

Rapport de recherche LPC N° 102

Amélioration de la visibilité de la signalisation routière de jour et de nuit Applications de la photométrie et de la colorimétrie

Roger HUBERT

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



**Amélioration de la visibilité
de la signalisation routière de jour et de nuit
Applications de la photométrie et de la colorimétrie**

Roger HUBERT
Ingénieur diplômé du CNAM
Section des peintures et de la signalisation
Service de Chimie
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Action de recherche pluriannuelle (AR) : 20
- Signalisation et exploitation de la route

Fiche d'action élémentaire de recherche (FAER) : 20 02 0
- Signalisation verticale.

Cette étude, effectuée au Service de Chimie du Laboratoire central des Ponts et Chaussées a fait l'objet d'un mémoire en vue de l'obtention du diplôme CNAM, soutenu le 8 mai 1980 devant le Jury présidé par M. le Professeur DIDIER.



Roger HUBERT
né le 4 octobre 1944

*Ingénieur diplômé du Conservatoire national
des Arts et Métiers
Entré au LCPC en avril 1975.*

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du Directeur du Laboratoire central des Ponts et Chaussées
(ou de ses représentants autorisés).

©1981 - LCPC

Sommaire

Résumé	4
Présentation	5
Introduction	6
Première partie : Les feux de signalisation	7
1. Feux tricolores	7
1.1. Généralités	7
1.2. Paramètres affectant l'efficacité visuelle des feux tricolores	7
1.3. Mesures des caractéristiques photométriques et colorimétriques	16
1.4. Éléments pouvant servir de base pour de futures spécifications photométriques et colorimétriques	23
2. Feux rythmés	25
2.1. Généralités	25
2.2. Définitions	25
2.3. Notion d'intensité effective	26
2.4. Mesures des caractéristiques photométriques et colorimétriques des feux à éclats	27
2.5. Éléments pouvant servir de base pour de futures spécifications	31
Deuxième partie : Les dispositifs rétroréfléchissants	32
1. Principe de rétroréflexion	32
2. Les divers types de dispositifs rétroréfléchissants	32
3. Conditions géométriques de la vision de nuit des signaux routiers	34
4. Caractéristiques photométriques et méthodes de mesure	34
5. Caractéristiques colorimétriques et méthodes de mesure	36
6. Mesures sur les divers dispositifs rétroréfléchissants	37
7. Apports et limites des mesures pour la détermination de l'efficacité des dispositifs rétroréfléchissants	44
Conclusion	45
Références bibliographiques	46
Glossaire	48
Résumé en anglais, allemand, espagnol et russe	50

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE - MINISTÈRE DES TRANSPORTS
LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES

58, boulevard Lefebvre - 75732 PARIS CEDEX 15
Tél. (1) 532-31-79 - Téléc : LCPARI 200361 F

Juin 1981

résumé

Nos lecteurs étrangers trouveront ce résumé traduit en anglais, allemand, espagnol et russe en fin de rapport.

Our readers will find this abstract at the end of the report.

Unsere Leser finden diese Zusammenfassung am Ende des Berichtes.

Nuestros lectores hallarán este resumen al final del informe.

Русский текст аннотации помещен в конце отчета.

Ce rapport apporte une contribution à la connaissance de l'efficacité des dispositifs de signalisation par une meilleure approche de leurs propriétés photométriques et colorimétriques. Les feux de signalisation (les feux tricolores et les feux à éclats) et les dispositifs rétroréfléchissants sont examinés dans cette étude.

On a mesuré l'intensité lumineuse, la couleur et l'effet fantôme des différents types de feux tricolores utilisés en France. A partir d'une analyse bibliographique sur l'efficacité visuelle des feux et de la comparaison des résultats de mesures avec les projets de recommandations de la Commission Internationale de l'Eclairage, on propose des éléments pour l'élaboration de futures spécifications.

Pour les feux à éclats, on a mis au point une méthode de mesure permettant de déterminer la variation de leur intensité lumineuse en fonction du temps pour des éclats dont la durée est de l'ordre de 100 μ s. On peut alors calculer leur intensité lumineuse effective par la méthode de Blondel-Rey. On définit également leur couleur par les coordonnées trichromatiques du filtre, mesurées avec l'illuminant C normalisé.

Parmi les dispositifs rétroréfléchissants, on a étudié plus particulièrement le marquage au sol, les plots et les films rétroréfléchissants. On définit les grandeurs pouvant caractériser les propriétés photométriques et colorimétriques de ces matériels ainsi que leurs méthodes de mesure en laboratoire.

MOTS CLES : Signalisation - colorimétrie - photométrie - feux tricolores - intensité lumineuse - effet fantôme - feux à éclats - intensité effective - rétroréflexion - plots - films - marquage au sol.

PRÉSENTATION

Anne-Marie SERRES

Chef de la section des peintures
et de la signalisation
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

La signalisation routière est faite pour être vue par l'automobiliste et son message aisément perçu. Cela impose que les matériels et matériaux utilisés à cet effet possèdent des qualités visuelles suffisantes dans toutes les conditions d'utilisation. Pratiquement, c'est l'inverse qui se produit, c'est-à-dire que les conditions d'utilisation et d'implantation des dispositifs de signalisation sont déterminées à partir des qualités propres du matériel en question, qui sont dépendantes de la technologie utilisée.

Ainsi la connaissance et la compréhension du fonctionnement visuel de ces matériels permettent leur utilisation maximale.

Le présent rapport étudie les méthodes permettant de caractériser les performances visuelles des principaux dispositifs utilisés en signalisation routière :

- les dispositifs lumineux par eux-mêmes, c'est-à-dire les feux, feux tricolores et feux rythmés,*
- et les dispositifs rétroréfléchissants qui ne font que renvoyer tout ou partie de la lumière qu'ils reçoivent : marques sur chaussées, plots, films rétroréfléchissants utilisés pour les panneaux de signalisation.*

Il précise comment l'on peut physiquement caractériser et comparer ces matériels en laboratoire par des mesures photométriques et colorimétriques, ce qui n'est pas toujours facile, par exemple pour l'intensité des feux à éclats ou la couleur de nuit des matériaux rétroréfléchissants. Il s'attache aussi à relier ces mesures, caractéristiques d'un matériel, à ses performances visuelles au réel, en fonction de ses conditions d'implantation et de vision. Cela est particulièrement important pour les matériaux rétroréfléchissants dont les performances varient largement selon les conditions d'éclairage et d'observation et donc entre le jour et la nuit, selon la place des matériaux sur la chaussée ou sur l'accotement, en ligne droite ou en virage, selon les conditions météorologiques (pluie, brouillard, givre, etc.).

Une part des données de ce rapport est déjà utilisée dans les spécifications appliquées aux dispositifs de signalisation routière, pour la plupart soumis à homologation et dans les essais de qualité réalisés à cet effet qui conduisent à des listes de produits homologués.

Mais le choix et la bonne utilisation de ces matériels seront d'autant mieux assurés que le responsable aura acquis une bonne compréhension de leur fonctionnement visuel ; à ce titre, la lecture de ce rapport peut lui apporter des indications précieuses.

INTRODUCTION

La signalisation, élément important de la sécurité routière, doit apporter des informations visuelles à l'utilisateur de la route. Ces informations se présentent sous forme de guidage et d'indication d'un message pour obtenir un comportement déterminé de l'observateur et apporter une aide à la circulation.

Les deux critères importants d'efficacité de la signalisation sont la visibilité du dispositif de signalisation et la reconnaissance du message fourni par le signal.

La visibilité du signal est fonction de deux éléments essentiels :

- la quantité de lumière émise en direction de l'observateur
- l'environnement lumineux sur lequel il se détache.

La reconnaissance du message peut se faire de plusieurs façons :

- par la lecture en signalisation de direction ou de jalonnement ; dans ce cas, la visibilité du message sera fonction du contraste de luminance entre les symboles et le fond du panneau,
- par la couleur, des couleurs ayant une signification bien précise ; par exemple, pour les feux tricolores, le rouge signifie arrêt, le jaune signifie danger et le vert indique une autorisation,
- par la forme des surfaces éclairantes ; par exemple, une flèche indique une direction,
- par le mode de présentation ; par exemple, des feux rythmés signifient une alerte devant un danger particulier.

Cette étude vise à améliorer les spécifications des dispositifs utilisés en signalisation par une meilleure approche de leurs

caractéristiques photométriques et colorimétriques. Ces dernières peuvent être définies par des mesures physiques, mais elles doivent, en outre, correspondre à des exigences d'efficacité souhaitable qui ne peuvent être déterminées qu'à partir d'expérimentations visuelles extrêmement longues et complexes. Elles doivent, enfin, correspondre à des conditions d'utilisation réelles et pouvoir être mesurées selon des modes opératoires relativement simples et admis.

Sur la base de certaines conclusions d'expérimentations faites par ailleurs, et à partir de la connaissance des matériaux existants, on essaie d'apporter des éléments pour élaborer de futures spécifications.

Pour la connaissance des produits, on précisera les conditions et les moyens de mesure de leurs caractéristiques photométriques et colorimétriques en faisant référence, quand cela est possible, aux recommandations de la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.).

Dans cette étude, on distingue deux catégories de dispositifs de signalisation :

- les dispositifs que l'on peut dénommer dispositifs actifs qui émettent de la lumière. On étudiera les feux tricolores et les feux rythmés.
- les dispositifs que l'on peut dénommer dispositifs passifs qui renvoient une partie de la lumière qu'ils reçoivent. On étudiera les dispositifs rétroréfléchissants qui, en vision de jour, fonctionnent comme des surfaces diffusantes et, en vision de nuit, renvoient une partie de la lumière provenant des projecteurs de véhicule dans des directions proches de la direction de la lumière incidente. On examinera plus particulièrement le marquage au sol, les plots rétroréfléchissants, et les films rétroréfléchissants.

PREMIERE PARTIE

LES FEUX DE SIGNALISATION

1. FEUX TRICOLORES

1.1. Généralités

Les feux tricolores ont pour rôle de communiquer aux usagers de la route des informations visuelles en vue de l'adoption d'un comportement précis. Ces informations sont transmises de façon optique par des signes lumineux convenus auxquels il est donné une signification précise et qui se différencient par la couleur de la lumière qu'ils émettent, la forme des surfaces éclairantes et le mode de présentation.

On se limitera, dans cette étude, au type de feux le plus couramment utilisé, comportant 3 couleurs (rouge, jaune, et vert) et dont la surface lumineuse est un cercle de diamètre 200 mm.

1.2. Paramètres affectant l'efficacité visuelle des feux tricolores

Pour être efficaces, les feux tricolores doivent être perçus avec une probabilité suffisante quelles que soient les conditions d'observation. Leur efficacité est fonction de 3 facteurs importants :

- l'intensité lumineuse dans la direction d'observation, dont dépend la perception du signal dans cette direction ;
- la couleur dont dépend la reconnaissance du message codé fourni par le signal ;
- l'effet fantôme produit par une lumière provenant de l'extérieur pouvant perturber le signal existant, ou créer l'illusion d'un signal totalement inexistant.

1.2.1. Intensité lumineuse

Pour déterminer l'intensité lumineuse optimale d'un feu, on ne doit pas considérer les valeurs de seuil de visibilité, mais on doit déterminer les caractéristiques du feu

qui donnent une probabilité de détection voisine de 1 dans des situations de circulation et de conduite automobile complexes.

Les principaux facteurs qui affectent les exigences à avoir pour l'intensité lumineuse du feu sont les suivants :

- luminance du fond,
- dimensions du feu,
- distance à laquelle le feu doit être vu,
- position du feu dans le champ de vision,
- couleur du feu,
- présence d'un écran de fond.

1.2.1.1. Luminance du fond

Un certain nombre de recherches (Adrian [1], Jainski et Schmidt-Clausen [2], Cole et Brown [3], Fisher [4]) suggèrent que de jour, pour un feu de taille fixe, il y a une relation linéaire entre la luminance nécessaire du feu et la luminance du fond contre lequel le feu est vu.

Ceci peut s'exprimer par la formule :

$$L_S/L_F = C_1$$

où L_S est la luminance du signal

L_F est la luminance du fond

C_1 est une constante.

Les spécifications standard considèrent une luminance de fond de 10^4 cd/m², ce qui correspond à la luminance d'un ciel brillant.

1.2.1.2. Dimensions du feu

Cole et Brown [3] ainsi que Boissin et Pages [5], dans des expérimentations utilisant une simulation du travail de conduite, ont montré que la réponse de l'observateur dépend seulement de la quantité de lumière atteignant l'oeil en provenance du feu et

est indépendante de la taille du feu à partir duquel la lumière est émise.

Ceci est une simplification intéressante ; en effet, l'augmentation de l'angle solide sous lequel est vu le feu durant l'approche n'a pas besoin d'être prise en compte pour déterminer la réponse de l'observateur ; de la même manière, la taille initiale du feu n'a pas d'importance, bien qu'en pratique, des feux de plus grand diamètre peuvent être utilisés pour augmenter l'intensité lumineuse.

Pour une luminance de fond L_F constante, on peut écrire :

$$L_S w = C_2 \quad (2)$$

où w est l'angle solide s'appuyant sur la surface du feu vu depuis l'approche.

C_2 est une constante indépendante de w qui exprime que la réponse de l'observateur dépend seulement de la quantité de lumière atteignant l'oeil. C_2 est en fait l'éclairement produit par le feu au niveau de l'oeil dans un plan perpendiculaire à la direction d'observation.

On peut facilement déterminer l'intensité du feu en relation avec la luminance du fond et la distance d'observation d .

$$\text{En effet, } w = A/d^2 \quad (3)$$

A étant la surface apparente de la source.

L'intensité de la source est donnée par :

$$I = L_S A \quad (4)$$

L'équation (2) peut s'écrire, pour L_F constant :

$$I/d^2 = C_2 \quad (5)$$

Des équations (1), (3) et (4), il s'en suit que l'intensité I_d nécessaire pour que le feu soit clairement vu à la distance d est donnée par :

$$I_d = C d^2 L_F \quad (6)$$

où C est une constante.

Cole et Brown ainsi que Boissin et Pages, à partir de leurs expérimentations, ont trouvé qu'un feu rouge, proche de la ligne de vision de l'observateur et vu dans des conditions standard ($L = 10^4 \text{ cd/m}^2$), sera détecté avec certitude et rapidité s'il présente une intensité lumineuse de 200 cd.

A partir de ces données, on peut écrire l'équation (6) :

$$I_d = 2.10^{-6} \times d^2 \times L_F \quad (7)$$

I_d en cd

d en m

L_F en cd/m^2

1.2.1.3. Distance à laquelle le feu doit être vu

La distance minimale d'efficacité du feu doit être suffisante pour que le conducteur arrête son véhicule sans un freinage anormal.

La distance d'arrêt D est la somme de la distance parcourue pendant le temps de perception/réaction du conducteur et de la distance de freinage.

Hulsher [6] propose la formule suivante :

$$D = tv + \frac{v^2}{2g(f + 0,01G)}$$

où v est la vitesse d'approche du véhicule en m/s

t est le temps de réaction du conducteur en s

g est la constante de gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$)

G est la pente d'approche de la chaussée en %

f est le coefficient de frottement.

Hulsher a choisi d'utiliser comme valeur de t 2,2 s et pour f une valeur applicable à une chaussée humide, propre et rugueuse et à des pneus en conditions normales.

A partir de ces valeurs, il a tracé le graphique représenté en figure 1.1.

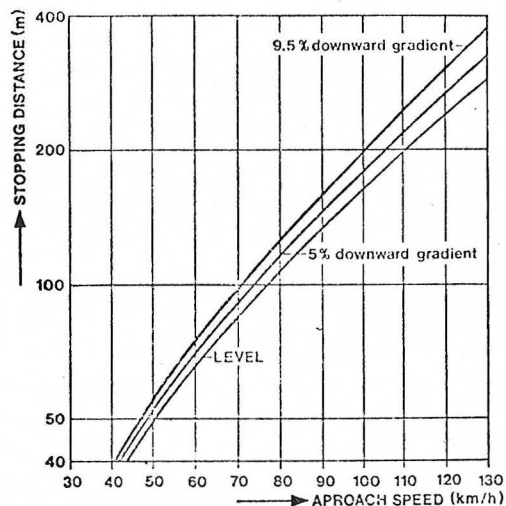


Figure 1.1. : distance d'arrêt en fonction de la vitesse d'approche

Ce graphique suggère que l'échelle raisonnable d'efficacité d'un feu, pour les voies urbaines (vitesse < 80 km/h) doit être de 100 m, et pour les routes à grande vitesse

se (vitesse > 100 km/h) doit être de 200 m.

1.2.1.4. Position du feu dans le champ de vision

Si l'on admet que la direction la plus fréquente d'observation du conducteur coïncide avec la ligne de circulation, le feu est le plus souvent vu dans le champ de vision périphérique de l'observateur. Quand le conducteur approche du feu, l'excentricité de celui-ci par rapport à la ligne courante de vision augmente et son intensité doit augmenter pour attirer l'attention de l'observateur.

On peut représenter les conditions géométriques d'observation du feu par la figure 1.2.

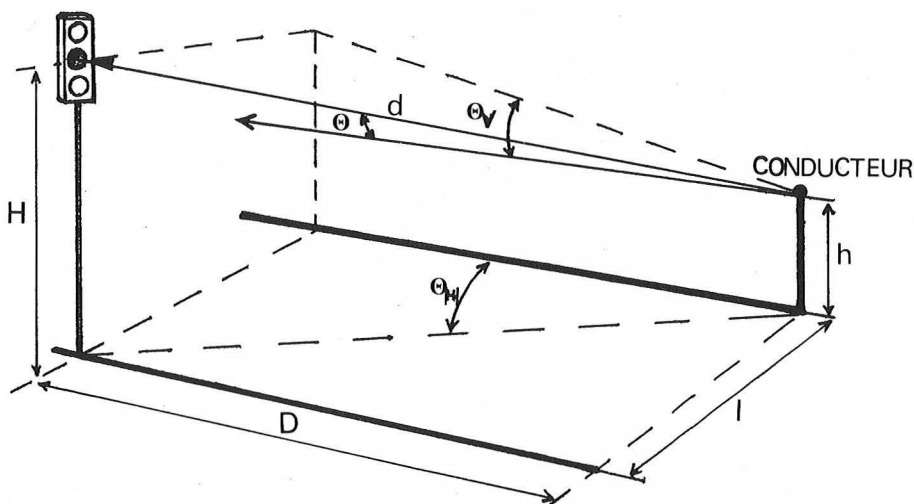


Figure 1.2. : Conditions géométriques d'observation des feux de signalisation

où h = hauteur de l'œil du conducteur au-dessus de la chaussée

l = distance du feu au plan vertical parallèle à l'axe de la chaussée et contenant l'œil de l'observateur

D = distance des plans verticaux perpendiculaires à l'axe de la chaussée et contenant respectivement l'œil de l'observateur et le feu

H = hauteur du feu au-dessus de la surface de la chaussée

θ_H = angle entre le plan vertical contenant le feu et l'œil de l'observateur et le plan vertical passant par l'axe de la chaussée : $\text{tg } \theta_H = l/D$

θ_V = angle entre la droite passant par le feu et l'œil de l'observateur et le plan horizontal :

$$\text{tg } \theta_V = (H - h) / \sqrt{D^2 + l^2}$$

d = distance entre le feu et l'œil de l'observateur :

$$d = \sqrt{(H - h)^2 + D^2 + l^2}$$

θ = angle entre la droite passant par le feu et l'œil de l'observateur et la direction d'observation supposée parallèle à l'axe de la chaussée :

$$\text{Cos } \theta = \text{Cos } \theta_H \cdot \text{Cos } \theta_V$$

pour de petits angles : $\theta^2 \approx \theta_H^2 + \theta_V^2$.

Pour exprimer l'influence de l'excentricité du feu, Fisher propose la formule suivante :

$$I_\theta = I(\theta/3)^{1.33}$$

où I_θ est l'intensité requise pour un feu à un angle θ (en degrés) à partir de la ligne d'observation si I est l'intensité requise dans la direction d'observation pour une distance donnée.

Pour un feu rouge, l'équation (7) pourra s'écrire :

$$I_{d,\theta} = 2.10^{-6} K d^2 L_F \quad (8)$$

avec $K = (\theta/3)^{1.33}$.

A partir de la figure 1.2. et de l'équation (8), on peut calculer des exigences pour l'intensité d'un feu rouge pour différentes situations en relation avec la distance et l'excentricité pour des conditions standard de luminance du fond.

Si l'on prend comme repères de positionnement du conducteur par rapport au feu les distances D et l, on a :

$$d^2 = (H - h)^2 + D^2 + l^2$$

et

$$\theta^2 \approx \theta_H^2 + \theta_V^2$$

On peut admettre pour la hauteur h une valeur moyenne de 1,2 m.

On peut également considérer deux pos-

sibilités d'implantation du feu :

- le feu est implanté sur le bord de la chaussée ; dans ce cas, on peut prendre pour la hauteur H une valeur moyenne de 3 m et considérer que $l < 6$ m ; si $l > 6$ m, on peut admettre que le feu sera doublé par un deuxième feu placé à gauche de la voie de circulation,

- le feu est implanté sur potence ou portique au-dessus de la chaussée ; dans ce cas, on peut considérer que la hauteur H est comprise entre 4,5 m et 6 m et que $l < 3$ m.

Les calculs effectués pour différents cas d'implantation en fonction de H, D et l, sont représentés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. : Valeurs de l'intensité lumineuse (en cd) en fonction des positions relatives du véhicule et du feu

H = 3 m

D (m)	l = 0				l = 3m				l = 6m				l = 9m			
	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)
240	0	0,43	0,43	87	0,72	0,43	0,84	212	1,43	0,43	1,49	454	2,15	0,43	2,19	759
200	0	0,51	0,51	76	0,86	0,51	1,00	186	1,72	0,51	1,79	403	2,57	0,51	2,62	669
150	0	0,68	0,68	62	1,14	0,69	1,33	152	2,29	0,69	2,39	333	3,43	0,68	3,49	552
100	0	1,03	1,03	48	1,72	1,03	2,00	117	3,43	1,03	3,58	254	5,14	1,03	5,24	423
60	0	1,72	1,72	34	2,86	1,72	3,34	83	5,71	1,71	5,96	181	8,53	1,70	8,70	303
45	0	2,29	2,29	28	3,81	2,28	4,44	68	7,59	2,27	7,92	150	11,3	2,24	11,52	252
30	0	3,43	3,43	22	5,71	3,42	6,65	52	11,31	3,36	11,8	116	16,7	3,29	17,02	199
15	0	6,84	6,84	14	11,31	6,71	13,15	32	21,80	6,36	22,71	78	30,96	5,87	31,51	141

H = 4,5 m

D (m)	l = 0				l = 3m				l = 6m				l = 9m			
	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)
240	0	0,76	0,76	185	0,72	0,76	1,04	281	1,43	0,76	1,62	508	2,14	0,76	2,27	796
200	0	0,92	0,92	166	0,86	0,92	1,26	252	1,72	0,92	1,95	451	2,57	0,92	2,73	707
150	0	1,22	1,22	136	1,14	1,22	1,67	206	2,29	1,22	2,59	371	3,43	1,22	3,64	584
100	0	1,83	1,83	103	1,72	1,83	2,51	158	3,43	1,83	3,88	283	5,14	1,82	5,45	446
60	0	3,05	3,05	74	2,86	3,05	4,18	112	5,71	3,03	6,46	202	8,53	3,02	9,05	320
45	0	4,06	4,06	61	3,81	4,06	5,57	93	7,59	4,03	8,59	168	11,31	3,99	11,99	267
30	0	6,09	6,09	47	5,71	6,06	8,32	72	11,31	5,97	12,79	131	16,70	5,83	17,69	211
15	0	12,04	12,04	30	11,31	11,81	16,35	46	21,80	11,20	24,50	88	30,96	10,36	32,64	151

H = 6 m

D (m)	l = 0				l = 3m				l = 6m				l = 9m			
	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)	θ_H	θ_V	θ	I(Cd)
240	0	1,14	1,14	318	0,72	1,14	1,35	398	1,43	1,14	1,83	597	2,14	1,14	2,42	867
200	0	1,37	1,37	282	0,86	1,37	1,62	352	1,72	1,37	2,20	530	2,57	1,37	2,91	770
150	0	1,83	1,83	233	1,14	1,83	2,15	289	2,29	1,83	2,93	437	3,43	1,83	3,88	636
100	0	2,75	2,75	178	1,72	2,75	3,24	222	3,43	2,75	4,39	334	5,14	2,75	5,83	489
60	0	4,57	4,57	127	2,86	4,57	5,39	158	5,71	4,55	7,30	239	8,53	4,52	9,65	350
45	0	6,09	6,09	105	3,81	6,09	7,18	131	7,59	6,03	9,69	198	11,31	5,97	12,79	293
30	0	9,09	9,09	81	5,71	9,04	10,69	101	11,31	8,92	14,40	155	16,70	8,71	18,83	232
15	0	17,7	17,7	52	11,31	17,42	20,77	67	21,80	16,54	27,36	107	30,96	15,34	34,55	170

1.2.1.5. Influence de la couleur

Les équations (7) et (8) s'appliquent à un feu rouge. Un certain nombre de recherches (Adrian [1], Fisher [4], Jainski et Schmidt-Clausen [2]) indiquent que, à la fois pour le jour et la nuit, l'intensité lumineuse des feux verts doit être plus élevée. Les intensités relatives des signaux rouges et verts doivent être respectivement de 1 et 1,33.

Pour le feu jaune, le facteur de transmission des filtres jaunes étant plus grand que celui des filtres rouges et verts, des intensités lumineuses à peu près 3 fois celle du rouge sont couramment obtenues et semblent satisfaisantes.

1.2.1.6. Influence d'un écran de fond

Cole et Brown [7] ainsi que Jainski et Schimdt-Clausen [8] ont étudié l'influence des écrans noirs de fond autour du feu pour augmenter sa visibilité ; ils ont montré que lorsque la dimension de l'écran augmente, l'intensité nécessaire du feu diminue.

De même, Fisher suggère qu'il faut que l'écran isole à peu près complètement le feu de son environnement, la séparation entre le bord du feu et le bord extérieur de l'écran devant être telle que les différences d'ouverture angulaire soient au moins de 1° .

Anon [9] indique que, au-delà d'une certaine valeur, l'influence de l'augmentation de la largeur de l'écran est négligeable ; ses données sont représentées en figure 1.3.

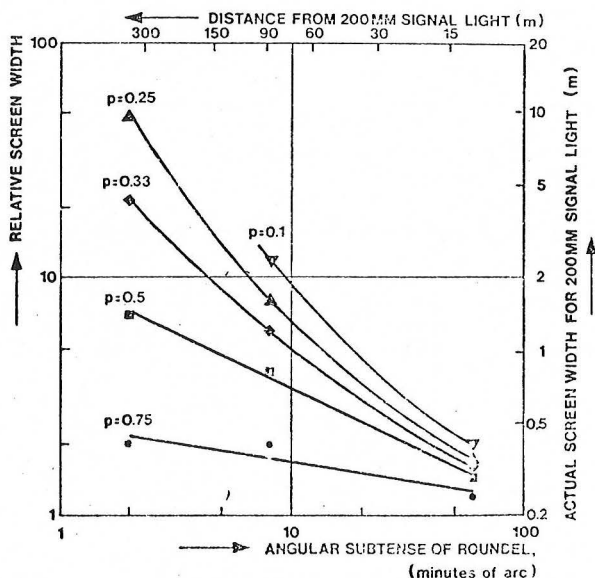


Figure 1.3. : Influence des dimensions d'un écran de fond sur la visibilité des feux tricolores.

La valeur de P indiquée sur les courbes représente le facteur de réduction par lequel l'intensité optimale peut être multipliée quand l'écran est utilisé.

La largeur relative de l'écran est le rapport entre la largeur de l'écran noir et le diamètre du feu.

1.2.1.7. Vision de nuit

Nous avons vu, pour la vision de jour, que l'intensité lumineuse doit être supérieure à une valeur minimale pour que le feu soit détecté avec certitude. En vision de nuit, l'oeil étant adapté à une luminance ambiante beaucoup plus faible, l'intensité lumineuse minimale requise peut être diminuée ; mais, pour éviter les phénomènes d'éblouissement, elle ne doit pas excéder une valeur maximale.

Adrian [10] ainsi que Holladay [11] et Stiles [12], ont étudié l'éblouissement créé par une source lumineuse ; à partir de leurs travaux, on peut penser que pour la vision de nuit l'intensité lumineuse des feux ne devrait pas dépasser 100 cd.

La valeur maximale de l'intensité lumineuse pour la vision de nuit étant inférieure à la valeur minimale pour la vision de jour, il apparaît souhaitable de pouvoir disposer de deux niveaux différents d'intensité lumineuse.

1.2.1.8. Spécifications étrangères

On a regroupé dans le tableau 1.2. les valeurs de l'intensité lumineuse recommandées en vision de jour et dans le tableau 1.3. les valeurs recommandées en vision de nuit par les normes de l'Allemagne (13), de la Grande-Bretagne (14), des Pays-Bas (15) et de la Belgique (16).

Les tableaux 1.2. et 1.3. montrent que les spécifications des divers pays diffèrent largement entre elles quant aux valeurs imposées ; si l'on se borne à l'intensité lumineuse dans l'axe géométrique du feu, on constate qu'il existe une dispersion d'environ 1 à 4 pour les valeurs recommandées.

Tableau 1.2. : Intensités lumineuses, en vision de jour, recommandées par les spécifications étrangères

Normes	Direction d'observation	Intensité lumineuse (en Cd)		
		Rouge	Jaune	Vert
Allemagne DIN 67527 Sans commutation Jour/nuit	Axe géométrique	100 à 150	100 à 200	100 à 150
	Angle Horizontal $H = \pm 11^\circ$ Angle Vertical $V = 0^\circ$	50 à 75	50 à 100	50 à 75
	Angle Vertical $V = 7^\circ$ Angle Horizontal $H = 0^\circ$	50 à 75	50 à 100	50 à 75
Allemagne DIN 67527 Avec commutation Jour/nuit	Axe géométrique	200 à 300	200 à 400	200 à 300
	$H = \pm 11^\circ$ $V = 0^\circ$	100 à 150	100 à 200	100 à 150
	$H = 0^\circ$ $V = 7^\circ$	100 à 150	100 à 200	100 à 150
Grande-Bretagne BS 505	Axe géométrique	400	800	400
	$V = 0^\circ$ $H = \pm 10^\circ$ $V = 10^\circ$ $H = 0^\circ$	200	400	200
	$V = 10^\circ$ $H = \pm 10^\circ$	100	200	100
	$V = 10^\circ$ $H = \pm 25^\circ$	25	50	25
Pays-Bas NEN 3322	Axe géométrique	300	300	250
	$V = 0^\circ$ $H = \pm 11^\circ$ $V = 8^\circ$ $H = 0^\circ$	150	150	125
Belgique Cahier des charges type 400	Axe géométrique	90	100	70
	$V = 0$ $H = \pm 15^\circ$	45	50	35

Tableau 1.3. : Intensités lumineuses, en vision de nuit, recommandées par les spécifications étrangères

Normes	Direction d'observation	Intensité lumineuse (en Cd)		
		Rouge	Jaune	Vert
Allemagne DIN 67527 Sans commutation Jour/nuit	Axe géométrique	100 à 150	100 à 200	100 à 150
	V = 0° H = + 11° V = 7° H = 0°	50 à 75	50 à 100	50 à 75
Allemagne DIN 67527 Avec commutation Jour/nuit	Axe géométrique	50 à 100	50 à 150	50 à 150
	V = 0° H = + 11° V = 7° H = 0°	25 à 50	25 à 75	25 à 75
Grande-Bretagne BS 505	Axe géométrique	300 à 360	600 à 720	300 à 360
	V = 0° H = + 10° V = 10° H = 0°	150 à 180	300 à 360	150 à 180
	V = 10° H = + 10°	75 à 90	150 à 180	75 à 90
	V = 10° H = + 25°	19 à 22	38 à 45	19 à 22
Pays-Bas NEN 3322	Axe géométrique	25 à 200	25 à 200	25 à 200
	V = 0° H = + 11° V = 7° H = 0°	12,5 à 100	12,5 à 100	12,5 à 100
Belgique Cahier des Charges type 400	Axe géométrique	90	100	70
	V = 0° H = + 15°	45	50	35

1.2.2. Couleur

La couleur est le facteur le plus important pour la reconnaissance du message codé du feu de signalisation.

Les définitions de la couleur des signaux lumineux sont établies sous forme de valeurs limites des coordonnées trichromatiques C.I.E. admissibles de la lumière émise par l'ensemble de l'appareil de signalisation.

La Commission Internationale de l'Eclairage, dans la publication n° 2.2. (T.C. 1.6)1975 (17) et dans le rapport technique n° 0.0. (T.C. 1.6) 1978 (18), définit pour chaque couleur des zones de chromaticité dans le diagramme (x, y) ; différentes limites sont proposées pour assurer une probabilité suffisante d'identification pour des observateurs normaux aussi bien que pour des observateurs à vision colorée anormale.

Les personnes à vision des couleurs déficiente possèdent principalement, soit une aptitude restreinte à distinguer le rouge de certains verts (trichromates protanomaux et deutéranomaux) soit une inaptitude à le faire (dichromates protanopes ou deutéranopes).

Y. Le Grand [19] indique que les déficiences de la vision colorée ne sont pas des exceptions ; le pourcentage des principales anomalies dans la population française est regroupé dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4. : Fréquence des principales anomalies de la vision des couleurs parmi la population

	Protanomaux	Deutéranomaux	Protanopes	Deutéranopes
Hommes	1 %	4,9 %	1 %	1,1 %
Femmes	0,02 %	0,38 %	0,02 %	0,01 %

On peut aider ces observateurs, confondant habituellement le rouge et le vert, à distinguer les signaux de ces deux teintes en utilisant des signaux verts-bleuâtres et des signaux rouges ayant une composante jaune appréciable.

En tenant compte de ces observations, la C.I.E. propose des domaines restreints de couleur dans le diagramme (x, y) délimités par des droites et le spectre Locus. Les équations des droites limites sont regroupées dans le tableau 1.5.

Les domaines correspondants sont représentés sur la figure 1.4.

Tableau 1.5. : Domaines de couleurs des signaux lumineux définis par la C.I.E.

Couleur	Limites	Equations des droites limites
Rouge	Pourpre	$y = 0,990 - x$
	Jaune	$y = 0,320$
	Rouge	$y = 0,290$
Jaune	Rouge	$y = 0,382$
	Blanc	$y = 0,790 - 0,667 x$
	Vert	$y = x - 0,120$
Vert	Jaune	$y = 0,726 - 0,726 x$
	Blanc	$y = 0,650 y$
	Bleu	$y = 0,390 - 0,171 x$

1.2.3. Effet fantôme

On appelle effet fantôme, une perturbation du signal provoquée par de la lumière en provenance de l'extérieur du feu. Cette lumière parasite peut être produite, soit par les projecteurs de véhicule, soit comme dans la plupart des cas, par le soleil.

On peut classer, selon Grosskurth [20], suivant la manière dont ils se produisent, ces phénomènes perturbateurs en 3 groupes : le vrai feu fantôme, le feu fantôme miroir, le feu fantôme par réflexion sur la surface extérieure de la lentille du feu.

1.2.3.1. Le vrai feu fantôme

Le vrai feu fantôme est une lumière émise dans la couleur du feu de signalisation. Il correspond à une illumination du signal provoquée par un faisceau lumineux arrivant sur le système optique et concentré au voisinage du foyer de celui-ci. La lumière atteint le filament et le globe de l'ampoule qui constituent alors une source secondaire et provoquent l'illumination du signal.

1.2.3.2. Le feu fantôme miroir

La lumière du feu fantôme miroir a également la même couleur que le feu de signalisation. Les images fantômes de ce type se produisent avec des signaux comportant un miroir concave ; le phénomène a lieu quand un faisceau lumineux, venant d'en haut, tombe sur la partie inférieure réfléchissante et, après avoir frappé la partie supérieure du miroir, parvient dans l'oeil de l'observateur.

1.2.3.3. Le feu fantôme par réflexion sur la surface extérieure de la lentille du feu

La lumière émise est une lumière non colorée réfléchie sur la surface extérieure. Dans certains cas, il peut arriver que la lumière blanche du soleil ainsi réfléchie et mélangée à la lumière colorée du signal allumé rende difficile ou même impossible l'identification de ce signal.

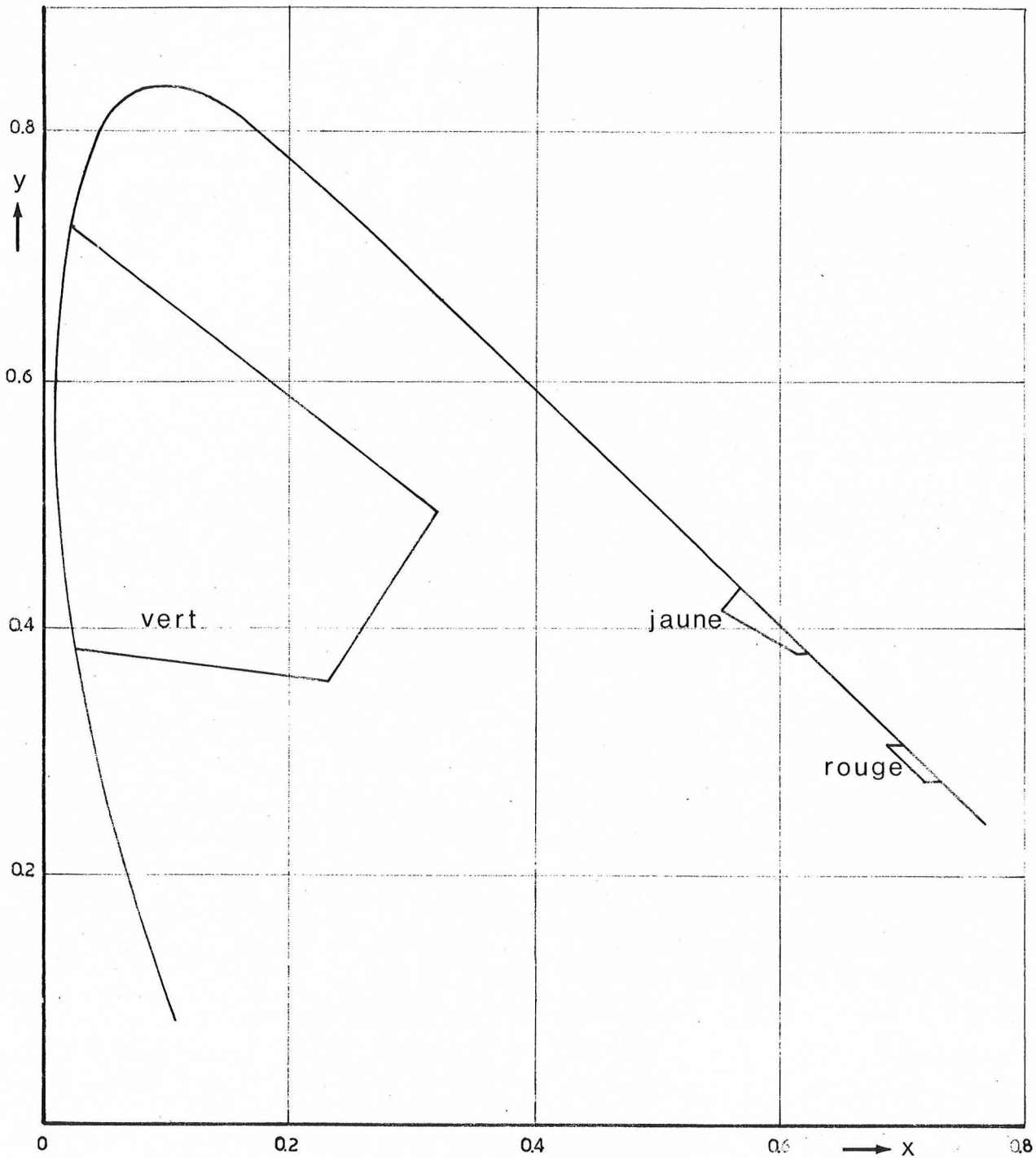


Figure 1.4. : Domaines de couleur pour les feux tricolores

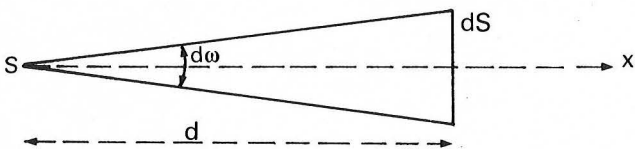
1.3. Mesures des caractéristiques photométriques et colorimétriques des feux tricolores

Nous avons à notre disposition sept types de feux actuellement commercialisés en France. On se propose de mesurer les caractéristiques photométriques et colorimétriques affectant l'efficacité visuelle de ces appareils. Tous les feux présentent trois surfaces lumineuses (rouge, jaune, vert) circulaires de diamètre 20 cm.

1.3.1. Intensité lumineuse

1.3.1.1. Principe

Supposons une source ponctuelle S qui émet un flux lumineux dF dans l'angle solide $d\omega$ d'axe Sx :



L'intensité lumineuse I de la source dans la direction Sx est :

$$I = \frac{dF}{d\omega}$$

L'éclairement reçu par la surface dS perpendiculaire à Sx à la distance d de la source est :

$$E = \frac{dF}{dS}$$

Comme $d\omega = \frac{dS}{d^2}$, on a $I = E \cdot d^2$ avec I en candela, E en lux et d en mètre.

On a supposé que la source S était ponctuelle ; pour une source de dimensions finies, on peut la considérer comme ponctuelle si la distance d est 10 à 15 fois la plus grande dimension de la source. On peut donc, en se plaçant à une distance suffisante, déterminer l'intensité lumineuse dans une direction en mesurant l'éclairement dans un plan perpendiculaire à cette direction [21] [22].

1.3.1.2. Méthode

Toutes les mesures sont effectuées en chambre noire. Pour mesurer la répartition angulaire de l'intensité lumineuse, on dispose de la chaîne de mesure représentée sur la figure 1.5.

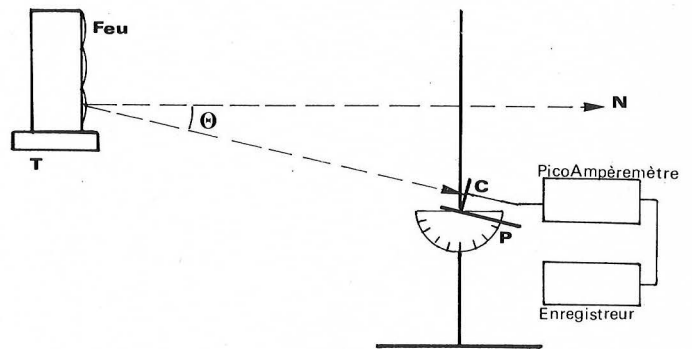


Figure 1.5. : Schéma du montage pour la mesure de l'intensité lumineuse

Sur une table tournante (T) Bruël et Kjaer type 3922, on place le feu de façon que sa face avant soit dans un plan vertical passant par l'axe de rotation de la table tournante.

Pour mesurer l'éclairement, on utilise une photodiode au silicium (C) UDT PIN 10 AP qui est bien corrigée en fonction du facteur d'efficacité lumineuse relative V_λ de l'observateur de référence défini par la C.I.E. Cette cellule est fixée sur une platine P qui peut se déplacer le long d'un axe vertical et qui peut pivoter autour d'un axe horizontal.

La translation de la platine permet de fixer l'angle vertical θ_V entre la normale N à la face avant du feu prise comme axe de référence et la direction de mesure. La rotation de la platine d'un angle θ_H , mesuré à l'aide d'un cadran gradué en degrés, permet d'avoir la surface sensible de la photodiode dans un plan perpendiculaire à la direction de mesure.

La réponse de la photodiode est mesurée à l'aide d'un picoampèremètre et d'un enregistreur de niveau Brüel et Kjaer type 2307. Cet enregistreur en coordonnées polaires, synchronisé avec la table tournante, permet d'enregistrer en continu l'intensité lumineuse du feu en fonction de l'angle horizontal θ_H entre la normale N et la direction de mesure et pour un angle vertical θ_V fixé.

Pour déterminer la normale N, on utilise un petit laser placé sur la platine à la place de la cellule. A l'aide d'un miroir plan appliqué sur la face avant du feu et en réglant la position de la platine et de la table tournante, on renvoie le faisceau réfléchi par le miroir sur la source laser ; dans cette position on a $\theta_H = \theta_V = 0$.

La réponse de la photodiode étant proportionnelle à l'éclairement reçu, on doit étalonner la chaîne de mesure à l'aide d'une lampe étalon d'intensité lumineuse connue. On utilise la méthode de substitution en plaçant la lampe étalon à la place de la source à mesurer.

On a alors :

- réponse de la cellule avec la lampe étalon

$$r_{et} = K E_{et} = K \frac{I_{et}}{d^2}$$

- réponse de la cellule avec la source à mesurer

$$r_x = K E_x = K \frac{I_x}{d^2}$$

et l'intensité lumineuse de la source inconnue est

$$I_x = \left(\frac{r_{et}}{r_x} \right) I_{et}$$

1.3.1.3. Résultats

a) état neuf

Conformément à la norme NFC 71-120 [23], les sources lumineuses des feux sont préalablement vieillies pendant 50 heures de façon que leurs caractéristiques photométriques soient suffisamment stables.

Pour les mesures, les feux sont alimentés à leur tension nominale d'alimentation, soit 220 v ± 0,2 v pour les feux n° 1 à 6 et 110 v ± 0,2 v pour le feu n° 7.

Pour chaque feu, on enregistre, en coordonnées polaires, les courbes de répartition angulaire de l'intensité lumineuse en fonction de l'angle horizontal θ_H pour différents angles verticaux θ_V . On obtient des courbes comme celles indiquées sur la figure 1.6.

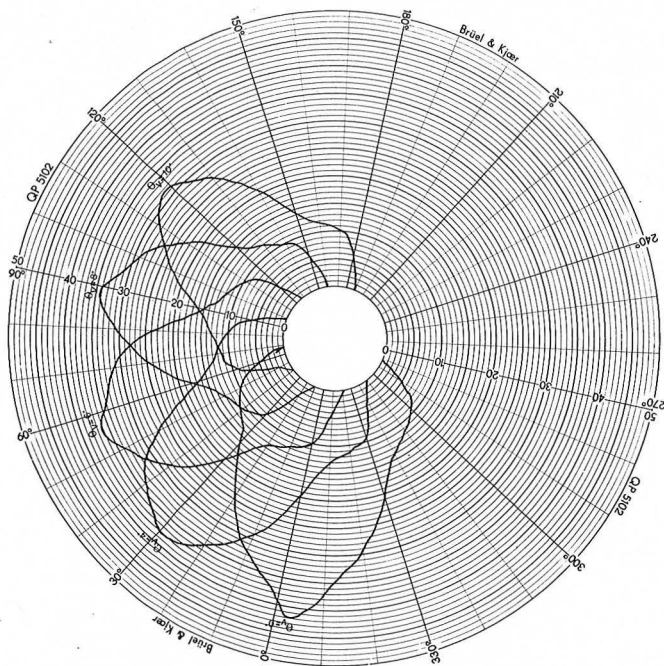


Figure 1.6. : Courbes de répartition angulaire de l'intensité lumineuse en coordonnées polaires

Les courbes obtenues correspondent à la réponse de la photodiode. On enregistre également la réponse correspondant à la lampe étalon d'intensité $I_{et} = 270$ cd.

L'enregistreur de niveau utilisé étant logarithmique, on doit calculer l'intensité I_x selon la méthode suivante :

$$\Delta r = \log I_{et} - \log I_x$$

$$\Delta r = \log \frac{I_{et}}{I_x}$$

$$I_x = \frac{270}{10^{\Delta r}} \text{ (en cd)}$$

Après calcul, on trace les courbes de répartition angulaire de l'intensité lumineuse en coordonnées rectangulaires (figure 1.7.)

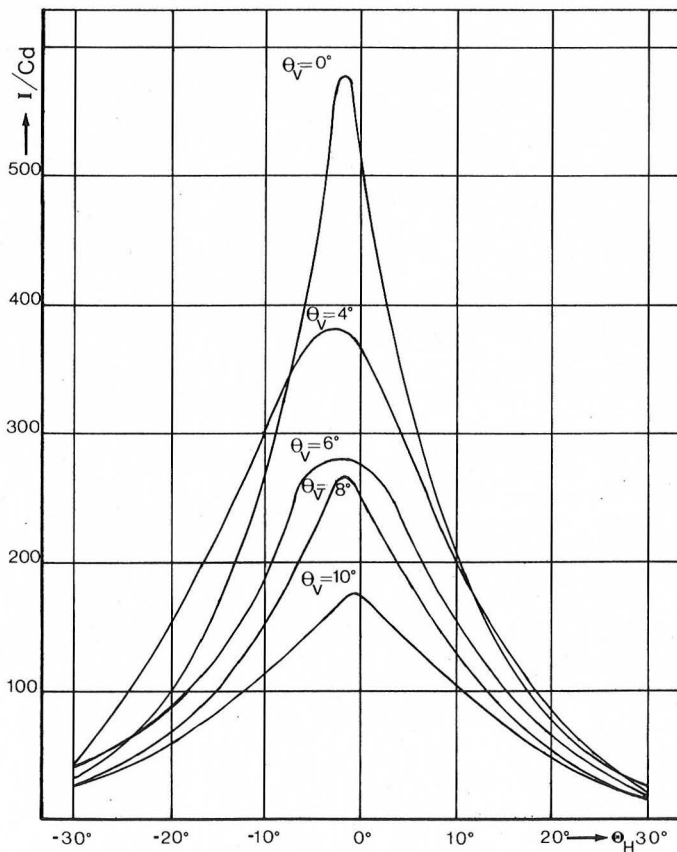


Figure 1.7. : Courbes de répartition angulaire de l'intensité lumineuse en coordonnées rectangulaires

Les intensités lumineuses de chaque feu dans différentes directions définies par les angles θ_H et θ_V sont regroupées dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6. : Intensité lumineuse (en cd)
des feux tricolores mesurés

N° feux	Direction de θ_V Mesure θ_H	0°	0°	0°	- 6°	- 6°	- 6°
		0°	+ 10°	- 10°	0°	+ 10°	- 10°
1	Rouge	214	87	138	135	76	121
	Jaune	491	217	277	270	180	219
	Vert	217	98	176	131	86	121
2	Rouge	110	59	76	105	49	71
	Jaune	170	85	138	182	163	132
	Vert	85	47	76	87	46	74
3	Rouge	92	55	110	95	65	96
	Jaune	150	142	135	214	134	138
	Vert	154	107	150	189	115	147
4	Rouge	76	28	67	55	25	49
	Jaune	166	65	147	119	54	114
	Vert	69	24	63	50	21	48
5	Rouge	64	44	43	51	31	43
	Jaune	71	59	39	72	55	43
	Vert	80	63	47	69	45	56
6	Rouge	47	47	47	44	43	43
	Jaune	41	40	40	39	38	38
	Vert	264	255	260	238	232	237
7	Rouge	210	29	43	76	15	38
	Jaune	904	107	170	373	81	121
	Vert	152	26	68	107	24	43

Tableau 1.7. : Intensité lumineuse (en cd)
après vieillissement de la source pour $\theta_V = \theta_H = 0$

		Etat neuf	Après 1 500 h	Après 3 000 h
1	Rouge	214	212	209
	Jaune	491	478	424
	Vert	217	210	196
2	Rouge	110	108	105
	Jaune	170	166	155
	Vert	85	81	75
3	Rouge	92	90	88
	Jaune	150	156	140
	Vert	154	154	131
4	Rouge	76	77	74
	Jaune	166	158	145
	Vert	69	61	57
5	Rouge	64	62	61
	Jaune	71	69	65
	Vert	80	78	70
7	Rouge	210	215	198
	Jaune	904	900	846
	Vert	152	161	135

Tableau 1.8. : Intensité lumineuse (en cd)
en fonction de la tension d'alimentation
de la source pour $\theta_V = \theta_H = 0$

		220 V	190 V	150 V
1	Rouge	214	114	43
	Jaune	491	255	101
	Vert	217	147	43
2	Rouge	110	65	27
	Jaune	170	98	42
	Vert	85	45	15
3	Rouge	92	50	19
	Jaune	150	88	31
	Vert	154	85	29
4	Rouge	76	44	16
	Jaune	166	96	31
	Vert	69	35	10
5	Rouge	64	39	16
	Jaune	71	42	17
	Vert	80	46	16

		220 V	190 V	170 V
6	Rouge	47	40	34
	Jaune	41	32	26
	Vert	264	189	106

		110 V	95 V	80 V
7	Rouge	210	114	60
	Jaune	904	381	255
	Vert	152	98	51

b) après vieillissement de la source

Pour étudier l'influence du vieillissement de la source sur l'intensité lumineuse, on a laissé vieillir les lampes à leur tension nominale d'alimentation. On effectue les mesures de l'intensité, après 1 500 heures puis 3 000 heures de vieillissement, dans la direction perpendiculaire à la face avant du feu ($\theta_V = \theta_H = 0$).

Les résultats sont regroupés dans le tableau 1.7.

c) variation de l'intensité lumineuse en fonction de la diminution de la tension d'alimentation

Dans le but d'obtenir des niveaux d'intensité lumineuse différents on effectue des mesures pour différentes tensions d'alimentation de la source des feux.

Les résultats pour $\theta_H = \theta_V = 0$ sont regroupés dans le tableau 1.8.

d) précision des résultats

Pour estimer la précision des résultats, il faut analyser tous les paramètres influençant la mesure. L'incertitude sur les résultats dépend de :

- la précision de la valeur de l'intensité lumineuse étalon,
- l'incertitude sur la distance source-récepteur que nous pouvons négliger dans la méthode de substitution,
- la correction en fonction de $V(\lambda)$ de la cellule,
- la linéarité de la cellule,
- l'incertitude due à l'enregistreur,
- l'erreur due aux défauts de repérage des angles V et H .

A partir de la formule :

$$I_x = I_{\text{et}} \frac{r_x}{r_{\text{et}}}$$

on peut calculer l'incertitude relative :

$$\frac{\Delta I_x}{I_x} = \frac{\Delta I_{\text{et}}}{I_{\text{et}}} + \frac{\Delta r_x}{r_x} + \frac{\Delta r_{\text{et}}}{r_{\text{et}}}$$

On peut négliger l'incertitude sur la valeur de l'intensité étalon et admettre que la correction en fonction de $V(\lambda)$ et la linéarité de la cellule sont bonnes. On ne retiendra, pour l'incertitude $\frac{\Delta r}{r}$ que l'incertitude due à l'enregistreur r et prise égale à $\pm 2\%$.

On a donc une incertitude relative sur l'intensité lumineuse

$$\frac{\Delta I_x}{I_x} = \pm 4\%$$

L'erreur de repérage des angles V et H est due à l'erreur sur le positionnement de l'axe de référence et à l'incertitude sur la synchronisation de l'enregistrement. On peut prendre une valeur $\Delta H = \Delta V = \pm 0,1^\circ$.

e) commentaires

Les résultats montrent une grande dispersion des intensités lumineuses des différents feux mesurés à l'état neuf. Si on se base sur la valeur de 200 cd recommandée par la C.I.E. pour les feux rouges pour leur intensité souhaitable en vision de jour, deux feux seulement satisferaient à ces conditions.

Le vieillissement de la source jusqu'à 3 000 heures n'entraîne pas de diminution très importante de l'intensité lumineuse. Il faut noter que les sources utilisées pour les feux ont une durée de vie prévue entre 4 000 et 5 000 heures.

La diminution de la tension d'alimentation entraîne une diminution importante de l'intensité lumineuse des feux. Si on diminue la tension de 15 % par rapport à la ten-

sion nominale d'alimentation, l'intensité lumineuse est diminuée environ de moitié.

Pour étudier l'influence des variations de la source sur l'intensité, il semble préférable de mesurer les lampes seules ; l'intensité lumineuse étant fonction du flux lumineux qui peut être mesuré avec plus de précision par la méthode de la sphère d'intégration.

1.3.2. Couleur

1.3.2.1. Principe

Pour mesurer la couleur de la lumière émise par l'ensemble du feu (source + réflecteur + filtre) on est confronté au problème de la mesure de la couleur d'une source lumineuse.

Les composantes trichromatiques C.I.E. d'un stimulus de couleur peuvent être obtenues en multipliant la courbe du stimulus de couleur $\Phi(\lambda)$ par les composantes trichromatiques spectrales C.I.E. ($\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ et $\bar{Z}(\lambda)$) et en intégrant ces produits sur l'ensemble du spectre visible, on a :

$$X = K \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{X}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda$$

Les coordonnées trichromatiques sont déduites des composantes trichromatiques par les formules suivantes :

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

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

Dans le cas d'une source, la courbe stimulus de couleur $\Phi(\lambda)$ s'identifie à la répartition spectrale relative d'énergie $S(\lambda)$.

La mesure de la couleur d'une source se ramène donc à la mesure de sa répartition spectrale relative d'énergie et à la détermination de ses coordonnées trichromatiques par le calcul.

1.3.2.2. Méthode

A l'aide d'un spectrophotomètre Trilac de la Société Leres, on mesure la répartition spectrale relative d'énergie $S(\lambda)$ de chaque feu.

On procède par comparaison avec une source étalon (lampe à incandescence de température de couleur $T = 3\,200\text{ K}$) dont la répartition énergétique relative $\phi(\lambda)$ est connue. On mesure successivement, tous les 10 mm de 380 à 700 nm, les flux de radiations fournis par la source étalon $F_{\text{et}}(\lambda)$ et par le feu $F_x(\lambda)$.

La répartition spectrale d'énergie relative du feu est alors :

$$S(\lambda) = \frac{F_x(\lambda)}{F_{\text{et}}(\lambda)} \cdot \phi(\lambda)$$

Les valeurs des composantes trichromatiques spectrales et de la répartition énergétique relative d'une source à 3 200 K se trouvant dans des tables [24, 25], on peut calculer, à un facteur près, les composantes trichromatiques X, Y, Z par les formules suivantes :

$$X = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=700} \frac{F_x(\lambda)}{F_{\text{et}}(\lambda)} \cdot \phi(\lambda) \cdot \bar{X}(\lambda)$$

$$Y = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=700} \frac{F_x(\lambda)}{F_{\text{et}}(\lambda)} \cdot \phi(\lambda) \cdot \bar{Y}(\lambda)$$

$$Z = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=700} \frac{F_x(\lambda)}{F_{\text{et}}(\lambda)} \cdot \phi(\lambda) \cdot \bar{Z}(\lambda)$$

Puis, on déduit les coordonnées trichromatiques x et y.

1.3.2.3. Résultats

a) état neuf

Pour les mesures, les feux sont alimentés à leur tension nominale d'alimentation.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9. : Coordonnées trichromatiques des feux mesurés à l'état neuf

N° Feu	Rouge		Jaune		Vert	
	x	y	x	y	x	y
1	0,694	0,302	0,601	0,394	0,239	0,470
2	0,695	0,303	0,577	0,416	0,211	0,455
3	0,685	0,311	0,567	0,412	0,222	0,496
4	0,688	0,309	0,608	0,388	0,212	0,454
5	0,699	0,297	0,571	0,419	0,206	0,486
6	0,665	0,328	0,588	0,396	0,308	0,518
7	0,708	0,289	0,591	0,403	0,230	0,529

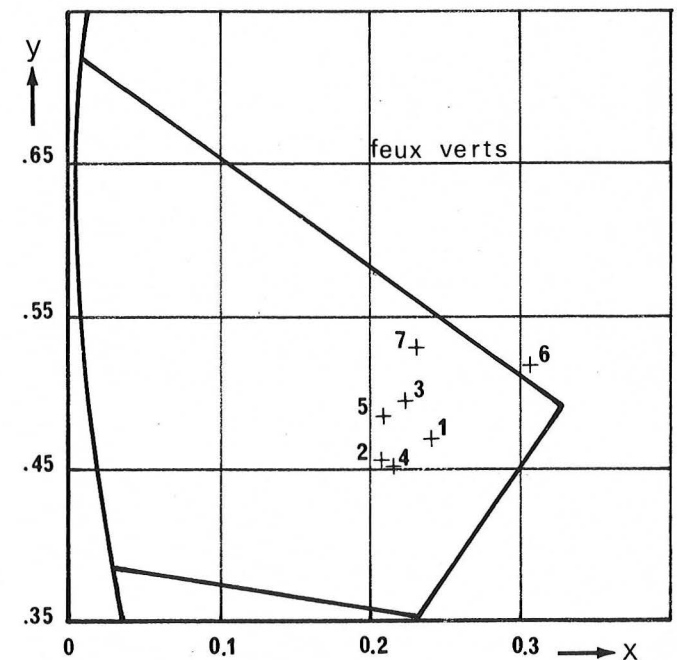
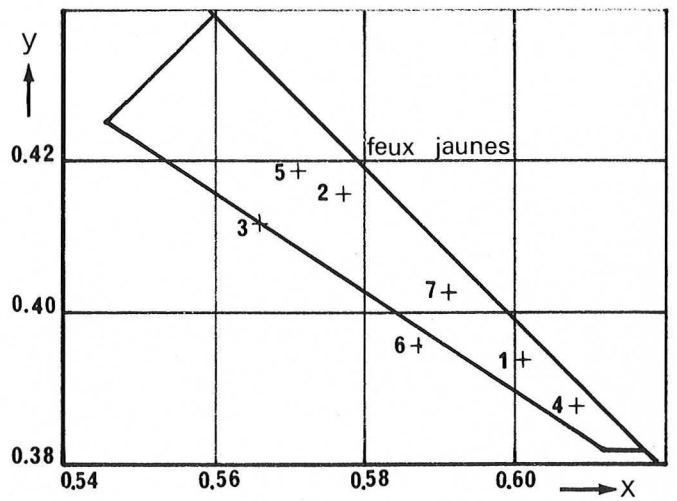
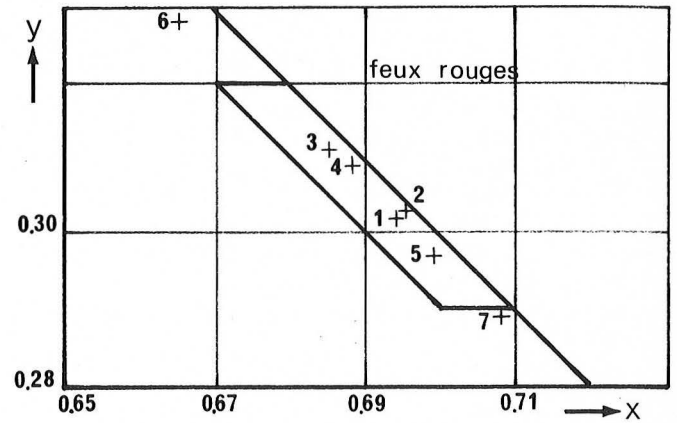


Figure 1.8. : Coordonnées trichromatiques des feux mesurés à l'état neuf

Les points représentatifs des coordonnées trichromatiques sont reportés sur la figure 1.8. où l'on a fait figurer des domaines de couleur définis dans le rapport technique n° 00 (T.C. 1.6) 1979 de la C.I.E. [18].

b) après vieillissement de la source

Les mesures de couleur sont effectuées pour chaque feu après 3 000 h de vieillissement de la source lumineuse.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 1.10.

c) influence de la diminution de l'intensité

La diminution de la tension d'alimentation des lampes fait varier leur répartition spectrale relative d'énergie et, toutes choses étant égales par ailleurs, la répartition spectrale de la lumière émise par l'ensemble du feu est changée et par conséquent, les coordonnées trichromatiques évoluent.

Les résultats de mesure sont regroupés dans le tableau 1.11.

d) précision des résultats

L'erreur sur les coordonnées trichromatiques x, y provient de l'incertitude sur la mesure de la répartition spectrale d'énergie relative $S(\lambda)$.

Pour estimer l'erreur sur x et y, on a effectué cinq mesures sur un même feu à des temps différents. Pour chaque couleur, l'écart sur les valeurs x et y est inférieur à 0,003. On prendra donc comme incertitude sur x et y les valeurs $\Delta x = \Delta y = \pm 0,003$.

e) commentaires

A l'état neuf, tous les feux sauf un ont des points de couleur intérieurs aux domaines définis par la C.I.E. pour les trois couleurs (rouge, jaune, vert).

Le vieillissement de la source jusqu'à 3 000 h n'entraîne pas de changement notable des coordonnées trichromatiques.

La diminution de l'intensité lumineuse n'apporte pas de changement pour la couleur rouge. Pour le jaune et le vert, les points de couleur se déplacent légèrement vers le blanc tout en restant à l'intérieur des domaines définis par la C.I.E.

Tableau 1.10. : Coordonnées trichromatiques des feux après 3 000 h de vieillissement de la source

N° feu	Rouge		Jaune		Vert	
	x	y	x	y	x	y
1	0,695	0,303	0,605	0,391	0,244	0,477
2	0,695	0,302	0,582	0,412	0,216	0,466
3	0,684	0,311	0,568	0,410	0,214	0,501
4	0,689	0,308	0,608	0,387	0,210	0,451
5	0,698	0,299	0,577	0,414	0,216	0,500
7	0,706	0,291	0,592	0,402	0,233	0,521

Tableau 1.11. : Coordonnées trichromatiques des feux pour différentes tensions d'alimentation des sources

N° Feu		Rouge		Jaune		Vert	
		x	y	x	y	x	y
1	190 V	0,695	0,301	0,605	0,390	0,246	0,483
	150 V	0,696	0,300	0,609	0,384	0,265	0,502
2	190 V	0,696	0,302	0,582	0,411	0,217	0,468
	150 V	0,696	0,301	0,589	0,405	0,227	0,490
3	190 V	0,686	0,310	0,573	0,408	0,228	0,508
	150 V	0,687	0,310	0,582	0,403	0,237	0,527
4	190 V	0,688	0,307	0,612	0,384	0,222	0,473
	150 V	0,691	0,306	0,618	0,378	0,234	0,489
5	190 V	0,699	0,299	0,576	0,414	0,211	0,498
	150 V	0,643	0,317	0,580	0,409	0,225	0,516
6	190 V	0,667	0,327	0,577	0,406	0,311	0,517
	150 V	0,665	0,328	0,565	0,415	0,310	0,516
7	95 V	0,708	-0,288	0,596	0,398	0,235	0,539
	80 V	0,708	0,288	0,601	0,394	0,246	0,555

1.3.3. Effet fantôme

1.3.3.1. Principe

On a vu en 1.2.3. que l'effet fantôme pouvait avoir trois causes différentes. On déterminera cet effet par le coefficient de réflexion de l'ensemble du feu, incluant les trois phénomènes fantômes. Le coefficient de réflexion, dans une direction donnée, s'exprime en terme d'intensité lumineuse par unité d'éclairement reçu par le feu et fourni par la source lumineuse produisant le feu fantôme. Pour caractériser complètement l'effet fantôme, on déterminera la couleur de la lumière réémise par le feu.

1.3.3.2. Méthode

On adoptera le mode opératoire décrit dans la norme allemande DIN 67527 [13]. Le schéma de principe est représenté sur la figure 1.9.

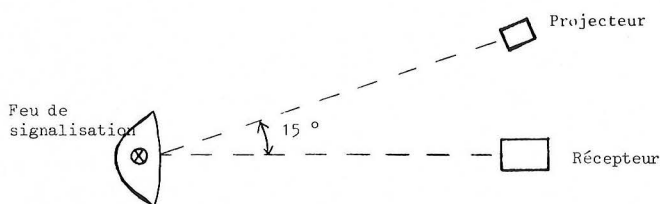


Figure 1.9. : Schéma de principe pour la mesure du coefficient de réflexion

Le feu de signalisation est placé dans sa position d'utilisation et éteint.

Le projecteur qui simule la source lumineuse produisant le feu fantôme émet une lumière de température de couleur d'environ 2 900 K et est placé au-dessus de l'horizontale.

L'axe optique du projecteur et l'axe de référence du feu sont dans un plan vertical et font entre eux un angle de 15°.

Pour ne mesurer que la lumière réémise par le feu et éviter les lumières parasites, on utilisera comme récepteur un luminancemètre Pritchard 1980 A dont le schéma de principe optique est représenté sur la figure 1.10.

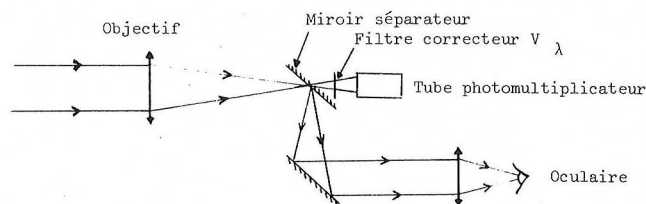


Figure 1.10. : Schéma de principe optique du luminancemètre Pritchard 1980 A

Le diaphragme découpé dans le miroir séparateur délimite un champ de mesure et permet de mesurer la luminance L d'une surface délimitée par ce champ de mesure. En choisissant un diaphragme circulaire, on peut mesurer la luminance moyenne d'un cercle inscrit dans la surface du feu.

L'intensité lumineuse est reliée à la luminance L et à la surface S du feu par la relation :

$$I = L \cdot S$$

I en cd, L en cd/m², S en m².

L'éclairement reçu par le feu est mesuré avec un luxmètre Hartman et Braun EBLX 4 dans un plan perpendiculaire à l'axe optique de la source.

Le facteur de réflexion est :

$$R = \frac{I}{E_I}$$

I en cd, E en lx, R en cd/lx.

Le luminancemètre Pritchard étant équipé de filtres correspondants aux fonctions trichromatiques X , Y et Z , on peut mesurer la couleur de la lumière réémise par le feu.

En conservant le même dispositif, on mesure la lumière successivement avec :

- le filtre correspondant à la fonction Y , identique à V_λ ,
- le filtre correspondant à la fonction Z ,
- le filtre X_r correspondant au lobe rouge de la fonction X ,
- le filtre X_b correspondant au lobe bleu de la fonction X .

Les coordonnées trichromatiques x et y se calculent par les formules suivantes :

$$x = \frac{(X_r + X_b)}{(X_r + X_b) + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{(X_r + X_b) + Y + Z}$$

1.3.3.3. Résultats

Les résultats des mesures du coefficient de réflexion des feux sont regroupés dans le tableau 1.12.

Les résultats des mesures de couleur de la lumière fantôme sont regroupés dans le tableau 1.13.

Tableau 1.12. : Coefficient de réflexion (en mcd/lx)

N° feu	Rouge	Jaune	Vert
1	0,60	0,71	0,54
2	0,50	0,63	0,67
3	0,72	0,98	0,84
4	0,22	0,18	1,0
5	0,41	0,32	0,49
7	0,66	1,15	0,75

Tableau 1.13. : Coordonnées trichromatiques de la lumière fantôme des feux mesurés

N° feu	Rouge		Jaune		Vert	
	x	y	x	y	x	y
1	0,567	0,345	0,531	0,380	0,344	0,410
2	0,554	0,344	0,473	0,393	0,375	0,390
3	0,499	0,367	0,475	0,395	0,288	0,433
4	0,496	0,377	0,508	0,388	0,375	0,393
5	0,515	0,366	0,452	0,402	0,355	0,419
7	0,554	0,348	0,470	0,382	0,398	0,423

1.3.3.4. Commentaires

Les coefficients de réflexion des feux mesurés sont inférieurs à 1 mcd/lx. Si on admet que l'éclairement fourni par le soleil peut atteindre 40 000 lux, dans des conditions d'orientation proches de celles dans lesquelles est mesuré le coefficient de réflexion, on obtiendra des intensités lumineuses du feu fantôme de l'ordre de 40 candélas.

Cette valeur peut apporter une gêne à la reconnaissance des feux si leur intensité,

quand ils sont allumés, n'est pas nettement supérieure.

Les coordonnées trichromatiques de la lumière réfléchie est un mélange de lumière de la couleur du feu et de la lumière réfléchie sur la face extérieure du feu sans traverser le filtre. Les points de couleur sont extérieurs aux domaines définis pour les feux allumés en étant déplacés vers le blanc. Il peut néanmoins y avoir risque de confusion entre la couleur du feu fantôme et celle du feu allumé.

1.4. Eléments pouvant servir de base pour de futures spécifications photométriques et colorimétriques

Actuellement, aucune spécification n'existe en France pour les feux tricolores. A partir de l'étude réalisée sur les dispositifs existants et des spécifications étrangères, on a essayé d'apporter des éléments pour des futures spécifications. Il faut préciser, qu'à l'heure actuelle, ces éléments n'ont pas été discutés par une commission compétente.

1.4.1. Intensité lumineuse

On a vu que les exigences pour l'intensité lumineuse dépendent de la distance d'arrêt qui est, entre autres choses, fonction de la vitesse du véhicule. Il apparaît souhaitable de considérer deux cas d'implantation en fonction des vitesses couramment pratiquées :

- zones urbaines où la vitesse est inférieure à 60 km/h. La distance d'arrêt peut être raisonnablement comprise entre 60 et 100 m,

- zones non urbaines où la vitesse peut être supérieure à 90 km/h et la distance d'arrêt être de l'ordre de 200 m.

Il semble suffisant de définir des valeurs limites pour l'intensité lumineuse dans certaines directions dépendant de la position du feu par rapport à la chaussée. On peut considérer deux cas d'implantation où l'on peut définir des directions d'après la figure 1.2. et le tableau 1.1. :

- le feu est fixé sur un mât sur le bas-côté de la chaussée. Dans ce cas, on peut choisir les directions suivantes définies par les angles :

$$H = V = 0^\circ$$

$$V = -6^\circ \text{ et } H = \pm 10^\circ$$

- le feu est fixé sur une potence ou sur un portique au-dessus de la chaussée. Dans ce cas, on pourra choisir les directions définies par les angles :

$$H = V = 0^\circ$$

$$V = -10^\circ \text{ et } H = \pm 6^\circ$$

On a vu également qu'il était souhaitable d'avoir des niveaux d'intensité lumineuse différents pour le jour et pour la nuit.

Pour les feux avec un système de commutation jour/nuit, on peut envisager les exigences suivantes (tableaux 1.14 et 1.15.) :

Tableau 1.14. : Intensité lumineuse des feux en zones urbaines

Directions d'observation		Intensité lumineuse (en Cd)		
		Rouge	Jaune	Vert
V = 0° H = 0°	Jour	> 200	> 200	> 200
	Nuit	50 à 100	50 à 150	50 à 150
V = - 6° H = + 10°	Jour	> 100	> 100	> 100
	Nuit	25 à 50	25 à 75	25 à 75

Tableau 1.15. : Intensité lumineuse des feux en zones non urbaines

Directions d'observation		Intensité lumineuse (en Cd)		
		Rouge	Jaune	Vert
V = 0° H = 0°	Jour	> 400	> 400	> 400
	Nuit	100 à 200	100 à 300	100 à 300
V = - 6° H = + 10°	Jour	> 100	> 100	> 100
	Nuit	25 à 50	25 à 75	25 à 75

En supposant que soit conservée en France l'utilisation de feux sans système de commutation jour/nuit, on peut envisager comme compromis les exigences suivantes pour le jour et la nuit (tableau 1.16.) :

Tableau 1.16. : Intensité lumineuse des feux sans système de commutation jour/nuit

Directions d'observation		Intensité lumineuse (en Cd)		
		Rouge	Jaune	Vert
V = 0° H = 0°	Zones urbaines	100 à 150	100 à 150	100 à 150
	Zones non urbaines	200 à 300	200 à 300	200 à 300
V = - 6° H = + 10°	Zones urbaines	50 à 75	50 à 75	50 à 75
	Zones non urbaines	50 à 75	50 à 75	50 à 75

Remarque :

Pour tenir compte des risques d'éblouissement en vision de nuit, les valeurs proposées sont inférieures aux valeurs souhaitables pour la vision de jour. Pour améliorer l'efficacité de jour, il pourrait être intéressant d'envisager l'utilisation d'écrans de fond noirs isolant le feu de son environnement lumineux. Par exemple, avec un écran de largeur égale à trois fois le diamètre du feu, l'intensité lumineuse souhaitable de jour pourrait être multipliée par un facteur $P \approx 0,6$.

1.4.2. Couleur

On peut définir la couleur des feux tricolores par leurs coordonnées trichromatiques x et y . On peut prendre comme domaines limites pour les points de couleur ainsi définis, les domaines proposés par la C.I.E. et dont les droites limites sont regroupées dans le tableau 1.17. :

Tableau 1.17. : Domaines de couleur des signaux lumineux

Couleur	Limites	Equations des droites limites
Rouge	Pourpre Jaune Rouge	$y = 0,990 - x$ $y = 0,320$ $y = 0,290$
Jaune	Rouge Blanc Vert	$y = 0,332$ $y = 0,790 - 0,667 x$ $y = x - 0,120$
Vert	Jaune Blanc Bleu	$y = 0,726 - 0,726 x$ $x = 0,650 y$ $y = 0,390 - 0,171 x$

Après vieillissement et en position de commutation "nuit" si elle existe, la couleur du feu devra rester à l'intérieur de ces domaines.

1.4.3. Effet fantôme

L'effet fantôme peut être déterminé en mesurant le coefficient de réflexion du feu dans la direction perpendiculaire à sa face avant, le feu étant éclairé sous une incidence de 15°. Avec les valeurs d'intensité lumineuse envisagées pour les feux allumés, on peut penser qu'un coefficient de réflexion inférieur à 1 mcd/lx n'impliquera pas de gêne dans la reconnaissance des feux.

2. FEUX RYTHMES

2.1. Généralités

La C.I.E. [26] définit un feu rythmé comme étant : un feu dont la lumière apparaît par intermittence, avec une périodicité régulière. On retiendra cette définition générale pour caractériser les feux dont l'intensité lumineuse varie en fonction du temps.

2.2. Définitions

Selon la durée d'apparition de la lumière des feux rythmés, ceux-ci peuvent être divisés en deux catégories.

2.2.1. Feux clignotants

Les feux clignotants sont des feux rythmés utilisés en signalisation routière pour signifier l'arrêt absolu (feu rouge) ou ralentir la circulation ou signaler un point dangereux (feu jaune). La durée totale de la lumière de ces feux, dans chaque période, est nettement plus longue que la durée totale de l'obscurité et les intervalles d'obscurité ont tous la même durée.

En général, la source lumineuse de ces feux est une lampe à incandescence dont la tension d'alimentation varie en fonction du temps en passant par des valeurs nulles.

La figure 2.1. représente la variation de l'intensité lumineuse en fonction du temps.

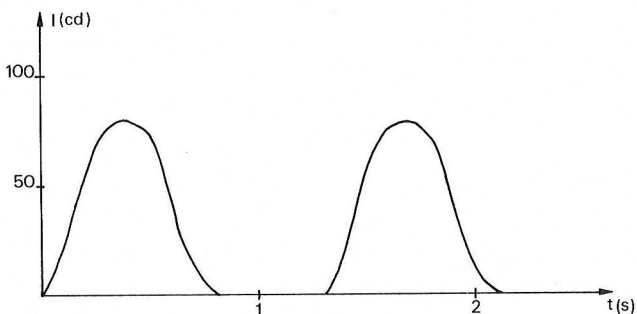


Figure 2.1. : Intensité lumineuse d'un feu clignotant en fonction du temps

2.2.2. Feux à éclats

Les feux à éclats sont des feux dont la durée totale de la lumière, dans chaque période, est nettement plus courte que la durée totale de l'obscurité et où les apparitions de la lumière (éclats) ont toutes la même durée.

Les sources lumineuses de ces feux sont des lampes au xénon alimentées par dé-

charge de courte durée [27]. Le schéma de principe du circuit électrique utilisé pour alimenter les lampes à éclats est représenté sur la figure 2.2.

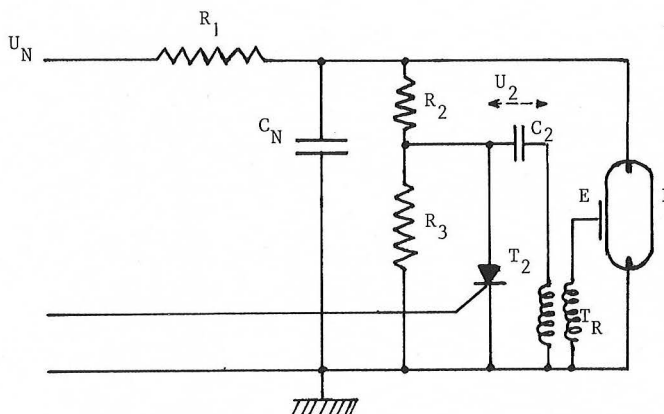


Figure 2.2. : Schéma du circuit électrique pour lampe à éclats :

- U_N = tension d'alimentation
- C_N = condensateur éclair
- U_Z = tension d'amorçage primaire
- C_Z = condensateur d'amorçage
- T_Z = thyristor d'amorçage
- E = électrode extérieure pour l'amorçage
- T_R = transformateur d'amorçage
- B = tube éclair
- R_1, R_2, R_3 = résistances

La décharge du condensateur C_N est provoquée par une impulsion en haute tension appliquée à l'électrode externe E qui rend le gaz du tube conducteur en le ionisant.

On obtient ainsi des éclairs de forte luminance pendant un temps très court.

La figure 2.3. représente le flux lumineux fourni par une lampe à éclats en fonction du temps.

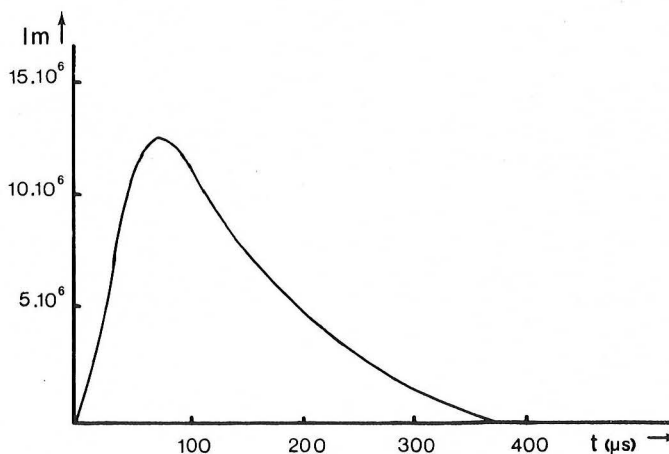


Figure 2.3. : Flux lumineux d'une lampe à éclats en fonction du temps

2.3. Notions d'intensité effective

La variation de l'intensité lumineuse du feu en fonction du temps peut se caractériser par la fréquence de l'éclat, la durée de l'éclat, le maximum de l'intensité lumineuse.

Mais l'oeil n'analyse pas les variations de l'intensité lumineuse qu'il reçoit pendant un éclat bref et il réagit à l'impression visuelle totale en attribuant au feu une intensité lumineuse apparente. Il est possible d'évaluer l'efficacité d'un feu rythmé en le comparant à un feu fixe vu dans les mêmes conditions.

On appelle intensité effective d'un feu rythmé, l'intensité d'un feu fixe qui produirait la même impression visuelle dans les mêmes conditions d'observation.

Il est possible de déterminer l'intensité effective d'un éclat à partir de la loi de variation de l'intensité lumineuse en fonction du temps.

Trois méthodes d'évaluation de l'intensité effective sont décrites par Blaise [28] et Holmes [29] et sont recommandées par l'association internationale de la signalisation maritime [30].

2.3.1. Méthode de Blondel-Rey-Douglas

A partir d'observations expérimentales, Blondel-Rey [31] proposèrent, pour des éclats de forme rectangulaire d'intensité I et de durée t , la formule suivante donnant l'intensité effective :

$$I_e = \frac{It}{a + t}$$

Pour des éclats non rectangulaires, ils ont indiqué une extension possible de leur loi sous la forme :

$$I_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt}{a + t_2 - t_1}$$

où $I(t)$ est la loi de variation de l'intensité lumineuse I en fonction du temps, a est la Cte de Blondel-Rey égale à 0,2 seconde, t_1 et t_2 sont les instants initial et final de l'éclat dont la détermination reste ambiguë.

Douglas [32] a suggéré que les limites t_1 et t_2 soient choisies de façon à rendre maximale l'intensité effective. Il a montré que le maximum est atteint lorsque $I(t_1) = I(t_2) = I_e$.

Pour un éclat simple, on peut écrire :

$$aI_e = \int_{t_1}^{t_2} [I(t) - I_e] dt$$

où t_1 et t_2 sont les instants auxquels l'intensité instantanée devient respectivement supérieure et inférieure à l'intensité effective I_e . Comme I_e est fonction de t_1 et t_2 et que les limites t_1 et t_2 proposées par Douglas sont aussi des fonctions de I_e , il faut recourir à des méthodes itératives pour déterminer I_e .

Dans le cas d'éclats extrêmement brefs (de l'ordre de 100 μ s), on peut se demander si la valeur de $a = 0,2$ s, proposée par Blondel-Rey pour des éclats plus longs est toujours applicable ; Bates [33] a montré, à partir d'expérimentations visuelles, que cette valeur de 0,2 s pouvait s'appliquer pour la détermination de l'intensité effective d'éclats de lampes à décharge dans le xénon de durée aussi courte que 30 μ s.

2.3.2. Méthode de Schmidt-Clausen

Selon Schmidt-Clausen [34], l'intensité effective I_e d'un éclat est donnée par :

$$I_e = \frac{\int I dt}{C + \frac{\int I dt}{I_0}}$$

où C est une constante de temps de la vision égale à 0,2 s et I la valeur maximale de $I(t)$ appelée intensité de crête de l'éclat.

Il introduit la notion de facteur de forme défini par :

$$F = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt}{(t_2 - t_1) I_0}$$

L'intensité effective peut alors s'exprimer par :

$$I_e = \frac{I_0 \cdot \tau}{\frac{C}{F} + \tau}$$

où t_1 = instant initial de l'éclat

t_2 = instant final de l'éclat

et $\tau = t_2 - t_1$, durée totale de l'éclat.

Si l'on trace la courbe de l'intensité instantanée et le rectangle circonscrit dont la base a pour longueur $t_2 - t_1$ et dont la hauteur est égale à l'intensité de crête de l'éclat, le facteur de forme est le quotient de l'aire sous la courbe par l'aire du rectangle.

Pour des éclats extrêmement courts, τ devient négligeable en comparaison de $\frac{C}{F}$ et I_e pourra s'écrire :

$$I_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt}{C}$$

Dans ce cas, l'intensité effective s'obtient en multipliant par 5 la valeur de l'intensité intégrée (en cd.s) d'un éclat.

2.3.3. Méthode d'Allard

Cette méthode procède aussi de la loi de variation de l'intensité lumineuse, instantanée $I(t)$ en fonction du temps. L'intensité effective instantanée correspondante est définie par une fonction $i_e(t)$.

Selon la théorie d'Allard [35], ces fonctions sont reliées par l'équation différentielle :

$$\frac{di_e(t)}{dt} = \frac{I(t) - i_e(t)}{A}$$

où A est une constante de temps égale à 0,2 s.

Les solutions de l'équation différentielle fournissent les valeurs de $i_e(t)$ à chaque instant pendant l'éclat. L'intensité effective I_e est la valeur maximale de $i_e(t)$ pendant la durée de l'éclat.

On peut obtenir une solution de l'équation différentielle sous forme intégrale :

$$i_e(t) = \int_{t_1}^t \frac{I(u)}{A} e^{-\frac{(t-u)}{A}} du$$

où t_1 est un instant précédent l'éclat.

Pour des éclats très brefs, on a :

$$I_e = \lim i_e(t)$$

$$I_e = \frac{\int_{\tau} I(t) dt}{A}$$

où τ est la durée de l'éclat.

Feu à éclats

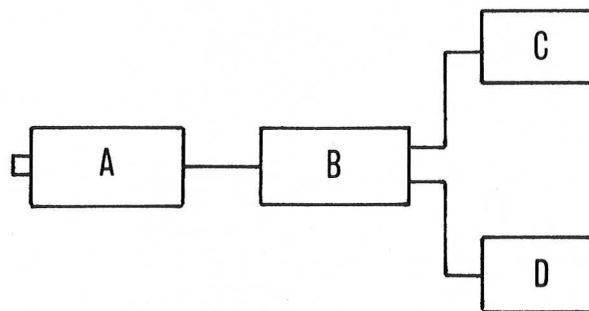
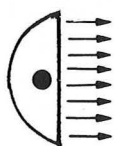


Figure 2.4. : Schéma de la chaîne de mesure de l'intensité lumineuse des feux à éclats

En A, est placé un photomètre Spectra Pritchard modèle 1980 A-PL, spécialement modifié pour mesurer les sources de lumière pulsée. Cet appareil, de conception identique au modèle 1980 A utilisé pour mesurer la luminance des feux fantômes des feux tricolores, est équipé d'un amplificateur ultra rapide permettant de mesurer des impulsions extrêmement brèves (jusqu'à 180 nanosecondes).

2.4. Mesures des caractéristiques photométriques et colorimétriques des feux à éclats

2.4.1. Intensité lumineuse effective

Pour des éclats de durée extrêmement brève (de l'ordre de 100 μ s), les formules de Blondel-Rey, de Schmidt-Clausen et d'Allard sont équivalentes et donnent l'intensité lumineuse effective :

$$I_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt}{0,2}$$

Il faut donc connaître la loi de variation de l'intensité $I(t)$ en fonction du temps.

2.4.1.1. Méthode de mesure

On est confronté au problème de la vitesse de réponse des récepteurs et de l'enregistrement du signal fourni par ces récepteurs.

Pour résoudre ce problème, on utilise la chaîne de mesure dont le schéma est représenté sur la figure 2.4.

En plaçant un diffuseur à correcteur de cosinus devant l'objectif, on peut mesurer l'éclairement produit par la source dans le plan de ce diffuseur. Connaissant la distance d entre la source et le plan du diffuseur, on peut calculer l'intensité lumineuse dans la direction de mesure par :

$$I = E \cdot d^2$$

I en candéla, E en lux, d en mètres.

En B, est placé un enregistreur de signaux transitoires à mémoire Physical Data 513 A. Cet appareil a la propriété de mettre en mémoire des signaux électriques analogiques. Le stockage se fait sous forme numérique en mémoire à micro-circuits à semi-conducteurs. La lecture des informations en mémoire est répétitive pour la restitution sur oscilloscope, elle peut également se faire en un seul balayage lent pour l'enregistrement de courbes X-T ou X-Y.

A l'entrée de l'enregistreur, la durée du balayage, piloté par une base de temps A, peut aller de 5 msec. à 500 s. pour 2 000 mots correspondant à la cadence d'échantillonnage de 2,5 μ s à 0,25 s. par mot.

La restitution peut se faire :

- soit en mode scope avec balayages répétés à la base de temps de 20 ms (fréquence de répétition de 50 HZ),
- soit en mode Trace avec un seul balayage dont la cadence est fixée par une base de temps B.

Cet enregistreur a pour rôle de "ralentir" le signal fourni par le photomètre et de permettre un enregistrement graphique.

En C, est placé un oscilloscope permettant de visualiser le signal stocké en mémoire.

En D, est placé un enregistreur Bryans X-T permettant d'enregistrer le signal fourni par le photomètre en fonction du temps.

Il est nécessaire d'étalonner le photomètre à l'aide d'une lampe étalon d'intensité lumineuse connue. Si on procède par substitution en plaçant la lampe étalon à l'endroit de la source à mesurer, on obtient :

- réponse avec la lampe étalon

$$R_{et} = k \frac{I_{et}}{d^2}$$

- réponse avec la source inconnue

$$R_x = k \frac{I_x}{d^2}$$

et

$$I_x = R_x \left(\frac{I_{et}}{R_{et}} \right)$$

On utilise une lampe étalon de 1180 cd. L'intensité maximale des feux mesurés étant de l'ordre de 10^5 cd, pour diminuer l'écart entre les réponses R_{et} et R_x , on est amené à effectuer l'étalonnage à une distance plus faible.

La distance entre la source à mesurer

et le diffuseur étant de 8 m, on prend une distance source étalon-diffuseur égale à 2 m. On a alors :

$$I_x = \left(\frac{16 I_{et}}{R_{et}} \right) R_x$$

2.4.1.2. Résultats

L'enregistrement graphique fournit une courbe représentant la loi de la variation de l'intensité lumineuse en fonction du temps.

Pour avoir la valeur absolue de l'intensité lumineuse, il faut faire intervenir la constante d'étalonnage de la chaîne de mesure.

A l'aide d'un coordinatographe, on peut analyser la courbe brute point par point ; à chaque couple (x, y) on applique un facteur de temps correspondant aux vitesses de balayage utilisées à l'enregistrement et la constante d'étalonnage en intensité. Avec un calculateur et une table traçante, on obtient pour chaque feu, des courbes du type de celle représentée en figure 2.5.

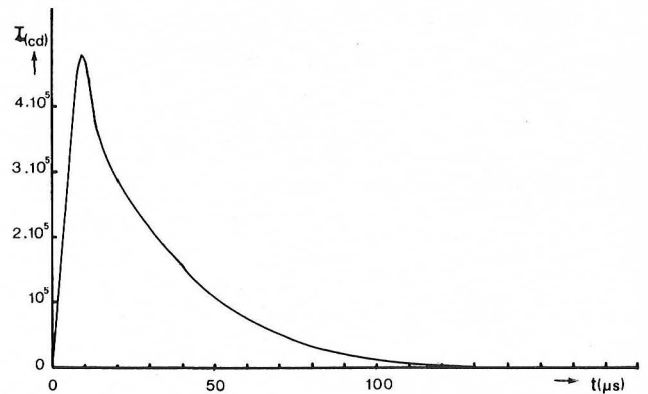


Figure 2.5. : Intensité lumineuse (en cd) en fonction du temps (en μ s)

A partir de ces courbes, on peut déterminer l'intensité maximale et la durée de l'éclat.

Avec le calculateur, on peut également obtenir l'intégrale $\int_{t_2}^{t_1} I(t) dt$ par la méthode d'intégration par trapèzes.

On calcule ensuite l'intensité effective :

$$I_e = \frac{\int I(t) dt}{0,2}$$

Pour déterminer la fréquence des éclats on mesure la durée t de 100 éclats :

la fréquence (en Hz) est alors $f = \frac{1}{t/100}$
(t en s).

On a ainsi les caractéristiques photométriques des feux qui sont regroupés dans le tableau 2.1.

L'intensité lumineuse est mesurée dans la direction perpendiculaire à la face avant des feux.

Les feux n° 1 à 11 sont de conception identique et possèdent un filtre jaune comme face avant.

Les feux n° 12 et 13 ont une face avant plane et incolore dans le but d'avoir un faisceau plus concentré et une intensité lumineuse plus importante. Ils présentent en outre, la propriété d'avoir deux fréquences possibles. Leur utilisation est prévue comme dispositif d'alerte en cas de brouillard.

Tableau 2.1. : Caractéristiques photométriques des feux à éclats

N° feu	Fréquence en Hz	Durée éclat en μ s	I max en Candela	I effectif en Candela
1	1,04	120	630 000	99,9
2	1	85	330 000	33,6
3	1,06	75	400 000	28,2
4	1,03	140	561 000	87,3
5	0,98	75	510 000	40,2
6	1,05	150	544 000	99,4
7	1,06	245	535 000	174,9
8	1,06	235	540 000	165,6
9	1,03	130	484 000	72,1
10	0,97	45	570 000	29,0
11	0,97	75	467 000	37,3
12	1	225	$1,06 \cdot 10^6$	340
	3	140	$0,51 \cdot 10^6$	90
13	1	195	$1,53 \cdot 10^6$	245
	3	130	$1,1 \cdot 10^6$	145

2.4.1.3. Précision des résultats

La précision sur le temps dépend de l'incertitude due à la mémoire, égale à $\pm 1 \mu$ s, de l'incertitude due à l'enregistreur égale à $\pm 0,5 \mu$ s et de l'incertitude due au récepteur égale à $\pm 0,5 \mu$ s.

L'erreur sur le temps sera donc $t = \pm 2 \mu$ s.

L'incertitude relative sur l'intensité lumineuse est

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta I_{et}}{R_{et}} + \frac{\Delta R_x}{R_x}$$

en négligeant l'incertitude sur la valeur de l'intensité étalon.

L'incertitude relative sur la réponse R est due à l'incertitude créée par la mémoire égale à 1 %, à l'incertitude sur l'enregistreur égale à 0,2 % et à l'incertitude due au défaut de linéarité du récepteur que l'on estime à 1 %.

On peut donc admettre une incertitude relative sur l'intensité lumineuse inférieure à 5 %.

2.4.2. Couleur

2.4.2.1. Méthode

La durée extrêmement brève de l'éclat ne permet pas de mesurer la couleur de la lumière émise comme dans le cas des feux fixes.

On peut déterminer la couleur émise à partir de la transmission spectrale du filtre et de la répartition spectrale énergétique de la source.

Pour les feux à éclats, les lampes à décharge dans le xénon émettent une lumière se rapprochant de la lumière du jour. On détermine [36] la couleur du filtre avec l'illuminant C normalisé par la C.I.E.

Pour mesurer le facteur spectral de transmission du filtre, on utilise un spectrophotomètre Trilac. On mesure d'abord le flux de radiations $F_1(\lambda)$ fourni par une lampe à ruban de tungstène puis, en intercalant le filtre entre la source et le spectrophotomètre et sans changer les réglages, on mesure le flux de radiations $F_2(\lambda)$ fourni par la source à travers le filtre.

Le facteur spectral de transmission du filtre sera alors :

$$\tau(\lambda) = \frac{F_1(\lambda)}{F_2(\lambda)}$$

On mesure $\tau(\lambda)$ tous les 10 nm de 380 à 700 nm. On peut calculer les fonctions trichromatiques par les formules suivantes :

$$X = \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{X}(\lambda)$$

$$Y = \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{Y}(\lambda)$$

$$Z = \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{Z}(\lambda)$$

où $S(\lambda)$ est la répartition spectrale d'énergie relative de l'illuminant C et $\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ et $\bar{Z}(\lambda)$ sont les composantes trichromatiques spectrales de la C.I.E.

On calcule ensuite les coordonnées trichromatiques :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad \text{et} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

On peut également calculer le facteur global de transmission par la formule :

$$\tau = \frac{\sum \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{Y}(\lambda)}{\sum S(\lambda) \bar{Y}(\lambda)}$$

2.4.2.2. Résultats

Les résultats de mesure sont regroupés dans le tableau 2.2. A titre indicatif on a mesuré les filtres n° 14 et 15 qui sont utilisés pour des feux jaunes de feux tricolores, leurs coordonnées trichromatiques et leur facteur de transmission sont calculés avec l'illuminant A et avec l'illuminant C.

Tableau 2.2. : Coordonnées trichromatiques et facteur de transmission des filtres

N° feu	x	y	τ
2	0,396	0,443	0,255
3	0,393	0,446	0,331
4	0,395	0,448	0,314
5	0,414	0,490	0,602
6	0,389	0,434	0,348
7	0,387	0,437	0,327

N° feu	x	y	τ	
10	0,420	0,490	0,604	
11	0,417	0,489	0,600	
14	111. A	0,572	0,416	0,324
	111. C	0,518	0,446	0,274
15	111. A	0,558	0,417	0,056
	111. C	0,485	0,426	0,048

Les points correspondants aux coordonnées trichromatiques sont représentés sur la figure 2.6. où l'on a reporté le domaine de couleur défini par la C.I.E. pour les feux tricolores jaunes.

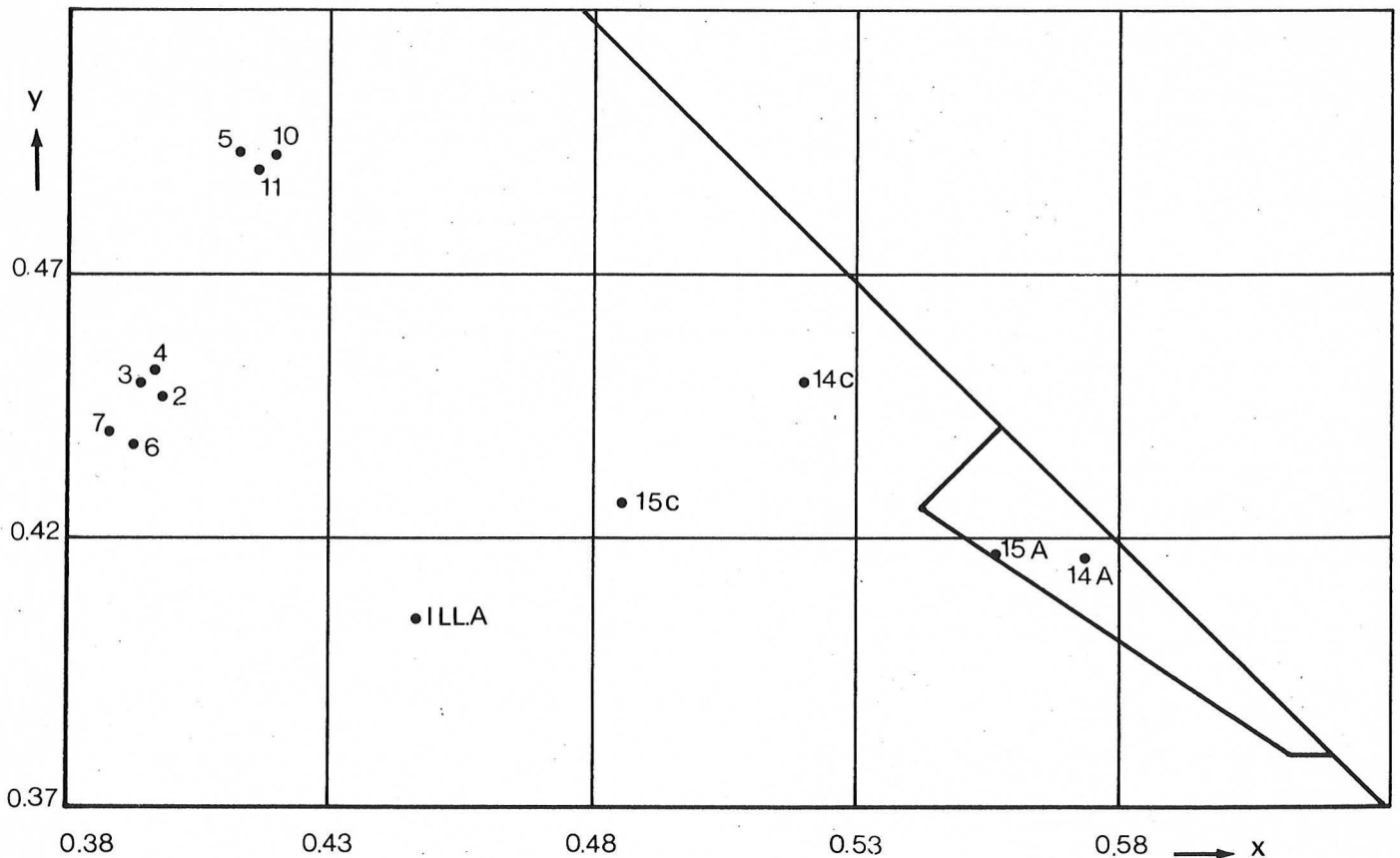


Figure 2.6. : Coordonnées trichromatiques des filtres des feux à éclats

2.4.2.3. Commentaires

Pour l'intensité lumineuse, on peut remarquer que le maximum est sensiblement le même pour tous les feux à éclats jaunes, la différence importante de leur intensité effective provient de la différence de leur durée d'éclat.

Les coordonnées trichromatiques des filtres mesurées avec l'illuminant C donnent une bonne approximation de la couleur émise par le feu et montrent que celle-ci tend vers la couleur blanche.

2.5. Eléments pouvant servir de base pour de futures spécifications

Toutes les études sur les feux à éclats ont été réalisées dans des conditions d'observation à grande distance en signalisation maritime ou aérienne. Leur utilisation sur route pose des problèmes particuliers qui nécessitent des études spéciales avec des observations visuelles et une analyse du comportement de l'automobiliste à l'approche des feux à éclats : localisation de l'obstacle et de la distance à laquelle il se trouve, gêne visuelle à proximité du feu ...

On a organisé une première séance d'observation des feux à éclats en notre possession, de jour et de nuit. Cette expérimentation effectuée avec un nombre restreint d'observateurs, permet de faire les remarques suivantes :

- pour l'intensité lumineuse :

. la durée de l'éclat ne semble pas intervenir
. la fréquence des éclats modifie l'efficacité, à 3 Hz celle-ci apparaît plus importante qu'à 1 Hz, bien que l'intensité effective soit plus faible

. en vision de jour, les feux n° 2, 3 et 10 semblent insuffisants et sont à peine discernables

. en vision de nuit, les feux n° 12 et 13 sont à la limite de l'éblouissement (perte momentanée des facultés visuelles).

- pour la couleur :

. les feux n° 1 à 11, munis d'un filtre jaune, apparaissent blancs.

Les deux paramètres importants pour caractériser l'efficacité d'un feu à éclats semblent être son intensité effective et la fréquence des éclats. Il apparaît souhaitable de poursuivre des expérimentations visuelles pour déterminer les valeurs optimales des critères d'efficacité.

On peut déjà penser que des valeurs comprises entre 40 et 200 candélas pour l'intensité effective seront satisfaisantes et que des fréquences supérieures à 1 Hz sont souhaitables.

DEUXIEME PARTIE

LES DISPOSITIFS RÉTRORÉFLÉCHISSANTS

1. PRINCIPE DE LA RETROREFLEXION

Dans un milieu homogène et transparent comme l'air, la transmission de la lumière s'effectue en ligne droite. Au contact de surfaces, sa direction et sa nature peuvent être modifiées.

On peut distinguer trois types de réflexion :

- la réflexion spéculaire : c'est le cas d'un miroir, toute la lumière frappant celui-ci est réfléchié suivant un angle égal à l'angle d'incidence (figure 1.1.)

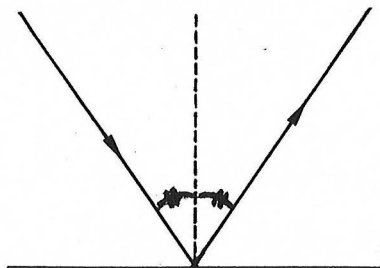


Figure 1.1. : Réflexion spéculaire

- la réflexion diffuse : dans ce cas, la lumière est renvoyée dans toutes les directions (figure 1.2.)

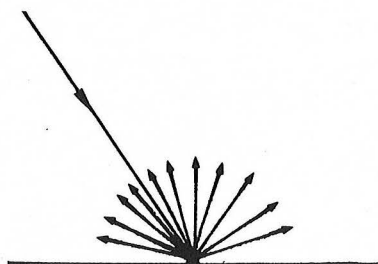


Figure 1.2. : Réflexion diffuse

- la rétroréflexion : la plus grande partie de la lumière est réfléchié dans des directions voisines de la direction incidente (figure 1.3.)

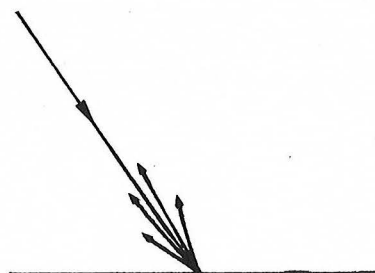


Figure 1.3. : Rétroréflexion

Dans des directions proches de la direction incidente, la quantité de lumière renvoyée par les matériaux rétroréfléchissants étant beaucoup plus importante que celle provenant, sous le même éclairage, des surfaces voisines diffusantes, la visibilité des rétroréfléchissants est largement accrue.

2. LES DIVERS TYPES DE DISPOSITIFS RETRO-REFLECHISSANTS

2.1. Les réflecteurs à trièdres trirectangles

La lumière incidente frappe successivement les trois surfaces réfléchissantes disposées perpendiculairement deux à deux (figure 2.1.) ; les trois réflexions successives renvoient la lumière parallèlement à sa direction d'origine.

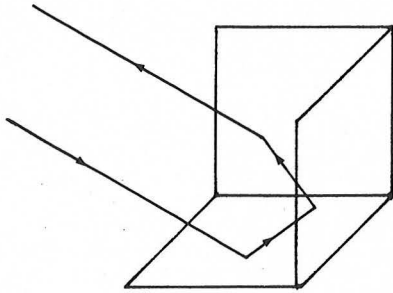


Figure 2.1. : Trièdre trirectangle

Les rétroreflecteurs sont composés d'un grand nombre de dispositifs élémentaires disposés les uns à côté des autres sur un support plan.

La plupart des catadioptrés utilisés en signalisation arrière des véhicules sont de ce type.

En signalisation routière, ils peuvent être utilisés comme dispositifs rétroreflectifs de délinéateurs et de plots.

Les délinéateurs sont des potelets fixés dans le sol ou sur des glissières de sécurité sur les accotements de la chaussée. Leur hauteur est d'un mètre au-dessus du sol et ils sont munis d'un dispositif rétroreflectif dont le centre est à 0,8 m au-dessus du sol.

Les plots sont des dispositifs collés sur la chaussée. Ils possèdent une surface rétroreflective et servent à matérialiser les voies de circulation.

2.2. Les réflecteurs du type lentille

Ils consistent en une lentille épaisse qui comporte deux surfaces sphériques concentriques, de rayons différents (figure 2.2.)

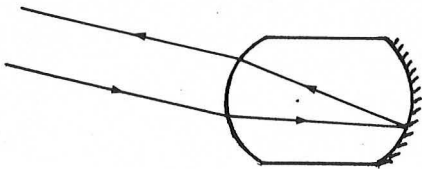


Figure 2.2. : Réflecteurs type lentille

La face arrière est métallisée et réfléchit la lumière de telle façon que, après une nouvelle réfraction sur la face avant, celle-ci reparte dans une direction à peu près parallèle à la direction incidente.

Ces réflecteurs peuvent être également utilisés dans les dispositifs rétroreflectifs de délinéateurs et de plots.

2.3. Les réflecteurs à sphères de verre

Une sphère de verre ne peut servir de réflecteur de type lentille qu'à condition d'avoir un indice de réfraction n égal à 2. Dans le cas de sphères à plus faible indice, on peut les assimiler à des lentilles convergentes dont le foyer est situé derrière la sphère (figure 2.3.). Pour qu'il y ait rétroreflexion, il faut placer une surface réfléchissante au lieu géométrique des foyers.

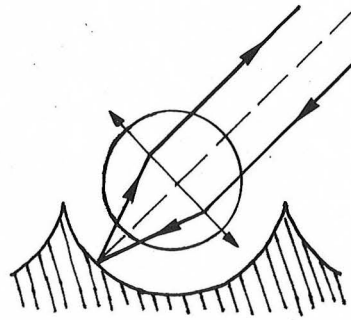


Figure 2.3. : Réflecteur à sphère de verre

Ce principe est utilisé dans les films rétroreflectifs pour la signalisation verticale. Le réflecteur est une mince pellicule d'aluminium et les microbilles de verre sont noyées dans une couche de résine transparente dont la coloration donne la couleur du film.

Ce principe est également utilisé pour rendre rétroreflectif le marquage au sol. Dans ce cas, la rétroreflexion se fait par réflexion diffuse de la lumière sur la surface de la peinture blanche au contact de la bille (figure 2.4.).

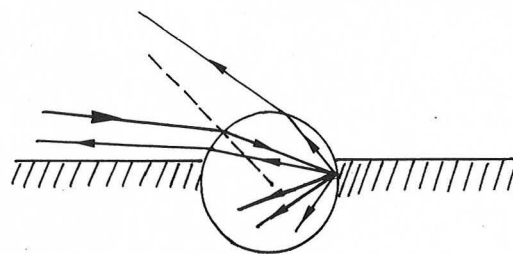


Figure 2.4. : Schéma de principe de la rétroreflexion du marquage au sol

3. CONDITIONS GEOMETRIQUES DE LA VISION DE NUIT DES SIGNAUX ROUTIERS

En vision de nuit, sous l'éclairage de projecteurs de véhicule, la quantité de lumière renvoyée en direction de l'observateur par les dispositifs rétro réfléchissants est fonction de plusieurs paramètres. En particulier, il faut tenir compte de la quantité de lumière en provenance des projecteurs, de la distance entre le véhicule et le signal, de la position de celui-ci dans le faisceau lumineux, des propriétés rétro réfléchissantes du dispositif.

On peut schématiser les conditions géométriques de vision des signaux par la figure 3.1.

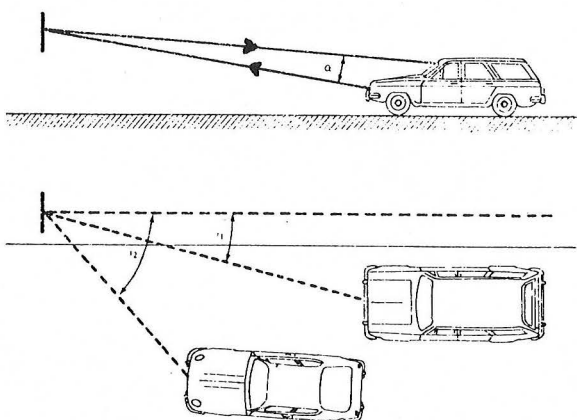


Figure 3.1. : Conditions géométriques de la vision de nuit de signaux routiers

Les propriétés rétro réfléchissantes des réflecteurs sont fonction de l'incidence de la lumière et de la position de l'observateur par rapport à la direction d'incidence.

Le pouvoir rétro réfléchissant doit donc être déterminé en fonction de l'angle d'incidence et de l'angle d'observation que fait la direction d'observation avec le rayon incident. On peut remarquer que, au fur et à mesure de l'approche du véhicule, ces angles varient.

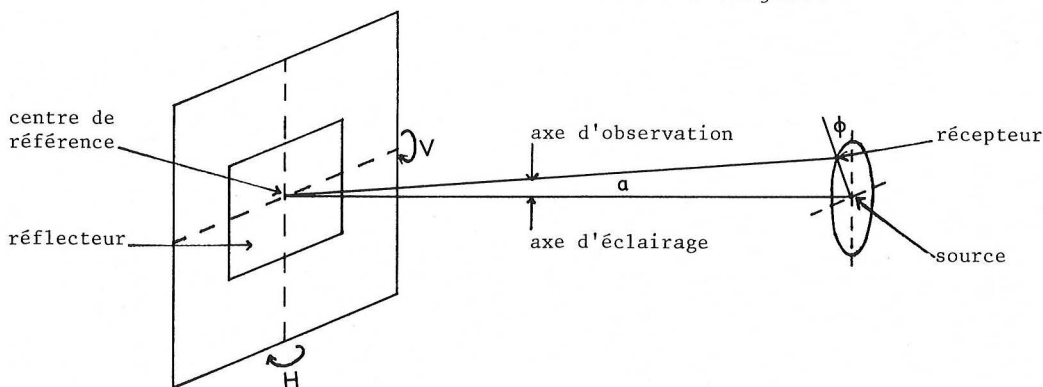


Figure 4.1. : Système local de référence angulaire

4. CARACTERISTIQUES PHOTOMETRIQUES ET METHODES DE MESURE DES DISPOSITIFS RETROREFLECHISSANTS

La quantité de lumière renvoyée, dans une direction, par un rétro réflecteur dépend de l'éclairement qu'il reçoit, de la direction de la lumière incidente et de la direction de mesure de la rétro réflexion. Avant de décrire les méthodes de mesure, il faut définir un système de repérage angulaire pour positionner les directions d'incidence et d'observation. Pour tenir compte des différentes cas de figure de l'implantation des rétro réflecteurs par rapport à la chaussée, on a choisi comme repérage le système dit "système local de référence angulaire" (figure 4.1.) défini avec les paramètres suivants :

- *axe de référence* : axe passant par le centre de référence du rétro réflecteur (centre de gravité de la plage lumineuse) et dirigé selon la verticale ascendante, le réflecteur étant installé dans sa position d'utilisation.

- *axe d'éclairage* : axe issu du centre de référence du rétro réflecteur passant par le centre de la source lumineuse éclairante et orienté vers celle-ci.

- *axe d'observation* : axe issu du centre de référence du rétro réflecteur passant par le centre du récepteur et orienté vers celui-ci.

- *plan d'origine* : plan s'appuyant sur l'axe de référence et la direction de déplacement de l'observateur.

- *angle de site (V)* : complément de l'angle de l'axe de référence et de l'axe d'éclairage.

- *angle azimutal (H)* : angle du demi-plan contenant l'axe de référence et l'axe d'éclairage avec le plan d'origine, ce dernier servant d'origine.

- *angle d'observation (alpha)* : angle de l'axe d'éclairage et de l'axe d'observation.

- *angle de réception (phi)* : angle des demi-plans s'appuyant sur l'axe d'éclairage et contenant respectivement l'axe d'observation et l'axe de référence, ce dernier demi-plan servant d'origine.

Les dimensions de la source, du récepteur et du réflecteur ont également une influence sur la mesure. Moerman [37] et Stephenson [38] ont étudié l'influence de ces paramètres sur la précision des mesures. La norme DIN 67520 [39] recommande les dimensions suivantes :

- angles d'ouverture du récepteur et de la source lumineuse à partir du centre du réflecteur inférieurs à 10',
- angle d'ouverture du réflecteur depuis le centre de la source lumineuse inférieur à 1°.

4.1. Coefficient d'intensité lumineuse

Quand les rétro-réflecteurs ont des petites dimensions (plots, délinéateurs), et sont observés à une distance grande par rapport à leurs dimensions, on peut les considérer comme des sources secondaires ponctuelles et les caractériser au point de vue photométrique par l'intensité lumineuse qu'ils émettent dans la direction d'observation. Cette intensité lumineuse est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par le réflecteur qui est caractérisée par l'éclairement produit au centre de référence dans le plan perpendiculaire à la direction d'éclairage. Le coefficient d'intensité lumineuse [26] (C.I.L.) est le rapport de cette intensité lumineuse à cet éclairement et s'exprime en candélas par lux (cd/lx).

Les mesures sont effectuées selon le schéma de principe représenté en figure 4.1.

La source est une lampe à incandescence aux halogènes dont l'alimentation stabilisée est ajustée pour que la température de couleur de la source corresponde à celle de l'illuminant A normalisé (2 856 K). L'optique de sortie du projecteur est un prisme à réflexion totale dont les dimensions sont 10 x 10 mm.

Le récepteur est une photodiode au silicium UDT PIN 10 AP corrigée en fonction du facteur d'efficacité lumineuse V_λ de l'observateur moyen défini par la C.I.E. La surface est un carré de dimensions 10 x 10 mm.

L'angle de réception ϕ est choisi égal à zéro, ce qui correspond aux conditions de conduite automobile.

L'angle d'observation α est déterminé par le positionnement du récepteur le long d'un axe vertical.

La distance d entre la source et le rétro-réflecteur est de 10 m. Les angles d'ouverture du récepteur et de la source depuis le centre du réflecteur sont inférieurs à 4'. Les plus grandes dimensions des rétro-réflecteurs étant inférieures à 10 cm, leur angle d'ouverture depuis le centre de la source est inférieur à 40'.

L'axe d'éclairage étant horizontal,

l'origine ($V = H = 0$) est déterminée en renvoyant l'image de la source sur elle-même à l'aide d'un miroir plan placé au centre de la platine du goniomètre.

La réponse du récepteur est mesurée avec un micro-ampèremètre.

La photodiode est d'abord placée au centre de référence du réflecteur, sa surface sensible étant orientée vers la source lumineuse dans le plan perpendiculaire à l'axe d'éclairage. La réponse du récepteur étant proportionnelle à l'éclairement qu'il reçoit, on a :

$$R_S = k E_S$$

Le rétro-réflecteur étant placé sur le goniomètre réglé selon les angles V et H voulus, on place la photodiode au-dessus de la source à une hauteur correspondant à l'angle de divergence désiré. On a également :

$$R_{ech} = k E_{ech}$$

E_{ech} étant l'éclairement fourni par le réflecteur dans le plan du récepteur.

Le C.I.L. est donné par :

$$C.I.L. = \frac{I}{E_S} = \frac{E_{ech} \times d^2}{E_S} = \frac{R_{ech}}{R_S} \cdot d^2$$

d étant la distance en mètre entre la source et le centre de référence du réflecteur.

4.2. Coefficient de rétro-réflexion

Dans le cas de réflecteurs de dimensions assez grandes (films rétro-réfléchissants par exemple), les mesures sont effectuées sur des échantillons de petites dimensions. On caractérise la rétro-réflexion de ces réflecteurs par leur coefficient de rétro-réflexion qui est le coefficient d'intensité lumineuse par unité de surface.

La méthode de mesure est la même que précédemment et on a :

$$C.R. = \frac{R_{ech}}{R_S} \cdot \frac{d^2}{A}$$

A étant la surface de l'échantillon mesurée en m^2 , le coefficient de rétro-réflexion est exprimé en $cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$.

4.3. Coefficient de luminance rétro-réfléchie

Pour des rétro-réflecteurs vus essentiellement comme des surfaces lumineuses, en particulier dans le cas du marquage au sol rétro-réfléchissant, le stimulus visuel est fonction de leur luminance L . Comme pour les autres réflecteurs, il faut tenir compte de l'éclairement reçu par la surface, mesuré dans le plan perpendiculaire à la direction de la lumière incidente.

Le coefficient de luminance rétro-réfléchi est le quotient $\frac{L}{E}$ exprimé en $(cd/m^2).lx^{-1}$.

Pour mesurer le coefficient de luminance rétro-réfléchi, on peut utiliser deux méthodes :

a) première méthode :

On peut mesurer le coefficient d'intensité lumineuse selon le schéma de principe représenté en figure 4.2.

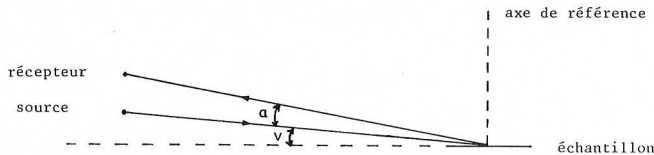


Figure 4.2. : Schéma de mesure du coefficient d'intensité lumineuse

La luminance de l'échantillon, dans la direction d'observation, est reliée à son intensité lumineuse dans cette direction et à sa surface apparente par la formule suivante :

$$L = \frac{I}{A \cos (90 - \nu - \alpha)}$$

I en cd, A en m^2 , L en cd/m^2 .

On peut calculer le coefficient de luminance rétro-réfléchi :

$$C.L.R = \frac{C.I.L}{A \cos (90 - \nu - \alpha)}$$

b) deuxième méthode :

On peut mesurer directement la luminance de l'échantillon en utilisant un luminancemètre comme récepteur et l'éclairage peut être mesuré avec un luxmètre.

Le champ de mesure du luminancemètre doit couvrir une surface intérieure à la surface de l'échantillon ; en général, le champ de mesure des luminancemètres est délimité par un diaphragme circulaire et la surface mesurée sur l'échantillon est une ellipse qui ne couvre qu'une fraction de la surface totale. Pour obtenir la luminance moyenne de l'échantillon, il faut faire la moyenne de plusieurs mesures en balayant la surface totale.

5. CARACTERISTIQUES COLORIMETRIQUES ET METHODES DE MESURE

5.1. Couleur en vision de jour

La couleur d'une surface peut être définie par ses coordonnées trichromatiques dans le système de référence colorimétrique C.I.E., 1931, ainsi que par le facteur de

luminance [24, 40, 41]. La couleur par réflexion dépend de la nature de la lumière éclairant la surface ainsi que des conditions d'éclairage et d'observation. Il est admis, au niveau international, de reproduire les conditions d'observation de jour par l'éclairage avec les illuminants normalisés C ou D.65 sous l'incidence de 45° , les mesures étant effectuées dans la direction normale à la surface.

Pour mesurer la couleur, on dispose de deux méthodes :

a) première méthode : colorimètres à filtres

Les mesures sont effectuées selon la géométrie représentée en figure 5.1.

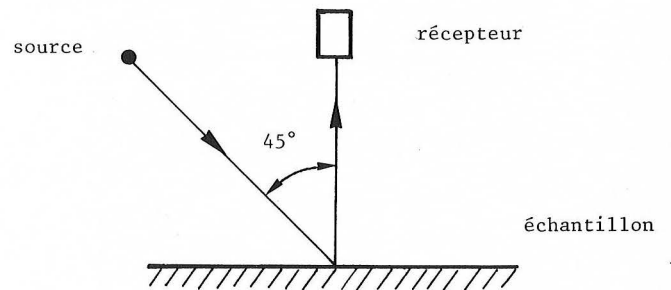


Figure 5.1. : Géométrie de mesure de la couleur de jour

La source correspond à l'illuminant C de température de couleur $T_C = 6774$ K.

Le récepteur est muni de trois filtres donnant respectivement les fonctions trichromatiques X, Y et Z, on en déduit les coordonnées trichromatiques x et y.

Le colorimètre étant calibré par rapport au blanc réfléchissant diffusant parfait dont la composante Y est normalisée à 100, le facteur de luminance de l'échantillon est :

$$\beta = \frac{Y}{100}$$

b) deuxième méthode : méthode spectrophotométrique

A l'aide d'un spectrophotomètre, on peut mesurer successivement, toutes les longueurs d'onde, les flux de radiations réfléchis par un blanc diffusant $F_x(\lambda)$ et par l'échantillon $F_{et}(\lambda)$ mesurés dans les mêmes conditions.

Le facteur spectral de luminance est alors :

$$\beta(\lambda) = \frac{F_x(\lambda)}{F_{et}(\lambda)}$$

On peut ensuite calculer, à un facteur près, les composantes trichromatiques :

$$X = \int \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{X}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda$$

$S(\lambda)$ étant la répartition spectrale relative d'énergie de l'illuminant choisi.

Le facteur de luminance est :

$$\beta = \frac{\int \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda}$$

5.2. Couleur en vision de nuit

La chromaticité en vision de nuit est différente de celle en vision de jour à cause des conditions d'éclairage et d'observation différentes et surtout de la différence de la nature de la lumière éclairant les surfaces. On peut mesurer la couleur de nuit dans des conditions géométriques identiques à celles de la mesure du coefficient d'intensité lumineuse avec l'illuminant A. On utilise la même méthode en remplaçant le récepteur photométrique par un monochromateur. On mesure successivement le flux de radiations $F_S(\lambda)$ émis par la source au centre de référence de l'échantillon, puis le flux de radiations $F_X(\lambda)$ émis par l'échantillon, dans la direction d'observation.

Le coefficient d'intensité lumineuse spectrale du rétroreflécteur est :

$$C(\lambda) = \frac{F_X(\lambda)}{F_S(\lambda)} \cdot d^2$$

On peut calculer les comportements trichromatiques :

$$X = \int C(\lambda) S(\lambda) \bar{X}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int C(\lambda) S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int C(\lambda) S(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda$$

$S(\lambda)$ étant la répartition spectrale relative d'énergie de l'illuminant A.

On peut également calculer le coefficient d'intensité lumineuse :

$$C.I.L = \frac{Y}{\int S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda}$$

6. MESURES SUR LES DIVERS DISPOSITIFS RETROREFLECHISSANTS

6.1. Marquages au sol rétrorefléchissants

Les marquages au sol (bandes blanches) sont rendus rétrorefléchissants par l'incorporation de micro-billes de verre. Leur efficacité, en vision de nuit sous l'éclairage

des projecteurs de véhicule, est fonction de leur coefficient de luminance rétrorefléchie.

6.1.1. Mesure de la rétroreflexion in situ

Les mesures sur la route peuvent être effectuées, dans les conditions réelles de circulation, à l'aide d'un luminancemètre portable. On peut installer un luminancemètre dans un véhicule à la place du passager avant ; en mesurant l'éclairage fourni par les projecteurs du véhicule sur la surface mesurée, on a directement le coefficient de luminance rétrorefléchie $\frac{L}{E}$ en $(cd/m^2) \cdot lx^{-1}$.

Ces mesures, devant être faites la nuit sur des routes en général ouvertes à la circulation, sont difficiles à réaliser ; en outre, elles ont l'inconvénient d'être peu précises à cause de la difficulté de maîtriser la géométrie et de l'influence possible de lumières parasites.

Les mesures peuvent être effectuées plus aisément à l'aide d'un rétrorefléctomètre Ecolux [42]. Cet appareil simule, à une échelle réduite, les conditions de visibilité de nuit (figure 6.1.).

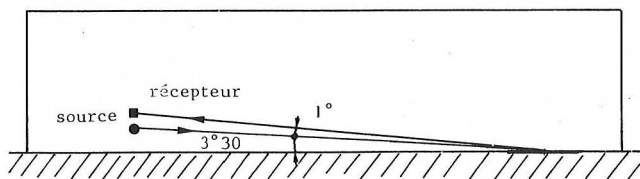


Figure 6.1. : Géométrie de mesure du rétrorefléctomètre Ecolux

La source projette sur la surface à mesurer, un rectangle de 10 x 8 cm, sous un angle $V = 3^{\circ}30'$. La rétroreflexion est mesurée, sous un angle d'observation de 1° , avec une cellule dont la réponse est lue sur un galvanomètre.

L'ensemble étant isolé de la lumière ambiante permet d'effectuer les mesures de jour.

Si on considère que la hauteur moyenne des projecteurs des véhicules est 0,7 m et la hauteur moyenne des yeux du conducteur est 1,2 m, la géométrie de mesure choisie correspond à une distance de 11,5 m entre la zone mesurée et l'avant du véhicule.

Le rétrorefléctomètre doit être calibré à partir d'étalons de rétroreflexion connue. Pour cela, on a mesuré des échantillons de marquage rétrorefléchissant, en laboratoire, dans les conditions géométriques identiques.

6.1.2. Mesure de la rétro réflexion en laboratoire

On mesure la rétro réflexion suivant les deux méthodes décrites précédemment avec la géométrie suivante : $H = 0^\circ$, $V = 3^\circ 30'$, $\alpha = 1^\circ$, $\phi = 0$.

La distance entre la source et l'échantillon est 10 m.

La source correspond à l'illuminant A.

Pour la première méthode, le récepteur est une photodiode au silicium UDT PIN 10 AP.

Pour la deuxième méthode, la luminance est mesurée avec un luminancemètre Pritchard et l'éclairement au niveau de l'échantillon est mesuré avec un luxmètre Hartmann et Braun EBLX 4.

On a effectué des mesures sur dix éprouvettes de 15 x 30 cm soigneusement réalisées en laboratoire sur support métallique.

Les résultats de mesures sont regroupés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1. : Coefficient de luminance rétro réfléchie en $(\text{mcd}/\text{m}^2) \cdot \text{lx}^{-1}$

N° Plaques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesures Cellule	110	161	153	127	187	339	339	263	68	314
Mesures avec luminancemètre	96	165	121	150	191	305	321	218	55	301

On a tracé (figure 6.2.) la droite de corrélation des résultats obtenus avec les deux méthodes.

Le coefficient de corrélation est $r = 0,98$ et l'équation de la droite est $y = 0,91 x + 4,2$.

La méthode de mesure avec la cellule présente l'avantage de pouvoir obtenir directement la rétro réflexion moyenne de toute la surface de l'échantillon. Elle a, par contre l'inconvénient d'être influencée par la lumière parasite réfléchie du fond sur lequel est placé l'échantillon. En outre,

la précision est affaiblie du fait que la quantité de lumière rétro réfléchie est très petite et qu'on travaille près du seuil de sensibilité de la cellule.

La deuxième méthode a l'avantage de ne pas être influencée par la lumière parasite mais nécessite plusieurs mesures sur le même échantillon pour estimer la rétro réflexion moyenne, celle-ci étant d'autant moins précise que l'échantillon est plus hétérogène. En outre, la précision de la mesure dépend de la précision du calibrage du luminancemètre et du luxmètre.

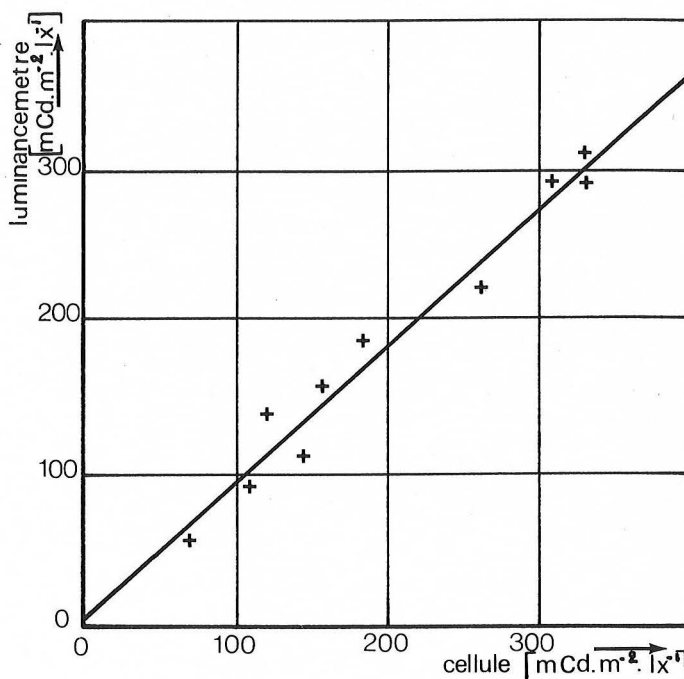


Figure 6.2. : Corrélation entre les deux méthodes de mesures en laboratoire du coefficient de luminance rétro réfléchie

6.2. Plots rétro réfléchissants

Les plots rétro réfléchissants sont utilisés pour remédier à la perte d'efficacité du marquage au sol lors de mauvaises conditions atmosphériques. En effet, si celui-ci est recouvert d'un film d'eau qui joue le rôle d'un miroir, la lumière est réfléchie selon les lois de la réflexion spéculaire (figure 6.3.). Les plots émergent du film d'eau et conservent leur efficacité.

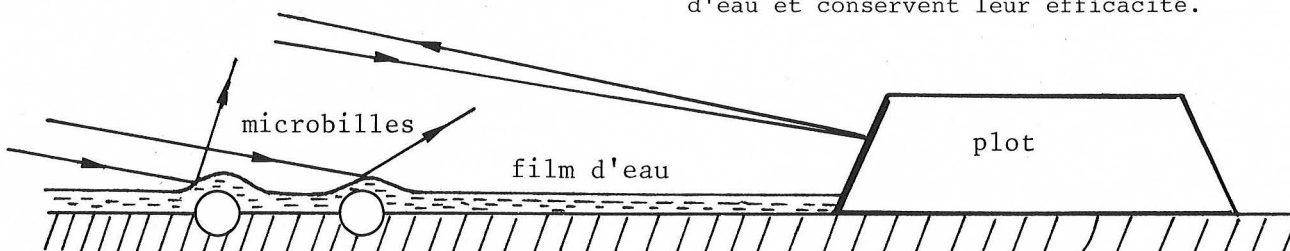


Figure 6.3. : Schéma de principe de la réflexion de la lumière sur le marquage recouvert d'un film d'eau

Il est prévu, en France, de n'utiliser que deux couleurs pour les plots :

- des plots blancs servant à matérialiser les voies de circulation
- des plots verts indiquant un changement de direction avec autorisation de franchir la ligne qu'ils matérialisent.

6.2.1. Mesure du coefficient d'intensité lumineuse en laboratoire

Les mesures sont effectuées selon le mode opératoire de mesure du C.I.L décrit précédemment. Pour chaque série de plots, les mesures sont faites sur dix échantillons dans les conditions géométriques définies dans la note technique provisoire pour l'homologation des plots rétro réfléchissants [43].

Les résultats regroupés dans les tableaux 6.2. et 6.3. correspondent à la moyenne des dix mesures.

Tableau 6.2.

Coefficient d'intensité lumineuse (mcd/lx) des plots blancs pour un angle d'observation $\alpha = 20'$

N° Plot	Incidence				
	V = 0° H = 0°	V = 0° H = 5°	V = 0° H = 15°	V = 0° H = 30°	V = 5° H = 0°
1	475	415	236	112	452
2	172	164	138	82	224
3	60	56	50	40	70
4	140	124	88	18	135
5	23	23	27	50	37
6	300	265	198	52	290
7	561	531	392	169	649
8	308	295	229	104	368

Tableau 6.3.

Coefficient d'intensité lumineuse (mcd/lx) des plots verts pour un angle d'observation $\alpha = 20'$

N° Plot	Incidence				
	V = 0° H = 0°	V = 0° H = 5°	V = 0° H = 15°	V = 0° H = 30°	V = 5° H = 0°
1	172	158	112	44	200
2	9,2	8,6	6,7	2,6	11
3	6,3	6,3	5,9	6,5	7,4
4	35	35	32	8	33
5	2,6	2,6	3,0	4,0	2,6
6	61	56	42	13	60
8	150	129	91	39	172

6.2.2. Mesure du coefficient d'intensité lumineuse in situ

Les caractéristiques photométriques des plots à l'état neuf ne sont pas suffisantes pour évaluer leur efficacité. En effet, en service, ils sont soumis à des contraintes importantes (passage des roues, pneus cloutés, salissures ...) qui peuvent faire évoluer rapidement leurs qualités. Pour étudier cette évolution, il faut tester les plots implantés dans des conditions réelles de circulation. Trois sites expérimentaux ont été choisis, correspondant à trois types de chaussées : béton bitumineux, enduit superficiel, ciment.

Les mesures sont effectuées dans les conditions suivantes.

Les plots sont éclairés par les projecteurs d'un véhicule (figure 6.4.), l'éclairage reçu par le plot est mesuré dans le plan perpendiculaire à la direction d'incidence, la quantité de lumière renvoyée par le plot est mesurée avec un luminancemètre monté dans le véhicule.

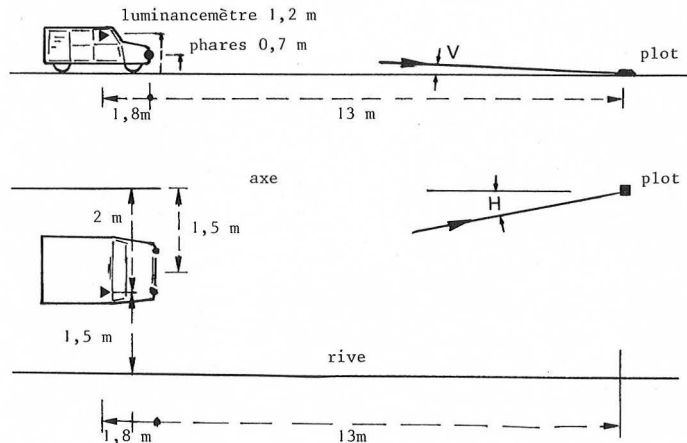


Figure 6.4. : Conditions géométriques de mesure de la rétro réflexion des plots in situ

Le champ de mesure du luminancemètre étant délimité par un diaphragme rectangulaire, la surface prise en compte est légèrement supérieure à la surface réfléchissante du plot. L'intensité lumineuse de la surface mesurée est $I_S = L.S$, S étant la surface apparente et L la luminance mesurée. On a également $I_S = I + I_1$, I étant l'intensité du plot et I_1 l'intensité de la surface prise en compte et extérieure à la surface rétro réfléchissante. I_1 étant négligeable devant I, l'intensité lumineuse du plot, dans la direction de mesure sera :

$$I = L S$$

I en cd, L en cd/m^2 , S en m^2

et le coefficient d'intensité lumineuse est :

$$C.I.L = \frac{I}{E}$$

Les angles correspondant à la géométrie de mesure sont :

- angle d'incidence $V \sim 2^{\circ}40'$ - $H \sim 6^{\circ}30'$

- angle d'observation $\alpha \sim 1^{\circ}20'$.

On a réalisé trois séries de mesures après 1, 4 et 8 mois d'implantation, avant et après nettoyage des plots. Ces mesures permettent de juger de l'évolution du C.I.L dans le temps et de l'influence des salissures.

A titre d'exemple, on a regroupé dans le tableau 6.4. les résultats correspondant à la moyenne de cinq plots implantés sur chaussée sur enduit superficiel. Le rapport S/P est le rapport

$$\frac{C.I.L \text{ du plot sale}}{C.I.L \text{ du plot nettoyé}}$$

les valeurs du C.I.L indiqués correspondent aux plots propres.

Tableau 6.4. :
Coefficient d'intensité lumineuse (en mcd/lx)
des plots blancs mesurés en situ

N° plot	Durée d'implantation	Durée d'implantation		
		1 mois	4 mois	8 mois
1	C.I.L.	4,7	3,4	2,7
	S/P	0,97	1,13	0,92
2	C.I.L.	4,1	3,6	3,0
	S/P	1,02	1,10	0,89
3	C.I.L.	1,8	2,0	1,45
	S/P	0,80	0,72	0,66
4	C.I.L.	2,1	2,0	1,7
	S/P	0,80	0,78	0,85
5	C.I.L.	1,1		1,4
	S/P	0,82		0,93
6	C.I.L.	2,3		1,1
	S/P	0,42		0,58
7	C.I.L.	2,0		1,7
	S/P	0,86		1,10
8	C.I.L.	0,42		0,68
	S/P	0,97		1,12

Les résultats du tableau 6.4. sont très différents de ceux du tableau 6.2., correspondant aux mesures en laboratoire. Ceci est dû aux conditions géométriques de mesures très différentes ; néanmoins, les mesures étant toujours effectuées dans les mêmes con-

tions, on peut comparer les plots entre eux et suivre leur évolution dans le temps. Certaines valeurs du rapport S/P sont supérieures à 1, ceci semble dû à la présence de condensation sur le réflecteur apportée par l'eau utilisée pour le nettoyage.

6.2.3. Mesure de la couleur en vision de nuit

Les mesures sont effectuées selon la géométrie suivante :

- angle d'incidence $V = H = 0^{\circ}$

- angle d'observation $\alpha = 20'$.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 6.5. pour les plots blancs et le tableau 6.6. pour les plots verts.

Tableau 6.5. :
Coordonnées trichromatiques des plots
blancs en vision de nuit

N° Plot	1	2	3	4	5	6	7	8
x	0,450	0,458	0,455	0,450	0,432	0,454	0,454	0,444
y	0,406	0,412	0,408	0,413	0,417	0,410	0,406	0,407

Tableau 6.6. :
Coordonnées trichromatiques des plots
verts en vision de nuit

N° Plot	1	2	3	4	5	6	8
x	0,292	0,146	0,227	0,298	0,268	0,160	0,232
y	0,485	0,615	0,495	0,490	0,570	0,514	0,519

Des domaines limites, pour les coordonnées trichromatiques, définis par les coordonnées des points d'intersection des droites limites, sont indiqués dans la note technique provisoire pour les plots rétroréfléchissants [43] et dans la norme BS 873 [44] de la British Standards Institution.

Les coordonnées des points définissant les domaines de couleur pour les plots blancs et verts sont regroupés dans le tableau 6.7.

Tableau 6.7. : Domaines de couleur
pour les plots blancs et verts

Couleur		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Blanc	x	0,440	0,480	0,451	0,409
	y	0,380	0,410	0,439	0,411
Vert	x	0,030	0,228	0,321	0,302
	y	0,385	0,351	0,493	0,692

On a représenté sur les figures 6.5. et 6.6. les domaines ainsi définis sur lesquels on a reporté les points correspondant aux coordonnées trichromatiques des plots mesurés.

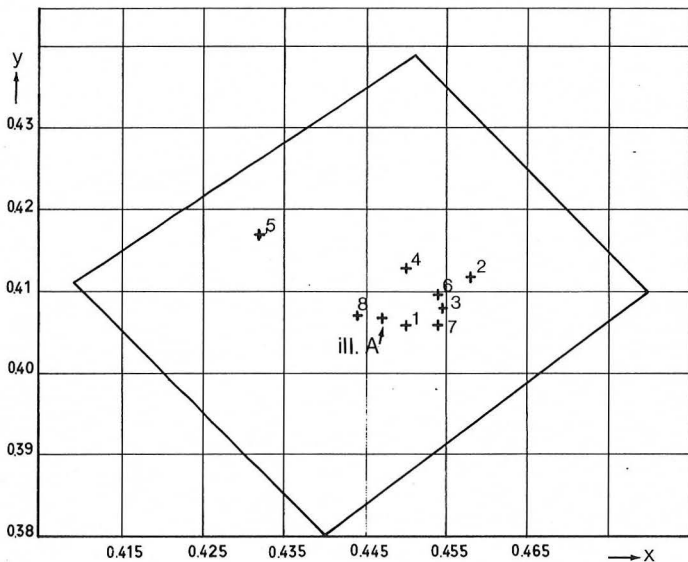


Figure 6.5. : Domaine de couleur et coordonnées trichromatiques des plots blancs

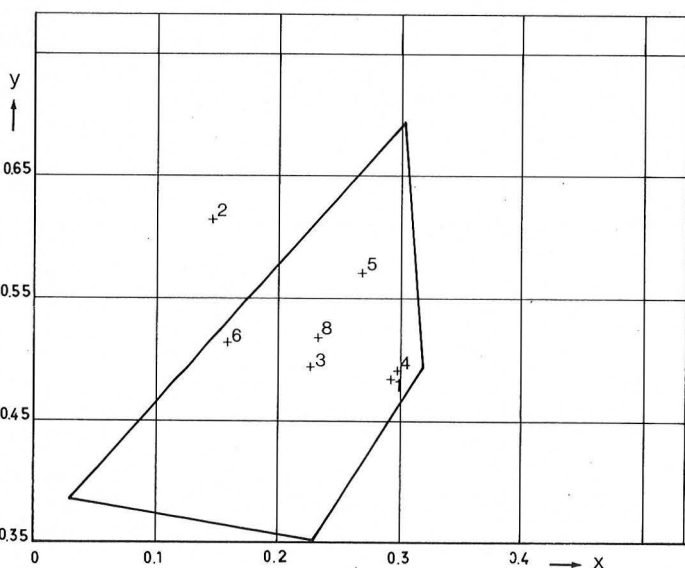


Figure 6.6. : Domaine de couleur et coordonnées trichromatiques des plots verts

6.3. Films rétro-réfléchissants

Les films rétro-réfléchissants se présentent sous forme de feuilles pouvant être appliquées sur un support. On a vu que l'on pouvait définir leurs caractéristiques photométriques par leur coefficient de rétro-réflexion.

6.3.1. Mesure du coefficient de rétro-réflexion

Actuellement, les caractéristiques photométriques des films rétro-réfléchissants sont spécifiées, tant au niveau international [41] qu'au niveau français [45], en termes de valeurs minimales du coefficient de rétro-réflexion pour différents angles d'éclairage et d'observation sans préciser l'angle de réception.

Il est apparu nécessaire d'étudier l'influence de cet angle de réception. Pour cette étude, on a mesuré des échantillons de films rétro-réfléchissants de différentes couleurs avec un angle de réception ϕ respectivement de 0° et 90° .

Les résultats regroupés dans le tableau 6.8. montrent des différences assez sensibles entre les valeurs mesurées pour $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 90^\circ$.

Tableau 6.8. :
C.I.L par unité de surface (en $\text{cd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
des films mesurés avec $\alpha = 20'$, $\nu = 0^\circ$
en fonction de H et ϕ

N° échantillon	H		5°	20°	30°	40°
	ϕ					
1 Blanc	0°	90°	238,8	228,8	206,8	153,1
	90°	0°	238,2	230,1	213,7	169,1
2 Jaune	0°	90°	122,2	121,8	111,2	77,7
	90°	0°	123,6	122,0	115,0	88,6
3 Rouge	0°	90°	35,1	33,8	27,9	19,2
	90°	0°	34,4	32,9	28,2	21,4
4 Bleu	0°	90°	20,1	16,8	12,5	8,4
	90°	0°	20,5	17,6	13,8	9,6
5 Vert	0°	90°	33,0	31,1	27,0	16,9
	90°	0°	32,3	31,5	29,0	21,5
6 Orange	0°	90°	70,5	67,0	58,6	41,2
	90°	0°	71,5	68,8	62,2	47,8
7 Blanc	0°	90°	78,6	61,1	40,9	20,7
	90°	0°	78,9	65,2	46,7	25,2
8 Jaune	0°	90°	55,3	43,3	30,2	16,9
	90°	0°	55,8	46,5	33,5	18,8
9 Rouge	0°	90°	17,7	12,6	7,0	2,6
	90°	0°	17,9	13,2	7,6	2,9
10 Bleu	0°	90°	9,0	7,1	5,0	2,9
	90°	0°	9,9	8,0	5,8	3,3
11 Vert	0°	90°	10,5	8,0	5,5	3,3
	90°	0°	10,9	8,2	6,0	3,8
12 Orange	0°	90°	31,8	24,0	15,0	7,2
	90°	0°	32,5	24,9	16,4	8,1

Il apparaît donc nécessaire de spécifier l'angle de réception avec lequel les mesures sont effectuées. Pour avoir des conditions géométriques de mesure proches des conditions géométriques d'utilisation réelle, l'angle de réception ϕ doit être choisi égal à 0° .

6.3.2. Mesure de la couleur en vision de nuit

Actuellement, il n'existe pas de spécifications pour la chromaticité des films rétro réfléchissants en vision de nuit. On peut penser que les coordonnées trichromatiques en vision de nuit seront très différentes de celles en vision de jour à cause de la différence des conditions géométriques d'éclairage et d'observation et surtout en raison de la différence de la composition spectrale de la lumière éclairant les surfaces.

Pour étudier l'évolution de la couleur de nuit par rapport à la couleur de jour, on a mesuré plusieurs échantillons de films de différentes couleurs (blanc, jaune, rouge et vert) pour les deux conditions de vision.

Les coordonnées trichromatiques en vision de jour sont déterminées par la méthode spectrophotométrique dans la géométrie 45/0

(éclairage à 45° et mesure perpendiculaire) avec l'illuminant D.65.

Les coordonnées trichromatiques en vision de nuit sont déterminées, pour l'angle d'observation $\alpha = 20'$, les angles d'éclairage $V = 0^\circ$ et $H = 5^\circ$ et l'angle de réception $\phi = 0^\circ$, avec l'illuminant A.

Sur les figures 6.7., 6.8., 6.9. et 6.10., où sont représentés les domaines de couleur en vision de jour recommandés par la C.I.E. [41], on a reporté les points représentatifs des coordonnées trichromatiques mesurés en vision de jour et en vision de nuit.

Les échantillons choisis pour les mesures recouvrant des zones assez larges des domaines de couleur en vision de jour, on peut avoir un aperçu de l'évolution des coordonnées trichromatiques en vision de nuit.

Il semble prématuré de définir des domaines précis de couleur en vision de nuit à cause d'une part, du nombre trop restreint de mesures et d'autre part, de la nécessité d'obtenir un accord entre différents laboratoires sur la méthode de mesures et sur leur précision.

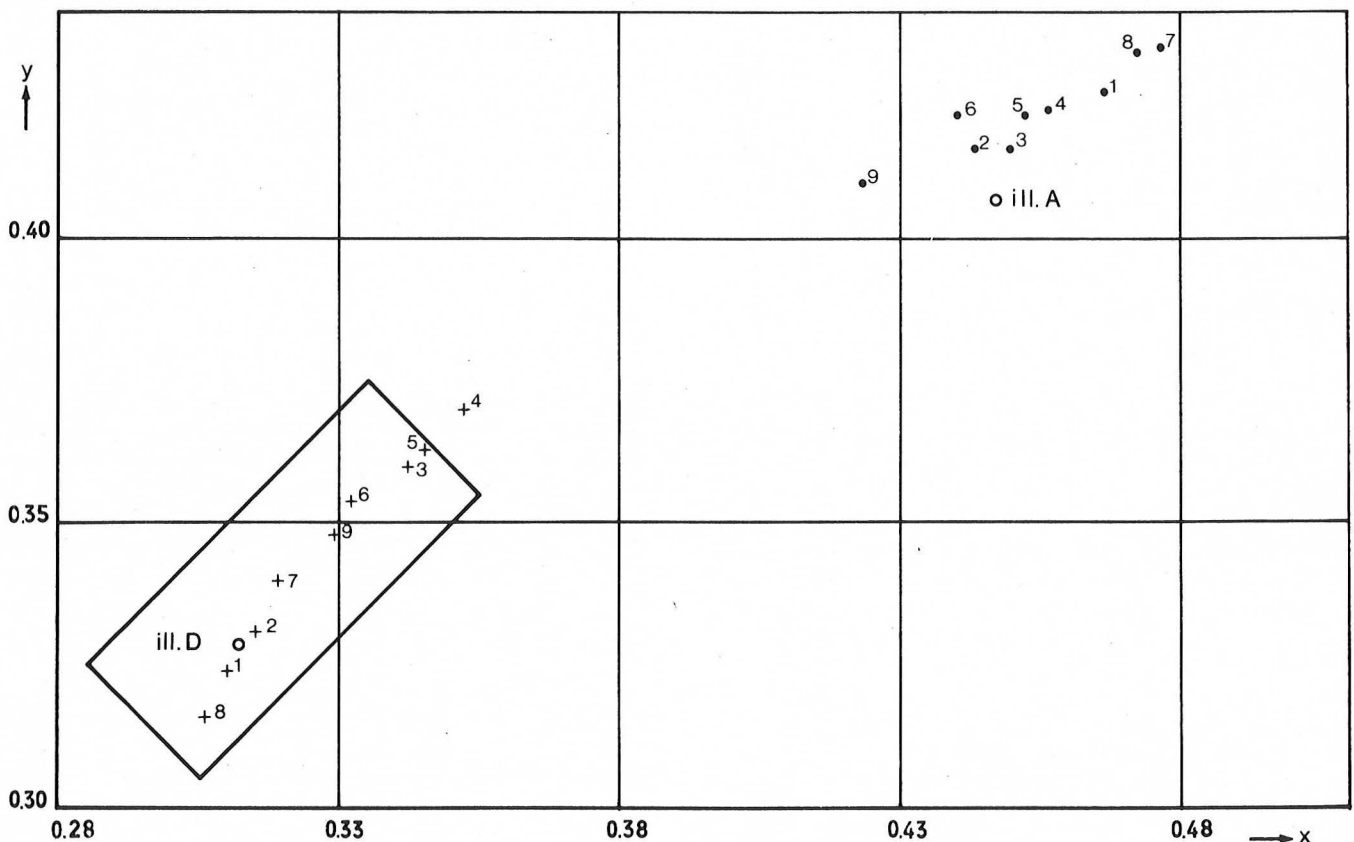


Figure 6.7. : Coordonnées trichromatiques des films blancs

+ vision de jour - • vision de nuit

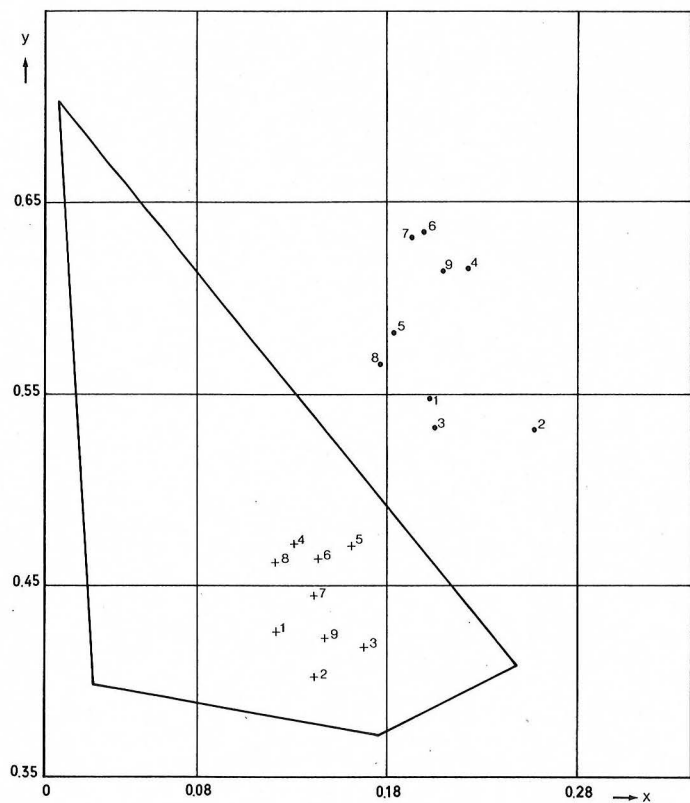


Figure 6.8. : Coordonnées trichromatiques des films verts
+ vision de jour - • vision de nuit

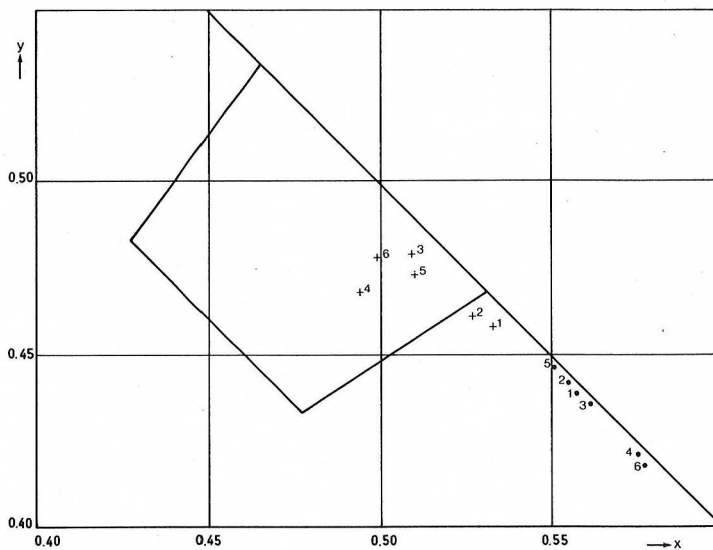


Figure 6.9. : Coordonnées trichromatiques des films jaunes
+ vision de jour - • vision de nuit

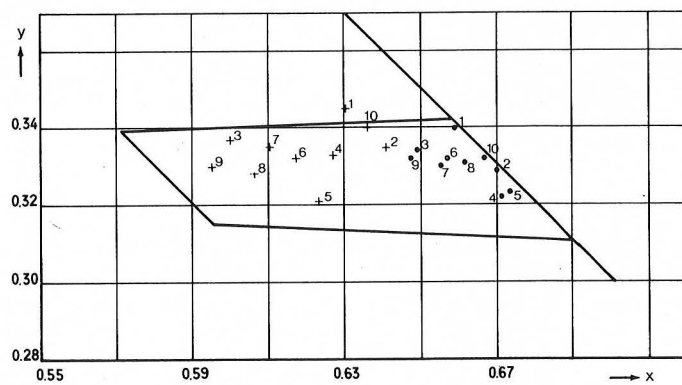


Figure 6.10. : Coordonnées trichromatiques des films rouges
+ vision de jour - • vision de nuit

7. APPORTS ET LIMITES DES MESURES POUR LA DETERMINATION DE L'EFFICACITE DES DISPOSITIFS RETROREFLECHISSANTS

L'efficacité des dispositifs rétrofléchissants dépend de leurs caractéristiques photométriques et colorimétriques qui évoluent plus ou moins rapidement sous l'influence du vieillissement, de l'usure mécanique, des salissures ...

L'éclairement reçu par les dispositifs et les conditions d'éclairage et d'observation varient au fur et à mesure de l'approche du véhicule et peuvent être différentes d'un véhicule à l'autre, aussi, la quantité de lumière renvoyée vers le conducteur sera extrêmement variable.

Les mesures de la rétroflexion peuvent néanmoins apporter des informations sur l'efficacité des rétroreflecteurs à condition que le choix des conditions géométriques de mesure corresponde aux conditions les plus courantes d'utilisation qui sont différentes selon les types de dispositifs ; en outre, on doit s'assurer de l'évolution dans le temps des caractéristiques photométriques et colorimétriques.

Pour les marquages au sol, leur application étant effectuée directement sur la chaussée, il apparaît assez difficile de prélever des échantillons représentatifs afin d'effectuer des mesures en laboratoire. Du fait de l'hétérogénéité de l'application, on ne pourra caractériser leur rétroflexion que par plusieurs mesures effectuées in situ. Le rétroreflectomètre Ecolux [42] paraît très bien adapté à ce type de mesures. Pour reproduire, à échelle réduite, les conditions réelles de vision, sa géométrie de mesure devrait correspondre à une distance d'observation minimale de 30 m correspondant à la portée théorique des feux de croisement des véhicules. On a choisi la géométrie de mesure ($V = 3^{\circ}30'$, $\alpha = 1^{\circ}$) correspondant à une distance plus courte (11,5 m) en raison de contraintes technologiques et pour pouvoir obtenir une bonne reproductibilité des mesures. En effet, à cause des dimensions réduites de la surface mesurée, en éclairage trop rasant, la mesure pourrait être influencée par la rugosité de la surface et ne pas être significative de la rétroflexion moyenne.

Pour les plots rétrofléchissants, on peut facilement effectuer, en laboratoire, des mesures de rétroflexion et de couleur en vision de nuit. Les angles choisis pour les mesures ne correspondent pas assez bien aux conditions réelles d'utilisation, en particulier, l'angle d'observation $\alpha = 20'$ correspond à une distance d'observation d'environ 90 m. Il serait préférable de prendre des géométries de mesure correspondant à des distances d'observation d'environ 10, 30 et 90 m ; on aurait respectivement les angles suivants :

$$\alpha = 2^{\circ} - V = 2^{\circ} \text{ et } H = 0^{\circ}, \pm 5^{\circ}, \pm 10^{\circ}, \pm 20^{\circ}$$

$$\alpha = 1^{\circ} - V = 1^{\circ} \text{ et } H = 0^{\circ}, \pm 5^{\circ}, \pm 10^{\circ}, \pm 20^{\circ}$$

$$\alpha = 20' - V = 0^{\circ} \text{ et } H = 0^{\circ}, \pm 5^{\circ}, \pm 10^{\circ}, \pm 20^{\circ}.$$

Les valeurs de l'angle H sont choisies de manière à tenir compte des différences d'orientation et des implantations des plots dans les parties courbes des chaussées.

Les mesures in situ ont permis d'étudier l'évolution dans le temps du C.I.L des plots et l'influence des salissures. Il apparaît intéressant de pouvoir effectuer ces mesures avec un appareil portatif, utilisable de jour ; aussi, on étudie actuellement la possibilité d'adapter un rétroreflectomètre Ecolux, pour ce type de mesures.

Pour les films rétrofléchissants, des recommandations au niveau de la C.I.E. sont établies pour leur couleur en vision de jour et pour leur rétroflexion. Ces recommandations sont applicables à l'état neuf et sont facilement vérifiables par des mesures en laboratoire. En service, sous l'influence du vieillissement et surtout des salissures, les films perdent de leur efficacité. De la même façon que pour les plots, il est intéressant de suivre l'évolution de leur rétroflexion par des mesures in situ ; pour cela, on conçoit actuellement un rétroreflectomètre portatif adapté à ce type de mesure et dont les angles de mesure sont : $V = 0^{\circ}$, $H = 5^{\circ}$, $\alpha = 20'$. La question qui reste à résoudre est de définir le niveau de rétroflexion à partir duquel les films rétrofléchissants doivent être considérés comme inefficaces pour l'automobiliste.

CONCLUSION

Cette étude avait pour but de contribuer à l'amélioration de l'efficacité des dispositifs de signalisation par une meilleure connaissance de leurs propriétés photométriques et colorimétriques. Deux catégories de dispositifs ont été étudiées : les feux de signalisation et les dispositifs rétroréfléchissants.

Pour les feux de signalisation tricolores, à partir d'études bibliographiques, des recommandations de la C.I.E. ou des spécifications étrangères et de la connaissance des dispositifs existants, on peut proposer, sur la base de nos travaux, des éléments pour l'élaboration future de spécifications de leur intensité lumineuse et de leur couleur.

Pour les feux à éclats, pour lesquels peu de travaux existent, on a mis au point une méthode de mesure permettant de déterminer la variation de leur intensité en fonction du temps et ainsi de pouvoir calculer leur intensité effective qui affecte leur efficacité. L'influence d'autres paramètres, tels que la durée et la fréquence des éclats, doit être étudiée avant de pouvoir proposer des spécifications pour leurs propriétés photométriques. Pour la couleur, on propose de la définir par la couleur du filtre mesurée avec l'illuminant C normalisé.

Pour les dispositifs rétroréfléchissants, pour lesquels des spécifications existent, après avoir décrit leur principe,

on définit les grandeurs pouvant caractériser leurs propriétés photométriques et colorimétriques ainsi que leurs méthodes de mesure.

Pour le marquage au sol, on a examiné l'utilisation d'un rétroréfléctomètre permettant d'effectuer des mesures in situ et on décrit deux méthodes de mesure sur échantillons en laboratoire pour l'étalonnage de cet appareil.

Pour les plots rétroréfléchissants, on propose, sur la base de nos expériences, des géométries de mesure correspondant aux conditions réelles d'utilisation.

Pour les films rétroréfléchissants, on précise la géométrie de mesure et on aborde le problème de la mesure de leur couleur en vision de nuit, problème qui ne sera résolu que lorsqu'un accord sera trouvé sur la méthode de mesure entre différents laboratoires.

Au cours de cette étude, on a abordé essentiellement l'aspect "mesures physiques". Pour déterminer les caractéristiques photométriques et colorimétriques souhaitables, à l'état neuf et en service, des divers types de dispositifs de signalisation, des études spécifiques sur le comportement de l'automobiliste doivent être réalisées en liaison avec l'environnement routier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ADRIAN W., Ueber die Sichtbarkeit von Strassenverkehr, Signalen, Lichttechnik, 15, 1963, pp. 115-118.
- [2] JAINSKI P., SCHMIDT-CLAUSEN J., Ueber den Einfluss der Schwellenleuchdichten auf das Erkennen farbiger Signallichter, Lichttechnik, 19, n° 1, 1967.
- [3] COLE B.L., BROWN B., A specification of road traffic signal light intensity, Human Factors, 10, n° 3, 1968.
- [4] FISHER A.J., The luminous intensity of a traffic signal necessary for its detection by peripheral vision, C.I.E., C.R. 17ème session, publication n° 21, 1971.
- [5] BOISSIN H., PAGES R., Détermination du seuil de perception des signaux routiers, C.I.E., C.R. 15ème session, publication n° 11 D, 1964.
- [6] HULSHER F.R., Photometric requirements for long range road traffic light signal, Aust. Road Res., 5, n° 7, 1975.
- [7] COLE B.F., BROWN B., A note on the effectiveness of surround screens for road traffic signal lights, Aust. Road Res., 2, n° 10, 1966.
- [8] JAINSKY P., SCHMIDT-CLAUSEN J., Ueber den Einfluss von Umfeld blenden auf das Erkennen farbiger signallichter, Lichttechnik, 19, n° 3, 1967.
- [9] ANON., Traffic signal lights. Comments to standard NEN 3322, Electrotechnick, 51, 1973, pp. 611-633.
- [10] ADRIAN W., Der Einfluss störender lichter auf die extrafoveale wahrnehmung des menschlichen auges, Lichttechnik, 13, 1961, pp. 450-454 et 558-562.
- [11] HOLLADAY L.L., Action of a light source in the field of view in lowering visibility, J. Opt. Soc. Am., 14, 1927, pp. 1-9.
- [12] STILES W.S., The effect of glare on brightness difference threshold, Proc. Roy. Soc., B 104, pp. 322-350.
- [13] Norme DIN 67527, Propriétés photométriques des signaux lumineux de circulation, Deutsche Normen, mars 1979.
- [14] Norme BS 505, Specification for road traffic signals, British standards Institution, 1971.
- [15] Norme NEN 3322, Road traffic control signals, photometric requirements and test methods, Nederlands Normalisatie Instituut, décembre 1973.
- [16] Cahier des charges type 400, partie 400 G.01, Installations de signalisation routière, Ministère des Travaux Publics Belge.
- [17] C.I.E., Couleurs des signaux lumineux, publication n° 2.2 (T.C. 1.6), 1975.
- [18] C.I.E., Light signals for road traffic control, publication n° 00 (T.C. 1.6), 1979.
- [19] LEGRAND Y., Optique physiologique, tome II, Lumière et couleurs, Paris, Masson 1972.
- [20] GROSSKURTH K., Phantom Erscheinungen an licht signalen, Lichttechnik, n° 2, 1957, pp. 62-65.
- [21] COHU M., Photométrie, Eclairage intérieur et extérieur, Paris, Masson 1966.
- [22] STIMSON A., Photometric and radiometry for engineers, New-York, John Wiley and Sons 1974.

- [23] Norme NF C.71-120, Méthodes recommandées pour la photométrie des lampes et des appareils d'éclairage, Union Technique de l'Electricité, 1970.
- [24] C.I.E., Colorimétrie, publication n° 15 (E-1.3.1), 1971.
- [25] WYSZECKI G., STILES W.S., Color science, Concepts and methods, quantitative data and formulas, New-York, John Wiley and Sons 1967.
- [26] C.I.E., Vocabulaire International de l'Eclairage, publication n° 17 (E-1.1), 1970.
- [27] Cours supérieur d'éclairage, Association Française de l'Eclairage, Paris.
- [28] BLAISE P., Développements concernant l'intensité effective des feux à éclats, Bulletin de l'A.I.S.M., n° 66, 1976.
- [29] HOLMES J.G., Terminology for flashing light signals, Lighting Research and Technology, 6, n° 1, 1974.
- [30] A.I.S.M., Recommandations pour la détermination de l'intensité lumineuse d'un feu de signalisation maritime, Bulletin de l'A.I.S.M., n° 75, 1978.
- [31] BLONDEL A., REY J., Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée, Journal de Physique, juillet-août 1911, pp. 530-555.
- [32] DOUGLAS C.A., Computation of the effective intensity of flashing lights, Illuminating Engineering, 52, n° 12, 1957, pp. 641-646.
- [33] BATES R., Perception of effective flashes produced by a scintillating xenon arc flash tube, The Perception and application of flashing lights, London, Adam Hilger LTD 1971, pp. 289-301.
- [34] SCHMIDT-CLAUSEN J., Ueber das wahrnehmen verschiedenartiger Lichtimpulse bei veränderlichen umfeldleuchtdichten, Lichttechnik, 21, n° 11, 1969, pp. 126-132.
- [35] ALLARD E., Mémoire sur l'intensité et la portée des phares, Imprimerie Nationale, Paris 1876, pp. 62-73.
- [36] Cahier des charges relatif à l'homologation des feux spéciaux pour véhicules, Arrêté du 1er décembre 1971, Journal Officiel, 29 décembre 1971, pp. 263-268.
- [37] MOERMAN J.J.B., Accuracy of photometry of retroreflectors and retroreflective materials, Lighting Research and Technology, 9, n° 2, 1977, pp. 85-92.
- [38] STEPHENSON H.F., The colorimetric measurement of retroreflecting materials, Progress report on international interchange tests, C.I.E., C.R. 18ème session, publication n° 36, 1976, pp. 595-609.
- [39] Norme DIN 67520, Matériaux réfléchissants pour la sécurité routière, Evaluation photométrique, mesure et classification, Deutsche Normen, avril 1971.
- [40] C.I.E., Caractéristiques radiométriques et photométriques des matériaux et leur mesure, publication n° 38 (T.C. 2.3), 1977.
- [41] C.I.E., Couleurs de surface pour signalisation visuelle, publication n° 39 (T.C. 1.6), 1978.
- [42] Avant-projet de mode opératoire : Le Rétroreflectomètre Ecolux, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, mai 1978.
- [43] Note technique provisoire : modalités d'homologation des plots rétro réfléchissants, Ministère des Transports, 17 avril 1979.
- [44] Norme BS 873 : Part. 4, Specification for the construction of road traffic signs and internally illuminated bollards, part. 4 : Road studs, British standard Institution, 1973.
- [45] Arrêté du 15 mars 1973 relatif à l'homologation des revêtements rétro réfléchissants destinés à la signalisation verticale, Journal Officiel, 9 mai 1973, pp. 5160-5162.

GLOSSAIRE

Champ visuel : étendue angulaire des directions de l'espace dans laquelle un objet peut être perçu lorsque la tête et l'oeil sont immobiles. Le champ peut être monoculaire ou binoculaire.

Flux énergétique : puissance émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement.

Flux lumineux : grandeur dérivée du flux énergétique par l'évaluation du rayonnement d'après son action sur un récepteur sélectif dont la sensibilité spectrale est définie par le facteur d'efficacité lumineuse relative.

Le flux lumineux est rattaché au flux énergétique par la relation :

$$\phi_v = K_m \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

dans laquelle $\frac{d\phi_e}{d\lambda} \cdot d\lambda$ est le flux énergétique correspondant aux radiations comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$, et K_m est l'efficacité lumineuse spectrale maximale.

En vision photopique, on a $K_m = 680 \text{ lm.w}^{-1}$ pour la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$.

L'unité de flux lumineux est le lumen (lm).

Facteur d'efficacité lumineuse relative V_λ :

L'oeil humain est un récepteur sélectif, c'est à dire qu'à énergie égale toutes les radiations ne produisent pas la même sensation sur l'oeil. La Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E), à la suite de mesures effectuées sur un grand nombre d'observateurs humains, a établi, en 1931, une fonction $V(\lambda)$ qui définit pour chaque longueur d'onde, le rapport entre les unités photométriques et les unités radiométriques.

Lumen : flux lumineux émis dans l'angle solide unité (1 stéradian) par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 candéla.

Intensité lumineuse : l'intensité lumineuse d'une source dans une direction est le quotient du flux lumineux quittant la source et se propageant dans un élément d'angle solide contenant la direction, par cet élément d'angle solide :

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

L'unité d'intensité lumineuse est la candéla (cd).

Candéla : intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de $1/600\,000$ mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de $101\,325$ newtons par mètre carré.

La 16ème Conférence des Poids et Mesures en a récemment donné une nouvelle définition (Octobre 1979) :

"La candéla est l'intensité lumineuse dans une direction donnée d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ watt.stéradian⁻¹".

Luminance : la luminance dans une direction, en un point de la surface d'une source est le quotient du flux lumineux quittant un élément de surface en ce point et se propageant dans des directions définies par un cône élémentaire contenant la direction donnée, par le produit de l'angle solide du cône et de l'aire de la projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à la direction donnée :

$$I = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$$

L'unité de luminance est le candéla par mètre carré (cd.m⁻²).

Eclairement : quotient du flux lumineux reçu par un élément de la surface contenant le point, par l'aire de cet élément :

$$E = \frac{d\phi}{dA}$$

L'unité d'éclairement est le lux (lx).

Lux : éclairement produit par un flux lumineux de 1 lumen uniformément réparti sur une surface dont l'aire est de 1 mètre carré :

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm.m}^{-2}.$$

Température de couleur : température à laquelle il faudrait porter le corps noir pour obtenir une répartition spectrale équivalente à celle de la source considérée.

Corps noir : le corps noir est un dispositif théorique qui aurait la propriété d'absorber 100 % de l'énergie lumineuse qui lui serait appliquée ou de rayonner sous forme lumineuse la totalité de l'énergie calorifique à laquelle il serait soumis. La répartition spectrale de l'énergie émise par le corps noir à une température donnée peut être calculée à partir de la relation de Planck :

$$W(\lambda, T)d\lambda = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1}$$

donnant la puissance émise sur une longueur d'onde λ dans une largeur de bande $d\lambda$ pour la température absolue T , C_1 et C_2 sont des constantes.

Illuminant : rayonnement de répartition spectrale relative d'énergie définie dans le domaine des longueurs d'onde capables d'influencer la vision.

Les trois illuminants définis par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E) et habituellement utilisés sont :

Illuminant A, représentant le corps noir à la température de couleur
 $T = 2856 \text{ K}$

Illuminant C, représentant la lumière du jour avec une température de couleur $T = 6774 \text{ K}$

Illuminant D_{65} , représentant la lumière du jour avec une température de couleur $T = 6504 \text{ K}$.

abstract

IMPROVEMENT OF THE DAY AND NIGHT VISIBILITY OF ROAD SIGNALS : APPLICATIONS OF PHOTOMETRY AND COLORIMETRY

This report makes a contribution to the knowledge of the efficacy of signals through a better approach to their photometric and colorimetric properties. Flashing lights and traffic lights, together with retroreflector systems, are examined.

The luminous intensity, colour, and phantom effect of the different types of traffic lights used in France were measured. On the basis of a bibliographical analysis of the visual efficacy of these lights and a comparison of the results of measurements with the draft recommendations of the International Lighting Commission, elements for the establishment of future specifications are proposed.

With regard to flashing lights, a method of measurement has been developed making it possible to determine their variation in luminous intensity over a period of time, for flashing lights with a duration of around 100 μ s. Their effective luminous intensity can then be calculated by the Blondel-Rey method. Their colour is defined by the tri-chromatic co-ordinates of the filter, measured with the standardized illuminant C.

Among reflector systems, carriageway markings, studs and retroreflecting films were more especially studied. The magnitudes characterizing their photometric and colorimetric characteristics are defined, together with laboratory methods of measuring them.

zusammenfassung

VERBESSERUNG DER SICHTBARKEIT DER STRASSENSIGNALANLAGEN BEI TAG UND BEI NACHT. ANWENDUNG DER LICHTSTÄRKEN- UND FARBMESSUNG

Dieser Bericht trägt zur Erforschung der Wirksamkeit der Signalanlagen durch eine bessere Erfassung ihrer photo- und kolorimetrischen Eigenschaften bei. In dieser Studie werden Lichtzeichen (Dreifarbenampeln und Blitzfeuer) und retroreflektierende Mittel untersucht.

An den verschiedenen in Frankreich verwendeten Dreifarbenampeln wurden Messungen der Lichtstärke, Farbe und Phantomscheinungen durchgeführt. Ausgehend von einer bibliographischen Analyse über die visuelle Wirksamkeit der Lichtzeichen und dem Vergleich der Messergebnisse mit den Empfehlungsentwürfen der Internationalen Beleuchtungskommission werden Grundlagen zur Erarbeitung zukünftiger Vorschriften vorgeschlagen.

Für die Blitzfeuer wurde eine Messmethode erarbeitet mit deren Hilfe die Schwankung der Lichtstärke abhängig von der Zeitdauer der Lichtblitze - etwa 100 μ s - bestimmt werden kann. Dadurch kann ihre effektive Lichtstärke mittels der Blondel-Rey-Methode ermittelt werden. Durch die mit der Normlichtart C gemessenen Farbwertanteile des Filters wird ebenfalls ihre Farbe bestimmt.

Unter den retroreflektierenden Mitteln wurden insbesondere die Fahrbahnmarkierung, sowie die retroreflektierenden Markierungsknöpfe und Folien untersucht. Es werden Größen definiert, welche die photo- und kolorimetrischen Eigenschaften dieser Anlagen kennzeichnen können, sowie die im Laboratorium angewandten Messmethoden.

resumen

MEJORAMIENTO DE LA VISIBILIDAD DE LA SEÑALIZACIÓN VIAL, DIURNA Y NOCTURNA. APLICACIONES DE LA FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA

Se brinda con este informe una contribución para conocer la eficacia de los dispositivos de señalización mediante una aproximación mejor de sus propiedades fotométricas y colorimétricas. Se examinan en este estudio las luces de señalización (luces tricolores y luces de destellos) y los dispositivos retrorreflexionantes.

Se midió la intensidad luminosa, el color y el efecto fantasma de los distintos tipos de luces tricolores empleadas en Francia. En base al análisis bibliográfico sobre la eficacia visual de las luces y a la comparación de los resultados de mediciones con los proyectos de recomendaciones de la Comisión Internacional del Alumbrado, se proponen elementos para elaborar futuras especificaciones.

Para las luces de destellos, se elaboró un método de medición que permite determinar la variación de su intensidad luminosa en función del tiempo destellos cuya duración es del orden de 100 μ s. Se puede entonces calcular su intensidad luminosa efectiva con el método de Blondel-Rey. También se define su color mediante las coordenadas tricromáticas del filtro, medidas con el iluminante C normalizado.

Entre los dispositivos retrorreflexionantes, se estudiaron más especialmente las marcas en el suelo, los hitos y los filmes retrorreflexionantes. Se definieron las magnitudes que pueden caracterizar las propiedades fotométricas y colorimétricas de los referidos equipos así como sus métodos de medición en laboratorio.

резюме

УЛУЧШЕНИЕ ДНЕВНОЙ И НОЧНОЙ ВИДИМОСТИ ДОРОЖНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОМЕТРИИ И КОЛОРИМЕТРИИ

В отчёте рассмотрен вопрос эффективности средств дорожной сигнализации путём улучшения исследования их фотометрических и колориметрических свойств. В работе изучены светофоры (трёхцветные и быстро мигающие), также как и обратно отражающие устройства.

Измерялись сила света, цвет и ложная светимость различных светофоров, применяемых во Франции. Основываясь на библиографическом исследовании визуального эффекта светофоров и сравнении результатов измерений с проектными рекомендациями Международной комиссии по освещению, предложены некоторые данные для разработки будущих требований.

Для быстро мигающих световых сигналов разработан метод измерения, который позволяет определить изменение во времени их световой интенсивности для вспышек длительностью примерно в 100 микросекунд. Метод Блондель-Рей позволяет тогда вычислить действительную интенсивность освещения. Определяется также их цвет трёххроматическими координатами фильтра, измеряемыми с помощью стандартного светильника C.

Среди обратно отражающих устройств особо исследовались горизонтальная разметка краской, площадки и обратно отражающие плёнки. Дано определение величин, которые могут характеризовать фотометрические и колориметрические свойства этих устройств, также как и соответствующие методы их измерения в лаборатории.

**RAPPORTS DE RECHERCHE
DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES**

publiés par le LCPC

- | | |
|---|--|
| <p>1 Recherche sur l'évolution des propriétés des matériaux alluvionnaires dans un bassin et mise en évidence de quelques caractéristiques générales, L. Primel (1969) — AR 04 : Reconnaissance des tracés et sites.</p> <p>2 * Application de la spectrométrie infrarouge à l'étude des argiles et ciments hydratés, A. Baron (1969) — AR 63 : Méthodes chimiques et physico-chimiques.</p> <p>3 Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques, J. Baron et R. Lesage (1969) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> <p>4 * La résistance à la traction des roches, C. Tourenq et A. Denis (1970) — AR 09 : Mécanique des roches et ouvrages souterrains.</p> <p>5 * Mesure des teneurs en eau des sols par les méthodes électriques - Étude d'une méthode capacitive, Tran Ngoc Lan, P. Chaigne et A. Philippe (1970) — AR 03 : Terrassements.</p> <p>6 La gélivité des roches — Application aux granulats C. Tourenq (1970) — AR 35 : Granulats.</p> <p>7 Corrélation entre frottement longitudinal roue bloquée et frottement transversal à dérive élevée, B. Torchet et B. Lajoinie (1970) — AR 02 : Confort et sécurité de la circulation (en relation avec la glissance et l'uni des chaussées).</p> <p>8 * La méthode des éléments finis et ses applications aux problèmes de génie civil, P. Guellec (1970) — AR 09 : Mécanique des roches et ouvrages souterrains.</p> <p>9 Interprétation des vibrations de surface sur les structures routières, R. Guillemin (1970) — AR 01 : Dimensionnement des chaussées.</p> <p>10 * Remblais sur sols compressibles - Synthèses des recherches effectuées dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées, F. Bourges (1970) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>11 * Calcul des écoulements en milieu poreux par la méthode des éléments finis, P. Guellec (1970) — AR 09 : Mécanique des roches et ouvrages souterrains.</p> <p>12 Chaussées en béton - Constatations 1966-1967-1968, Groupe de travail LCPC-LR (1970) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> <p>13 * Consolidation d'un sol sous charge variable - Théorie - Vérification en laboratoire, M. Peignaud (1971) — AR 05 : Fondations des ouvrages.</p> <p>14 * Étude de la pression interstitielle, H. Josseaume (1971) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>15 Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment, J. Baron (1971) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> <p>16 Identification et dosage des différents sucres présents dans les plastifiants réducteurs d'eau, C. Laval et F. Durrieu (1971) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> <p>17 * Étude de la terre armée à l'appareil triaxial, Nguyen Thanh Long, Y. Guégan et G. Legeay (1972) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>18 Contribution à l'étude de la dilatation thermique des bétons, Mahmoudzadeh-Rahimi (1972) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> <p>19 Élaboration de liants goudrons époxydes pour enrobés à hautes performances mécaniques, G. Brun (1972) — AR 33 : Liants hydrocarbonés et enrobés.</p> | <p>20 Machines foreuses pour tunnels et galeries - Techniques et bases théoriques de l'abattage mécanique des roches, D. Fourmaintraux (1972) — AR 09 : Mécanique des roches et ouvrages souterrains.</p> <p>21 Influence des gradients de pression interstitielle sur les résultats de l'essai triaxial, H. Josseaume (1972) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>22 Mesure des pressions derrière et sous un mur de soutènement, J.-P. Levillain (1973) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>23 Étude sur la perméabilité des sols fins mesurée en laboratoire, S. Amar et H. Dupuy (1973) — AR 05 : Fondations des ouvrages.</p> <p>24 Compactage des terrassements - Efficacité en profondeur de trois rouleaux vibrants, P. Chaigne, E. Leflaive, J. Oczkowski, R. Franceschina, G. Morel et A. Quibel (1973) — AR 03 : Terrassements.</p> <p>25 Remblais sur sols mous équipés de banquettes latérales - Élaboration des abaques de stabilité, G. Pilot et M. Moreau (1973) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>26 * Étude des voûtes en terre armée, C. Behnia (1973) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>27 Contribution à l'étude de la cohésion dans une pâte de laitier granulé, Ph. Petit (1973) — AR 63 : Méthodes chimiques et physico-chimiques.</p> <p>28 * La stabilité des ouvrages souterrains - Soutènement et revêtement, M. Panet (1973) — AR 09 : Mécanique des roches et ouvrages souterrains.</p> <p>29 Calcul des contraintes dans un massif d'épaisseur limitée soumis à une charge trapézoïdale, B. Mandagaran (1973) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>30 Étude des murs en terre armée sur modèles réduits bidimensionnels, Nguyen Than Long, F. Schlosser, Y. Guégan et G. Legeay (1973) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>31 Études sur l'uni des revêtements routiers et le confort du véhicule automobile, M. Abrache (1974) — AR 02 : Confort et sécurité de la circulation (en relation avec la glissance et l'uni des chaussées).</p> <p>32 Dispositif d'enregistrement adaptable à l'essai de classement des sols selon leur degré de gélivité, J.-C. Laporte (1974) — AR 01 : Dimensionnement des chaussées.</p> <p>33 Compactage des terrassements - Compactage en grande épaisseur au moyen de rouleaux à cylindres vibrants lourds et d'un compacteur à pneu lourd, P. Chaigne, R. Franceschina, G. Morel, J. Oczkowski et A. Quibel (1974) — AR 03 : Terrassements.</p> <p>34 Auscultation dynamique des superstructures par les méthodes classiques, G. Cannard, J. Carracilli, J. Prost et Y. Vénéec (1974) — AR 62 : Auscultation des ouvrages d'art.</p> <p>35 Étude du mécanisme de modification des propriétés des bétons, mortiers et coulis hydrauliques par addition de résines thermodurcissables, A.-M. Paillère (1974) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> <p>36 Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire, P. Raulin, G. Rouquès et A. Toubol (1974) — AR 06 : Ouvrages en terre.</p> <p>37 Étude expérimentale de la mise en place du béton frais, R. Lesage (1974) — AR 31 : Bétons et liants hydrauliques.</p> |
|---|--|

* Épuisé.

- 38 Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline, R. Dron (1974) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 39 Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques, R. Sierra (1974) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 40 Étude expérimentale de la compatibilité de résines époxydes avec le bitume - Application à la prévision de systèmes compatibles, C. Laval et B. Brûlé (1974) — AR 63 : *Méthodes physiques et physico-chimiques*.
- 41 * Étude d'un remblai sur tourbe à Caen, J. Vautrain (1975) — AR 06 : *Ouvrages en terre*.
- 42 Étude théorique et expérimentale de la préparation d'une résine époxyde compatible avec le bitume, B. Brûlé et C. Laval (1975) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 43 * Redistribution des effets hyperstatiques des ponts en béton précontraint par fluage linéaire, M.-Y. Lau (1975) — AR 10 : *Ponts en béton précontraint*.
- 44 * Étude des massifs à comportement non linéaire - Applications aux problèmes de génie civil, A. Ricard (1975) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains*.
- 45 Évolution sur route de liants et d'enrobés bitumineux - Étude de laboratoire sur prélèvements, Doan Tu Ho, A. Grignard et P. Ugé (1975) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés*.
- 46 Étude théorique du comportement des pieux sous charge verticale - Introduction de la dilatance, R. Frank (1975) — AR 05 : *Fondations des ouvrages*.
- 47 * Consolidation d'un sol avec drains verticaux sous charge variable, D. Chaput et G. Thomann (1975) — AR 06 : *Ouvrages en terre*.
- 48 Centrifugation de modèles réduits d'ouvrages en terre et de fondations, G. Pilot (1975) — AR 06 : *Ouvrages en terre*.
- 49 Influence des matières minérales en suspension sur la qualité des eaux de surface, D. Robbe (1975) — AR 67 : *Eau*.
- 50 Étude expérimentale des phénomènes différés dans les ouvrages en béton précontraint, M. Diruy (1975) — AR 10 : *Ponts en béton précontraint*.
- 51 Les meulières du sud de la région parisienne, J. Prévot (1975) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites*.
- 52 * Étude hydrogéologique des formations de pente de la butte d'Amance, M. Livet (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites*.
- 53 * Étude de mortiers de résine pour revêtements superficiels routiers, A. Denis (1976) — AR 35 : *Granulats*.
- 54 Utilisation des textiles non-tissés pour le drainage - Application aux remblais de sols fins en cours de consolidation, M. Bourdillon (1976) — AR 03 : *Terrassements*.
- 55 Étude lithologique du calcaire de Saint-Ouen dans la région parisienne - Quelques conséquences d'ordre géotechnique, B. Caron (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites*.
- 56 Dalles orthotropes, M.-Y. Lau (1976) — AR 11 : *Ponts métalliques et ponts mixtes*.
- 57 Méthodes de contrôle de la pollution des eaux - Utilisation des électrodes spécifiques, M. Cathelain (1976) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 58 Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux, S. Soliman (1976) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés*.
- 59 Interprétation de l'efficacité des compacteurs vibrants, J.-M. Machet (1976) — AR 03 : *Terrassements et AR 34 : Assises traitées*.
- 60 Étude des mortiers des graves traitées aux liants hydrauliques et aux liants mixtes en vue de la réduction de leur fissuration de retrait, Y. Toklu (1976) — AR 34 : *Assises traitées*.
- 61 Les roches granitiques et leur altération - Reconnaissance géotechnique de tracés en Bretagne, G. Chevassu (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites*.
- 62 Revêtement en béton de liants hydrocarbonés modifiés - Étude de laboratoire, J.-P. Grimaux, A. Grignard et M. Huet (1976) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés*.
- 63 Compactage des graves-bitume au moyen de rouleaux vibrants, J.-M. Machet, G. Morel et J.-C. Valeux (1976) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés*.
- 64 La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, J. Baron et R. Lesage (1976) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques*.
- 65 Relations entre les propriétés physico-chimiques et les caractéristiques mécaniques des sols compressibles - J.-F. Vidalie (1977) — AR 03 : *Terrassements*.
- 66 Contribution à l'étude de la tensio-activité cationique des bitumes routiers, F. Durrieu (1977) — AR 63 : *Méthodes physiques et physico-chimiques*.
- 67 * Contribution à l'étude des propriétés de matériaux - Le traitement des sables, M. Hamzé (1977) — AR 33 et 34 : *Liants hydrocarbonés et enrobés - Assises traitées*.
- 68 Effets des forces de précontrainte concentrées dans les poutres caissons, Ly Kim Ty (1977) — AR 10 : *Ponts en béton précontraint*.
- 69 Comportement du béton hydraulique : fissurabilité et fragilité - Étude bibliographique et critique, J. Baron (1977) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques*.
- 70 Compactage des terrassements - Efficacité en profondeur de plaques et de rouleaux vibrants et influence de l'épaisseur des couches sur la qualité du compactage, P. Chaigne, R. Franceschina, J. Oczkowski et A. Quibel (1977) — AR 03 : *Terrassements*.
- 71 Comportement en traction simple des enrobés hydrocarbonés, R. Linder (1977) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés*.
- 72 Détermination de la teneur en eau des granulats et du béton frais par méthode neutronique, J.-P. Baron (1977) — AR 65 : *Méthodes physiques*.
- 73 Stabilisation des massifs rocheux fissurés par barres d'acier scellées, J.-J. Azuar (1977) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains*.
- 74 Application des modèles élastoplastiques de l'Université de Cambridge au calcul du comportement d'un remblai expérimental sur sols mous (Cubzac-les-Ponts), M.-T. Dang et J.-P. Magnan (1977) — AR 06 : *Ouvrages en terre*.
- 75 Contribution à l'étude des états structuraux des bitumes, R. Dron, M. Bestougeff et I.A. Voïnovitch (1978) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 76 Contribution de la chromatographie sur gel perméable (G.P.C.) à la caractérisation qualitative et quantitative des bitumes. Structure colloïdale, B. Brûlé (1978) — AR 33 et 63 : *Liants hydrocarbonés et enrobés - Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 77 Application de la chromatographie sur gel perméable à l'analyse des liants de peinture pour signalisation horizontale, F. Migliori (1978) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 78 Perte de tension d'origine thermique intervenant au cours de fabrication des éléments précontraints par pré-tension traités thermiquement, M. Hassan (1978) — AR 10 : *Ponts en béton précontraint*.
- 79 Propriétés générales des graves traitées par des ciments spéciaux et des retardateurs de prise, J. Alexandre, A. Broccoli, C. Cimpelli, J.-L. Paute (1978) — AR 34 : *Assises traitées aux liants hydrauliques*.

* Épisé.

- 80 Éboulements et chutes de pierres sur les routes. I. - Méthode de cartographie, Groupe d'études des falaises (1978) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains*.
- 81 Éboulements et chutes de pierres sur les routes. II. - Recensement des parades, Groupe d'études des falaises (1978) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains*.
- 82 Diagraphies de densité et de teneur en eau. Sondes nucléaires de première génération, J. Ménard et J. Cariou (1978) — AR 64 : *Emploi des radio-isotopes*.
- 83 Analyse minéralogique — Application aux bétons durcis en liaison avec la pérennité des ouvrages, F.-X. Deloye (1978) — AR 31 et 63 : *Bétons et liants hydrauliques — Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 84 Application de l'holographie à l'analyse des contraintes, J.-M. Caussignac (1978) — AR 65 : *Méthodes physiques*.
- 85 Fatigue des ouvrages d'art métalliques soudés — Rapport introductif à un programme de recherche, P. Brevet, D. François, J.-P. Gourmelon et A. Raharinaivo (1978) — AR 32 : *Métaux*.
- 86 Réparation des structures en béton fissurées par injection de liants époxydiques, Y. Mouton (1979) — AR 31 et 63 : *Bétons et liants hydrauliques — Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 87 Argiles à meulière et calcaires de Beauce en Hurepoix, Synthèse géologique, J.C. Grisoni (1979) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites*.
- 88 Méthode de contrôle de la pollution des eaux. Les pesticides et leur détermination dans les eaux de surface, J. Lamathe, Ch. Magurno et G. Maire (1979) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques*.
- 89 Stabilité, ténacité, propagation des fissures dans les fils et barres en acier, A. Athanassiadis (1979) — AR 32 : *Métaux*.
- 90 Prospection des gisements rocheux à l'aide des diagraphies, C. Archimbaud et J. Peybernard (1979) — AR 35 : *Granulats*.
- 91 Compactage des assises de chaussées traitées aux liants hydrauliques au moyen de compacteurs à pneumatiques, M. Khay, Guy Morel et J.-M. Machet (1979) — AR 34 : *Assises traitées aux liants hydrauliques*.
- 92 Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante, M. Buil (1979) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques*.
- 93 Le fluage des sols argileux — Étude bibliographique, B. Félix (1980) — AR 06 : *Ouvrages en terre*.
- 94 Le fluage et la consolidation unidimensionnelle des sols argileux, B. Félix (1980) — AR 06 : *Ouvrages en terre*.
- 95 Étude bibliographique sur les possibilités actuelles d'utilisation des hyperfréquences en génie civil, G. Baillot (1980) — AR 65 : *Méthodes physiques*.
- 96 Propriétés électrocinétiques des particules argileuses. Application de la méthode électrophorétique aux problèmes d'environnement et d'identification des sols, O. Cuisset (1980) — AR 03 : *Terrassements*.
- 97 Transport et dispersion d'effluents industriels ou urbains dans le domaine côtier de mers à marées, J.-L. Olié, Jean Godin, Penh Lmuth (1980) — AR 67 : *Eau*.
- 98 Cassettes LPC : enregistrement, lecture, exploitation, M. Leroy, J.-Y. Toudic (1981) — AR 68 : *Informatique*.
- 99 Météorologie et terrassements, P. Hénensal (1981) — AR 03 : *Terrassements*.
- 100 Méthodologie de caractérisation de l'agressivité d'un site, D. André, J. Millet, A. Raharinaivo (1981) — AR 32 et AR 30 : *Métaux — Matériaux pour ouvrages d'art*.
- 101 Le vibrex. Influence des paramètres d'un rouleau vibrant sur l'efficacité du compactage, A. Quibel, M. Froumentin, G. Morel (1981) — AR 03, 33 et 34 : *Terrassements ; Liants hydrocarbonés et enrobés ; Assises traitées aux liants hydrauliques*.

Les rapports de recherche disponibles peuvent être demandés au Service des Publications du LCPC.

Les rapports de recherche épuisés peuvent être fournis sous forme de micro-fiches 105 x 148 mm.

