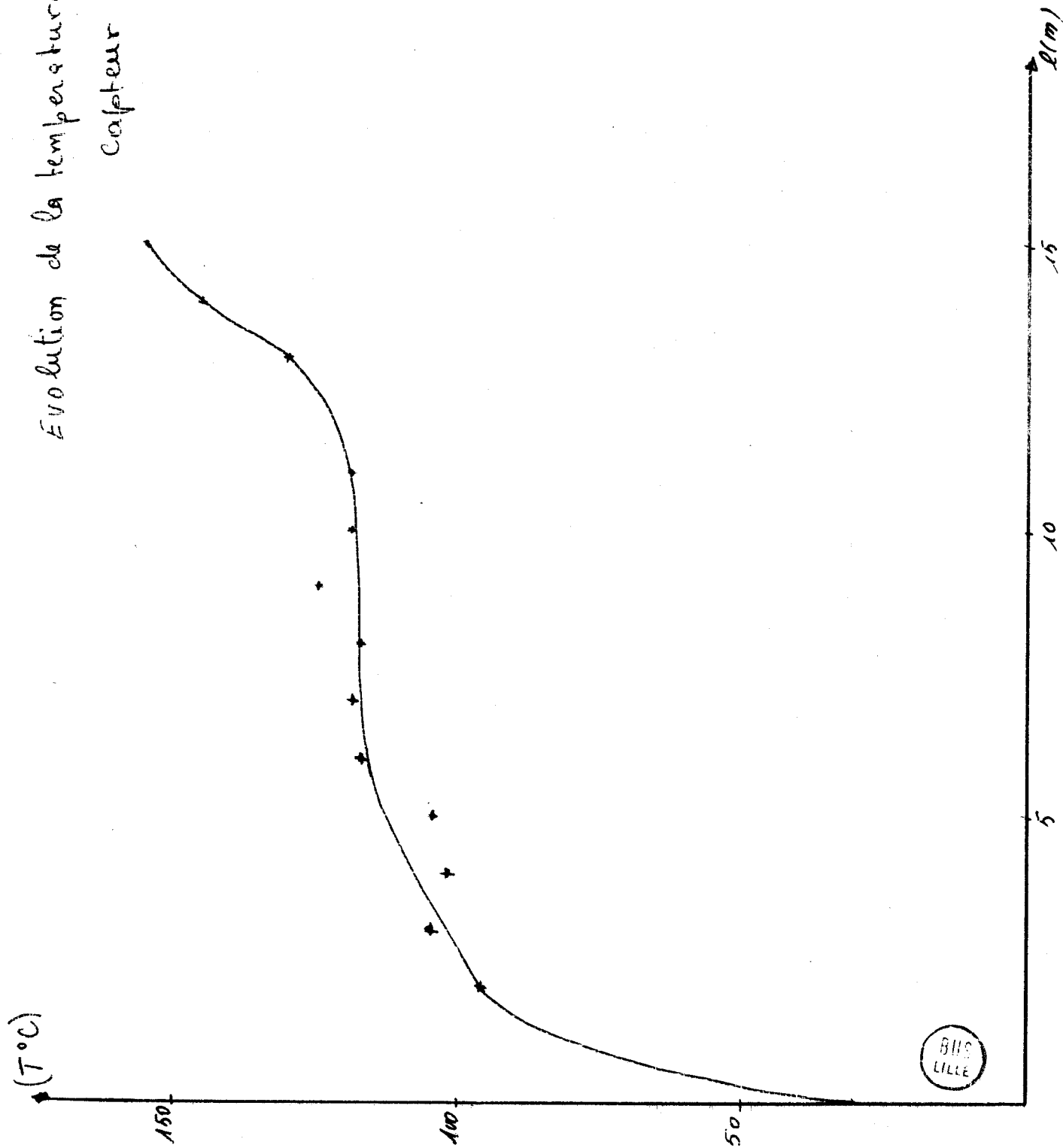
l(m)



Evolution de la température du tissu
Capteur WIRA

$$P = 0,215 \text{ kg/m}^2$$

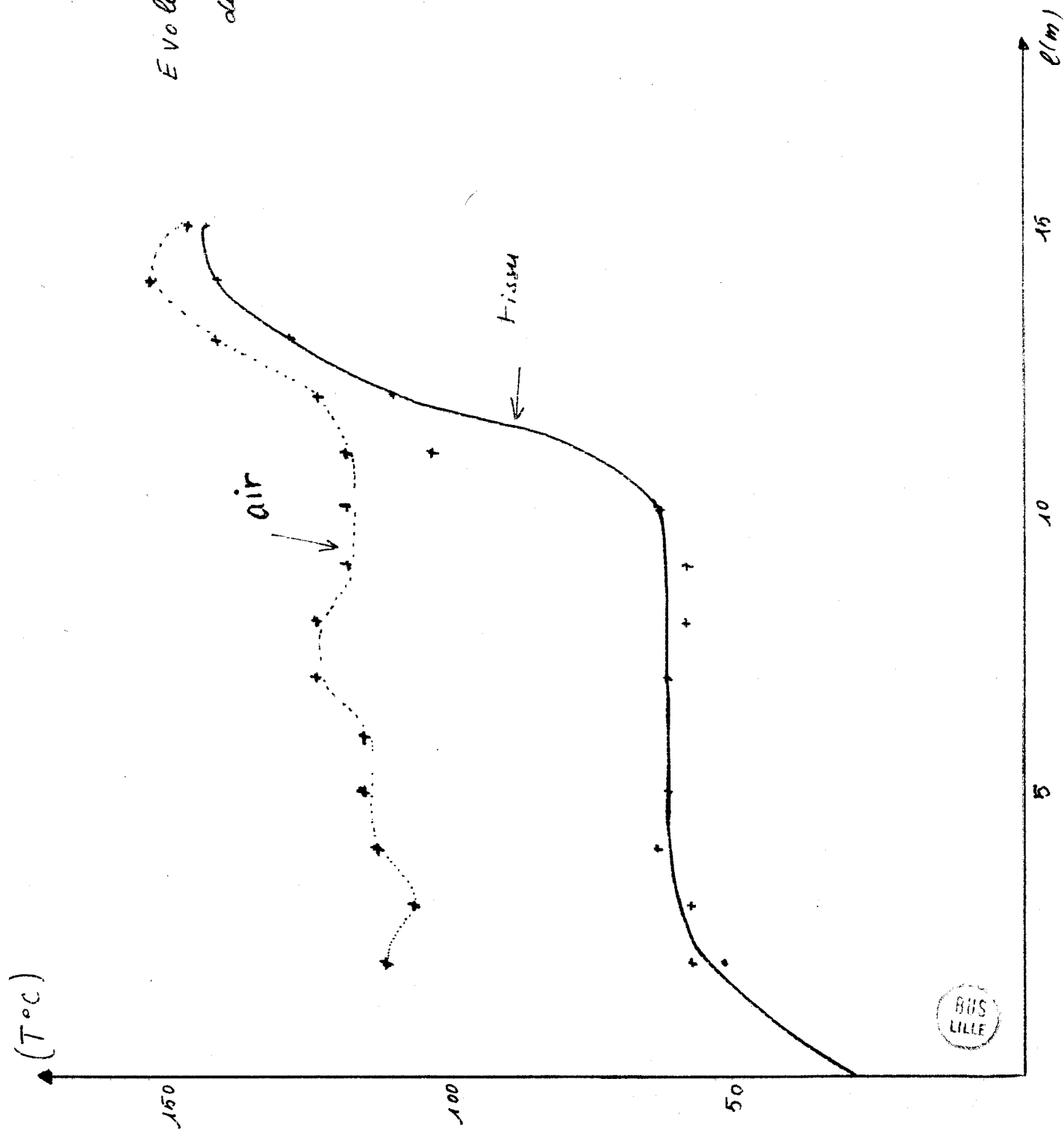
$$V = 24 \text{ m/min}$$



Evolution de la température
du tissu, Air-Capteur I.I.F.

$$\rho = 0,27 \text{ kg/m}^2$$

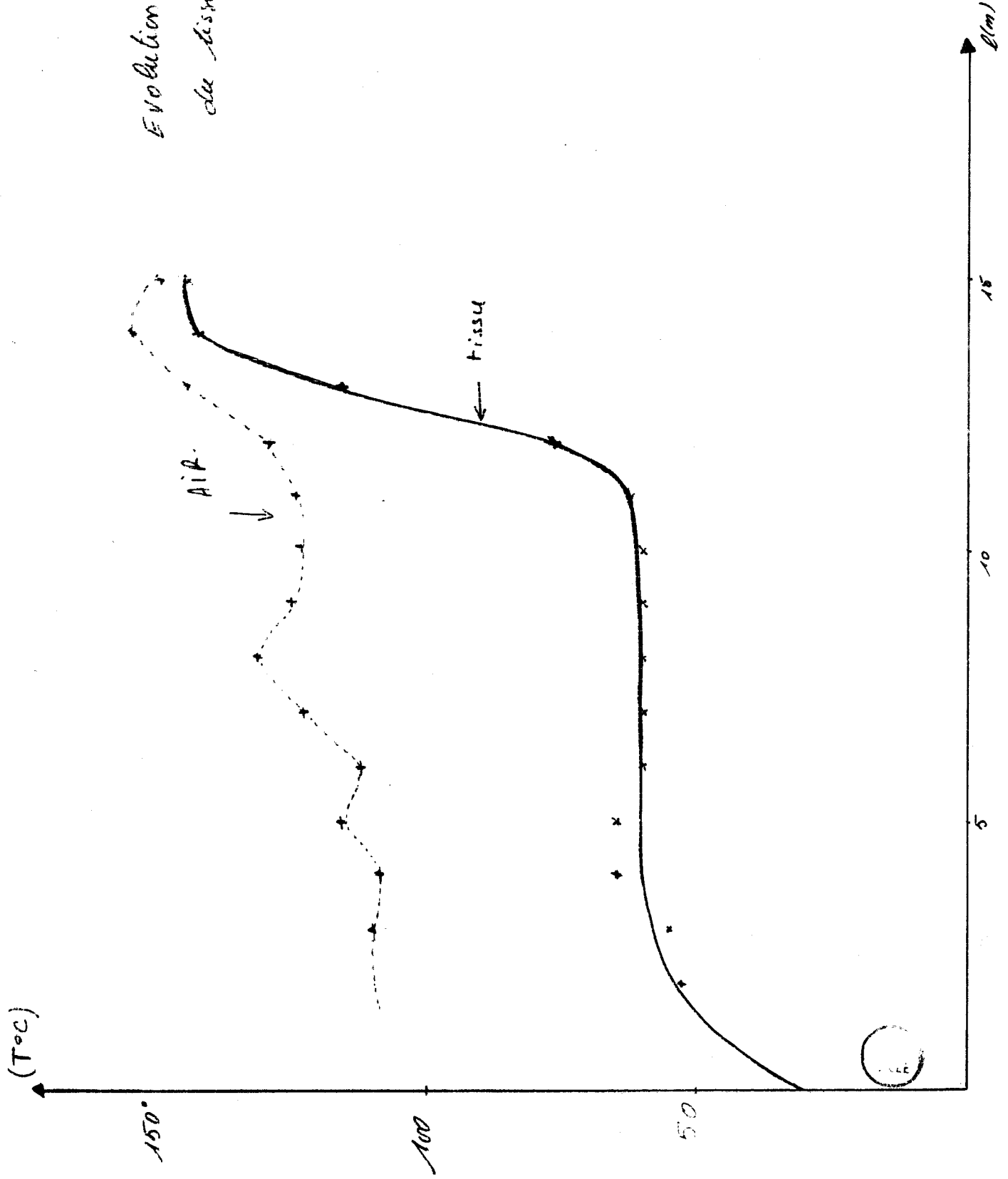
$$V = 22 \text{ m/min}$$



Evolution de température
de tissu, Air-Capteur ITF

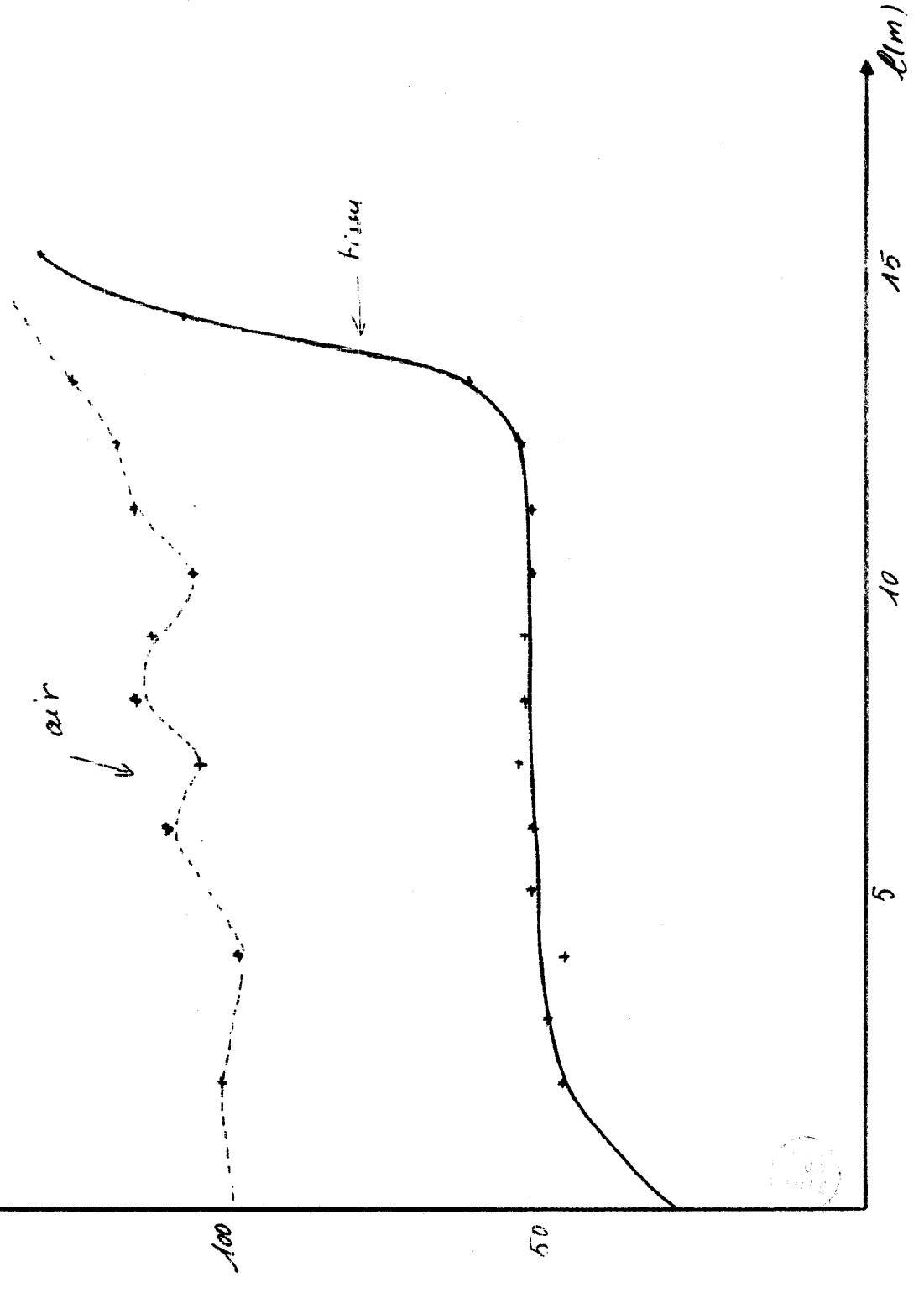
$$\rho = 0,27 \text{ kg/m}^2$$

$$V = 18 \text{ m/min}$$



(T°C)

evolution de la température
du tissu, AIR - Capteur I.T.F



V = 10 m/min
acrylique vent

MESURE DE L'HUMIDITE DU TISSU

La mesure de l'humidité du tissu est effectuée à l'aide de deux capteurs, à infrarouge et à micro-ondes dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

	Appareil à Micro-ondes	Appareil à Infra-Rouge
<u>Constructeurs</u>	Sté SCAUPRO (Suède)	Sté PIER ELECTRONIC (Allemagne Fédérale)
<u>Réglages</u>	Simple et rapides Doivent être modifiés à chaque changement de poids au m ² du tissu	Délicat et long Doivent être modifiés à chaque changement de tissu
<u>Distance du tissu à la tête de mesure</u>	En contact avec la tête de mesure	A une distance de 10 cm $\pm$ 3 cm de la tête de mesure
<u>Couleur du tissu</u>	Aucune influence	Aucune influence
<u>Poids au m² du tissu</u>	Grande influence	Influence importante
<u>Température du tissu</u>	Aucune influence	Influence au-delà de 35°C.
<u>Mesure d'humidité</u>	Réponse linéaire Même précision quelle que soit l'humidité	Réponse non linéaire Appareil très bien adapté à la mesure des faibles humidités



MESURES DE L'HUMIDITE

Avant que le tissu ne pénètre dans la rame, il passe dans un bac rempli d'eau, puis entre deux rouleaux exprimeurs (foulard d'humidification). On pense ainsi éviter une irrégularité de l'humidité du tissu avant qu'il ne pénètre dans la rame.

Une mesure effectuée à l'aide du capteur à micro-ondes (fig. 3-2) montre cependant une irrégularité de cette humidité sur toute la largeur du tissu, le centre de la laize est plus humide que les côtés et on peut constater une différence allant jusqu'à 10%. Ce phénomène trouve son explication au niveau des rouleaux d'exprimage. L'un des pistons servant à assurer la mise en pression du rouleau supérieur présente une fuite.

. Mesures de l'humidité en sortie de rame.

Les deux capteurs, à infrarouge et à micro-ondes, sont installés en même temps en sortie de rame.

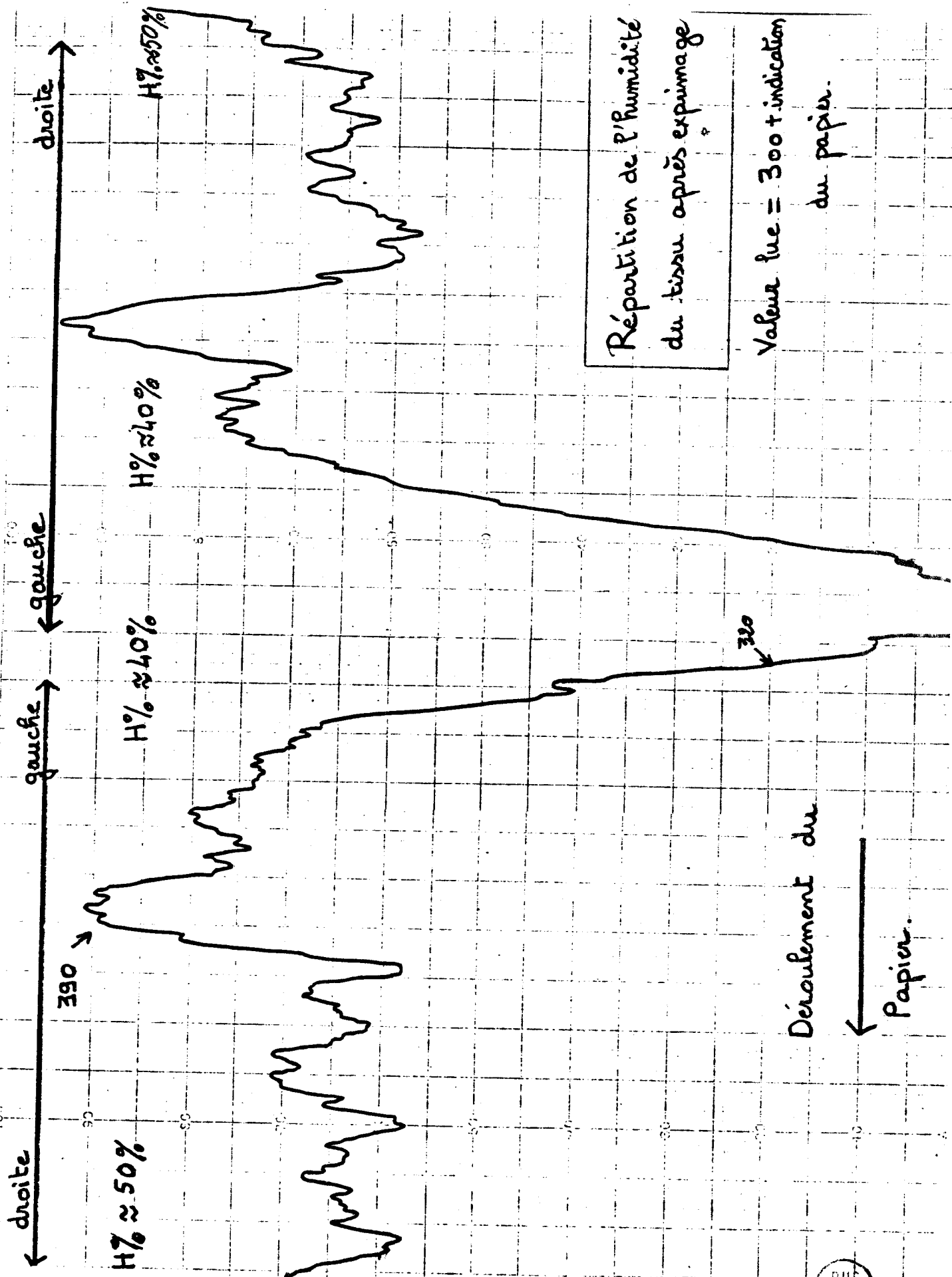
- Mesures par infra rouge

Dans les conditions d'expérimentations, nous n'avons pu obtenir un résultat valable, parce que l'aiguille du capteur indiquant la valeur reste bloquée, cette anomalie est due à la température trop élevée du tissu en sortie de rame (110°C). D'après le constructeur, la tête de mesure de l'appareil ne peut donner des mesures d'humidité d'un produit présentant une température supérieure à 35°C.

- Mesure par micro-ondes.

Dans les mêmes conditions d'expérimentations, la mesure de l'humidité par le capteur à micro-ondes n'a pu donner des résultats, l'indicateur de capteur donne un taux inférieur à zéro.

.../...



Remarque :

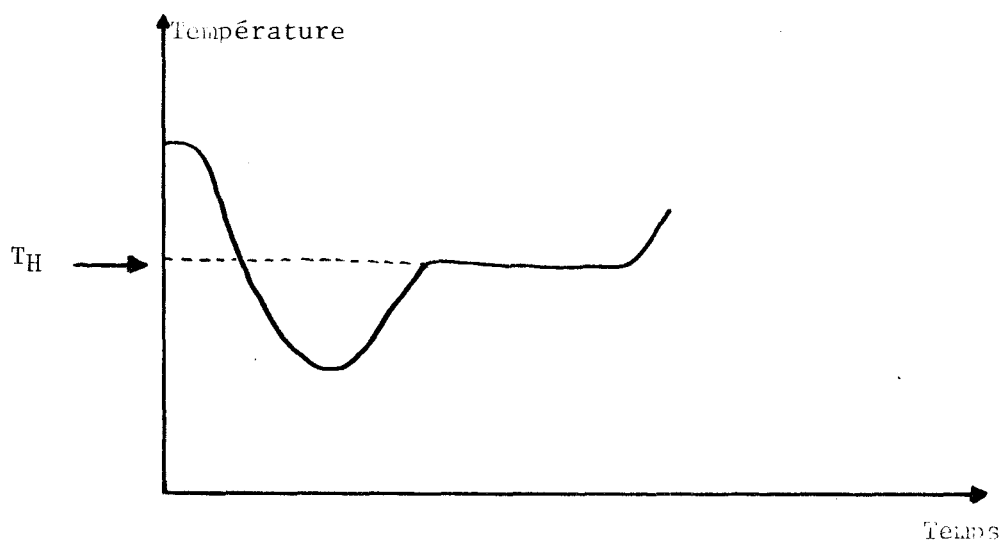
Ces capteurs ont donné des résultats satisfaisants dans des conditions d'expérimentation statique, mais en dynamique on n'a pu obtenir des résultats valables.

. Mesures de température de l'air et de sa teneur en eau.

La température et la teneur en eau (humidité) de l'air de séchage aux différents points considérés ont été déterminés à partir de mesures des températures sèches et humides.

Le capteur utilisé est une canne pyrométrique à thermocouple fournissant la température sèche T_S et la température humide T_H de l'air.

Après humidification du thermomètre mouillé, la courbe des températures observées à l'allure suivante (en fonction de temps).



La température humide de l'air est celle du palier observé, qui correspond à la période d'évaporation de surface sur le coton entourant l'embout thermométrique.

L'équation du psychomètre adiabatique fournit la relation entre T_S , T_H et X , teneur en eau de l'air [3-2] .

$$(C_{pa} + X C_{pv}) (T_S - T_H) = (X_H - X) \cdot L(T_H)$$

avec C_{pa} , C_{pv} chaleurs massiques à pression constante de l'air sec et de la vapeur d'eau.

X_H : teneur en eau de l'air saturé à la pression considérée et à la température T_H .

$L(T_H)$ chaleur latente de vaporisation à la température T_H .

On a donc :

$$X = \frac{X_H \cdot L(T_H) - C_{pa}(T_S - T_H)}{L(T_H) + C_{pv}(T_S - T_H)}$$

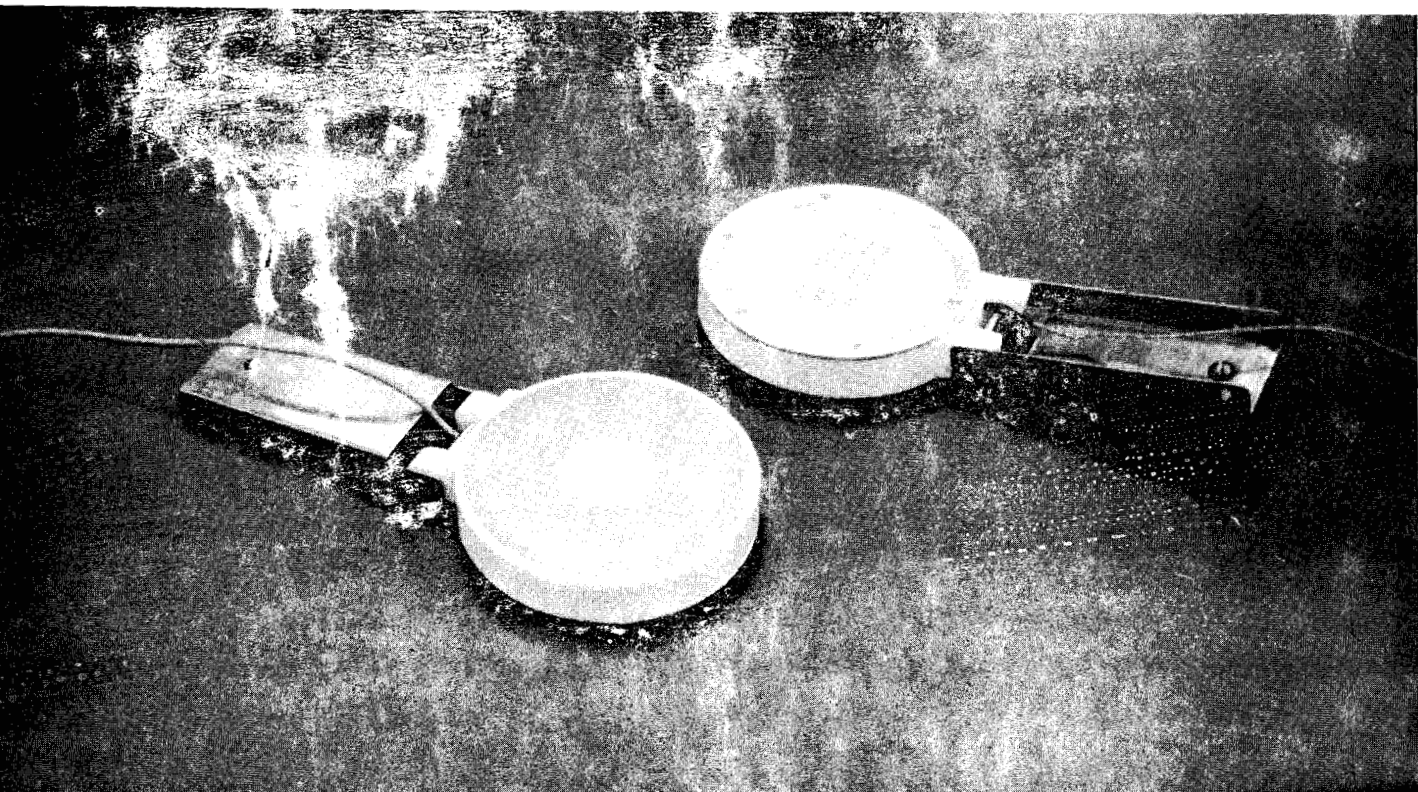
X_H est donnée par des tableaux.

REFERENCES

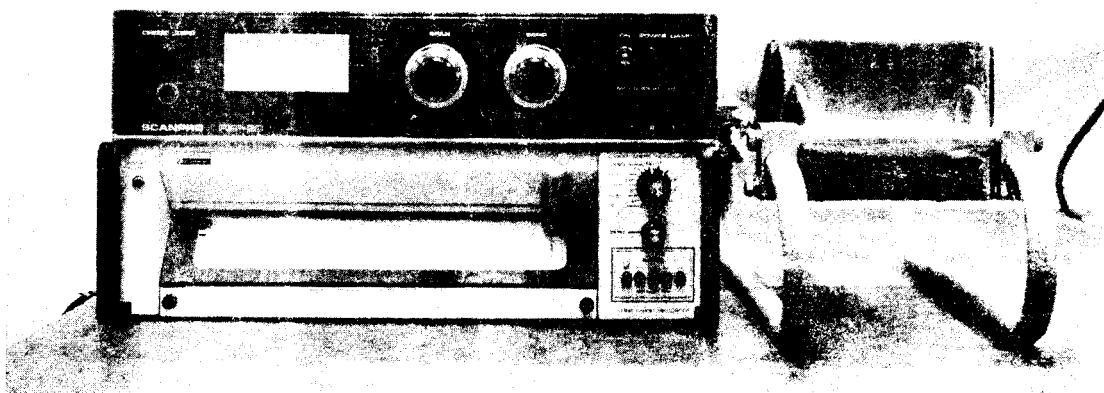
- /3-1/ B. LE CAMPION
"Etude en vue de la régulation de séchage des tissus"
Mémoire fin d'études, juin 1978
ITR - ITF Nord.

- /3-2/ J. MERIGOUX
"L'air humide - définitions et calculs de base"
CETIAT - Villeurbanne.

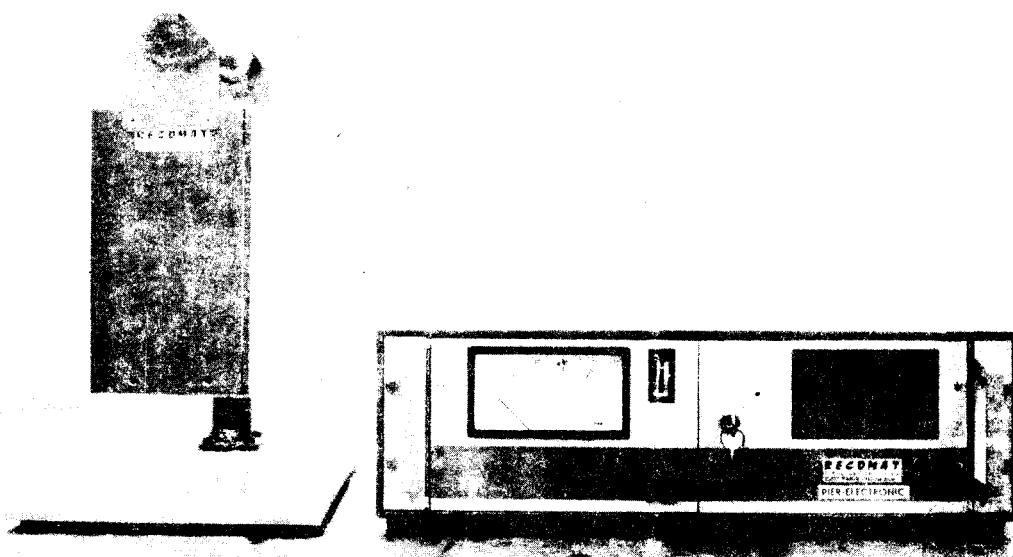
- /3-3/ A. NIETO, F. PAUL
"Mesure des températures de la sonde à l'indicateur numérique"
Editions Radio - 1975.



Capteur de temperature : type WIRA



Capteur à micro-ondes



Capteur à infra-rouge



ANNEXE 4

ANNEXE 4

PROTOCOLES EXPERIMENTALS

CORRECTION DE RAYONNEMENT

Nous avons supposé que certaines incohérences relevées dans la mesure des températures et des humidités de l'air de séchage avant contact ou après contact du tissu (AP ou AS) sont dues au rayonnement.

Nous avons tenté de remédier à ce défaut au moyen de la correction suivante :

En début d'essai, la rame étant à la température atmosphérique (pas de rayonnement), on met les ventilateurs en marche. L'air circulant dans la rame est donc dans les mêmes conditions de température et d'humidité que l'air extérieur. On mesure dans chaque compartiment les températures sèches et humides, à partir desquelles on calcule l'humidité de l'air. Une première correction est alors effectuée sur les températures humides, de sorte que l'humidité de l'air calculée coïncide avec l'humidité atmosphérique relevée par ailleurs à l'aide d'un hygromètre précis.

La rame est ensuite montée en température par paliers successifs, sans introduction du tissu. L'humidité de l'air interne est donc toujours l'humidité atmosphérique. On mesure pour chaque palier la température sèche et la température humide dans chaque compartiment.

.../...

La connaissance de l'humidité atmosphérique détermine la température qu'on devrait observer en absence de perturbations ; On en déduit, pour chaque palier, la correction à apporter à la température humide lue dans chaque compartiment.

STABILISATION DE LA RAME EN REGIME PERMANENT

Lorsqu'on introduit le tissu dans la rame, il faut attendre un certain temps avant que l'humidité de l'air de séchage ne se stabilise.

Afin de gagner du temps lors de la montée en régime, on ferme tous les volets de recyclage ; ceux-ci ne seront ouverts que lorsque l'humidité de régime sera atteinte.

Un calcul approximatif de celle-ci est le suivant :

Connaissant l'humidité d'entrée du tissu et son temps de séjour dans le séchoir, on en déduit le débit d'eau à évacuer par le séchoir, en kg d'eau par heure. Le débit d'air dans les cheminées étant calculé, on en déduit l'humidité de régime de l'air à évacuer. On ouvre les clapets des cheminées dès que cette humidité est atteinte par l'air de séchage.