

N° d'ordre : 287

50376  
1981  
206

50376  
1981  
206

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR INGENIEUR**

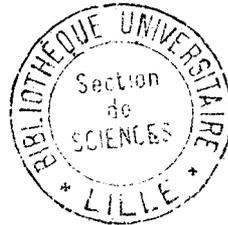
Spécialité Automatique

par

Ahmed Mounir BENHABIB

Ingénieur U.S.T. d'ORAN

## CONTRIBUTION A LA REGULATION COLORIMETRIQUE D'UNE UNITE DE TEINTURE TEXTILE



Soutenu le 15 Décembre 1981 devant la Commission d'Examen

Messieurs

P. VIDAL  
L. POVY  
M. FOURNET  
J.C. SACRE  
D. STEEN

Président  
Rapporteur  
Examineur  
Invité  
Invité

A MA MERE

A MA SOEUR

A TOUS MES FRERES

- AVANT - PROPOS -  
-----

*Le travail que nous présentons a été effectué au Laboratoire d'Automatique de l'Université des Sciences & Techniques de Lille 1 et à l'Institut Technique Roubaisien (I.T.R.) dans le cadre d'un contrat D.G.R.S.T. - C.R.E.A.T.I. - I.T.R. - S.P.I.E.T. - n° 78.7.21 90 : "Commande Prédicative d'un Système Multivariable: Application à la conduite d'unités industrielles de teinture textile".*

*Nous exprimons toute notre gratitude au Professeur Pierre VIDAL pour l'accueil qu'il nous a réservé au sein de son Laboratoire. Nous le remercions tout particulièrement d'avoir accepté la présidence de notre jury de thèse.*

*Que le Professeur Lucien POVY trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour les conseils et encouragements qu'il nous a toujours prodigués, nous faisant ainsi profiter de son expérience et de son amitié.*

*Nous sommes reconnaissants à Monsieur Maurice FOURNET, Coordinateur Mesure et Informatique à l'O.N.E.R.A./Paris, d'avoir considéré avec bienveillance nos travaux et de nous faire l'honneur d'être membre de notre jury.*

*Que Monsieur Jean-Claude SACRE, Maître-Assistant à l'Université des Sciences et Techniques de Lille 1, qui nous a conseillé, guidé et dirigé tout au long de nos travaux, soit assuré de notre profonde reconnaissance. Nous sommes heureux de le remercier sincèrement et de lui exprimer notre amicale gratitude.*

*Nous remercions également Monsieur Daniel STEEN, Ingénieur-Professeur à l'I.T.R. pour sa collaboration et pour son esprit d'équipe. Nous lui témoignons notre sympathie pour sa participation au jury.*

*Enfin nous tenons à remercier les secrétaires et techniciens du laboratoire, ainsi que les techniciens de l'I.T.R. qui ont participé d'une façon très active à l'élaboration de ce mémoire.*

## INTRODUCTION : ÉNONCÉ DU PROBLÈME

---

L'industrie textile, contrairement aux autres industries, n'a pas subi de mutations profondes depuis la "Révolution Industrielle". Ce qui fait qu'elle reste souvent considérée, aujourd'hui, comme traditionnelle.

Cependant, une volonté de modernisation commence à se manifester, tant par des automatismes dans les chaînes de fabrication que par la recherche de techniques nouvelles faisant appel à l'ordinateur. Toutefois, les recherches ne se sont développées dans les ateliers de teintures que dans les tâches ou opérations industrielles classiques (pesage, introduction de tissu, contrôle de volume, température, pression, débit, remplissage et vidange d'eau...) où l'automatique ne peut éventuellement apporter son concours que par sa partie automatisme combinatoires ou séquentielles.

La difficulté commence avec le contrôle de l'évolution colorimétrique du textile en cours de teinture en vue d'établir sa conformité. En effet, l'automatisation du procédé de teinture présente un grand nombre de particularités :

- C'est un processus multivariable. Le nombre des grandeurs à régler est au minimum de 3 dans le cas de la trichromie, nombre auquel il faut ajouter les paramètres relatifs à la teinture.

- Les variables à réguler sont couplées les unes aux autres. Elles présentent aussi l'inconvénient de dépendre de la matière à traiter et des conditions dans lesquelles se déroule la teinture.

- Le système est non linéaire. Les méthodes de teinture sont dominées par un empirisme total. Les lois qui régissent la concentration des colorants et leur rapidité d'épuisement sont mal connues. Cela est dû principalement à la multiplicité des classes de colorants et aux interactions physico-chimiques avec les fibres textiles.

- La reproduction du coloris souhaité, sans dépassement de nuance, vue l'irréversibilité du phénomène de teinture, doit se faire nécessairement par approches successives. Le système se complique par le fait que les colorants agissent par synthèse soustractive.

Le travail que nous exposons dans ce mémoire constitue une approche préliminaire de ce phénomène très complexe qu'est la teinture auquel vient se greffer la colorimétrie, science qui empiète sur la physique, la physiologie et quelquefois la psychologie.

. BUT :

Nous nous proposons de réguler une unité pilote de teinture - Figure 1 - pour des reproductions, assistées par ordinateur, de nuances conformes aux coloris souhaités.

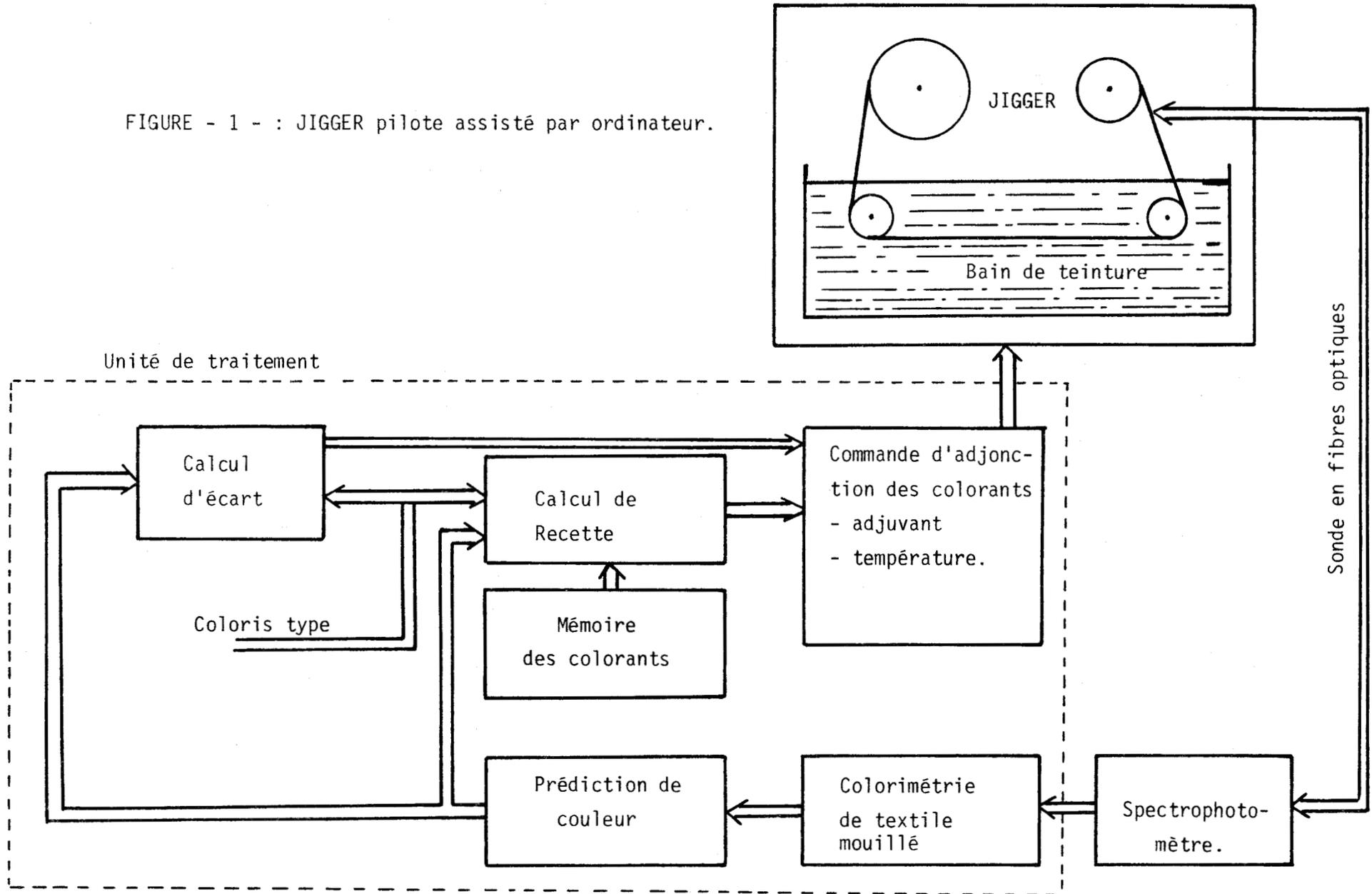
. TEINTURE TRADITIONNELLE :

Dans le domaine de la teinture industrielle, le procédé actuel pour juger de la conformité d'un coloris se fait soit à l'oeil, soit d'une manière séquentielle, par prélèvement d'un échantillon de tissu. Les opérations relevant de cette méthode sont le rinçage, le séchage, puis la présentation de l'échantillon à un spectrophotomètre pour évaluer sa conformité réelle par colorimétrie de surface sèche. Si la conformité est insuffisante, le teinturier ajoute les colorants estimés nécessaires et reprend la teinture. Ce procédé s'avère long, surtout à cause du temps de séchage, coûteux et relativement inefficace, car pendant cette période l'opération de teinture se poursuit.

. NOUVELLE TECHNIQUE DE TEINTURE :

Là où l'on ne parle que "d'habileté" et de "tours de mains" du teinturier, aspects subjectifs, nous envisageons de procéder à un contrôle direct sur le textile mouillé en cours de teinture pour évaluer et éventuellement réajuster la conformité. Toutes les théories de la colorimétrie étaient auparavant basées sur l'observation des matières sèches que ce soit pour établir une recette ou pour juger de la conformité.

FIGURE - 1 - : JIGGER pilote assisté par ordinateur.



L'idée d'une colorimétrie en phase mouillée devrait permettre d'intervenir dans l'exécution d'une teinture textile et ainsi d'envisager la régulation de coloris à reproduire. Cette démarche a tout naturellement demandé un environnement technique relativement important, ainsi qu'une étude particulière de chacune des phases du procédé.

Tout d'abord nous nous sommes attachés à la métrique des objets colorés, ainsi qu'aux notions d'écart colorimétriques. Nous définissons la courbe spectrale de réémission, celle-ci identifie la couleur d'une surface et représente la variable d'entrée du système. Mais cette information est prélevée en phase mouillée. Cela suppose par conséquent :

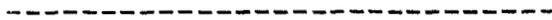
- D'une part, la mise en place d'une sonde optique susceptible de transformer un spectrophotomètre de laboratoire en un outil de mesure de textile mouillé en milieu industriel.

- D'autre part, l'établissement d'une loi de transposition colorimétrique entre un textile mouillé et le même sec.

La phase suivante de la recherche s'est orientée après une familiarisation du procédé de teinture vers l'analyse du suivi colorimétrique du tissu dans le bain. A partir de cette étude, une procédure de teinture avec une formulation mathématique pour la prédiction de couleur sèche dès l'instant de la vidange a été édifiée.

Les résultats de ces travaux, associés à un calcul de recette, aboutissent à l'élaboration d'un système de contrôle et de régulation des coloris dans une phase de nuançage se situant entre la teinture et le rinçage.

- PREMIERE PARTIE -



. CHAPITRE I : COLORIMÉTRIE

. CHAPITRE II : ACQUISITION DE DONNÉES -

LOI DE CORRESPONDANCE MOUILLÉ-SEC.

# CHAPITRE I

---

## COLORIMÉTRIE

---

I-1 - INTRODUCTION.....	I-1
I-2 - THEORIE DE LA PERCEPTION ET DE LA VISION DES COULEURS....	I-1
2.1. La Couleur.....	I-2
2.1.1. <i>Formation de la couleur</i> .....	I-2
2.1.2. <i>Synthèse additive, synthèse soustractive</i> .....	I-4
2.1.3. <i>Composantes psychophysiques de la vision des couleurs</i> .....	I-4
a) <i>Aspect psychologique</i> .....	I-4
b) <i>Aspect physique</i> .....	I-5
2.2. L'oeil et la perception des couleurs.....	I-6
I-3 - LOIS DE LA COLORIMETRIE.....	I-7
3.1. Classification des couleurs.....	I-7
3.1.1. <i>Technique de mesure</i> .....	I-7
3.1.2. <i>Système X, Y, Z de la C.I.E.</i> .....	I-9
3.1.3. <i>Seuils différentiels</i> .....	I-17
3.2. Ecart de nuance.....	I-21
3.2.1. <i>Méthodes utilisées</i> .....	I-22
I-4 - CONCLUSION.....	I-34
BIBLIOGRAPHIE.....	I-36

*I-1 INTRODUCTION*

L'objet du présent chapitre repose principalement sur la définition et la caractérisation d'une couleur. Le but est de montrer d'abord comment l'oeil voit la couleur, ainsi que la mise en équation des relations qui existent entre le côté physique, c'est-à-dire l'analyse des couleurs par des appareils optiques et le côté physiologique, c'est-à-dire la sensation de ces mêmes couleurs par l'observateur humain.

Dans la première partie, il sera question de la formation, de la perception et de la vision des couleurs. Dans la deuxième partie, nous mettrons en évidence l'identification, l'analyse et la représentation de la couleur dans un espace. Enfin, nous traiterons de la formulation d'une métrique de la couleur pour l'évaluation de différence de nuance entre deux chromaticités et luminances : l'une représentant le coloris type, l'autre une reproduction ou un contre type.

La colorimétrie repose sur la connaissance des coefficients de réémission d'une couleur. Ces coefficients, prélevés dans le spectre visible, permettent de relever la courbe spectrale de réémission. Cette dernière identifiant parfaitement une couleur, constituera le paramètre d'entrée-sortie du système automatique que nous proposons pour une reproduction.

*I-2 THEORIE DE LA PERCEPTION ET DE LA VISION DES COULEURS*

La matière modifie la composition de la lumière qu'elle transmet ou qu'elle réémet. Il ne sera pas fait ici état des 14 catégories de causes premières de la couleur, les références à ce sujet sont abondantes. Cependant, toutes ces causes ont la même origine : Ce sont les électrons de la matière qui, par leurs diverses interactions avec les ondes lumineuses donnent à la nature son aspect polychrome (1).

L'impression chromatique que notre sens visuel reçoit, résulte donc de la répartition des longueurs d'onde dans la lumière réémise par la matière. Cette impression constitue le point de départ de notre étude concernant les couleurs et leur reproduction.

Sans rentrer dans les détails concernant :

- l'interaction des ondes lumineuses avec les électrons
- et aussi, l'état d'interférence dépendant de la longueur d'onde et qui entraîne l'apparition des couleurs (2).

Nous allons voir la formation des couleurs, l'oeil qui les perçoit et le cerveau qui les analyse d'une manière beaucoup plus générale :

## 2.1. LA COULEUR :

### 2.1.1. La formation des couleurs

C'est à partir d'un rayonnement complexe d'une lumière plus ou moins blanche, à spectre continu, qu'on obtient en général les couleurs.

Le mode d'extraction de la couleur, ainsi que la modification de l'aspect d'une source lumineuse sont variables.

#### α) La dispersion par prisme

Ce fut NEWTON, en 1666, qui montra que la lumière était un mélange de couleur en la décomposant sur un prisme .Ce dernier dissocie la lumière en donnant les couleurs du spectre dites simples, car elles ne peuvent plus être décomposées (figure 1).

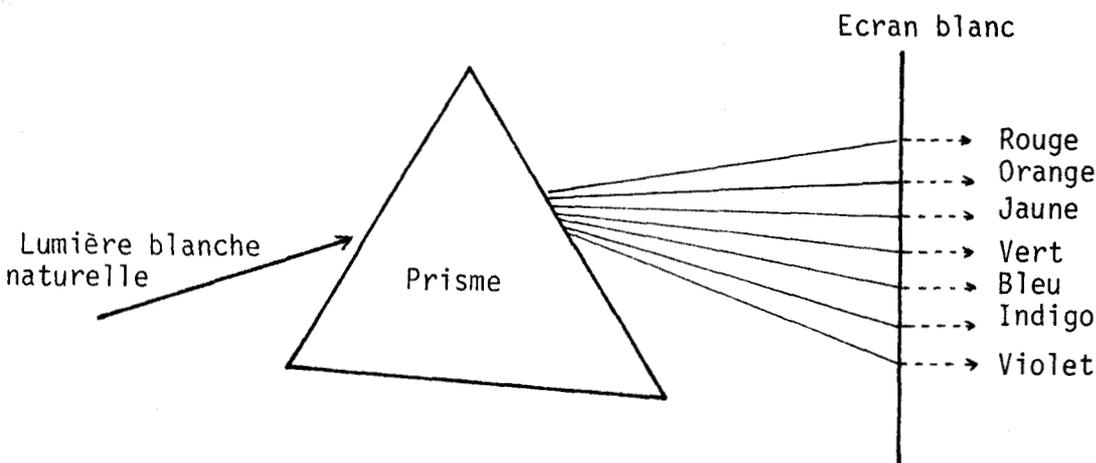


FIGURE - 1 -  
Expérience du prisme.

### β) Transmission par filtre

Le filtre est un corps présentant une certaine absorption de la lumière. Il est défini par son facteur de transmission  $\tau_\lambda$  qui est le rapport de flux émergent  $I_E$  au flux incident  $I_I$  pour une longueur d'onde déterminée  $\lambda$

$$\tau_\lambda = \frac{I_E}{I_I}$$

Il est dit neutre s'il transmet également toutes les longueurs d'ondes ; il est sélectif s'il absorbe certaines radiations et en transmet d'autres. Il en résulte une courbe de transmission spectrale qui définira ce filtre.

### γ) La réémission

La lumière qui frappe un objet est en partie réfléchi, en partie absorbée et en partie diffusée. L'observateur recevrait non seulement le rayonnement réfléchi, mais aussi une partie du rayonnement diffusé. Ces deux rayonnements constituent la réémission. Le facteur de réémission ou réflectance  $\beta_\lambda$  est défini par le rapport du flux réémis  $I_R$  au flux incident  $I_I$

$$\beta_\lambda = \frac{I_R}{I_I}$$

$\beta_\lambda$  dépend également de la position respective de la source et de l'observateur. Si les angles d'éclairages et d'observation ne sont pas conformes, cela se traduit par un phénomène de brillance qui fausse la mesure.

Les radiations de la lumière incidente peuvent être également réémises : ce qui correspond aux objets blancs, gris ou noirs. Elles peuvent être au contraire sélectives : L'objet absorbe toutes les longueurs d'onde, sauf une partie renvoyée vers l'oeil de l'observateur et qui va donc définir la couleur de l'objet.

### 2.1.2. Synthèse additive, synthèse soustractive

La distinction entre un mélange additif et un mélange soustractif est à préciser car la définition se prête à une confusion. En effet ajouter "additif" au terme mélange est un pléonasme, car le mot mélange implique déjà l'addition de plusieurs choses. Le terme soustractif quant à lui suggère une soustraction, ce qui constitue un contresens lorsqu'il est question d'un mélange (3).

On appelle mélange additif la couleur obtenue en superposant sur un écran de projection blanc des flux lumineux colorés issus de projecteurs différents : Par exemple le mélange additif blanc obtenu avec deux lampes munies chacune d'un filtre différent : un bleu et un jaune.

Le mélange soustractif est réalisé en mêlant des pigments colorés (en peinture par exemple), chaque pigment contribuant à soustraire à la lumière une partie de son spectre. C'est le cas où les deux filtres vus précédemment au lieu d'être mis chacun devant une lampe, ils seront superposés tous les deux devant la même lampe. La résultante est une couleur verte sur l'écran. Chaque filtre enlève successivement à un même rayonnement une partie de ces radiations (4).

### 2.1.3. Composantes psychophysiques de la vision des couleurs.

Dans le domaine de la couleur il est important de distinguer les aspects subjectifs des aspects objectifs des objets colorés.

#### a) Aspects psychologiques :

Une couleur peut-être caractérisée au point de vue sensoriel et psychologique par trois attributs subjectifs fondamentaux qui sont :

α) La luminosité qui exprime l'impression subjective selon laquelle une surface paraît renvoyer plus ou moins de lumière.

β) La tonalité ou chroma appelé couramment la teinte de la couleur et qui donne l'impression qualitative chromatique proprement dite. La teinte est un attribut de la sensation visuelle selon laquelle une surface paraît se relier à une ou plusieurs des couleurs, bleu, vert, jaune, orangé, rouge et pourpre.

γ) La saturation exprime l'intensité de la sensation chromatique. Par exemple, pour une lumière très pure la saturation est maximale, elle vaut 1 et la couleur correspondante est dite saturée. Par contre, la saturation tendant vers 0 qualifie une couleur pastel.

b) Aspects physiques :

Aux trois paramètres psychologiques vont correspondre respectivement au point de vue physique trois données équivalentes.

α) La luminance L :

C'est une mesure photométrique, la luminance est la caractéristique de l'intensité de la radiation lumineuse renvoyée par l'objet.

β) La longueur d'onde dominante :

Définie colorimétriquement, la longueur d'onde dominante  $\lambda_d$  est la longueur d'onde de la couleur pure la plus proche de la couleur considérée.

γ) La pureté colorimétrique  $p_c$  :

La pureté colorimétrique exprime la proportion de la lumière blanche mêlée à la lumière pure. Le facteur de la pureté colorimétrique, défini par le rapport de la luminance d'une radiation monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  sur la luminance totale, est donnée par :

$$p_c = \frac{L_d}{L} = \frac{L - L_w}{L}$$

L étant la luminance d'un faisceau coloré quelconque réalisé par superposition d'un faisceau blanc de luminance  $L_\omega$  et d'un faisceau monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_d$  et de luminance  $L_d$

$$L = L_d + L_\omega \quad 0 < p_c < 1$$

$p_c \rightarrow 0$  il y a très peu de couleur dans le blanc

$p_c \rightarrow 1$  la couleur tend vers une couleur pure.

Pour le cas particulier des pourpres, la longueur d'onde dominante et la pureté sont données par leur correspondant symétrique à la couleur blanche.

## 2.2. L'OEIL et LA PERCEPTION DES COULEURS :

L'oeil n'est qu'un organe externe qui permet de capter les images, de collecter la lumière et de la focaliser au niveau de la rétine. Tous les investigateurs sont d'accord sur l'existence des cellules sensibles de la rétine ou photorécepteurs qui convertissent l'énergie lumineuse en influx nerveux transmis au cerveau. C'est donc, dans ce dernier que se trouve le sens visuel. La conversion de l'énergie lumineuse en signaux essentiellement électriques et partiellement chimiques, est effectuée grâce à des pigments spéciaux sensibles à la lumière.

Deux sortes de photorécepteurs tapissent la rétine : les bâtonnets et les cônes. Les premiers ne sont pas sensibles à la couleur, par contre les cônes présentant un maximum de sensibilité dans les courtes, les moyennes et les grandes longueurs d'onde du spectre visible, sont responsables de la vision des couleurs.

L'hypothèse de YOUNG (formulée en 1801) sur le processus de la formation de la sensation colorée dans l'organe de la vision a fait l'objet de plusieurs études. En effet YOUNG a envisagé l'existence de trois stimuli d'excitation respectivement sensibles au rouge, au bleu et au jaune, le mélange additif des trois excitations provoque la sensation colorée correspondante. Mais c'est en 1964 que deux équipes de chercheurs (Mac Nichol and Marks ; Wald and Brown) démontrèrent l'existence de trois sortes de pigments dans les cellules réceptrices

présentant des pics d'absorption dans le bleu, le vert et le rouge.

Les théories sur la perception des couleurs ont permis de dégager trois paramètres psychophysiques caractérisant une couleur. Le rôle de la colorimétrie est justement d'exprimer ces trois paramètres en chiffres et de les valoriser de façon à les définir objectivement.

A cette fin il faut :

- 1°) *Mesurer et identifier la couleur*
- 2°) *L'analyser*
- 3°) *La situer dans un système de coordonnées.*

### I-3 LOIS DE LA COLORIMETRIE

La colorimétrie est la technique de mesure, ainsi que la manière d'exprimer en nombres une couleur. Les lois qui en découlent, donnent une classification, une représentation dans un espace et une métrique pour l'évaluation des différences de couleur.

#### 3.1. CLASSIFICATION DES COULEURS

L'étude de la répartition spectrale de la lumière émise ou absorbée par une matière est un outil puissant pour l'analyse de cette matière. La mesure et l'identification d'une couleur se font à l'aide d'un spectrophotomètre. En effet, la spectrophotométrie combine l'analyse spectrale de la spectrométrie et la mesure d'une qualité photométrique (5).

##### 3.1.1. Technique de mesure

L'analyseur de couleur ou spectrophotomètre est un appareil de mesure d'une grandeur photométrique en fonction de la longueur d'onde. Il explore automatiquement le spectre visible de 380 à 800 nm.

Il est formé de quatre éléments principaux qui sont : la source lumineuse, le monochromateur, le porte échantillon et la cellule

photoélectrique.

Le principe est représenté sur la figure 4.

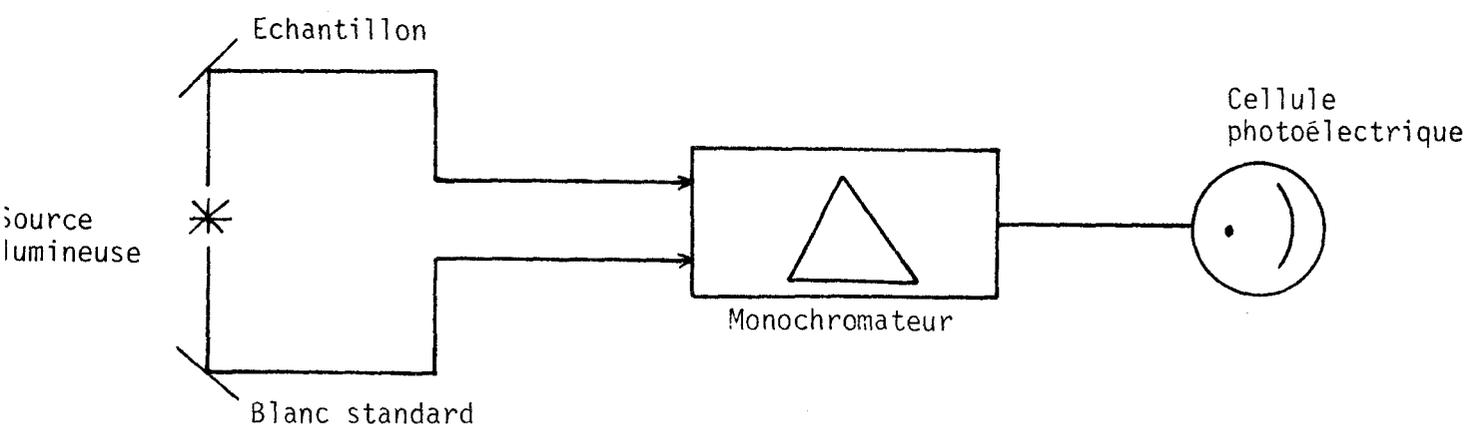


FIGURE - 4 -

Principe d'un spectrophotomètre.

La lumière issue de la source frappe simultanément le blanc standard et l'échantillon. Par un jeu de miroirs, les faisceaux issus du blanc standard et de l'échantillon pénètrent dans le monochromateur. Ce dernier est construit comme un spectromètre où seule une partie du spectre est utilisée à la fois, ce qui simplifie la corrections des aberrations.

Le monochromateur comprend les fentes, les prismes ou le réseau dispersif avec les dispositifs de changement de longueur d'onde et les systèmes de focalisation. Les lumières décomposées par le monochromateur atteignent finalement la cellule photoélectrique où les deux énergies seront enregistrées.

Le rapport de l'énergie réémise par l'objet et de celle du blanc standard donne l'énergie relative réémise dans la radiation envisagée et porte le nom de facteur spectral de luminance  $\beta(\lambda)$  ou encore facteur de réémission.

L'opération réalisée successivement dans chacune des radiations du spectre permet de relever la courbe spectrale de la couleur de l'objet en portant sur des axes orthonomés les facteurs spectraux de luminance  $\beta$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Tout au long de notre étude, il serait question de ces paramètres spectraux de luminance  $\beta(\lambda)$ . Ils constituent les paramètres d'entrée-sortie de notre système. Par conséquent, les performances de notre objectif dépendent en grande partie de la précision de ces mesures.

La courbe spectrale identifie exactement la couleur, en ce sens que deux couleurs différentes ne peuvent avoir des courbes spectrales identiques. Par contre, cette courbe spectrale ne permet pas d'identifier et de valoriser directement les paramètres psychophysologiques de la couleur. Il faut procéder à l'analyse de la couleur pour l'identification et la valorisation de ces paramètres.

L'analyse consiste à déterminer, par rapport à trois couleurs primaires, la quantité que la couleur de l'objet contient de chacune de ces couleurs fondamentales.

### 3.1.2. Système X Y Z de la C.I.E.

Nous avons vu qu'il existe dans la rétine trois centres de sensibilité spectrale différentes, c'est-à-dire que l'impression des couleurs est provoquée par les trois centres d'excitation conduisant au cerveau. Cela signifie également, et l'expérience le montre, que trois valeurs numériques seulement suffisent pour repérer l'aspect coloré d'une surface.

Cette extraordinaire simplification constitue le fait fondamental de la vision chromatique, à savoir sa trivariance. Donc pour un sujet normal, trois nombres sont nécessaires et suffisants pour définir une couleur.

A partir de cette trivariance plusieurs travaux ont été développés sur la représentation des couleurs dans un espace (6), (7), (8) et (9). Parmi tous les systèmes nous nous limiterons à exposer le système de coordonnées X Y Z de la C.I.E. Ce dernier extrêmement pratique et qui date de 1931 est adopté dans tous les colloques internationaux sur les couleurs. L'utilisation de ce système reposant sur de nouvelles mesures de Guild (10) et de Wright (11) a pour but d'uniformiser la manière de caractériser les couleurs.

Les couleurs naissent par le concours de trois facteurs : la nature de l'illuminant éclairant les objets, les propriétés de réémission de ces derniers et la sensibilité de l'oeil. En effet, sous certains éclairages de nombreux objets s'y montrent avec une distorsion de couleurs ou, plus exactement, ils produisent une impression colorée différente de celle à laquelle nous sommes habitués pendant le jour.

A cette fin, il a été recommandé par la C.I.E. d'employer des sources artificielles étalons (figure 5) telle que leur répartition spectrale  $E_\lambda$  soient constantes dans tout le spectre visible pour l'examen réel au laboratoire et pour la pratique de la colorimétrie (12).

. Source A :

L'illuminant A sera réalisé par une lampe à filament de tungstène spiralé à atmosphère gazeuse. Il est très pauvre en radiations bleues et très riche en radiations rouges.

. Source B :

L'illuminant B sera obtenu en filtrant les radiations issues de A à travers deux solutions  $B_1$  et  $B_2$  traversées chacune sous 1 cm d'épaisseur. Il correspond à la lumière solaire.

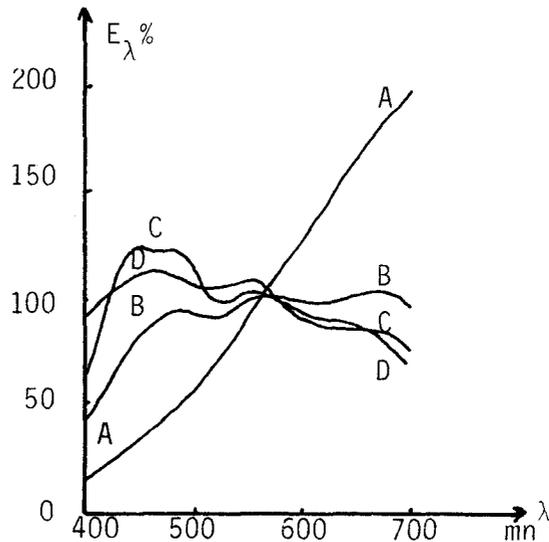
. Source C :

Les radiations issues de A seront filtrées à travers deux solutions  $C_1$  et  $C_2$ . L'illuminant C correspond à la lumière du jour, il est légèrement plus riche en radiations bleues et moins riches en radiations rouges.

. Source D<sub>65</sub> :

Aucune source artificielle n'est recommandée pour réaliser l'illuminant D<sub>65</sub> qui représente une valeur expérimentale moyenne de la lumière du jour.

FIGURE - 5 -  
Répartition énergétique  
des sources étalons A, B, C, D.



Le facteur de lumière est l'élément principal du phénomène "couleur" et se trouve à son origine.

Pour ce qui est du deuxième facteur, la nature du corps, il résulte de la propriété qu'a le corps d'absorber ou de réémettre, partiellement ou totalement, certaines radiations du spectre visible. La résultante de cette propriété est définie par le facteur spectral de réémission  $\beta(\lambda)$  du corps considéré.

Quant au troisième facteur, la sensibilité de l'oeil qui provoque enfin la sensation colorée réelle, relève du domaine de la psychophysiologie. Donc, afin de réaliser la liaison entre la sensation colorée et l'analyse de la couleur, les zones de sensibilité spectrales des trois récepteurs de l'oeil ont été déterminées par observation statistique sur un certain nombre d'individus et ils ont été normalisés par la C.I.E. Ils sont désignés sous le nom de courbes de distribution du spectre d'égalité d'énergie  $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$ ,  $\bar{z}_\lambda$  de l'oeil à vision normale (fig. 6).

## Energie spectrale

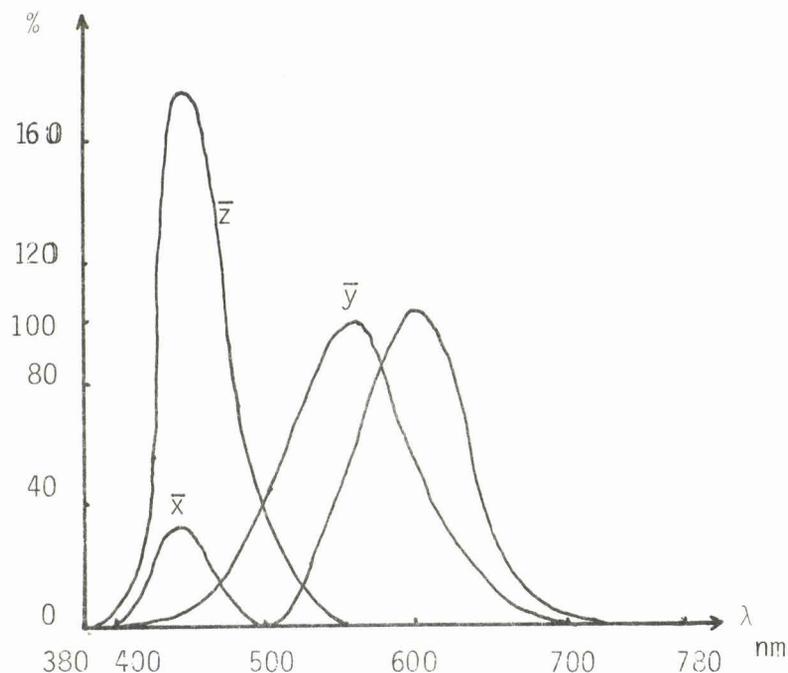


FIGURE - 6 - Courbes de distribution du spectre d'égal énergie pour l'observateur normal moyen conventionnel.

De plus, il faut tenir compte de la sensibilité de l'oeil aux variations de la luminosité. Mais aucune nouvelle courbe n'est à considérer car la courbe de sensibilité de l'oeil pour la luminosité correspond exactement à  $\bar{y}_\lambda$ .

Ces courbes ont permis, enfin, de réaliser un trait d'union entre les deux domaines physiques et physiologiques et de poser les bases de la colorimétrie actuelle :

a) Composantes trichromatiques psychophysiques :

L'action conjuguée des trois facteurs :

$E_\lambda, \beta_\lambda, (\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$  (fig. 7) va permettre de déterminer les composantes trichromatiques psychophysiques X, Y, Z. Ces derniers peuvent être obtenus en multipliant la courbe spectrale équiénergétique  $E_\lambda$  de l'illuminant par la courbe spectrale de luminance  $\beta_\lambda$ , puis par les courbes de sensibilité de l'oeil et en intégrant les produits sur l'ensemble du spectre visible. (Voir Annexe I.1. pour les valeurs de  $E_\lambda$  et de  $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ .)

$$X = \int_{400}^{700} E(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Y = \int_{400}^{700} E(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Z = \int_{400}^{700} E(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda$$

Le produit  $E(\lambda) \beta(\lambda)$  est l'énergie lumineuse réémise par l'objet et qui pénètre dans l'oeil.

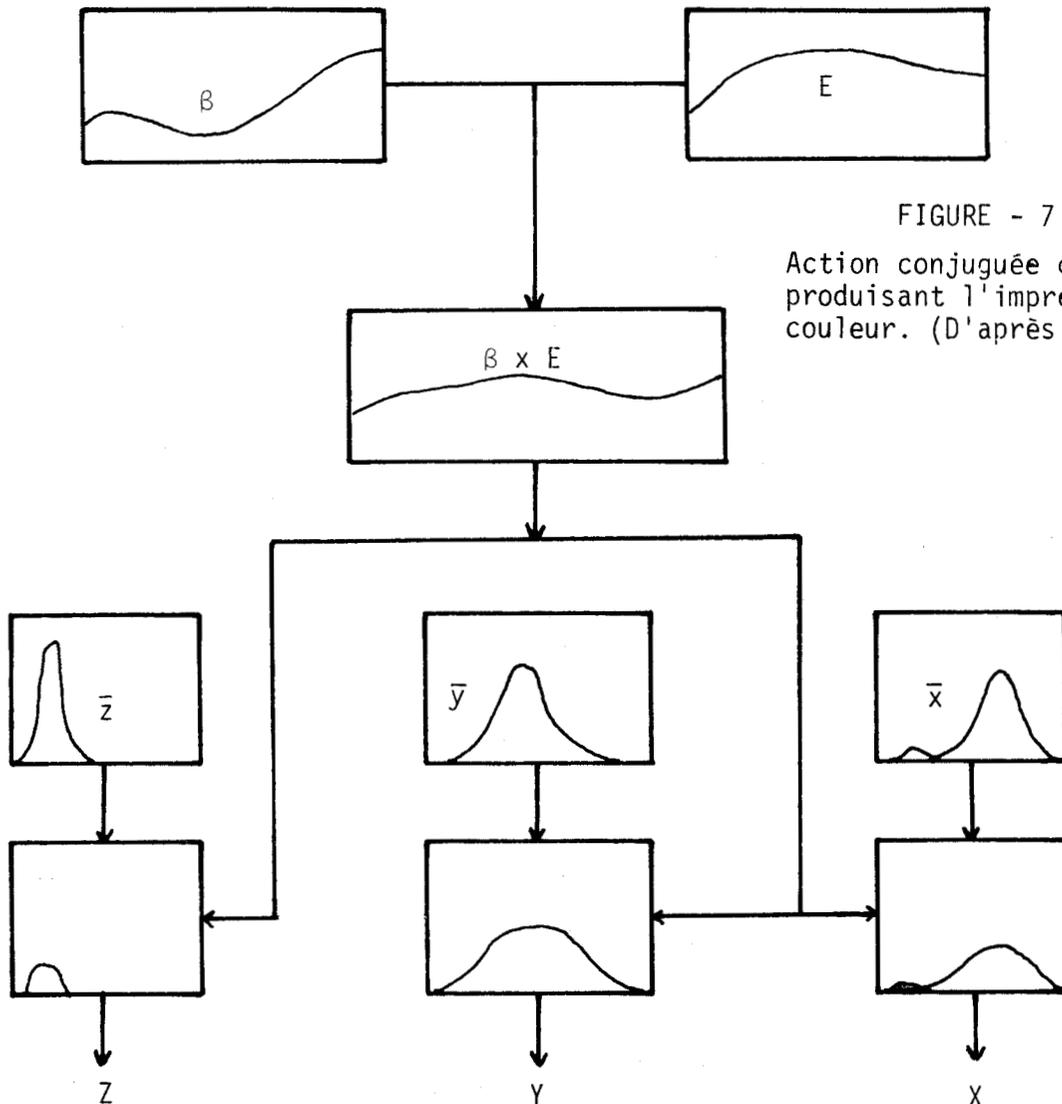


FIGURE - 7 -

Action conjuguée des facteurs produisant l'impression de couleur. (D'après D.L. Mac Adam)



X, Y et Z représentent les quantités que contient un stimulus de couleur des trois stimuli d'excitation pris comme couleurs primaires d'analyse.

Les trois composantes trichromatiques constituent dès lors les caractéristiques proprement dites d'une couleur au point de vue sensation exercée sur l'oeil.

L'application directe des composantes trichromatiques X, Y, Z dans un espace peut représenter graphiquement l'ensemble de toutes les couleurs. Mais les résultats sont plus clairs lorsqu'on calcule les coordonnées trichromatiques psychophysiques  $x, y$ , pour une représentation des couleurs dans un plan.

#### b) Coordonnées trichromatiques psychophysiques

Les coordonnées trichromatiques psychophysiques sont déduites des composantes trichromatiques X, Y, Z, elles sont données par les relations :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Par convention leur somme est égale à l'unité. Cependant la coordonnée z est sans intérêt puisqu'on ne la lit pas sur le plan représentatif des couleurs (figure 8).

La grandeur x indique la proportion de composante rouge X dans la somme des composantes X+Y+Z, tandis que y représente la proportion de composante verte ; ensemble ils fournissent la chromaticité d'une couleur et ils sont reliés à des combinaisons de nuance et de saturation.

Les spécifications colorimétriques peuvent, de ce fait, comporter l'ensemble des valeurs  $x$ ,  $y$ ,  $Y$  pour l'identification et l'analyse d'une couleur.

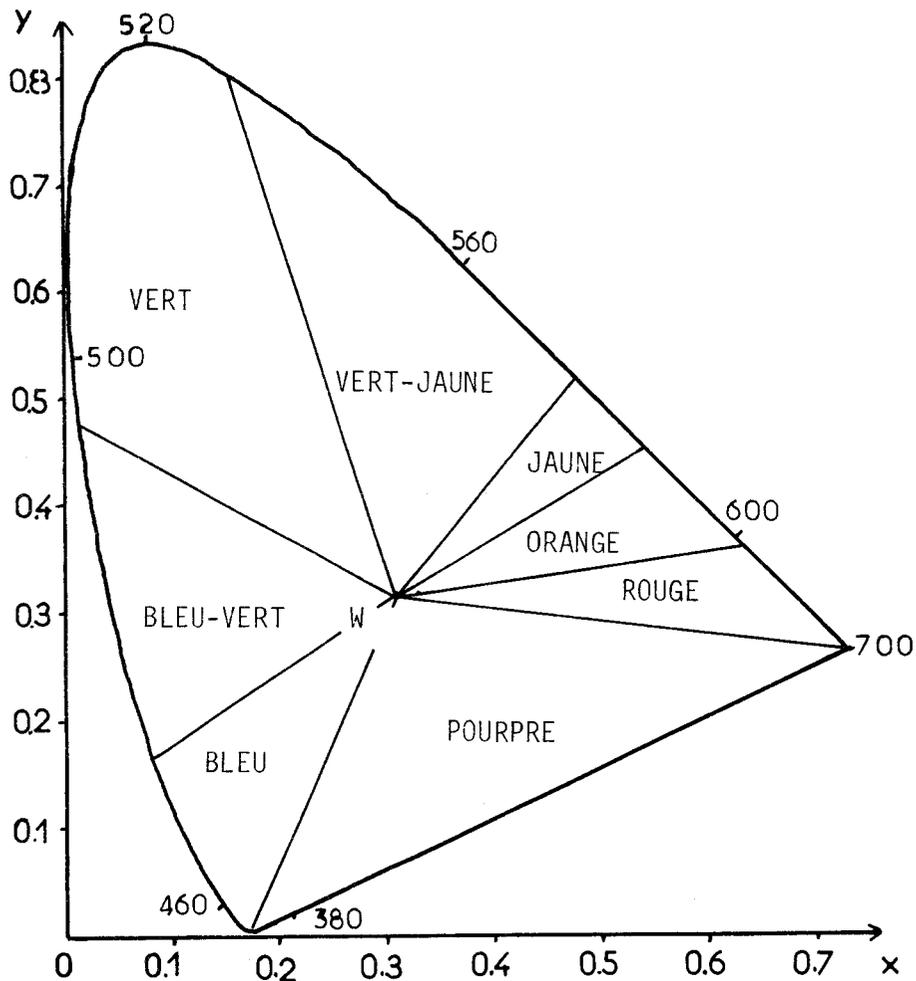


FIGURE - 8 -

Découpage des couleurs dans le plan  $x, y$ .

Il est à signaler et ceci est important qu'il existe un phénomène de métamérisme lors d'une analyse d'une couleur. C'est-à-dire qu'on peut obtenir les mêmes composantes trichromatiques  $X, Y, Z$ , par conséquent le même aspect, avec des courbes spectrales de luminance différentes.

Cela s'explique mathématiquement par le fait que les composantes sont calculées par intégrales ou sommes en partant des courbes spectrales de luminance prélevées dans des conditions d'éclairage et sous un type de lumière bien déterminé. Si les objets sont analysés sous une autre source lumineuse, ils paraîtront différents. Par contre, les objets

qui possèdent la même courbe spectrale de luminance auront le même aspect sous n'importe quel illuminant et ils seront dits de couleurs identiques.

La courbe spectrale de réémission  $\beta(\lambda)$  identifie l'objet, quant aux coordonnées  $X, Y, Z$ , elles représentent son image.

A tout objet  $\beta_i(\lambda)$  correspond une et une seule image représentée par le triplet  $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ . Par contre, à une image  $\{X, Y, Z\}$  nous pouvons faire correspondre plusieurs objets  $\beta_i(\lambda)$   $i = 1, \dots, n$

La fonction qui lie l'objet à son image dépend des conditions d'éclairage et d'observation. Par conséquent, la reproduction d'un échantillon avec la plus faible métamérie peut-être rendue possible par comparaison des objets, c'est-à-dire des courbes spectrales de luminance. (Nous ne pouvons pas nous référer à des images pour faire des reproductions).

D'autre part, si l'on double les valeurs des facteurs spectraux de luminance d'un objets, les composantes  $X, Y$  et  $Z$  doublent également, mais les coordonnées  $x$  et  $y$  demeurent sans changements, la luminosité  $Y$  liée à  $X, Z$  n'exerce par contre aucune influence ni sur  $x$ , ni sur  $y$ . C'est dans cette cloison qui sépare la chromaticité de la luminosité que repose précisément l'utilité pratique du calcul des coefficients trichromatiques psychophysiques (13).

Du diagramme  $x, y$  de la C.I.E. (fig. 9) nous pourrons déterminer directement deux des paramètres objectifs de la couleur équivalente à la teinte et à la saturation.

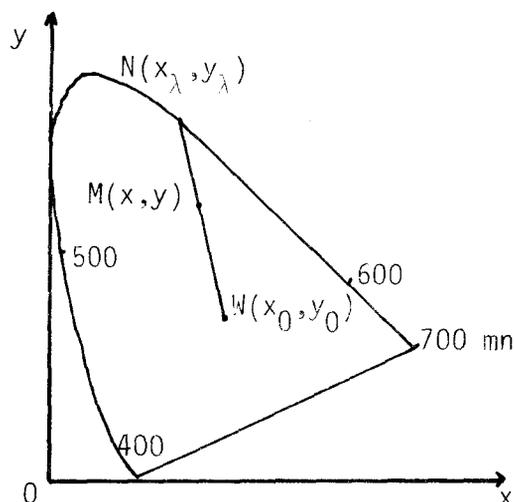


FIGURE - 9 -

1°) La longueur d'onde dominante  $\lambda_d$  :

Elle est déterminée sur le prolongement de la droite joignant le point acromatique  $w(x_0, y_0)$  au point M (x,y) de la couleur considérée jusqu'au spectrum locus.

2°) La pureté d'excitation  $p_e$  :

C'est une grandeur analogue à la pureté colorimétrique  $p_e$  définie au paragraphe 2.1.3. Elle est donnée par la relation :

$$p_e = \frac{x - x_0}{x_\lambda - x_0} = \frac{y - y_0}{y_\lambda - y_0}$$

Une géométrie des couleurs a été édiflée en quelque sorte, mais il reste à déterminer une métrique des couleurs, c'est-à-dire à savoir jusqu'où l'on peut aller dans les variations des paramètres cités précédemment avant que l'oeil, qui est en fait le principal juge, commence à percevoir une différence de couleur.

### 3.1.3. Seuils différentiels

Après avoir vu la définition et le classement des couleurs dans un espace, le problème consiste donc à déterminer la quantité dont doit varier l'une des caractéristiques (tout en maintenant constantes les autres caractéristiques) pour que l'oeil commence à percevoir une différence.

#### α) Seuil de luminance

Le seuil différentiel de luminance et la plus petite valeur de  $\Delta L$  qui permet au sujet de reconnaître pour deux phases colorées, chromatiquement identiques, mais dont les luminances diffèrent et sont  $L + \Delta L$ , de quel côté la luminance est la plus élevée. La loi de FECHNER (1858) dit que la sensation de luminosité est une fonction linéaire de  $\log L$  (figure 10).

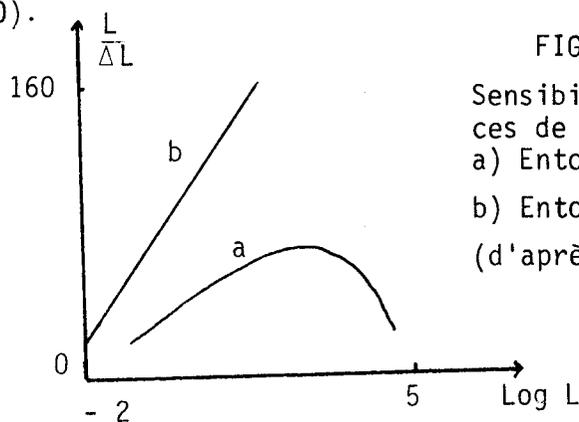


FIGURE - 10 -  
Sensibilité de l'oeil aux différences de luminance L  
a) Entourage sombre  
b) Entourage lumineux  
(d'après BOUMA) /14/

### β) Seuil chromatique

Le seuil chromatique et la variation minima  $\Delta\lambda$  qu'il faut ajouter à la longueur d'onde  $\lambda$  d'une couleur spectrale pour obtenir à luminance égale une différence de couleur juste perceptible (figure 11) pour un observateur moyen.

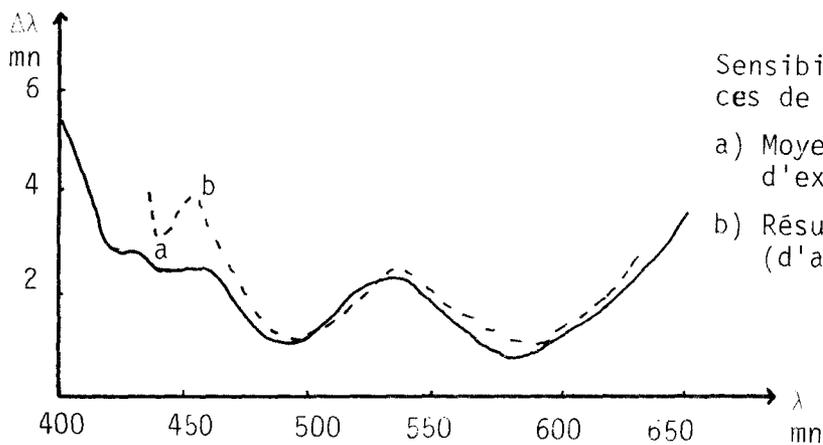


FIGURE - 11 -

Sensibilité de l'oeil aux différences de chromaticité.

a) Moyenne d'un certain nombre d'expérimentateur

b) Résultats de Wright (d'après BOUMA)

Les courbes montrent qu'il y a deux régions de seuil minimal. Par conséquent, l'oeil est particulièrement sensible d'une part au passage du bleu au vert et d'autre part à la transition entre le rouge et l'orangé.

### γ) Seuil de saturation

Les seuils de saturation peuvent s'étudier à partir d'une pureté  $p_e = 0$  correspondant au blanc ou d'une pureté  $p_e = 1$  correspondant à une couleur spectrale.

#### - Le seuil à partir du blanc

C'est la plus petite quantité de couleur qu'il faut ajouter au blanc pour avoir une impression colorée (figure 12).

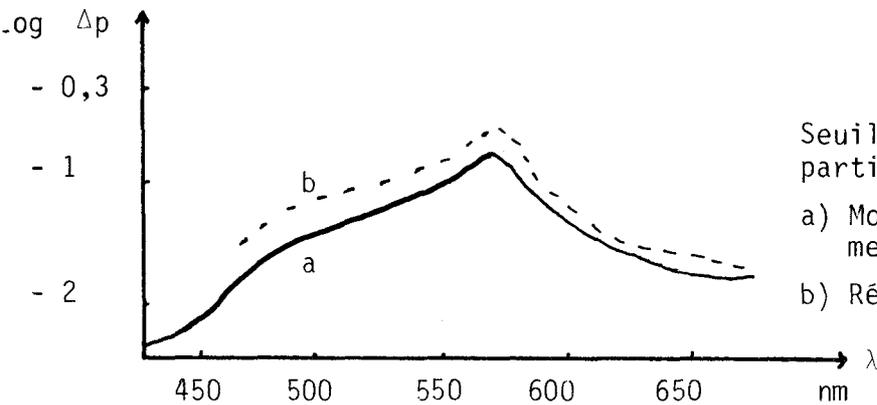


FIGURE - 12 -

Seuil différentiel de saturation à partir du blanc.

a) Moyenne d'un certain nombre d'expérimentateur

b) Résultats de Wright.

Le seuil  $\Delta p$  est maximum pour 570 nm (dans le Jaune) : il faut plus de jaune pour obtenir une impression colorée à partir du blanc que de rouge ou de bleu.

- Le seuil à partir du spectre :

C'est la plus petite quantité de blanc qu'il faut ajouter à une couleur spectrale pour avoir une impression de "pâlisement de la couleur".

Ce seuil différentiel est à peu près constant : il faut autant de blanc pour désaturer le jaune que pour le rouge ou le violet.

En utilisant les valeurs de seuil et en les complétant par un grand nombre de mesures, Judd, Wright et Mac Adam (15, 16, 17) ont essayé de définir une distance entre deux points de l'espace des couleurs X Y Z de la C.I.E., c'est-à-dire introduire un élément métrique qui peut représenter une même différence visuelle.

Sur le diagramme de la C.I.E. la même distance entre deux points situés dans le vert ou dans le rouge ne correspond pas à la même différence visuelle de couleur. Autrement dit l'espace de la C.I.E. n'est pas uniforme. Par conséquent, on ne peut pas définir un écart  $\Delta$  entre deux nuances relativement voisines de coordonnées  $x_0, y_0, z_0$  et  $x_1, y_1, z_1$  par la relation :

$$\Delta = \left[ (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 \right]^{1/2}$$

En mécanique il existe le mètre pour la mesure d'une longueur par exemple ; l'évaluation de la différence entre deux objets de taille différente est donnée par un nombre qui est relatif au mètre étalon. Contrairement à la mécanique, la colorimétrie ne présente pas d'étalon pour l'évaluation de la différence entre deux coloris, vu la diversité des couleurs existant dans la nature.

Cependant de nombreux chercheurs ont essayé de trouver l'élément pouvant évaluer dans l'ensemble de l'espace C.I.E., la différence entre deux coloris voisins.

En 1942, D.L. Mac ADAM a cherché le lieu des couleurs justes discernables autour de 25 points fixes répartis dans le plan de chromaticité. Les mesures ont donné naissance à 25 ellipses (Figure 13) détaillées et d'orientations différentes. Cette expérimentation détermine donc le seuil de perceptibilité d'un observateur moyen, vis à vis d'un certain nombre de nuances. C'est ce seuil de perceptibilité différentiel qui est pris conventionnellement comme unité d'écart entre coloris d'équivalence.

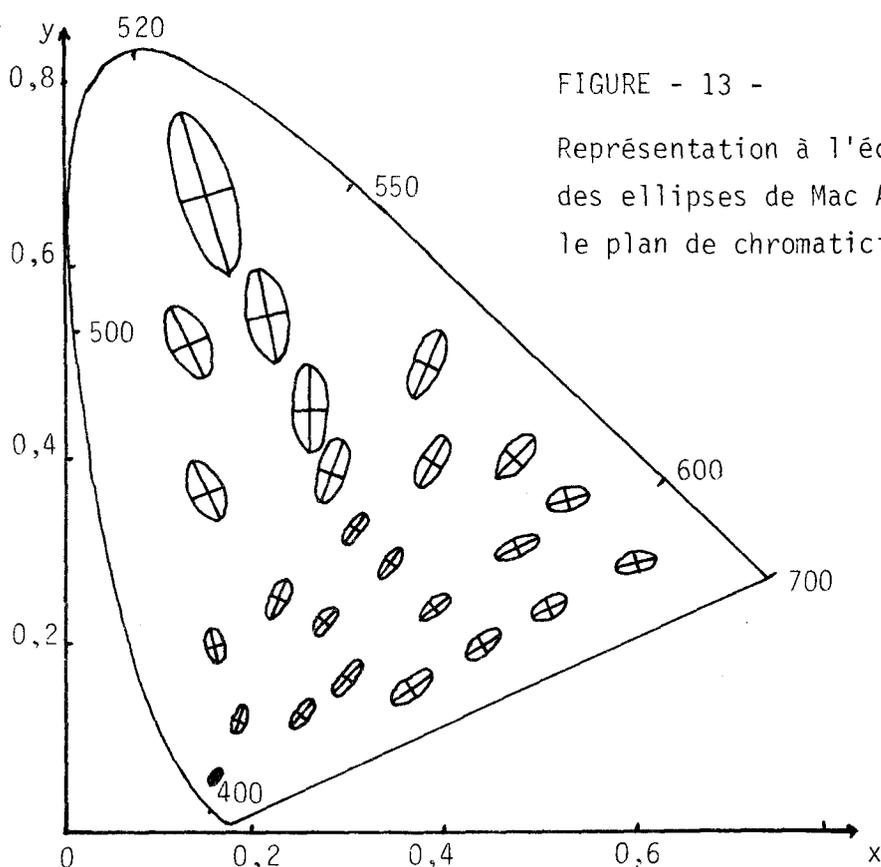


FIGURE - 13 -

Représentation à l'échelle 10 des ellipses de Mac Adam dans le plan de chromaticité.

### 3.2. ECART DE NUANCE

Nous parlons d'écart de nuance ou écart colorimétrique lorsque nous faisons la comparaison de deux échantillons colorés, l'un représentant la référence ou le type, l'autre étant la réalisation ou le contre-type. De nombreux chercheurs se sont penchés sur le problème de l'évaluation d'écart de nuance et ont apporté diverses formulations. Les solutions peuvent être classées en trois catégories :

#### 1°) Méthodes basées sur le système de Munsell :

Dans l'espace de Munsell chaque couleur est distante de sa voisine d'un même écart de sensation et se définit par trois valeurs :

- la teinte (H)
- la saturation (C)
- la luminosité (V)

D. NICKERSON /18/, I.A. Balinkin /19/, I.H. Godlove /20/, E.Q. Adams /21/ ont établi à partir de ces trois valeurs, trois relations peu différentes les unes des autres, représentant la différence de couleur dans l'espace de Munsell. Ces relations ne prétendent pas à une grande exactitude ; certaines formules ne sont valables que pour des cas particuliers.

#### 2°) Transformation de l'espace C.I.E. :

Les travaux ont consisté à faire subir une distorsion au diagramme C.I.E., afin d'obtenir un espace uniforme. De nombreuses formules globales ont été proposées les plus connues sont celles de D.B. Judd /22/, R.S. Hunter /23/, /24/, F. Scofield /25/, G. Wyszecki /26/. Elles ont l'avantage d'avoir une grande simplicité d'emploi, mais l'inconvénient d'être insuffisamment précises.

#### 3°) Transformation d'un espace restreint :

Les méthodes citées dans ce paragraphe estiment que l'espace du "Munsell renotation système" /27/ n'est pas uniforme et qu'il n'existe pas de transformation mathématique du système de la C.I.E. en un autre système uniforme. La solution consiste à transformer des zones de diagramme de la C.I.E. en zone de chromaticité uniforme. Plusieurs chercheurs, H.R. Davidson /28/, J. Perry /29/, H.R. Davidson et E. Friede /30/,

H.R. Davidson et J.J. Hanlon/31/, F.T. Simon et W.J. Goodwin, se basant sur les travaux de D.L. Mac Adam /32/ ont proposé des formules pratiques et des solutions graphiques correspondant à des zones de chromaticité uniforme et des diagrammes de différences de luminosité permettant de déterminer l'écart colorimétrique. Les résultats ont abouti à une linéarisation de l'espace de la C.I.E. par zones. Ces méthodes sont plus précises, mais elles exigent la manœuvre d'abaques.

### 3.2.1. Méthodes utilisées pour le calcul d'écart colorimétrique

Dans le cadre de notre projet, nous avons choisi deux méthodes pour le calcul d'écart colorimétrique. La première méthode est celle de J.C. Sacré qui est une application de Mac Adam, tandis que la seconde est une recommandation de la C.I.E.

#### a) Principe d'écart colorimétrique selon Mac Adam

Nous avons vu précédemment que Mac Adam a montré expérimentalement qu'autour de 25 couleurs du diagramme de la C.I.E., on pouvait construire une ellipse centrée sur chacune de ces couleurs. L'ellipse étant la frontière entre ce qui est distinguable et le lieu de toutes les couleurs pour lesquelles l'oeil ne fait pas de différence. On remarque que les ellipses sont de tailles et d'orientations non linéaires.

En 1943, il généralise cette méthode pour construire autour de n'importe quel point du diagramme une ellipse de "Deviation Standard". A partir des travaux de Silberstein /33/ et après transformation des ellipses en cercles, chacune des ellipses a pu être représentée par l'équation suivante :

$$g_{11} dx^2 + 2g_{12} dx dy + g_{22} dy^2 = 1 \quad /1/$$

où dx et dy étant la différence entre les coordonnées du centre de l'ellipse et les coordonnées d'un point quelconque appartenant à l'ellipse.  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$  sont des coefficients constants pour une ellipse donnée.

Les valeurs  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$  peuvent être calculées à partir de la caractéristique d'une ellipse à savoir,  $a$  son demi-grand axe,  $b$  son demi-petit axe et  $\theta$  l'angle d'inclinaison de  $a$  par rapport à l'axe des abscisses.

Les valeurs de ces constantes sont données par les relations :

$$g_{11} = \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \quad /2/$$

$$g_{12} = \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \sin \theta \cos \theta \quad /3/$$

$$g_{22} = \frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2} \quad /4/$$

Ils diffèrent d'une ellipse à une autre d'une manière apparemment systématique. Les variations de ces coefficients en fonction de la position du centre de l'ellipse sont représentées avec  $\pm 30\%$  par les familles de courbes données figures 14, 15, 16.

Réciproquement l'orientation  $\theta$  et les longueurs  $a$  et  $b$  des demi-axes de l'ellipse représentant les déviations standards de la chromaticité pour toutes les directions, à partir d'une chromaticité fixée, peuvent être calculés à partir des coefficients  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$  relevés dans les figures 14, 15, 16 pour cette chromaticité.

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2g_{12}}{g_{11} - g_{22}} \quad /5/$$

$$a = \frac{1}{(g_{22} + g_{12} \cotg \theta)^{1/2}} \quad /6/$$

$$b = \frac{1}{(g_{11} - g_{12} \cotg \theta)^{1/2}} \quad /7/$$

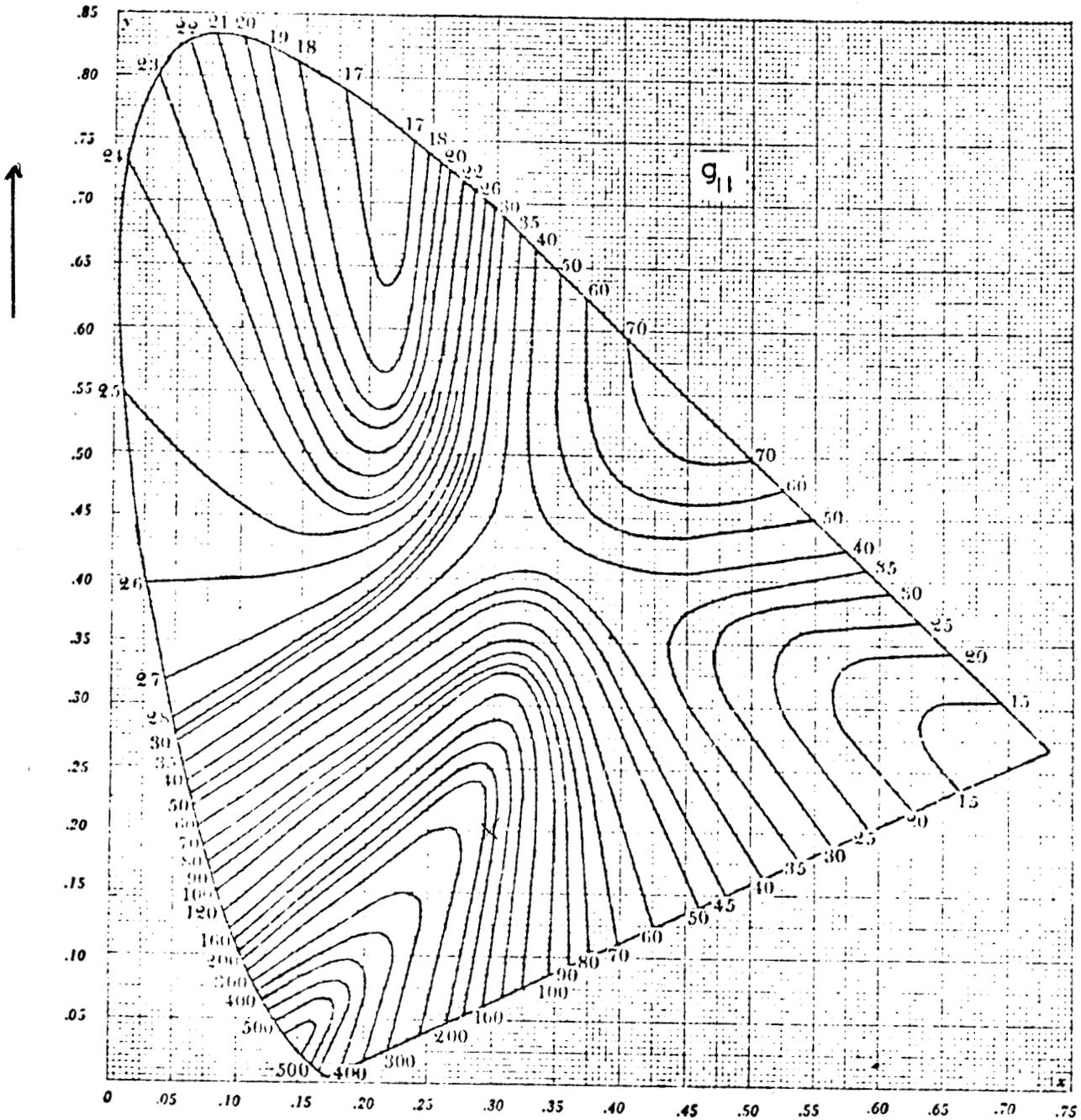


FIGURE - 14 -



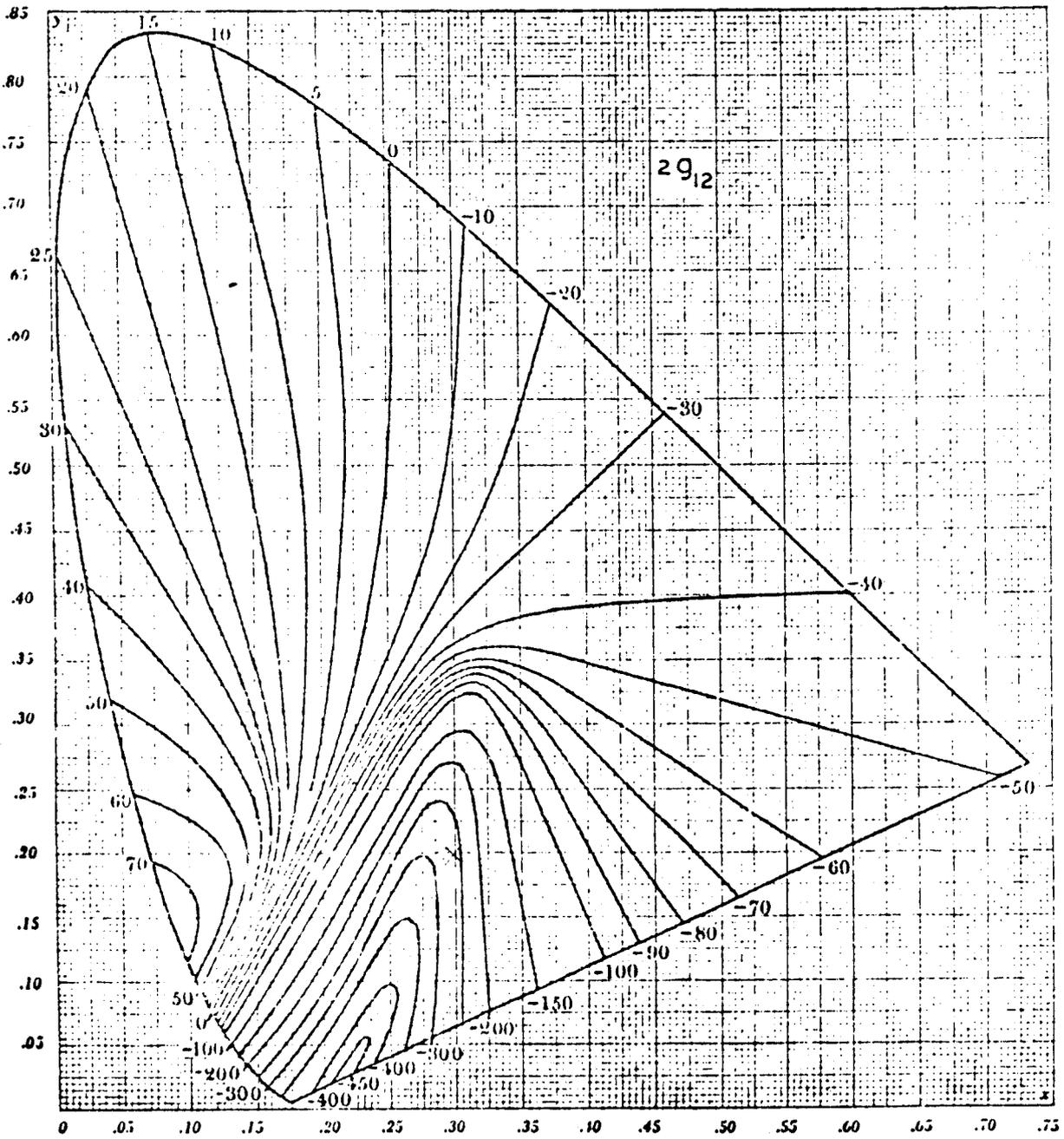


FIGURE - 15 -



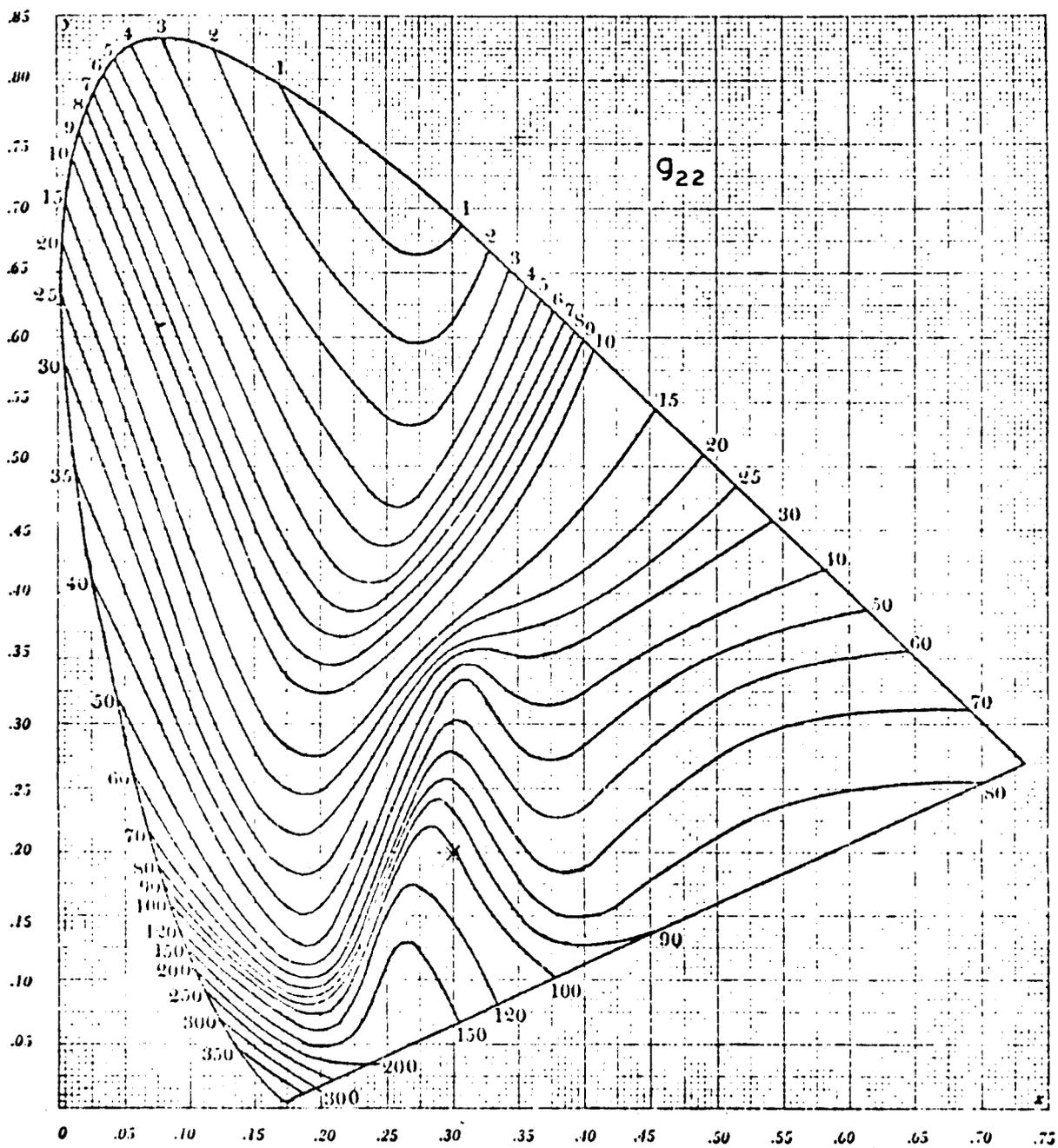


FIGURE - 16 -



Une ellipse peut être construite à partir de ces valeurs, mais la construction de telles ellipses n'est pas nécessaire pour un calcul de différence de chromaticité.

Par ailleurs n'importe quelle différence de chromaticité, par rapport à la déviation standard correspondante à la couleur assortie, sera donnée par :

$$\Delta C^2 = g_{11} dx^2 + 2g_{12} dx dy + g_{22} dy^2 \quad /8/$$

Dans cette définition dx est la différence des coordonnées x représentant les deux chromaticités pour lesquelles la différence est à spécifier, dy est la différence des coordonnées y représentant les chromaticités prises dans le même ordre et les coefficients  $g_{11}$ ,  $2g_{12}$  et  $g_{22}$  sont donnés par les figures 14, 15 et 16 dans la région située entre les deux chromaticités.

#### b) Application de la méthode de Mac Adam

La difficulté pour le calcul d'une différence réside en la connaissance des paramètres de l'ellipse en fonction de l'origine considérée. C'est pourquoi J.C. Sacré /34/ a proposé une méthode d'interpolation et d'extrapolation locale des mesures dans l'ensemble du plan de chromaticité de la C.I.E. pour le calcul de la différence entre deux chromaticités voisines à partir des caractéristiques connues des 25 ellipses de Mac Adam.

Dans le plan C.I.E., il a tracé 8 diagrammes représentant les courbes de niveau de différents paramètres a, b,  $\theta$ ,  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ , R, S. R et S étant respectivement le rapport du grand axe sur le petit axe et la surface de l'ellipse.

Ainsi,

$\forall M(x,y) \in \text{plan C.I.E.}, \exists$  une proposition de solution définie par

$$P(x,y) = (a,b,\theta, g_{11},g_{12},g_{22},R,S) \quad /9/$$

Aux propositions P réduites à :

- a, b, et  $\theta$
- $g_{11}, g_{12}$  et  $g_{22}$
- R et S

correspondent respectivement 3 vecteurs  $V_i, V_j$  et  $V_k$

Les propositions P,  $V_i, V_j$  et  $V_k$  correspondantes au point M (x,y) sont généralement différentes. Leur comparaison fournit les indications pour l'élaboration d'une nouvelle proposition.

Un programme sur calculateur permet de réitérer l'opération jusqu'à l'obtention de l'égalité entre les vecteurs P,  $V_i, V_j$  et  $V_k$ .

Les caractéristiques de l'ellipse correspondant au coloris type ainsi déterminées, définissent le seuil de perceptibilité différentiel pris conventionnellement comme unité d'écart.

L'application de la formule /8/ à un coloris contre-type très proche du coloris type chiffre l'écart en chromaticité entre les deux éléments. Cet écart est exprimé en unité U.M.A. (Unité Mac Adam).

Mais l'écart en chromaticité n'établit pas une comparaison suffisante entre deux coloris, l'un peut être en effet plus clair, tandis que l'autre sera plus foncé.

Un modèle d'écart en luminosité exprimé également en U.M.A. sera donc ajouté à l'écart en chromaticité. Il est donné par la relation /10/

$$\Delta L = 69 \log_e \frac{Y_0 + 8,3}{Y_1 + 8,3} \quad /10/$$

où  $Y_0$  et  $Y_1$  sont respectivement la luminosité du type et du contre-type. L'écart total  $\Delta T$  est calculé par :

$$\Delta T = (\Delta C^2 + \Delta L^2)^{1/2} \quad /11/$$

Il correspond théoriquement au nombre minimum de nuances justes discernables l'une de l'autre que l'on peut intercaler entre les coloris à comparer. Cette quantité constitue un élément capital pour juger de la conformité d'une reproduction, c'est-à-dire pour juger de l'acceptabilité ou le rejet d'une teinture que l'on a reproduite.

L'exploitation de cette méthode nécessite obligatoirement l'usage d'un calculateur numérique. Le calcul étant fait à la base d'un nombre important de données qui devront être stockées.

c) Système  $L^*, a^*, b^*$  C.I.E. 1976

Les moyens informatiques dont on dispose ne nous ont pas permis d'associer le programme du système précédent au programme de calcul des composantes de la couleur, calcul de recette pour l'ajout des colorants (voir chapitre V) plus autres calculs annexes.

Cependant, nous avons associé un programme d'un espace recommandé par la C.I.E. pour l'identification, l'analyse et le calcul de la différence de couleur. Cet espace chromatique approximativement uniforme est une version simplifiée de l'espace d'Adams-Nickerson.

Une couleur est caractérisée par 3 grandeurs  $L^*, a^*, b^*$  portées en coordonnées rectangulaires (fig. 17) et qui sont définies par :

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad \text{clarté psychométrique}$$

$$a^* = 500 \left[ (X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3} \right] \quad \text{]chroma}$$

$$b^* = 200 \left[ (Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3} \right]$$

$a^*$  : axe des couleurs rouge (a positif), vert (a négatif)

$b^*$  : axe des couleurs jaune (b " ), bleu (b " )

$X_n, Y_n, Z_n$  : composantes trichromatiques d'une couleur de surface choisie comme stimulus blanc nominal.

Les relations ne donnent une bonne approximation de l'espacement uniforme des couleurs que si les rapports  $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n$  sont supérieurs à 0,01.

Il est intéressant d'exprimer les résultats de l'espacement uniforme des couleurs ou des différences de couleurs en fonction de leur correspondant - clarté, "chroma" perçu et teinte.

Le système CIELAB en définit 3 fonctions :

α) Clarté psychométrique C.I.E. 1976

Définie par la relation

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

La luminosité d'une surface est évaluée par rapport à la luminosité d'un objet blanc éclairé de la même façon.

$L^*$  est donc le correspondant psychométrique du concept de clarté. L'écart en luminance  $\Delta L^*$  constitue un élément précieux de comparaison. En effet, selon le signe de  $\Delta L^*$  nous pouvons spécifier la couleur par les qualificatifs : clair ou foncé.

Par exemple un contre-type peut être plus clair ou plus foncé que le coloris type.

β) "Chroma" perçu C.I.E. 1976

C'est la grandeur définie par la relation

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

L'écart en chroma donne une valeur quantitative chromatique relative à la saturation et qui constitue un élément supplémentaire pour une comparaison.

γ) Angle de teinte a,b C.I.E. 1976

C'est le correspondant psychométrique du concept de teinte. Il est défini par :

$0^\circ < h_{ab} < 90^\circ$	si $b > 0$ , $a > 0$
$90^\circ < h_{ab} < 180^\circ$	si $b > 0$ , $a < 0$
$180^\circ < h_{ab} < 270^\circ$	si $b < 0$ , $a > 0$
$270^\circ < h_{ab} < 360^\circ$	si $b < 0$ , $a < 0$

Les spécifications des couleurs étant élaborées, il est nécessaire de définir une formulation de différence de couleur pour l'évaluation de la distance séparant deux points de l'espace  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .

La différence entre deux couleurs est calculée par

$$\Delta E_{ab}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}$$

L'établissement de la différence de couleurs  $\Delta E_{ab}^*$  pour prédire la grandeur de la différence de couleur est d'un grand intérêt pour les applications industrielles, particulièrement en ce qui concerne le contrôle de conformité d'une reproduction.

$\Delta E_{ab}^*$  est exprimé en unités  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .

20 unités  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , correspondent à la différence qui existe entre l'eau pure et la liqueur de platine cobalt 100 mg.

Considérons deux points (T) et (CT) dans l'espace CIELAB représentant respectivement le coloris-type et le coloris contre-type

Chacun des deux points est défini par

$$T \begin{vmatrix} L_0^* \\ a_0^* \\ b_0^* \end{vmatrix} \quad CT \begin{vmatrix} L_1^* \\ a_1^* \\ b_1^* \end{vmatrix}$$

Si nous appelons  $\Delta L^* = L_0^* - L_1^*$  : différence de luminance

$\Delta A = a_0^* - a_1^*$  } différence de chromaticité.

$\Delta B = b_0^* - b_1^*$

Nous pouvons, dans le but d'une estimation d'écart par rapport au coloris type, qualifier le contre-type à l'aide de l'organigramme (figure 18)

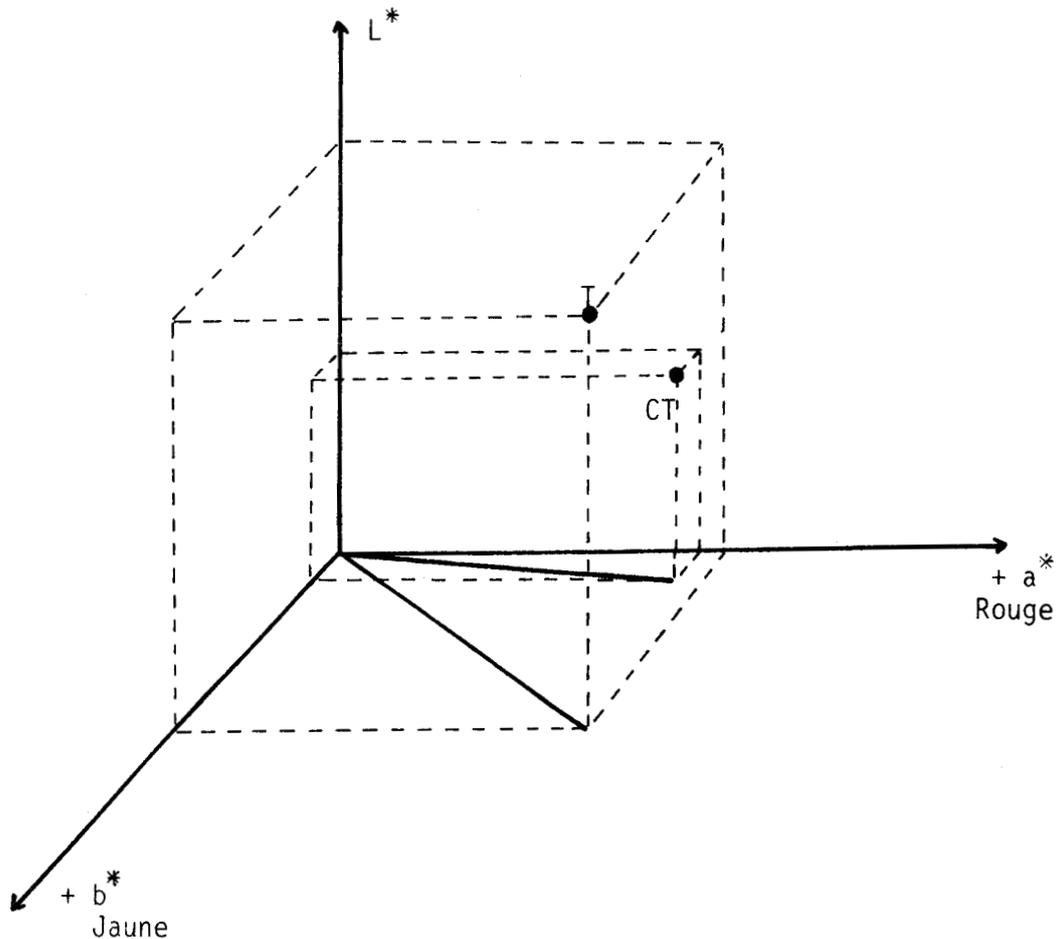


FIGURE - 17 -

Représentation dans l'espace CIELAB.

La comparaison du contre-type est relative à la position du coloris type qui est en fait la référence.

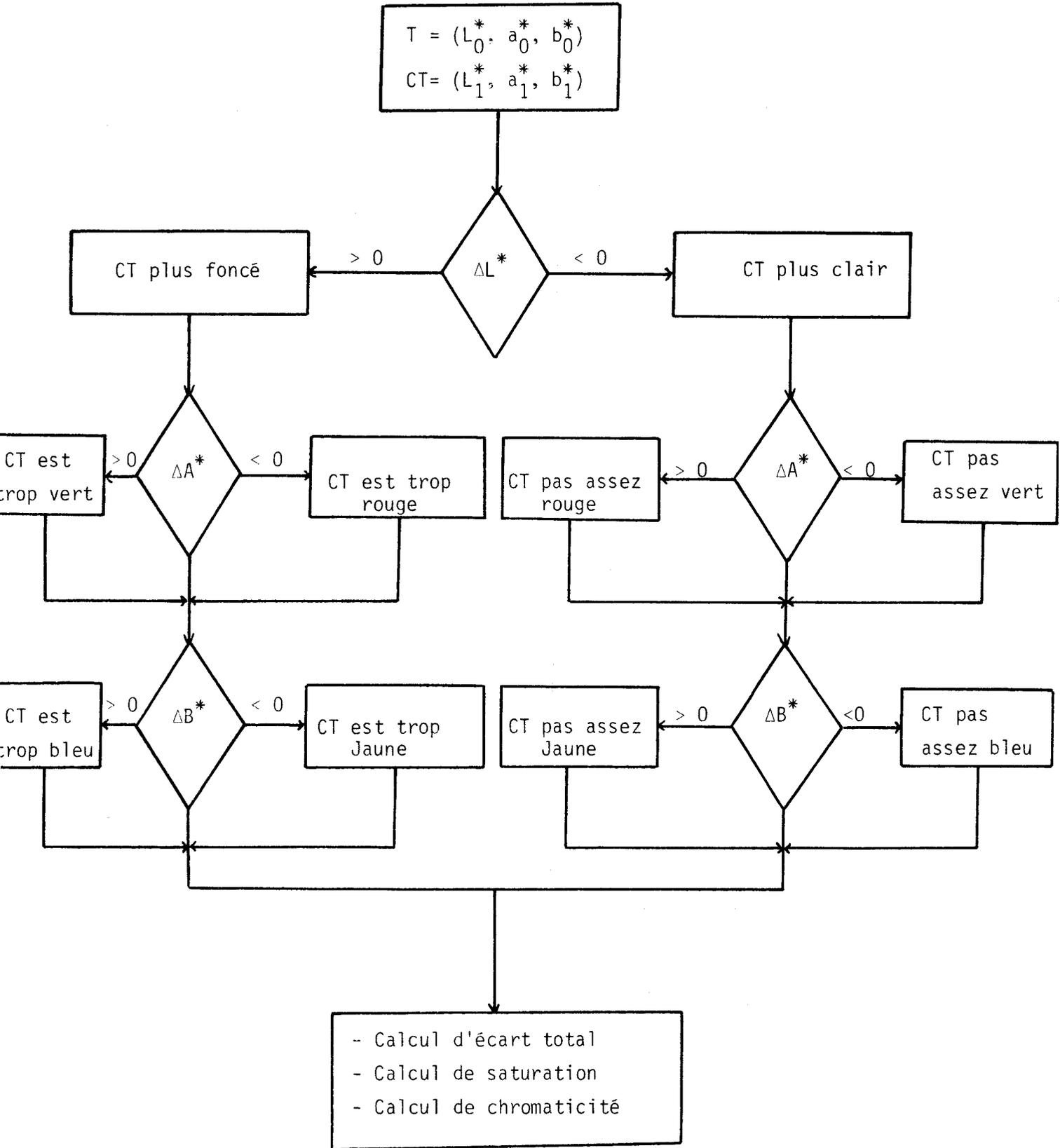


FIGURE - 18 -  
Comparaison de deux couleurs.



Suivant le signe de  $\Delta L^*$  le contre-type peut-être plus foncé ou plus clair.

Si le contre-type est plus foncé, tout en ayant les mêmes coordonnées chromatiques, cela représente un dépassement de nuance. On peut dire que la reproduction est ratée.

Par contre, si le contre-type est plus clair, il aura des qualificatifs "pas assez". Par conséquent, il est susceptible d'être amélioré par une nouvelle teinture.

Cette méthode qualifie l'écart de différence de nuance, mais ne peut en aucun cas le corriger.

#### 1-4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrit les principes fondamentaux de la colorimétrie classiques. Nous n'avons pas fait état et nous n'avons pas insisté dans cette partie sur les nombreux travaux réalisés dans ce domaine très délicat qui est la colorimétrie. Nul n'ignore qu'en jugeant d'une impression colorée, on a affaire à un problème d'optique physiologique dont le résultat dépendra, nécessairement, de toutes sortes de propriétés de l'organe visuel propre à chaque humain et de l'environnement de l'objet à observer.

Il est à signaler que la plupart des problèmes colorimétriques se situant à la limite de deux sciences, d'une part la physique, d'autre part la physiologie et quelquefois la psychologie, présentent une certaine difficulté : quant à leurs applications pratiques, elles s'avèrent difficiles.

Néanmoins, compte-tenu des techniques de teinture et des connaissances actuelles en colorimétrie, nous avons essayé d'appliquer la colorimétrie à l'industrie textile. Nous avons porté notre intérêt sur la vraie grandeur caractérisant la couleur des objets, à savoir leurs courbes spectrales de réémission  $\beta(\lambda)$ .

Le chapitre suivant décrira justement le capteur colorimétrique pour la mesure des facteurs spectraux de réémission. Ensuite, des lois de transformation traiteront ces grandeurs pour leur insertion dans la chaîne de régulation.

- B I B L I O G R A P H I E -

- 
- /1/ K. NASSAU  
"Pour la science" - Edition française de Scientific American -  
N° 38 - 1980.
- /2/ M. HENRY  
"Les réseaux colorés". - La Recherche n°118.1.1981
- /3/ J. BERGNANS  
"La vision des couleurs"  
Bibliothèque Technique Philips
- /4/ P. LANTHONY  
"Vision de couleurs"
- /5/ J. TERRIEN  
"Techniques de l'Ingénieur" - R 3340.
- /6/ A. KONIG, C. DIETERILI  
"Die gundempfindinger und ubre intensitäts verteilung in spektrum"  
Phys. Math Kl 29.805 (1886).
- /7/ W. ABNEY  
"Researches in colour vision and the trichromatic theory"  
London 1913 -- Longmand Green
- /8/ H.E. IVES  
"The transformation of color mixture equation from one system to  
another I"  
J. Frankl. Inst. 180, 673 (1915).
- /9/ D.B. JUDD  
"The 1931 ICI Standard observer and coordinate system for colorimetry"  
J. Opt. Soc. Amer. - 23. 259 (1933).
- /10/ J. GUILD  
"The colorimetric properties of the spectrum"  
Phil. Trans. Roy. Soc. 230-149 (1931/32)
- /11/ W.D. WRIGHT  
"A redetermination of the trichromatic coefficient of the spectral  
colors"  
Trans. Opt. Soc. - 30-141 (1928/29)

- /12/ *Recommandation de la C.I.E. (1979)*
- /13/ A. BERGER, A. BROCKES  
*Bayer Farben Revue.*
- /14/ P.J. BOUNA  
*"Les couleurs et leur perception visuelle"*  
DUNOD - 1949.
- /15/ D.B. JUDD  
*"Estimation of Chromaticity difference"*  
*J. Research Natl. Bur. Std. 17 - 1936.*
- /16/ W.D. WRIGHT  
*The sensitivity of the eye to small colour differences*  
*Proc. Phylo.Soc. London 53,93, 1941.*
- /17/ D.L. Mac ADAM  
*"Visual sensitivities to color differences in daylight"*  
*J. Got. Soc. Ame. 32, 247, 1942.*
- /18/ D. NICKERSON  
*"The specification of color differences"*  
*Textile Research 6 - 1936.*
- /19/ I.A. BALINKIN  
*"Measurement and designation of small color differences"*  
*Am. Ceram Soc. Bull. 20 - 1941.*
- /20/ I.H. GODLOVE  
*"Improved color diffence formula, with applications to the perceptibility and acceptability of fadings"*  
*J. Opt. Soc. Am. 41 - 1951*
- /21/ E.Q. ADAMS  
*"X-Z planes in the 1931 I C I System of colorimetry"*  
*J. Opt. Soc. Am. 41 - 1951.*
- /22/ D.B. JUDD  
*"Specificalion of uniform color tolerances for textiles"*  
*Textile Research 9 - 1939.*
- /23/ - /24/ P.S. HUNTER  
*"Photoelectric tristimulus colorimetry with three filters"*  
*Natl. Bur. Std Circ. - 1942.*  
*"Photoelectric color difference Meter"*  
*J. Opt. Soc. Am. 38 - 1948.*
- /25/ F. SCOFIELD  
*"A method for determination of color differences"*  
*Natl. Paint. Varnish Lacquer Assoc. Sce. Circ. - 1943.*

- /26/ G. WYSZECKI  
*Congrès de la C.I.E. - Vienne 1963.*
- /27/ MUNSELL COLOR COMPANY - 2441.
- /28/ H.R. DAVIDSON  
*"Visual sensitivity to surface color differences"*  
*J. Opt. Soc. Am. 41 - 1951.*
- /29/ J. PERRY  
*"The objective measurement of color"*  
*J. Sci. Instr. 15 - 1938.*
- /30/ H.R. DAVIDSON et E. FRIEDE  
*J. Opt. Soc. Amer. 43 - 1953.*
- /31/ H.R. DAVIDSON et J.J. HANLON  
*J. Opt. Soc. Amer. 45 - 1955.*
- /32/ D.L. Mac ADAM  
*Specification of small chromaticity Differences*  
*J. Opt. Soc. Amer. 33 - 1943.*
- /33/ L. SILBERSTEIN  
*"Investigations on the intrinsic properties of the color domain"*  
*J. Opt. Soc. Amer. 33 - 1943.*
- /34/ J.C. SACRE  
*"Contribution of control of an industrial textile dyeing plant"*  
*Intern. Conf. Syst. Eng. Coventry - England - 1980.*

# CHAPITRE II

## ACQUISITION DE DONNÉES

### LOI DE CORRESPONDANCE MOUILLÉ-SEC

II-1 INTRODUCTION.....	II-1
II-2 REALISATION D'UN CAPTEUR COLORIMETRIQUE A DISTANCE.....	II-1
II-2.1. Adaptation de la sonde sur le spectrophotomètre....	II-3
a) Connexion côté source lumineuse.....	II-4
b) Connexion côté cellule photoélectrique.....	II-5
c) Tête de mesure.....	II-7
II-2.2. Implantation de la sonde.....	II-9
a) Choix du vecteur de correction.....	II-10
b) Eclairage de l'objet.....	II-10
c) Observation de l'échantillon.....	II-12
II-2.3. Mesure par le capteur colorimétrique.....	II-14
A) Expérimentation sur des tuiles en céramique.....	II-14
a) Technique de mesure.....	II-14
b) Calcul d'erreur.....	II-15
c) Calcul d'écart colorimétrique.....	II-16
B) Application à la mesure du textile sec.....	II-22
II-3 MESURE SUR TEXTILE MOUILLE.....	II-24
II-3.1. Recherche du modèle mathématique de transposition mouillé-sec.....	II-26
a) Méthode d'identification.....	II-30
b) Loi de correspondance mouillé-sec.....	II-31

II-3.2. Expérimentation de la loi de correspondance.....	II-37
a) Résultats.....	II-37
b) Remarques.....	II-37
II-4 CONCLUSION.....	II-37
BIBLIOGRAPHIE.....	II-39

II-1 INTRODUCTION

Jusqu'à présent le contrôle d'une reproduction se fait par découpe d'un échantillon de la pièce, puis analyse de ce dernier dans un laboratoire par colorimétrie de surface sèche. Cette opération est longue et coûteuse.

Un contrôle, par le biais d'informations prises directement et à distance sur la pièce, permet d'éviter la découpe et d'analyser rapidement l'échantillon.

Cette technique, appliquée lors d'une reproduction d'un coloris type sur textile mouillé, évite la découpe, le rinçage et le séchage et permet un contrôle rapide de conformité.

A cette fin une étude a été menée :

1°) Pour l'acquisition et le transfert d'informations colorées jusqu'à l'unité d'analyse et de traitement : la réalisation et l'adaptation d'une sonde colorimétrique à un spectrophotomètre de laboratoire font l'objet de la première partie.

2°) Pour la prédiction de la couleur sèche à partir d'informations prélevées sur textile mouillé : la recherche d'une loi de correspondance mouillé-sec fera l'objet de la deuxième partie.

La méthode développée nécessite l'utilisation d'un micro-ordinateur, destiné à corriger et à transposer en sec les mesures prises par l'intermédiaire du câble de fibres optiques.

II-2 REALISATION D'UN CAPTEUR COLORIMETRIQUE A DISTANCE /1/

La fragilité et le mode de présentation des échantillons ne permettent pas l'utilisation directe d'un spectrophotomètre dans un atelier de teinture. Les éléments constituant un spectrophotomètre, comme par exemple les filtres et les différents miroirs seront

affectés par les différentes vapeurs dégagées lors des teintures, par les vibrations, l'humidité et les changements de températures. En effet, il suffit d'un dépôt de poussière ou d'une légère altération d'un miroir pour faire fausser la mesure de la couleur de l'objet.

L'une des techniques permettant d'intervenir dans un atelier pour la prise d'informations colorimétriques, consiste en la réalisation d'une sonde de lumière et à son adaptation sur un spectrophotomètre.

Le capteur colorimétrique, composé de plusieurs fibres optiques (voir Annexe I - caractéristiques) assurera une double tâche : premièrement la transmission de l'énergie lumineuse étalon jusqu'à l'objet à mesurer et deuxièmement le retour des rayonnements réémis par l'objet pour les transmettre sur la voie d'analyse du spectrophotomètre - figure 2.1. Le spectrophotomètre placé ainsi à distance et à l'abri d'un milieu perturbé, analysera les informations colorées transmises par l'intermédiaire de la sonde optique.

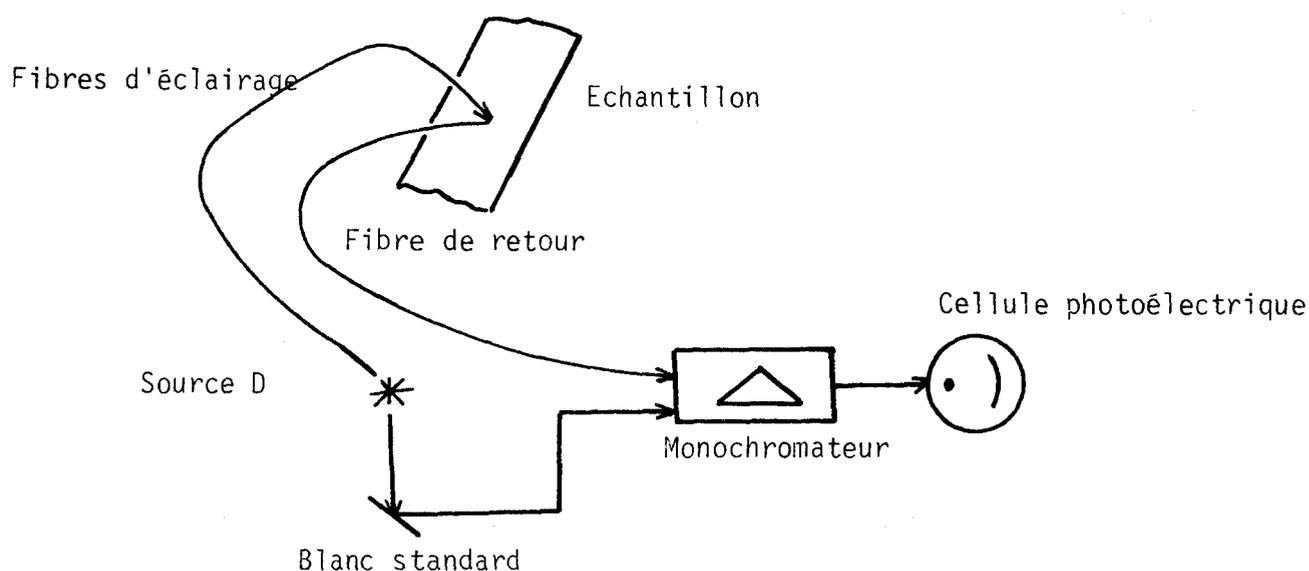


FIGURE - 2.1. - Mesure par sonde optique.

Cependant, pour l'acquisition des données, la difficulté réside dans le couplage des entrées-sorties du câble à fibres optiques, constituant la sonde avec les terminaux du spectrophotomètre qui n'est pas conçu pour une telle application.

### II-2.1. Adaptation de la sonde sur le spectrophotomètre

Dans le but d'améliorer le rendement énergétique, nous cherchons à réduire, au maximum, les pertes dans les raccordements de câble aux modules d'émission et de réception.

Les causes de pertes dans un raccordement peuvent avoir plusieurs origines :

- l'éloignement : les deux surfaces, terminal et fibres sont parallèles, leurs axes coïncident, mais ils sont séparés. Dans ce cas, la perte suit une courbe sensiblement parabolique en fonction de l'éloignement.

- le déplacement axial : les surfaces sont parallèles, mais un glissement latéral provoque une diminution de la surface de transmission. Dans ce cas, la perte varie d'une façon non linéaire.

- le déplacement angulaire : les deux axes font un angle par rapport à l'axe de coïncidence optimal. Dans la plupart des cas, et compte-tenu de l'ouverture numérique des fibres optiques, la perte croît comme le carré de l'incidence angulaire, ce, avec un maximum très rapidement atteint dès le moment où le défaut d'alignement dépasse 22 grades.

Toutefois, pour l'élimination aussi complète que possible des pertes dues aux couplages, nous avons été amenés à considérer :

- *le faisceau de lumière pénétrant dans les fibres pour l'éclairage de l'objet,*
- *les rayons tombants sur l'objet à analyser,*
- *et enfin le faisceau des rayons réémis par l'objet, collecté par la fibre centrale de retour pour être envoyé sur la voie de mesure.*

A cette fin, nous avons conçu et réalisé des supports mécaniques, adaptables aux appareils à connecter.

Ces supports sont ajustables et présentent plusieurs degrés de liberté.

a) Connexion côté source :

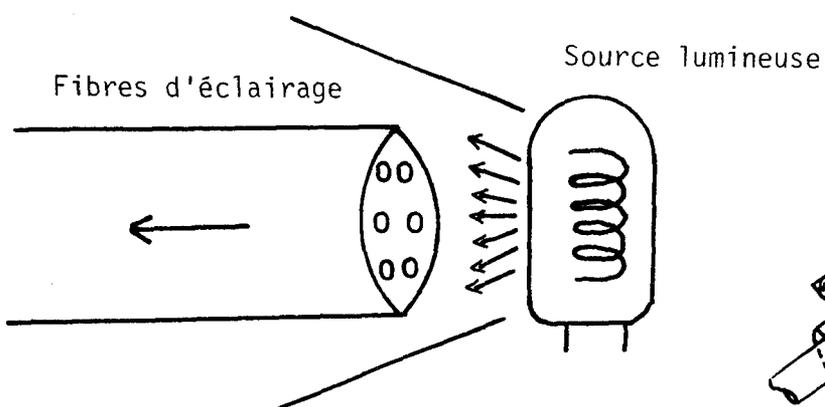


FIGURE - 2.2. -  
Embout côté source.

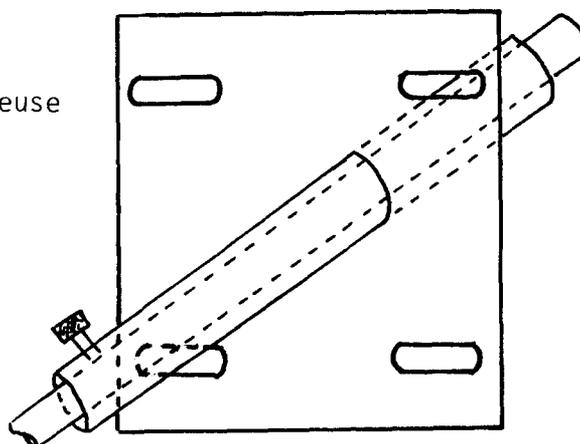


FIGURE - 2.3. -  
Support des fibres d'éclairage.

Le filament de la lampe du spectrophotomètre se présente en serpentín sous une forme rectangulaire. En tenant compte de la forme du filament, les 6 fibres d'éclairage ont été insérées dans un embout cylindrique en acier. Elles ont été disposées de manière à couvrir l'ensemble du filament (figure 2.2.).

Le support dans lequel vient se loger cet embout du câble est fixé sur le carter de la source. Quatre vis fixées sur le support, permettent à ce dernier un déplacement latéral et transversal par rapport à la normale à la surface du filament. Ces quatre vis ajustent l'axe de l'embout du câble à la source de lumière.

Le positionnement en profondeur, donc le réglage de l'éloignement de la face de l'embout à la source, se fait par simple glissement du câble dans le tube du support (figure 2.3.).

Ce support permet de corriger l'angle d'incidence du faisceau de lumière. Par conséquent, il assure le transport du maximum de rayonnement émis par la source. Cela entraîne un gain en énergie lumineuse.

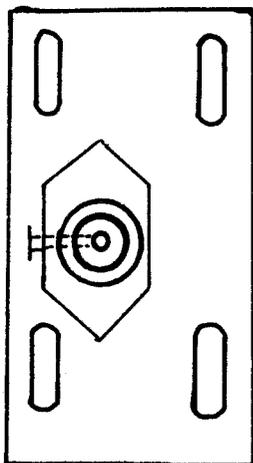
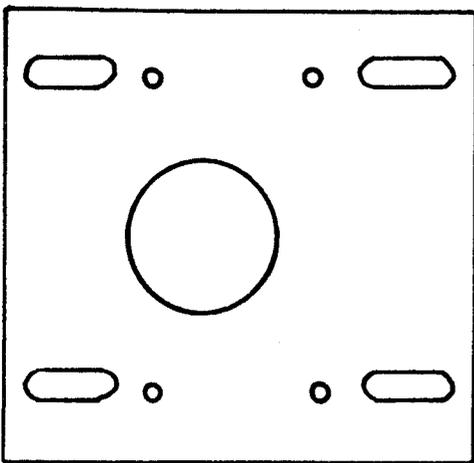
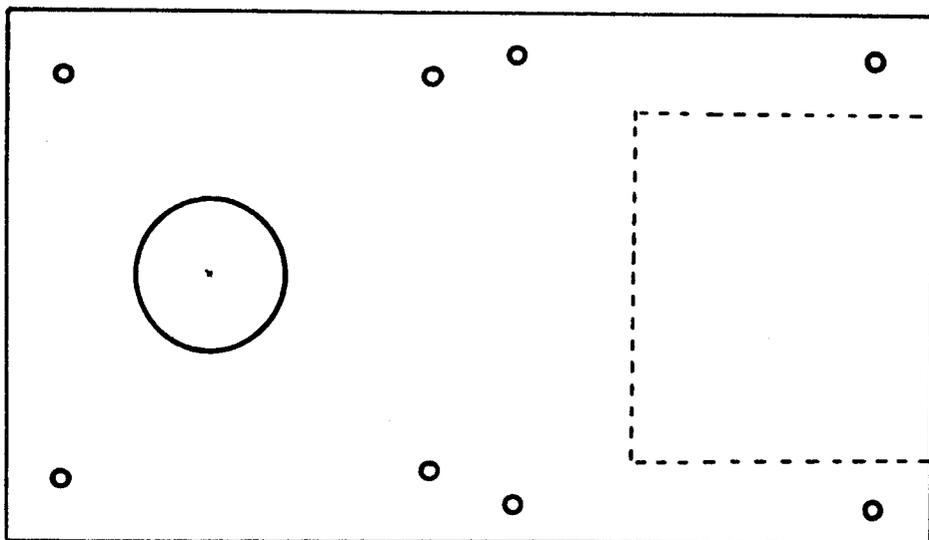
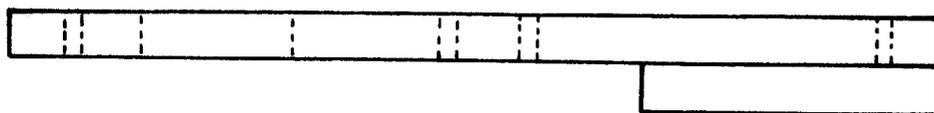
b) Connexion côté cellule photoélectrique :

La conception du spectrophotomètre LERES, côté différentiel, présente un porte échantillon muni d'une fenêtre à travers laquelle l'échantillon est analysé. Par un jeu de miroirs orientables, les rayons réfléchis d'une part par le standard, d'autre part par l'échantillon passent tous les deux à travers la fente du monochromateur et convergent vers la cellule photoélectrique. Ceci est dans le cas d'une mesure directe.

Dans le cas d'une mesure par fibres optiques, le porte échantillon est remplacé par un support dans lequel vient se loger la fibre collectrice des rayons réémis par l'objet.

La voie des rayonnements étalons reste inchangée . Par contre, celle de la mesure a été modifiée du fait que les rayonnements arrivent par voie optique. Par conséquent, le câble à fibres optiques supprime le premier jeu de miroirs du spectrophotomètre et entraîne un changement du mode d'observation des échantillons.

Cependant l'accès à la fente du monochromateur est très difficile et faire ajuster le faisceau de lumière, issu de la fibre de retour, sur la fente du monochromateur, nécessite la conception d'un mécanisme à 5 degrés de liberté (figure 2.4.).



BUS  
LILLE

( c )

( b )

( a )

FIGURE - 2.4. -

Support côté cellule de mesure.

L'élément b de la figure 2.4. se place sur l'élément a. Les rainures faites sur l'élément b permettent à ce dernier un déplacement longitudinal.

L'élément c lui va se placer sur b. Il aura, selon le même principe que b, un déplacement latéral.

Le déplacement angulaire par rapport aux deux axes de l'élément a est obtenu par l'insertion d'un ressort entre les pièces c et b.

La fibre de retour positionnée sur la pièce c passe à travers b et a. Le réglage de l'éloignement de la face de la fibre, par rapport à l'objectif, se fait par simple pénétration de la fibre.

Il est à noter que l'ajustement de la fibre est rendu difficile par les contraintes qu'impose la conception du spectrophotomètre. A la position optimale, il suffit de faire varier d'un degré l'angle de la fibre par rapport à son axe, pour faire chuter la mesure de 60 %.

Avec ce support à 5 degrés de liberté, il nous est possible de faire un bon réglage, par conséquent de réduire au mieux les pertes dues aux raccordements.

#### c) Tête de mesure :

La couleur d'un objet ou d'un textile peut paraître différente selon l'incidence sous laquelle elle est considérée. Il est possible de modifier l'impression colorée produite, tout en gardant constante la répartition spectrale relative, mais en modifiant la quantité de lumière qui atteint l'oeil. Par conséquent, la valeur de la mesure des coefficients de réémission est largement dépendante de l'angle d'incidence de la lumière et de l'angle d'observation des rayonnements réémis par la surface à mesurer.

Cela s'explique en effet par la définition même du facteur de réémission (voir chapitre Colorimétrie).

Sachant que la luminance des rayons réémis par le blanc standard reste constante, le facteur de réémission ne peut varier que proportionnellement à la luminance des rayons réémis par l'objet.

Toutefois, il y a un phénomène de brillance qui intervient, ce phénomène dépend de l'angle d'éclairage et d'observation et peut, par conséquent fausser la mesure. Pour se rapprocher des conditions d'échantillonnage visuel, il faut éliminer la brillance sinon la réduire autant que possible par la recherche d'un dispositif à adapter à la tête de la mesure (figure 2.5.).

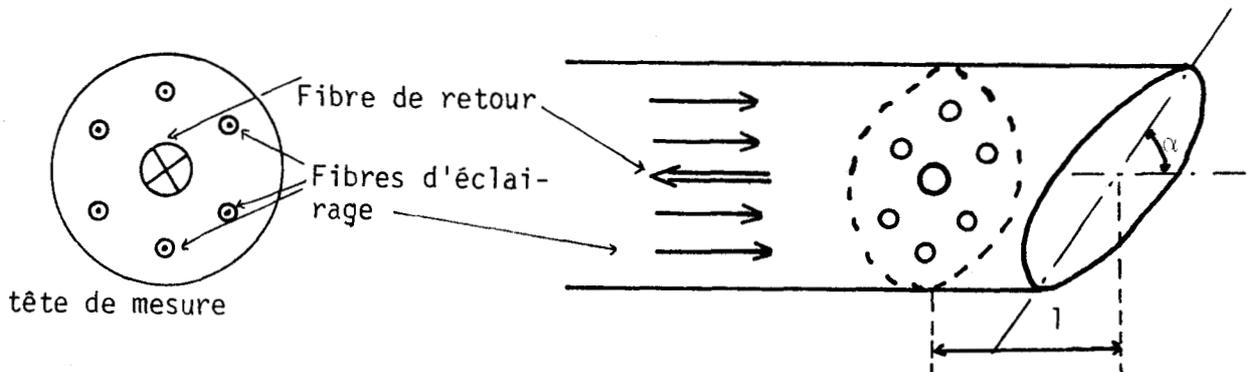


FIGURE - 2.5. -

Tête de mesure.

FIGURE - 2.6. -

Embout tête de mesure.

L'expérimentation d'une série de tubes biseautés d'angles différents (figure 2.6.) ajustables en longueur et qui viennent se fixer sur l'embout de fibres optiques, côté prise de mesure, nous a montré les phénomènes suivants :

1°) La brillance et la réémission diminuent avec l'augmentation de l'angle  $\alpha$ . Cependant la brillance diminue plus rapidement que la réémission et tend à s'annuler (figure 2.7.).

2°) La variation de la longueur  $l$  entraîne une modification de la mesure. Cela est dû principalement au rendement d'énergie lumineuse figure 2.8.

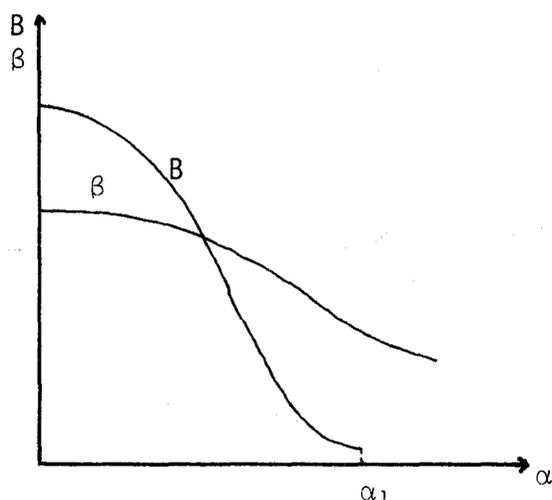


FIGURE - 2.7.

Brillance  $B$  et réémission  $\beta$   
en fonction de  $\alpha$

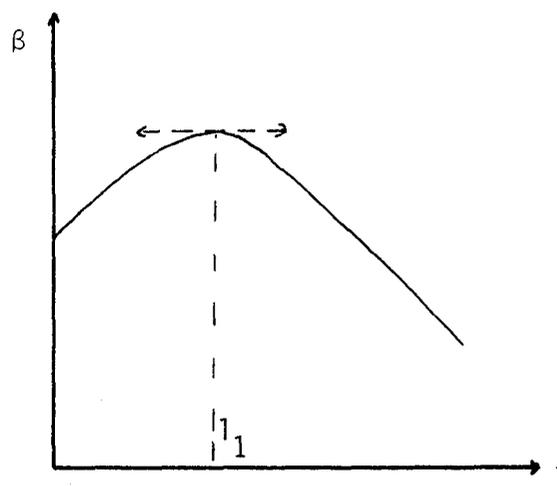


FIGURE -2.8. -

Réémission  $\beta$  en fonction de  $l$

La détermination des caractéristiques optimales  $\alpha_1$  et  $l_1$  a été faite à la suite d'une étude comparative entre les mesures réelles des tuiles grise et marron servant à l'étalonnage du spectrophotomètre et les mesures faites par l'intermédiaire du capteur optique. Une expérimentation sur 10 tuiles étalons en céramique s'en est suivie pour la mise au point du capteur colorimétrique.

### II-2.2. Implantation de la sonde

L'introduction de la sonde en fibre optique dans la chaîne de mesure modifie l'éclairage et l'observation des échantillons. Par conséquent, les résultats obtenus, dépendant de ces conditions, ne reflètent pas totalement la perception visuelle des couleurs.

a) choix du vecteur de correction

L'emploi du capteur a nécessité l'établissement d'un vecteur pour la correction des mesures, afin de retrouver les valeurs réelles de tout objet mesuré directement par le spectrophotomètre.

$$V_c(\lambda) = \frac{\beta_{rg}(\lambda)}{\beta_{fg}(\lambda)}$$

avec  $\beta_{rg}(\lambda)$  : taux de réémission de la tuile grise de référence servant comme base pour l'étalonnage du 100 % du spectrophotomètre. Ils sont constants.

$\beta_{fg}(\lambda)$  : taux de réémission de la même tuile, mais mesurés par l'intermédiaire du capteur.

Le vecteur  $V_c$  défini en 16 points n'est pas constant. Il dépend de :

- L'étalonnage de l'appareil de mesure
- La connexion de la sonde
- L'éclairement et l'observation de l'objet.

b) Eclairage de l'objet :

Nous avons vu précédemment que la mesure de la couleur d'un corps dépend de la composition de la lumière qui éclaire en même temps le blanc standard et l'objet. L'introduction du câble optique entraîne une atténuation de l'énergie transmise, mais également une modification spectrale de l'objet. Suite à l'atténuation, les mesures obtenues sont considérablement réduites dans les couleurs claires et difficilement exploitables pour les couleurs foncées.

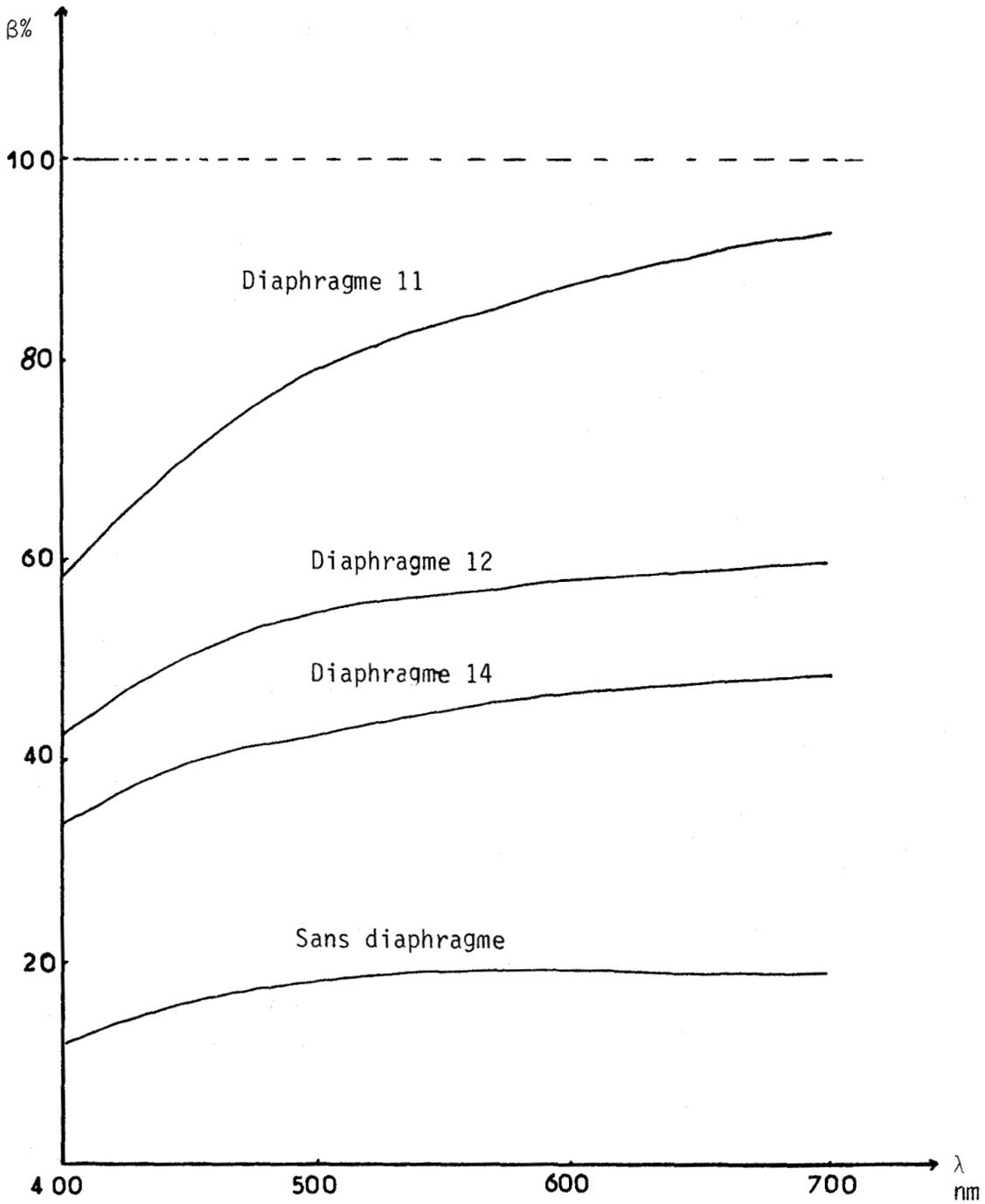


FIGURE - 2.9. -



La mesure d'un objet étant définie par comparaison avec les rayonnements du blanc standard, nous avons agi sur ces derniers pour augmenter les mesures, donc pour mieux les exploiter. L'emploi d'un diaphragme entre la source de lumière et le blanc standard réduit la lumière incidente ce qui entraîne une augmentation du taux de réémission des objets.

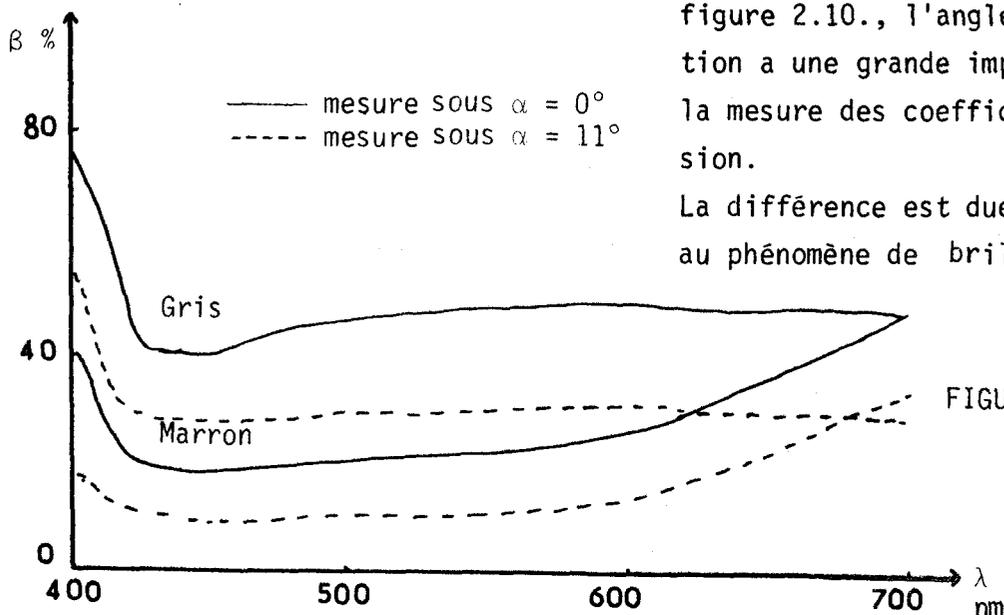
#### - Choix d'un diaphragme

Pour le choix d'un diaphragme une série de mesures a été faite sur le blanc standard de courbe de réémission connue (100 % de réémission sur tout le spectre visible). Il a été mesuré par l'intermédiaire du capteur avec plusieurs diaphragmes de différents diamètres.

Le résultat obtenu avec un diaphragme de 12 mm de diamètre est le plus satisfaisant, quoique le spectre du blanc ait subi une légère modification du côté du bleu. Des essais avec des diaphragmes de diamètre supérieur à 12 mm donnent des taux de réémission insuffisants, par contre les diaphragmes de diamètres inférieurs à 12 mm modifient considérablement le spectre.

Sur la figure 2.9. sont représentées les courbes de réémission du blanc standard mesuré sans diaphragme, puis avec des diaphragmes de diamètre 14 mm, 12 mm et 11 mm.

#### c) observation de l'échantillon :



Comme nous le constatons sur la figure 2.10., l'angle  $\alpha$  d'observation a une grande importance dans la mesure des coefficients de réémission.

La différence est due principalement au phénomène de brillance.

FIGURE - 2.10. -

- Détermination de l'angle  $\alpha_1$  et de la longueur  $l_1$

L'étalonnage de l'appareil, les différentes connexions, l'éclairage de l'objet étant fixés, il ne reste pour la mise au point du capteur que la détermination de l'angle  $\alpha_1$  et la longueur  $l_1$ . A cette fin, nous avons considéré la tuile marron de référence servant de base pour l'étalonnage de 0 % du spectrophotomètre.

Les rapports des taux de réémission des tuiles marron et grise, mesurés par sonde, sont fonction de  $\alpha$  et de  $l$ . En agissant sur ces deux derniers, nous avons essayé de retrouver, pour chaque longueur d'onde, les rapports correspondants des taux de réémission réels des mêmes tuiles.

$$\left[ \frac{\beta_{rm}(\lambda)}{\beta_{rg}(\lambda)} \right]_{cst} = \left[ \frac{\beta_{fm}(\lambda)}{\beta_{fg}(\lambda)} \right]_{\alpha, l}$$

avec  $\beta_{rm}(\lambda)$  : coefficient de réémission du marron (étalonnage 0 %)

$\beta_{fm}(\lambda)$  : coefficient de réémission du marron par fibres.

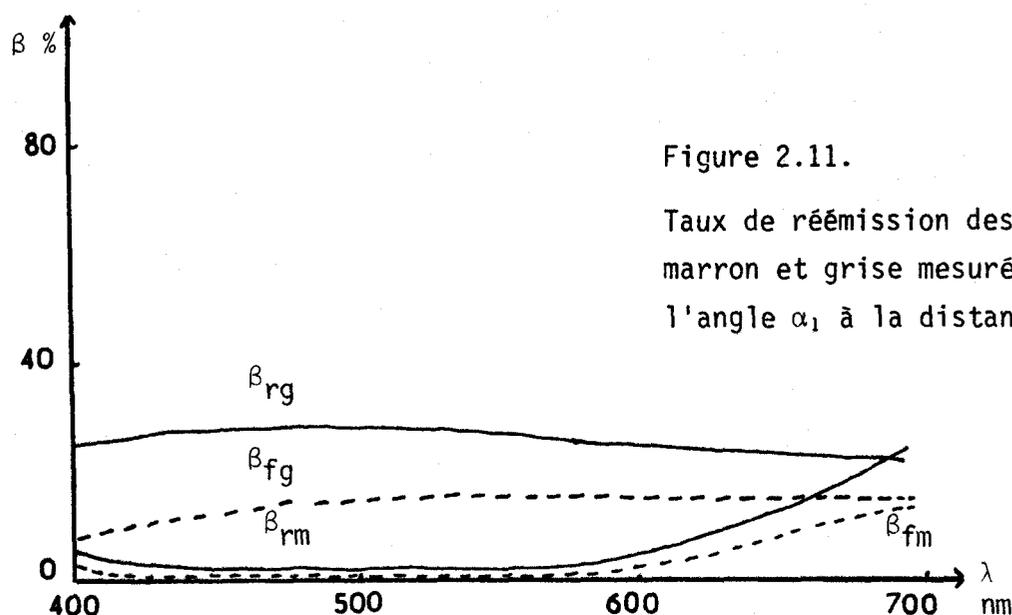


Figure 2.11.

Taux de réémission des tuiles marron et grise mesurées sous l'angle  $\alpha_1$  à la distance  $l_1$

La conception et la réalisation des connexions du câble optique au spectrophotomètre, la mise en place d'un diaphragme et la détermination des caractéristiques de la tête de la mesure, a permis l'implantation de la sonde avec :

- Une minimisation des pertes d'énergie grâce à un bon alignement mécanique
- une augmentation des valeurs des taux de réémission pour une exploitation satisfaisante des mesures
- une élimination des perturbations due à la brillance.

Une série de mesures sur des étalons de coloris divers mesurés directement, puis par l'intermédiaire du capteur colorimétrique permet quelques retouches notamment pour ce qui est de l'alignement mécanique du câble en fibres optiques et pour la justification du bon choix du vecteur de correction  $V_c$ .

### II-2.3. Mesure par le capteur colorimétrique

#### A) Expérimentation sur des tuiles en céramique.

Les tuiles en céramique sur lesquelles va porter la première expérimentation du câble sont de couleurs standards. Elles ont été produites en collaboration avec la "British Ceramic Research Association", la "National Physical Laboratory" et la "Société of Dyes and Colorist". La sélection des couleurs utilisées a suivi une étude approfondie où toutes les hypothèses ont été examinées avec des prototypes de tuiles en céramique de la "National Physical Laboratory".

#### a) Technique de mesure :

Après étalonnage du spectrophotomètre les 10 tuiles sont mesurées directement du côté différentiel. Une fois cette opération terminée, nous plaçons le capteur colorimétrique, nous mettons en place le diaphragme de 12 mm entre la source de lumière et le blanc standard et nous mesurons la tuile de référence grise entre 400 et 700 nm, tous les 20 nm. Les 16 valeurs de  $\beta_{fg}(\lambda)$  serviront pour l'établissement du vecteur de correction  $V_c$ .

Cette technique de mesure est à adopter avant chaque utilisation du capteur colorimétrique.

Enfin, nous procédons à la mesure à distance de l'ensemble des tuiles.

Toutes les mesures à distance seront ainsi corrigées

$$\beta(\lambda) = \frac{\beta_{rg}(\lambda)}{\beta_{fg}(\lambda)} * \beta_f(\lambda)$$

$$\text{Soit : } \beta(\lambda) = V_c(\lambda) * \beta_f(\lambda)$$

avec  $\beta(\lambda)$  : coefficient de réémission corrigé

$\beta_f(\lambda)$  : coefficient de réémission par capteur colorimétrique.

Pour l'estimation de l'erreur commise entre la valeur réelle et la valeur corrigée, nous avons utilisé deux méthodes pratiques de calcul d'écart de nuance, tenant compte des coordonnées trichromatiques. Car un calcul d'erreur quadratique classique ne peut pas estimer une différence de chromaticité entre le même coloris mesuré directement puis mesuré à distance.

#### b) Calcul d'erreur :

L'erreur quadratique moyenne entre les coefficients de réémission des tuiles mesurées directement, puis par l'intermédiaire de la sonde optique est définie par :

$$\xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\beta_i - \beta_{fi})^2$$

N : nombre de couple de mesure

$\beta_i$  : mesures directes

$\beta_{fi}$  : mesures par fibres.

L'erreur trouvée est relativement faible, mais elle n'est pas significative ; elle ne tient compte que de la différence des valeurs point par point. Par contre, et compte-tenu que la mesure d'une couleur se fait en 16 points régulièrement répartis sur le spectre visible, un calcul de l'écart colorimétrique rend bien compte de l'erreur commise sur la conformité du coloris mesuré par câble optique.

c) Calcul d'écart colorimétrique : (Voir chapitre I - colorimétrie pour plus de détails).

Deux méthodes serviront pour évaluer l'écart de nuance.

1) Ecart selon Mac-Adam modifié

Nous appelons  $x_0, y_0, Y_0, x_1, y_1, Y_1$  respectivement les coordonnées du coloris mesuré directement et du même coloris mesuré par capteur .  
Connaissant ces coordonnées, nous leur appliquons la formule de Mac-Adam modifiée pour le calcul d'écart colorimétrique qui est défini comme suit :

Ecart en chromaticité

$$\Delta C = (g_{11} \Delta x^2 + 2g_{12} \Delta x \Delta y + g_{22} \Delta y^2)^{1/2}$$

$$\Delta x = x_0 - x_1$$

$$\Delta y = y_0 - y_1$$

Ecart en luminosité

$$\Delta L = \left| 69 \log \frac{Y_0 + 8.3}{Y_1 + 8.3} \right|$$

Ecart total ou colorimétrique

$$\Delta T = \sqrt{\Delta C^2 + \Delta L^2}$$

2) Ecart selon le système CIELAB 1976

Les grandeurs  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  sont définies par :

$$L^* = 116 \left( Y_0/Y_n \right)^{1/3} - 16 : \text{clarté psychométrique}$$

$$a^* = 500 \left\{ \left( X_0/X_n \right)^{1/3} - \left( Y_0/Y_n \right)^{1/3} \right\} \quad \text{] chroma}$$

$$b^* = 200 \left\{ \left( Y_0/Y_n \right)^{1/3} - \left( Z_0/Z_n \right)^{1/3} \right\}$$

$X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  sont les composantes trichromatiques d'une couleur de surface choisie comme blanc nominal.

Ceci étant pour une tuile mesurée directement

Nous calculerons de la même manière les grandeurs  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  pour la même tuile, mais mesurée par l'intermédiaire du câble.

La différence entre les deux ensembles de mesure sera exprimée ainsi par la relation :

$$\Delta E = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}$$

3) Résultats

Sur les tableaux  $T_1$  et  $T_2$  sont regroupés les résultats obtenus avec les deux méthodes de calcul d'écart.

Aussi sur la figure 2.12 sont représentées les différentes courbes de réémission des 10 tuiles standards mesurées directement puis par l'intermédiaire du câble.

Coloris	$x_0$	$y_0$	$y_0$	$x_1$	$y_1$	$y_1$	$\Delta T$ U.M.A.
BRUN	0.4878	0.3870	17.40	0.4935	0.3926	17.83	2.98
GRIS CLAIR	0.3088	0.3210	62.93	0.3077	0.3209	63.63	1.22
GRIS FONCE	0.2898	0.2972	5.698	0.2924	0.3013	5.500	2.35
ROSE	0.3590	0.3148	43.57	0.3577	0.3144	44.45	1.51
JAUNE	0.4273	0.4639	65.74	0.4272	0.4659	66.61	1.40
VERT CLAIR	0.3054	0.3639	31.99	0.3054	0.3653	32.66	1.26
VERT FONCE	0.3152	0.4366	7.704	0.3223	0.4545	7.180	5.19
BLEU MOYEN	0.2358	0.2419	12.58	0.2354	0.2414	12.65	0.36
BLEU FONCE	0.1967	0.1196	1.508	0.1973	0.1173	1.399	3.05
BLEU-VERT	0.2333	0.3012	7.790	0.2340	0.3029	7.770	0.96

T.1 : Application de la méthode Mac-Adam modifiée.

Coloris	$L_0^*$	$a_0^*$	$b_0^*$	$L_1^*$	$a_1^*$	$b_1^*$	$E^* L^* a^* b^*$
BRUN	48.76	24.37	39.19	49.29	24.27	42.12	2.985
GRIS CLAIR	63.33	17.32	11.48	63.88	17.86	11.92	0.8825
GRIS FONCE	33.36	20.65	18.43	32.21	21.28	21.11	2.983
ROSE	71.94	19.57	6.530	72.53	19.34	6.279	0.6832
JAUNE	84.86	8.862	72.41	85.30	9.670	73.58	1.489
VERT CLAIR	83.40	2.737	1.422	83.77	3.183	1.209	0.6168
VERT FONCE	28.63	0.3623	4.267	28.11	0.6632	3.414	1.045
BLEU MOYEN	42.12	0.5082	22.29	42.23	0.4582	22.47	0.2207
BLEU FONCE	12.66	23.22	34.14	11.95	23.72	33.88	0.9047
BLEU VERT	33.54	16.13	7.975	33.51	16.54	7.465	0.652

T.2 : Application de la méthode CIELAB 1976.



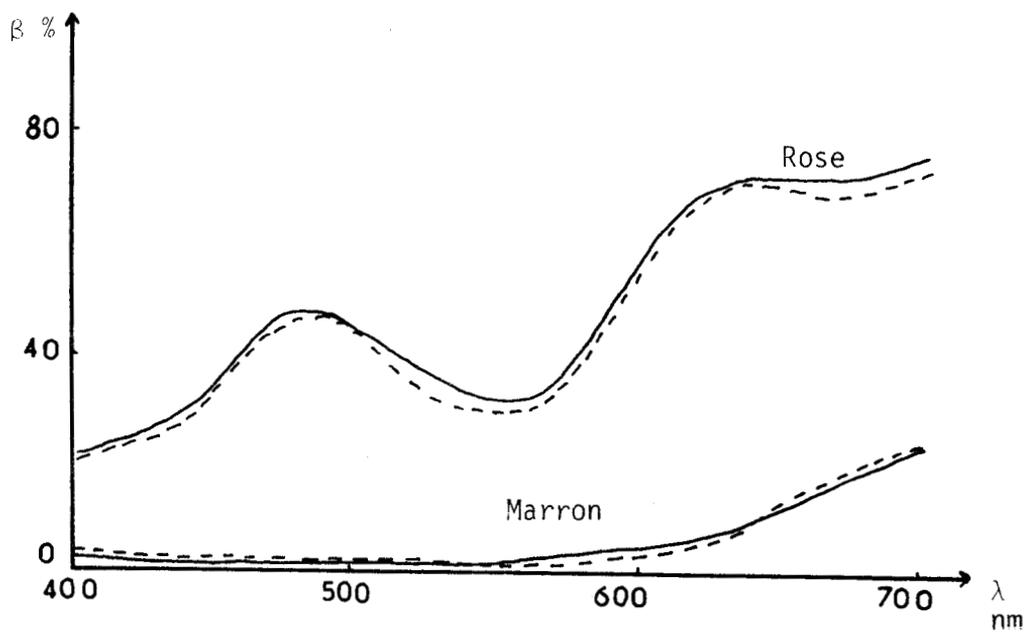
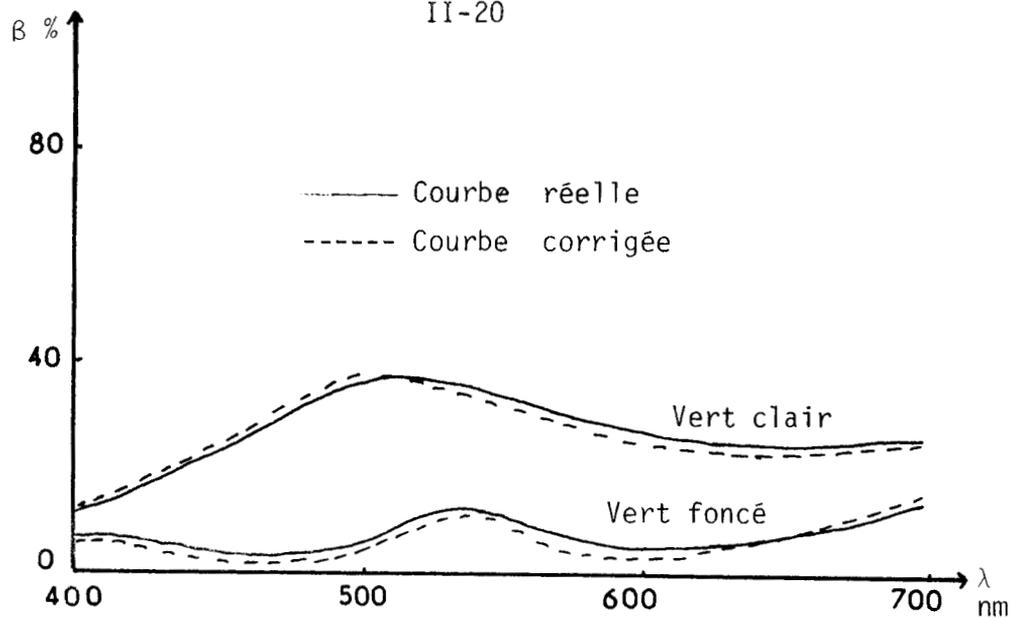
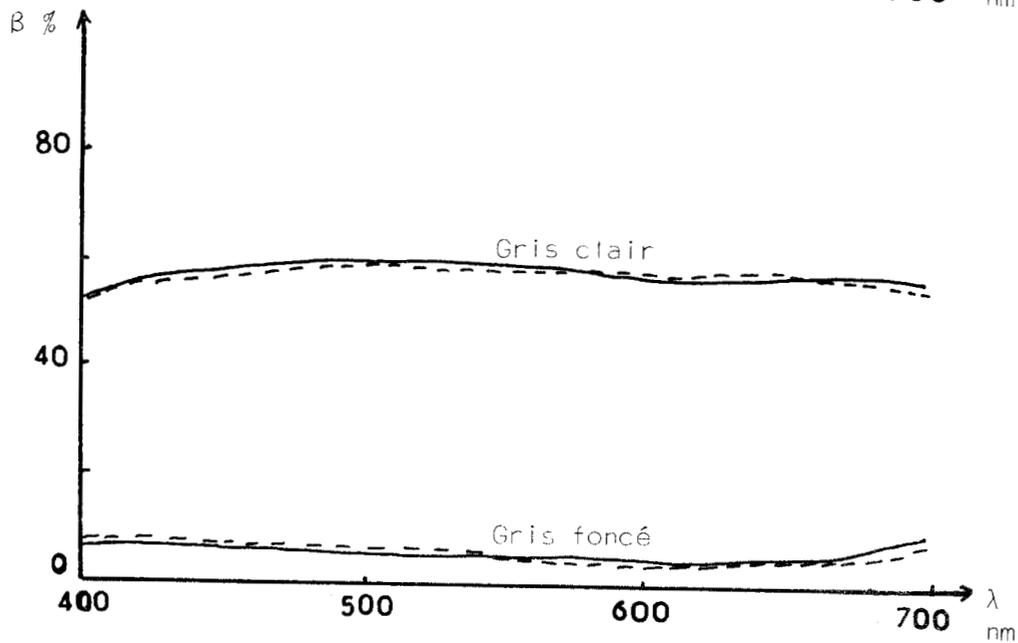
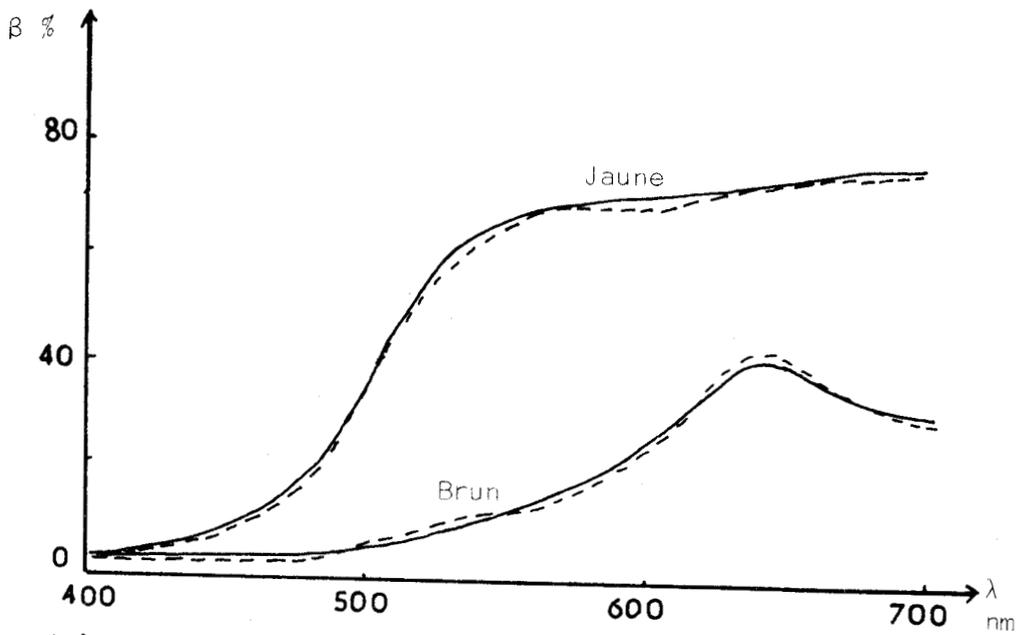
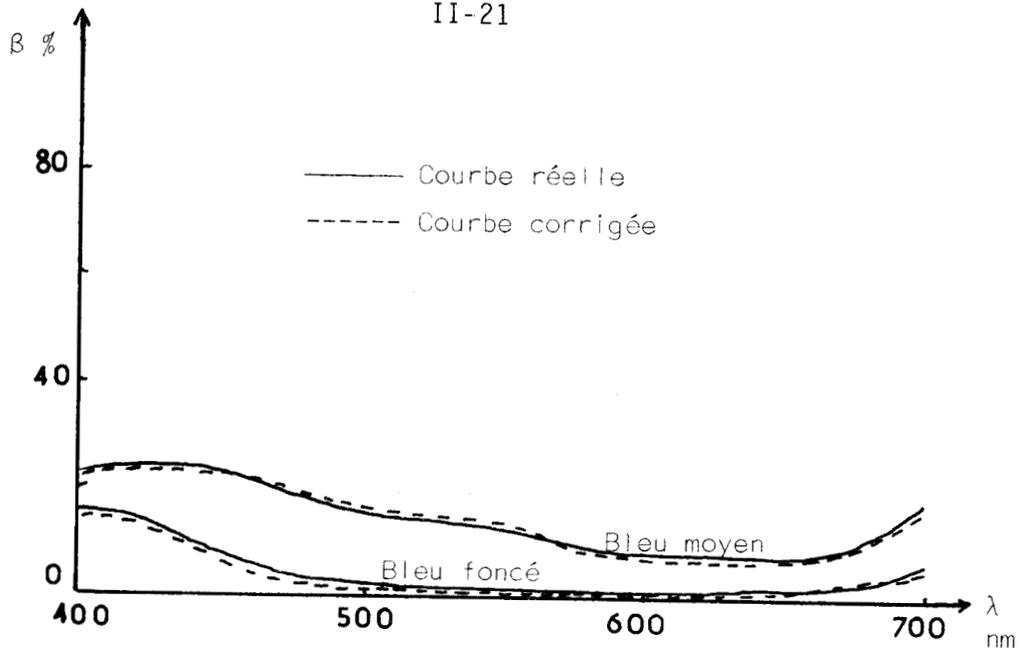


FIGURE - 2.12. -

Les tableaux  $T_1$  et  $T_2$  et les différentes courbes de réémission, nous amènent à faire les constatations suivantes :

- la première constatation est que les fibres entraînent une modification de la clarté psychométrique, c'est-à-dire que
  - les coloris foncés deviennent plus foncés
  - les coloris clairs deviennent plus clairs.



- FIGURE 2.12 -  
 Courbes de réémission des céramiques.

La deuxième constatation est que cette modification entraîne une faible variation de l'écart colorimétrique.

Compte-tenu de la précision du spectrophotomètre qui est de l'ordre de 3 % en comparaison de la sortie numérique en millième, nous considérons que cette variation n'affecte pas l'utilisation du capteur et justifie la technique employée.

*B) Application à la mesure du textile sec.*

Après l'expérimentation du capteur colorimétrique sur des tuiles en céramique, nous allons essayer de faire des mesures à distance sur des échantillons de tissu. Alors que les premiers présentent des surfaces planes et polies, donc des surfaces idéales pour la prise de mesure, les seconds sont formés d'un ensemble de fibres d'où des surfaces irrégulières pouvant influencer la mesure.

Plusieurs échantillons en coton de coloris bleu, rouge, jaune, de concentration allant de 0,1 % à 1,5 %, ont été mesurés directement, puis par l'intermédiaire du capteur colorimétrique selon la même technique.

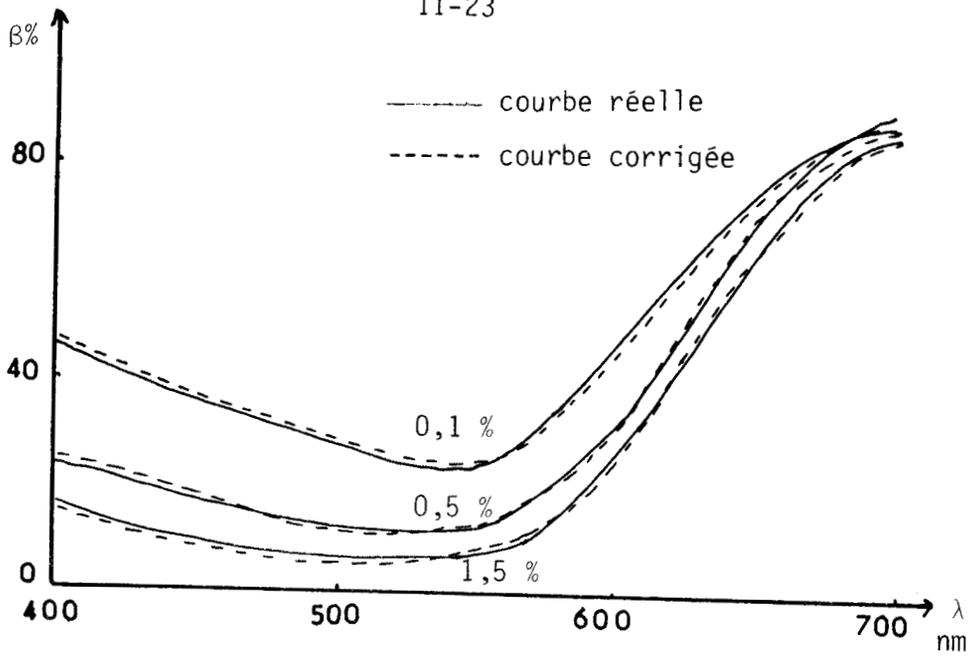
Une étude comparative et un calcul d'écart de nuance s'en est suivi et dont les résultats sont consignés dans les tableaux T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> et T<sub>5</sub>.

Bleu %	$\Delta T_{U.M.A.}$	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	Jaune %	$\Delta T_{U.M.A.}$	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	Rouge %	$\Delta T_{U.M.A.}$	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$
0,1	2.02	2.14	0,1	2.07	3.32	0,1	2.38	2.34
0,3	3.17	1.63	0,3	2.05	4.39	0,3	3.21	3.32
0,5	3.26	2.48	0,5	1.96	4.75	0,5	2.06	3.68
0,75	2.86	3.49	0,75	3.69	5.31	0,75	2.65	3.27
1	4.12	2.91	1	3.27	5.50	1	3.11	3.42
1,5	5.06	3.37	1,5	5.11	5.86	1,5	3.50	4.33

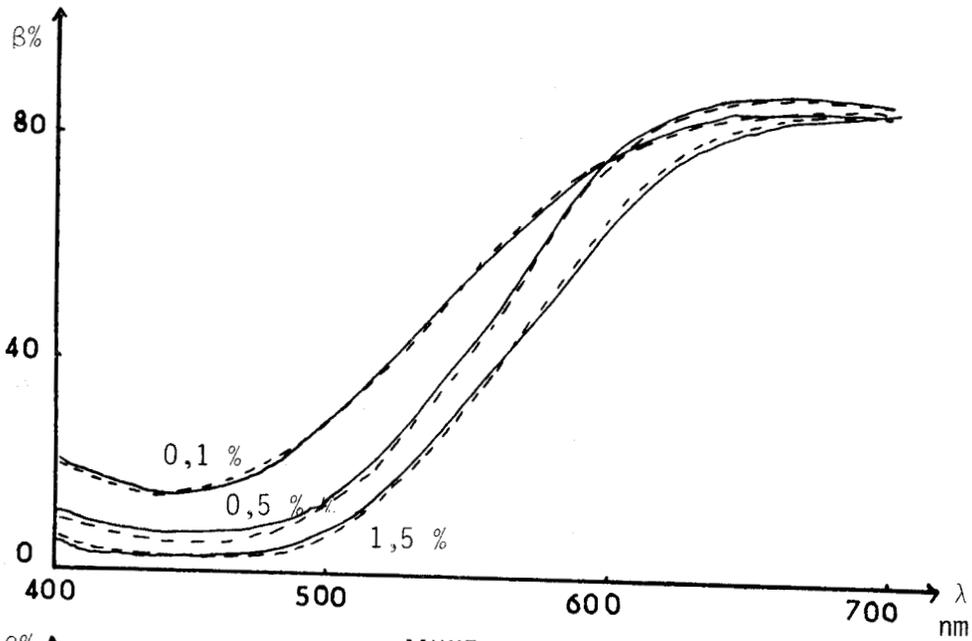
T<sub>3</sub>T<sub>4</sub>T<sub>5</sub>

Aussi pour illustrer ces tableaux, nous avons tracé quelques courbes des taux de réémission - figure 2.13.

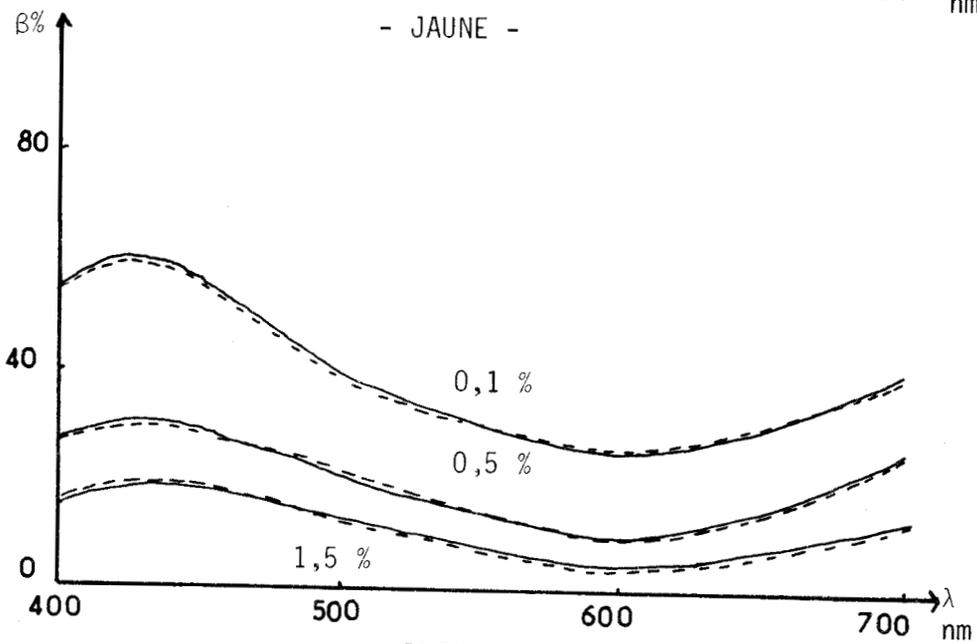
II-23



- ROUGE -



- JAUNE -



- BLEU -

FIGURE - 2.13. -



Les résultats trouvés montrent la possibilité de faire des mesures de couleur à distance par l'intermédiaire d'un capteur optique.

L'acquisition d'informations colorées des objets facilite la tâche à certains industriels du textile qui ne se trouveront plus devant la nécessité de découper des échantillons des pièces de tissu et de les envoyer à des laboratoires pour la mesure colorimétrique. Cette opération pourrait se dérouler et être effectuée, désormais, sur place. Cela demande par conséquent une unité de traitement pour la correction des informations et la conception d'un spectrophotomètre adéquat.

La conception actuelle des spectrophotomètres ne permettent pas la mesure des objets mouillés. L'adjonction d'une sonde colorimétrique peut, par conséquent, résoudre ce problème sans affecter les éléments constituant le spectrophotomètre, ni perturbation de la mesure.

A la suite de la possibilité de faire des mesures à distance sur des objets, une étude sur textile mouillé a été envisagée.

### II-3 MESURE SUR TEXTILE MOUILLE

Les différentes études et théories faites sur la colorimétrie supposent que le milieu dans lequel est observé un objet est toujours l'air d'indice de réfraction  $n = 1$ .

L'observation d'un objet dans un autre milieu provoque nécessairement un changement de sensation par conséquent une variation de la perception de la couleur de l'objet. Ceci est relatif au changement d'indice des milieux et s'explique par les lois de réfraction et de diffusion de la lumière.

De récentes études Christine SMITH (2), GOLDFINGER(3) ont été menées sur la colorimétrie en phase humide. Elles ont permis de faire ressortir certains phénomènes qui se passent dans la colorimétrie sur textile immergé et d'établir des lois reliant les mesures colorimétriques sur textile immergé et le même sec.

En effet, une simple inspection, même à l'oeil nu, permet de discerner le changement de couleur qui existe entre un objet sec et le même immergé ou simplement mouillé ; celui-ci paraît plus foncé, sa couleur plus pure, sa luminosité plus faible. Chacun peut observer que la nature paraît plus belle après la pluie.

L'expérimentation de la méthode de GOLDFINGER n'a pas donné entière satisfaction vue les hypothèses très théoriques prises pour l'établissement du modèle (voir annexe II :Goldfinger).

Plusieurs relations ont été établies par la suite pour donner une représentation approximative de la correspondance des coefficients de réémission immergé-sec. /4/, /5/, /6/.

Toutes ces méthodes consistent en la prise de la mesure du coefficient de réémission sur un tissu immergé dans un liquide transparent par conséquent, elles ne peuvent être directement appliquées industriellement, étant donné la complexité de la prise d'informations lumineuses à l'intérieur d'un bain de colorant.

Par contre, la technique de mesure que nous avons adoptée, à savoir l'utilisation d'un capteur en fibres optiques pour la prise d'informations lumineuses colorées sur le textile mouillé est plus avantageuse compte-tenu de son application directe sur site industriel. Comme la mesure est effectuée sur textile mouillé, la recherche d'une loi de correspondance mouillé-sec qui ne tiendra pas compte des indices des milieux, de la géométrie de la fibre, des considérations théoriques sur le trajet d'un rayon lumineux à travers la fibre de textile et du type de teinture est plus que nécessaire pour la reproduction d'un contre type et sa prédiction de couleur sèche.

L'information sera prise sur textile mouillé, puis elle sera traitée par le biais de ce modèle pour son utilisation ultérieure dans la chaîne de régulation.

II-3.1. Recherche du modèle mathématique de transposition  
mouillé-sec.

Le modèle n'a été établi pour l'instant que pour un type de matière, en l'occurrence le coton teint, avec les 3 colorants suivants :

- Rouge Diazol lumière 6BL 1750
- Bleu " " R Extra 1350
- Jaune " " 4 RL

18 pièces de textile ont donc été teintes à plusieurs concentrations et sur lesquelles nous avons prélevé les échantillons cités (paragraphe II-2.3. B) qui ont servi pour la première expérimentation du capteur.

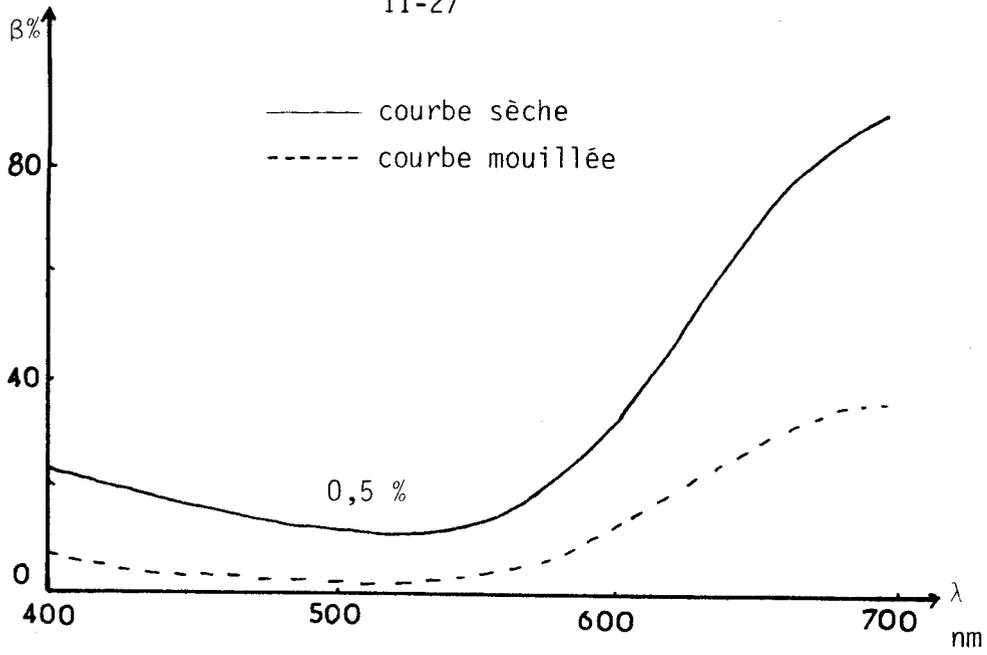
D'autres échantillons prélevés sur les mêmes pièces de textile serviront pour l'étude de la colorimétrie en phase mouillée. Les échantillons ont été trempés dans de l'eau pendant 5 minutes avant d'être mesurés par l'intermédiaire du capteur colorimétrique. Ces mesures montrent effectivement que les échantillons sont plus foncés (fig. 2.14 a, b, c) leurs couleurs plus pures, leurs coordonnées trichromatiques  $x$ ,  $y$  se déplacent dans l'espace des couleurs (fig. 2.15), ainsi que leurs luminosités  $Y$  sont plus faibles.

Afin de remédier à cette modification du spectre, nous avons été amenés à concevoir un modèle mathématique qui puisse évaluer ce changement d'état et prédire la couleur sèche à partir des taux de réémission faits sur textile mouillé.

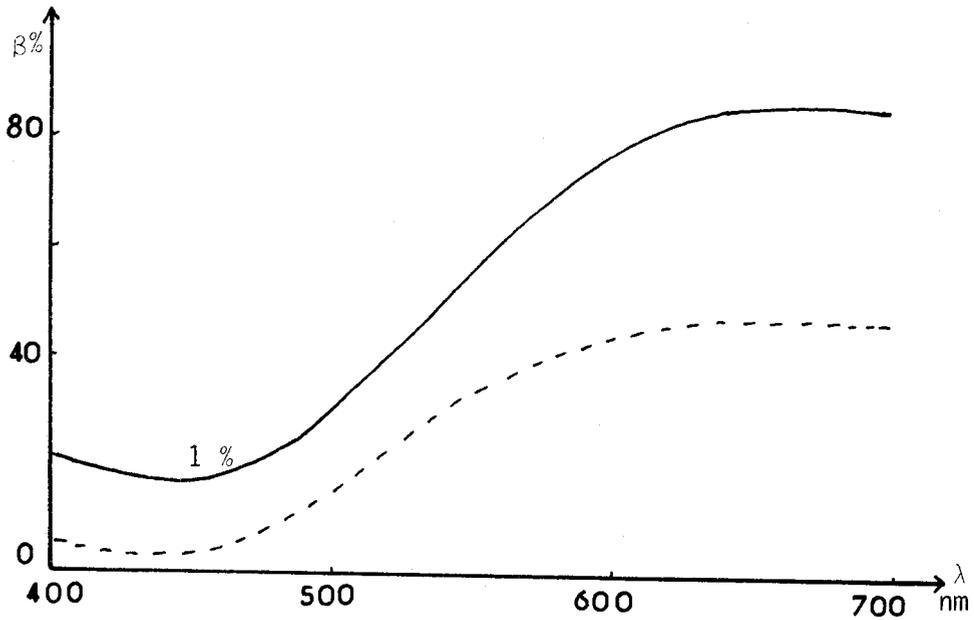
L'ensemble des échantillons mesurés mouillés, puis secs fournissent 288 couples de mesures pour l'établissement du modèle. Etant donné que nous avons fait, par coloris, 6 concentrations : 0,1 %, 0,3 %, 0,5 %, 0,75 %, 1 %, 1,5 %. Rappelons, à cet effet, qu'un coloris est mesuré en 16 longueurs d'onde régulièrement réparties dans le visible entre 400 nm et 700 nm.

Sur la figure 2.16 nous avons représenté dans des axes ce nuage de points sur lequel nous souhaitons ajuster une fonction.

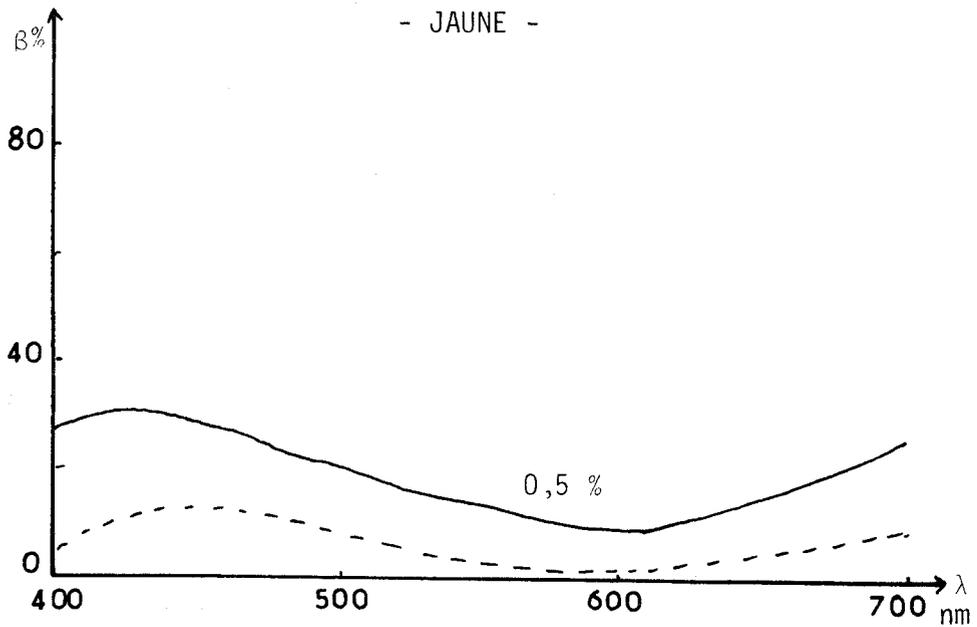
Avant d'aborder la méthode d'identification et le choix du modèle, nous avons considéré l'hypothèse suivante :



- ROUGE -



- JAUNE -



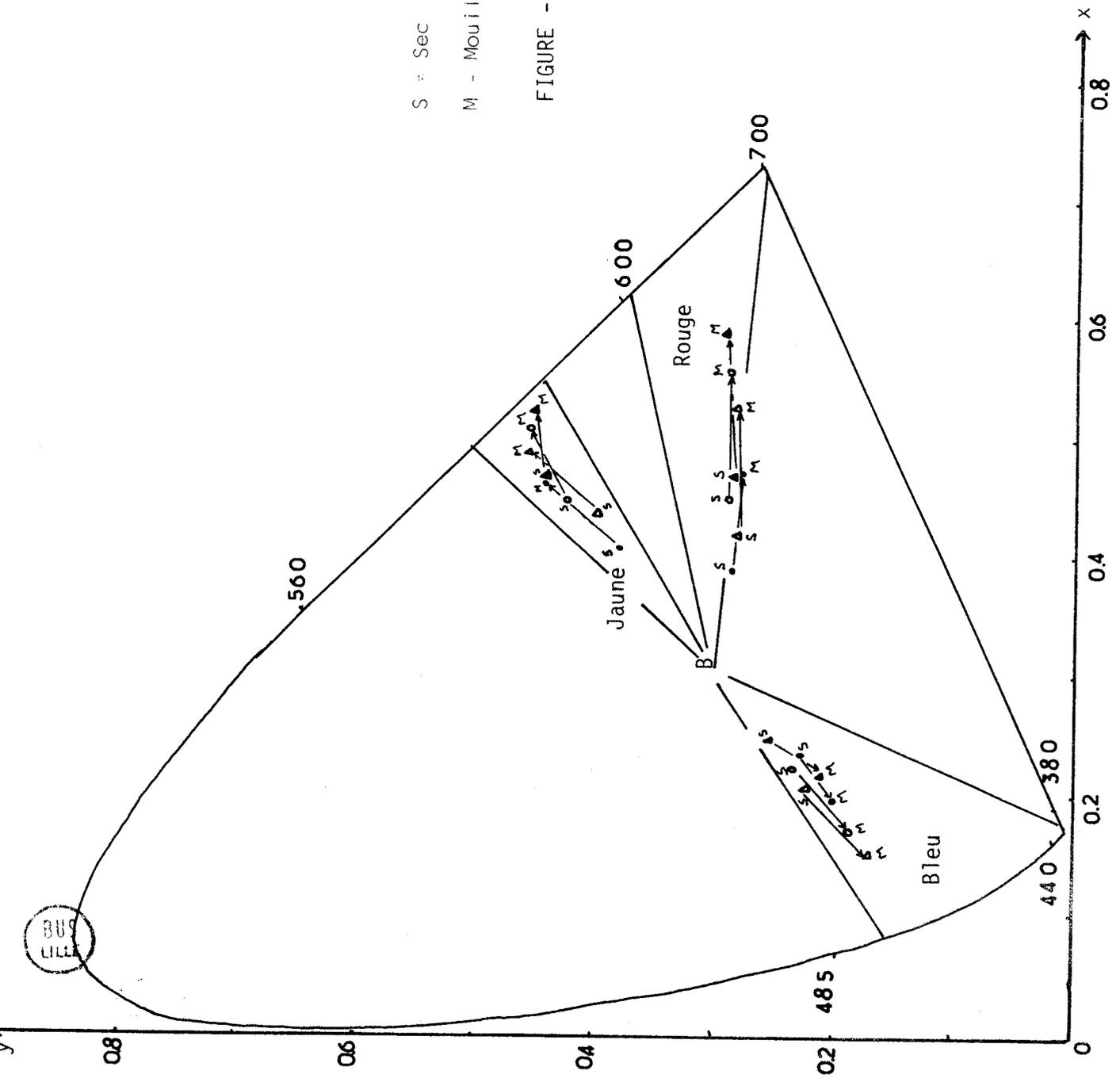
- BLEU -

FIGURE - 2.14 -



S = Sec  
M = Mouillé.

FIGURE - 2.15. - Diagramme x, y de la C.I.E.  
B. point achromatique.



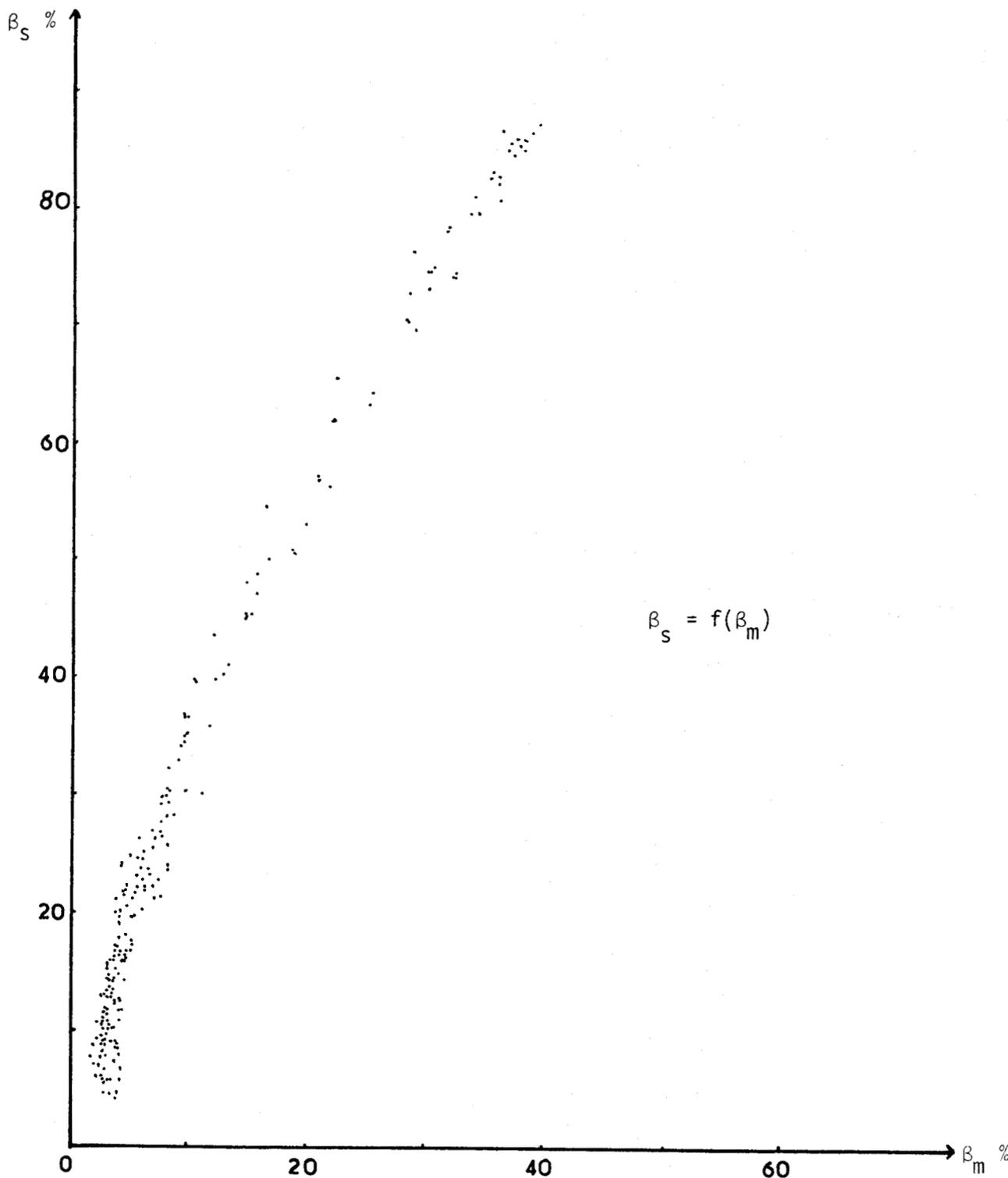


FIGURE - 2.16. -



- comme nous ne disposons pas d'informations près de l'origine et comme nous ne savons pas précisément comment varient les coefficients de réémission d'un corps noir mouillé par rapport aux coefficients de réémission de ce même corps noir mais sec, nous avons considéré que la fonction ne passera pas par l'origine des axes.

Ceci n'est pas un inconvénient, car pour son utilisation industrielle les mesures de taux de réémissions faibles sont rares. Aussi toutes les valeurs des coefficients traités seront comprises entre 0,6 et 100 en pourcentage de réémission.

#### a) Méthode d'identification

Pour l'identification du système nous avons utilisé la méthode des moindres carrés. Elle consiste à déterminer les paramètres optimaux d'une équation linéaire rendant minimum la somme des carrés des écarts entre les valeurs issues de la mesure sèche et les valeurs obtenues par le modèle choisi /7/.

Le problème consiste donc à déterminer les paramètres  $\theta_j$ ,  $j = 1, n$  connaissant  $\phi_j(\beta_{mi})$ ,  $j = 1, n$  les valeurs de l'argument des coefficients de réémission mouillé et  $\beta_{si}$  les valeurs des coefficients de réémission résultant de la mesure dans le sec.

Nous pouvons écrire pour N couples de mesure :

$$\begin{aligned} \beta_{s1} &= \theta_1 \phi_1(\beta_{m1}) + \dots + \theta_i \phi_i(\beta_{m1}) + \dots + \theta_n \phi_n(\beta_{m1}) + e_1 \\ &\vdots \\ \beta_{si} &= \theta_1 \phi_1(\beta_{mi}) + \dots + \theta_i \phi_i(\beta_{mi}) + \dots + \theta_n \phi_n(\beta_{mi}) + e_i \\ &\vdots \\ \beta_{sN} &= \theta_1 \phi_1(\beta_{mN}) + \dots + \theta_i \phi_i(\beta_{mN}) + \dots + \theta_n \phi_n(\beta_{mN}) + e_N \end{aligned}$$

où  $e_j$  représente l'écart entre la valeur sèche de la valeur obtenue par le système d'équation choisie.

b) Loi de correspondance mouillé-sec

L'application de la méthode des moindres carrés ne peut se faire que si la fonction  $\alpha$  est connue.

Or, comme nous ignorons la façon de choisir au mieux cette fonction d'approximation qui lie les coefficients de réémission mouillé  $\beta_m$  aux coefficients de réémission secs  $\beta_s$ , plusieurs polynômes de degrés divers ont été essayés.

Ils sont de la forme :

$$\beta_s = A_0 + A_1 \beta_m + A_2 \beta_m^2 + \dots + A_{n-1} \beta_m^{n-1} + A_n \beta_m^n$$

En considérant les hypothèses faites à partir du graphe (fig.4.3.) qui sont :

$$\beta_m \in |0,10| \rightarrow \exists \text{ d'une pente de } 5,3 \text{ environ.}$$

$$\beta_m \in |10,70| \rightarrow \exists \quad " \quad " \quad 1,4 \text{ environ.}$$

Puis l'allure des résultats obtenus sur un polynôme du 5ème degré, cela nous a incité à choisir une équation telle qu'un terme exponentiel, soit prépondérant près de l'origine des axes, d'où le choix d'une fonction sous la forme :

$$\beta_s = A_0 \cdot e^{-\frac{\beta_m}{K}} + A_1 \beta_m + A_2$$

Cependant pour pouvoir appliquer la méthode des moindres carrés qui permet de déterminer les paramètres  $A_i$  rendant minimum la somme des carrés des valeurs issues de la mesure sèche et des valeurs simulées par le modèle, nous avons linéarisé le système en fixant la valeur de  $K$ . L'opération est réitérée pour diverses valeurs de  $K$  jusqu'à l'obtention d'un minimum minimorum de l'erreur quadratique moyenne.

La méthode et le modèle à employer étant fixés, plusieurs cas sont à envisager :

a) Etude par colorant :

Nous considérons l'ensemble des couples  $(\beta_{sn}, \beta_{mn})_{n=1,N}$

$\beta_{sn}$  : réémission sec

$\beta_{mn}$  : réémission mouillé

N : ensemble des observations sur chacun des colorants rouge, jaune, bleu à plusieurs concentrations.

ROUGE

$$\beta_{si} = A_{01} e^{-\frac{\beta_{mi}}{K_1}} + A_{11} \beta_{mi} + A_{21}$$

JAUNE

$$\beta_{si} = A_{02} e^{-\frac{\beta_{mi}}{K_2}} + A_{12} \beta_{mi} + A_{22}$$

BLEU

$$\beta_{si} = A_{03} e^{-\frac{\beta_{mi}}{K_3}} + A_{13} \beta_{mi} + A_{23}$$

Les paramètres  $(A_{ij}, K_j)$  sont peu différents pour les trois colorants.

b) Etude par concentration :

Nous considérons l'ensemble des couples  $(\beta_{sn}, \beta_{mn})_{n=1,N}$

N : ensemble des observations sur chacune des concentrations sans distinction de couleur.

Les paramètres  $(A_{ij}, K_j)$   $i = 0,1,2$  sont calculés puis comparés  
 $j = 1,2,\dots,6$  entre eux.

c) Etude par longueur d'onde  $\lambda$ 

Nous considérons l'ensemble des couples  $(\beta_{sn}, \beta_{mn})_{n=1,N}$

N : Ensemble des observations par longueur d'onde.

De même que précédemment les paramètres  $(A_{ij}, K_j)$   $i = 0,1,2$   
 $j = 1,2,\dots,16$

seront comparés entre eux puis avec les résultats des cas ci-dessous.

Les résultats obtenus dans les trois cas nous ont poussé à faire une étude sur l'ensemble des observations pour la détermination des paramètres  $(A_i)$   $i = 0,1,2$  et K

La méthode a donné le résultat suivant :

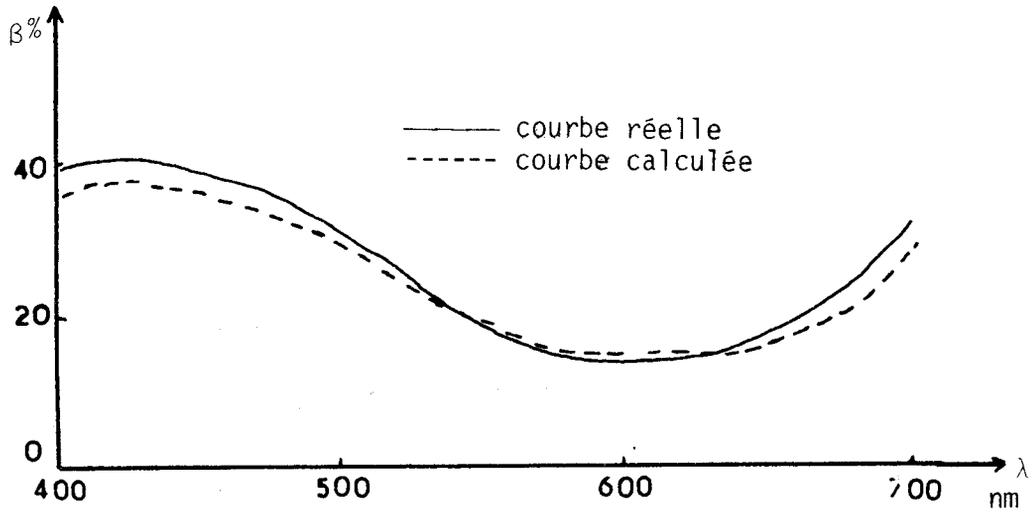
$$\beta_s = - 14.43 e^{-\frac{\beta_m}{2.5}} + 1.161 \beta_m + 15.60$$

Ce modèle a l'avantage d'être indépendant des coloris, des concentrations et surtout de la longueur d'onde.

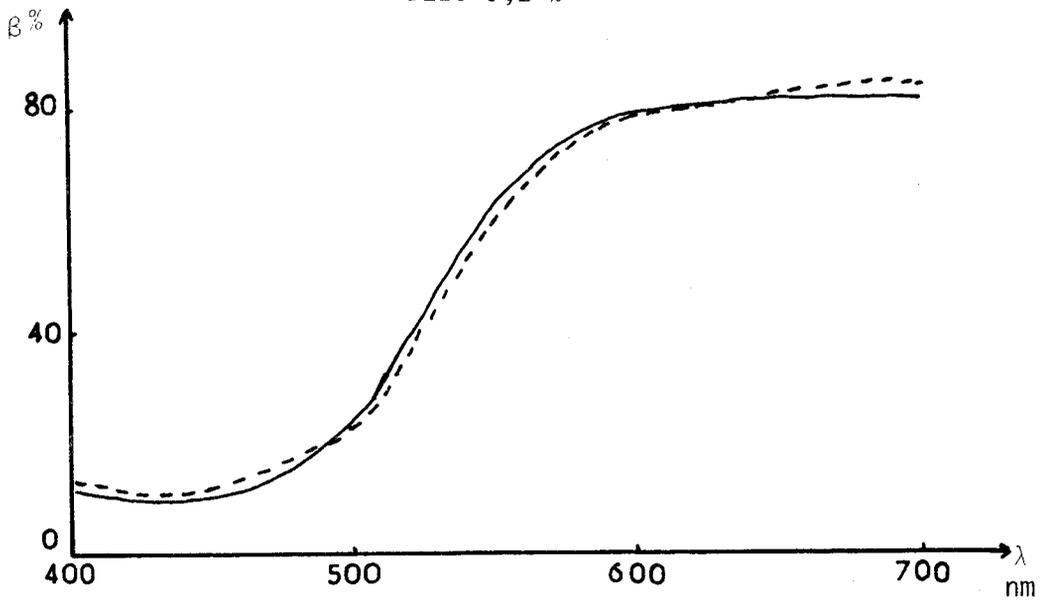
Vu le nuage de points et le nombre d'observations considérés, l'unicité du modèle augmente l'erreur certes, mais par contre facilite son implantation et réduit le temps de réponse lors de son emploi dans la boucle de régulation.

Les coefficients de réémission varient en fonction du degré d'humidité et de la température. Faute de moyens de prélever ces deux facteurs à la surface de l'échantillon au moment de la prise de la mesure qui dure une minute, nous avons considéré que les paramètres  $(A_i, K)_{i=0,1,2}$  du modèle recherché seront fonction de ces deux facteurs non encore quantifiables.

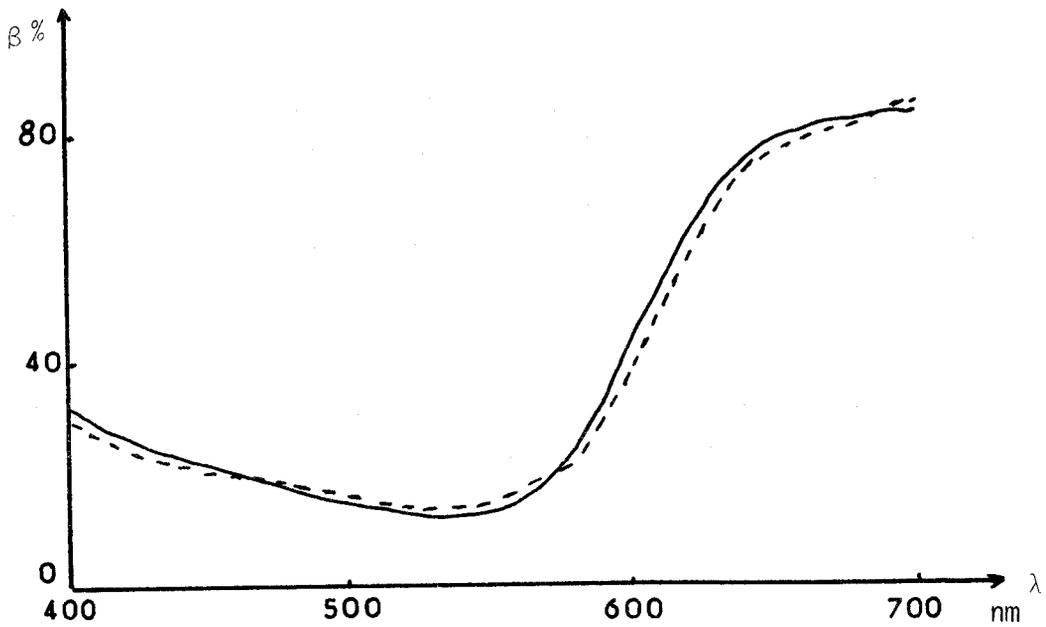
Néanmoins, en analysant l'ascendant de ces facteurs sur l'erreur dans la solution, on a obtenu un modèle de prédiction avec une erreur admissible.



BLEU 0,2 %

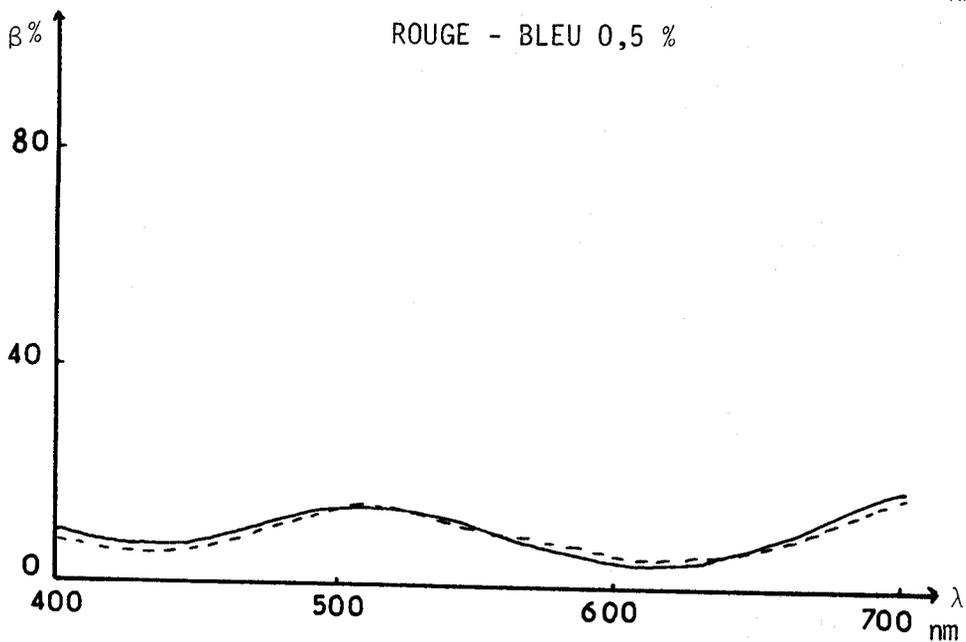
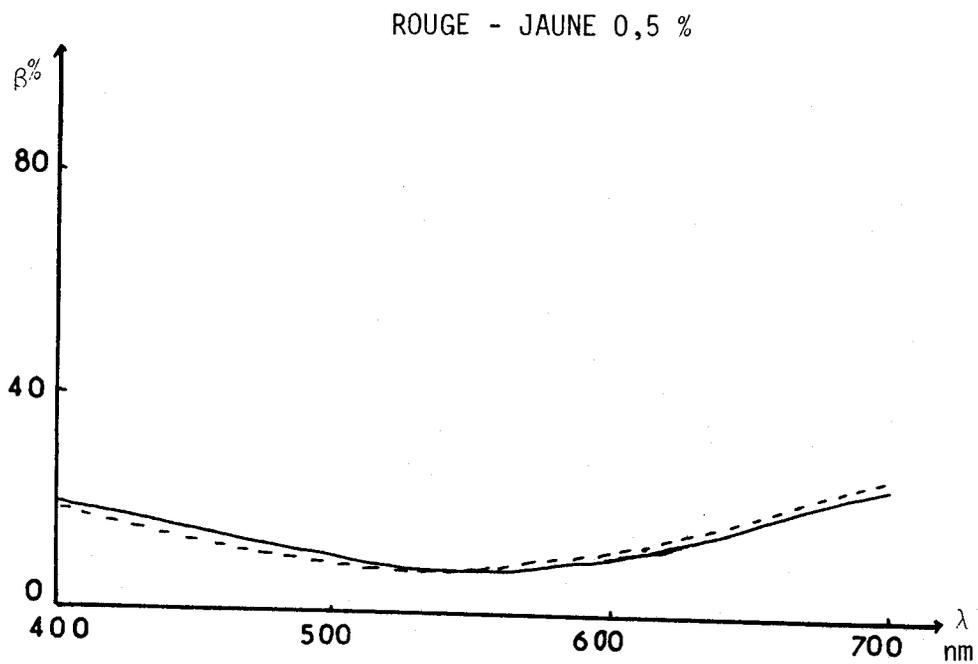
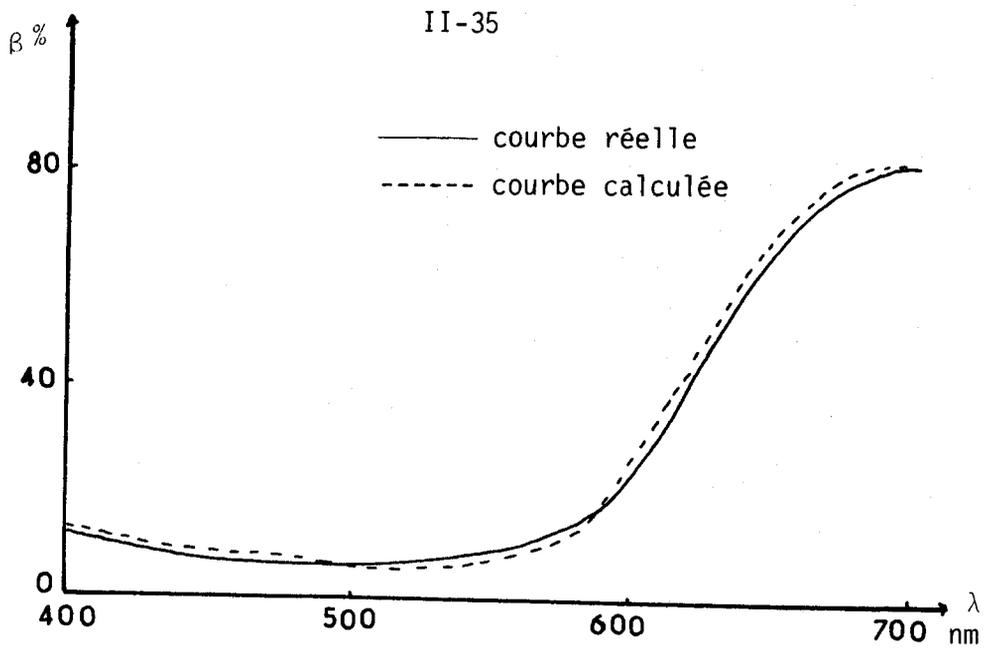


JAUNE 0,2 %



ROUGE 0,2 %

BUS  
LILLE



BLEU - JAUNE 0,5 %

FIGURE - 2.18 -





COLORIS %	$\Delta T$ U.M.A.	$\Delta E$ L**a**b
ROUGE 0.1	1.83	2.34
" 0.5	3.42	3.68
" 1.5	4.12	4.33
BLEU 0.1	1.92	2.14
" 0.5	2.87	2.49
" 1.5	3.30	3.37
JAUNE 0.1	0.83	3.31
" 0.5	2.42	4.75
" 1.5	2.85	4.90

T.6 : Comparaison au monochromie

COLORIS %	$\Delta T$ U.M.A.	$\Delta E$ L**a**b
BLEU 0.5 JAUNE 0.5	3.03	2.41
BLEU 0.5 ROUGE 0.5	4.12	3.49
ROUGE.5+JAUNE.5	3.60	4.87

T.7 : Comparaison en dichromie.

### III-3.2. Expérimentation de la loi de correspondance

Afin de justifier de la validité de cette nouvelle technique de mesure de couleur à distance sur tissu mouillé et de prédiction de couleur sèche, plusieurs séries de mesures ont été effectuées sur des échantillons de même support teints par les mêmes colorants, mais à d'autres concentrations (fig. 2.17).

Quelques mesures comparatives ont été essayées en dichromie. Elles montrent, en effet, que la méthode employée est bien au point (fig. 2.18).

#### a) Résultats :

Les coefficients de réémission du textile mouillé transformés par le modèle et les coefficients du même textile sec ont été comparés par les deux systèmes de calcul d'écart de nuance.

Quelques résultats sont consignés dans les tableaux  $T_6$ ,  $T_7$ .

#### b) Remarques :

En plus de l'écart moyen propre au spectrophotomètre qui est de 0,5 U.M.A., l'introduction des fibres optiques l'augmente au maximum de 1,5 U.M.A. Cette valeur pourrait être aisément réduite en augmentant l'éclairement de l'objet.

Les plus grands écarts de nuances correspondent aux coloris foncés. Cela est dû à la faible réémission de ces derniers.

La relation entre sec-mouillé introduit quant à elle un écart supplémentaire de 2 U.M.A.

Relativement au seuil d'acceptabilité d'une reproduction d'un coloris qui se situe entre 5 et 10 U.M.A., les écarts trouvés sont minimes et leur cumul se trouve en dessous de ce seuil.

### II-4 CONCLUSION

La réalisation d'une sonde en fibres optiques et son adaptation sur un spectrophotomètre de laboratoire a montré la possibilité de prélever des mesures colorimétriques à distance.

Cette technique judicieuse et importante ouvre la voie à diverses applications industrielles. Pour ne citer que l'industrie textile, nous pouvons, par le biais de cette sonde optique, procéder à un contrôle rapide de conformité sur toute la longueur de la pièce teinte sans prélèvement d'échantillons.

La première application a été la mesure des coefficients de réémission d'un textile mouillé. Cela nous a permis de mettre au point un modèle mathématique donnant la valeur sèche à partir de mesures prélevées en phase humide. De ce fait, il devient possible de prédire un coloris en cours de fabrication sans prélèvement d'un échantillon, ni séchage.

La prise d'informations colorées tout au long d'un processus de teinture envisagera des suivis de teinture pour une meilleure connaissance des phénomènes intervenant et si possible la rationalisation du processus.

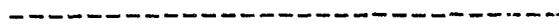
Mais avant d'aborder l'application du capteur au phénomène de teinture, nous commençons par le définir et l'explicitier.

- B I B L I O G R A P H I E -

-----

- /1/ A.M. BENHABIB, J.C. SACRE, D. STEEN.  
*"Prédiction de la couleur réelle d'un textile en phase humide :  
Application au contrôle rapide de conformité"*  
A.F.C.E.T. - Congrès Automatique 1981 (Nantes).
- /2/ C. SMITH.  
*"The colour of textiles when wet. The relation ship between wet  
and Dry. Reflectance values for common textile materials"*  
J.S.D.C., 220, June 1979.
- /3/ G. GOLDFINGER, H.S. GOLDFINGER, S.P. HERSH and T.M. LEONARD  
*Journal of Polymer Science. Part. C, Vol 31 (1970)*
- /4/ F. CAMBONIE, J.I. COULIOU  
*Mémoire d'Ingénieur - I.T.R. (Juin 1979)*
- /5/ F. BESTEL, D. LEFRANCOIS  
*Mémoire d'Ingénieur - I.T.R. (Juin 1974)*
- /6/ F. BALLET  
*Mémoire d'Ingénieur - I.T.R. (Juin 1977)*
- /7/ L. POVY  
*"Identification des Processus"*  
DUNOD UNIVERSITAIRE -
- /8/ Rapport D.G.R.S.T.  
*"Commande Prédicative d'un système multivariable : Application à la  
conduite d'unités industrielles de teinture textile".*

- D E U X I E M E P A R T I E -



- . CHAPITRE III : TEINTURE
- . CHAPITRE IV : SUIVI DE TEINTURE ET DU RINÇAGE :  
MODÉLISATION.
- . CHAPITRE V : RÉGULATION ET COMMANDE DU PROCESSUS.

# CHAPITRE III

## TEINTURE.

III-1 - INTRODUCTION.....	III-1
III-2 - ETUDE THERMODYNAMIQUE - CINETIQUE DE LA TEINTURE...	III-1
a) Dissolution du colorant.....	III-2
b) Adsorption superficielle.....	III-2
c) Diffusion.....	III-3
d) Fixation du colorant.....	III-4
III-2.1. Aspect thermodynamique.....	III-4
III-2.2. Aspect cinétique.....	III-6
III-3 - TEINTURE SUR JIGGER.....	III-11
III-3.1. Description.....	III-11
III-3.2. Théorie de la teinture sur Jigger.....	III-13
III-3.2.1. Influence de l'absorption.....	III-13
A) Modèle idéal à absorption instantanée du colorant.....	III-13
B) Modèle à absorption incomplète.....	III-17
C) Modèle avec "Transport de bain".....	III-18
D) Modèle à absorption lente.....	III-19
III-3.2.2. Influence du rinçage.....	III-21
A) Rinçage par arrosage.....	III-21
B) Rinçage avec renouvellement d'eau.....	III-22
C) Rinçage dans un unique bain.....	III-23
III-4 - CONCLUSION.....	III-23
BIBLIOGRAPHIE.....	III-25

III-1 INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'exposer sous un angle théorique la teinture. Nous expliquons par des lois thermodynamiques et cinétiques, comment est réalisé l'échange entre une solution colorée et les fibres textiles.

La teinture est caractérisée par le passage d'un ou de plusieurs colorants à l'état dissous dans un solvant à un substrat fibreux. Les lois qui régissent ce transfert ionique dépendent essentiellement :

- *De la nature des fibres*
- *De l'affinité des colorants*
- *Des conditions dans lesquelles se trouvent les colorants et de la résistance de la fibre à la teinture.*

Mais les théories établies sur le phénomène de teinture sont différentes et sont fonctions du :

- *Mode de raisonnement thermodynamique*
- *Des hypothèses et approximations admises*
- *Du choix des variables.*

Aussi le nombre des classes de colorants, ainsi que le nombre sans cesse croissant des fibres textiles existant sur le marché, compliquent davantage les lois physico-chimiques qui interviennent dans le processus.

A toutes ces considérations, il ne faut pas oublier le rôle de l'appareil de teinture dont dépendent les qualités requises qui sont l'unisson, la solidité et le coût.

III-2 ETUDE THERMODYNAMIQUE-CINETIQUE DE LA TEINTURE

L'intérêt de cette étude est la mise en évidence des paramètres qui interviennent dans le processus de teinture, sans pour autant entrer dans les considérations très théoriques régissant le phénomène.

La teinture est un phénomène irréversible où l'on peut distinguer 4 étapes principales :

- 1°) Dissolution du colorant
- 2°) Adsorption superficielle
- 3°) Diffusion
- 4°) Fixation.

Ces 4 étapes se confondent d'une façon arbitraire et s'intègrent l'une à l'autre sans une délimitation précise des différents états (figure 1).

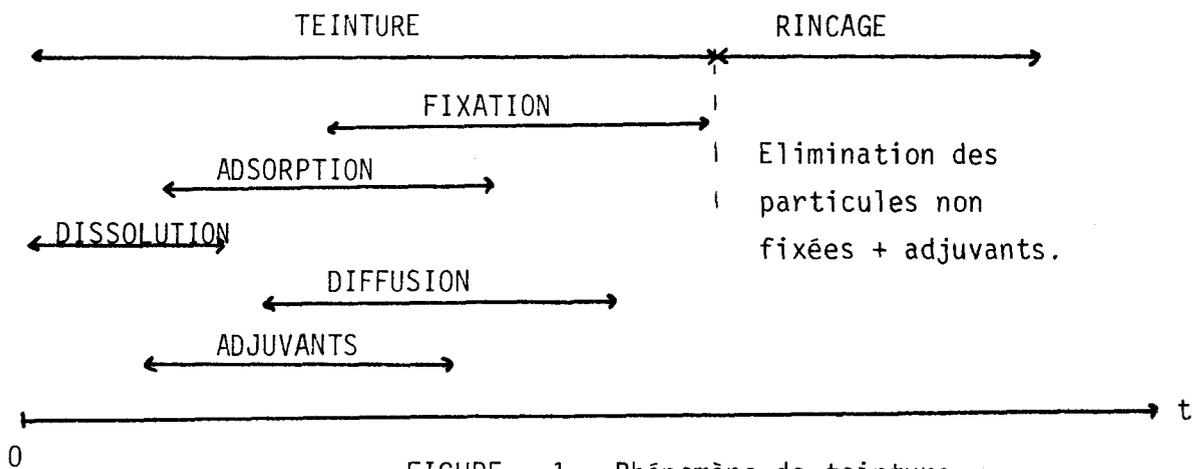


FIGURE - 1 - Phénomène de teinture.

a) Dissolution du colorant

Le colorant se présente sous forme :

- soit d'agrégats
- soit de molécules simples

Dissout dans un milieu aqueux, l'équilibre est atteint suivant les lois de la chimie classique.

b) Adsorption superficielle

Dans le milieu, il se trouve que le colorant et les fibres portent tous deux des charges négatives. La force de répulsion rend difficile l'adsorption du colorant par la fibre (figure 2).

L'adsorption sera facilitée par l'adjonction dans le milieu d'un électrolyte ou adjuvant ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Ce dernier permet à la fibre de prendre un potentiel positif et d'attirer par conséquent les anions colorants.

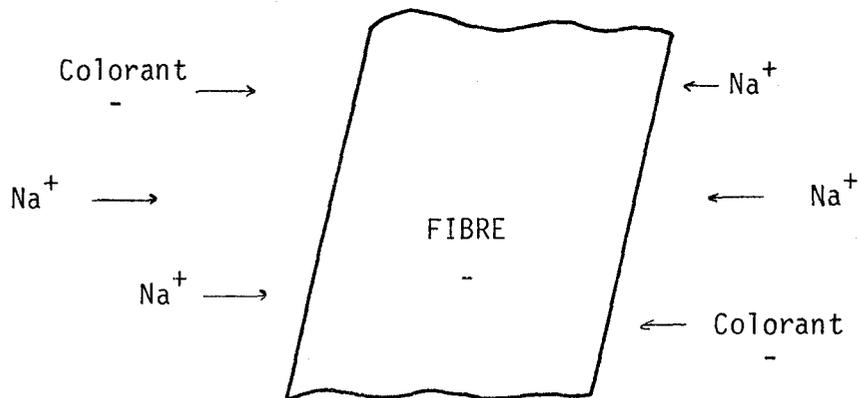


FIGURE - 2 - Fibre + colorant dans un solvant.

En réalité le processus est plus complexe, car par adsorption puis absorption d'anions colorants, la fibre peut reprendre un potentiel négatif et de nouveau attirer les cations  $\text{Na}^+$  et redevenir positif etc...

### c) Diffusion

La diffusion du colorant de la surface vers l'intérieur de la fibre se fait sous l'influence des forces osmotiques.

Le colorant présent dans le bain ne pénètre pas en entier dans la fibre ; il s'établit un équilibre à la suite des échanges permanent de colorant entre les fibres de textile et le bain. Ceux-ci dépendent de :

- la température
- la concentration en colorant
- la concentration en adjuvant
- le pH du bain
- le rapport de bain =  $\frac{\text{Poids du tissu}}{\text{Volume du bain}} = r_b$

Plusieurs chercheurs /1/, /2/, /3/ et /4/ ont étudié le phénomène et essayé de trouver une loi d'équilibre qui décrit ce transfert d'ions.

Leurs théories diffèrent par le mode de raisonnement thermodynamique, l'approximation admise et le choix des variables.

d) Fixation du colorant

Le colorant est fixé à la fibre par liaisons hydrogènes.

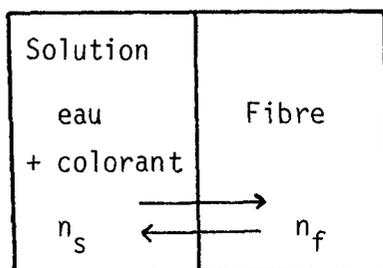
Le passage d'un colorant à un substrat fibreux peut s'exprimer qualitativement par le taux de teinture :

$$\text{Taux de teinture} = \frac{\text{Force instantanée de teinture}}{\text{Résistance instantanée de teinture}} \quad (1)$$

Ce rapport dépend donc des conditions dans lesquelles se trouve le colorant et de la résistance de la fibre à la teinture. Toutefois, ces deux paramètres portent à la fois sur l'aspect thermodynamique et sur l'aspect cinétique.

III-2.1.) Aspect thermodynamique

Soit le système suivant : figure 3.

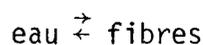


$n_s$  : quantité de colorant dans la solution

$n_f$  : quantité de colorant dans la fibre.

FIGURE - 3 -

Si on suppose qu'il y a déjà équilibre



Seuls les échanges de molécules de colorant entre la solution et la fibre sont possibles.

La variation de l'énergie libre du système ramenée à la quantité de colorant acquise par la fibre est donnée par :

$$\frac{\partial G}{\partial n_f} = \frac{\partial G_f}{\partial n_f} + \frac{\partial G_s}{\partial n_f} \quad (2)$$

comme  $\partial n_f = -\partial n_s$

$$\frac{\partial G}{\partial n_f} = \frac{\partial G_f}{\partial n_f} - \frac{\partial G_s}{\partial n_s} \quad (3)$$

Si on appelle

$$\frac{\partial G_f}{\partial n_f} = \mu_f \quad : \text{potentiel chimique du colorant dans la fibre.}$$

$$\frac{\partial G_s}{\partial n_s} = \mu_s \quad : \text{potentiel chimique du colorant dans la solution.}$$

$$(2) \text{ devient } \frac{\partial G}{\partial n_f} = \mu_f - \mu_s = \Delta\mu \quad (4)$$

La variation du potentiel chimique constitue un paramètre important dans le processus de teinture. La thermodynamique et la cinétique font appel justement à ce facteur pour étudier le transfert ionique de la solution au substrat fibreux.

D'autre part, le potentiel chimique peut-être calculé en fonction de la concentration en colorant soit :

$$\mu_s = \mu_s^\circ + RT \ln C_s \quad (5)$$

$$\mu_f = \mu_f^\circ + RT \ln C_f \quad (6)$$

où -  $C_s$  et  $C_f$  sont les concentrations du colorant en solution et dans la fibre.

-  $\mu_s^\circ$  et  $\mu_f^\circ$  sont les potentiels chimiques standards.

La différence des équations (6) et (5) donne l'affinité tinctoriale du colorant pour la fibre du textile.

$$- \Delta\mu = - \Delta\mu_0 - RT \ln \frac{C_f}{C_s} \quad (7)$$

où  $-\Delta\mu_0$  est l'affinité tinctoriale standard.

Suivant le signe de  $\Delta\mu$  il peut y avoir sorption c'est-à-dire teinture ou désorption.  $\Delta\mu$  représente la force de teinture.

Mais le comportement du colorant est fonction de la température. En général l'affinité du colorant pour une fibre croît avec la température (5).

La température absolue de teinture, l'affinité standard et la chaleur standard de teinture  $H_0$  sont reliées par l'équation :

$$\frac{d(\Delta\mu_0/T)}{d(1/T)} = \Delta H_0 \quad (8)$$

Ces présentes indications montrent que la teinture n'est pas un processus instantané, mais comme toutes les réactions chimiques il y a une vitesse de réaction. Le facteur temps d'une très grande importance dans la pratique et dans le coût de l'opération, introduit la notion de cinétique de la teinture.

### III-2.2.) Aspect cinétique

Dans l'équation (7), quand  $C_f = C_s$

$$- \Delta\mu = - \Delta\mu_0$$

On peut écrire qu'à l'équilibre (indice  $\infty$ )

$$- \Delta\mu_0 = RT \ln \left( \frac{C_f}{C_s \infty} \right) \quad (9)$$

Cette relation peut s'écrire également

$$- \Delta\mu_0 = RT \ln \frac{C_f}{C_{f_\infty}} \times \frac{C_{S_\infty}}{C_S} \quad (10)$$

Si le volume du bain est très grand ou si  $C_S = \text{constant}$  durant l'expérience.

$$- \Delta\mu_0 = - RT \ln \frac{C_f}{C_{f_\infty}} = - RT \ln c_f \quad (11)$$

Si on appelle le taux de teinture  $\frac{dc_f}{dt}$

L'équation (1) s'écrira

$$\frac{dc_f}{dt} = \frac{-1}{\text{Résistance instantanée de teinture}} RT \ln c_f \quad (12)$$

$$\text{où } \frac{dc_f}{dt} = - \beta \ln c_f \quad (13)$$

$$\text{avec } \beta = \frac{R.T}{\text{Résistance instantanée de teinture}}$$

Ce résultat est très proche de celui obtenu avec un modèle de diffusion classique

$$J = D_0 \left( - \frac{\partial C_f}{\partial x} \right)$$

$D_0$  : coefficient de diffusion

$\partial C_f$  : variation de la concentration

$x$  : distance de diffusion.

D'autre part, l'une des hypothèses de la thermodynamique des processus irréversibles stipule que si plusieurs processus irréversibles ont lieu simultanément, chaque flux dépendra de toutes les forces en présence et inversement.

$$J_i = \sum_j L_{ij} A_j \quad (14)$$

où  $L_{ij}$  peuvent traduire des flux conjugués à une force associée ou non conjugués mais croisés.

$$\text{et } A_j = \Delta\mu_j + V_j \Delta p$$

avec  $V_j$  = Volume molaire partiel

$\Delta p$  = Différence de pression entre les deux milieux solution-fibres.

L'application de l'équation (14) à la teinture dépend du type de colorant.

#### α) Cas des colorants non ionisés

$$\Delta\mu = \mu_s - \mu_f \quad \text{différence de potentiel chimique entre la solution et la fibre.}$$

Si la solution et la fibre sont supposées homogènes et l'équilibre thermique solution (s), fibre (f) est assuré, chacun des trois milieux indicés comme suit :

1 : colorant

2 : eau

3 : fibre

sera caractérisé par

$$\begin{vmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{T} \begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{vmatrix}$$

A la suite de plusieurs hypothèses et considérations théoriques émises et que nous n'avons pas jugé utile de les développer, le flux de colorant sera égal à

$$J_1 = \frac{L}{T} \Delta\mu_1 \quad (15)$$

avec  $L = (L_{11} - L_{13} \frac{L_{31}}{L_{33}})$  traduisant l'interaction physico-chimique entre colorant et fibres.

Par conséquent nous pouvons dire que le flux du colorant dépend de la température et du potentiel chimique.

#### β) Cas des colorants ionisés

Dans le cas d'une teinture par colorant ionisé, le transfert dépendra du potentiel électrique qui remplacera le potentiel chimique.

$$\tilde{\mu}_i^+ = \mu_i^+ + Z_i \Delta\Psi F$$

Pour un cation

$\mu_i^+$  : potentiel chimique

$Z_i$  : charge

$\Delta\Psi$  : différence de potentiel entre solution et fibres

F : constante de Faraday

En conséquence, le flux de colorant aura une forme analogue à l'équation (15).

Compte-tenu :

- des équations (7) et (11)
- des conditions tel que le colorant soit en solution idéale dans le bain et qu'il soit adsorbé sur les sites réactifs des fibres suivant la forme de l'isotherme d'adsorption.

L'intégration de l'équation (15) donne une relation entre la vitesse de la teinture, la concentration en colorant, son affinité et le rapport de bain.

$$-\frac{dC_f}{dt} = \frac{L.R.S.}{n_\infty} \ln \left| \frac{C_f}{\frac{K}{r_b}(1-C_f)-1} \right| \quad (16)$$

avec

$n_\infty$  : quantité de colorant à l'équilibre

$r_b$  : rapport de bain

$S$  : surface de contact solution/fibres.

Après ce bref rappel de la thermodynamique et de la cinétique appliquée à la teinture, nous pouvons dégager 4 paramètres importants dont va dépendre le transfert du colorant aux fibres textiles.

- Evolution de la température
- Introduction des adjuvants
- Rapport de bain
- Temps de teinture.

Mais la connaissance de ces paramètres ne suffit pas pour mener à bon terme une teinture :

C'est-à-dire une teinture avec toutes les qualités requises, unisson, solidité, épuisement des colorants du bain qui intervient dans le coût de l'opération et le taux de pollution des rejets et enfin le temps de teinture principal facteur d'économie d'énergie.

La teinture dépend du matériel utilisé pour teindre et la détermination des paramètres optimaux est fonction de ce matériel.

### III-3 TEINTURE en JIGGER

#### III-3.1.) Description

Une pièce de textile peut se teindre dans de nombreux matériels, tel que les barques, les autoclaves et les Jiggers. Ce dernier type d'appareils, outre son accès facile, connaît un regain d'intérêt du fait de ses excellentes performances dans le domaine de la consommation d'eau.

Dans l'optique du problème de la pollution et de l'économie d'énergie, les procédés de teinture par Jigger permettent un épuisement de colorant aussi complet que possible ; par conséquent ils évitent des eaux résiduelles trop chargées de colorant avec un temps de teinture relativement faible, comparé aux autres matériels.

Nos expériences sont réalisées dans un Jigger de laboratoire. Ce prototype (figure 4) est constitué par une cuve évasée contenant le bain de teinture dans lequel circule alternativement la pièce de tissu d'un cylindre à l'autre.

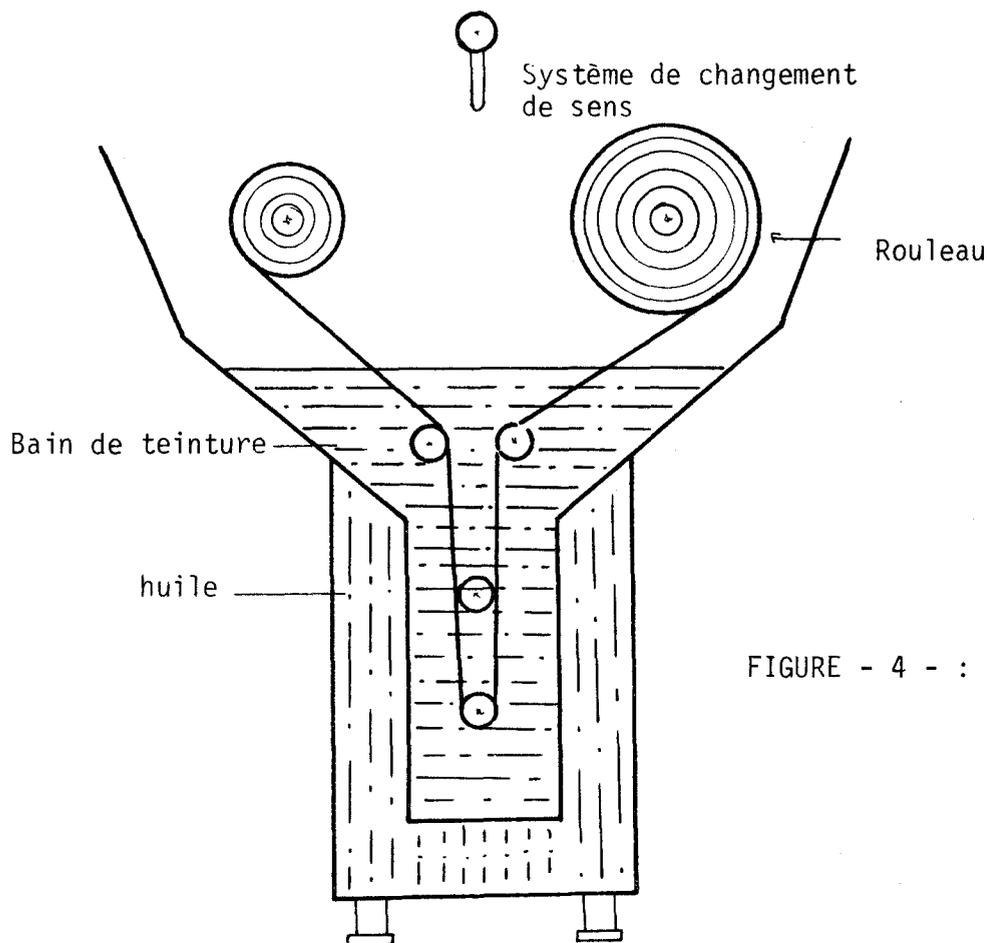


FIGURE - 4 - : JIGGER.

Les rouleaux sont montés pour assurer le maintien de la pièce et éviter la formation des plis longitudinaux. Au dessus du bain de teinture, la cuve est surmontée par deux rouleaux parallèles, l'un sur lequel la pièce s'enroule, pendant qu'elle se déroule de l'autre. A la fin du déroulement de la pièce un système inverse le sens de rotation. La teinture est poursuivie ainsi jusqu'à son terme final.

Le Jigger est équipé de dispositifs mécaniques et électriques qui assurent :

- une vitesse de rotation constante
- la possibilité de régler la vitesse de 1 à 6 m/s
- l'inversion automatique du sens de marche à la fin du déroulement
- l'arrêt automatique après un certain nombre de passages fixé d'avance.
- la possibilité de régler la tension du tissu.

Quant à la montée en température de la solution colorée, un bain d'huile régulé en assure le contrôle. Enfin une pompe permet la circulation du bain, afin d'homogénéiser celui-ci en permanence.

La fixation du colorant sur la fibre n'est que partielle au cours du bref passage du tissu dans le bain ; elle se poursuit pendant le séjour sur les moyeux. A chaque passage, il se produit un échange entre le bain encore riche en colorant et le liquide imprégnant le tissu dont le colorant a été fixé par le coton. Lors de l'enroulement, la pression des couches superposées de tissu oblige le bain à pénétrer la matière et le colorant à diffuser dans les fibres.

L'utilisation d'un Jigger présente la possibilité d'adaptation à une chaîne de régulation. En effet, il permet une prise d'information directe sur le tissu mouillé en cours de teinture.

III-3.2.) Théorie de la teinture sur Jigger

Etant donné la dépendance du phénomène de teinture vis à vis du matériel à teindre, plusieurs travaux ont été faits à propos des Jiggers. Les auteurs ont essayé de formuler par des modèles mathématiques, le comportement du colorant dans la solution et dans les fibres. La possibilité d'une formulation d'un modèle mathématique dépend de 3 considérations émises par E. FRANCE (6).

1°) Le tissu humide hors du bain ne contient pas seulement du liquide d'imbibition (I) dans les fibres gonflées, mais du liquide interstitiel (i) dont la quantité est presque indépendante de la température, de la vitesse et de la tension du tissu ; i est une caractéristique d'un textile teint donné.

2°) Le passage du tissu à travers le bain, d'un rouleau à un autre, change la composition du liquide interstitiel d'une façon ordonnée. Chaque textile, sur un Jigger donné, est caractérisé par un facteur d'échange (F).

3°) Dans le déroulement, le liquide interstitiel ne reste pas fixe, mais il est en mouvement par rapport au tissu.

III-3.2.1. Influence de l'absorption

A ces trois considérations KILBY (7) ajoute un autre facteur pour l'établissement du modèle. Il considère l'épuisement du bain et la cinétique d'absorption du colorant.

A) Modèle idéal avec absorption instantanée du colorant

Un modèle idéal a été établi compte-tenu des hypothèses ci-après que la pratique de la teinture admet avec une approximation suffisante :

- i) la vitesse du tissu est constante
- ii) la température est homogène et constante
- iii) A une distance x du début de la pièce et après n tours la concentration du liquide interstitiel.

$$C_{x,n} = F.c + (1-F) C_{x,n-1} \quad (17)$$

F : facteur d'échange indépendant de la vitesse de tissu et de la concentration du bain.

c : Concentration dans le bain

iv) I, i et V sont homogènes et constants (V : volume du bain)

v) A chaque passage, tout le colorant se trouvant dans le liquide interstitiel est immédiatement, complètement et uniformément absorbé par le tissu.

Comme indiqué par l'équation (17) avec la condition qu'au n<sup>ième</sup> passage  $C_{x, n-1} = 0$ , la variation de la concentration peut s'écrire :

$$- \frac{dc}{dt} = \frac{F \cdot i \cdot s \cdot w}{10^5 \cdot V \cdot T} \cdot c \quad (18)$$

où T : Temps d'un tour

S : Surface du tissu

w : Poids spécifique du tissu.

Après intégration :

$$c_t = c_0 e^{-\frac{\lambda t}{T}} \quad (19)$$

avec  $\lambda = \frac{F \cdot i \cdot S \cdot w}{10^5 \cdot V} = F \cdot \frac{\bar{V}}{V}$  Coefficient d'épuisement.

ou par rapport au nombre de tour

$$c_\tau = c_0 e^{-\lambda \tau} \quad \tau = \frac{t}{T} \quad (20)$$

t : temps écoulé depuis le début de la teinture.

Plusieurs remarques peuvent être tirées à partir de ce modèle.

- i) la teinture dépend uniquement du coefficient d'épuisement ( $\lambda$ ) et du nombre de tour ( $n$ )
- ii) l'épuisement du bain croît et la concentration dans le bain décroît tous les deux exponentiellement.
- iii) Pour atteindre un épuisement de bain donné, le temps est :
  - inversement proportionnel au liquide interstitiel ( $i$ ), au facteur d'échange ( $F$ ) et au rapport de bain ( $r_b$ )
  - proportionnel au rapport  $V/\bar{V}$  ( $\bar{V}$  : volume interstitiel)

Le modèle idéal (eq.20) est lié à la quantité de colorant sur fibre par la relation :

$$D_{x,n} = \frac{F \cdot \bar{V}}{10 r_b \cdot V} \sum_i^n c_\tau \quad (21)$$

ou

$$D_{x,n} = \frac{F \cdot \bar{V}}{10 r_b \cdot V} c_0 \sum_i^n e^{-\lambda \tau} \quad (22)$$

Cette relation permet donc de calculer la quantité de colorant monté sur la fibre à une distance  $x$  et après  $n$  passage.

La quantité moyenne de colorant monté sur le tissu est :

$$\bar{D}_n = \frac{1}{L} \int_0^L D_{m,n} dm = \int_0^1 D_{x,n} dx \quad (23)$$

$L$  étant la longueur du tissu et  $m$  un point du tissu au temps  $t = \infty$ , à l'équilibre

$$\bar{D}_\infty = \frac{\bar{V}}{10 r_b \cdot V} c_0 \left( \varepsilon \left( \frac{V}{\bar{V}} + 1 \right) - 1 \right) \quad (24)$$

avec  $\epsilon = \frac{E_{\infty}}{100}$  ou  $E_{\infty}$  : épuisement en % de colorant à l'équilibre.

L'équation (22) rapportée à la quantité moyenne de colorant monté au temps  $\infty$  a permis à MORTON (8) d'étudier le phénomène de "queutage" sur 2 types de tissu, l'acétate de cellulose et le coton.

Le phénomène de "queutage" est le principal défaut observé sur le tissu teint sur Jigger. En effet, le tissu présente des différences de hauteurs de ton, voire de nuance entre les bouts, les bandes et le milieu de la pièce.

Sur les figures 5 et 6 MORTON a représenté la distribution du colorant le long d'une pièce de coton teinte en Jigger.

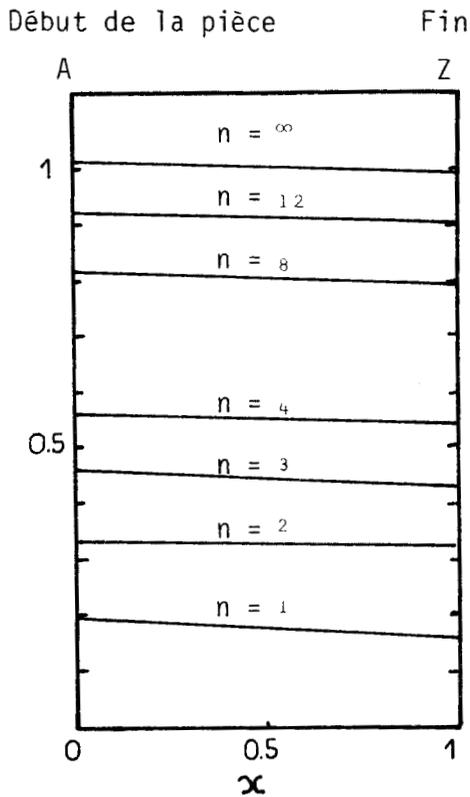


FIGURE - 5 -

Le colorant est ajouté en une seule fois à  $\tau = 0$

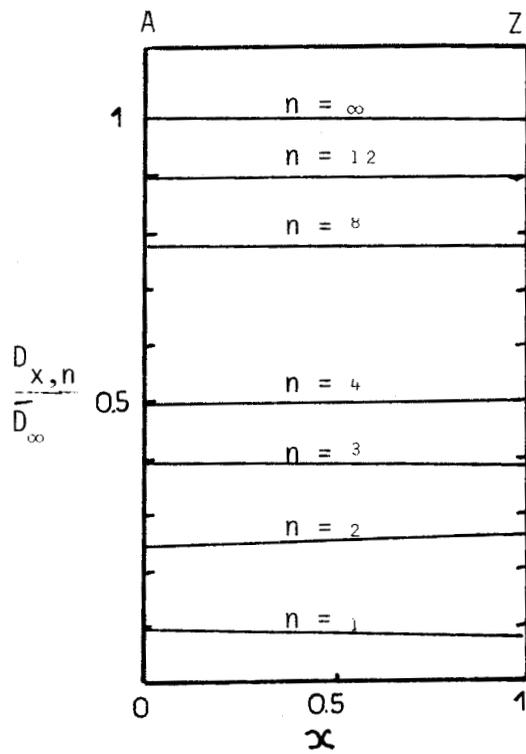


FIGURE - 6 -

Le colorant est ajouté en deux fois 1/2 à  $\tau = 0$

1/2 à  $\tau = 1$

On voit que l'unisson est meilleur dans le cas d'un ajout de colorant en deux fois.

Toutefois, le caractère de l'absorption du colorant par la fibre peut modifier le modèle idéal et par conséquent la quantité de colorant montée.

Ainsi trois cas ont été envisagés :

B) Modèle avec absorption incomplète :

L'isotherme d'absorption type Freundlich relie dans ce cas la quantité moyenne de colorant à celle du liquide interstitiel :

$$\bar{D}_n = k (\bar{C}_n)^{1/\gamma} \quad (25)$$

avec  $k = \text{constante}$

$$\gamma > 1$$

A la fin du premier tour, la concentration dans le bain est :

$$c_1 = c_0 e^{-\lambda} \quad (26)$$

Dans le second tour, il y aura échange entre le bain à  $c_1$  de concentration et le liquide interstitiel à  $\bar{C}_1$

D'où par récurrence au  $n^{\text{ième}}$  tour, l'échange se fait entre

$$c_{n-1} \rightleftharpoons \bar{C}_{n-1}$$

A l'équilibre les deux concentrations tendent vers  $(1-\epsilon) c_0$  et au  $n+1^{\text{ième}}$  tour la concentration sera égale à :

$$c_{n+1} = e^{-\lambda} (c_n - \bar{C}_n) + \bar{C}_n \quad (27)$$

Sur la figure 7, pour  $\gamma = 1$  Morton (9) a représenté le rapport  $\frac{c_n}{c_0}$  en fonction du nombre de tour. Les courbes sont calculées pour différentes valeurs d'absorption. L'expérience a été réalisée sur le coton.

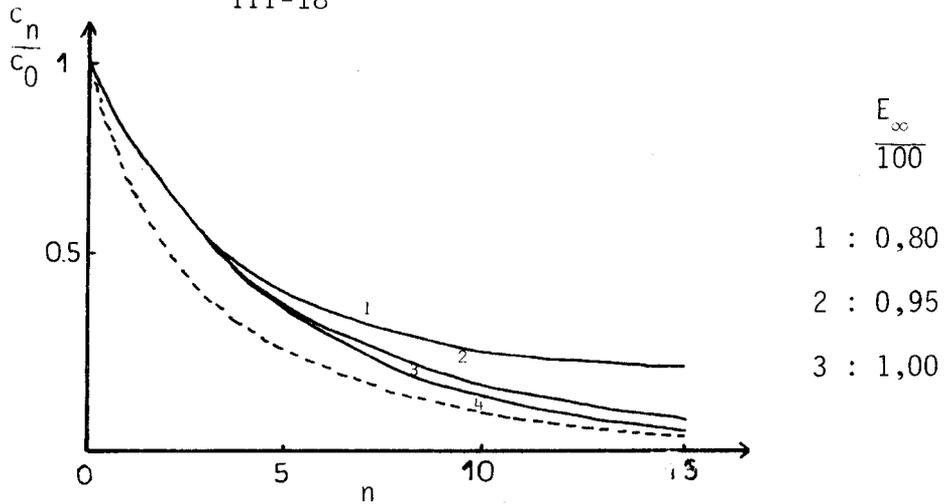


FIGURE - 7 - Absorption du colorant

On remarque que la différence d'absorption apparaît après un certain nombre de tour et elle est d'autant plus importante que  $\epsilon$  est petit.

C) Modèle avec "transport de bain"

Le tissu emmène entre l'instant où il sort du bain et avant qu'il ne soit enroulé une quantité supplémentaire de colorant en plus de la quantité normalement échangée dans le modèle idéal.

Cela se traduit par un nouveau facteur d'échange  $F'_n$  égal à :

$$F'_n = (1 + f_n)F \tag{28}$$

où  $f_n$  définit le facteur de "transport de bain".

$$\lambda'_n = \frac{F'_n}{V} \cdot \bar{V} = (1+f_n)\lambda \quad \text{Coefficient d'épuisement} \tag{29}$$

Les concentrations du bain avant et après le  $n^{\text{ième}}$  tour seront reliées par l'équation :

$$c_n = e^{-\lambda_n} c_{n-1} = c_0 e^{-\sum_1^n \lambda_n} = c_0 e^{-(n\lambda + \sum_1^n f_{n,\lambda})} \tag{30}$$

La courbe 4 de la figure 7 schématise l'équation (30). De cette dernière équation nous pourrions tirer deux remarques :

1°)  $f_n \rightarrow 0$  au fur et à mesure de la teinture.

2°) Que la concentration dans le bain au n<sup>ième</sup> tour est toujours plus petite en présence qu'en absence de phénomène de "transport de bain".

Les figures 8 et 9 illustrent la répartition du colorant le long du tissu.

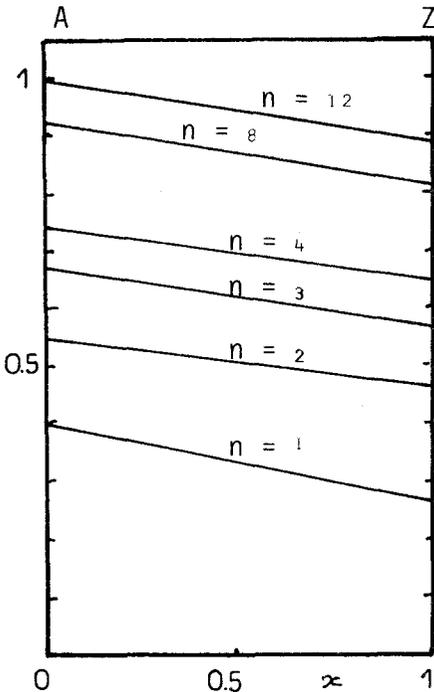


FIGURE - 8 -

Introduction du colorant à  $\tau = 0$

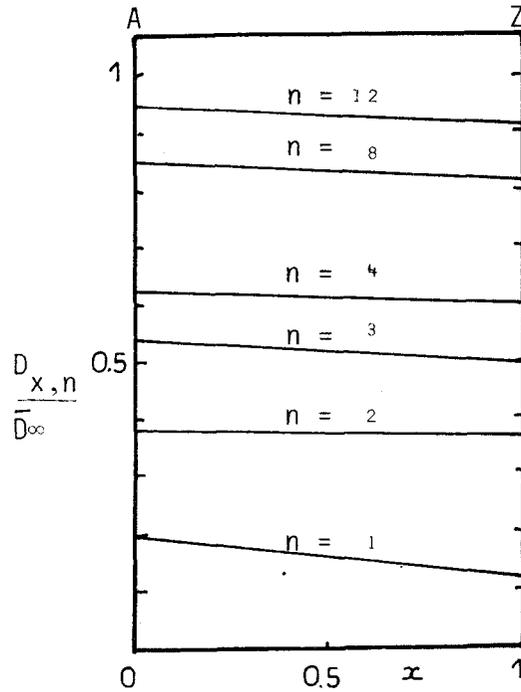


FIGURE - 9 -

Introduction du colorant en deux parts égales à  $\tau = 0 ; \tau = 1$

Quelque soit le mode d'introduction du colorant, ce phénomène de "transport de bain" conduit à un mal uni. Il provoque aussi une augmentation de l'épuisement surtout au début de la teinture.

D) Modèle à absorption lente :

MORTON a étudié l'effet d'une absorption lente, qui peut-être due à plusieurs phénomènes sur la distribution du colorant le long du tissu. Il considère qu'au changement de sens de rotation, l'extrémité du tissu échange de nouveau avec le bain avant que l'absorption n'ait eu le temps de se produire.

A la fin du premier tour, avant changement de sens, la concentration du liquide interstitiel sur l'extrémité Z serait :

$$C_{Z,1} = F \cdot C_1 \quad (31)$$

Au changement de sens l'échange se traduit par :

$$C_{Z,2} = F(c_1 - C_{Z,1}) = (1-F)F.c_1 \quad (32)$$

Cette situation se répète à chaque passage

En fonction de :

$\tau$  : temps depuis le dernier passage

$\theta$  : temps nécessaire pour l'absorption complète

Il démontre que dans le second tour la relation donnant la concentration du bain, à la condition que ( $0 < \sigma < \theta$ ) est :

$$c_{\sigma,2} = c_1 [(1-F \Psi(\sigma)) e^{-\lambda\sigma} + F \text{sh}(\lambda\sigma)] \quad (33)$$

$$\text{où : } \Psi(\sigma) = \lambda \int_0^{\sigma} e^{2\lambda\sigma} \epsilon_{\sigma} d\sigma \quad (34)$$

Dans le cas où  $\sigma = \theta$ , on est ramené au modèle idéal.

Morton a représenté figure 10 ce phénomène. Le tissu étant toujours le coton.

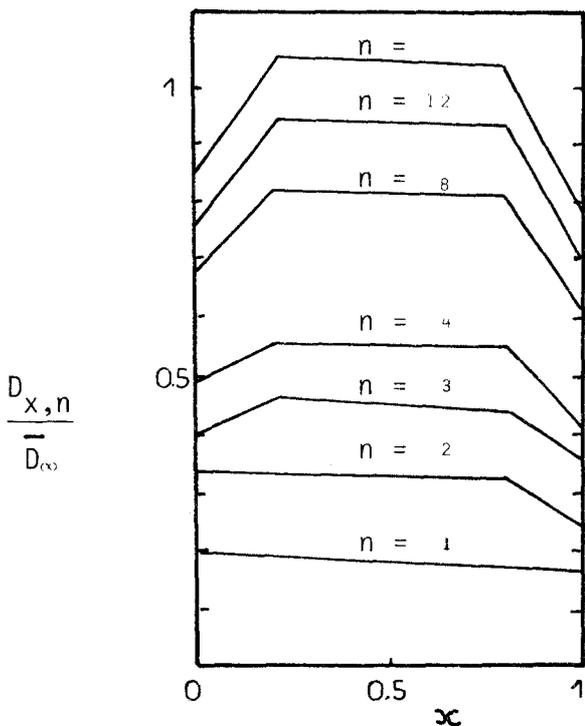


FIGURE - 10 -

Distribution du colorant dans le cas d'une absorption lente.

Nous remarquons le phénomène de "quentage" et la différence de nuance sur les extrémités de la pièce. Une absorption lente engendre un mal uni le long de toute la pièce.

L'étude du Jigger a été étendue à la seconde phase de la teinture.

### III-3.2.2. Influence du rinçage : (10)

Dans la phase rinçage, le modèle idéal (paragraphe III-3.2.A) peut-être appliqué pour étudié quantitativement les particules de colorant non fixées sur les fibres, ainsi que le phénomène de "quentage"

Trois cas de rinçage ont été envisagés :

- Le textile est arrosé d'eau
- Rinçage avec changement de bain à la fin de chaque tour
- Rinçage dans un seul bain.

#### A) Rinçage par arrosage d'eau :

Dans ce cas, le tissu est toujours en contact avec l'eau. Par conséquent, dans l'équation générale de l'échange :

$$C_{x,n} = F.c + (1-F) C_{x,n-1} \quad (35)$$

où

c : centration du bain

C : centration dans le liquide interstitiel

n : nombre de tour

x : distance d'un point quelconque le long du tissu.

la concentration du bain  $c = 0$

d'où

$$C_{x,n} = (1-F) C_{x,n-1} \quad (36)$$

Si  $C_0$  est constant le long du tissu alors  $C_n$  est aussi constant et égal à :

$$C_n = (1-F)^n C_0 \quad (37)$$

Le calcul du rapport  $\frac{c_n}{c_0}$  définit la quantité de particules enlevées à chaque tour. Après le 4ème tour, il n'est pas nécessaire de continuer le rinçage la concentration dans le liquide interstitiel est nulle. Il est clair que l'efficacité du rinçage dépend du facteur d'échange.

B) Rinçage avec changement de bain :

Au début de chaque tour, le bain de rinçage est changé. Mais pendant le déroulement du tissu la concentration dans le bain augmente.

En général :

$$\left(\frac{dc}{dx}\right)_n = (-1)^{n+1} \lambda (c_{x,n-1} - c_{x,n}) \quad (38)$$

pour  $n = 1$

$$\frac{dc}{dx} = \lambda (c_0 - c) \quad (39)$$

Avec les conditions aux limites puis intégration on obtient :

$$c_{x,1} = c_0 (1 - e^{-\lambda x}) \quad (40)$$

ou en considérant la concentration du liquide interstitiel.

$$c_{x,1} = c_0 (1 - F \cdot e^{-\lambda x}) \quad (41)$$

pour  $n = 2$

les équations sont plus compliquées, car il faut réinitialiser le bain ; donc d'autres conditions aux limites en tenant compte de ce qui a été enlevé lors du précédent tour.

L'expérimentation et le calcul de  $\frac{c_{x,n}}{c_0}$  ont été réalisés sur plusieurs rinçages (plusieurs tours). La distribution des particules restantes dans le liquide interstitiel est représentée sur la figure 11.

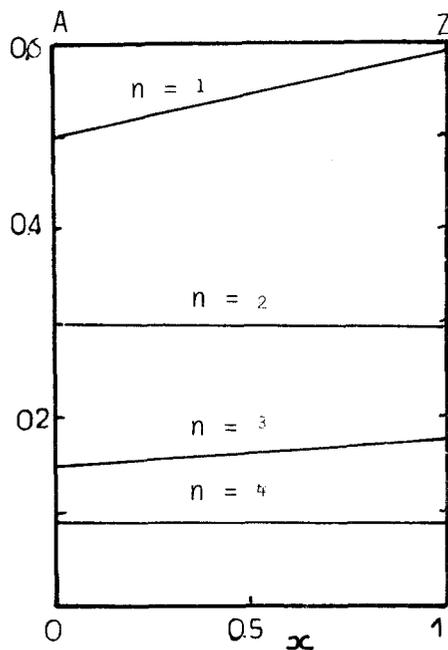


FIGURE - 11 -

Distribution de particules restantes lors d'un rinçage avec changement de bain.

C) Rinçage dans un unique bain :

Dans ce cas, le rinçage se fait dans le même bain. Pour le premier tour l'équation sera identique au cas précédent. Mais pour tous les suivants, du fait de la présence des particules de colorant dans le bain, l'échange est différent. La figure 12 représente la distribution du colorant restant dans le liquide interstitiel le long du tissu.

Le rôle de la température est important dans la phase rinçage, mais aucune bibliographie n'en fait état. Cependant le rinçage est pratiqué toujours avec une eau à la température ambiante. Ce qui fait que l'opération se déroule dans un bain où la température décroît lentement. Si elle est trop basse, le dégorçage n'est pas assez important, il risque d'y avoir une déteinte du textile lors de son utilisation.

#### III-4 CONCLUSION

De l'ensemble de cette étude, il ressort que le phénomène de teinture dépend principalement :

- de quatre paramètres : température, adjuvant, rapport de bain et temps (nombre de tour)
- des conditions d'absorption du colorant, fonction de sa nature et de son affinité
- des caractéristiques du textile
- du mode de rinçage.

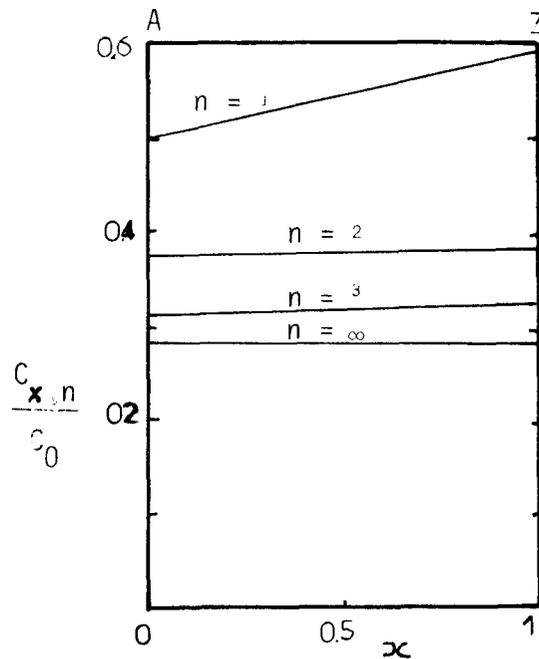


FIGURE - 12 -

Distribution des particules restantes avec un unique bain.

Il est toutefois intéressant de tirer quelques remarques importantes en vue de réaliser une teinture sur un Jigger quelconque. Il faut :

- fixer convenablement les paramètres pour avoir une absorption immédiate, complète et uniforme du colorant par les fibres, c'est-à-dire qu'il faut s'approcher du modèle idéal.
- éviter une absorption lente
- introduire le colorant en plusieurs fois
- enfin, rincer le tissu dans plusieurs bain, avec vidange et renouvellement complet d'eau, assorti d'une température décroissante.

Ces remarques améliorent l'unisson et limitent le phénomène de "queutage". Cette étude, sur le comportement du colorant dans les fibres, ainsi que dans le bain associée à une analyse colorimétrique sur le tissu lors d'une teinture sur Jigger, permettra de définir et d'établir une procédure de teinture. Ce problème sera traité dans le Chapitre suivant.

- B I B L I O G R A P H I E -  
-----

- /1/ HANSON, NEALE *et* STRIN GFELLOW  
*Trans. Far. Soc.* 1935, 31, 1718
- /2/ WILLIS, WARWICKER, STANDING *et* URQUHART  
*Trans. Far. Soc.* 1945, 41, 506.
- /3/ CRANK  
*J. Soc. Dyer and Col.* - 1947, 63, 293.
- /4/ PETERS *et* VICKERSTAFF  
*Proc. Roy. Soc.* - 1948, 192, A 292.
- /5/ VICKERSTAFF  
*The Physical Chemostry of dyeing* - 1950
- /6/ E. FRANCE  
*J.S.D.C.* - V. 75 - 1959, p. 477.
- /7/ W.F. KILBY  
*J.S.D.C.* - V. 76 - 1960, p. 479.
- /8/ T.H. MORTON  
*J.S.D.C.* - V. 81 - 1965, p. 52
- /9/ T.H. MORTON  
*J.S.D.C.* - V. 81 - 1965, p. 93
- /10/T.H. MORTON  
*J.S.D.C.* - V. 81 - 1965, p. 150

## CHAPITRE IV

-----

### SUIVI DE TEINTURE ET DU RINÇAGE : MODÉLISATION.

IV-1 - INTRODUCTION.....	IV-1
IV-2 - IDENTIFICATION DU PROCESSUS.....	IV-1
IV-3 - SUIVI DE TEINTURE.....	IV-3
IV-3.1. Matière et produit de teinture.....	IV-3
IV-3.2. Fixation des paramètres et établissement d'un diagramme temporel.....	IV-5
IV-4 - PHASE RINÇAGE.....	IV-21
IV-4.1. Mode de rinçage.....	IV-21
IV-4.2. Durée ou nombre de rinçage.....	IV-22
IV-4.3. Prédiction de la couleur sèche.....	IV-23
IV-4.4. Expérimentation.....	IV-26
IV-5 - CONCLUSION.....	IV-30
BIBLIOGRAPHIE.....	IV-31

IV-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons étudier le phénomène de teinture sur la base uniquement de données colorimétriques. Les mesures sont faites en mouillé, par l'intermédiaire du capteur colorimétrique, puis elles seront transposées en sec.

L'évaluation qualitative et quantitative des principaux paramètres pouvant influencer l'unisson, la solidité et l'échange entre la solution colorée et les fibres textiles, permet une meilleure connaissance du processus. A cette fin, il a été nécessaire d'axer notre recherche sur l'évolution colorimétrique dans les deux principales phases du phénomène de teinture qui sont :

- *la teinture proprement dite (montée colorant - fibres de textile)*
- *le rinçage.*

Par la suite nous avons établi un diagramme temporel pour chacune des deux phases. Enfin, nous avons mis au point une loi qui régit la phase rinçage. Il en découle une prédiction de la couleur finale sèche dès le stade de la vidange.

Compte-tenu de la non-commandabilité du système dans la phase de rinçage, une phase de "nuançage" a été introduite avant la vidange. Comme son nom l'indique, la phase de "nuançage" est :

- une phase de contrôle de la reproduction
- une phase de correction éventuelle de la nuance pour atteindre la conformité du coloris type.

IV-2 IDENTIFICATION DU PROCESSUS DE TEINTURE

Suite à l'étude thermodynamique-cinétique de la teinture et aux performances propres du Jigger, il a été possible d'identifier les principaux paramètres intervenant lors d'un processus de teinture.

Nous nous sommes proposés d'étudier, sur la base de données expérimentales, l'influence de chacun de ces paramètres sur les échanges entre un bain de colorant et des fibres de textile.

Ainsi, la connaissance de l'évolution colorimétrique du tissu permet de définir d'une façon beaucoup plus exacte la manière de conduire une teinture.

Les paramètres à considérer sont :

α) La température :

L'apport d'énergie thermique active la réaction et favorise la montée des colorants.

β) Adjuvants ou électrolytes :

L'ajoute d'un adjuvant ( $\text{NaCl}$  ou  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) facilite l'adsorption du colorant.

γ) Le rapport de bain :

Le volume du bain joue un grand rôle, car la quantité de colorant restant dans le bain est proportionnelle au volume du bain.

τ) Le nombre de cycles et temps de teinture :

13 cycles sont équivalents à 10 minutes.

Des courbes de réémission ont été prélevées par l'intermédiaire du capteur colorimétrique à des intervalles réguliers de temps, tout au long du processus de teinture.

Le problème consiste à déterminer dans un premier temps l'influence de chacun de ces paramètres, tout en maintenant constant les autres paramètres dans le déroulement de la teinture. Quatre cas ont été envisagés et dont l'étude doit tenir compte, outre le respect du coloris, des qualités du produit fini, qui sont :

1°) L'unisson, c'est-à-dire la bonne répartition du colorant dans tout le volume du tissu. Il arrive fréquemment d'observer des différences sensibles de nuances entre les extrémités de la bande, ainsi qu'entre ses côtés.

2°) La solidité une fois le colorant choisi. Ceci concerne principalement sa fixation sur la fibre.

3°) L'épuisement des colorants du bain qui intervient dans le coût de l'opération et le taux de pollution des rejets.

Chaque cas a fait l'objet de plusieurs teintures. Des courbes de réémissions ont été prélevées lors de ces teintures. Ensuite, une étude colorimétrique comparative est faite sur la base de ces courbes de réémission et sur les qualités demandées.

Les principales conclusions que nous pouvons tirer sont :

- Une élévation progressive de la température jusqu'au voisinage de l'ébullition que l'on maintient, pendant le temps nécessaire, pour obtenir la pénétration et l'unisson.

- L'introduction de la proportion de NaCl se fait graduellement. Des tentatives à quantités constantes de NaCl ont donné une précipitation du colorant sur les fibres de textile en début de la bande. On a constaté un mal uni entre les deux chefs extrêmes et sur les côtés de la bande.

Le suivi colorimétrique en cours de teinture a donc permis de régler ces paramètres, suivant le principe d'une montée contrôlée du colorant pour éviter plus particulièrement le mauvais unisson.

#### IV-3 SUIVI DE TEINTURE

##### IV-3.1. Matière et produit de teinture

L'étude a été limitée à un type de matière en l'occurrence le coton tissé teint avec les trois colorants suivants :

- Rouge Diazol lumière 6 B L 1750
- Bleu " " R Extra 1350
- Jaune " " 4 R L

Chacun de ces colorants est classé dans un groupe suivant sa caractéristique tinctoriale et la solidité de la teinture, qu'il permet d'obtenir /2/. En effet, afin de faciliter le choix des colorants en fonction des exigences des articles à teindre, chaque colorant possède une série de renseignements concernant son mode d'emploi. Comme indication on trouve :

- Le procédé de teinture :

Le procédé N est réservé aux colorants qui doivent être appliqués de préférence en milieu neutre. Par contre, le procédé A convient pour les colorants qui donnent leur plein rendement et leur nuance normale en bain alcalin.

- Le groupe d'affinité :

L'affinité des colorants classés dans le groupe 1 augmente régulièrement avec la température pour atteindre son maximum à l'ébullition. Les colorants réunis dans le groupe 2, présentent un maximum d'affinité pour une température inférieure à 100°C.

- La classe des colorants :

Il y a trois classes de colorants /3/

. Classe A : Colorants de bon unisson, migrant facilement, applicables sans précautions particulières.

. Classe B : Colorants de bonne migration, mais dont l'affinité croît fortement en fonction des quantités d'électrolytes ajoutées dans le bain.

. Classe C : Colorants de forte affinité et d'unisson délicat.

L'ensemble de ces renseignements et les différentes courbes présentées sur les planches 4.1., 4.2., 4.3., sont fournis pour déterminer les meilleures conditions de teinture.

Les colorants ont été choisis en fonction de leurs propriétés et de leurs caractéristiques tinctoriales voisines et des solidités qu'ils permettent d'obtenir sur les articles en coton.

Ils présentent une similitude dans :

- leur courbe d'affinité
- l'influence des adjuvants sur l'affinité
- leur pouvoir de migration

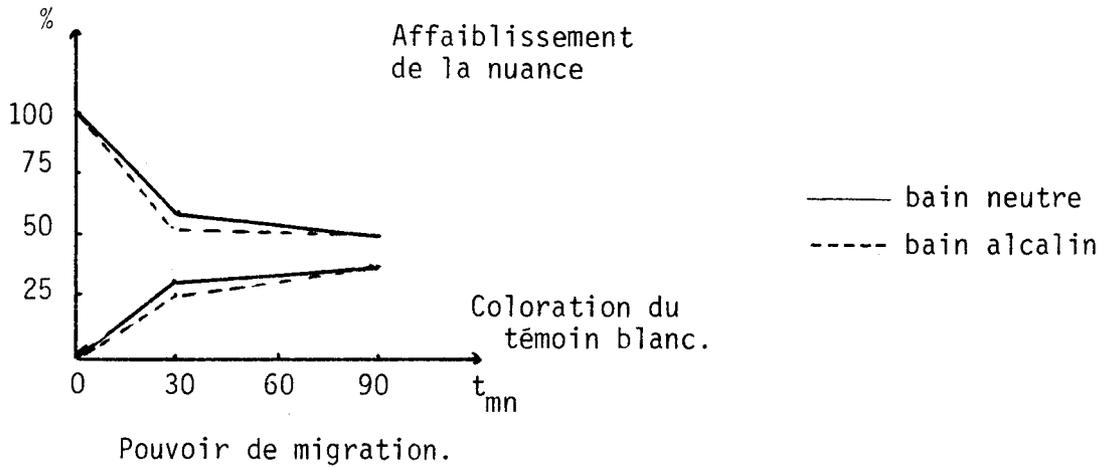
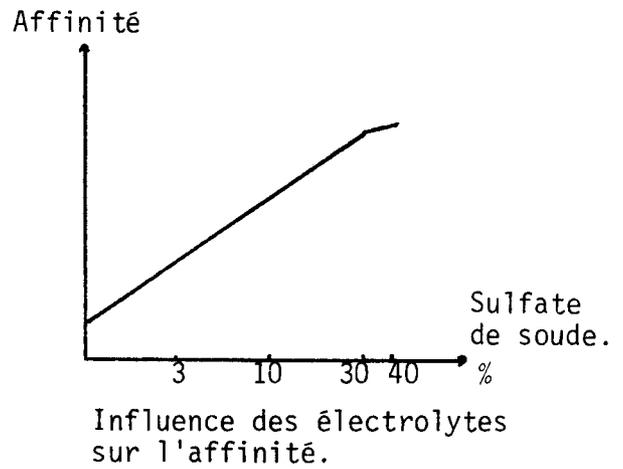
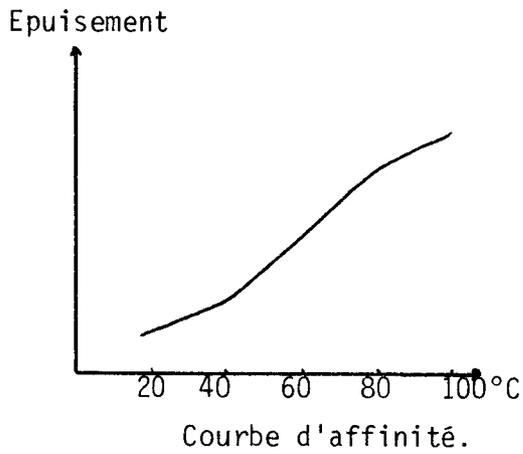
Toutefois les colorants doivent être adaptés à l'état de la marchandise et à l'appareillage dont on dispose. L'analyse d'une teinture par des mesures colorimétriques permet de fixer les paramètres dont dépend la teinture pour une meilleure utilisation de ces colorants.

#### IV-3.2. Fixation des paramètres et établissement d'un diagramme temporel.

Sur un Jigger du laboratoire, il a été teint des pièces de coton de 210 g et de 6 m de long sur 30 cm de large.

La teinture a été faite en monochromie, afin d'analyser le comportement de chacun des trois colorants sur le tissu.

Cependant, nous avons opéré en bains aussi courts que possible, afin de bien épuiser les colorants. Le rapport de bain est égale à 1/20.

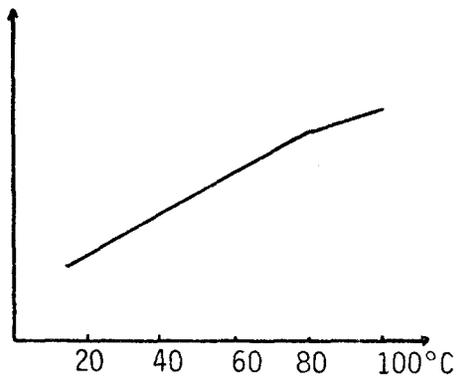


- Procédé de teinture : A ou N
- Groupe d'affinité : I
- Classe : A

. REMARQUES : Colorant de nuance rouge-bleuâtre très solide à la lumière.

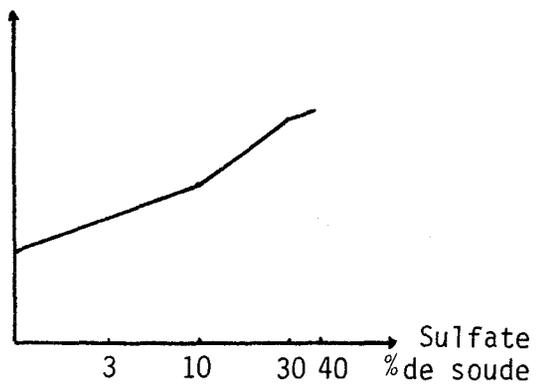
Planche 4.1. Rouge Diazol lumière 6 B L.

Epuisement

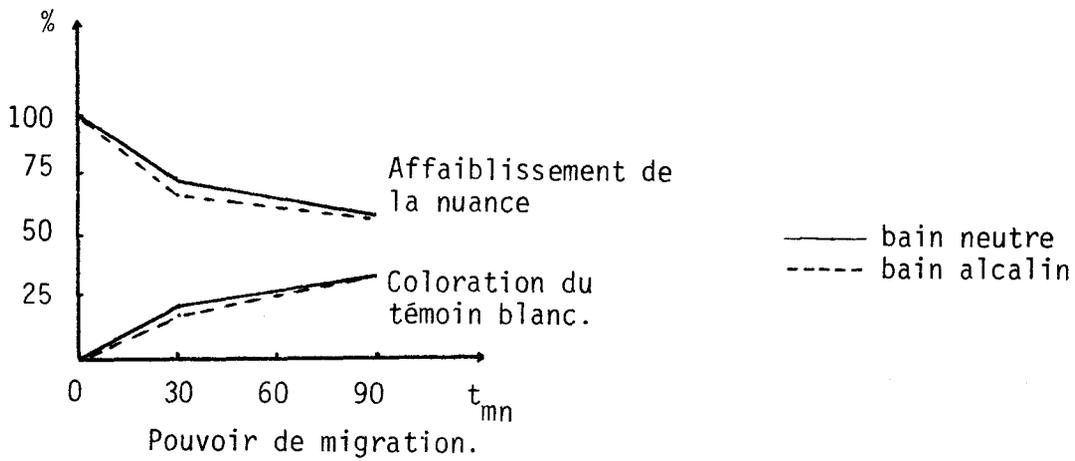


Courbe d'affinité

Affinité



Influence des électrolytes sur l'affinité.



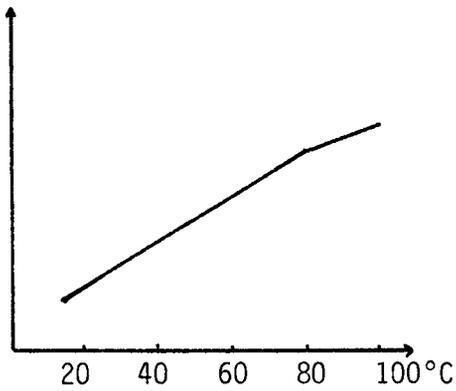
- Procédé de teinture : A ou N
- Groupe d'affinité : II
- Classe : A

. REMARQUE : Colorant d'emploi très étendu pour la réalisation de bleu moyen à foncé. Bonne solidité.

Planche 4.2. Bleu Diazol lumière R extra.

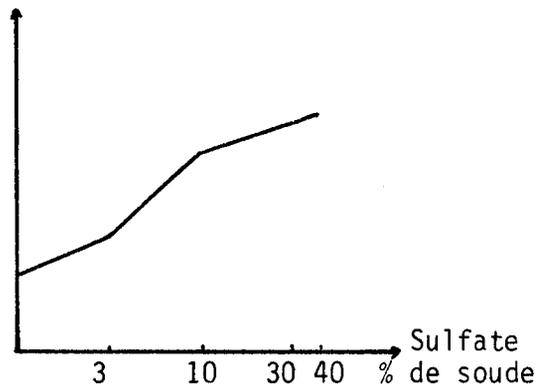


Epuisement

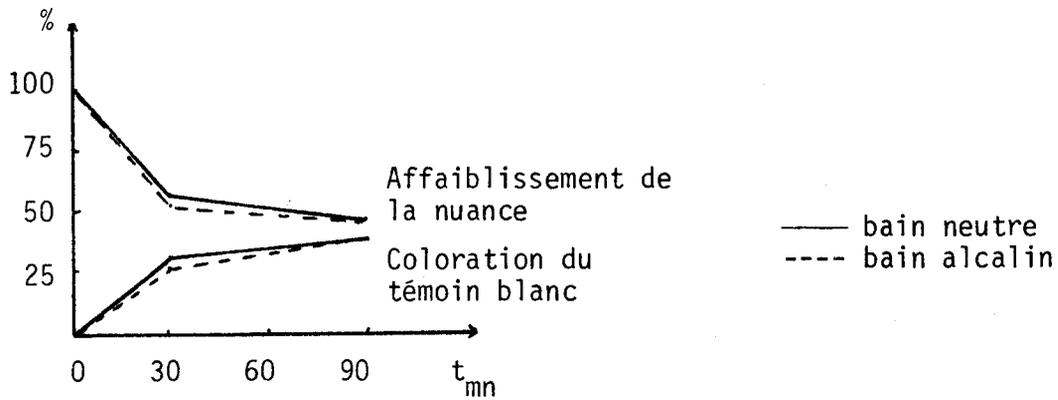


Courbe d'affinité

Affinité



Influence des électrolytes sur l'affinité.



Pouvoir de migration.

- Procédé de teinture : A ou N
- Groupe d'affinité : I
- Classe : B

. REMARQUE : Colorants de bonne solidité générale, caractérisés plus particulièrement par sa résistance à la lumière.

Planche 4.3. Jaune diazol lumière 4 R L.



Cette restriction sur :

- le choix de la marchandise
- les colorants
- et la monochromie

est le fait que les lois citées dans le précédent chapitre, régissant la thermodynamique cinétique de la teinture sont très mal connues. Cela est dû justement à la multiplicité des classes de colorants et de leurs interactions physico-chimiques avec les matières à traiter.

Il est à noter qu'une teinture se fait le plus souvent en trichromie, quelquefois en dichromie. Elle ne se fait pratiquement jamais en monochromie.

L'analyse de la teinture en monochromie n'est qu'une étape préliminaire d'une étude d'un phénomène très compliqué qui est la teinture.

Tous les paramètres ont été réglés :

- en fonction des caractéristiques tinctoriales des colorants utilisés et leur comportement vis à vis de la nature des fibres de textile (voir planches 4.1, 4.2, 4.3).
- et à la suite d'une étude menée pendant la phase de teinture proprement dite sur une série de teinture traditionnelle.

Pour une teinture sur du coton avec les 3 colorants précités, l'évolution de la température suit le schéma de la figure 1.

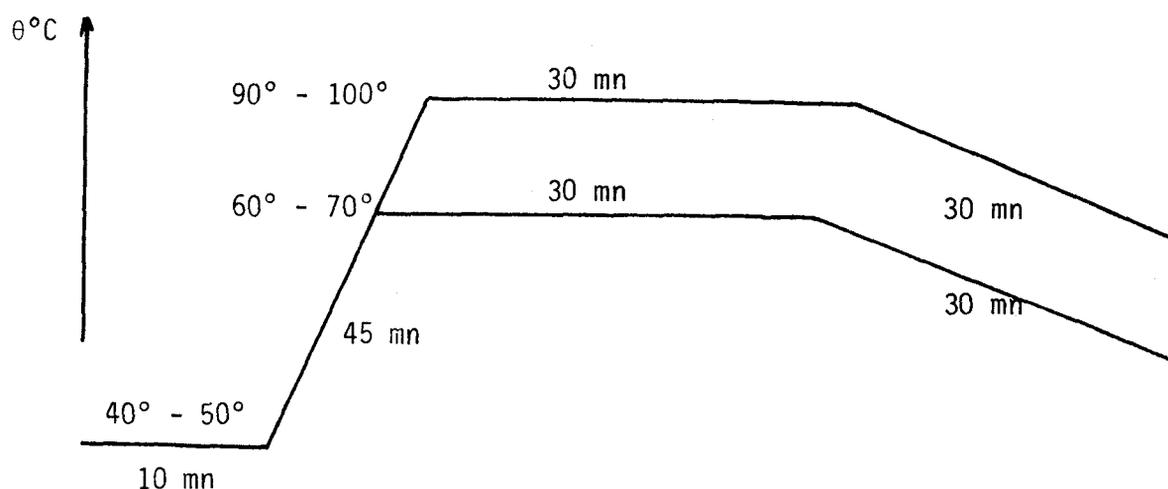


FIGURE - 1 - Evolution de la température.

La température est déduite de la courbe d'affinité propre aux colorants. Le procédé de teinture employé est donc à température croissante.

La durée d'une teinture traditionnelle est dans ce cas de deux heures environ avec introduction des adjuvants soit au début dans le bain, soit au contraire, ils sont ajoutés par partie en cours de teinture.

Le problème consiste par conséquent à redéfinir l'évolution de la température et l'introduction graduelle des proportions de NaCl pour teindre à l'unisson et avec la solidité requise pendant un minimum de temps.

Des mesures de courbes de réémission seront prélevées toutes les 10 minutes par l'intermédiaire du capteur colorimétrique. Ensuite elles seront tracées, puis analysées par un ordinateur.

Des essais de teinture à plusieurs niveaux de températures, nous ont permis de fixer l'évolution de la température (figure 2).

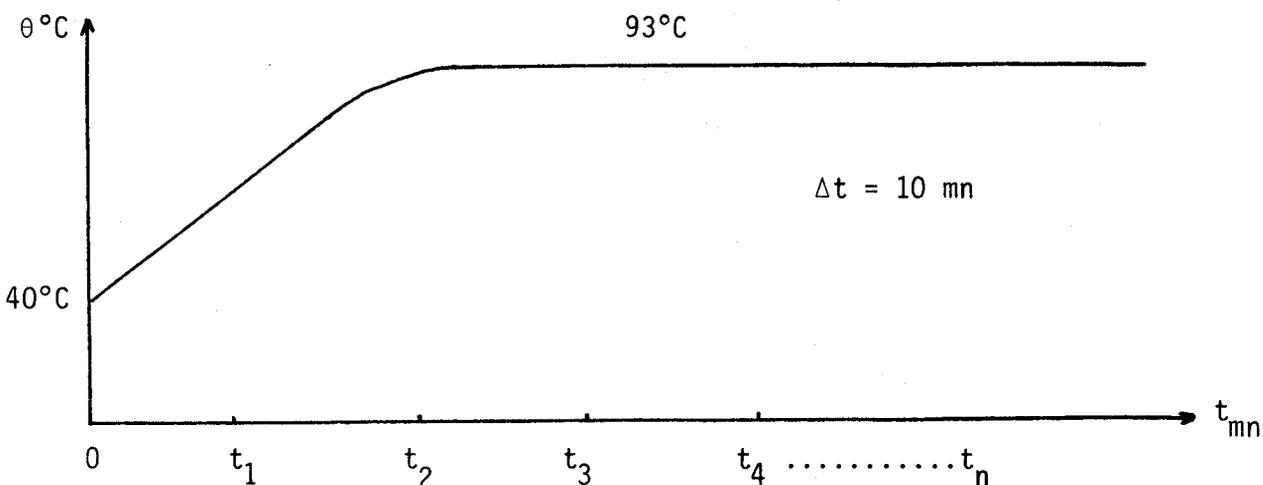


FIGURE - 2 - Evolution de la température.

Nous introduisons le tissu dans un bain à  $40^\circ\text{C}$ , puis nous élevons, progressivement, la température jusqu'à  $93^\circ\text{C}$ . Un thermostat assure la régulation de la température. Cette augmentation progressive de la température active la réaction et favorise la montée des colorants. Elle assure un taux maximum de fixation (défini par le rapport entre la quantité de colorant fixé sur la fibre et la quantité mise en oeuvre dans le bain de teinture) et une rapidité de croissance de ce taux.

D'autre part, la quantité de chlorure de sodium est fixée suivant le poids de la matière à teindre. Rappelons à cet effet que les colorants sont appliqués en présence d'un sel, dont le rôle est :

- de permettre une absorption du colorant : si les proportions ne sont pas respectées, il risque d'y avoir précipitation du colorant sur le début de la pièce de textile, par conséquent une différence de hauteur de ton, voir de nuance.

- et d'assurer le meilleur épuisement du bain. Il est conseillé d'introduire graduellement des proportions de NaCl dans le bain au cours de la teinture. Plusieurs tentatives nous ont poussé à fixer des proportions croissantes de NaCl. Elles seront introduites en quatre fois, à intervalles de temps réguliers (figure 3).

$\Delta t = 10 \text{ mn}$

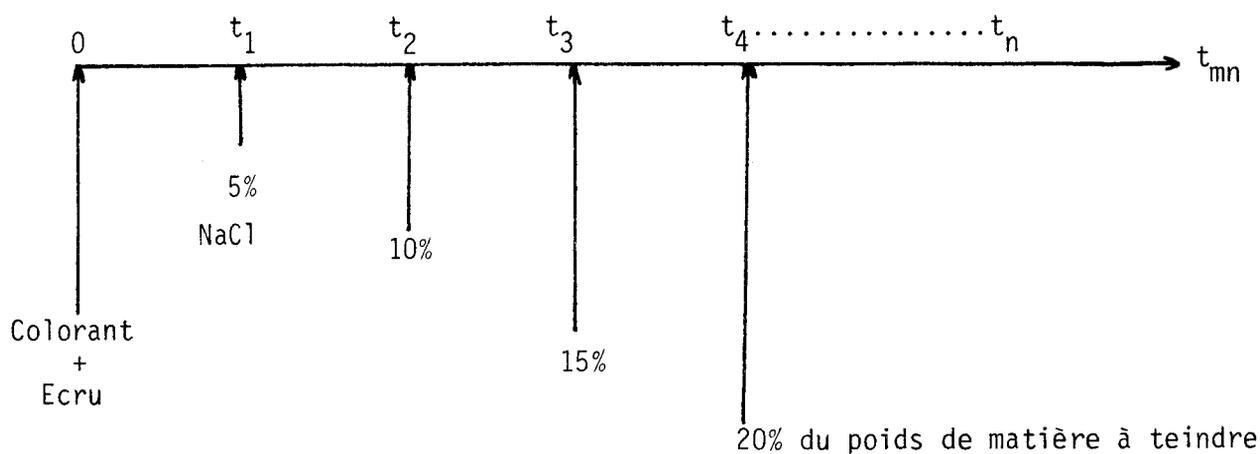


FIGURE - 3 - Introduction de NaCl.

Tels qu'ils sont définis, l'évolution de la température, ainsi que le mode d'utilisation de NaCl, principaux facteurs d'une réussite d'une teinture, assurent

- une montée contrôlée du colorant sur la fibre
- une pénétration et fixation du colorant suffisantes
- un épuisement optimal du bain de teinture.

Une fois les paramètres fixés, il s'agit de déterminer une procédure pour teindre, plus rapidement, un textile sans perdre de vue les qualités exigées.

La manière de résoudre ce problème a été la suivante :

Après l'ajout de la quatrième proportion de NaCl, le tissu est teint pendant un temps indéterminé à température constante égale à 93°C. Des courbes de réémission seront prélevées toutes les 10 minutes et tracées par le calculateur. Ces courbes spectrales de réémission, définissant parfaitement une couleur, seront comparées chronologiquement à l'aide de calcul de différence de couleur.

Sur la figure 4, nous avons représenté l'évolution des courbes spectrales de réémission à intervalles de temps réguliers pour les trois coloris suivants :

- Rouge à 0,5 % de concentration
- Jaune à 0,5 % de concentration
- Bleu à 0,5 % de concentration.

Graphiquement, nous constatons que les courbes de réémission au bout de 60 minutes de teinture, se confondent plus particulièrement pour les longueurs d'ondes dominantes à chaque coloris.

Par l'intermédiaire d'un calcul de différence de couleur, la comparaison des courbes spectrales prélevées au-delà de 60 minutes du début de la teinture donne un écart en luminosité et en chromaticité très minime. Cet écart se situe entre 0,60 et 1,08 unités LAB. Cela représente une valeur acceptable pour juger de la conformité de la nuance entre deux mesures successives.

Par conséquent, nous pouvons affirmer que le taux de fixation maximum est atteint au bout de 60 minutes de teinture. La couleur reste constante. Elle n'évolue plus quelque soit la durée ou le nombre de passage.

En outre, l'éclaircissement du bain atteint lui aussi son équilibre et reste inchangé au-delà de la période d'une heure de teinture.

Pour chaque expérience et après rinçage, un contrôle de qualité sur toute la pièce est effectué.

Cependant, par le biais de la courbe de réémission, nous ne pouvons pas séparer chronologiquement les phénomènes de diffusion, de pénétration et de fixation du colorant dans la fibre, mais la connaissance de la non évolution de la courbe de réémission d'une part et de la constance du bain d'autre part, permet d'affirmer que l'équilibre entre le tissu et le bain est acquis et donc que la phase de teinture est achevée.

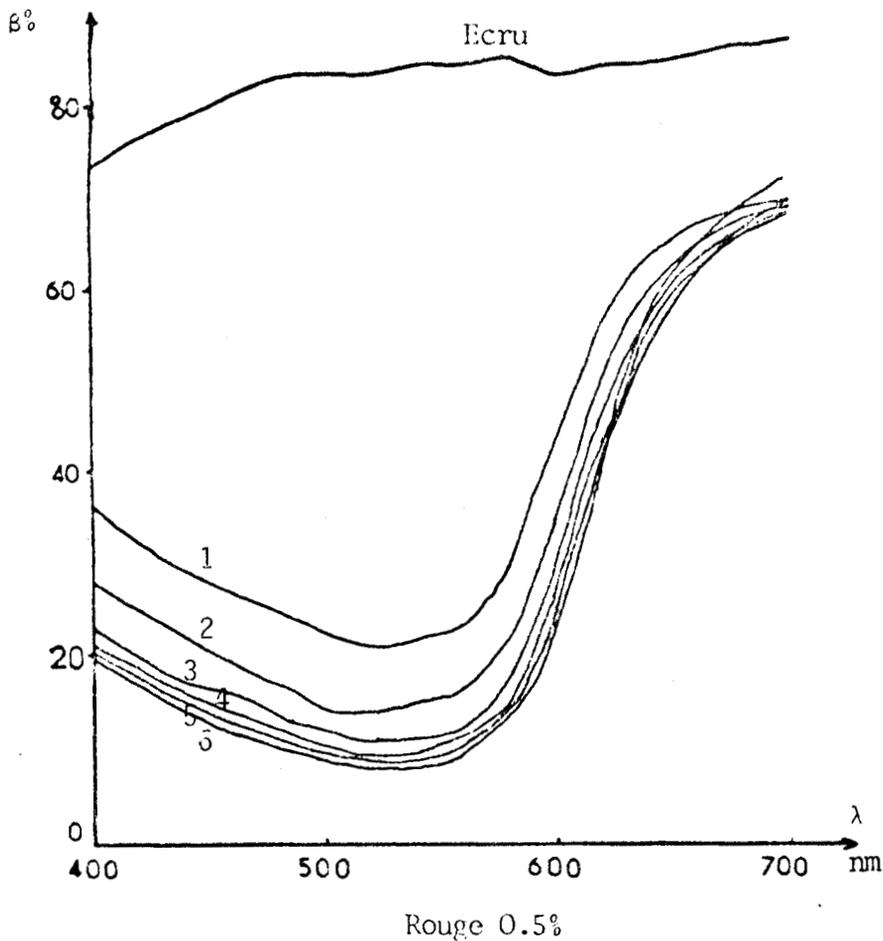
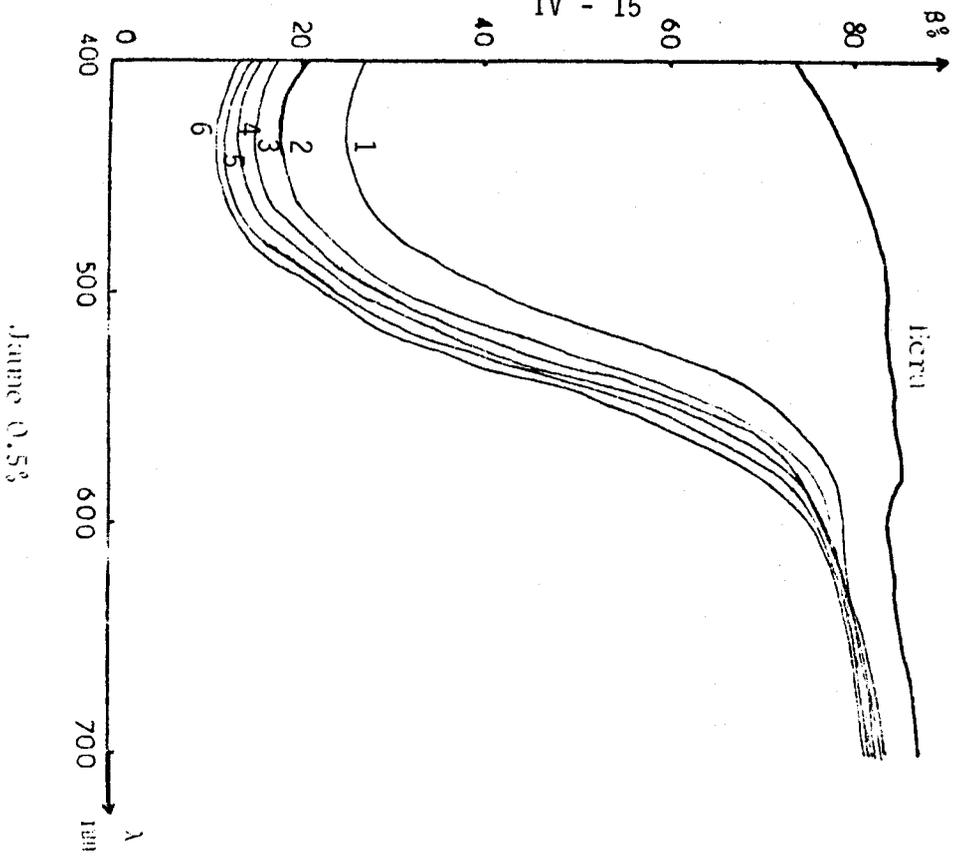
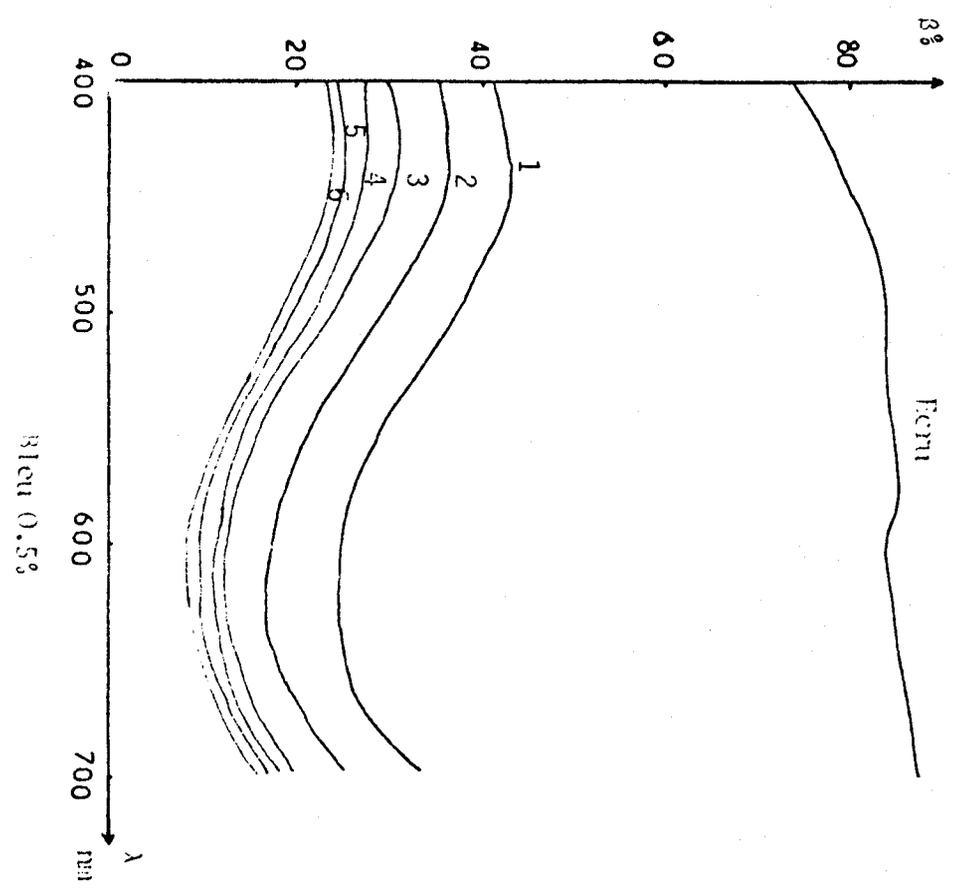


FIGURE - 4 -

IV - 15



Jaune 0.5%



Bleu 0.5%



Figure - 4 -

Dans le même ordre d'idée et pour justifier les constatations faites précédemment, nous avons procédé à une autre analyse graphique. Cette analyse sera faite entre la soixantième minute de teinture et l'instant de la vidange.

La première partie consiste à représenter à différentes longueurs d'ondes, les coefficients de réémission en fonction du temps de teinture (figure 5).

L'allure des courbes montre que les coefficients de réémission tendent vers une constante. Cette constante est la valeur limite propre à chaque type de colorant de concentration connue et de longueur d'onde bien définie. Les coefficients chutent brusquement puis se stabilisent après 60 minutes de teinture.

Dans la deuxième partie de l'analyse, nous avons utilisé les nouvelles recommandations de la C I E /4/.

Sur le plan CIELAB 1976, nous avons tracé l'évolution de la teinte de la saturation, ainsi que l'allure de la clarté psychrométrique L en fonction du temps de teinture (figure 6).

Les couples teinte-saturation définis dans le système d'axe par les points 7, 8 et 9 évoluent très peu autour du point 6.

Quant à la clarté psychrométrique, elle décroît jusqu'à un minimum fonction du colorant et de la concentration du tissu. Elle ne subit qu'une très faible variation.

Ces variations sont dues principalement à l'imprécision lors de la prise de la mesure et à la dérive de l'instrument de mesure.

Les résultats nous ont permis de définir la méthode à appliquer pour teindre plus rapidement que la méthode traditionnelle, une pièce de textile. Le tissu est teint avec la même efficacité, c'est-à-dire avec conservation de l'unisson et de la solidité, facteurs primordiaux de la réussite d'une teinture.

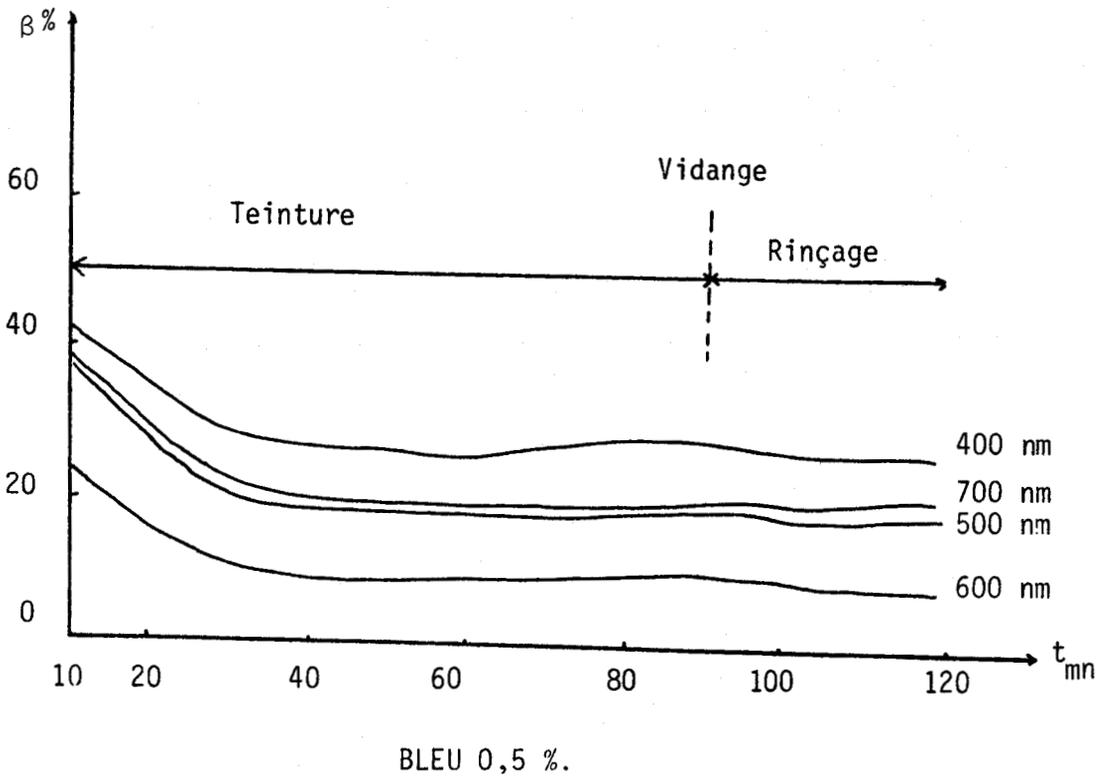
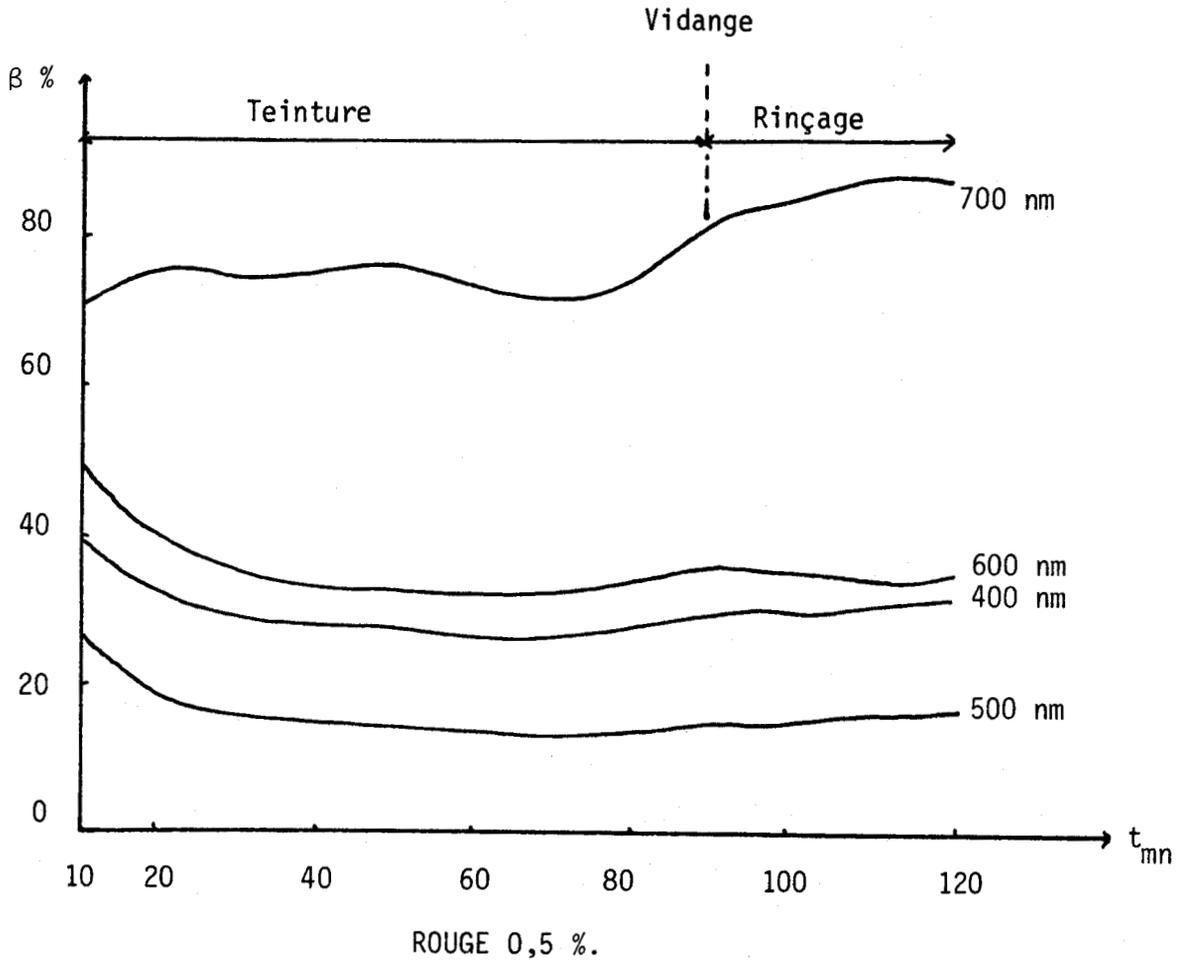
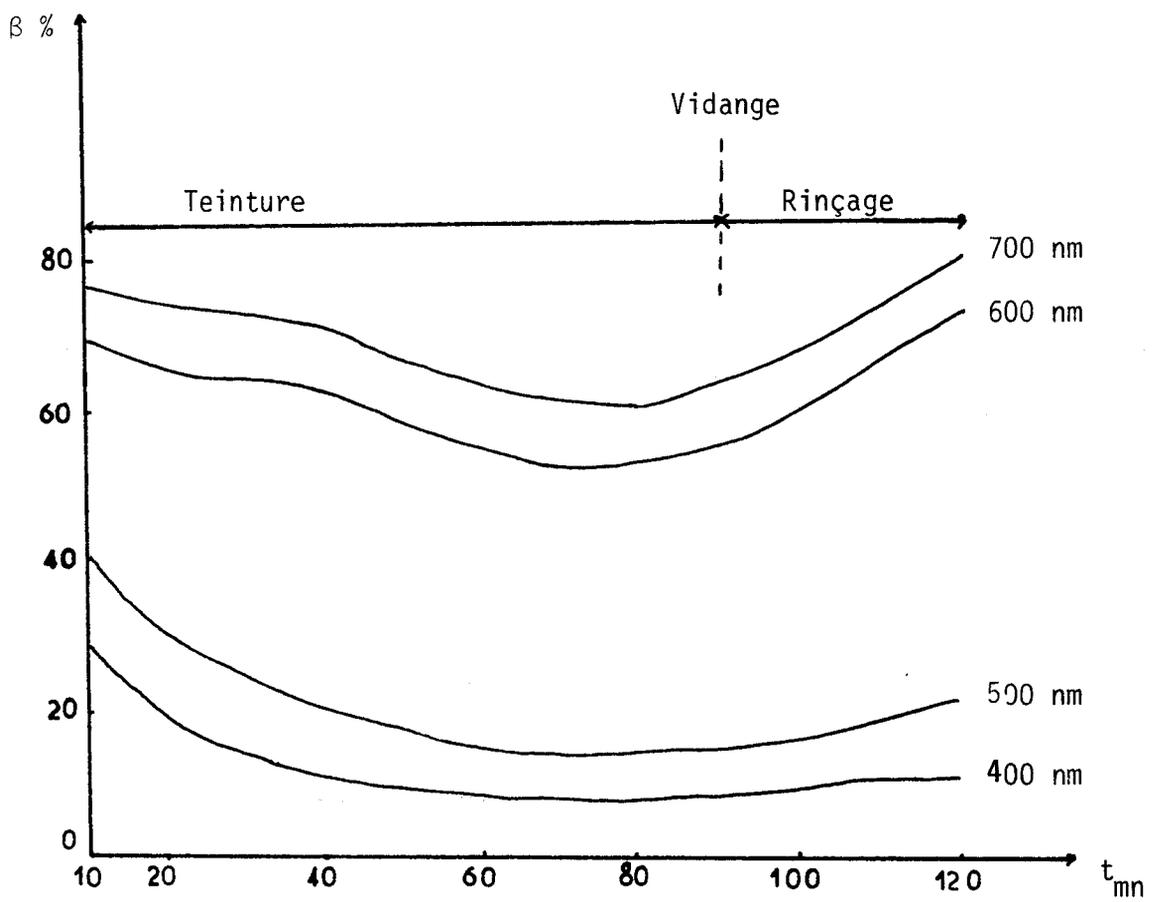


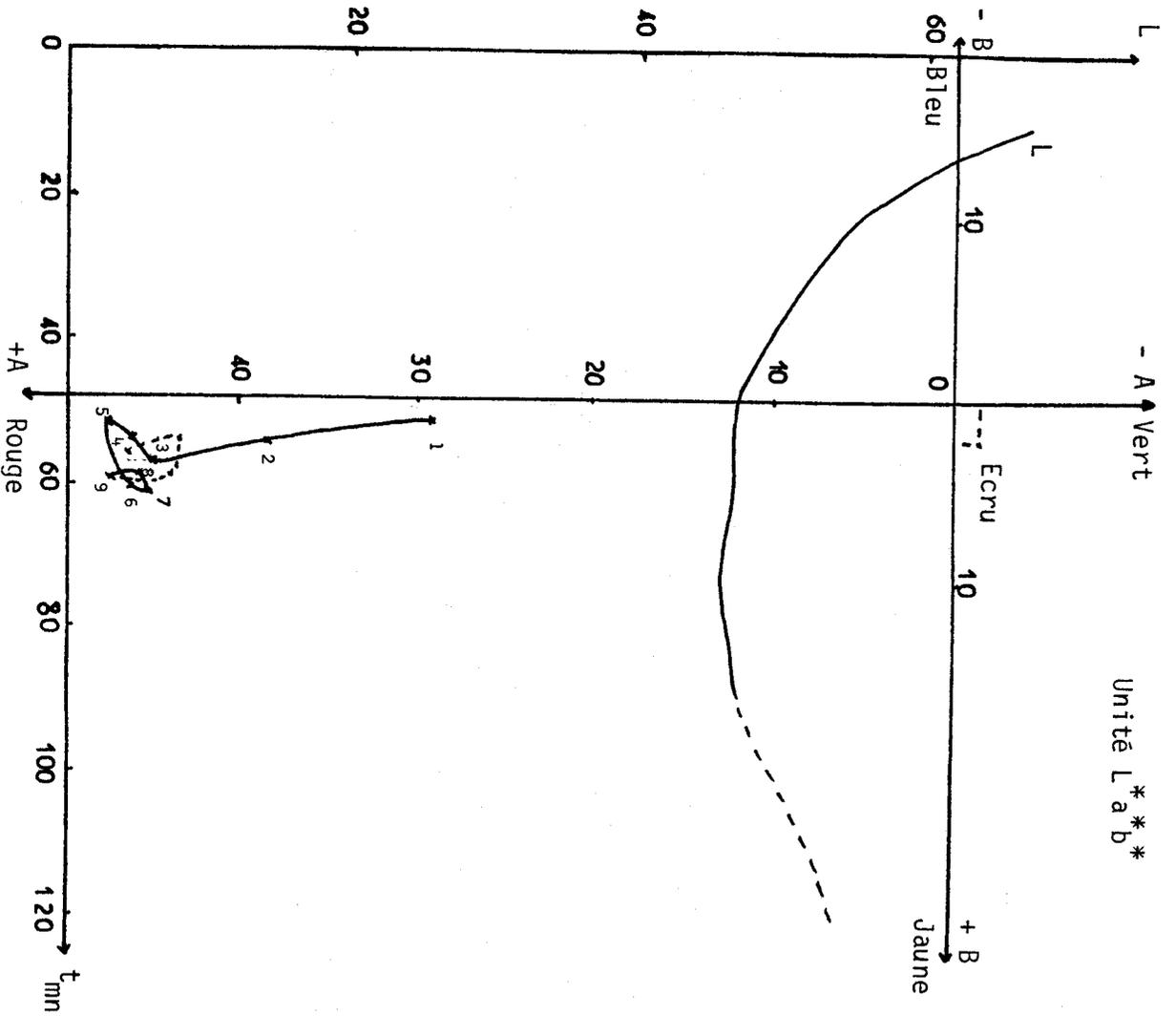
FIGURE - 5 -



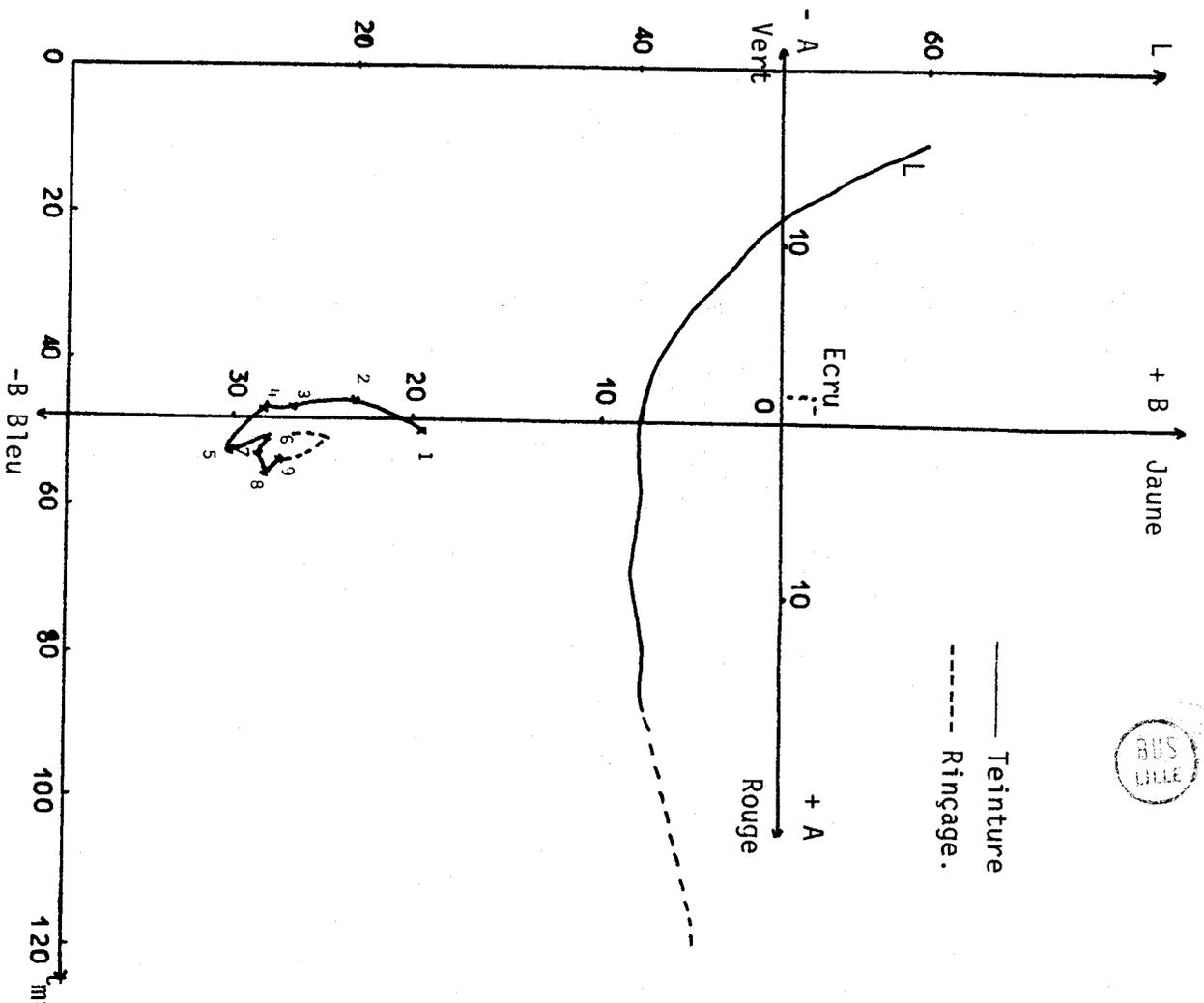
JAUNE 0,5 %.

FIGURE - 5 -

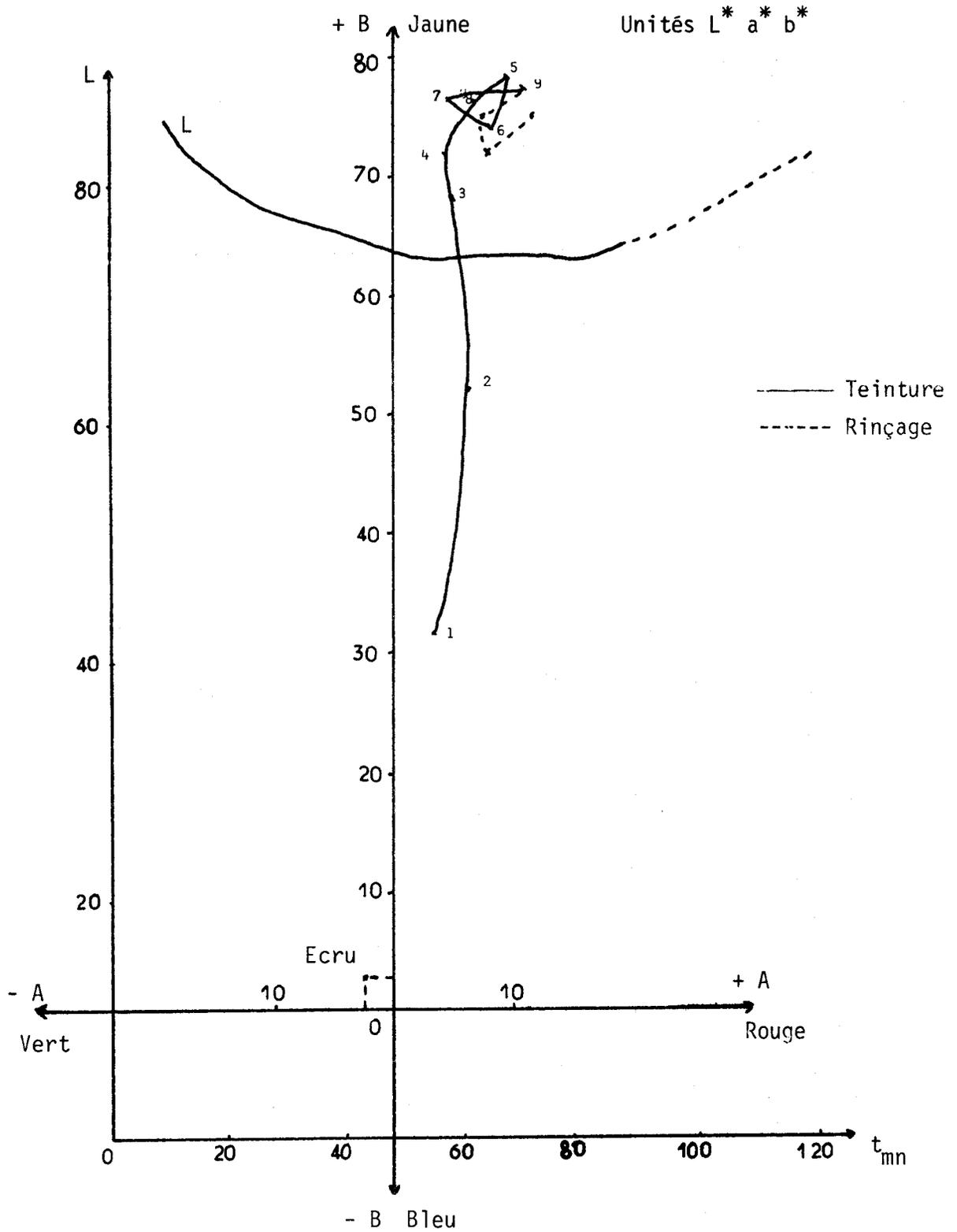




a) ROUGE 0,5 %



b) BLEU 0,5 %



c) JAUNE 0,5 %.

FIGURE - 6 -



Une fois la teinture terminée, le tissu est rincé. Le but est d'éliminer :

- des adjuvants
- des particules de colorant non fixées

Au terme du rinçage, le tissu sera par conséquent prêt à être commercialisé et utilisé comme produit fini.

#### IV-4 PHASE RINCAGE

La phase de teinture étant établie nous essayons de voir l'influence du rinçage sur la couleur après la vidange.

Les rinçages après teintures doivent être effectués en eau dure pour éviter le coulage des colorants. Dans cette phase, il y a non seulement élimination du chlorure de sodium, mais aussi un éclaircissement de la teinte.

L'éclaircissement est lié à la température de l'eau de rinçage et il est dû au relachement des particules non fixées au tissu.

Le problème consiste par conséquent à :

- déterminer le mode de rinçage
- quantifier l'éclaircissement de la teinte.

##### IV-4.1. Mode de rinçage

Les expressions développées par MORTON /5/ sur la phase rinçage sont précises. Mais quant à leur application à l'analyse des résultats expérimentaux, elles sont très complexes.

Pour une résolution pratique du problème, nous avons choisi d'étudier la phase rinçage autrement. Nous n'allons tenir compte et raisonner que sur la vraie grandeur de la couleur  $\beta(\lambda)$ .

Un tissu peut être rincé de différentes manières :

- dans un bain unique
- dans un bain avec renouvellement continu d'eau
- dans un bain avec vidange et renouvellement complet du bain.

Pour des raisons pratiques, nous avons choisi le troisième cas.

Le tissu est teint selon la procédure citée précédemment. Après la vidange du bain de teinture, plusieurs rinçages, avec renouvellement d'eau toutes les 10 minutes, seront effectués. A la fin de chaque période de rinçage, nous prélevons une mesure colorimétrique.

Toute la phase rinçage se déroule avec chauffage arrêté, d'où un rinçage par température décroissante.

#### IV-4.2. Durée ou nombre de rinçage

Pour fixer la durée ou le nombre de rinçage, nous avons opéré d'une manière similaire à la phase de teinture.

A savoir :

- Un tracé des coefficients de réémission en fonction du temps.
- Une représentation de la teinte de la saturation et de la clarté psychrométrique dans le plan CIELAB.

Nous constatons que les mesures augmentent au fur et à mesure du temps. Mais après le troisième rinçage, les valeurs se stabilisent. Par conséquent, pour l'utilisation du textile, ce mode de rinçage est satisfaisant, il est suffisant pour les trois colorants utilisés.

A ce stade, il a été adopté le mode, et la durée ou le nombre de rinçage.

Toutefois, il est à remarquer que dans la phase rinçage, nous ne pouvons, normalement, plus agir sur la couleur. Il est donc important de modéliser cette phase, compte-tenu de l'éclaircissement vis à vis des mesures prélevées avant la vidange.

#### IV-4.3. Prédiction de la couleur sèche

Il serait intéressant de connaître la couleur du produit fini avant de procéder à la vidange. Cette prédiction envisage une intervention éventuelle dans le processus de teinture.

Pour modéliser la phase de rinçage nous avons prélevé des mesures à la vidange, puis au premier deuxième et troisième rinçage pour les trois colorants et à plusieurs concentrations.

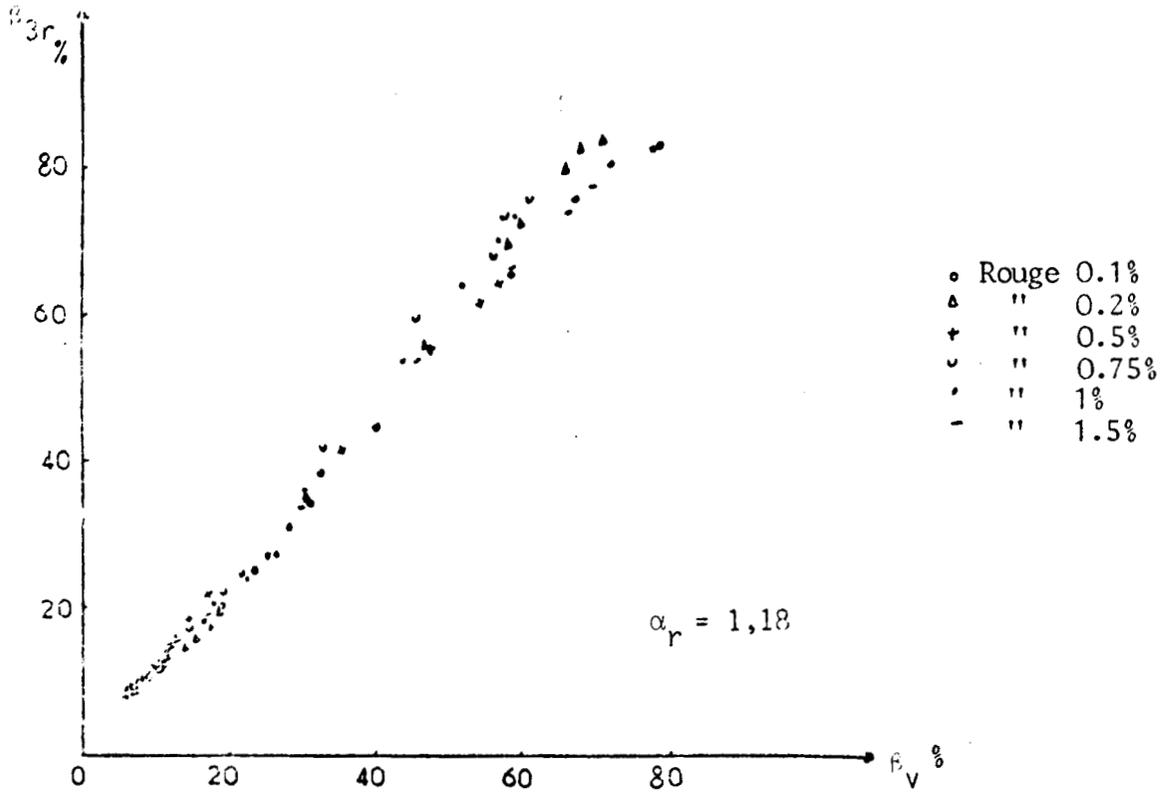
Le problème consiste donc à trouver une correspondance entre les mesures faites à la vidange et celles prises pendant le rinçage.

Dans une première étape nous avons considéré toutes les mesures :

- mesures faites à la vidange
- mesures faites au premier rinçage
- mesures faites au deuxième rinçage
- mesures faites au troisième rinçage

Ces mesures ont subi une analyse et un traitement, afin de déterminer si leur évolution ne répond pas à une loi quelconque, fonction du temps ou bien fonction du nombre de passage du tissu dans le bain. Cette tentative n'a donné aucun résultat.

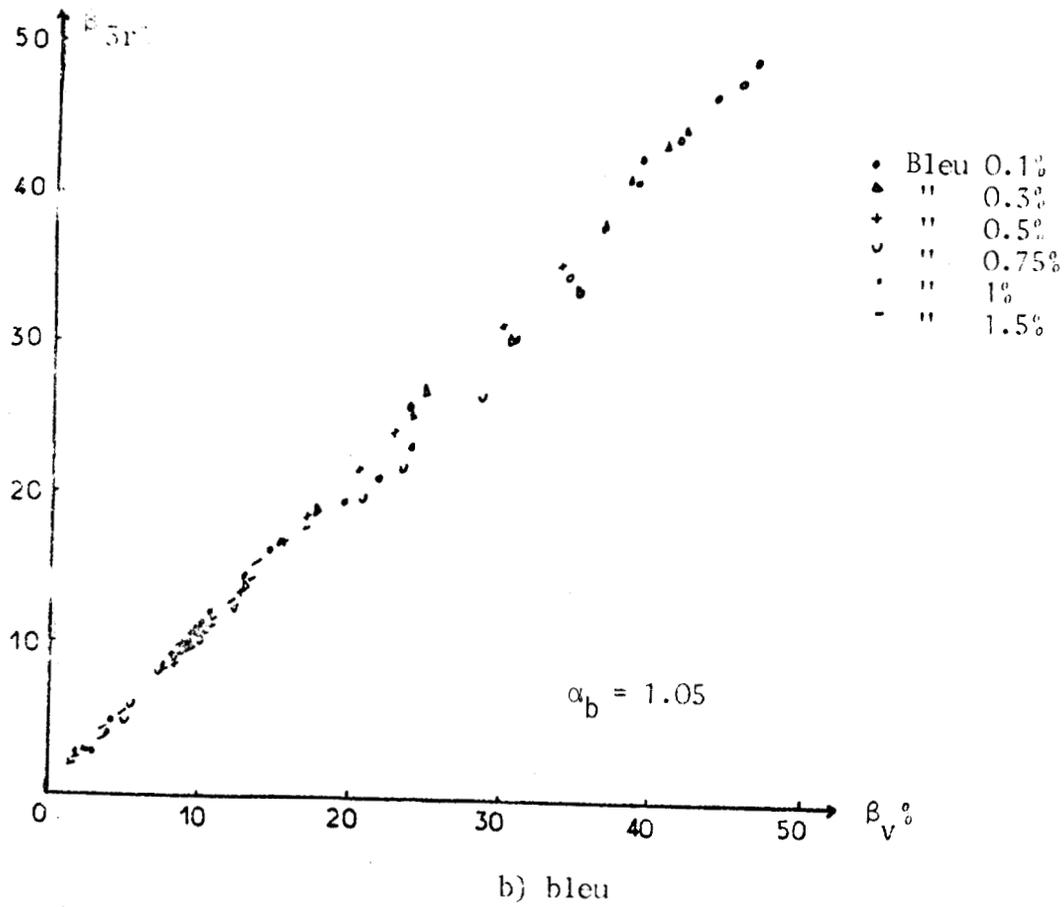
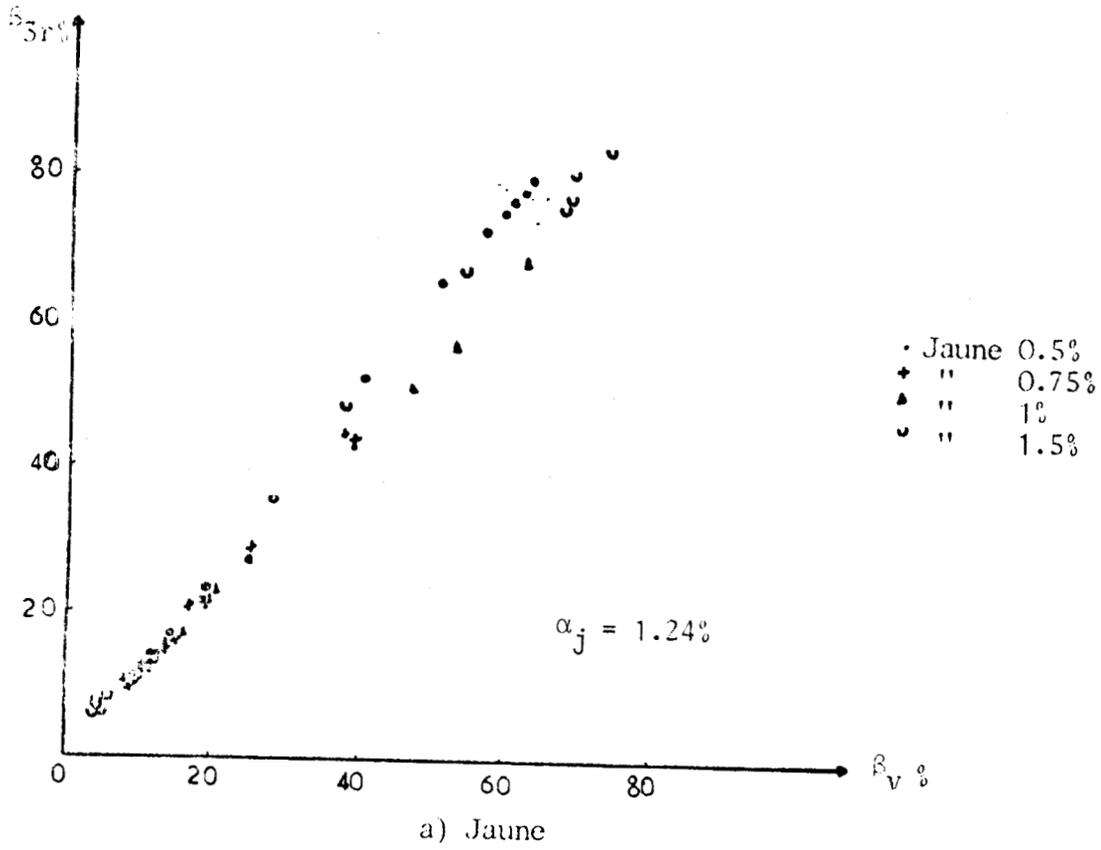
Par contre, nous avons tracé dans des axes orthonormés les valeurs des coefficients de réémission en fin du troisième rinçage en fonction des valeurs prises avant la vidange. Le tracé a été fait pour les trois colorants à plusieurs concentrations. Il s'est avéré que le rinçage dépend du colorant utilisé.



c) Rouge

Figure - 7 -





L'intérêt a été, dès lors, porté sur l'étude des représentations graphiques par colorant (figure 7). Les coefficients semblent se situer sur des droites de pentes différentes, selon chaque colorant.

Une identification numérique des résultats expérimentaux, par la méthode des moindres carrés, nous a amené à définir trois paramètres  $\alpha_r$ ,  $\alpha_j$ , et  $\alpha_b$  pour modéliser cette recette de rinçage, afin de prédire la couleur mouillée puis sèche.

Les paramètres  $\alpha_r$ ,  $\alpha_j$ ,  $\alpha_b$  correspondent à l'éclaircissement de la teinte et au pouvoir de fixation du colorant sur la fibre. Ils sont fonctions du type de colorant, mais il a été constaté qu'ils sont indépendants de la concentration et de la longueur d'onde.

Les courbes de réémission relatives au colorant rouge, jaune, bleu, prélevées avant la vidange seront donc à multiplier respectivement par  $\alpha_r$ ,  $\alpha_j$  et  $\alpha_b$ . Ces valeurs prédiront la couleur du produit fini sec désiré et donneront le "top" pour vidanger le bain de colorant et de commencer la phase rinçage.

#### IV-4.4. Expérimentation

La modélisation de la phase rinçage a été expérimentée sur plusieurs pièces de textiles teintés avec les trois colorants et à plusieurs concentrations, selon la procédure de rinçage élaborée (figure 8).

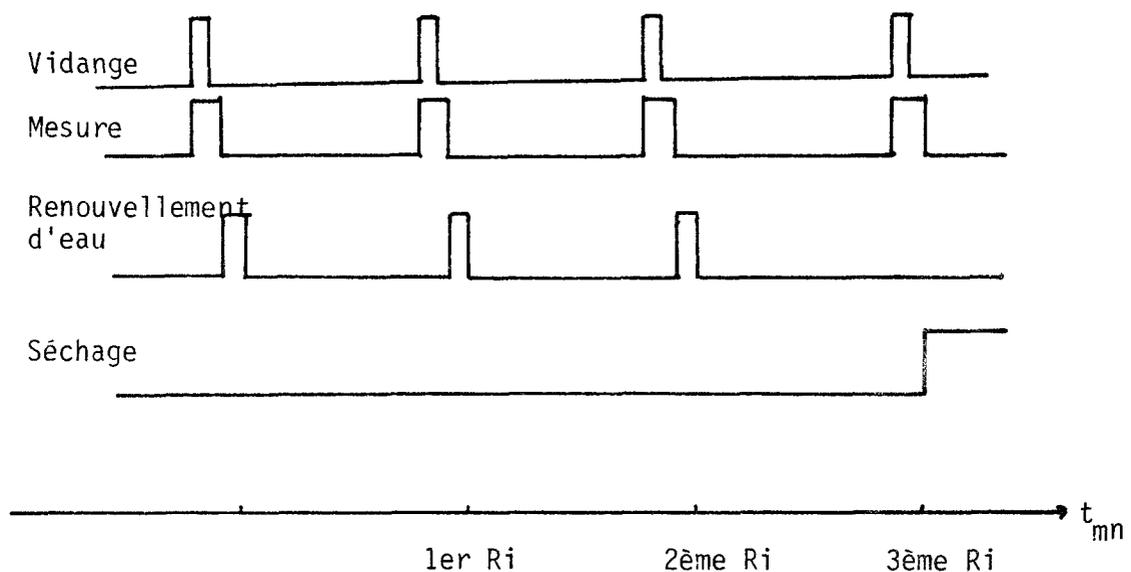


FIGURE - 8 - Diagramme logique.

Les courbes de réémission prédites à la vidange, puis réelles, après rinçage et séchage sont représentées sur la figure 9. La vérification de la loi de prédiction a été faite sur d'autres concentrations.

Sur le tableau ci-dessous, sont rassemblés les résultats obtenus. Le calcul des écarts de nuance relatives à chaque colorant permet d'apprécier la validité et la précision

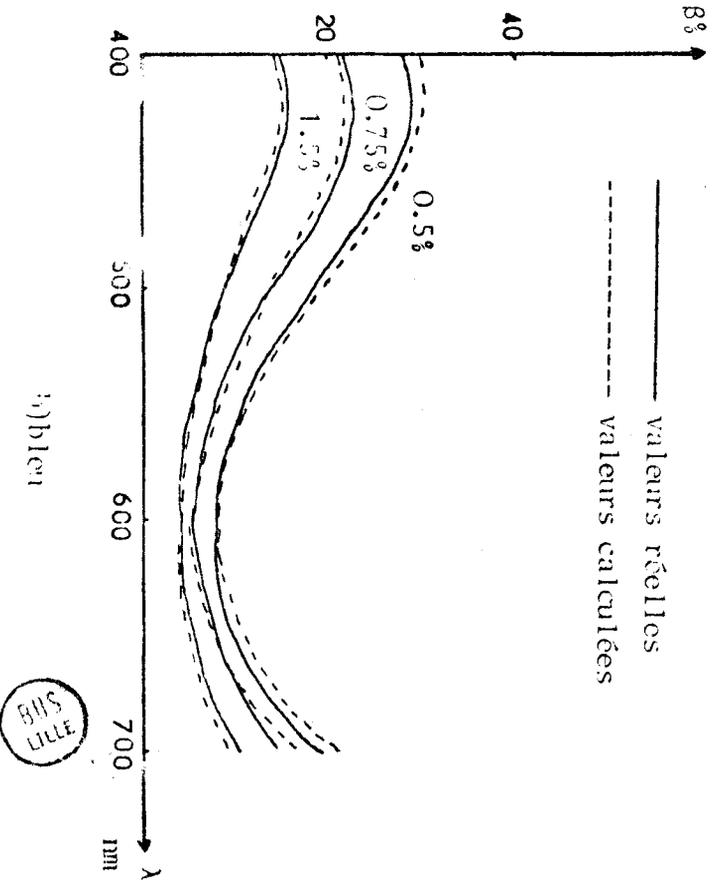
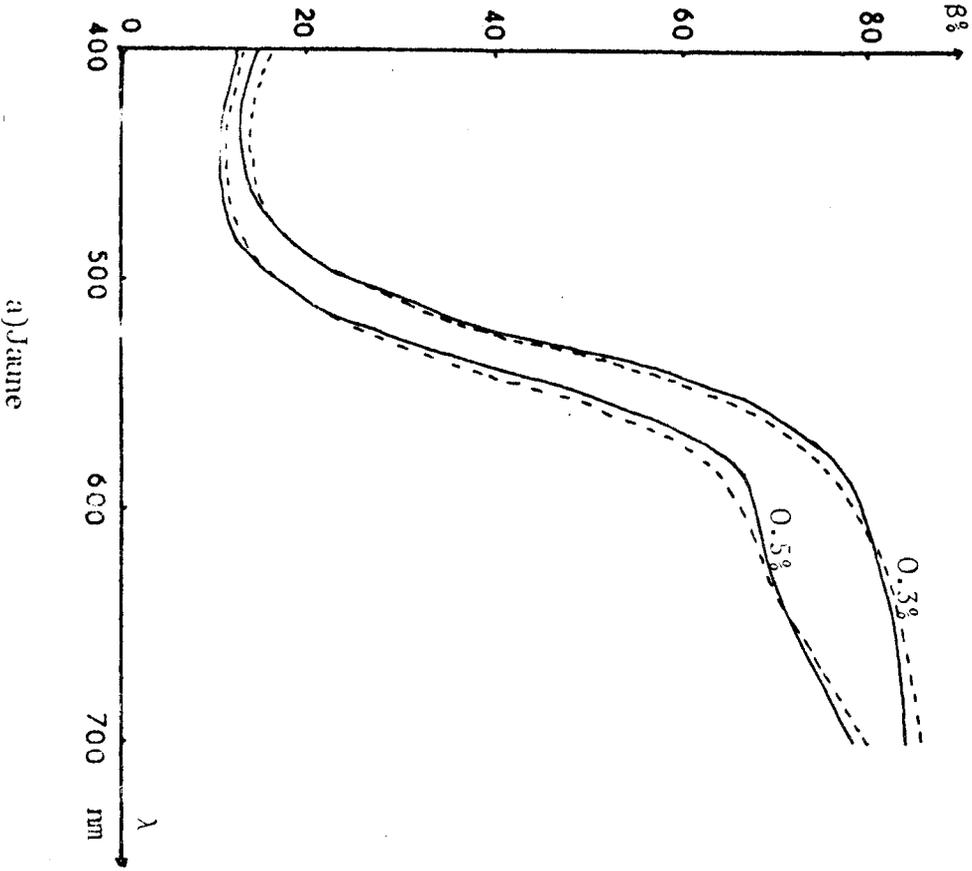
- du procédé de teinture
- de la modélisation de la phase rinçage
- et de la prédiction de couleur sèche.

ROUGE %	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	$\Delta E_{U.M.A.}$
0,1	1,134	2,34
0,5	1,552	3,16
1,5	2,248	4,08

BLEU %	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	$\Delta E_{U.M.A.}$
0,5	1,721	2,98
0,75	2,028	3,72
1,5	1,979	2,81

JAUNE %	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	$\Delta E_{U.M.A.}$
0,3	1,12	2,56
0,5	2,06	3,21

Tableaux récapitulatifs  
des courbes de la figure 9.

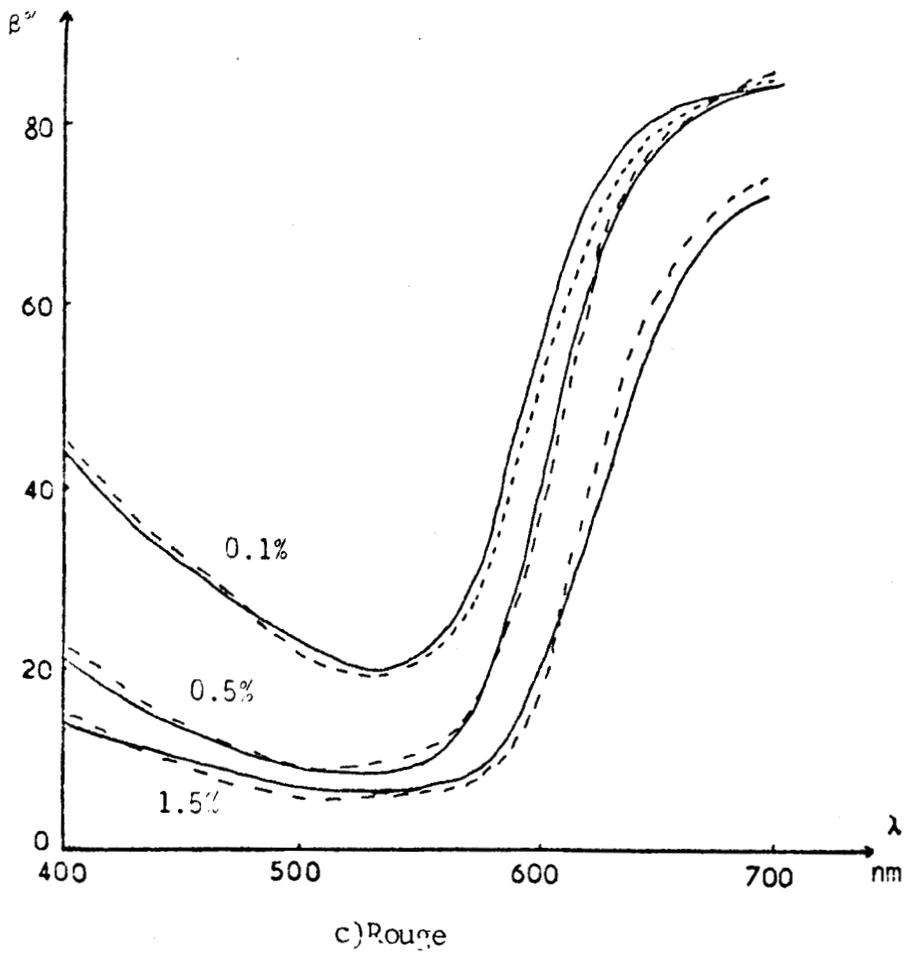


b) bleu

BIS LILLE

FIGURE - 9 -

FIGURE - 9 -



*IV-5 CONCLUSION*

Dans ce chapitre, nous avons fixé les paramètres qui influencent le passage du colorant dans la matière à teindre. Un procédé de teinture performant et rapide a été mis au point, suite à une étude expérimentale, basée sur des données colorimétriques.

La connaissance de la montée du colorant sur les fibres a permis par conséquent une rationalisation du processus de teinture tout en préservant les qualités qu'exige l'utilisateur à savoir l'unisson, la solidité et le coût.

Ensuite, une étude sur la phase rinçage, époque où le système devient non commandable, nous a conduit à déterminer analytiquement l'éclaircissement de la teinte. Une modélisation de la phase rinçage a entraîné l'établissement d'une loi linéaire de prédiction de couleur sèche du produit fini en fonction du type de colorant.

L'analyse des résultats obtenus montre que cette procédure est suffisamment précise et que nous pouvons l'introduire dans un système de régulation.

Toutefois, la régulation n'est envisagée que dans une phase dite de "nuançage", se situant entre la phase de teinture et avant la vidange, pour améliorer la reproduction et atteindre la nuance recherchée si cette dernière n'est pas dépassée. Dans le cas où la teinte est dépassée, nous ne disposons d'aucun moyen pour déteindre, ce qui provoque le rebut de la pièce ou au mieux son passage en second choix.

La régulation en vue de la reproduction d'une couleur-type nécessite l'association des mesures colorimétriques prélevées dans la phase de nuançage à un calcul de recette approprié, c'est l'objet du chapitre suivant.

- BIBLIOGRAPHIE -

---

- /1/ A.M. BENHABIB, J.C. SACRE  
*"Colorimetric Analysis Textile dyeing process application to colour transition control"*  
Systems Science VII - WROCLAW (Pologne) - Septembre 1981.
- /2/ Colorant Diazol lumière en teinture sur coton et viscose.  
CAHIERS de TEINTURE.
- /3/ J.S. D.C. - Septembre 1942, V.62, p. 280.
- /4/ Recommandation de la C.I.E. - 1979
- /5/ T.H. MORTON  
*"Jigger Studies IV - Washing and Heating"*  
J.S.D.C. - V.81, 3, 150, 1965.

# CHAPITRE V

-----

## RÉGULATION ET COMMANDE DU PROCESSUS.

-----

V-1 - INTRODUCTION.....	V-1
V-2 - PRINCIPE DE LA REGULATION.....	V-2
V-3 - SCHEMA FONCTIONNEL DU PROCESSUS.....	V-3
V-4 - FORMULE DE CALCUL DE RECETTE.....	V-4
V-4.1. Relations entre la réémission d'un textile. et les concentrations en colorants.....	V-5
A) Loi de KUBEKA-MUNK.....	V-5
B) Modification de la loi de KUBELKA-MUNK..	V-7
V-4.2. Principe du calcul de recette.....	V-12
A) Calcul d'une solution approximative.....	V-13
B) Analyse de la solution trouvée.....	V-15
C) Itération pour l'amélioration de la solution.....	V-16
V-5 - CREATION D'UNE MEMOIRE DE COLORANT.....	V-20
V-6 - REGULATION DU PROCESSUS DE TEINTURE.....	V-22
V-6.1. Phase de nuançage.....	V-24
V-6.2. Méthode utilisée pour une reproduction.....	V-25
V-6.3. Organisation d'une teinture.....	V-26

V-7 - EXPERIMENTATION.....	V-26
v-7.1. But.....	V-26
v-7.2. Indications.....	V-26
v-7.3. Résultats.....	V-26
V-8 - CONCLUSION.....	V-34
BIBLIOGRAPHIE.....	V-35

V-1 INTRODUCTION

A présent, nous disposons d'un processus de fabrication comprenant, un Jigger, une sonde optique et un spectrophotomètre, dans lequel nous avons :

- Défini un procédé de teinture avec des paramètres figés
- Appliqué une technique de mesure pour relever les courbes spectrales de réémission en phase humide
- Procédé à un traitement mathématique de transformation et de prédiction pour avoir la couleur du produit fini sec.

Nous sommes donc en présence d'une chaîne de fabrication, dont la sortie représentée par la courbe spectrale de réémission, ne dépend que de la composition en concentration de colorant dans la solution.

S'il est devenu possible de connaître précisément le phénomène de teinture, il nous est plus facile maintenant :

- d'élaborer des actions à partir des mesures colorimétriques
- d'agir sur la composition de la solution.

L'intervention dans le processus de fabrication nécessite par conséquent l'application d'une formule de mélange ou d'une formule de recette de teinture. Cette dernière relie la concentration d'un colorant au facteur spectral de luminance.

Nous proposons un système de régulation et de pilotage de l'unité de teinture par adjonction de colorants en fonction de l'analyse colorimétrique du tissu en phase humide. Par une approche successive, une reproduction conforme au type sera ainsi réalisée.

Le contrôle, la régulation et le pilotage se font en temps quasi-réel grâce à l'utilisation d'un ordinateur relié à un spectrophotomètre.

V-2 PRINCIPE DE LA REGULATION

L'unité pilote de teinture est composée de trois principaux blocs (figure 1) :

- l'appareil de teinture : Jigger
- unité de mesure : le spectrophotomètre
- unité de traitement : le calculateur.

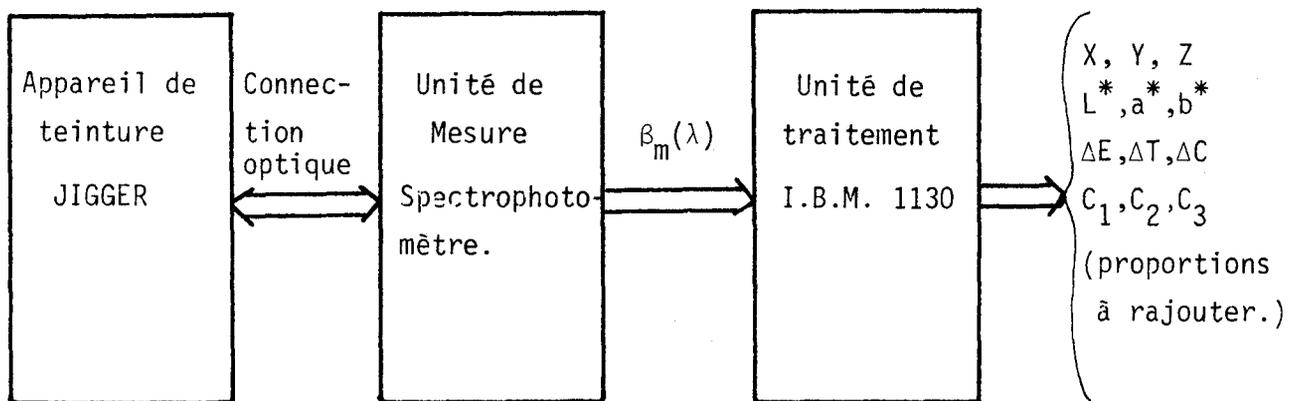


FIGURE - 1 - Unité pilote de teinture.

Les signaux émis par le textile en cours de reproduction sont transmis au spectrophotomètre par une sonde optique. La mesure  $\beta_m(\lambda)$ , prélevée en phase humide, est ensuite envoyée à un calculateur où elle subit divers traitements. Une fois traitée, elle serait comparée à la mesure du coloris-type pour déterminer la composition de la solution en vue d'un réajustement de la nuance.

V-3 SCHEMA FONCTIONNEL DU PROCESSUS

Le problème consiste à annuler la différence de nuance entre la couleur contre type et la couleur type, indépendamment des paramètres fixés dans le chapitre IV.

- température
- adjonction de NaCl
- $R_b$  de bain
- pH du bain de colorant.

L'annulation de cette différence dépend de la composition du bain en colorant. Le schéma de la procédure est le suivant (figure 2).

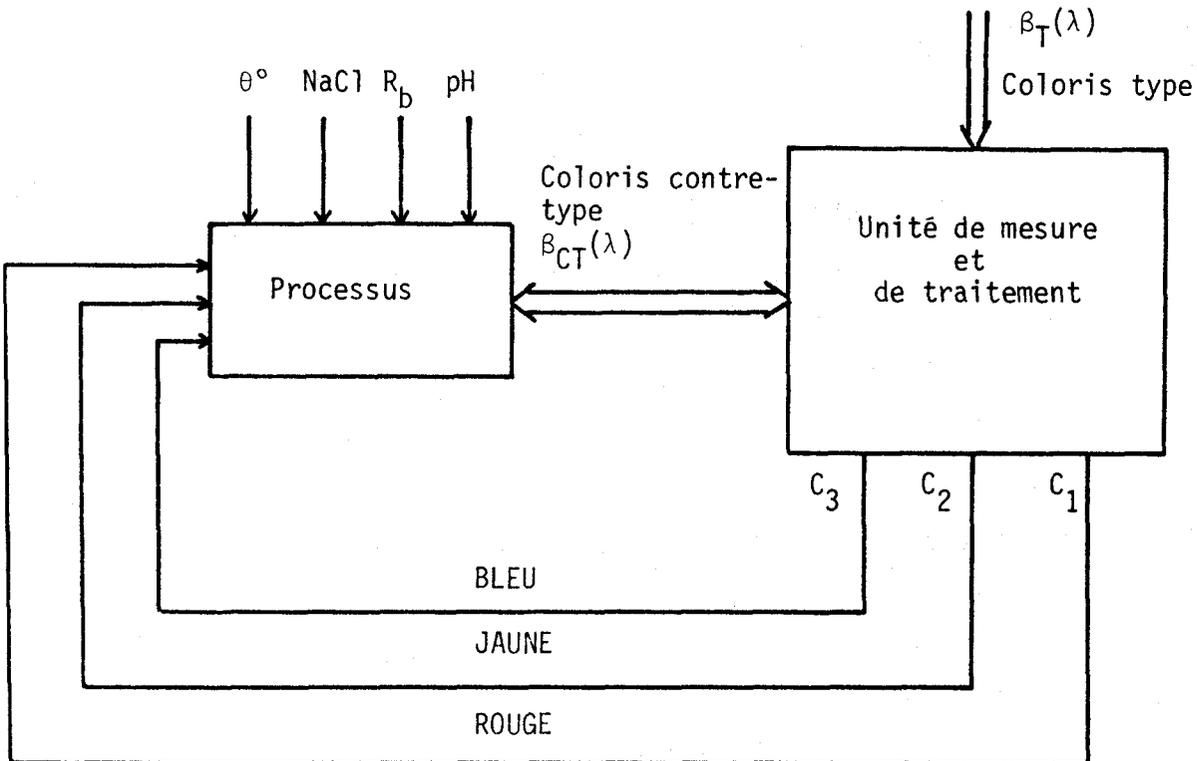


FIGURE - 2 - Schéma fonctionnel.

La résolution d'un tel problème demande d'agir sur les composants  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , représentant respectivement les concentrations des colorants rouge, jaune et bleu.

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  sont les composants manquants au coloris contre-type pour faire l'identité avec le coloris type, s'il s'agit bien sûr d'une trichromie.

Nous verrons ultérieurement, pourquoi nous avons raisonné sur une teinture en trichromie, alors que nos travaux ont été faits en monochromie.

Toutefois, pour déterminer les composants  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ , nous avons fait appel à une formule de calcul de recette établie par PRESTON et TSIEN, traitée et implantée sur ordinateur par D. STEEN /1/.

#### V-4 FORMULE DE CALCUL DE RECETTE

Pratiquement nous avons à résoudre le problème suivant :

- Quelle combinaison de colorants et quelles concentrations, faut-il utiliser pour reproduire une nuance donnée ?

Nous avons simplifié le problème par le choix de trois colorants. C'est à dire que nous reproduisons un coloris réalisé avec ces mêmes colorants. Ceci répond à la première question.

Quant à la deuxième question, un grand nombre de chercheurs ont contribué à apporter des solutions objectives et rationnelles.

Ce fut KUBELKA et MUNK /2/ qui montrèrent qu'il existe une relation entre la concentration d'un colorant et les coefficients de réémission. Leur découverte a permis de réaliser des progrès considérables dans la préformulation des recettes de teinture.

Toutefois, dans la pratique des calculs de recette, il s'avère rapidement que la loi de KUBELKA et MUNK présentait un champ d'application restreint.

Cela est dû principalement à deux facteurs :

1°) La complexité des phénomènes physico-chimiques intervenant au cours d'une teinture,

2°) L'apparition sur le marché international d'un grand nombre de fibres de caractéristiques différentes.

V-4.1. Relations entre la réémission d'un textile et les concentrations en colorants

A) Loi de KUBELKA et MUNK

KUBELKA et MUNK ont obtenu, dans certaines conditions bien déterminées, la relation suivante :

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-\beta)^2}{2\beta}$$

Cette formule signifie qu'à chaque longueur d'onde, nous pouvons calculer un nouveau coefficient appelé "rapport K/S".

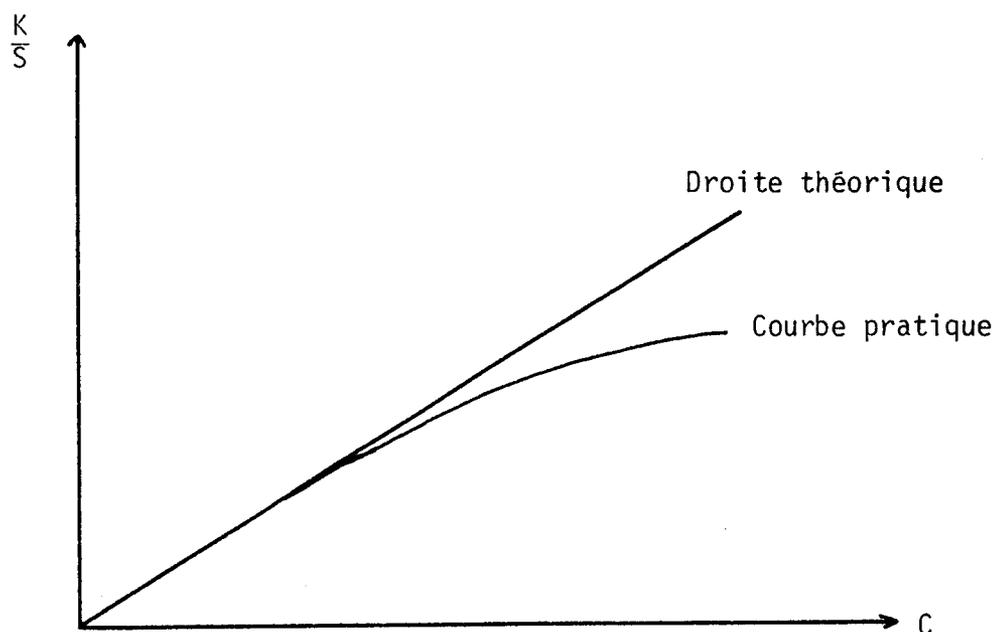
K représente le coefficient d'absorption de la lumière dans la matière colorée

S représente le coefficient de diffusion de cette lumière dans la même matière.

Ce rapport K/S a pour propriété d'être en relation linéaire avec la concentration C du colorant

$$\frac{K}{S} = k.C$$

Malheureusement, cette propriété n'est plus valable à de fortes concentrations. La droite de la figure suivante a tendance à s'aplatir.



$$K/S = f(C)$$

H. LEJEUNE et C. MARTRE /3, 4/ expliquent pourquoi cette loi devient discutable à de fortes concentrations.

Ce sont des facteurs propres aux différentes techniques de teinture disent-ils, qui limitent la valeur pratique de la loi de KUBELKA-MUNK à des domaines plus ou moins étendus de la concentration.

La relation entre la quantité de colorant sur la fibre et l'absorption de lumière est limitée pour des raisons optiques telle la réflexion résiduelle du support, même lorsque celui-ci est teint en noir. Mais ce qui diminue encore beaucoup la portée de cette relation, c'est le divorce qu'il peut y avoir entre la quantité de colorant présente sur la fibre en fin de teinture et celle que l'on avait prévue ; le colorant pénètre dans la fibre en fonction d'un équilibre dynamique entre sa concentration dans le bain de teinture et celle dans la matière à teindre ; les lois qui régissent ces

équilibres varient en fonction des colorants, des fibres, des adjuvants utilisés avec les colorants, des conditions physiques de la teinture. Il est déjà difficile de bien maîtriser tous ces facteurs ; or, il est fréquent qu'à partir d'une certaine concentration dans la fibre, le colorant n'obéisse plus aux lois d'équilibre précédentes et ne pénètre plus ou très peu dans la fibre ; ce sont des phénomènes de saturation qui se compliquent encore de phénomènes de blocage : certains éléments empêchent d'autres colorants, pourtant de même classe, de teindre les fibres à l'intensité normale ; on peut même, dans certains cas, provoquer en partie, le départ d'un colorant hors de la matière teinte en ajoutant en cours de teinture un autre colorant qui prend sa place.

Nous comprenons donc pourquoi la loi de KUBELKA et MUNK se présente comme une approximation de la solution. Elle est valable très souvent dans les coloris clairs à moyens, mais elle devient fortement discutable pour les coloris foncés.

#### B) Modification de la loi de KUBELKA et MUNK

D'autres travaux ont été effectués /5/, /6/, /7/, /8/, /9/, /10/, /11/ pour l'obtention d'une relation entre la réémission et la concentration. Les résultats obtenus répondent à des cas particuliers, mais ne solutionnent pas le problème en général.

De tous ces travaux nous exposons plus particulièrement, la fonction établie par PRESTON-TSIEN qui nous semble la meilleure approche à l'heure actuelle.

1°) Fonction de PRESTON-TSIEN /8 /

La fonction proposée par PRESTON-TSIEN s'écrit ainsi :

$$I_n \left[ \frac{\frac{1}{\beta_\infty} (1-2p) + \frac{1}{p} - 4}{\frac{1}{p} - \frac{1}{\beta_\infty}} \right] = BC \quad (1)$$

où

$p$  = coefficient de réémission pour l'interface fibre-air

$B$  = constante relative au coefficient d'absorption du colorant considéré

$\beta_\infty$  = réémission d'un tissu d'épaisseur infinie.

Cette fonction a été trouvée en interprétant les mesures de réflectance calculées à partir de fibres de viscose teinte.

Les mesures ont été effectuées avec des fibres dont les axes étaient tous orientés dans la même direction. Dans ces conditions, l'utilisation d'un modèle laminaire comme base pour déterminer la fonction est valable, mais considérer ces mesures comme correctes pour un tissu, cela n'est guère acceptable.

La difficulté d'utilisation de cette formule est la présence du coefficient  $p$ , propre à chaque fibre d'un tissu. Il sera donc très difficile de connaître la valeur de  $p$  pour un échantillon de tissu.

ATHERTON précise qu'il ne critique pas la théorie de PRESTON-TSIEN, car à l'origine elle n'avait pas été établie pour les tissus.

Il n'y a pas de méthode simple pour déterminer la valeur de  $p$  d'un tissu.

En général,  $p$  est inférieur ou égal à 0,01.

Pour de telles valeurs, le dénominateur de la fonction devient constant pour de petites valeurs de  $\beta$ .

Si  $1/\beta$  est négligeable au dénominateur, alors la fonction de PRESTON et TSIEN devient :

$$\frac{1}{\beta_{\infty}} \frac{(1-2p) + \frac{1}{p} - 4}{\frac{1}{p}} = e^{BC} \quad (2)$$

et  $e^{BC}$  peut être remplacé par  $(1 + BC)$  pour de faibles valeurs de  $C$ .

Cette approximation permet d'écrire l'équation précédente ainsi :

$$\frac{1}{\beta_{\infty}} p (1-2p) - 4p = BC \quad (3)$$

qui est essentiellement une relation entre la réémission et la concentration.

L'importance de la valeur donnée à  $p$  est montrée dans la figure 3, dans laquelle on présente la fonction de PRESTON et TSIEN en fonction de la concentration pour trois valeurs de  $p$ .

On voit que pour  $p = 0,04$ , l'ensemble des points donne une courbure importante ce qui est moins évident pour  $P = 0,01$ .

Pour  $p = 0,005$ , on obtient une droite ce qui montre que la surface réfléchante d'un tissu de laine peut-être aussi faible que 0,005.

Une comparaison est faite entre la fonction simplifiée et la fonction d'origine. Cette comparaison est représentée à la figure 4 avec, comme valeur de  $p = 0,005$ .

Nous obtenons une droite, cela signifie donc que l'approximation faite est valable et ne modifie en rien la théorie de PRESTON et TSIEN.

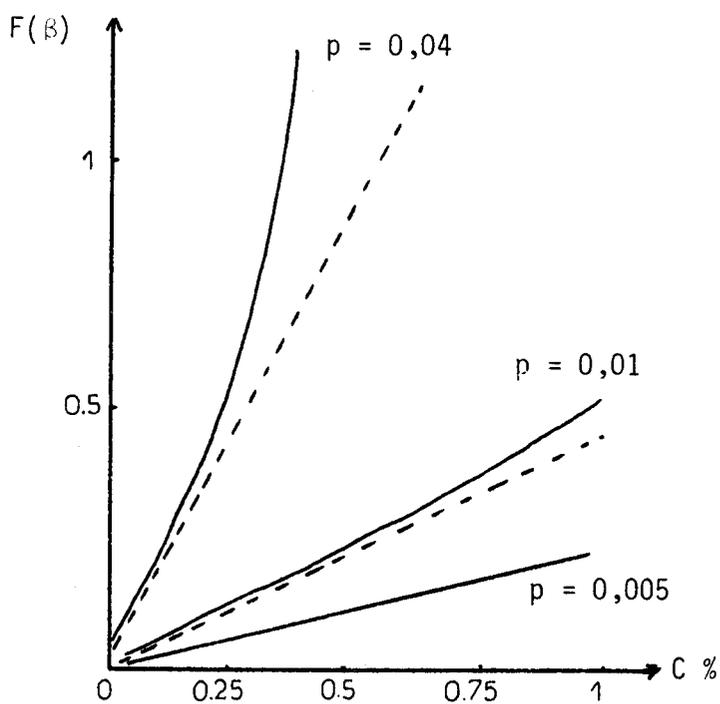


FIGURE - 3 -

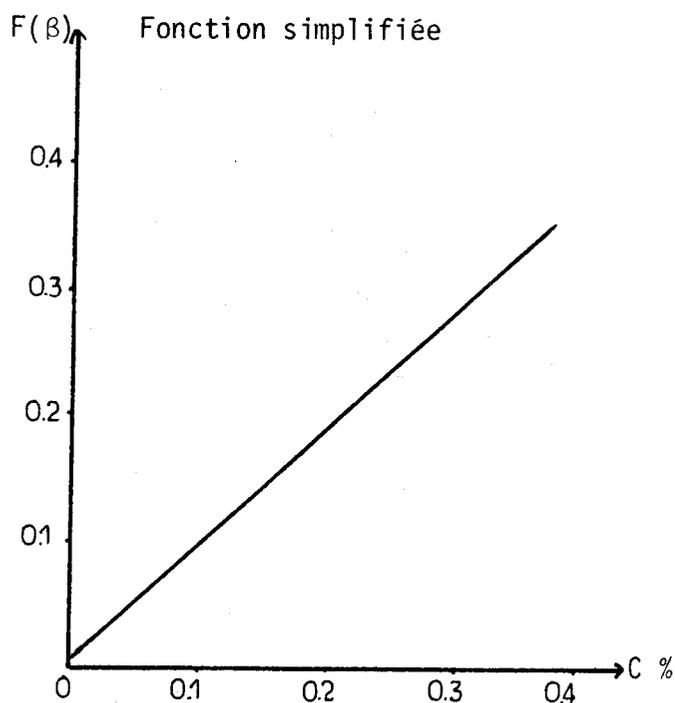


FIGURE - 4 -

2°) Modèle de PRESTON modifié

EXPRESSION DU MODELE (RAPPEL)

$$f(\beta) = \ln \left( \frac{\frac{1-2p}{\beta} + \frac{1}{p} - 4}{\frac{1}{p} - \frac{1}{\beta}} \right)$$

 $\beta$  = réémission du support teint

p = paramètre.

 $\alpha$ ) Remarques concernant la valeur de "p"

Les auteurs indiquent que p représente un coefficient de réémission pour l'interface fibre-air ; la valeur de p semble donc devoir être étroitement liée à la nature de la fibre.

Le rapport :

$$\frac{\frac{1-2p}{\beta} + \frac{1}{p} - 4}{\frac{1}{p} - \frac{1}{\beta}}$$

doit être positif quel que soit  $\beta$  qui varie entre 0 et 1. Cette condition est remplie si  $0 < p < \beta$  (on prendra, en général, p plus petit que la réémission la plus faible).

 $\beta$ ) Modification de l'expression du modèle

Si la réémission est totale ( $\beta = 1$ ), la valeur de  $f(\beta)$  doit être nulle :  $f(1) = 0$

$$\text{Or, } f(1) = \ln \left( \frac{\frac{1}{p} - 3 - 2p}{\frac{1}{p} - 1} \right)$$

n'est pas nulle dans le domaine de p.

Pour satisfaire à cette exigence de commodité, l'expression de PRESTON-TSIEN doit être légèrement modifiée, à savoir :

$$f(\beta) = \ln \left( \frac{\frac{1-2p}{\beta} + \frac{1}{p} - 4}{\frac{1}{p} - \frac{1}{\beta}} \right) - \ln \left( \frac{\frac{1}{p} - 3 - 2p}{\frac{1}{p} - 1} \right) \quad (4)$$

C'est sous cette forme que le modèle de PRESTON-TSIEN est utilisé dans la suite des travaux.

a) Méthode de détermination du paramètre "p"

Pour une fibre, un colorant et une longueur d'onde donnée, nous devons avoir une relation du type :

$$f(\beta) = a.C + b \quad (5)$$

(C = concentration du colorant sur la fibre)

Si p change, les valeurs de a et b sont modifiées et la corrélation entre les points théoriques et pratiques se trouve également modifiée. La valeur de p optimum sera donc celle qui donne le meilleur coefficient de corrélation. Les équations des droites sont déterminées par la méthode des moindres carrés.

D'une manière pratique, le programme de calcul recherche la valeur de p optimum entre 0,002 et 0,0015.

Par ailleurs, l'étude des colorants est faite en 5 points se situant aux concentrations % : 0,1 - 0,3 - 0,5 - 1 - 2.

V-4.2. Principe du calcul de recette

A ce stade de l'étude, nous disposons de tous les éléments nécessaires à l'élaboration d'un programme de calcul de recettes.

Dans ce qui suit, nous exposons en langage mathématique le principe d'un calcul de recette qui a été exposé par E. ALLEN /12/, /13/ en 1966 et 1974.

A) Calcul d'une solution approximative (pour une fibre donnée)1) Relations fondamentales

- Fonction de réémission :

$$f_{i,\lambda}(\beta) = \ln \left( \frac{\frac{1-2p}{\beta} + \frac{1}{p} - 4}{\frac{1}{p} - \frac{1}{\beta}} \right) - \ln \left( \frac{\frac{1}{p} - 2p - 3}{\frac{1}{p} - 1} \right) \quad (6)$$

- Linéarité entre  $f(\beta)$  et la concentration :

$$f_{i,\lambda}(\beta) = a_{i,\lambda} \cdot C_i$$

avec  $i$  = indice du colorant $\lambda$  = longueur d'onde (nm)2) Matrices de départ

Posons les matrices suivantes :

$$P = \begin{pmatrix} a_{1,400} & a_{2,400} & a_{3,400} \\ a_{1,420} & a_{2,420} & a_{3,420} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1,700} & a_{2,700} & a_{3,700} \end{pmatrix} = \text{matrice des pentes}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = \text{matrice solution du mélange (3 concentrations)}$$

$$M = \begin{pmatrix} f_{M, 400}(\beta) - f_{S, 400}(\beta) \\ f_{M, 420}(\beta) - f_{S, 420}(\beta) \\ \vdots \\ f_{M, 700}(\beta) - f_{S, 700}(\beta) \end{pmatrix} = \text{fonction de réémission du mélange} \\ \text{dont on déduit les valeurs du support.}$$

$$TP = \begin{pmatrix} a_{1, 400} & a_{1, 420} & \dots & a_{1, 700} \\ a_{2, 400} & a_{2, 420} & & a_{2, 700} \\ a_{3, 400} & a_{3, 420} & \dots & a_{3, 700} \end{pmatrix} = \text{transposée de P.}$$

La solution du système revient à résoudre :

$$P.C = M$$

En multipliant à gauche les deux matrices par TP, nous ne modifions pas l'égalité, d'où :

$$TP.P.C = TP.M$$

Ceci devient un système de 3 équations à 3 inconnues dont la solution est :

$$C = (TP.P)^{-1} . TP . M \quad (7)$$

Cette solution  $C_1, C_2, C_3$  est approximative et nécessite une amélioration.

A partir de ce résultat, il est toutefois possible de déduire la courbe théorique de réémission du mélange ainsi calculé en utilisant la fonction inverse de  $f_{i,\lambda}(\beta)$  soit  $f_{i,\lambda}^{-1}(\beta)$

B) Analyse de la solution trouvée

Connaissant une approche de solution  $C_1, C_2, C_3$ , nous devons avoir les égalités suivantes :

$$F_1(C_1, C_2, C_3) = X$$

$$F_2(C_1, C_2, C_3) = Y$$

$$F_3(C_1, C_2, C_3) = Z$$

avec : X, Y, Z coefficients tristimulaires du type :

$F_1, F_2, F_3$  fonctions non linéaires

Posons les matrices suivantes :

$$t = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$T = \begin{pmatrix} \bar{x}_{400} & \bar{x}_{420} & \text{-----} & \bar{x}_{700} \\ \bar{y}_{400} & \bar{y}_{420} & \text{-----} & \bar{y}_{700} \\ \bar{z}_{400} & \bar{z}_{420} & \text{-----} & \bar{z}_{700} \end{pmatrix} \quad = \text{ Courbes de sensibilité de l'oeil normalisé.}$$

$$E = \begin{pmatrix} E_{400} & 0 & \text{-----} & 0 \\ 0 & E_{420} & \text{-----} & 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 0 & 0 & \text{-----} & E_{700} \end{pmatrix} \quad = \text{ Energie de l'illuminant normalisé}$$

$$r(T) = \begin{pmatrix} \beta_{400}(T) \\ \vdots \\ \beta_{700}(T) \end{pmatrix} = \text{Réémission du type}$$

$$r(CT) = \begin{pmatrix} \beta_{400}(CT) \\ \vdots \\ \beta_{700}(CT) \end{pmatrix} = \text{Réémission du contre type}$$

Si la reproduction (CT) est parfaite, nous devons avoir la relation :

$$T.E \ r(T) = T.E.r \ (CT)$$

ou encore :

$$T.E \left[ r(T) - r(CT) \right] = 0 \quad (8)$$

Si la reproduction est trop éloignée de la nuance type, nous sommes amenés à poursuivre le calcul.

### C) Itération pour l'amélioration de la solution

Posons les matrices :

$$\Delta t = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \text{différence colorimétrique entre le type et le contre-type théorique.}$$

$$\Delta C = \begin{pmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \\ \Delta C_3 \end{pmatrix} = \text{différence de concentration nécessaire pour obtenir } \Delta t = 0$$

Il vient alors :

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial C_1} \cdot \Delta C_1 + \frac{\partial X}{\partial C_2} \cdot \Delta C_2 + \frac{\partial X}{\partial C_3} \cdot \Delta C_3 \quad (9)$$

de même pour Y et Z.

Nous pouvons donc écrire :

$$t = B \cdot C \quad (10)$$

$$\text{avec } B = \begin{pmatrix} \partial X / \partial C_1 & \partial X / \partial C_2 & \partial X / \partial C_3 \\ \partial Y / \partial C_1 & \partial Y / \partial C_2 & \partial Y / \partial C_3 \\ \partial Z / \partial C_1 & \partial Z / \partial C_2 & \partial Z / \partial C_3 \end{pmatrix}$$

B est la matrice délicate à obtenir. Nous sommes donc amenés à réaliser un certain nombre de développements mathématiques pour résoudre ce problème.

Posons les matrices

$$S = \begin{pmatrix} \partial X / \partial \beta_{400}(T) \dots \dots \dots \partial X / \partial \beta_{700}(T) \\ \partial Y / \partial \beta_{400}(T) \dots \dots \dots \partial Y / \partial \beta_{700}(T) \\ \partial Z / \partial \beta_{400}(T) \dots \dots \dots \partial Z / \partial \beta_{700}(T) \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} \partial\beta_{400}(T)/\partial C_1 & \partial\beta_{400}(T)/\partial C_2 & \partial\beta_{400}(T)/\partial C_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial\beta_{700}(T)/\partial C_1 & \partial\beta_{700}(T)/\partial C_2 & \partial\beta_{700}(T)/\partial C_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{Il vient : } B = S \cdot Q \quad (11)$$

- Examen de la matrice S

$$\text{Nous avons : } X = \bar{x}_{400} \cdot E_{400} \cdot \beta_{400}(T) + \dots + \bar{x}_{700} \cdot E_{700} \cdot \beta_{700}(T)$$

$$\text{d'où : } S = \begin{pmatrix} \bar{x}_{400} \cdot E_{400} & \dots & \bar{x}_{700} \cdot E_{700} \\ \bar{y}_{400} \cdot E_{400} & \dots & \bar{y}_{700} \cdot E_{700} \\ \bar{z}_{400} \cdot E_{400} & \dots & \bar{z}_{700} \cdot E_{700} \end{pmatrix}$$

$$\text{Soit } S = T \cdot E \quad (12)$$

- Examen de la matrice Q

$$\begin{aligned} \text{Nous avons } \frac{\partial\beta_{\lambda}(T)}{\partial C_i} &= \frac{d\beta}{d f(\beta)}_{\tau, \lambda} \cdot \frac{\partial f_{\tau, \lambda}(\beta)}{\partial C_i} \\ &= d_{\lambda} \cdot \frac{\partial f_{\tau, \lambda}(\beta)}{\partial C_i} \end{aligned}$$

$$\text{avec } d_{\lambda} = \frac{1}{f'_{\tau, \lambda}(\beta)} = \text{inverse de la dérivée de } f_{\tau, \lambda}(\beta)$$

Or, nous avons :

$$f_{T,\lambda}(\beta) = f_{S,\lambda}(\beta) + C_1 \cdot \phi_{1,\lambda} + C_2 \cdot \phi_{2,\lambda} + C_3 \cdot \phi_{3,\lambda}$$

Ce qui entraîne :

$$\frac{\partial f_{T,\lambda}(\beta)}{\partial C_i} = \phi_{i,\lambda}$$

et par conséquent :

$$\frac{\partial \beta_\lambda(T)}{\partial C_i} = d_{\lambda} \cdot \phi_{i,\lambda}$$

Soit, enfin :  $Q = D \cdot \phi$

(13)

avec :

$$D = \begin{bmatrix} d_{400} & 0 & \text{-----} & 0 \\ 0 & d_{420} & \text{-----} & 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 0 & 0 & \text{-----} & 700 \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \phi = \begin{bmatrix} \partial \beta_{400}(T) / \partial C_1 & \partial \beta_{400}(T) / \partial C_2 & \partial \beta_{400}(T) / \partial C_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \partial \beta_{700}(T) / \partial C_1 & \partial \beta_{700}(T) / \partial C_2 & \partial \beta_{700}(T) / \partial C_3 \end{bmatrix}$$

Les équations (12) et (13) introduites dans l'équation (11) nous donne :

$$B = T.E.D.\phi$$

Si nous remplaçons B par son expression dans l'équation (10) nous obtenons :

$$\Delta t = T.E.D.\phi.\Delta C$$

Soit :

$$\Delta C = |T.E.D.\phi|^{-1} . \Delta t \quad (14)$$

Cette itération peut-être effectuée jusqu'à ce que l'équation (8) soit satisfaite (ou pratiquement telle).

Le programme de calcul des composants  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  est fonction de la carte d'identité établie pour les trois colorants de base. Il est établi pour faire une trichromie. Néanmoins, compte-tenu des résultats de la composition en concentration de colorant du coloris-type, il peut-être utilisé en monochromie ou dichromie.

#### V-5 CREATION D'UNE MEMOIRE DE COLORANT

Le point de départ de tout établissement de recette réside dans la mesure des facteurs de réémission de teintures étalonnées avec chacune, un colorant de concentration connue.

A cet effet, nous avons réalisé pour chaque colorant 6 teintures-types à des concentrations en % égales à : 0,1 - 0,3 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,5.

Sur les figures 5, 6, 7 nous avons représenté le tracé des courbes de réémission des colorants rouge, jaune et bleu (voir Annexe V.I pour les valeurs de ces coefficients de réémission).

Les résultats constituent une banque de références destinée à alimenter les estimations de recette de dichromie et trichromie ultérieures.

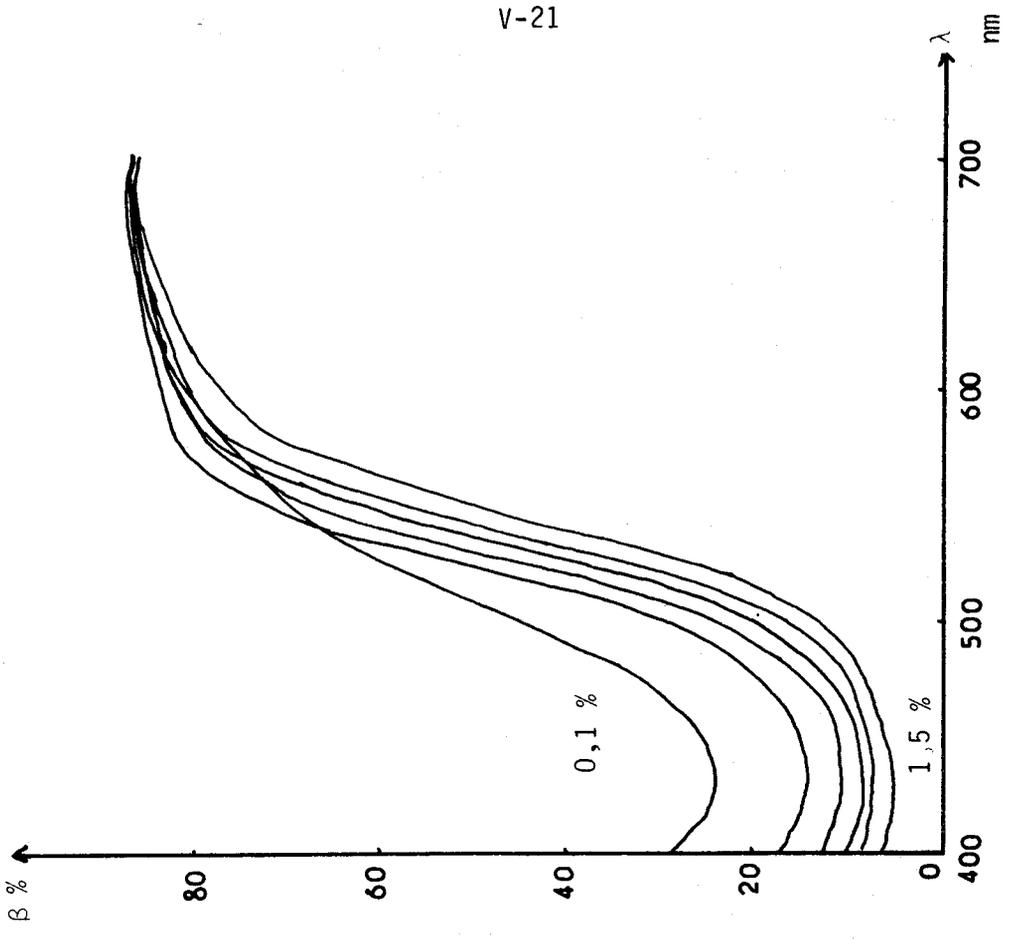


FIGURE - 6 - Coloris Jaune.

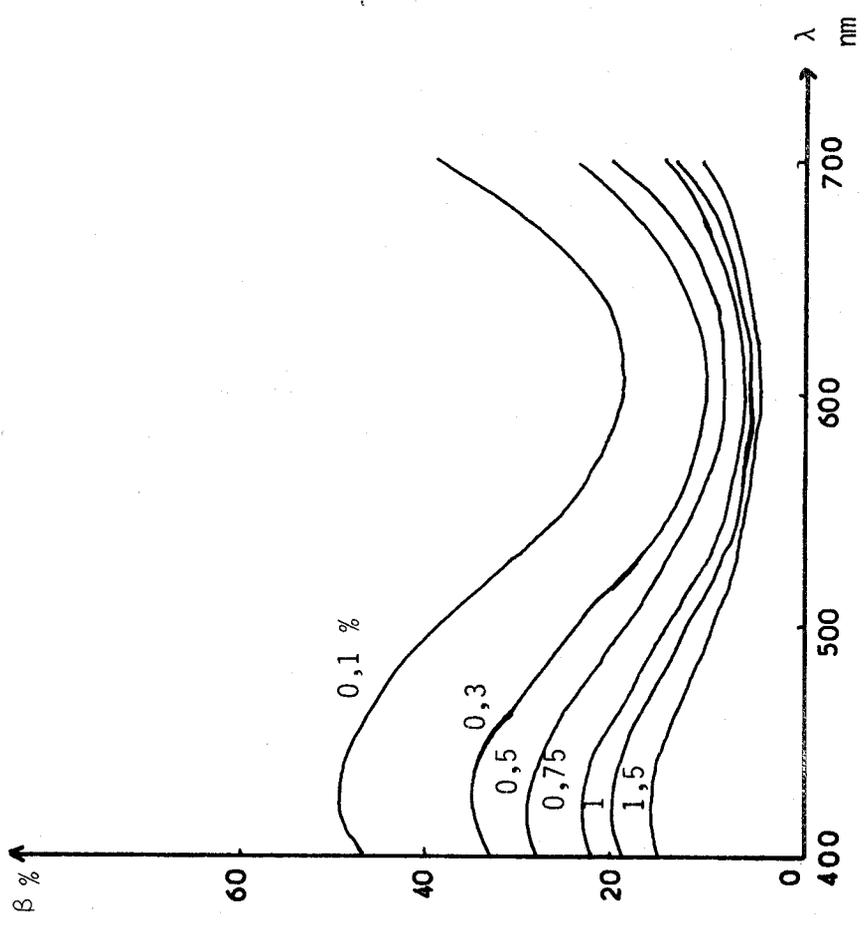


FIGURE - 5 - Coloris Bleu.



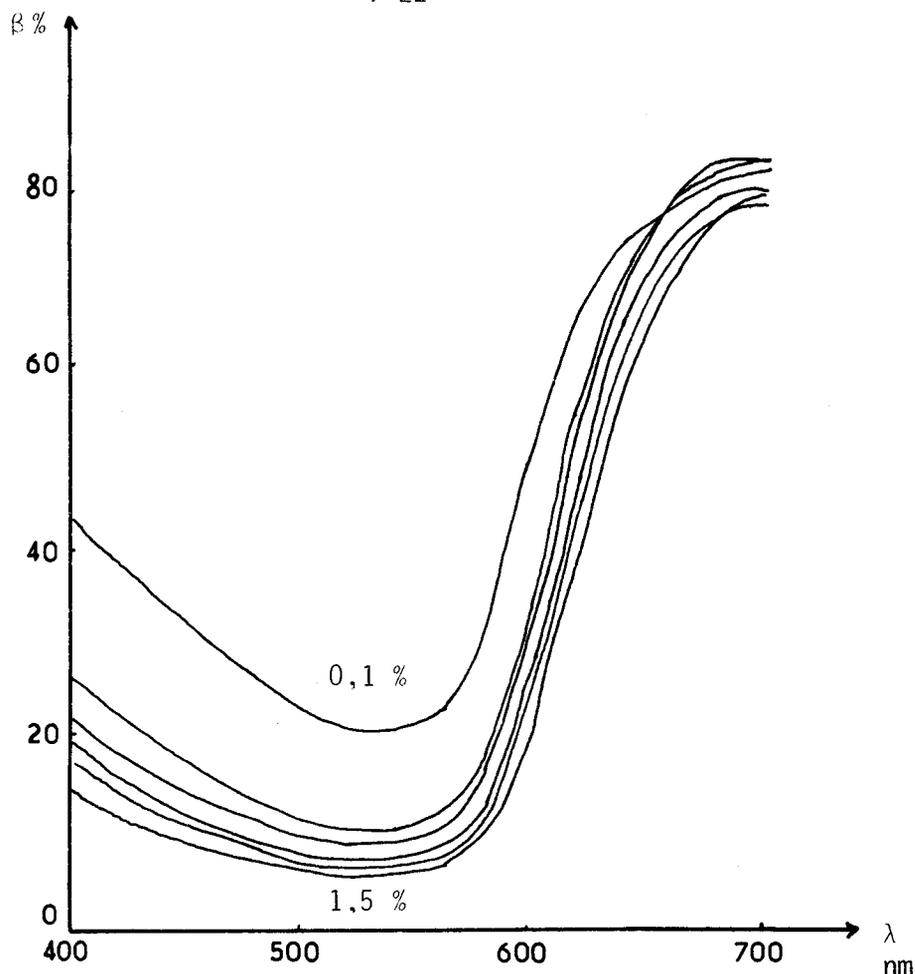


FIGURE - 7 - ROUGE.

Ainsi établie, cette mémoire de colorant servira de base de calcul de recette pour toute reproduction. Un programme de calcul de recette déterminera les proportions de colorant à ajouter, compte-tenu de cette mémoire de colorant, pour approcher la nuance désirée.

Au stade actuel de nos travaux, nous disposons de tous les éléments nécessaires à une automatisation du processus de teinture pour une reproduction.

#### V-6 REGULATION DU PROCESSUS DE TEINTURE :

Avant d'aborder ce sujet, il faut d'abord rappeler :

1°) La situation chronologique de tous les événements intervenant dans le processus.

2°) Et définir la méthodologie adapté pour teindre un tissu.

Un diagramme temporel figure 8, trace l'évolution des différentes étapes. Ainsi nous retrouvons :

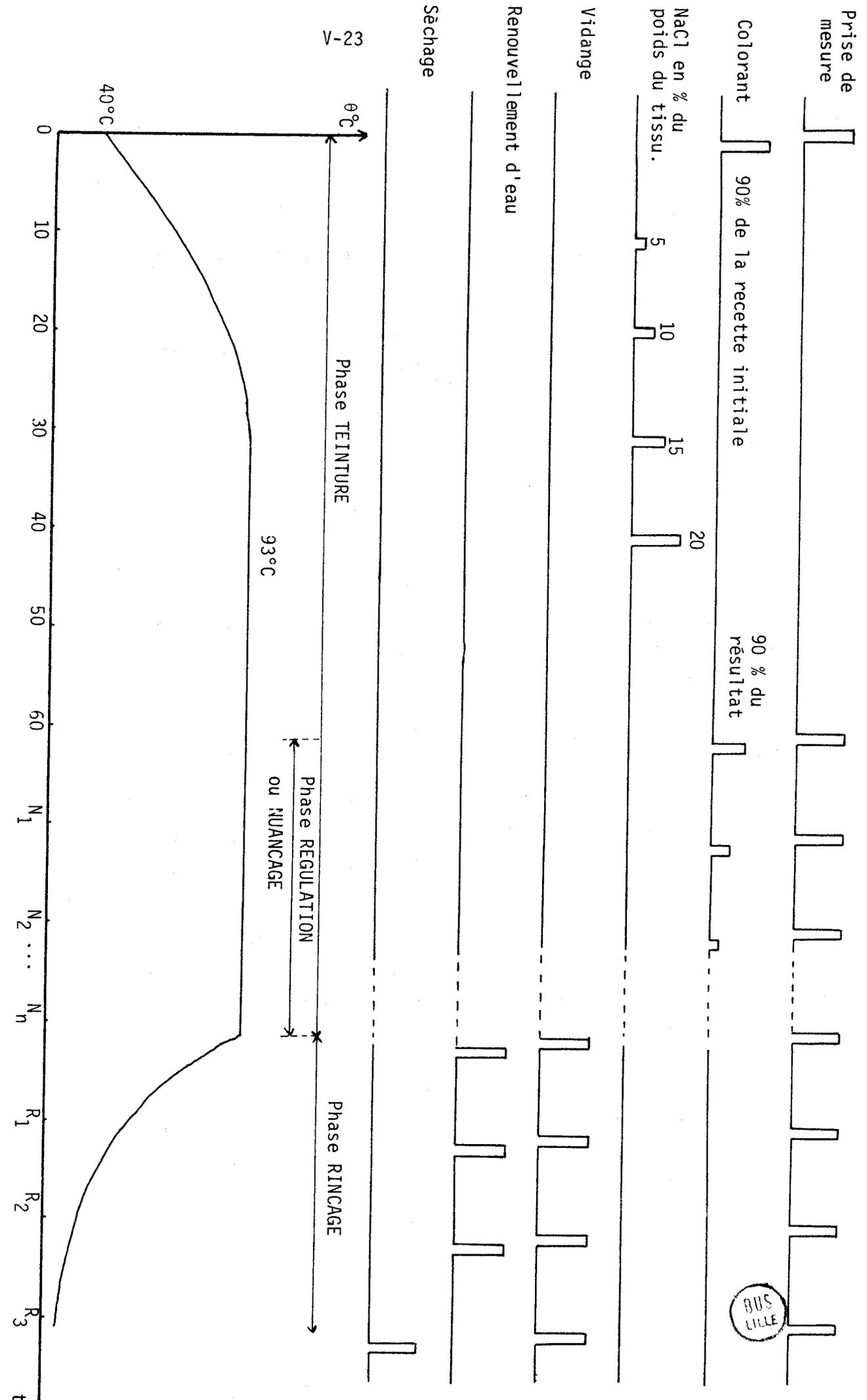


Figure 8 : Diagramme temporel

- La phase de teinture au bout de laquelle l'épuisement est considéré pratiquement comme achevé.

- La phase rinçage avec renouvellement d'eau d'une durée totale de 30 minutes.

A la procédure mise au point dans le chapitre IV, nous introduisons une phase dite de "nuançage" dans laquelle se fera la régulation.

#### V-6.1. Phase de nuançage

Pour juger de la conformité d'une reproduction, le teinturier intervenait soit par son expérience, soit par une découpe d'un échantillon de la pièce de tissu. Ce dernier est rincé, séché, mesuré et ensuite comparé au coloris type. La décision pour une correction éventuelle sera prise à la fin de toutes ces opérations. Mais pendant le temps que dure ce contrôle, la teinture se poursuivait. Alors trois cas peuvent se produire :

- si la nuance n'est pas dépassée, le teinturier rajoute du colorant et poursuit la teinture.

- si la nuance est la même, le teinturier procède au rinçage. Toutefois, il y a eu consommation en plus d'énergie, car la teinture s'est poursuivie pendant le contrôle et peut-être dépassement de la teinte.

- Si la nuance est dépassée, le tissu passera en second choix. Afin d'éviter la manière traditionnelle de reproduction de nuance, qui est sujet à des erreurs et au coût élevé, nous appliquons une technique nouvelle.

Cette dernière consiste à créer une phase de nuançage à la fin de la teinture et avant la vidange. A cette époque, nous intervenons par le moyen du capteur optique. Une prise de mesure sera effectuée sur le tissu mouillé, puis un contrôle de conformité prenant en compte la modélisation de la phase de rinçage, permettra la régulation du système.

Sachant l'irréversibilité du phénomène de teinture, c'est-à-dire la non possibilité de déteindre, nous introduisons par mesures de précaution 90 % de la recette initiale. Ensuite, un ajustement de la reproduction s'opère dans la phase de nuançage par adjonction successive de colorant.

#### V-6.2. Méthode utilisée pour une reproduction

L'une des hypothèses de travail qui consistait à teindre avec un bain relativement clair, de composition constante, a été écartée. Il était espéré de cette méthode une montée en colorant homogène et régulière et par conséquent une amélioration de l'unisson.

Ce résultat a été acquis mais aux dépens d'un temps de teinture considérablement plus long, incompatible avec les techniques industrielles et le coût énergétique de l'opération.

La méthode que nous appliquons comporte deux phases :

- La première reprend la technique classique de teinture avec une importante fraction de colorants introduite au début de teinture. Cette phase s'achève au bout de 60 minutes. A cet instant, l'équilibre dynamique entre la concentration dans le bain de teinture et celle dans la matière à teindre est atteint.

- La seconde phase est une phase de nuançage où les colorants sont progressivement ajoutés après :

- 1°) Une prise de mesure colorimétrique.
- 2°) Un calcul de la proportion de colorant à ajouter pour parvenir à la nuance recherchée.
- 3°) Un calcul de différence de couleur pour le contrôle de la conformité.

Une fois parvenu à la nuance recherchée, nous procédons à la vidange et au rinçage.

V-6.3. Organisation d'une teinture :

L'organisation d'une teinture pour une reproduction se fait comme suit :

1°) Détermination des composants en colorant du coloris-type :

Les résultats découlent d'un calcul de recette comparant la courbe de réémission du coloris-type à celle de l'écru. Evidemment dans le cas d'une monochromie, les deux des trois composants sont nuls. Le troisième constitue la recette initiale.

2°) Préparation de la solution de colorant et de la matière à teindre.

3°) L'organigramme de la figure 9 décrit l'ensemble de l'opération.

V-7 EXPERIMENTATION

V-7.1. But :

A l'aide du système élaboré, nous essayons de reproduire des couleurs, de concentration connue, faites en monochromie avec les mêmes colorants de base. Le but est de vérifier les résultats obtenus, d'en déduire la précision et les performances de la méthode employée.

V-7.2. Indications :

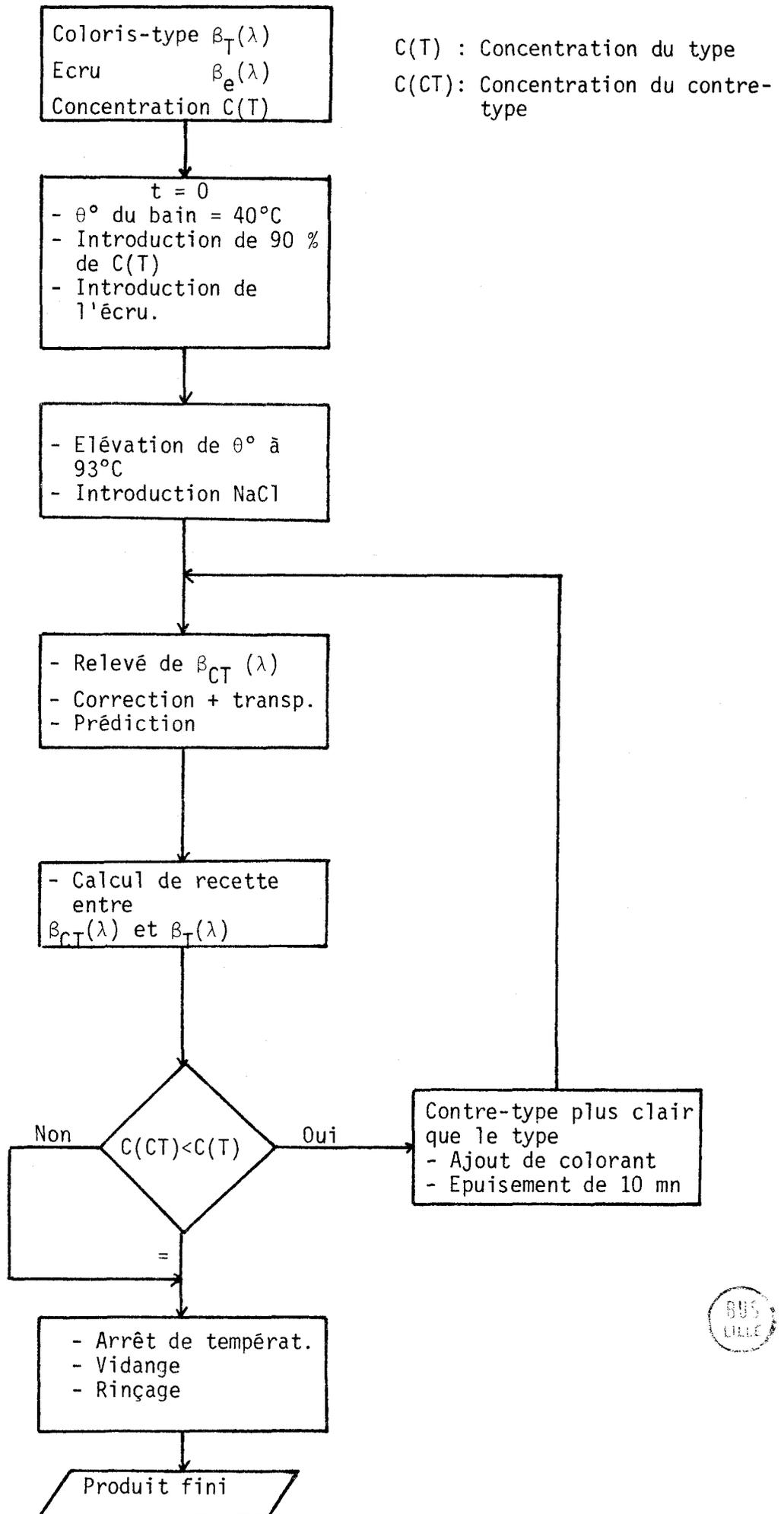
Le programme de reproduction est écrit en FORTAN IV pour son exploitation sur ordinateur IBM 1130 en liaison avec un lecteur de ruban fournit par une télécopie, elle-même raccordée à un spectrophotomètre.

V-7.3. Résultats :

Sur les listings ci-dessous sont consignés les résultats et courbes de réémission obtenus lors de la reproduction d'un coloris bleu à différents instants - figures 11, 12, 13.

D'autres reproductions ont été réalisées dans des coloris jaunes et rouges, figures 14, 15. L'ensemble des reproductions a donné des résultats satisfaisants. Un calcul de différence de nuances, après chaque reproduction, permet d'apprécier la précision et la réalisation du système de régulation envisagé.

FIGURE - 9 - Organigramme  
de l'organisation d'une  
teinture.



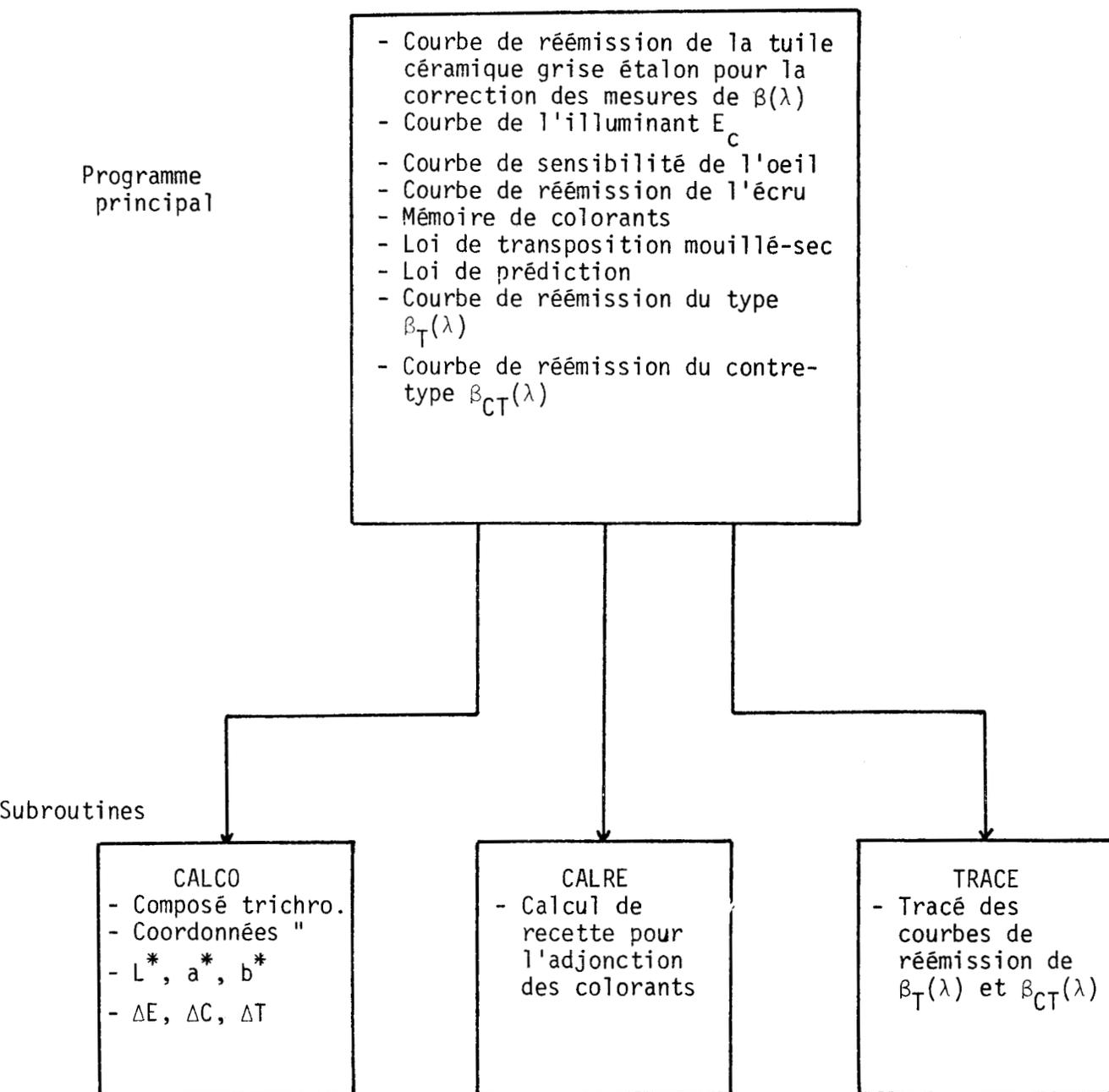


FIGURE - 10 - Programme de contrôle de conformité, de réajustement et de tracé de courbes de réémission.





REPRODUCTION DE LA COULEUR

CENTRE D'AUTOMATIQUE

SYMBOLE = I

\*\*\*\*\*  
 REFER. = COL TYP BL 17-11-80  
 \*\*\*\*\*  
 400 420 440 460 480 500 520 540 560 580 600 620 640 660 680 700  
 BETA MESURE  
 15.1 15.6 14.7 12.8 10.8 8.8 6.8 5.6 4.5 4.1 4.0 4.1 4.6 5.6 7.0 9.6

SYMBOLE = X

\*\*\*\*\*  
 REFER. = CTYPE6 BL1.5 171180 *60' de teinture*  
 \*\*\*\*\*  
 400 420 440 460 480 500 520 540 560 580 600 620 640 660 680 700  
 BETA MESURE 0.5 0.8 0.8 0.8 0.7 0.6 0.5 0.5 0.3 0.3 0.4 0.3 0.3 0.3 0.3 0.6  
 BETA CORRIGE 2.00 2.41 2.34 1.86 1.51 1.21 0.96 0.91 0.53 0.85 0.68 0.50 0.84 0.82 0.82 0.96  
 BETA SEC CALCULE 11.46 12.92 12.68 10.93 9.48 8.15 6.91 6.65 4.57 6.34 5.41 4.37 6.31 6.16 6.18 6.91

COORD. TRICHR. TYPE

\*\*\*\*\*  
 X= 0.6598E 01  
 Y= 0.5962E 01  
 Z= 0.1680E 02

COMP. TRICHR. TYPE

\*\*\*\*\*  
 PX= 0.2247E 00  
 PY= 0.2030E 00  
 PZ= 0.5721E 00

LT= 0.2931E 02 AT= 0.8030E 01 BT=-0.2623E 02  
 ANG.TEI=-0.1273E 01

COORD. TRICHR. CTYPE

\*\*\*\*\*  
 X= 0.7769E 01  
 Y= 0.6636E 01  
 Z= 0.1436E 02

COMP. TRICHR. CTYPE

\*\*\*\*\*  
 PX= 0.2518E 00  
 PY= 0.2344E 00  
 PZ= 0.5117E 00

LT= 0.3096E 02 AT= 0.5654E 01 BT=-0.1808E 02  
 ANG.TEI=-0.1267E 01

ECART TOTAL

\*\*\*\*\*  
 DE= 0.0645E 01

ECART CHROMATIQUE

\*\*\*\*\*  
 DC= 0.8485E 01

DIFFE. DE TEINTE

\*\*\*\*\*  
 DS= 0.1355E 00

SOLUTION\*

\*\*\*\*\*  
 10.6 11.9 11.7 10.1 8.7 7.4 6.1 5.7 3.9 5.0 4.3 3.7 3.1 3.2 5.5 6.4  
 BLEU DIAZOL R EXTRA C= 0.140 l 22.8 ML  
 JAUNE DIAZOL LUMIERE C= 0.000 l 0.0 ML  
 ROUGE DIAZOL LUMIERE C= 0.000 l 0.0 ML

REPRODUCTION DE LA COULEUR

CENTRE D'AUTOMATIQUE

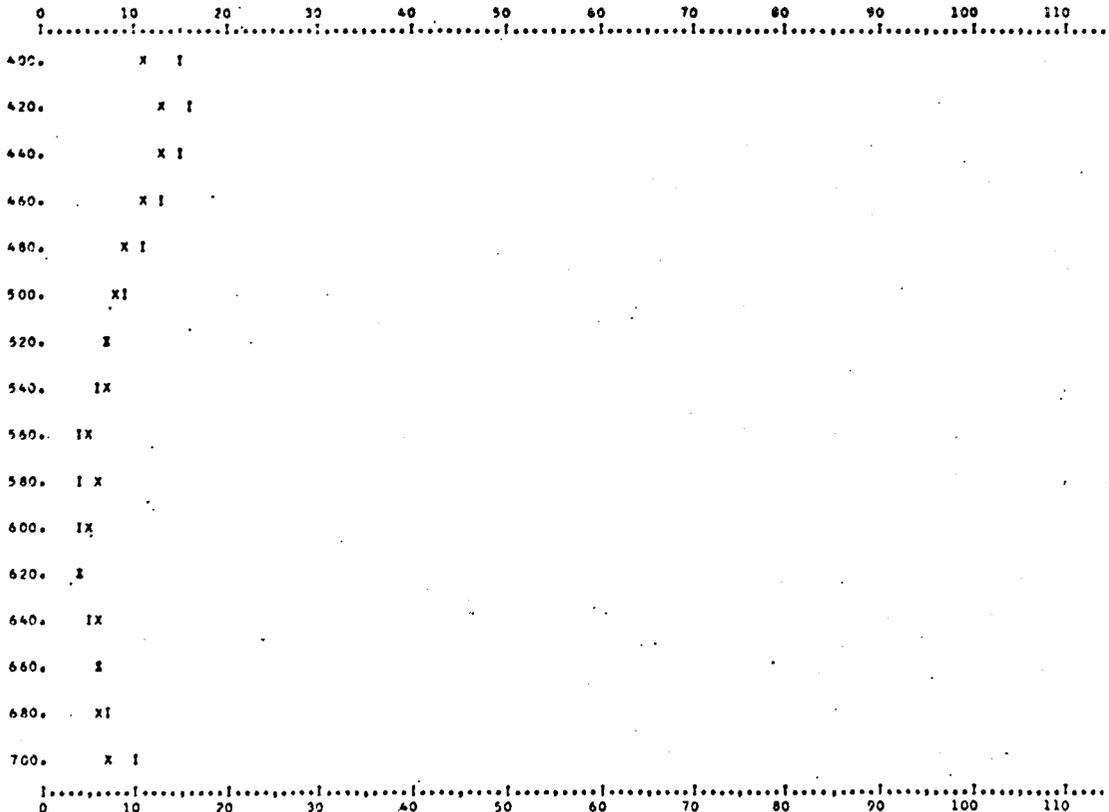


FIGURE -- 12 - Après 60' de teinture.

REPRODUCTION DE LA COULEUR

CENTRE D'AUTOMATIQUE

SYMSOLE = I  
 \*\*\*\*\*  
 REFER. = COL TYP BL 17.11.80  
 \*\*\*\*\*  
 400 420 440 460 480 500 520 540 560 580 600 620 640 660 680 700  
 BETA MESURE  
 15.1 15.8 14.7 12.8 10.8 8.8 6.8 5.6 4.5 4.1 4.0 4.1 4.6 5.6 7.0 9.6

SYMSOLE = X  
 \*\*\*\*\*  
 REFER. = CTYPESE BL1.5 17118  
 \*\*\*\*\*  
 400 420 440 460 480 500 520 540 560 580 600 620 640 660 680 700  
 BETA MESURE  
 13.7 14.7 14.0 12.3 10.6 8.8 7.0 5.5 4.6 4.1 3.9 4.0 4.6 5.6 7.1 10.2

COOR. TRICHR. TYPE                      COMP. TRICHR. TYPE  
 \*\*\*\*\*  
 X= 0.6598E 01                      PX= 0.2247E 00                      LT= 0.2931E 02                      AT= 0.8030E 01                      BT=-0.2625E 02  
 Y= 0.5962E 01                      PY= 0.2030E 00  
 Z= 0.1680E 02                      PZ= 0.5721E 00                      ANG.TEI=-0.1273E 01

COOR. TRICHR. CTYPE                      COMP. TRICHR. CTYPE  
 \*\*\*\*\*  
 X= 0.6408E 01                      PX= 0.2260E 00                      LT= 0.2918E 02                      AT= 0.6636E 01                      BT=-0.2483E 02  
 Y= 0.5909E 01                      PY= 0.2084E 00  
 Z= 0.1602E 02                      PZ= 0.5654E 00                      ANG.TEI=-0.1309E 01

ECART TOTAL                                      ECART CHROMATIQUE                                      DIFFE. DE TEINTE  
 \*\*\*\*\*  
 DE= 0.1979E 01                                      DC= 0.1728E 01                                      DS= 0.9550E 00

SOLUTION= \*\*\*\*\*  
 13.5 14.6 13.7 12.0 10.3 8.6 6.8 5.4 4.5 4.0 3.8 3.9 4.5 5.5 7.1 10.1  
 BLEU DIAZOL R EXTRA                      C= 0.000 l                                      0.0 mL  
 JAUNE DIAZOL LUMIERE                      C= 0.000 l                                      0.0 mL  
 ROUGE DIAZOL LUMIERE                      C= 0.010 l                                      1.6 mL

REPRODUCTION DE LA COULEUR

CENTRE D'AUTOMATIQUE

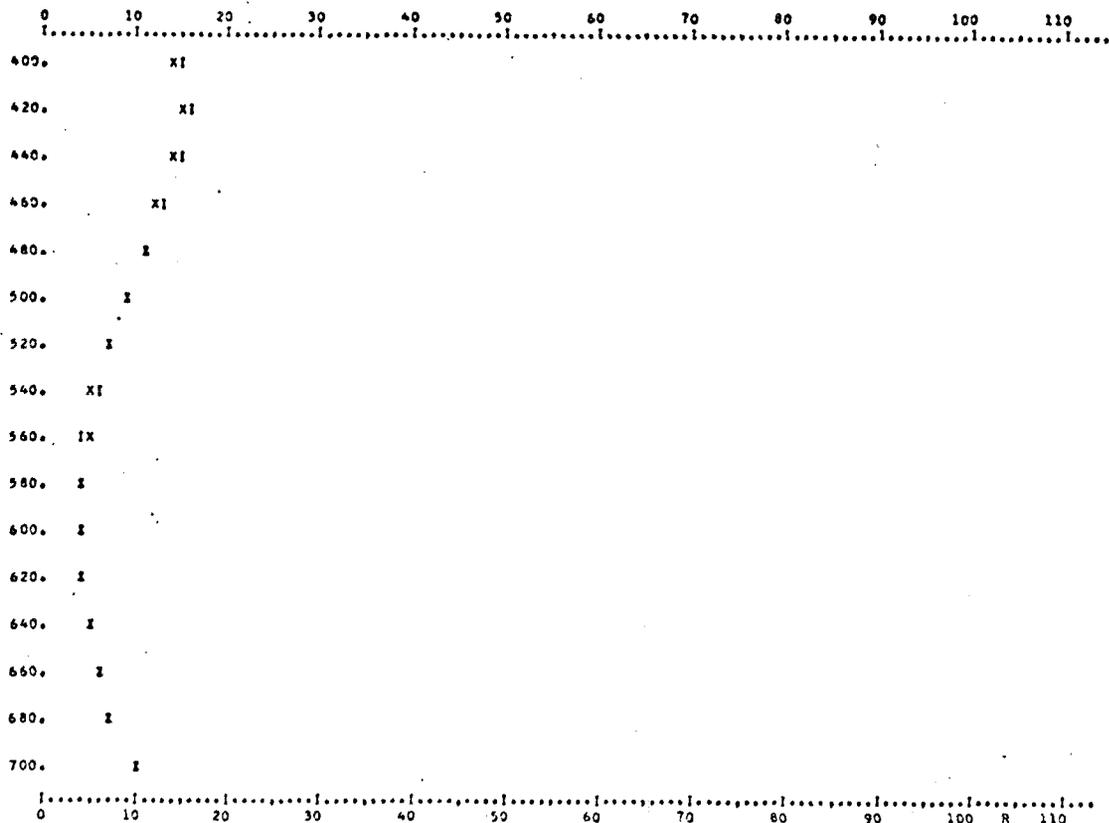


FIGURE - 13 - Reproduction sèche.

REPRODUCTION DE LA COULEUR				CENTRE D'AUTOMATIQUE												
				BLEU DIAZOL R EXTRA	0.11	0.30	0.50	0.70	1.00	1.30						
				JAUNE DIAZOL LUMIERE	0.10	0.30	0.50	0.70	1.00	1.30						
				ROUGE DIAZOL LUMIERE	0.10	0.30	0.50	0.70	1.00	1.30						
SAMPLE #1																
DIFF. JAUNE TYPE 4681																
*****																
	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700	
REF. MESURE	4.0	7.1	7.0	7.8	10.7	16.1	27.4	45.4	74.0	74.1	77.9	81.3	82.6	84.4	85.4	
	8.3															

SAMPLE #2															
DIFF. JAUNE CTYS 4681															
*****															
	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
REF. MESURE	4.0	7.0	7.1	8.7	11.0	16.7	27.7	45.7	59.4	71.6	77.0	80.9	82.0	84.1	85.5

COMP. TRICHR. TYPE	COMP. TRICHR. TYPE	LT= 0.8071E 02	AT= 0.3356E 02	BT= 0.7566E 02	
X= 0.4255E 02	PX= 0.4751E 00	ANG.TE1= 0.1393E 01			
Y= 0.5079E 02	PY= 0.4400E 00				
Z= 0.1116E 02	PZ= 0.8440E-01				

COMP. TRICHR. CTYPE	COMP. TRICHR. CTYPE	LT= 0.8005E 02	AT= 0.1399E 02	BT= 0.7385E 02	
X= 0.6148E 02	PX= 0.4741E 00	ANG.TE1= 0.1384E 01			
Y= 0.5475E 02	PY= 0.4378E 00				
Z= 0.1141E 02	PZ= 0.8804E-01				

FCART TOTAL	FCART CHROMATIQUE	DIFF. DE TEINTE
DE= 0.1545E 01	TC= 0.1713E 01	DS= 0.6540E 02

SOLUTION	7.9	6.9	7.0	8.1	10.8	16.3	26.5	41.2	53.2	65.2	73.8	79.7	81.3	83.4	85.3	84.1
				BLEU DIAZOL R EXTRA				0.4000 l		0.20 ML						
				JAUNE DIAZOL LUMIERE				0.4000 l		0.20 ML						
				ROUGE DIAZOL LUMIERE				0.4000 l		1.1 ML						

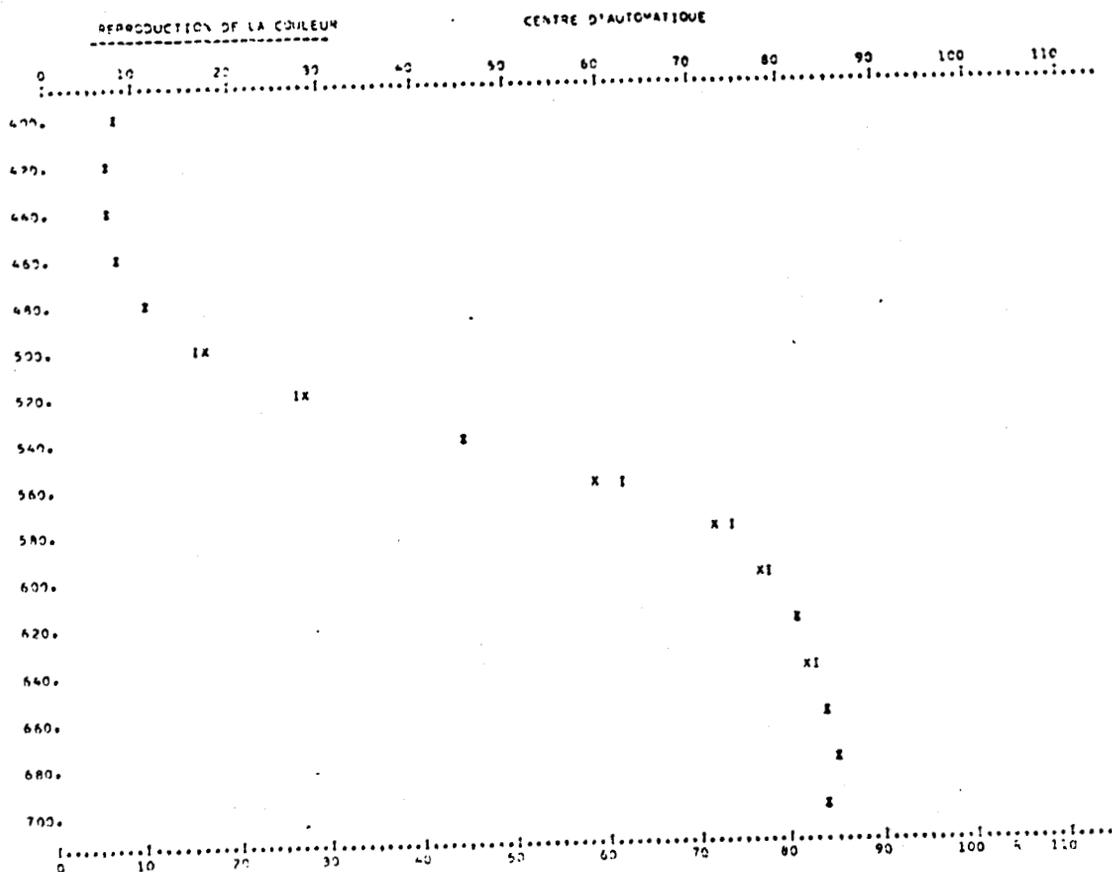


FIGURE - 14 - Reproduction sèche

REPRODUCTION DE LA COULEUR													CENTRE D'AUTOMATIQUE				
Echantillon de																	
REFLECTANCE TYPE 100%																	
400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700		
22.5	14.7	15.5	13.0	11.1	9.5	8.7	9.1	10.7	18.0	34.5	55.0	68.8	76.1	80.1	81.0		
-----																	
Echantillon de																	
REFLECTANCE TYPE CTXSE100%																	
400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700		
21.1	17.5	14.3	12.7	10.2	8.7	8.0	8.3	9.8	16.8	32.5	53.3	68.0	76.1	80.3	81.5		
-----																	
COMP. TRICHR. TYPE						COMP. TRICHR. TYPE											
*****						*****											
X= 0.152E 02						Y= 0.4521E 00						LT= 0.5234E 02		AT= 0.4790E 02		RT= 0.1155E 02	
Y= 0.2705E 02						Y= 0.2703E 00											
Z= 0.1774E 02						Z= 0.2544E 00						ANG.TE]= 0.2366E 00					
COMP. TRICHR. TYPE						COMP. TRICHR. TYPE											
*****						*****											
X= 0.301E 02						Y= 0.4579E 00						LT= 0.5104E 02		AT= 0.4861E 02		RT= 0.1200E 02	
Y= 0.1937E 02						Y= 0.2747E 00											
Z= 0.1642E 02						Z= 0.2491E 00						ANG.TE]= 0.2420E 00					
EGANT TOTAL						EGANT CHEMISTIQUE						DIFFE. DE TEINTE					
*****						*****						*****					
TE= 0.1552E 01						DEFO. 1990E 00						DS= 0.2679E 02					
-----																	
SOLUTION:																	
21.0	17.4	14.3	11.9	10.1	8.6	7.9	8.2	9.7	16.5	32.5	53.0	67.5	75.5	79.7	81.1		
							MEL. DIAM. 9 EXTRA		C= 0.000 1		0.0 ML						
							JANE DIAM. 10 MISH		C= 0.000 1		0.0 ML						
							V. DIAM. 10 MISH		C= 0.000 1		0.0 ML						

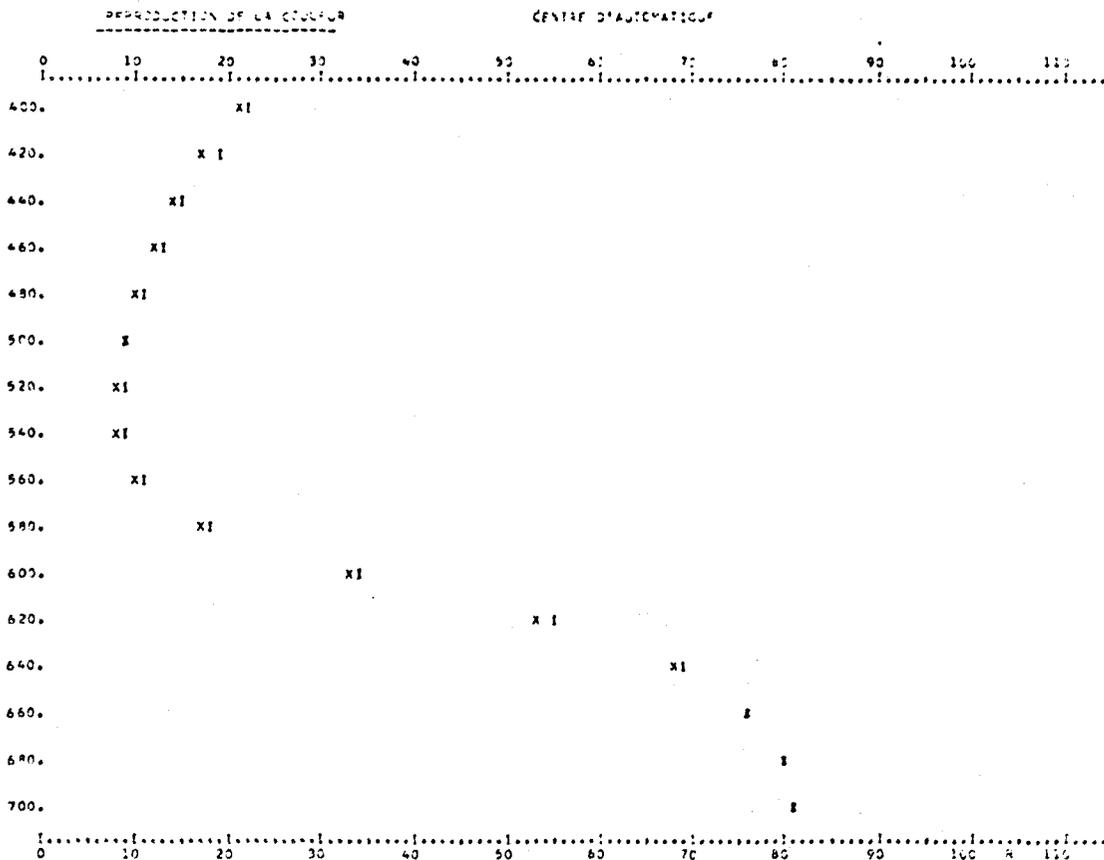


FIGURE - 15 - Reproduction sèche.

*V-8 CONCLUSION*

Ce dernier chapitre répond à l'objectif que nous nous sommes fixés de réaliser, à savoir la régulation d'un processus de teinture pour la reproduction d'une nuance donnée.

Dans une première partie, nous avons formulé le moyen pour parvenir à une telle régulation. Mais, l'application de ce moyen a nécessité l'établissement d'une mémoire de colorants, stockée dans un calculateur et destinée à alimenter un calcul de recette.

Dans une deuxième partie, nous avons coordonné les travaux élaborés dans les chapitres II et IV à une formule de calcul de recette, afin de fermer la chaîne de régulation.

Compte tenu de la difficulté du phénomène de teinture auquel vient s'ajouter celui de la colorimétrie, nous montrons par plusieurs expériences réalisées en monochromie, la faisabilité de la méthode. Pour notre part, nous estimons que la reproduction assistée par ordinateur est beaucoup plus fiable que celle réalisée par le teinturier. Elle permet de déterminer judicieusement, en temps quasi-réel, la ou les quantités de colorant à ajouter pour un réajustement de nuance. Cette méthode élimine surtout l'aspect subjectif et il est hors de doute qu'à ce seul point, son application s'avère utile et rentable.

- B I B L I O G R A P H I E -

/1/ D. STEEN

*Communication particulière.*

/2/ P. KUBELKA - F. MUNK

*"Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche"*

*Z. Techn. Physik, 12, 593, 1931.*

/3/ /4/ H. LEJEUNE - C. MARTRE

*Couleurs 59, 3ème trimestre, 1965-12*

/5/ F. BRAUN

*Couleurs 63, 3ème trimestre, 1966-31*

/6/ ALDERSON, ATHERTON, DERBYSHIRE

*J.S.D.C. 77.61, pp. 663-668*

/7/ R.B. LOVE

*J.S.D.C. 81, 1965, p. 609*

/8/ ATHERTON

*J.S.D.C. 71, 1955, p. 389*

/9/ T.B. RIDGEMAN

*J.S.D.C. 82, 1966, p. 457*

/10/ SHIFFNER

*J.S.D.C.*

/12/ E. ALLEN

*Basic equations used in computer colour*  
JOSA - Vol. 56 - 1966.

/13/ F. ALLEN

*Basic equations used in computer colour*  
JOSA - Vol. 64 - 1974.

## - CONCLUSION GÉNÉRALE -

-----

L'application pratique de la colorimétrie dans le domaine textile et tinctorial ouvre la voie à l'automatisation des industries de teintures. Juger de la conformité d'une couleur à distance par le biais de mesures colorimétriques et agir par des fonctions ou des lois mathématiques régissant le phénomène, permet d'éliminer le jugement subjectif de l'oeil et les nombreuses erreurs et imprécisions qui en résultent.

A cet effet, une sonde optique a été développée transformant ainsi un spectrophotomètre de laboratoire en un capteur industriel de couleurs. Ce capteur fonctionne sur textile mouillé et en ambiance industrielle ; Grâce à ce nouveau capteur nous avons pu mener, dans un premier temps, une étude sur le textile mouillé. Une loi de correspondance reliant la réémission sèche à la mesure sur textile mouillé a été établie.

Les deux outils de base, le capteur et la loi de correspondance, nous ont permis d'observer l'évolution de la couleur du textile tout au long de son traitement.

Les résultats d'une campagne de mesure sur des teintures traditionnelles ont abouti à l'élaboration d'une procédure précise de teinture. Cette dernière assure une montée contrôlée du colorant sur les fibres de textile et un épuisement complet du bain.

Comme le système devient non commandable dans la phase de rinçage, il fallait modéliser celle-ci pour prédire la couleur sèche à l'issue de l'étape de teinture proprement dite. L'opération de nuancement introduite ainsi avant le rinçage est destinée à l'approche du coloris à reproduire.

En ce qui nous concerne, la modélisation de la phase de rinçage et la prédiction de la couleur sèche résolvent une partie des problèmes liés au nuançage. Le reste relève de la bonne connaissance des méthodes d'évaluation des quantités de colorants à ajouter pour passer d'un coloris à un autre. Cette difficulté a pour origine la façon dont a été établie la recette initiale, la couleur du support étant l'un des éléments intervenant.

L'idée d'une régulation de la montée en colorant n'est pas nouvelle. Les recherches faites jusqu'à présent étaient basées sur l'analyse de la composition du bain de colorant. La méthodologie que nous avons adoptée pour le réajustement de la nuance et le contrôle de conformité, en temps quasi-réel, tient compte quant à elle de la vraie grandeur de la couleur. Ceci représente une innovation dans ce secteur.

Les expériences ont été réalisées en monochromie. Les problèmes relevant du traitement en mono-colorant substantif sur coton sont maintenant connus et maîtrisés en laboratoire. Les résultats acquis :

- montrent la faisabilité de cette méthode
- permettent d'aborder, efficacement, les problèmes relatifs à la dichromie et à la trichromie.

Nous ne prétendons pas avoir résolu le problème dans sa totalité, mais l'étude qui a été menée, pose des bases concrètes et rationnelles dans ce domaine qui a longtemps été marqué par un certain empirisme.

Avant de clore ce mémoire, citons quelques perspectives ouvertes par la mesure des couleurs industrielles.

Le développement des fibres optiques et de la micro-informatique devrait entraîner la construction d'un spectrophotomètre simple possédant les aptitudes requises en milieu industriel.

La complexité des phénomènes de teinture et du matériel à mettre en oeuvre dans une telle régulation devraient amener la conception d'une commande centralisée de plusieurs appareils de teinture.

En dehors du textile, d'autres applications pourraient être envisagées, en particulier dans le secteur de l'imprimerie quadrichromique pour le réglage des débits d'encre en vue du calage plus rapide des rotatives. Il s'agit, là aussi, d'un problème de conformité de couleur et de ses répercussions sur les matières premières (papier, encre, énergie, etc....)

Dans le secteur de l'agro-alimentaire, le mûrissement des fruits ou la cuisson des aliments pourraient être surveillé par ce type de capteur. D'autres applications dans les industries de la peinture ou des métaux colorés sont envisageables.

## ANNEXE I.1

-----

### COMPOSANTES TRICHROMATIQUES SPECTRALES - RÉPARTITION SPECTRALE RELATIVE D'ÉNERGIE $E_c$

$\lambda$ nm	$\bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$	$E_c$
400	0.0143	0.0004	0.0679	63.30
420	0.1344	0.0040	0.6456	98.10
440	0.3483	0.0230	1.7471	121.50
460	0.2908	0.0600	1.7441	123.10
480	0.0956	0.1390	0.8130	123.90
500	0.0849	0.3230	0.2720	112.10
520	0.0633	0.7100	0.0203	96.90
540	0.2904	0.9540	0.0039	102.10
560	0.5945	0.9950	0.0017	105.30
580	0.9163	0.8700	0.0008	97.80
600	1.0622	0.6310	0.0002	89.70
620	0.8544	0.3810	0.0000	88.10
640	0.4479	0.1750	0.0000	87.80
660	0.1649	0.0610	0.0000	87.90
680	0.0468	0.0170	0.0000	84.00
700	0.0144	0.0041	0.0000	76.30



## ANNEXE II.1

---

### TECHNOLOGIE ET CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES.

---

#### I) DEVELOPPEMENT DES FIBRES OPTIQUES

La conduction de la lumière par des diélectriques est connue depuis longtemps comme en témoignent les premiers travaux scientifiques au cours du Siècle dernier : John Tyndall a étudié la conduction guidée de la lumière et a démontré la possibilité de réaliser des trajectoires optiques par les filets d'eau.

Ce n'est que vers le milieu du vingtième siècle que le principe de transmission de lumière en fut redécouvert. La réalisation des premières fibres pour la conduction de la lumière devient une réalité industrielle dans ces dix dernières années.

L'application des fibres optiques sera une innovation dans l'industrie textile. Leur première fonction est de guider la lumière colorée dans le visible ou l'infrarouge.

#### II) STRUCTURE DES FIBRES OPTIQUES

La fibre optique est un guide d'onde électromagnétique cylindrique composé de deux matériaux transparents d'indice de réfraction différent au centre de la fibre le coeur autour duquel il y a un revêtement d'indice inférieur à celui du coeur et une protection.

La théorie montre que seul un nombre fini de rayons ou modes électromagnétiques se propagent dans la fibre.

Pour une fibre à saut d'indice leur nombre est :

$$N = 2\pi^2 \frac{a^2}{2\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2)$$

a : diamètre du coeur

$n_1$  : indice de réfraction du coeur

$n_2$  : indice de réfraction de la gaine.

Le nombre de mode dépend donc du diamètre du coeur. Ainsi, les fibres optiques ont été classées en deux groupes :

- Les fibres monomodes dans lesquelles le diamètre du coeur est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde lumineuse.

- Les fibres multimodes où le diamètre du coeur est plus grand que la longueur d'onde.

α) Les fibres monomodes permettent d'éliminer les trajectoires en lignes brisées pour conserver seulement le rayon direct axial. La propagation est décrite par les solutions des équations de Maxwell satisfaisant aux conditions de continuité à l'interface coeur-gaine. Elles offrent la possibilité de transmettre de fort débit, mais soulèvent de grandes difficultés technologiques.

La réduction du diamètre du coeur à quelques microns rend difficile l'injection de la lumière et par delà la réalisation d'un bon alignement pour l'élimination des pertes de couplages (figure 2.2 )

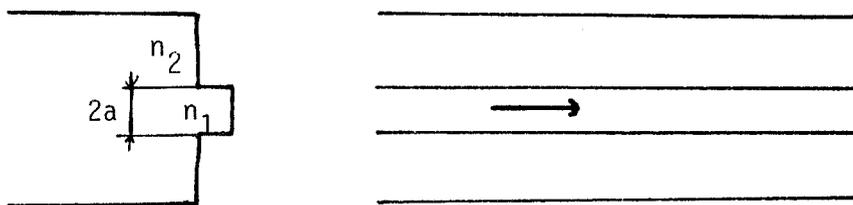


FIGURE 2.2. - Fibre monomode.

β) Les fibres multimodes avec un diamètre du coeur plus grand que la longueur d'onde, ce qui entraîne une diminution des pertes de couplage et un raccordement facile, sont les plus utilisées.

La propagation dans les fibres optiques peut être expliquée par les lois de l'optique géométrique.

En effet, pour qu'il y ait propagation de la lumière, le faisceau pénétrant dans la fibre doit satisfaire à deux conditions :

- Une condition de réflexion totale : Il faut que l'inclinaison des rayons lumineux par rapport à l'axe soit inférieure à une limite  $\theta_n$ . Comme dans notre cas la fibre présente un saut d'indice (figure 2.3.), l'angle  $\theta_n$  correspond à l'angle limite de réflexion totale sur le dioptré coeur-gaine  $n_1/n_2$ .

$$\text{La loi Descartes } \cos \theta_n = \frac{n_2}{n_1}$$

Les rayons lumineux entrant dans la fibre proviennent d'un milieu qui est l'air et d'indice très proche de l'unité.

La réfraction sur le dioptré air-coeur nous donne alors une inclinaison maximale  $\theta_n$  telle que :

$$\sin \theta'_n = n_1 \sin \theta_n = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

La valeur  $\sin \theta'_n$  définit l'ouverture numérique de la fibre. Cette ouverture détermine la capacité ou la fraction de puissance lumineuse qu'une fibre peut accepter dans un rayonnement incident.

- Une condition de phase liée à l'interférence entre une onde incidente et la même onde réfléchie dans l'interface coeur-gaine : La différence de phase entre l'onde incidente en A et celle incidente en C doit être un multiple de  $2\pi$  et ceci dépend de la polarisation du faisceau optique pénétrant dans la fibre (figure 2.4.)

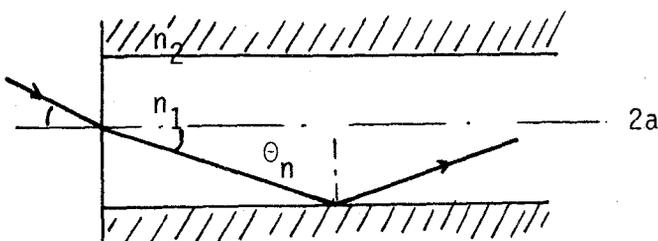


FIGURE 2.3.

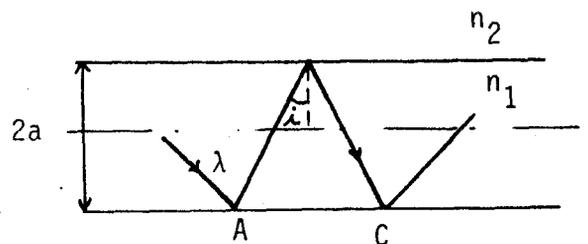


FIGURE 2.4.

Condition de propagation :  $\frac{8\pi a}{\lambda} \cos i + 2\phi_r = 2K\pi$

$\phi_r$  : déphasage dû à la réflexion vitreuse sur l'interface.

### III) CARACTERISTIQUES DU CABLE A FIBRES OPTIQUES

Le problème consiste à envoyer une énergie lumineuse suffisante pour éclairer la surface du tissu et récupérer une énergie compatible avec la chaîne de mesure.

La spécification du nombre de fibres optiques constituant le câble pour permettre une grande part de transmission des informations colorées entre le Jigger et le spectrophotomètre a été faite à la base d'une étude sur échantillon de fibre optique de 50 cm de long et de capteur d'énergie lumineuse.

Pour la spécification du nombre et de la disposition des fibres il a été tenu compte :

- du matériel dont on dispose
- de l'atténuation de la fibre (figure 2.5.)
- de l'ambiance particulière qui règne lors de la prise de l'information. En effet, cette dernière se fait à l'intérieur d'un appareil de teinture sur un tissu humide et à une température de 90°C.

A partir de ces contraintes six fibres d'éclairage et une seule fibre de retour ont été estimées nécessaires pour fournir une mesure exploitable.

Vue le coût élevé des fibres qui est fonction du degré de pureté des matériaux utilisés, les six fibres pour la transmission des rayons lumineux de la source à l'objet sont de qualité standard alors que l'unique fibre centrale qui collecte les rayons réfléchis par l'objet à la cellule photo-électrique est de qualité supérieure. L'absorption propre du matériau de la fibre centrale est moins importante que celle de l'éclairage.

Caractéristiques géométriques :

La fibre est composée d'une âme en silice pure, d'un revêtement silicone servant d'indice et d'une protection en Tefzel.

Les fibres ont un diamètre de  $1000\mu$  et une longueur de 4 m.

Du côté de la source lumineuse les six fibres sont placées dans un embout cylindrique et sont groupées d'une manière à former une section rectangulaire (2x3).

Du côté échantillon les six fibres sont disposées en cercle autour de la fibre centrale de retour, l'ensemble est placé dans un embout cylindrique fileté.

Caractéristiques optiques :

- Silice de coeur

Indice de réfraction = 1.458

- Silicone de revêtement

Indice de réfraction = 1.448

- Ouverture numérique

$\sin \theta = 0,17$

$2 \theta = 20^\circ$

Répartition spectrale :

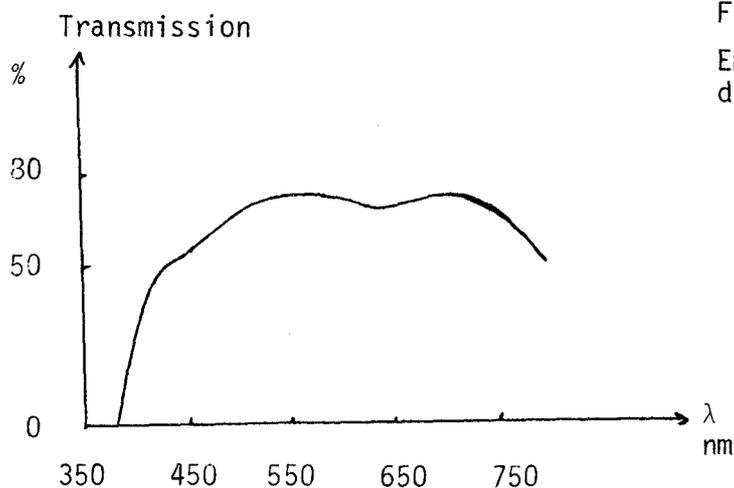


FIGURE 2.5. :

Emission spectrale en sortie de fibres.

Atténuation :

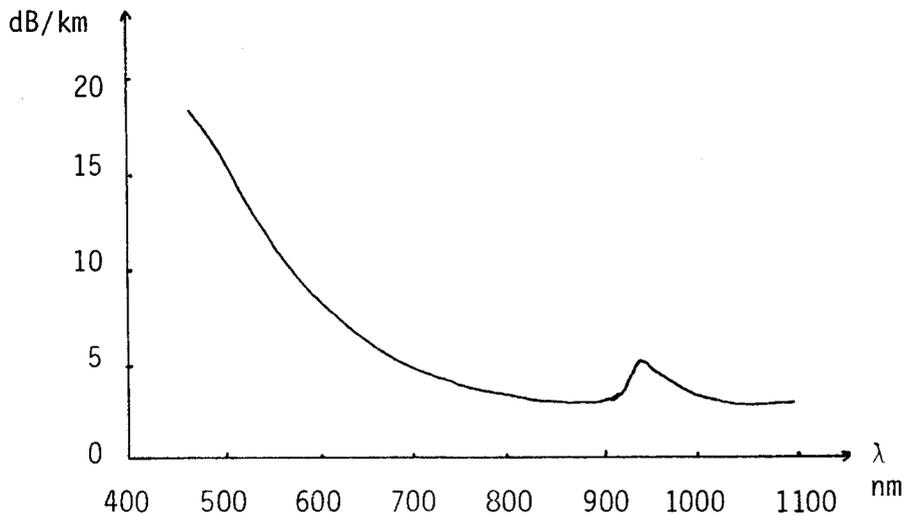


FIGURE - 2.6. - Courbe d'atténuation d'une fibre optique.

Caractéristiques mécaniques :

Le rayon de courbure est de 10 fois le diamètre du coeur  
La résistance à la traction du coeur est de  $350 \text{ Hbar/mm}^2$   
La fibre garde ses caractéristiques entre  $-40^\circ\text{C}$  et  $+150^\circ\text{C}$ .

La fibre peut être utilisée dans l'ultra-violet jusqu'à 160 nm dans le visible et dans l'infrarouge jusqu'à 3500 nm.

L'avantage de l'utilisation de ces fibres comme moyen de transport d'énergie lumineuse réside dans leur immunité aux perturbations et présentent de larges bandes passantes. Elles nécessitent un alignement qui doit être maintenu en toutes occasions, quelque soient les conditions environnantes, vibrations, variations thermiques.....

## ANNEXE II.2

---

### LOI DE GOLDFINGER

---

Goldfinger a cherché à construire un modèle mathématique en tenant compte :

- Du produit de la concentration  $C$  par le coefficient d'absorption  $K$  des colorants dans la fibre,
- Du rapport des indices de réfraction de la fibre de textile et du milieu dans lequel elle est observée

$$m = \frac{n_1}{n_2}$$

$n_1$  : indice de réfraction de la fibre

$n_2$  : indice de réfraction du milieu.

- De la structure géométrique du fil et de la matière

Goldfinger considère que l'objet à analyser, c'est-à-dire le support de textile, est constitué de couches distinctes de cylindres isotropes. Il suppose qu'une lumière d'intensité  $i = 1$  provenant d'un faisceau de lumière monochromatique, tombant sur une couche, provoque l'un des phénomènes décrit sur la figure 3.1.

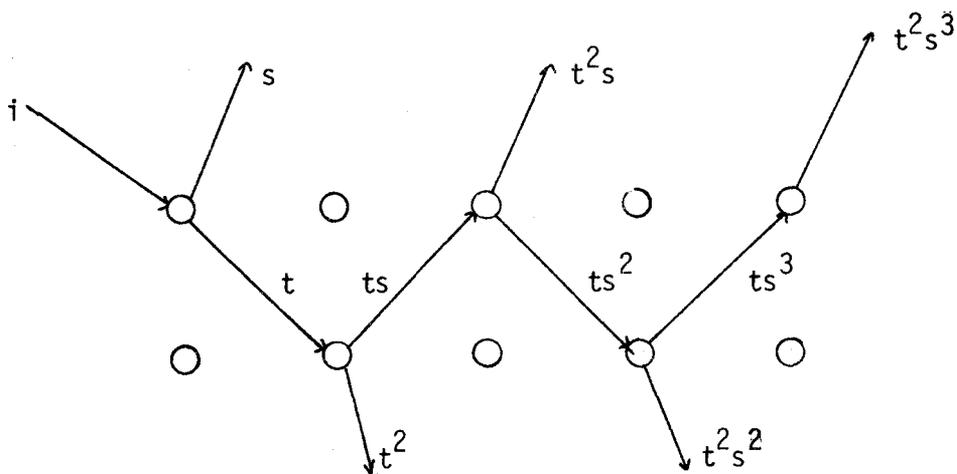


FIGURE - 3.1. -

- $i$  est réfléchi ou réfracté suivant  $s$
- $i$  est réfléchi ou réfracté : c'est la proportion de lumière transmise  $t$
- $i$  n'est ni réfléchi, ni réfracté, donc il est absorbé, c'est la proportion  $a$ .

$$i = 1 = s + t + a$$

D'autre part il pose comme hypothèse qu'il y a proportionnalité entre  $t$  et  $s$

$$s = \frac{1 - a}{1 + k}$$

$$t = ks \implies t = k \frac{(1 - a)}{(1 + k)}$$

Les rayonnements transmis par la première couche vont se comporter comme rayons incidents sur la deuxième couche avec les trois phénomènes réflexion, réfraction et absorption.

Ainsi la somme des rayons transmis par les deux premières couches sera :

$$\tau_1 = t^2 + t^2 s^2 + t^2 s^4 + \dots + t^2 s^{2n} + \dots$$

$$\tau_1 = t^2 (1 + s^2 + s^4 + \dots + s^{2n} + \dots)$$

$$\tau_1 = t^2 \left( \frac{1}{1 - s^2} \right)$$

Compte-tenu de la proportionnalité entre t et s

$$\tau_1 = k^2 \frac{(1-a)^2}{(1+k)^2 - (1-a)^2}$$

Par contre la source des rayons réfléchis par les deux couches est :

$$\sigma_1 = s + t^2 s + t^2 s^3 + \dots + t^2 s^{2n+1} + \dots$$

$$= s + t^2 s (1 + s^2 + \dots + s^{2n} + \dots)$$

$$= s + s \frac{t^2}{1 - s^2}$$

$$\sigma_1 = s(1 + \tau_1)$$

Le raisonnement est identique pour deux paires de couche de fibres (figure 3.2.)

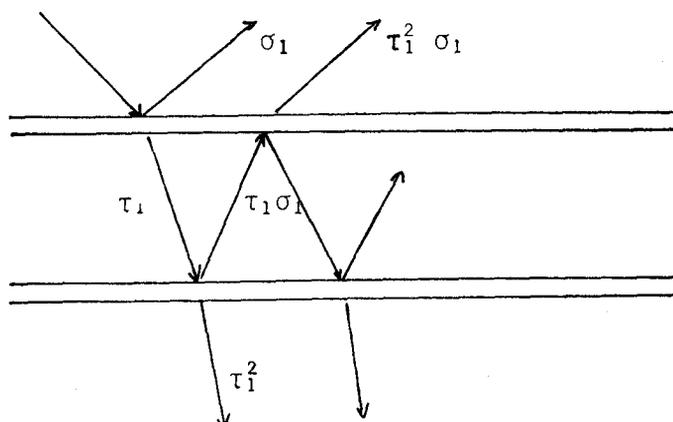


FIGURE - 3.2. -



a) Calcul du coefficient d'absorption  $\mu$  :

Un objet ou une solution colorée absorbe d'autant plus d'énergie lumineuse que le chemin parcouru par la lumière est long.

Soit  $dl$  le chemin optique nécessaire pour affaiblir, par absorption, le faisceau d'intensité  $I$ .

$$dI = -\mu I dl$$

Selon la loi de Lambert et s'il n'y a ni réflexion, ni diffusion on a :

$$I = I_0 e^{-\mu l}$$

avec :  $I_0$  = Intensité lumineuse incidente  
 $I$  = Intensité lumineuse émergente  
 $\mu$  = Coefficient d'absorption  
 $l$  = Chemin optique

Selon la loi de Beer qui dit que le coefficient d'absorption  $\mu$  est proportionnel à la concentration  $C$  on a :

$$\mu = K.C. \quad K = \text{Coefficient de proportionnalité.}$$

La combinaison de ces deux lois conduit à :

$$I = I_0 e^{-K.C.l} \Rightarrow \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = -K.C.l$$

Si on pose  $e = \frac{I}{I_0}$  la fraction transmise à travers la fibre et

si  $I_0 = 1$

$$e = 10^{-K.C.l} = 10^{-K.C.2 \cos \alpha}$$

$$\text{et enfin } e = 10^{-K.C.2 \sqrt{1 - \frac{d^2}{m^2}}} \quad \text{avec } m = \frac{n_1}{n_2}$$

et  $\sin \theta = d$  : distance de l'axe de la fibre au point d'incidence.

D'autre part un objet coloré éclairé par un faisceau de lumière réfléchit et diffuse de la lumière dans toutes les directions (figure 3.4.)

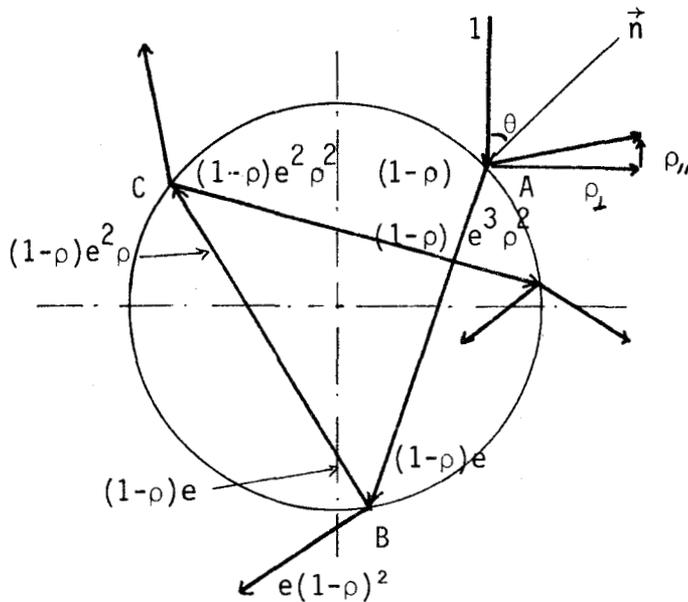


FIGURE 3.4. : Chemin optique de la lumière à travers une fibre.

Si nous appelons  $\rho$  le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente

$$\rho = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie incidente}}$$

Ce rapport se décomposera en deux composantes, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire au plan d'incidence.

Selon les équations de Fresnel on a :

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta - \alpha)}{\sin^2(\theta + \alpha)} = \left[ \frac{\cos \theta - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta}} \right]^2$$

$$\rho_{\parallel} = \left[ \frac{\text{tg } \theta - \text{tg } \alpha}{\text{tg } \theta + \text{tg } \alpha} \right]^2 = \left[ \frac{m^2 \cos \theta - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta}}{m^2 \cos \theta + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta}} \right]^2$$

Le rayon lumineux égal à l'unité (figure 3.4) et tombant sur la fibre :

- réfléchit une énergie  $\rho$  sous un angle  $\theta$  par rapport à la normale  $\vec{n}$
- réfracte une énergie  $(1-\rho)$  sous un angle  $\alpha$  par rapport à la normale
- transmet une énergie  $(1-\rho)e$  à travers la fibre.

Ainsi la lumière absorbée dans le premier chemin entre A et B est

$$(1-\rho) - (1-\rho)e = (1-\rho)(1-e)$$

Dans le deuxième chemin entre B et C

$$(1-\rho)e\rho - (1-\rho)e^2\rho = (1-\rho)(1-e)e\rho$$

Dans le troisième chemin entre C et D

$$(1-\rho)e^2\rho^2 - (1-\rho)e^3\rho^2 = (1-\rho)(1-e)e^2\rho^2$$

Dans le quatrième chemin

$$(1-\rho)e^{(n-1)}\rho^{(n-1)} - (1-\rho)e^n\rho^{n-1} = (1-\rho)(1-e)e^{n-1}\rho^{n-1}$$

L'énergie absorbée dans la fibre est :

$$a = (1-\rho)(1-e) \{1 + e\rho + \dots + e^n\rho^n + \dots\}$$

$$a = (1-\rho)(1-e) \cdot \frac{1}{1-e\rho}$$

Par contre l'énergie totale absorbée sera :

$$a = a_{\perp} + a_{\parallel}$$

avec  $a_{\perp} = f(\rho_{\perp}, d)$

$$a_{\parallel} = f(\rho_{\parallel}, d)$$

b) Calcul du coefficient de proportionnalité k entre t et s :

$k = \frac{t}{s}$  rapport de la lumière transmise sur la lumière réfléchie ou réfractée.

La réflexion change de direction suivant l'angle d'incidence du rayon lumineux (figure 3.3.) donc pour :

$$0 < \theta < \frac{\pi}{4} \rightarrow 0 < d < \frac{\sqrt{2}}{2}$$

la première réflexion est dirigée vers le haut.

$$\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} < d < 1$$

la première réflexion est dirigée vers le bas.

Cela entraîne par conséquent un changement de direction des proportions de lumières réfléchies et transmises  $s_i$  et  $t_i$  ; toutes les deux sont fonctions des angles  $\beta_i$  formés par le rayon incident et les rayons réfractés sortant de la fibre.

La lumière est réémise selon l'angle  $\beta_i$  soit vers le haut, soit vers le bas.

Nous appellerons  $s_i$  la lumière réémise vers le haut si  $\cos \beta_i > 0$  et  $t_i$  la lumière réémise vers le bas si  $\cos \beta_i < 0$ .

L'angle  $\beta_i$  est donné par :

$$\cos \beta_1 = (1-2d^2) \left(1 - \frac{2d^2}{m^2}\right) - 4 \frac{d^2}{m^2} \sqrt{(1-d^2) \left(1 - \frac{d^2}{m^2}\right)}$$

$$\beta_1 = 180^\circ - 2 \left( \text{Arctg} \frac{d}{\sqrt{1-d^2}} - \text{Arctg} \frac{d}{\sqrt{m^2-d^2}} \right)$$

$$\beta_2 = \beta_1 + (180^\circ - 2\alpha)$$

$$\beta_n = \beta_{n-1} + (180^\circ - 2\alpha)$$

La lumière réfractée quant à elle est (voir figure 3.4.)

Pour le premier rayon traversant la fibre :

$$(1-\rho) e - (1-\rho)e\rho = e(1-\rho)^2$$

Quand le rayon traverse deux fois la fibre

$$(1-\rho)e\rho - (1-\rho)e^2\rho = e^2\rho(1-\rho)^2$$

Pour la n<sup>ième</sup> traversée de la fibre on a :

$$e^n(1-\rho)\rho^{n-1} - e^n(1-\rho)\rho^n = e^n\rho^{n-1}(1-\rho)^2$$

L'énergie totale réfractée est :

$$t = \rho \begin{matrix} \text{(si } \frac{\sqrt{2}}{2} < d < 1) \\ \end{matrix} + (1-\rho)^2 \sum e^n \rho^{n-1} \quad \text{(si } \cos \beta_n < 0)$$

$$r = \rho \begin{matrix} \text{(si } 0 < d < \frac{\sqrt{2}}{2}) \\ \end{matrix} + (1-\rho)^2 \sum e^n \rho^{n-1} \quad \text{(si } \cos \beta_n > 0)$$

Le coefficient de proportionnalité serait égal au rapport de t sur r dans les conditions citées :

De même que pour a, k sera égal à :

$$k = k_{\perp} + k_{\parallel} \quad \text{avec} \quad k_{\perp} = f(\rho_{\perp}, d) \\ k_{\parallel} = f(\rho_{\parallel}, d)$$

L'étude faite d'une manière théorique par Goldfinger pour la détermination de la réflexion d'un tissu dans un milieu  $n_1$  autre que l'air repose sur des hypothèses qui ne reflètent pas entièrement la réalité.

En effet, il n'a pas pris en compte l'influence des rayons lumineux réfractés par une fibre et qui pénètrent les fibres adjacentes, aussi il a considéré une fibre cylindrique lisse alors que les caractéristiques physiques et géométriques des fibres sont variables.

Cependant il a essayé d'ajuster son modèle par la recherche des facteurs de correction suivant le mode de teinture et les fibres employées.

Enfin il a établi une relation entre les réémissions d'un textile sec et le même immergé dans un liquide d'une manière empirique.

$$z = \frac{0,12(1-x)^2}{0,1 + x} + x - 0,20$$

$$\text{avec } x = \beta_s \quad ; \quad z = \frac{\beta_m}{\beta_s}$$

$\beta_m(\lambda)$  : Coefficient de réémission immergé à une longueur d'onde  $\lambda$

$\beta_s(\lambda)$  : Coefficient de réémission sec à la même longueur d'onde  $\lambda$

ANNEXE V.1

MÉMOIRE DE COLORANT

BLEU DIAZOL R EXTRA

$\lambda$ nm \ C %	0.11	0.30	0.50	0.75	1.0	1.5
400	47.4	33.2	28.1	21.8	19.2	15.3
420	49.0	34.5	28.9	22.5	19.8	15.7
440	48.7	33.7	28.0	21.6	18.9	14.9
460	46.2	30.9	25.4	19.0	16.6	12.9
480	43.1	27.7	22.4	16.5	14.3	10.9
500	38.5	23.7	18.9	13.6	11.7	8.9
520	32.8	19.2	15.2	10.7	9.3	7.0
540	27.3	15.2	11.8	8.2	7.1	5.5
560	23.0	12.3	9.5	6.6	5.7	4.5
580	20.2	10.6	8.2	5.8	5.1	4.1
600	18.6	9.6	7.5	5.3	4.8	3.8
620	19.4	10.2	8.0	5.6	5.0	4.1
640	21.4	11.6	9.2	6.5	5.8	4.7
660	24.8	13.9	11.0	7.9	6.9	5.6
680	30.9	18.0	14.4	10.2	9.0	7.0
700	39.3	24.3	19.9	14.3	12.6	9.6



JAUNE DIAZOL LUMIERE 4RC

$\lambda$ nm \ C %	0.1	0.30	0.50	0.75	1.0	1.5
400	28.7	16.8	12.3	9.8	8.1	6.3
420	24.7	13.9	10.0	8.0	6.7	5.3
440	24.3	13.5	9.9	7.8	6.6	5.2
460	27.2	15.6	11.4	9.1	7.6	5.9
480	34.0	20.9	15.7	12.6	10.4	8.0
500	43.8	30.2	23.6	19.3	16.0	12.2
520	55.9	45.9	38.1	32.6	27.9	21.5
540	65.8	64.8	57.7	52.3	47.1	38.5
560	70.3	75.7	71.1	67.7	63.8	56.2
580	76.5	81.8	79.2	77.5	75.7	70.5
600	80.3	82.1	80.6	80.0	79.3	76.3
620	82.7	83.8	82.6	82.5	82.2	80.2
640	83.8	84.5	83.7	83.7	83.7	81.9
660	85.5	86.4	85.4	85.6	85.7	84.4
680	86.2	87.1	86.2	86.5	86.5	85.5
700	85.1	85.8	85.0	85.3	85.5	84.5



ROUGE DIAZOL LUMIERE 6 BL 1750

$\lambda$ nm \ C	0.1	0.30	0.50	0.75	1.0	1.5
400	44.6	27.4	23.1	19.5	17.5	15.2
420	40.0	23.0	18.2	15.6	14.1	12.1
440	35.3	19.0	15.6	13.0	11.8	9.7
460	30.6	15.5	12.8	10.5	9.6	7.8
480	26.5	12.8	10.8	8.6	8.0	6.5
500	22.9	10.8	9.2	7.3	6.6	5.6
520	20.6	9.8	8.3	6.5	6.1	5.2
540	21.0	10.3	8.5	6.8	6.3	5.5
560	22.8	11.6	9.8	7.8	7.3	6.2
580	32.2	18.1	16.5	12.8	11.7	10.1
600	49.9	34.3	33.5	27.7	25.6	21.2
620	65.7	55.9	54.6	48.3	45.3	39.4
640	73.5	71.2	70.1	65.4	62.4	57.7
660	77.9	79.2	78.5	75.0	72.6	69.8
680	80.7	82.8	81.6	79.1	77.1	76.5
700	81.9	83.1	82.5	80.1	78.3	78.7

