



**CAHIERS
D'ÉTUDES**

*Cahier d'Etude n° 53
Juillet 1981*

**LA VISIBILITÉ DE NUIT DES PLOTS
RÉTRORÉFLÉCHISSANTS**

**CDAT
15062**

L'ORGANISME NATIONAL DE SÉCURITÉ ROUTIÈRE
*est une association ayant pour objet de procéder aux études
et recherches de toutes natures sur les accidents de la circulation
routière et sur les mesures destinées à accroître la sécurité
de cette circulation, ainsi que de promouvoir toutes activités
ayant le même objet. Les Ministères intéressés à la sécurité
routière sont représentés dans son Conseil d'Administration.*

Président : E. BIDEAU

Directeur : J. Moreau de St Martin

*Les bulletins peuvent être reproduits librement sous réserve que l'origine :
« Cahiers d'Études de l'Organisme National de Sécurité Routière »
soit mentionnée.*

Siège social : 244, boulevard Saint-Germain, 75007 Paris.

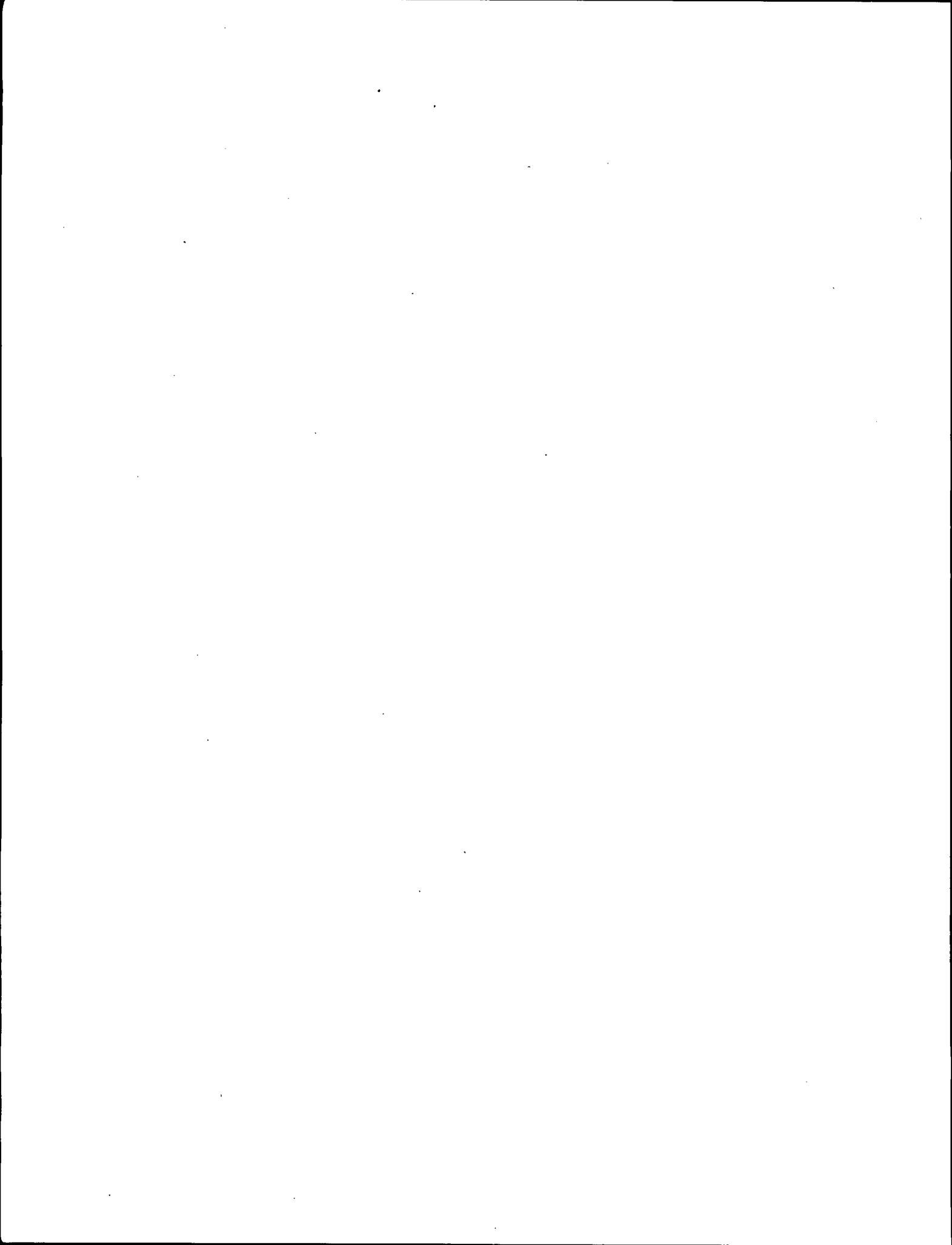
Administration : 2, avenue du Général-Malleret - Joinville, 94114 Arcueil Cédex.

**LA VISIBILITÉ DE NUIT DES PLOTS
RÉTRORÉFLÉCHISSANTS**

Etude conjointe de l'Organisme National de Sécurité Routière et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

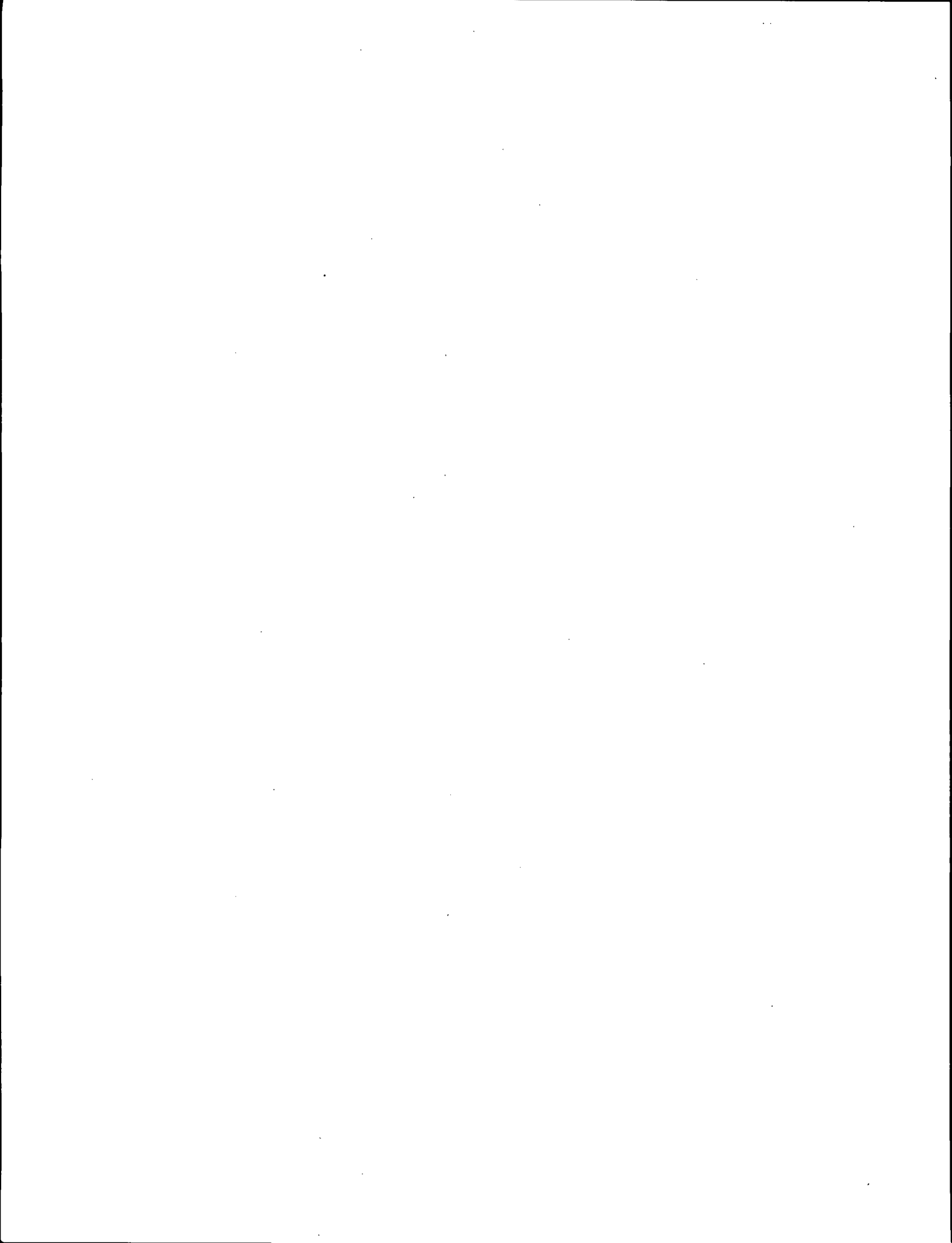
*M. BRY (L.C.P.C.)
D. MOUKHWAS (ONSER)*

*Cette étude a été menée pour le compte de la Direction des Routes et de la Circulation Routière
avec la collaboration de M. MINARD, de la D.D.E. des Yvelines.*



SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
I — OBJET DE L'ETUDE	3
II — PHOTOMETRIE DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS	3
2.1. GRANDEURS ET UNITES DE BASE	3
2.1.1. Flux lumineux	3
2.1.3. Intensité lumineuse	3
2.2. PRINCIPE DE LA RETROREFLEXION	3
2.3. DESCRIPTION DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS	5
2.3.1. Les réflecteurs à trièdres trirectangles	5
2.3.2. Les réflecteurs à lentilles	6
2.3.3. Les réflecteurs à films rétro réfléchissants	6
2.4. MESURE DU COEFFICIENT D'INTENSITE LUMINEUSE DES PLOTS RETRO- REFLECHISSANTS	6
2.5. COULEUR DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS, MESURE	7
III — ETUDE EXPERIMENTALE DE LA VISIBILITE DE PLOTS RETRO- REFLECHISSANTS	8
3.1. METHODE	8
3.2. CHOIX DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS	10
3.3. PLAN D'EXPERIENCE	13
3.4. VEHICULES UTILISES POUR LES ESSAIS	14
3.4.1. Véhicule d'observation	14
3.4.2. Véhicule fixe	15
IV — ANALYSE DES DONNEES	15
4.1. DETECTION DES PLOTS	15
4.1.1. Résultats par catégorie	17
4.1.2. Relation entre les caractéristiques photométriques des plots et la performance visuelle	19
4.1.2.1. C.I.L. et intensité lumineuse	19
4.1.2.2. Confusion des couleurs	25
4.2. DISTANCES D'IDENTIFICATION DES PLOTS, PERCEPTION DES CONFIGURATIONS	26
V — DISCUSSION DES RESULTATS	29
5.1. COMPARAISON AVEC LES ETUDES ETRANGERES	29
5.2. DISCUSSION DE LA METHODE	31
5.3. QUELLES EXIGENCES RETENIR POUR LE C.I.L. ET LA COULEUR ?	31
CONCLUSIONS	33
BIBLIOGRAPHIE	36
ANNEXES	37



La Visibilité de Nuit des Plots Rétro réfléchissants

RESUME

Ce rapport décrit une expérience de détection de plusieurs types de plots rétro réfléchissants dans des conditions de visibilité nocturne, par temps sec ou humide.

48 observateurs devaient indiquer le nombre et la couleur de plots présentés par séries de 3, 4 ou 5, pendant qu'ils se déplaçaient en voiture sur une piste à partir d'un point extrême situé à 500 m des plots.

Deux conditions d'éclairage ont été introduites : feux de route (phares) du véhicule où se trouve l'observateur et feux de croisement (codes) de ce véhicule avec en même temps les codes d'un véhicule placé en face, derrière les plots.

Les distances de visibilité de six matériels et pour deux couleurs (plots blancs ou plots verts) ont été ainsi établies. Les mesures de l'éclairage et la connaissance du CIL des plots ont permis de relier la mesure de la performance visuelle à l'intensité lumineuse au niveau des plots. On montre ainsi que la performance plafonne au-delà d'une certaine valeur correspondant à un CIL de 100 mcd.lux^{-1} .

L'expérience met en évidence la dégradation de l'efficacité des plots sous la pluie, le décalage dans la performance entre plots blancs et plots verts, ainsi que les incertitudes quant à la couleur donnant lieu à de fréquentes confusions.

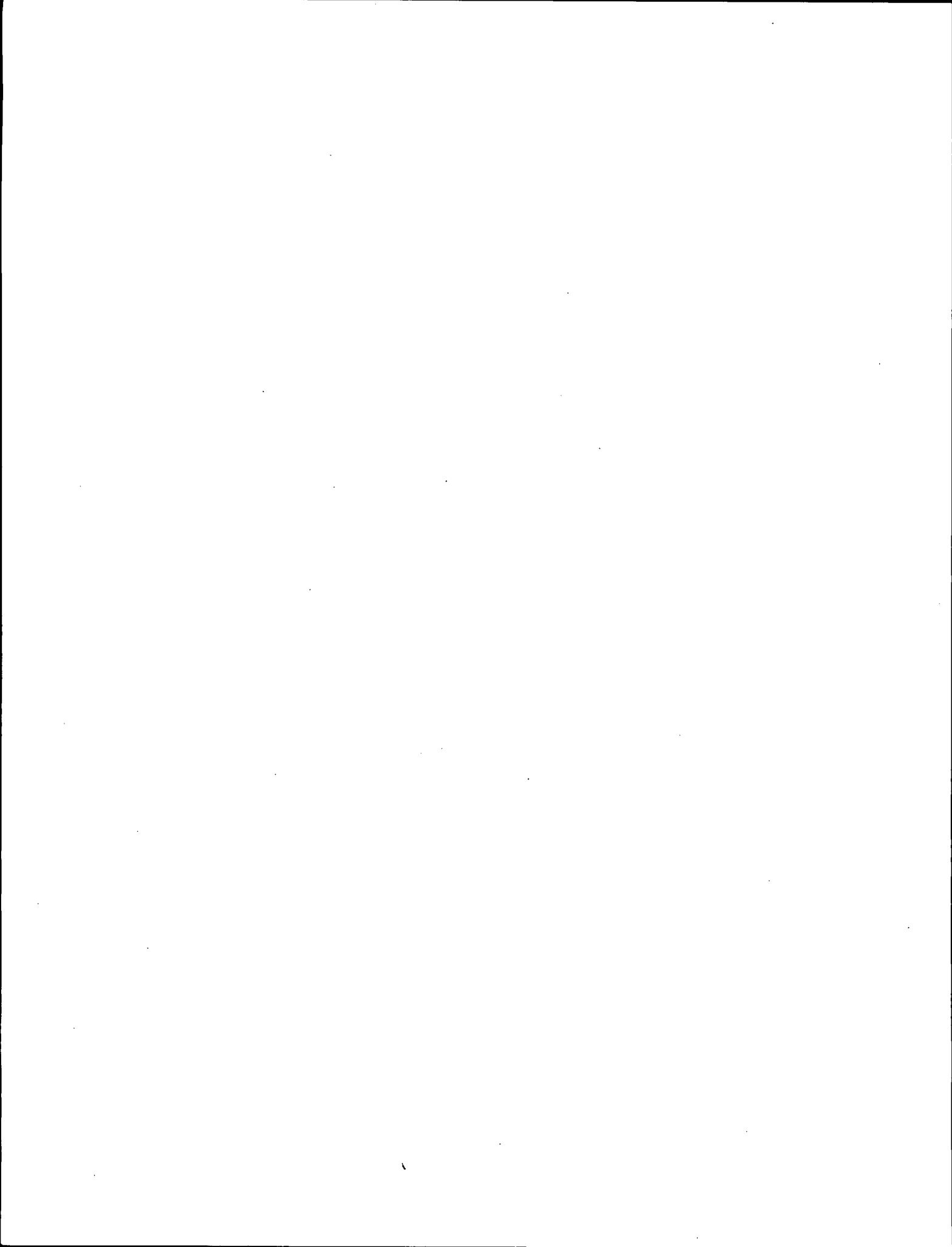
Night Visibility of Retroreflective Roadstuds

SUMMARY

Night visibility measures of several models of roadstuds were carried out in dry or wet weather.

Two illumination conditions were taken into account : High beam alone, or low beam, with opposing car low beam. 6 types of roadstuds were tested, including white and green devices. 48 observers took part to the experiment. They were driven on an 500 m airport track towards a display of different roadstuds.

Every 25 m lights were put on and allowed thus instant detection of the roadstuds display by the observer. Main findings are : Green roadstuds are less conspicuous than white roadstuds, decrease of visibility reaches 30 % in wet weather and performance shows no more improvement for roadstuds when their coefficient of luminous intensity reaches 100 mcd.lux^{-1} .



INTRODUCTION

Les plots de marquage rétro réfléchissants sont en général considérés comme un moyen de signalisation horizontale présentant des avantages particuliers sur le plan de la visibilité et un impact sur la sécurité du trafic qui justifient leur emploi en complément ou même à la place du marquage par bandes de peinture. Il est en particulier reconnu que "les plots possèdent une assez bonne visibilité par mauvais temps, lorsqu'une partie de leur surface rétro réfléchissante se situe au-dessus du film d'eau" ... (1)

Le critère de la visibilité est en effet crucial pour l'évaluation des matériels de signalisation, bien que des considérations de coût, d'entretien, de durabilité, ne peuvent être négligées. Il importe d'autant plus qu'un matériel est coûteux, de s'assurer que son efficacité visuelle justifie l'investissement qu'il implique. Il se trouve en effet que le marquage habituel par peinture, s'il est en général visible de jour ou de nuit par temps sec, tend à disparaître sous la pluie pour devenir, si le film d'eau est assez important, pratiquement invisible. Les plots par contre sont peu visibles par temps clair en lumière de jour, mais sont par leur constitution très visibles la nuit. Leur supériorité doit surtout être marquée par temps humide, grâce au fait que leur partie rétro réfléchissante est susceptible d'émerger au-dessus de la surface mouillée.

A l'étranger :

Divers types de plots sont proposés par les fabricants, et certains ont déjà un long usage, principalement en Grande-Bretagne et aux U.S.A.

Usage des plots

Différents types de routes sont équipés de plots, et notamment les zones posant des problèmes de visibilité ou de guidage latéral pour le contrôle de la trajectoire. On trouve aussi une utilisation de plots dans l'approche de sections de routes qui impliquent des manœuvres telles que les virages, sorties et entrées, en tant que présignalisation servant d'avertissement. Par rapport aux délinéateurs, les plots ont l'avantage de correspondre sans décalage à la structure de la route, ce qui a de l'importance quand le conducteur ne dispose pas d'indices visuels extérieurs à la route pour se maintenir dans la voie appropriée. Les voies de circulation sont de plus mieux indiquées dans les courbes car contrairement aux délinéateurs, la position des plots étant plus proche de l'axe de conduite, le risque de superposition de plots appartenant à des alignements parallèles est réduit.

L'usage courant de plots présente selon les pays des différences quant à l'espacement, les couleurs utilisées, et les attributions du dispositif en tant que moyen de signalisation. Les premiers plots (2) ont été implantés en Grande-Bretagne dans les années 40 (matériel Catseyes) puis leur usage s'est répandu aux U.S.A. notamment.

On distingue les plots rétro réfléchissants à usage nocturne et les plots non rétro réfléchissants visibles de jour mais peu efficaces la nuit. Il y a enfin des plots à éclairage interne (balisage des pistes d'aérodrome) ; ce matériel peut être utilisé dans le domaine routier dans les régions à brouillard (3-4).

On utilise les plots, soit pour compléter un marquage par peinture, soit pour le remplacer, bien que dans ce dernier cas, les aspects légaux du marquage conventionnel puissent faire problème. Par exemple, on ne peut pas représenter à l'aide des plots une ligne continue qui interdit le dépassement. Leur usage est donc fondamentalement d'aider au guidage du véhicule, à moins d'introduire un codage spécifique par positionnement et arrangement des plots, de manière à pouvoir représenter spatialement un message réglementaire.

La pratique courante en Grande-Bretagne, est d'utiliser des plots uniquement en complément à un marquage conventionnel quand celui-ci a un caractère réglementaire (ligne continue ou discontinue de séparation de voies, bord de chaussée). En Allemagne, on préconise le remplacement d'une ligne longitudinale centrale par un alignement serré de plots pour la signalisation de chantier.

La couleur des plots

En complément au marquage par peinture, les plots sont en général blancs ou jaunes (ces deux couleurs peuvent d'ailleurs se confondre si elles sont utilisées simultanément). En Grande-Bretagne, on utilise sur une grande échelle le blanc en lignes axiales, l'orange et le rouge pour les accès d'autoroute et le vert pour les sections d'accélération ou de décélération. L'usage de deux couleurs vise à indiquer les deux côtés d'une voie ou la rencontre de voies comme dans une intersection. On utilise aussi aux U.S.A. des plots bidirectionnels, blancs dans le sens de la marche, et rouge dans l'autre sens sur une route à circulation en sens unique.

Le marquage des rampes d'accès d'autoroutes par plots bleus sur les deux côtés de la voie ("le tunnel bleu") a été expérimenté en Californie (Monterey Freeway), en comparaison avec des délinéateurs, et s'est révélé supérieur (pas de superposition).

Une enquête récente auprès d'un échantillon de 187 conducteurs passant sur une section équipée de plots de l'Interstate 78 (U.S.A.) a montré que les usagers apprécient ce genre de matériel dans la détection des rampes d'accès et de sortie (5).

En France :

En France, leur développement est assez récent. Ils ont fait l'objet de deux circulaires du Ministère des Transports, l'une relative aux normes d'implantation en 1978 (circulaire n° 78.116 du 19 septembre 1978), et l'autre relative aux règles de programmation en 1980 (circulaire n° 80-85 du 3 juillet 1980).

Parallèlement à ces deux circulaires, une procédure d'homologation s'est instaurée sur les bases d'une "Note technique provisoire". Dans cette note figurent des exigences de couleur pour le blanc et le vert — les deux seules couleurs retenues — et des exigences pour le coefficient d'intensité lumineuse. Ces dernières ont été fixées arbitrairement à partir de normes étrangères, en particulier des normes anglaises "British Standards", la valeur minimum pour le Coefficient d'Intensité Lumineuse (C.I.L.) devant être de 50 mcd.lx^{-1} pour le blanc et le vert pour les conditions géométriques de mesure $V = 0$, $H = 0$ et $\alpha = 20'$ (voir chapitre II).

I – OBJET DE L'ETUDE

On affirme couramment que, par rapport à la signalisation horizontale conventionnelle, les plots rétro réfléchissants constituent un dispositif de guidage efficace de nuit, même par temps humide. Il y a cependant peu de données précises à ce sujet et peu de mesures concernant leur visibilité dans les différentes conditions de conduite en liaison avec leurs caractéristiques photométriques.

C'est pourquoi au moment où leur usage tend à se développer en France, il a paru utile de s'assurer que les exigences photométriques prévues dans la "Note technique provisoire" correspondent bien à un niveau de performances visuelles suffisantes : CIL minimum 50 mcd.lx^{-1} et définition du blanc et du vert.

On a donc défini une expérimentation dans laquelle plusieurs types de plots, blancs et verts, de plusieurs niveaux de CIL sont comparés sur le plan de leur distance de visibilité.

Avant de rentrer dans le détail de l'expérimentation, un rappel sur la définition des grandeurs photométriques considérées doit permettre au lecteur non averti de mieux comprendre l'exploitation des résultats.

Les résultats obtenus sont comparés aux données disponibles des quelques études déjà réalisées sur la visibilité des plots puis les exigences de la "Note technique provisoire" sont discutées.

II – PHOTOMETRIE DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS

2.1. GRANDEURS ET UNITES DE BASE

2.1.1. Flux lumineux (F) :

Grandeur caractéristique d'un flux énergétique, caractérisant son aptitude à produire une sensation lumineuse.

Unité : Lumen (lm)

2.1.2. Eclairement (E) :

L'éclairement (E) en un point d'une surface est la densité du flux lumineux reçu en ce point de la surface. C'est donc le quotient du flux lumineux reçu par un élément de la surface contenant ce point par l'aire de cet élément :

$$E = \frac{F}{S}$$

Unité : Lux (lx) ; (1 lux = 1 lumen.m⁻²)

2.1.3. Intensité lumineuse (I) :

On définit l'intensité (I) d'une source lumineuse "ponctuelle dans une direction donnée, comme étant le quotient du flux lumineux F émis dans un angle solide W entourant cette direction, par la valeur de cet angle, quand ce dernier est suffisamment petit ($I = F.W^{-1}$).

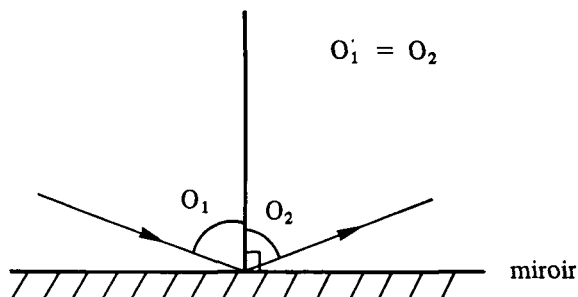
Unité : Candela (cd) ; (1 candela = 1 lumen.steradian⁻¹).

2.2. PRINCIPE DE LA RETROREFLEXION

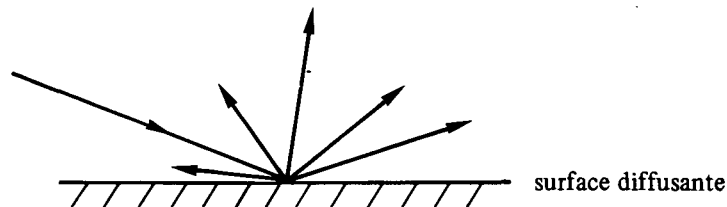
Dans un milieu homogène et transparent comme l'eau, la transmission de la lumière s'effectue en ligne droite. Au contact d'un matériau différent, sa direction et sa nature peuvent être modifiées.

On peut distinguer 3 types de réflexion :

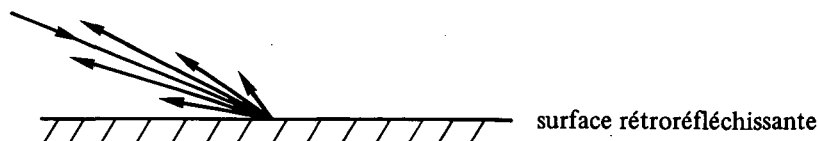
- la réflexion spéculaire : c'est le cas d'un miroir, toute la lumière frappant celui-ci est réfléchié suivant un angle égal à l'angle d'incidence.



- la réflexion diffuse : la lumière est renvoyée dans toutes les directions.



- la rétro réflexion : la plus grande partie de la lumière est réfléchié dans des directions voisines de la direction incidente.



La CIE (6) en donne la définition suivante : "Réflexion caractérisée par le renvoi du rayonnement dans des directions voisines de celles d'où il provient, cette propriété étant conservée pour des variations importantes de la direction du rayonnement incident".

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

2.3. DESCRIPTION DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS

Les plots rétro réfléchissants utilisés en signalisation horizontale se composent d'un réflecteur, d'un corps servant de support au réflecteur et d'un système de fixation sur la chaussée. Le réflecteur constitue pour l'usager nocturne de la route l'élément essentiel du plot.

Ce réflecteur étant de petite dimension et étant observé à grande distance (l'angle solide W est donc petit), le plot peut être considéré lorsqu'il est éclairé par les feux d'un véhicule comme une source secondaire ponctuelle et peut être ainsi caractérisé du point de vue photométrique par l'intensité lumineuse qu'il émet dans la direction d'observation. Cette intensité lumineuse est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par le réflecteur qui est caractérisé par l'éclairement produit au centre de référence dans le plan perpendiculaire à la direction d'éclairage. Le coefficient d'intensité lumineuse (C.I.L.) est le rapport de cette intensité lumineuse à cet éclairement et s'exprime en candelas par lux (cd.lx^{-1}).

Les plots rétro réfléchissants utilisent 3 grandes familles de réflecteurs :

- les réflecteurs à trièdres trirectangles,
- les réflecteurs à lentilles,
- les réflecteurs à films rétro réfléchissants.

2.3.1. Les réflecteurs à trièdres trirectangles

Ces réflecteurs moulés constituent pour les modèles courants l'enveloppe extérieure du plot. Leur dimension est donc importante comparée aux autres types de réflecteurs et notamment ceux à lentilles.

Le schéma n° 1 montre leur principe de fonctionnement :

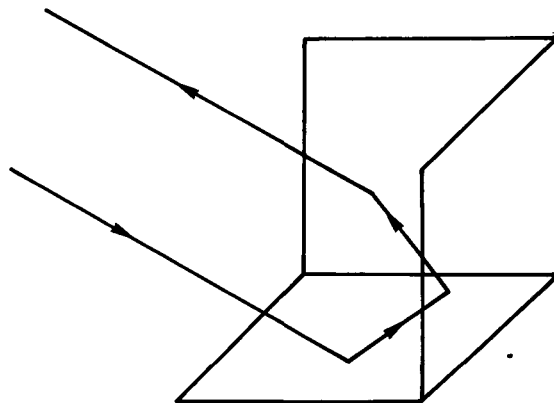


Schéma n° 1 : Principe du réflecteur à trièdres trirectangles

Les 3 réflexions spéculaires successives renvoient la lumière incidente dans une direction proche de la direction d'incidence. Une métallisation des faces du réflecteur assure une meilleure efficacité du système.

Leurs surfaces importantes donnent à ces réflecteurs de bons coefficients d'intensité lumineuse.

Les plots n° 5 et 6 de cette étude entrent dans cette famille (voir photo 4).

2.3.2. Les réflecteurs à lentilles

Il s'agit de catadioptrés bi-hémisphériques en verre de dimension variable présentant une métallisation sur leur face arrière et implantés au nombre plus ou moins important dans le corps du plot au moment de sa fabrication.

Le schéma n° 2 montre leur principe de fonctionnement :

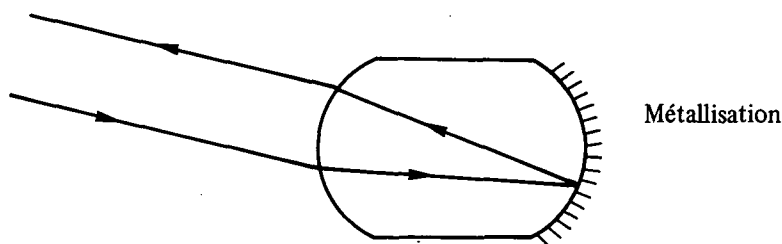


Schéma n° 2 : Principe de réflecteur à lentilles

Les rayons de courbure sont calculés pour que la lumière reparte dans une direction voisine de la direction incidente.

Contrairement au réflecteur précédent, les lentilles n'occupent qu'une partie de la face avant du corps du plot. Le coefficient d'intensité lumineuse des plots équipés de tels dispositifs dépend du nombre et des dimensions des lentilles. Il est généralement très inférieur à celui des plots équipés de trièdres trirectangles.

Les plots n° 1, 2 et 4 de cette étude entrent dans cette famille (voir photos 6, 7).

2.3.3. Les réflecteurs à films rétro réfléchissants

De tels réflecteurs sont constitués d'un morceau de film rétro réfléchissant utilisé en signalisation verticale et d'un système translucide de protection du film formant loupe qui s'adapte sur le corps des plots.

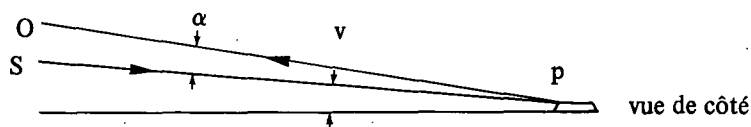
Le principe de fonctionnement optique de ces dispositifs dépend de celui du type de film rétro réfléchissant utilisé. Le film rétro réfléchissant formant le réflecteur du plot 3 (voir photo n° 5) de cette étude, fonctionne sur le principe du trièdre trirectangle vu précédemment.

Le coefficient d'intensité lumineuse de ce dispositif se situe entre ceux des 2 types précédents.

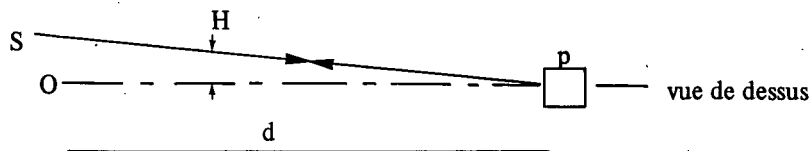
2.4. MESURE DU COEFFICIENT D'INTENSITE LUMINEUSE DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS

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 (7).

Les conditions géométriques d'observation ou de mesure sont définies par les angles :



V angle d'incidence vertical
H angle d'incidence horizontal
 α angle d'observation



S = source lumineuse
 O = observateur
 P = plot

Les conditions d'utilisation habituelles des plots rétro réfléchissants font que les angles V et α sont très faibles, H pouvant prendre une valeur plus importante dans les courbes. Dans les conditions standard de mesure, on prend généralement $V = H = 0^\circ$ et $\alpha = 20'$.

On détermine en laboratoire le C.I.L. d'un plot rétro réfléchissant en mettant en S une source bien définie (illuminant A) et en O un récepteur corrigé selon la courbe de sensibilité de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde. La réponse du récepteur Rech. est proportionnelle à l'éclairement Ech. fourni par le réflecteur ; on a $\text{Rech.} = K \cdot \text{Ech.}$. Pour la place du réflecteur, sa surface sensible étant orientée vers la source lumineuse dans le plan perpendiculaire à l'axe d'éclairage. On a alors : $R_s = K \cdot E_s$. Le C.I.L. du plot rétro réfléchissant est donné par :

$$\text{C.I.L.} = \frac{I}{E_s} = \frac{\text{Ech.} \cdot d^2}{E_s} = \frac{\text{Rech.}}{R_s} \cdot d^2$$

d étant la distance en mètres entre la source et le plot.

2.5. COULEUR DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS, MESURE (8-9)

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

La chromacité 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 des lumières éclairant les surfaces. On peut mesurer la couleur de nuit dans des conditions identiques à celles de la mesure du coefficient d'intensité lumineuse avec l'illuminant A en remplaçant le récepteur photométrique par un monochromateur. On mesure successivement le flux de radiation $F_s(\lambda)$ émis par la source au centre de référence de l'échantillon, puis le flux de radiation $F_{ech}(\lambda)$ émis par l'échantillon, dans la direction d'observation.

Le coefficient d'intensité lumineuse spectrale obtenu pour chaque longueur d'onde.

$$C(\lambda) = \frac{F_{ech}(\lambda)}{F_s(\lambda)} \cdot d^2$$

permet de calculer les composantes trichromatiques X, Y et Z :

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

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

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

avec $S(\lambda)$ = répartition spectrale d'énergie relative de l'illuminant A

$\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ et $\bar{Z}(\lambda)$ composantes trichromatiques spectrales de la CIE.

et les coordonnées trichromatiques x et y

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

La note technique provisoire relative à l'homologation des plots définit pour le blanc et le vert deux zones de chromaticité dans le diagramme x, y qui doivent assurer une probabilité suffisante d'identification de ces deux couleurs pour des observateurs normaux.

On peut s'interroger sur le bien fondé de ces zones dans la mesure où sur route les sources lumineuses jaunes des véhicules ont une répartition spectrale différente de celle de l'illuminant A.

A titre d'exemple, dans le chapitre 3.2 sont donnés pour les plots choisis les points représentatifs de la couleur de nuit obtenus avec l'illuminant A et une source jaune dont la répartition spectrale d'énergie relative est donnée en annexe 1.

III - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA VISIBILITE DE PLOTS RETROREFLECHISSANTS

3.1. METHODE

L'épreuve de visibilité des plots a été organisée en site routier protégé, de manière à la mener de façon standardisée. Le site protégé permet en effet d'éliminer diverses interférences présentes sur route réelle qui empêchent une évaluation précise du dispositif. Une expérimentation sur un site routier permet quant à elle d'analyser les conditions réelles dans lesquelles se produit la détection de plots par un conducteur circulant de nuit.

On a utilisé pour l'étude une piste d'aviation désaffectée à l'aérodrome militaire de Villacoublay, aimablement prêtée pour les besoins de l'expérience par l'Armée de l'Air. Les caractéristiques de cette chaussée figurent en annexe 2. Il s'agit d'amener des observateurs en voiture, face à des combinaisons de plots et de déterminer la distance à laquelle ils détectent leur présence sur la chaussée et perçoivent leur couleur et leur nombre. L'expérience a lieu la nuit (mars-avril 1980).

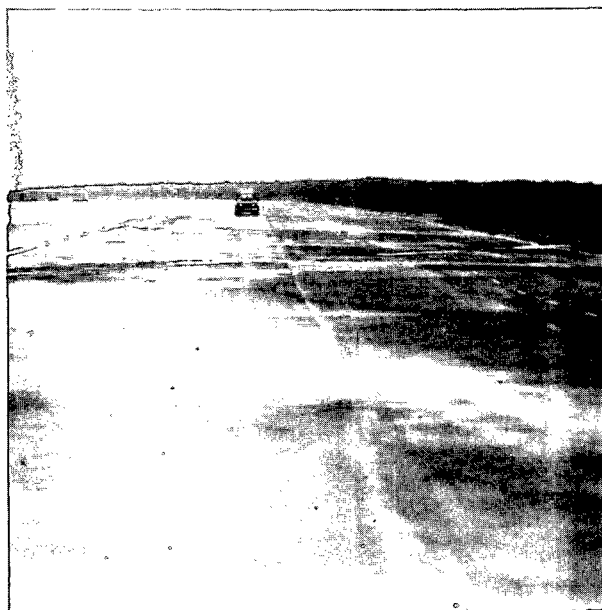


Photo n° 1 : Vue partielle de la piste d'aérodrome utilisée

On a choisi une méthode de présentation de séries de 3, 4 ou 5 plots placés en travers de la piste, à égale distance de l'observateur.

Il est en effet difficile d'effectuer une telle évaluation sur des plots disposés longitudinalement comme cela est fait dans leur utilisation courante, car les plots ne sont pas alors également répartis par rapport à l'observateur. La présentation par contre de plots isolés est à proscrire car leur détection est rendue artificiellement difficile et aléatoire et le risque de confusion avec d'autres objets brillants présents dans le champ de vision est élevé.

Le principe de la détermination des distances de visibilité consiste à placer une configuration de plots à un bout de la piste d'essai, et à amener un observateur dans un véhicule à l'autre bout de la piste, à une distance de départ de 500 m.

L'éclairage du véhicule est allumé pendant deux secondes et l'observateur doit indiquer verbalement ce qu'il a pu voir, en fonction d'une consigne où des explications lui ont été données sur l'expérience et sur ce qu'il doit rechercher. Puis on avance de 25 m et de nouveau on allume l'éclairage du véhicule et ainsi de suite, jusqu'à l'obtention d'une réponse jugée satisfaisante. On revient au point initial et on recommence l'expérience avec une autre configuration.



Photo n° 2 : Repérage des distances

Les configurations de plots sont modifiées d'un essai à l'autre en nombre (3, 4 ou 5) et en homogénéité (une couleur ou les deux : plots blancs et plots verts mélangés). Ceci a pour but d'éliminer un processus de devinement, par lequel, par forte incertitude, l'observateur a tendance à indiquer ce qu'il croit voir ou ce qu'il suppose qu'on lui présente.



Photo n° 3 : Changement de configuration entre deux passages

Si toutes les configurations avaient le même nombre de plots, les essais successifs créant un apprentissage, l'observateur voyant par exemple 3 plots et sachant qu'il y en a 4, tendra à indiquer la présence du quatrième par raisonnement et non par la perception. De même l'écartement entre plots est variable pour empêcher l'observateur de combler mentalement un vide entre 2 plots.

La technique de l'éclairement instantané des plots pendant deux secondes à des étapes régulièrement espacées est une variante de la méthode de la présentation tachistoscopique, par laquelle on crée une difficulté au niveau de la tâche perceptive dans le but d'augmenter la discrimination visuelle entre divers stimulus présentés. La tâche proposée est en effet une sous-tâche simplifiée de l'activité de conduite automobile, puisque l'observateur assis à la place du passager avant n'a rien d'autre à faire qu'à essayer de voir des points brillants en face de lui. Comme la tâche de conduite implique une contrainte temporelle, il est intéressant de l'introduire dans l'expérience pour créer une certaine tension et obliger l'observateur à répondre dans une ambiance d'incertitude.

Les observateurs sont des militaires du contingent de la base aérienne de Villacoublay.

On a procédé à un examen de la vision des couleurs des sujets au moyen de l'Atlas du Dr Polack de manière à éliminer les sujets qui auraient une déficience quant à la vision du vert. On sait en effet que de telles déficiences se rencontrent dans la population masculine, dans une proportion non négligeable (de l'ordre de 5 à 8 %). Un seul cas a été effectivement découvert dans notre échantillon.

3.2. CHOIX DES PLOTS RETROREFLECHISSANTS

L'objectif de l'étude étant de déterminer la distance de visibilité des plots en fonction de leur C.I.L. pour s'assurer que les exigences retenues répondent bien à des normes "suffisantes" de sécurité, les plots ont été choisis en fonction :

- de leur C.I.L. pour couvrir la gamme des modèles commercialisés tout en centrant les valeurs sur 50 mcd.lx^{-1} qui est l'exigence actuelle,
- de leur couleur : blanc et vert (les deux seules couleurs retenues pour l'homologation),
- du plan d'expérience qui limite le nombre de matériels différents.

Finalement, 6 types de plots ont été retenus :

3 blancs Cateyes (CYB)
 Catastud (CTB)
 Stimsonite 88 (SB)

3 verts Cateyes (CYV)
 Ferro (FV)
 Stimsonite 88 (SV)

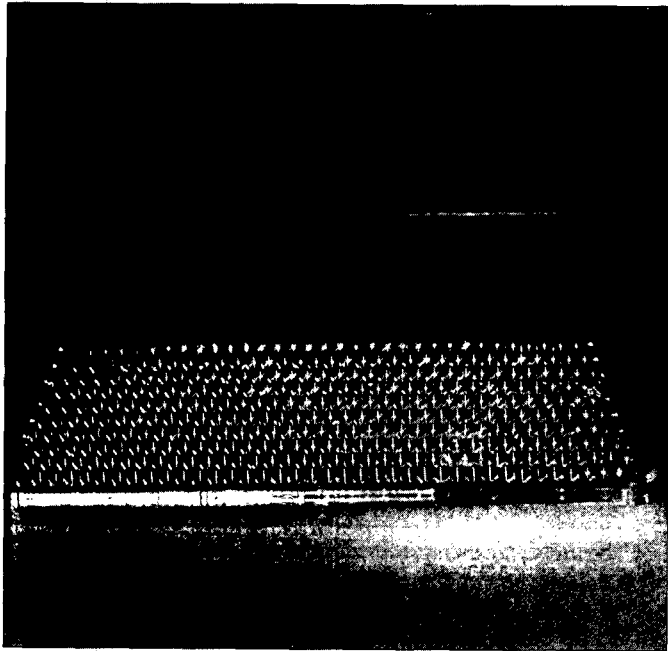


Photo n° 4 : Plot Stimsonite 88 (blanc et vert)

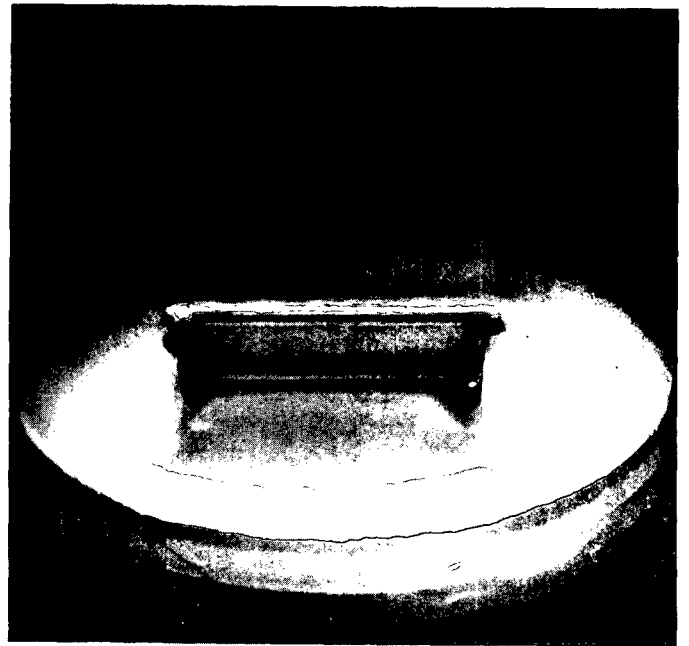


Photo n° 5 : Plot Ferro (vert)

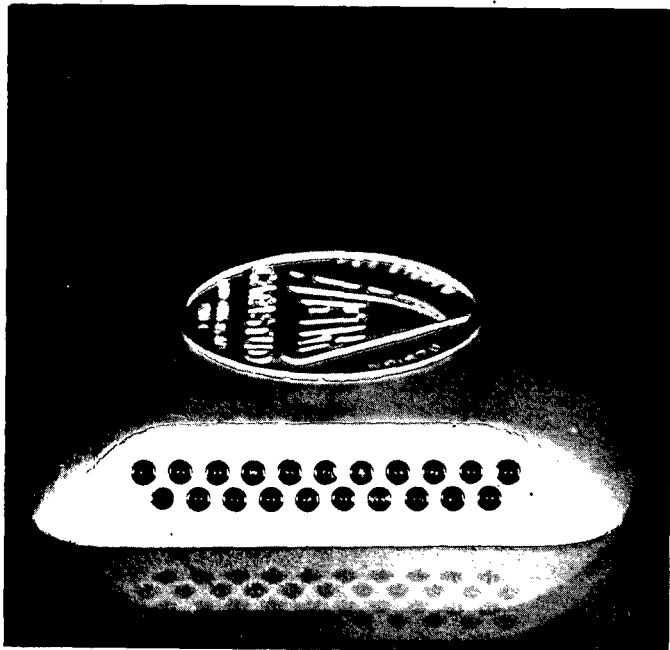


Photo n° 6 : Plot Catastud (blanc)

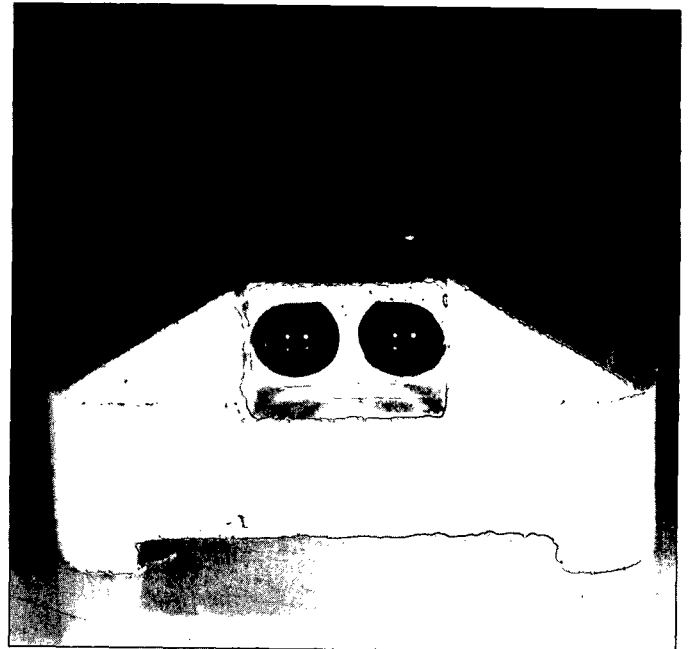


Photo n° 7 : Plot cateyes (blanc et vert)

Désignation des plots	Coefficient d'intensité lumineuse pour $\alpha = 20'$ en $\text{mcd} \cdot \text{l} \cdot \text{x}^{-1}$			Coordonnées trichromatiques (couleur de nuit)	
	V = 0 H = 0	V = 0 H = 5	V = 5 H = 0	Illuminant A	Source jaune
Cateyes vert	4	3	4	x = 0,268 y = 0,570	x = 0,356 y = 0,619
Cateyes blanc	36	34	28	x = 0,432 y = 0,418	x = 0,473 y = 0,511
Ferro vert	40	40	41	x = 0,298 y = 0,490	x = 0,344 y = 0,622
Catastud blanc	77	74	89	x = 0,455 y = 0,408	x = 0,482 y = 0,504
Stimsonite vert	116	104	135	x = 0,291 y = 0,486	x = 0,325 y = 0,634
Stimosonite blanc	573	534	652	x = 0,450 y = 0,406	x = 0,487 y = 0,498

Tableau n° 1 : Coefficient d'intensité lumineuse et coordonnées trichromatiques des 6 modèles de plots utilisés

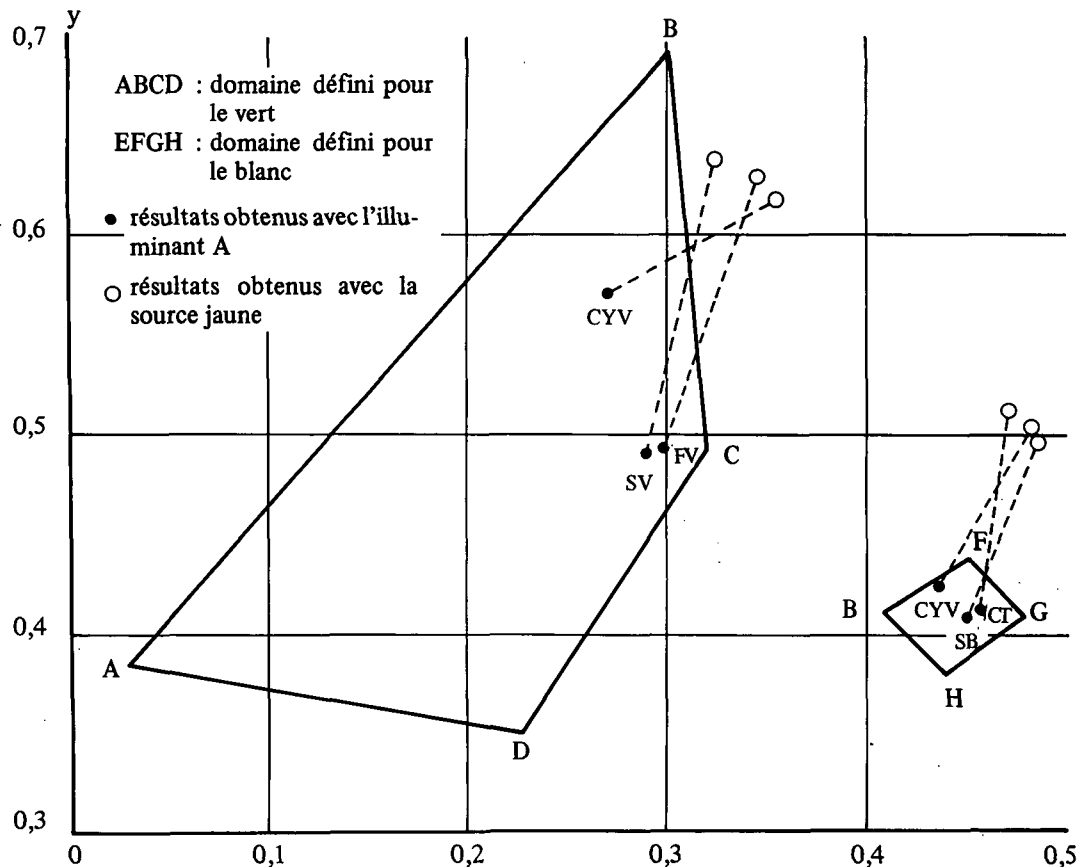


Figure n° 1 : Représentation des coordonnées trichromatiques des 6 plots utilisés

Les distances d'observation des plots au cours de l'étude varient de 25 m à 500 m, ce qui donne une valeur de l'angle V comprise entre 2° et 5° et une valeur de l'angle α comprise entre 1° et 3° . La valeur de l'angle H dépend de la position de chaque plot dans les configurations, elle reste dans tous les cas inférieure à 5° .

Pour les 6 modèles de plots, les coefficients d'intensité lumineuse sont donnés dans le tableau n° 1 pour des angles $\alpha \pm 20'$, $V = 0 - H = 0$, $V = 0 - H = 5$, $V = 5 - H = 0$ qui couvrent approximativement les conditions d'observation réelles définies ci-dessus. Les coordonnées trichromatiques sont données dans ce même tableau pour des conditions géométriques conventionnelles : $V = 0$, $H = 0$, $\alpha = 20'$. Tous les résultats sont obtenus avec l'illuminant A de la CIE avec en plus pour les coordonnées trichromatiques les valeurs trouvées avec la source jaune (cf. 2.5).

Les points représentatifs de la couleur de nuit sont indiqués sur la figure 1. On constate que le remplacement de l'illuminant A par une source jaune provoque un déplacement vers le jaune des points représentatifs des 6 plots.

3.3. PLAN D'EXPERIENCE

Les configurations de plots comportent un mélange de deux matériels ou sont homogènes, avec un nombre de plots variant de 3 à 5, placés latéralement à des écartements de 1 à 7 m. On a défini 24 configurations dont chaque observateur doit donner la composition pour 8 d'entre elles. L'ordre de présentation des configurations est modifié d'un obser-

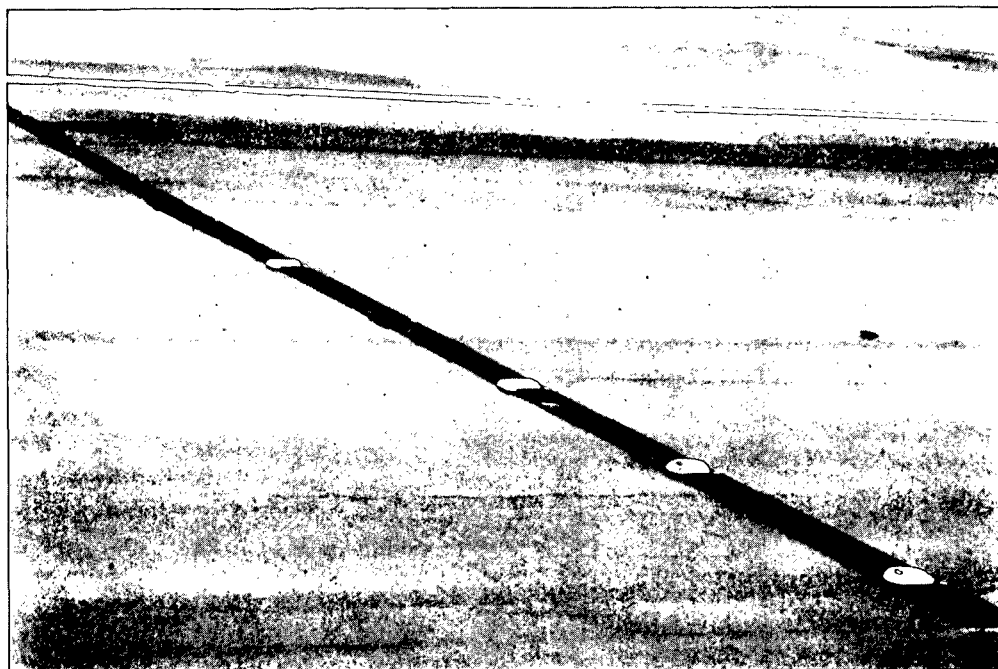
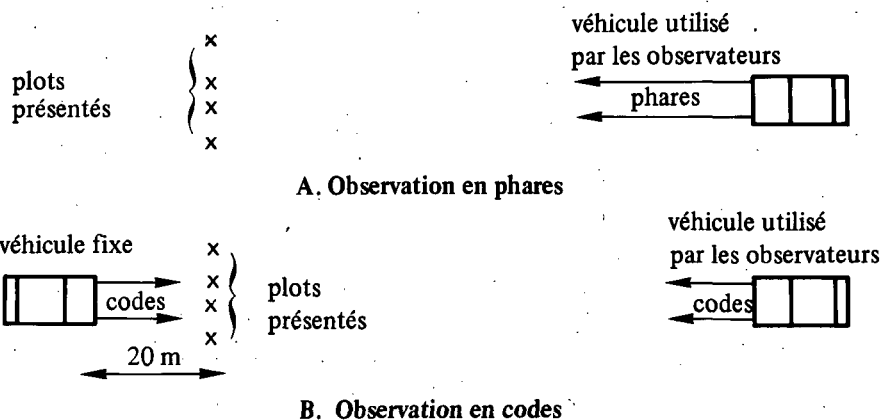


Photo n° 8 : Exemple d'une des 24 configurations

vateur à l'autre de manière à contrebalancer l'effet d'apprentissage qui fait que la performance s'améliore au fur et à mesure que l'observateur passe l'épreuve, ce qui favorise les matériels présentés dans les dernières configurations. Les observateurs sont affectés au hasard à trois groupes définis par les 8 configurations suivantes (voir liste en annexe 3) :

- G1 : configurations n° 1, 2, 3, 4, 13, 14, 15, 16.
- G2 : configurations n° 9, 10, 11, 12, 21, 22, 23, 24.
- G3 : configurations n° 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 20.

Deux conditions d'éclairage ont été définies : éclairage de plots par les phares du véhicule dans lequel se trouve l'observateur, et éclairage par les codes, avec un éclairage en face d'un autre véhicule, arrêté à 20 m en arrière des plots, au moyen lui aussi de ses feux de croisement. On simule ainsi les deux situations types de l'éclairage par circulation de nuit.



Sur les 8 configurations présentées à un observateur donné, 4 comportent l'éclairage par feux de croisement, et 4 comportent l'éclairage par phares.

Les soirées d'essais ont été choisies en fonction de la météorologie pour tenter d'avoir un nombre équivalent d'observations sur chaussée sèche et sur chaussée humide.

Le plan expérimental consiste donc à considérer les variables :

- matériel (3 plots blancs et 3 plots verts)
- le type d'éclairage (codes-phares)
- la structure des configurations (homogène ou hétérogène)
- les conditions météorologiques.

Le choix des paramètres espacement entre les plots (1 à 7 m), temps d'observation (2 sec.), distance entre les plots et le véhicule fixe (20 m), pas d'avancement (25 m) ont fait l'objet d'une pré-expérience.

Les informations recueillies pour chaque observateur sont les suivantes :

- la distance maximale à laquelle il a détecté les plots en tant que points lumineux pour chaque configuration
- la distance à laquelle il a identifié la configuration en nombre et en couleur
- le type d'éclairage employé pour la configuration présentée (4 présentations en phares et 4 en codes)
- les conditions météorologiques (temps sec ou humide)
- la dénomination des couleurs telles qu'elles sont perçues par l'observateur. On dispose ainsi de la distance à laquelle la couleur vraie est désignée.

Dans l'expérience, 48 observateurs ont été testés sur les 8 configurations. Comme chaque matériel est présent dans 5, 6, 7 ou 8 configurations, on a en tout 571 mesures concernant uniquement la performance maximale de détection, et 384 mesures concernant la performance d'identification.

3.4. VEHICULES UTILISES POUR LES ESSAIS

3.4.1. Véhicule d'observation

On a utilisé dans l'expérience un véhicule R5 muni de son éclairage standard dont le réglage a été effectué avant les essais (phares Cibié 233 ref. lampes CRE 2).

Travaillant en conditions naturelles, l'état de propreté des optiques a été maintenu en cours d'essais. Seule a joué l'humidité extérieure due à la pluie ; cet effet est pris en compte globalement dans le facteur temps humide. La présence

à bord du véhicule, outre l'observateur placé sur le siège avant droit, d'un ou deux expérimentateurs, a pu déséquilibrer l'assiette du véhicule, et modifier l'orientation de ses feux. Pour compenser cet effet, on a lesté l'arrière du véhicule avec des sacs de sable, pour retrouver dans tous les cas la situation du véhicule chargé par trois personnes.

La durée d'éclairage de 2 secondes est déterminée automatiquement avec initiation manuelle à l'aide d'un dispositif de commande. *

3.4.2. Véhicule fixe

Il s'agit d'un véhicule R4 break muni de son éclairage standard dont le réglage a été également vérifié avant et pendant les essais (phares S.E.V. Marchal A.C.R.E2.473 207 A 14546, lampes SL E2 051).

Pour éviter les réflexions parasites sur les optiques pendant les observations en phares, on les cache à l'aide de deux cadres noirs.



Photo n° 9 : Véhicule fixe pendant les observations en phares

IV — ANALYSE DES DONNEES

4.1. DETECTION DES PLOTS

L'analyse de la performance maximale (plus grande distance de détection des plots) doit tenir compte des facteurs suivants :

- le type d'éclairage du véhicule : codes ou phares
- le type de matériel
- la couleur du matériel
- les conditions climatiques d'observation : temps sec ou humide.

La présentation des plots en configurations à une couleur (configuration homogène) ou à deux couleurs (configuration hétérogène avec plots blancs ou verts) a été nécessaire pour des raisons méthodologiques exposées plus haut. Les résultats concernant les configurations hétérogènes posent cependant un problème car dans certains cas un doute peut être émis quant à l'attribution de la performance à l'une ou l'autre couleur, dans le cas par exemple où un plot blanc est détecté mais signalé comme vert et vice versa.

* réalisation : M. PERROT, Laboratoire d'Electronique de l'ONSER.

Un contrôle concernant cette variable d'homogénéité-hétérogénéité doit donc être effectué avant de prendre en compte tous les résultats confondus. Pour ce faire, une analyse de variance sur un plan A2 X B2 a été effectuée, dans lequel on considère le facteur A à deux modalités : A1 homogénéité et A2 hétérogénéité et le facteur B à deux modalités B1 éclairage code, B2 éclairage phare.

On rappellera que dans ce qui va suivre, on considère la performance maximale de détection du plot, avec incertitude quant à sa couleur. La performance de la reconnaissance des plots par couleur et par configuration correspond à une phase ultérieure dans le processus de visibilité qui est traitée en 4.2.

Les résultats moyens sont donnés dans le tableau suivant :

Présentation	Eclairage	
	Codes (B1)	Phares (B2)
Homogène (A1)	198,14 N = 81	401,25 N = 100
Hétérogène (A2)	171 N = 206	399,05 N = 184

Tableau n° 2 : Distances moyennes de visibilité (en mètres)

L'analyse de 571 observations faite par 48 observateurs donne les résultats suivants, concernant les deux variables (analyse de variance à deux facteurs) :

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
A (hétérogénéité)	1	26 403	26 403	3,03	.08 NS
B (éclairage)	1	5 696 219,8	5 696 219,8	654	.00001
Interaction	1	155,6	155,6	0,02	N.S.
Erreur	567	4 932 720	8 697,9		
Total	570				

Le facteur de présentation homogène-hétérogène n'est pas significatif au seuil habituel de 0.05 et peut donc être considéré comme négligeable. On peut alors regrouper les données concernant les mesures faites en présentation homogène ou hétérogène.

L'analyse peut alors porter sur le facteur (à deux niveaux très significatifs), le facteur matériel (à 6 niveaux) et le facteur climatologique (2 niveaux : temps sec ou humide).

On a ainsi un plan d'analyse 6 x 2 x 2 donc 24 cases qu'on a rendu égales par échantillonnage à 16 mesures chacune (pour des raisons de commodité pour l'analyse statistique).

Le plan est le suivant :

couleur			blanc			vert		
n° matériel			1	2	3	4	5	6
éclairage véhicule	codes	temps sec						
		temps humide						
	phares	temps sec						
		temps humide						

Ce plan porte sur $16 \times 24 = 384$ mesures (sur un total de 571).

4.1.1. Résultats par catégorie (distances en m) - 384 mesures

		blanc			vert			M
		CYB (A1)	CTB (A2)	SB (A3)	CYV (A4)	FV (A5)	SV (A6)	
codes (B1)	sec	156,6	254,7	251,6	118,7	195,3	203	
	humide	117,2	165,6	221,9	100	142,2	168,7	175,4
phares (B2)	sec	435,9	434,4	489	262,5	425	456,2	
	humide	370,3	403	426,6	250	376,5	400	394
moyenne		272,3	314,4	347,3	182,8	284,7	307	

Tableau n° 3 : distances de visibilité par sous-catégorie

		blanc			vert			M
		CYB (A1)	CTB (A2)	SB (A3)	CYV (A4)	FV (A5)	SV (A6)	
codes		141,4	210	236,7	109,4	168,7	186	175,4
phares		403	418,7	457,8	256,2	401	428	394

Tableau n° 4 : distances de visibilité en fonction de l'éclairage

sec (C1)	301	344,5	370,3	190,6	310	329,7	307,7
humide (C2)	243,7	284,4	324,2	175	259,4	284,4	262

Tableau n° 5 : distances de visibilité en fonction de l'état météorologique

	Sec	Humide	Moyenne	Variation Sec - Humide
Codes	198,2	152,6	175,4	- 23 %
Phares	417,2	371	394	- 11 %
Moyenne	307,7	262		- 15 %

Tableau n° 6 : distances de visibilité par situation globale.

Ces tableaux donnent les valeurs moyennes de la performance des 6 matériels dans les 2 conditions d'éclairage x 2 situations météorologiques.

Le caractère significatif des différences entre moyennes prises 2 à 2 est indiqué dans le tableau de résultats de l'analyse de variance suivant :

Source	ddl	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Snédécour	Risque x
Total	383	7 867 128,9			
Facteur A (matériels)	5	1 013 378,9	202 675,8	38,57	< .0001
Facteur B (éclairage)	1	4 593 750	4 593 750	874,3	< .0001
Facteur C (météo)	1	201 666,6	201 666,6	38,38	< .0001
Interaction A x B	5	125 546,9	25 109,5	4,78	< .001
Interaction A x C	5	20 286,5	4 057,3	0,77	N.S.
Interaction B x C	1	6,5	6,5	0,001	N.S.
Interaction A x B x C	5	21 009	4 201	0,8	N.S.
Erreur	360	1 891 484,4			

Comparaisons partielles :

Blancs contre verts : F = 51,57 risque x < .001

Entre matériels :

entre blancs	{	A1 contre A2	F = 10,8	< .001
		A1 contre A3	F = 34,2	< .001
		A2 contre A3	F = 6,56	< .01
entre verts	{	A4 contre A5	F = 63,3	< .0001
		A4 contre A6	F = 94	< .0001
		A5 contre A6	F = 3,02	< .08

L'analyse de variance confirme ainsi les hypothèses suivantes :

1. Les 6 matériels expérimentés diffèrent les uns des autres de façon significative non seulement en comparant globalement les blancs aux verts, mais aussi en les prenant 2 à 2 (sauf dans le cas des matériels A5 et A6).

On a le classement suivant : — dans les blancs : 1er = SB
 2ème = CTB
 3ème = CYB
 — dans les verts : 1ers = SV et FV
 3ème = CYV

- Le facteur éclairage (codes-phares) est très significatif. La performance moyenne varie pour l'ensemble des matériels dans un rapport de 1:2 selon le type d'éclairage adopté (voir tableau 2). Mais cet effet de l'éclairage n'est pas le même selon les matériels (interaction des facteurs A et B) ; dans les blancs, le matériel CYB est plus sensible que le matériel SB par exemple.
- Le facteur météorologique est très significatif. Par temps humide (pluie ou seulement chaussée mouillée) la performance baisse selon les cas de 10 à 20 %, mais l'effet de l'humidité est surtout sensible quand on éclaire les plots en codes, avec éclairage de codes en face, comme le montre le tableau comparatif suivant :

		matériel					
		A1	A2	A3	A4	A5	A6
% de la réduction due à l'humidité	codes	29,2	35	12	15,8	27,2	17
	phares	15	7,2	12,8	4,7	11,4	12,3

Tableau n° 7 : % de réduction de la performance en fonction des conditions météorologiques et par type d'éclairage

4.1.2. Relation entre les caractéristiques photométriques des plots et la performance visuelle

4.1.2.1. C.I.L. et intensité lumineuse

C.I.L.

En prenant les valeurs du C.I.L. de façon conventionnelle à $V = 0$, $H = 0$ et $\alpha = 20'$, on étudie leur régression sur la performance visuelle dans les 4 catégories résultant du croisement des variables éclairage et conditions météorologiques (la même opération utilisant des valeurs du C.I.L. établies à $V = 5$ et $H = 5$ donne pratiquement les mêmes courbes).

Les courbes données figures 2, 3, 4 et 5 indiquent la relation entre les deux variables par le meilleur ajustement graphique (par rapport à 8 fonctions usuelles).

On remarque qu'en codes, le meilleur ajustement est la fonction $y = a + b \log x$ où y est la distance de visibilité et x est le C.I.L.

En phares, le meilleur ajustement est la fonction $y = \frac{x}{a + bx}$

Compte tenu du nombre restreint de niveaux de C.I.L. et de leur discontinuité dans l'intervalle des valeurs obtenues, il apparaît important de se demander si les courbes reliant le CIL à la performance visuelle n'ont qu'un intérêt illustratif ou si elles représentent une indication quantitative satisfaisante.

Si le problème ne se pose pas tellement dans le cas de l'éclairage en codes, puisque la performance visuelle a varié dans ce cas de 100 à 250 m, alors que de plus grandes distances n'ont pu être abordées, il apparaît en revanche utile de s'arrêter au cas de l'éclairage en phares, car plusieurs mesures ont été obtenues dans ce cas à la distance limite de 500 m, ce qui suggère que si on avait pu commencer les mesures de plus loin encore, on aurait obtenu des détections

à plus de 500 m. Dans ce cas, l'infléchissement marqué de la courbe devenant un plateau dans l'intervalle des C.I.L. allant de 116 à 573 serait peu valide, et en réalité la performance moyenne pour les valeurs élevées du C.I.L. serait supérieure à 500 m. On retrouverait alors éventuellement la fonction Log obtenue dans la condition de l'éclairage en codes.

Pour lever quelque peu cette incertitude quant à la validité de la courbe dans l'intervalle où nous disposons de trop peu de mesures de C.I.L., on a recherché la fonction reliant les différentes valeurs à l'exclusion de la valeur la plus forte du C.I.L. On a donc recherché le meilleur ajustement des 5 points correspondant aux C.I.L. de 4, 36, 40, 77 et 116.

On obtient avec 5 points en phares la même fonction $y = \frac{x}{a + bx}$ avec des coefficients très proches de ceux de la courbe à 6 points :

Figure n° 2

PHARES - SEC

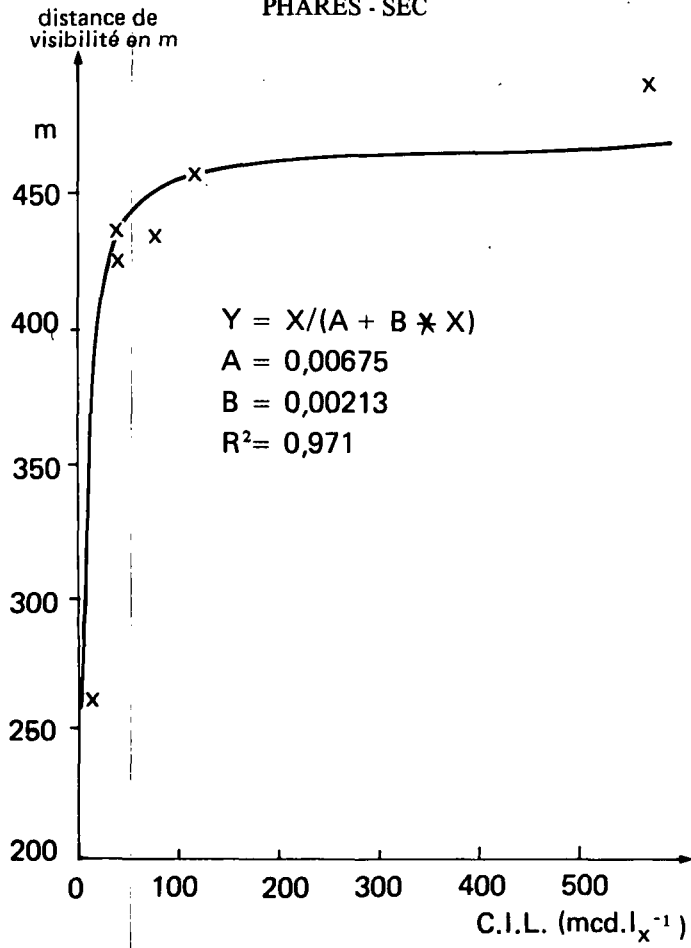


Figure n° 3

PHARES - HUMIDE

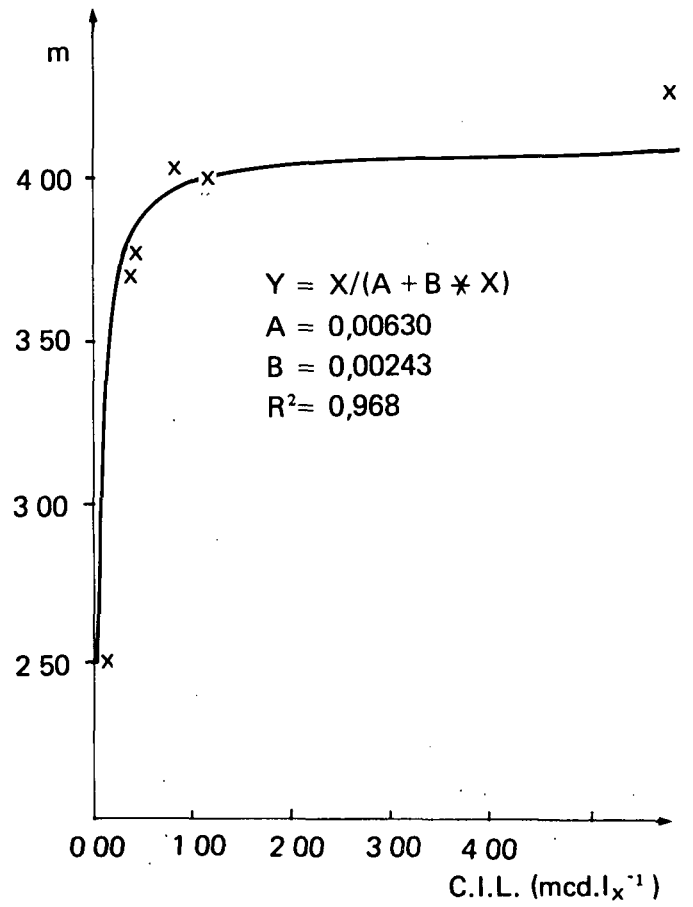


Figure n° 4

CODES - SEC

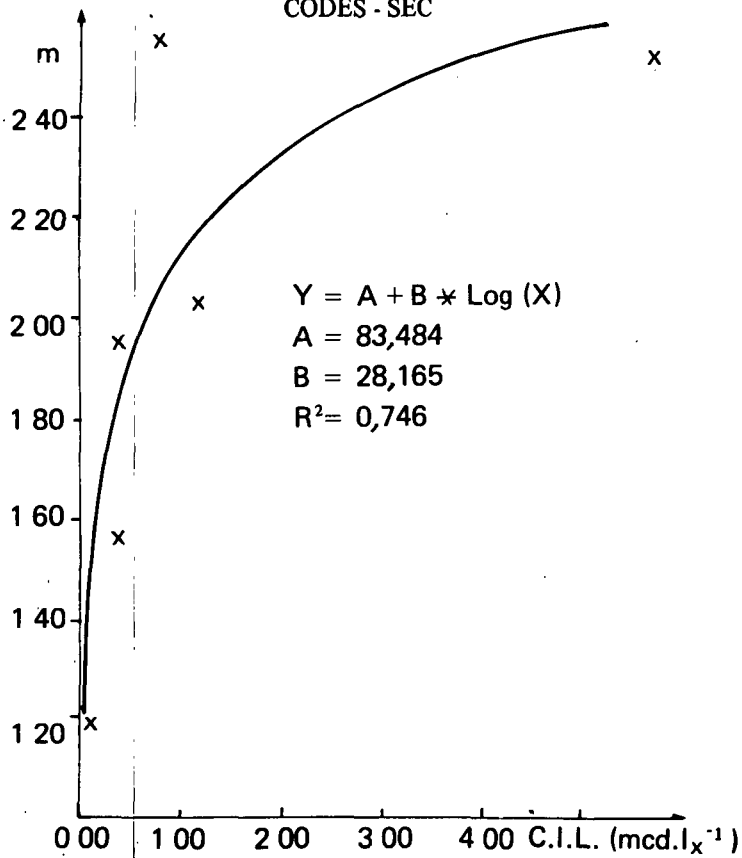
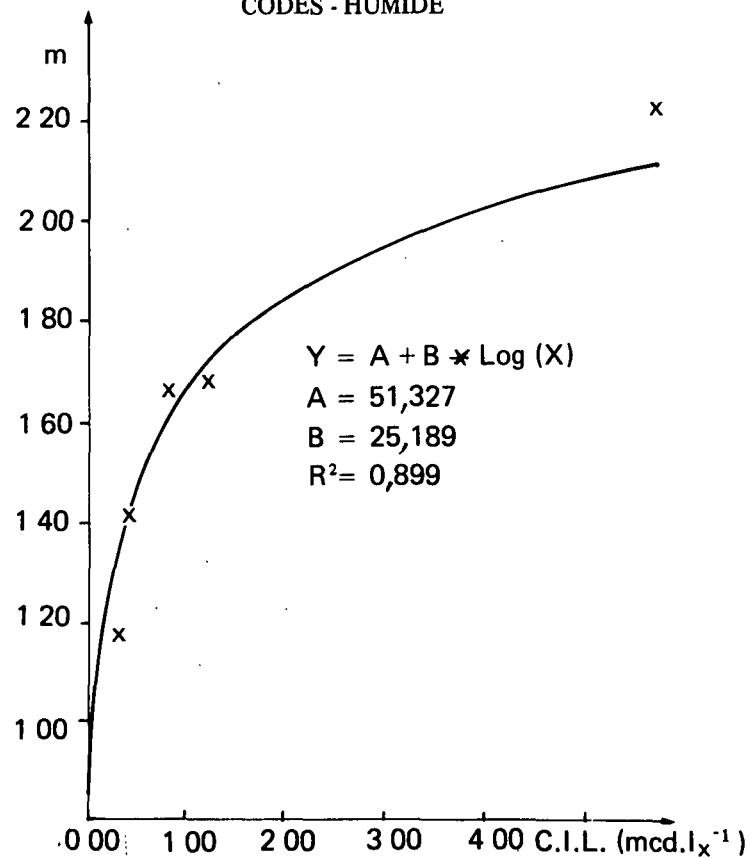


Figure n° 5

CODES - HUMIDE



— en condition temps sec, on a

6 points	5 points
$a = 0,00675$	$a = 0,00660$
$b = 0,00213$	$b = 0,00216$
$R^2 = 0,971$	$R^2 = 0,989$

— en condition temps humide, on a

6 points	5 points
$a = 0,00629$	$a = 0,00614$
$b = 0,00244$	$b = 0,00247$
$R^2 = 0,968$	$R^2 = 0,985$

En ce qui concerne la performance en condition d'éclairage par les codes, la comparaison des courbes ajustées sur les 6 ou les 5 points montre un écart un peu plus grand, bien que les fonctions restent semblables :

On trouve en temps sec les coefficients suivants de la fonction $y = a + b \log x$ reliant la mesure du C.I.L. à la distance de visibilité :

— temps sec :

sur 6 points	sur 5 points
$a = 85,931$	$a = 70,257$
$b = 27,913$	$b = 32,513$
$R^2 = 0,772$	$R^2 = 0,683$

— temps humide :

sur 6 points	sur 5 points
$a = 51,377$	$a = 64,746$
$b = 25,201$	$b = 20,825$
$R^2 = 0,900$	$R^2 = 0,813$

Bien que les différences soient plus prononcées que dans le cas de l'éclairage par phares, l'approximation reste sur le plan pratique satisfaisante, et permet d'affirmer que le 6ème point, à valeur du C.I.L. nettement supérieure à celle des autres 5 points, correspond cependant à la même famille et présente sur le plan de la perception visuelle la même relation psycho-physique.

On doit en effet noter que l'erreur dans les mesures de la performance était susceptible d'être introduite surtout dans le cas de l'éclairage par phares, par suite du biais produit par la présence d'une borne arbitraire pour les distances (à savoir 500 m disponibles). Or, dans cette condition, les fonctions en 5 et en 6 points sont très proches et on peut avec les 5 points déterminer assez précisément la fonction établie en ajoutant le 6ème point. Ceci suggère la possibilité d'effectuer une interpolation valide des valeurs comprises dans l'intervalle des C.I.L. où l'on ne dispose pas de mesures (soit entre 1.16 et 573).

On remarque enfin la valeur élevée des corrélations R entre la mesure physique et la mesure psychologique. La valeur du R^2 indiquée est de plus le pourcentage de la variance de la performance expliquée par la variance de la mesure corrélée.

Ces valeurs permettent d'utiliser les courbes obtenues expérimentalement dans un but prédictif et donner avec une précision satisfaisante une mesure de la performance visuelle attendue en fonction de la mesure physique sans introduire la procédure d'évaluation expérimentale.

Intensité lumineuse

Pour l'œil de l'observateur, seul compte l'éclairement reçu correspondant à l'intensité lumineuse émise par les plots. Pour connaître l'intensité lumineuse émise par chaque type de plot aux distances de visibilité trouvées, il faut mesurer l'éclairement reçu par les plots à ces distances. On calcule alors l'intensité lumineuse émise par un plot en multipliant son C.I.L. par l'éclairement reçu.

Les éclairements reçus par les plots sur chaussée sèche figurent en annexe 4 entre 25 et 500 m pour un pas de 25 m. Les éclairements sur chaussée humide n'ont pas pu, pour des raisons pratiques, être déterminés. Comme pour les distances de visibilité et les C.I.L., les régressions entre les éclairements mesurés et les distances sont ajustées par rapport à 8 fonctions usuelles. Le meilleur ajustement pour l'éclairement en codes et en phares est représenté sur les figures n° 6 et 7. Ces 2 courbes sont de la forme $y = a + b \log x$, x étant la distance en m. et y le log de l'éclairement multiplié par 100.

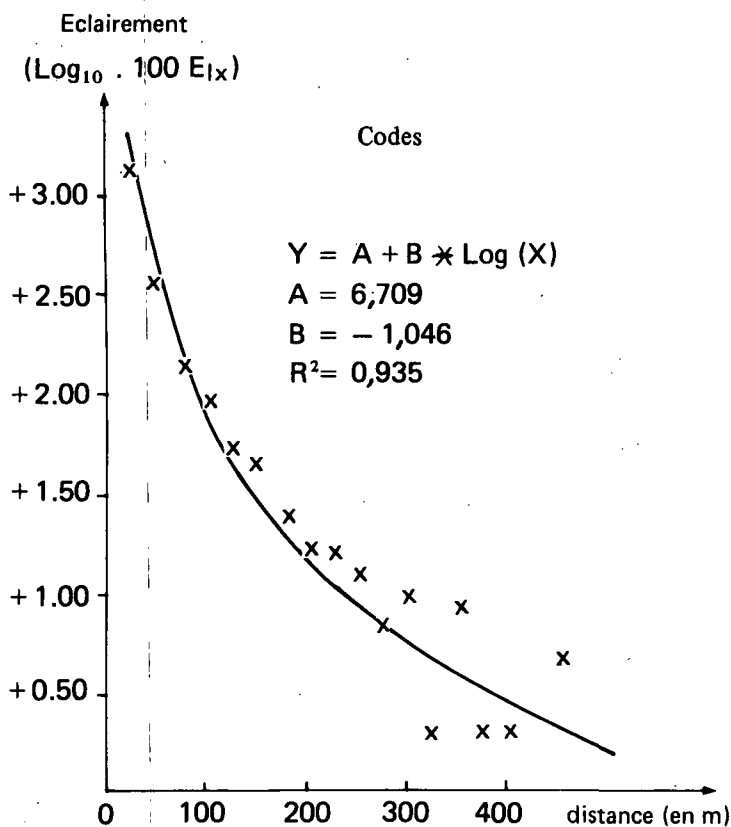


Figure n° 6

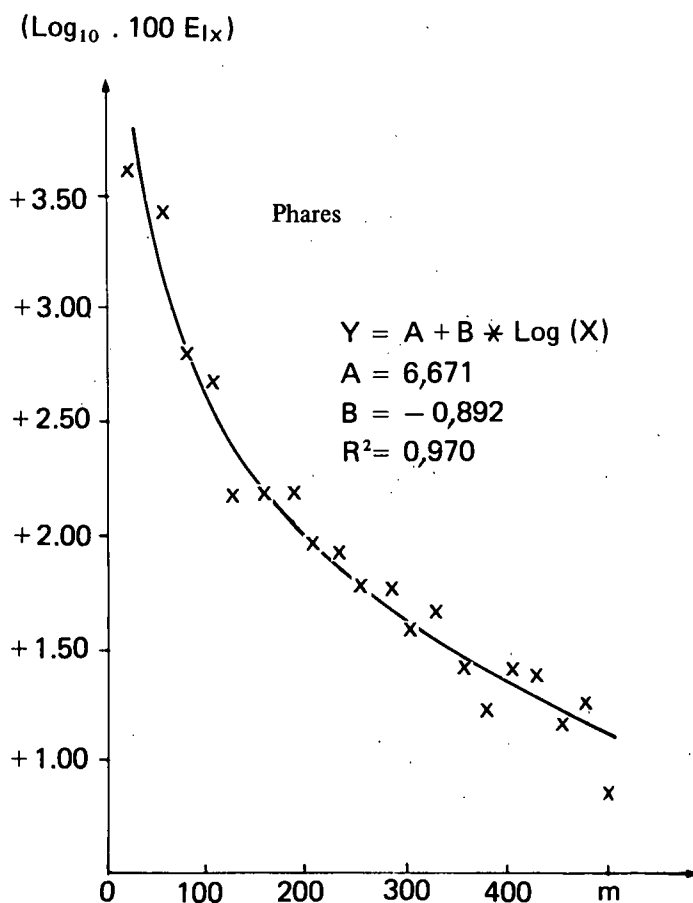


Figure n° 7

Pour calculer les intensités lumineuses émises par les plots, nous procédons comme suit :

- calcul des distances de visibilité théoriques à partir des C.I.L. mesurés en laboratoire (tableau 1) et des équations des courbes ajustées représentées sur les figures n° 2 et 4.

- calcul des éclairagements théoriques reçus par les plots à partir de ces distances de visibilité théoriques et des équations des courbes ajustées représentées sur les figures n° 6 et 7.
- calcul de l'intensité lumineuse théorique émise connaissant le C.I.L. du plot et l'éclairage théorique reçu.

L'utilisation des courbes ajustées permet de s'affranchir en partie des incertitudes expérimentales.

Le tableau 8 donne ces différentes valeurs théoriques ainsi que les intensités lumineuses correspondantes.

type de plot	C.I.L. H = 0 V = 0 $\alpha = 20'$	codes			phares		
		distance de visibilité théorique en m	éclairage théorique en lux	intensité lumineuse théorique en mcd	distance de visibilité théorique en m	éclairage théorique en lux	intensité lumineuse théorique en mcd
CYV	4	123	0,469	1,88	262	0,498	1,99
CYB	36	184	0,178	6,41	431	0,179	6,44
FV	40	187	0,171	6,84	435	0,176	7,04
CTB	77	206	0,135	10,4	451	0,163	12,5
SV	116	217	0,119	13,8	457	0,159	18,4
SB	573	262	0,076	43,5	467	0,152	87,1

Tableau n° 8 : Intensités lumineuses émises par les plots à la distance maximale de visibilité

On peut alors tracer, sur chaussée sèche, en codes et en phares, les courbes des intensités lumineuses émises en fonction des distances de visibilité des plots. Ces 2 courbes forment la figure n° 8 avec en abscisse le Log de l'intensité lumineuse.

L'ambiance lumineuse des plots étant tout à fait différente pour les observations en codes et en phares, il semble donc normal d'avoir 2 courbes distinctes : la performance visuelle en phares est supérieure pour une même intensité lumineuse grâce au meilleur contraste (la luminance de fond au niveau des plots étant plus faible en phare).

Pour l'observation en codes avec un véhicule en codes en face, la distance de détection varie linéairement en fonction du logarithme de l'intensité lumineuse. Ceci correspond à une constante près au comportement de l'œil vis à vis des éclairagements, ce qui prouve qu'il n'y a pas de phénomène de gêne à la détection.

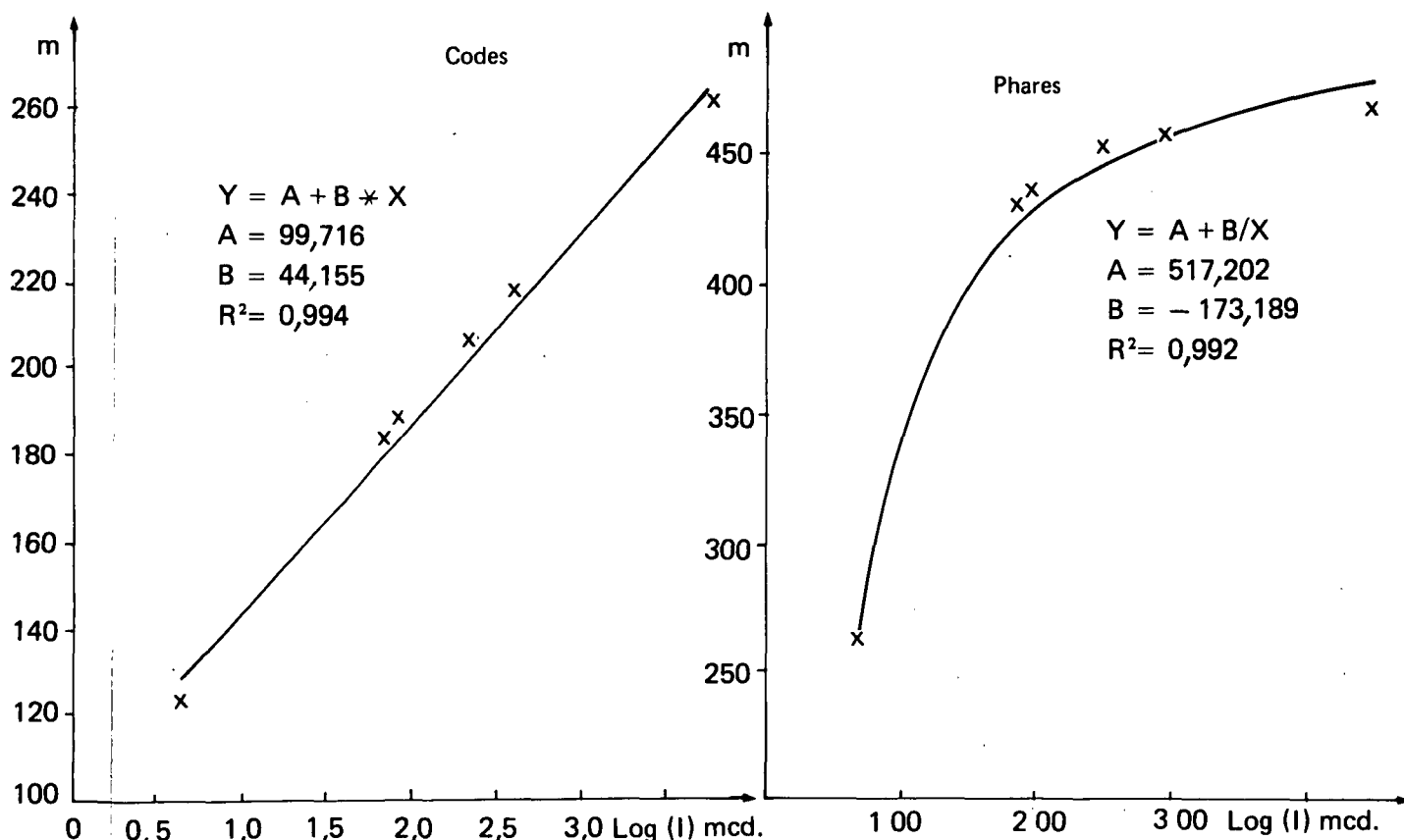


Figure n° 8 - Distance maximale de visibilité des plots par temps sec et intensité lumineuse

Pour l'observation en phares, les distances de visibilité sont plus grandes (la plus petite distance en phares correspond à la plus grande distance en code), la diminution progressive de la pente de la courbe au-delà de 350 m doit provenir de la perte d'acuité visuelle.

En effet, à cette distance les plots apparaissent sous un angle solide de 1' ce qui correspond sensiblement à l'acuité visuelle habituelle de cette classe d'âge (militaires du contingent) (11).

L'évolution du contraste entre les plots et leur environnement avec les distances d'observation intervient certainement sans que l'on puisse le caractériser numériquement.

4.1.2.2. Confusion des couleurs

Le tableau 5 donne le nombre de cas où une confusion de couleur s'est produite et la distance à laquelle la vraie couleur a été reconnue. Ces mesures concernent uniquement les configurations homogènes sur lesquelles on peut se prononcer sans ambiguïté.

On remarque que pour l'essentiel, les matériels blancs donnent lieu à une confusion avec le vert et réciproquement bien qu'on observe une douzaine de cas où les plots blancs ou verts ont été donnés pour bleus ; quelques cas également où ces couleurs ont été vues comme du rouge-orangé ont été observés.

L'erreur sur la couleur se maintient parfois même à faible distance surtout sous l'éclairage en codes. Il semble donc que le blanc et le vert employés ne se distinguent pas toujours assez nettement et que leur usage simultané risque de ne pas être efficace à une distance suffisante.

Si l'on essaie d'interpréter ces résultats à partir des points représentatifs de la couleur donnés figure 1, on s'aperçoit que tous les plots verts se situent du même côté du domaine de couleur défini, vers les jaunes. Par ailleurs, la lumière émise par les feux des véhicules étant jaune, il est normal d'obtenir un pourcentage de confusion assez élevé entre le vert et le blanc comme l'illustre le déplacement des points représentatifs des 6 plots sur cette même figure selon que l'on utilise l'illuminant A ou une source jaune.

matériel	CYV		FV		SV		CYB		CTB		SB	
	phare	code	phare	code	phare	code	phare	code	phare	code	phare	code
bleu	1	1	2		3	1	1		2		1	1
blanc ou jaune	3	3	8		3	4						
orange ou rouge	1	1	1				1	1	1		1	2
vert							7	3	5	8	1	4
indéterminé		1			1	1	1					1
nombre total	5	6	11		7	6	10	4	8	8	3	8
% (sur 48)	10,5	12,5	23		14,6	12,5	21	8,3	16,7	16,7	6,2	16,7
distance moyenne d'identification de la couleur	170	46	286		278,6	179	247,5	118,7	265,6	103	408	187,5

Tableau n° 9 : Distances d'identification de la couleur des plots
(dans les rangées : la fréquence des observations avec une erreur sur la couleur)

4.2. DISTANCES D'IDENTIFICATION DES PLOTS - PERCEPTION DES CONFIGURATIONS

Dans une première analyse des données concernant les 6 types de plots rétro réfléchissants, on a pris en considération la performance maximale des 48 sujets. Il s'agit donc des distances maximales auxquelles les plots sont détectés dans les différentes configurations et conditions expérimentales.

Une deuxième catégorie de mesures concerne cependant la performance visuelle fine, par laquelle les observateurs non seulement voient des plots, mais les identifient. Cette étape de la performance correspond à un moment où une information plus précise est disponible, et notamment la présence de plots de couleurs différentes, et à la perception d'un segment délimité (d'un nombre fini de plots), alors que la première étape de la perception concerne seulement une présence de points lumineux blancs ou verts.

Une telle étape de perception fine est à prendre en considération si l'on veut utiliser des plots de couleurs différentes et si l'on veut marquer avec des plots des sites précis, tels qu'une intersection, un virage brutal, etc.

La mesure de distance d'identification des configurations concerne celles constituées d'une seule couleur (matériel homogène). En effet, pour les configurations hétérogènes, la distance mesurée est en général celle correspondant au

matériel le moins visible parmi les deux types mélangés. On a cependant ajouté dans les résultats analysés les données des configurations 13, 14, 15 où le matériel FV est associé au matériel CTB en éclairage codes, car on ne dispose pas de données homogènes pour ce matériel et pour cette condition. Comme le matériel vert est visible de moins loin que le matériel blanc, ces résultats ne sont pas susceptibles d'avoir subi un biais positif dû à la présence du matériel blanc.

Les résultats moyens sont donnés dans le tableau 10 :

n°	condition matériel	éclairage codes		éclairage phares		moyenne par matériel
		temps sec	temps humide	temps sec	temps humide	
1	CYV	58,3 (9)	70,8 (6)	218,7 (8)	156,2 (8)	127,4 (31)
2	SV	158,3 (9)	146,4 (7)	442,5 (10)	375 (6)	285,1 (32)
3	FV	160,9 (16)	95,3 (16)	337,5 (8)	335,7 (7)	194,7 (47)
4	CYB	111,1 (9)	89,3 (7)	371,4 (7)	255,6 (9)	203,9 (32)
5	CTB	208,3 (9)	103,6 (7)	413,9 (9)	403,6 (7)	285,9 (32)
6	SB	219,4 (9)	196,4 (7)	480 (10)	375 (6)	325 (32)
moyenne		153,7 (61)	114 (50)	384,6 (52)	307,6 (43)	$\bar{N} = 206$

Tableau n° 10 : Identification des configurations homogènes - Distances de visibilité (m)
(le nombre de mesures par cas est entre parenthèses)

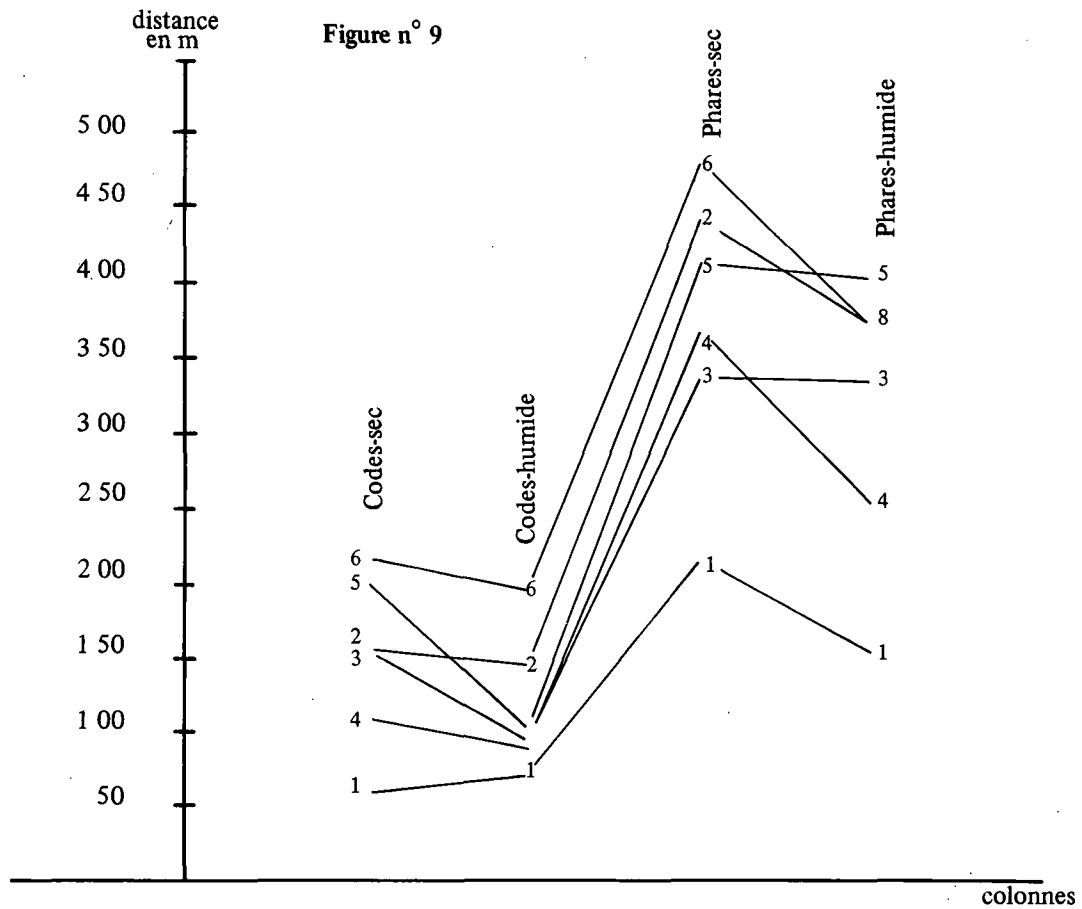
En regroupant les données, on obtient les valeurs globales suivantes :

	éclairage codes	éclairage phares	moyenne
plots verts	119 (63)	157,8 (48)	135,8 (111)
plots blancs	313,3 (47)	385,4 (48)	348,3 (95)
moyenne	202 (110)	271,6 (96)	N = 206

Tableau n° 11 : Distances de visibilité par type d'éclairage et par couleur de matériel
(nombre des mesures entre parenthèses)

Les données du tableau 10 sont représentées pour la commodité de la comparaison sur la figure 9. Les matériels sont numérotés de 1 à 6 suivant les rangées du tableau 10, et présentés sur 4 colonnes, correspondant aux conditions d'éclairage x météo.

La figure 9 met en évidence l'effet, d'une part de l'éclairage (codes : colonnes 1 et 2 ; phares : colonnes 3 et 4) et l'effet beaucoup plus réduit des conditions météorologiques (colonnes 1 et 3 : temps sec ; colonnes 2 et 4 : temps humide). La figure 9 permet de voir le classement relatif des 6 matériels dont le n° 6 (matériel SB) est le plus visible, suivi du n° 5 (CTB), alors que le n° 1 (CYV) est nettement moins efficace.



Les résultats numériques ont été soumis à une analyse de variance A6 x B4 qui a confirmé le caractère significatif des différences constatées entre matériels et entre conditions d'éclairiment :

source	d.l	somme des carrés	carré moyen	F	significatif au seuil de
matériels (types de plots)	5	723 233,4	144 646,7	32,4	< 0,00001
conditions	3	2 336 607	778 869	174,6	< 0,00001
interaction	15	21 624,7	1 441,6	0,3	N.S.
erreur	182	811 986,2	4 461,4		
total	205	3 893 451,3			

Une analyse plus détaillée permet ensuite de comparer les données partielles :

- la comparaison entre matériels blancs et verts (rangées 1, 2, 3 d'une part, 4, 5, 6 d'autre part dans le tableau 10 donne un $F_{1,182} = 54$ significatif au seuil de 0,00001.
- la comparaison entre l'éclairage codes et l'éclairage phares (colonnes 1, 2 contre colonnes 3 et 4) donne un $F_{1,182} = 512$ significatif à 0,00001.

- la comparaison des résultats en éclairage codes par temps sec, à ceux par temps humide (colonne 1 contre colonne 2) donne un $F_{1,182} = 9,7$ significatif à 0,002.
- la comparaison des résultats en éclairage phares par temps sec à ceux par temps humide (colonne 3 contre colonne 4) donne un $F_{1,182} = 31,3$ significatif à 0,00001.

Ainsi le facteur éclairage est mis en évidence dans les deux conditions climatologiques.

V - DISCUSSION DES RESULTATS

5.1. COMPARAISON AVEC LES ETUDES ETRANGERES

On dispose de très peu de mesures d'efficacité des plots, et les seules données qui ont été publiées sur ce thème sont les études de visibilité de cibles faites par HILLS (1976) (12), et dans lesquelles on a surtout considéré le contraste des luminances et l'aire de l'objet réfléchissant le faisceau de lumière. HILLS établit en laboratoire des courbes et définit la fonction reliant l'écart minimum des luminances objet-fond et l'aire de l'objet. A partir de ces données, une estimation des distances de visibilité de plots est alors effectuée (figure 10), en dérivant les courbes et en prenant les conventions suivantes :

- l'aire projetée du réflecteur du plot est de 80 x 10 mm
- l'éclairage du véhicule et du type feux de croisement anglo américain montés à 600 mm au-dessus de la chaussée et dirigés vers le bas avec un angle vertical de $1/3^\circ$.
- il n'y a pas d'éclairage opposé
- l'apport de luminance à la chaussée dû à l'éclairage du véhicule est négligé.

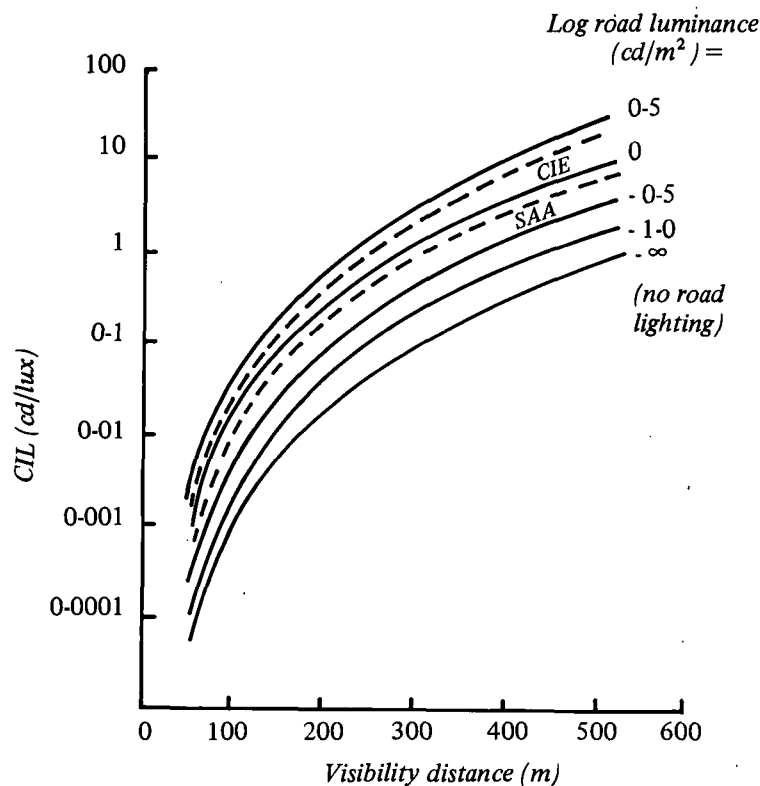


Figure n° 10 : Variation prédite des distances de visibilité de plots en fonction de leur C.I.L. et de la luminance de la chaussée (d'après HILLS 1976)

Dans ces conditions, la relation entre le C.I.L. du plot et la performance visuelle en fonction des différents niveaux de luminance de la chaussée est donnée dans la figure 10.

Ces courbes sont à comparer avec celles obtenues expérimentalement, bien que les conditions d'éclairage soient différentes.

En codes, on ne peut comparer les performances pratiques et théoriques puisque dans le cas de HILLS il n'y a pas d'éclairage opposé. On note cependant une bonne similitude dans les courbes, les écarts s'expliquant par les deux situations différentes.

L'évaluation de façon plus objective et plus directement liée à la performance de conduite a été effectuée sur divers matériels rétro réfléchissants. ROWAN (13) avait déjà comparé quatre types de matériels par temps clair et par temps de pluie sur le plan de la visibilité. Il donne les résultats suivants en codes :

Matériel	Distance de visibilité (m) avec le dispositif réflecteur à :			
	2 m à gauche ou à droite des feux		0,5 m à gauche ou à droite des feux	
	temps clair	pluie	temps clair	pluie
1. Billes de verre incluses dans une peinture jaune	70	50	95	60
2. Enduit réflecteur jaune	60	30	82	60
3. Enduit réflecteur blanc	68	30	88	63
4. Réflecteur prismatique (16 mm)	240	163	315	236

Cette étude, bien que non effectuée sur des plots, est intéressante par l'effet réducteur de la performance due à la pluie. L'ordre de grandeur est comparable à celui que nous avons trouvé sur les plots en codes.

L'effet de l'éclairage d'un véhicule venant de face sur la visibilité de plots a été évalué par YU (14). En feux de croisement, on mesure la distance de détection de quatre matériels, dans deux conditions d'ambiance nocturne, et avec ou sans la présence d'un éclairage de véhicule venant de face. Les résultats de cette étude sont les suivants :

Matériel	Ecart à gauche ou à droite des feux (m)	Distance de détection			
		nuit claire		nuit sombre	
		sans feux en face	avec feux en face	sans feux en face	avec feux en face
billes de verre en bande	3	310	192	160	100
billes 3M sur feuille acrylique	3	280	176	154	92
Stimsonite 88	3	187	136	108	82
peinture en bande avec billes de verre	3	158	108	83	51

Ces résultats montrent l'effet des conditions météorologiques d'une part, et des conditions d'éclairage d'autre part sur la performance visuelle.

Dans notre cas, la perte expérimentale moyenne de distance de détection lorsque l'on passe des phares sans véhicule en face aux codes avec un véhicule en face est de 52 % sur chaussée sèche et de 59 % sur chaussée humide ; pour YU, elle est de 34 % (nuit claire et nuit sombre confondue) soit une valeur plus faible sans doute due au fait que le réglage des feux du véhicule transportant les observateurs n'a pas été modifié comme dans notre cas. Rappelons que YU a seulement travaillé sur chaussée sèche.

Signalons enfin que MULLOWNEY (15) a effectué une mesure de distance de visibilité de délinéateurs médians dans diverses conditions d'éclairage et météorologique. Le résultat le plus important de son étude est que la visibilité s'améliore par temps de pluie à cause du nettoyage des catadioptrés.

5.2. DISCUSSION DE LA METHODE

Par rapport aux différentes études portant sur un sujet similaire, et faut d'évaluations précises de plots rétro réfléchissants menées par ailleurs, on peut noter que l'étude décrite dans ce rapport regroupe les variables non prises en compte simultanément jusqu'à maintenant :

- gamme de matériel étendue et comparaison de deux couleurs de plots
- évaluation de la performance dans deux conditions d'éclairage réalistes et deux conditions météorologiques fondamentales
- expérience réalisée sur un échantillon d'observateurs important
- combinaison dans la même expérience d'une mesure de performance visuelle avec son corrélat physique (intensité lumineuse)

On peut ainsi considérer que les résultats obtenus apportent une information plus précise et plus détaillée en ce qui concerne l'efficacité visuelle de différents plots rétro réfléchissants.

Il faut cependant ajouter que cette expérience s'est déroulée dans des conditions favorables à la détection des plots car les observateurs sont jeunes (donc ayant une bonne acuité visuelle moyenne). La tâche qui leur est demandée est simplifiée (détection de plots mais pas de tâches annexes). Enfin l'ambiance lumineuse dans laquelle les plots doivent être détectés a été particulièrement favorable par suite de l'absence de lumières parasites, d'éclairage environnant ou de celui d'autres véhicules, en dehors des deux véhicules expérimentaux. Les résultats obtenus peuvent donc être considérés comme une limite haute de la performance visuelle.

5.3. QUELLES EXIGENCES RETENIR POUR LE C.I.L. ET LA COULEUR ?

Pour le C.I.L.

Les figures 2, 3, 4 et 5 montrent que l'accroissement de la distance de visibilité des plots diminue lorsque le C.I.L. augmente. Cet accroissement tend pratiquement vers zéro au-delà de 100 mcd.lx^{-1} pour les phares (figures 2 et 3).

A titre d'exemple, le tableau 12 donne les distances de visibilité théoriques

C.I.L. en mcd.lx^{-1}	Distances de visibilité en m			
	phares sec	phares humide	codes sec	codes humide
5	287	270	129	92
10	356	326	148	109
25	415	372	174	132
50	440	390	194	150
75	449	396	205	160
100	453	400	213	167
250	462	406	239	190
500	465	408	258	208

Tableau n° 12 : Distances de visibilité de plots selon le C.I.L. et les conditions d'observation

pour divers C.I.L. dans les 4 conditions d'observation étudiées. Rappelons que ces distances correspondent à des conditions d'éclairage et d'observation bien définies (elles seraient différentes mais certainement voisines pour d'autres projecteurs de véhicules ou pour une autre position du véhicule opposé pour les codes).

Si l'on considère les conditions d'observation les plus défavorables : codes et chaussée humide, on s'aperçoit que la distance de détection passe :

- de 92 à 150 m lorsque le C.I.L. est multiplié par 10
- de 92 à 208 m lorsque le C.I.L. est multiplié par 100

L'exigence actuelle du C.I.L. de 50 mcd.lx^{-1} paraît largement satisfaisante puisqu'elle permet de détecter les plots à 150 m dans les plus mauvaises conditions de l'expérience, ce qui représente environ 70 % de la distance à laquelle sont détectés les plots qui ont le C.I.L. moyen le plus élevé (573 mcd.lx^{-1}). Si l'on voulait la diminuer, il faudrait, sur les bases de cette étude, prendre en considération la répartition des éclairages fournis par les différents modèles de projecteurs équipant les véhicules et les distances de visions nécessaires pour une bonne sécurité dans la conduite.

Pour la couleur

Le pourcentage relativement élevé de confusion de couleur (cf. 4.1.2.2.) prouve que dans les conditions actuelles (lumière jaune émise par les projecteurs des véhicules) le choix du vert n'est pas judicieux.

Si l'on souhaite cependant maintenir le vert pour les plots, l'une des deux actions suivantes permettrait d'améliorer la situation actuelle :

- remplacement des feux jaunes des véhicules par des feux blancs
- limiter le domaine de couleur du vert sur la droite (cf. figure 1). Cette mesure n'est pas compatible avec la nécessité d'avoir un C.I.L. élevé, elle devrait sans doute s'accompagner d'une diminution de l'exigence pour le C.I.L.

CONCLUSIONS

L'utilisation de plus en plus large des plots rétro réfléchissants pour le marquage des chaussées en complément ou à la place de la signalisation horizontale traditionnelle, implique que l'on dispose à propos de ces matériels de données précises sur la performance nocturne qu'ils permettent aux usagers.

Il apparaît en effet que le principal avantage des plots est d'être visible la nuit même par temps humide, alors que sous l'effet de la pluie, la visibilité de la signalisation traditionnelle tend à disparaître. Or, la circulation de nuit et par temps humide pose de réels problèmes de sécurité, comme le montrent diverses études, par exemple SABEY (16), selon lequel il y a en Grande-Bretagne une augmentation du taux d'accident de 20 % la nuit et par temps de pluie, par rapport au temps sec, et que la moitié de cette augmentation est liée à la visibilité. Le nombre des accidents à un seul véhicule est plus élevé la nuit (17) et bien que d'autres facteurs que la visibilité puissent intervenir (par exemple la glissance), il apparaît probable que la mauvaise visibilité de la route et de sa configuration joue un rôle fondamental dans l'occurrence d'accidents.

Il était par conséquent important, par rapport aux divers types de plots proposés par les fabricants, d'étudier leur efficacité sur le plan visuel et d'étudier le rapport entre leur performance et leurs qualités photométriques, de manière à pouvoir proposer des normes reposant sur des expérimentations bien définies. Il y a en effet sur le marché des plots rétro réfléchissants ayant des propriétés physiques très différentes sans que l'administration ne dispose en contrepartie de critères d'évaluation pour fonder ses exigences.

L'étude entreprise par l'ONSER et le LCPC a donc eu le double but d'évaluer plusieurs matériels disponibles, en particulier quant à leur visibilité par temps de pluie, et de relier la performance visuelle à un indice physique dénué d'ambiguïté.

Cette étude a permis ainsi de mettre en valeur les faits suivants :

1°) Les plots blancs sont toujours supérieurs aux plots verts du même modèle sur le plan de la visibilité comme le laissent prévoir les mesures de C.I.L. En moyenne, et toutes conditions confondues, les distances de détection sont :

plots blancs : CYB = 272 m, SB = 347 m, CTB = 314 m

plots verts : CYV = 183 m, SV = 307 m, FV = 285 m

Les distances d'identification des configurations sont respectivement :

plots blancs : 204, 325, 286 m

plots verts : 127, 285, 195 m

Ce résultat signifie que si des plots blancs et verts sont employés conjointement, pour marquer des voies divergentes par exemple, avec un aller tout droit et un virage de sortie, la configuration d'ensemble montrant notamment la zone de divergence ne sera perçue par l'usager qu'à la distance correspondant aux plots verts, alors qu'auparavant il n'aura détecté que le marquage par plots blancs d'où un certain risque de confusion.

Ce risque est d'autant plus grand que les confusions entre couleurs ne sont pas rares (voir tableau 9). Le vert est donné pour blanc ou bleu, le blanc est confondu avec le vert, le bleu ou l'orangé. Pour rendre le vert plus distinct du blanc, il faudrait prendre un vert plus éloigné du jaune que ne l'est le vert actuel, c'est-à-dire prendre un vert foncé. Il est évident cependant qu'un tel vert sera encore moins visible. C'est en fait le choix du couple blanc-vert qui doit être mis en cause, car d'autres combinaisons de couleurs pourraient donner lieu, en dehors de tout autre considération, à une meilleure discrimination nocturne (par exemple, bleu et rouge).

- 2°) En dehors du facteur « couleur », l'expérience met en évidence les différences hautement significatives entre matériels, dans les différentes conditions d'éclairage. On note cependant que les six matériels ont une performance élevée, par rapport aux distances de référence que sont par exemple les distances d'arrêt aux vitesses habituelles. En feux de croisement et par temps sec, les plots sont visibles au moins à 120 m dans le cas le moins bon. Par temps humide, ils le sont à 100 m. En feux de route, les distances de visibilité sont multipliées par deux par temps sec et par temps humide le facteur multiplicateur est encore plus élevé.

D'une façon générale l'effet de l'humidité, bien qu'important, ne réduit pas l'efficacité des plots considérés au-delà du minimum que serait la distance d'arrêt. Dans les conditions expérimentales étudiées, et compte tenu des conditions météorologiques éprouvées, la réduction de la visibilité par la pluie varie en moyenne de 5 à 15 % en phares et de 12 à 35 % en codes.

L'identification fine des configurations est diminuée de 26 % en codes et de 20 % en phares par l'effet de la pluie et en comparaison avec le temps sec.

La supériorité des plots sur le marquage par bandes en conditions d'éclairage nocturne et par temps de pluie est ainsi démontrée car dans une situation équivalente, les marquages conventionnels sont pratiquement effacés sous la couche d'eau et sous l'effet d'écran diffracteur que la pluie est susceptible de créer devant les phares du véhicule.

- 3°) Dans la comparaison de la performance des six types de plots rétro réfléchissants que l'on a étudiés, la mise en rapport de la mesure comportementale et de la mesure physique définissant le pouvoir rétro réfléchissant des matériels a permis de déterminer un seuil pratique qui pourra servir de norme pour l'homologation. Les courbes ainsi construites dans les conditions de l'expérience, indiquent que tant pour l'éclairage par feux de route qu'en feux de croisement, il y a un seuil pour la caractéristique physique au-delà duquel la performance visuelle ne croît plus mais tend vers un plateau. Ce seuil, correspondant sensiblement au C.I.L. de 50 mcd.lx^{-1} est par conséquent un indice physique à prendre en compte dans toute définition d'un cahier des charges concernant les plots. Comme de nombreux matériels présentent des valeurs nettement supérieures, un résultat pratique de l'expérience est qu'il est plus avantageux de prendre en considération des critères de coût, de solidité ou de commodité de mise en œuvre, que d'exiger une caractéristique photométrique excessive à l'état neuf dont l'intérêt pratique est limité.

Une remarque est à faire en ce qui concerne la différence entre plots blancs et verts, sur le plan photométrique : ce qui fait que les plots verts sont moins visibles que les blancs, ce n'est pas à proprement la couleur, mais la valeur moindre du C.I.L. des plots verts. Par contre, à caractéristique physique égale, la performance visuelle d'un plot vert équivaut à celle d'un plot blanc. Ceci est illustré par les tableaux 1 et 3 où l'on voit par exemple que le matériel CYB et le matériel FV, ayant respectivement un C.I.L. de 36 et 40 mcd.lx^{-1} sont visibles respectivement à 272 et 284 m en moyenne.

- 4°) La performance visuelle ainsi étudiée dans différentes situations, et notamment dans le cas de l'éclairage par feux de croisement, avec éclairage identique en face, simulant une situation caractéristique de la conduite automobile permet d'avoir une idée précise de l'efficacité des plots rétro réfléchissants et suggère leur intérêt pratique en complément avec la signalisation horizontale conventionnelle. Il convient cependant d'apporter quelques restrictions à nos conclusions sur ce sujet pour les raisons suivantes :

- bien qu'effectuées sur un échantillon relativement important de sujets (en comparaison avec YU par exemple, qui teste 12 conducteurs), nos mesures sont entachées d'un biais positif car les observateurs ont été tous des jeunes gens, dont l'acuité visuelle moyenne doit être supérieure à celle de la population globale des conducteurs.
- l'expérience s'est déroulée dans des conditions favorables à la détection : l'observateur testé n'avait que la tâche perceptible à exécuter, sans aucune activité perturbatrice. La détection s'est déroulée dans un site sans interférences ni lumières parasites comme on peut en trouver sur la route, où la vision est gênée non seulement par les autres véhicules, mais aussi par l'éclairage public, les lumières des habitations, etc. Les résultats obtenus doivent donc être considérés comme une limite supérieure et dans la réalité, on doit s'attendre à une performance moyenne moindre, mais que l'on peut difficilement évaluer. Dans ces conditions, il apparaît utile de considérer non seulement la performance moyenne, correspondant à celle de la moitié d'un échantillon, mais

aussi à celle obtenue par une proportion plus élevée d'observateurs. Il est courant d'employer à ce propos le critère du 85^e percentile, qui donne la performance obtenue par 85 % des observateurs. La détermination de cette valeur, à partir de courbes de performance en fréquence cumulée, donne lieu à des résultats dont la portée pratique est peut-être plus évidente que les valeurs moyennes. Des résultats comparés par matériel, par condition d'éclairage et par condition météorologique, sont donnés dans l'annexe 5.

On voit dans ce cas qu'en éclairage par codes, le matériel CYV présente une performance insuffisante si on tient compte des distances d'arrêts des véhicules à des vitesses comme 90 à 110 km/h. Or, il est à rappeler qu'on a utilisé dans l'expérience des plots neufs, propres, et dans un état parfait, alors que sur la route, on risque de trouver des plots usés, cassés, ou recouverts de boue et de poussière.

5°) Il résulte de l'ensemble des données recueillies et des remarques qu'on a pu faire à propos de cette étude, que la démarche expérimentale utilisée a permis d'avoir une meilleure connaissance de ce type de matériel de signalisation. On peut en conclure qu'une telle démarche pourra être entreprise pour étudier d'autres matériels :

- plots rétro réfléchissants de couleurs différentes que le blanc ou le vert (pour des raisons exposées plus haut)
- autres matériels rétro réfléchissants, tels que les délinéateurs
- comparaison de divers systèmes de signalisation basés sur des technologies différentes (matrice de lampe, fibre optique, film rétro réfléchissant, caisson éclairé de l'intérieur . . .)

Il pourra être envisagé d'étudier d'autres conditions de visibilité restreinte, telle que le brouillard simulé, et l'effet de l'humidité où l'on puisse d'une part déterminer une graduation quantifiée plutôt qu'une dichotomie élémentaire « sec-humide », et où d'autre part on puisse séparer l'effet de surface de la pluie (film d'eau) et l'effet d'écran vertical.

La présente étude suggère ainsi, au-delà des résultats obtenus, toute une méthodologie d'évaluation de matériels de signalisation. Une telle méthodologie permettra une connaissance plus réaliste des matériels considérés et complètera les données d'études en laboratoire portant sur les aspects purement physiques de la visibilité.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Marquage et balisage routier. Recherche routière, OCDE 1975.
- (2) TAYLOR J.I., Mc GEE H.W. Roadway delineation systems. HRB Research Program Report 130, 1972.
- (3) CREECH M.F. Installation of fog guidance lights in Afton Mountain, VHTRC 77-R 12, 1976.
- (4) HEISS W.H. Highway fog : visibility measures and guidance systems, TRB - NCHRP Report 171, 1976.
- (5) CHAMBERLAIN G. Raised markers save lives, energy. The American City and County, june 1979, pp. 71-74.
- (6) C.I.E. - Vocabulaire international de l'éclairage, publication n° 17. (E-1.1), 1970.
- (7) C.I.E. - Caractéristiques radiométriques et photométriques des matériaux et leur mesure, publication n° 38 (TC 2.3), 1977.
- (8) C.I.E. - Colorimétrie, publication n° 15 (E-1.3.1.), 1971.
- (9) C.I.E. - Couleurs de surface pour signalisation visuelle, publication n° 39 (TC 1.6), 1978.
- (10) HUBERT Roger, Recherche sur l'amélioration de la visibilité de la signalisation routière, de jour et de nuit : applications de la photométrie et de la colorimétrie. Thèse CNAM, Paris 8 mai 1980.
- (11) BURG A. Visual acuity as measured by dynamic and static tests : a comparative evaluation. Journal of Applied Psychology. Vol. 50, n° 6, 460-466, 1966.
- (12) HILLS B.L. Visibility under night driving conditions, Australian Road Research, 6, 2, 1976.
- (13) ROWAN N.J. Approach and treatment of channalization, signing and delineation HRR 31, 1963, pp. 57-58.
- (14) YU J.C. Driver performance related to median visibility. HRB special report 107, 1970, p. 180.
- (15) MULLOWNEY W.L. Evaluation of delineation systems for the New Jersey barrier TRR 681, 1978, pp.1-6.
- (16) SABEY B.E. Road accidents in darkness. TRRL report LR 536, 1973.
- (17) BO. O. Road Casualties, Oslo, 1972.

**ANNEXE 1 : REPARTITION SPECTRALE D'ENERGIE RELATIVE DE
LA SOURCE JAUNE**

coordonnées trichromatiques

x = 0,514

y = 0,466

λ (nm)		λ (nm)	
400	0	560	87,3
410	0	570	94,96
420	0	580	101,74
430	0	590	109,31
440	0	600	118,84
450	0	610	124,76
460	0	620	131,41
470	0	630	137,11
480	2,89	640	144,87
490	20,11	650	147,70
500	38,61	660	159,75
510	32,82	670	160,89
520	57,49	680	162,25
530	65,28	690	159,88
540	72,89	700	186,36
550	80,37		

ANNEXE 2 : CARACTERISTIQUES DE LA CHAUSSEE EXPERIMENTALE

1. FORMULATION

Tapis sable ancien genre 0/4 mm

Profondeur moyenne au sable : 0,90 mm

2. COULEUR

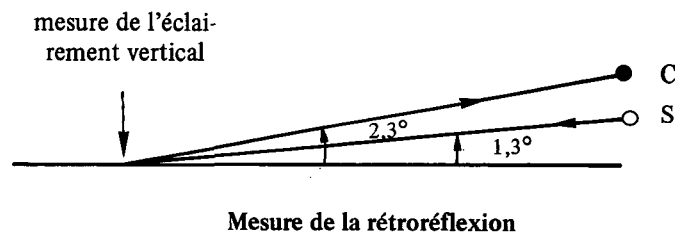
Facteur de luminance : 0,093

Chromaticité : $x = 0,331$

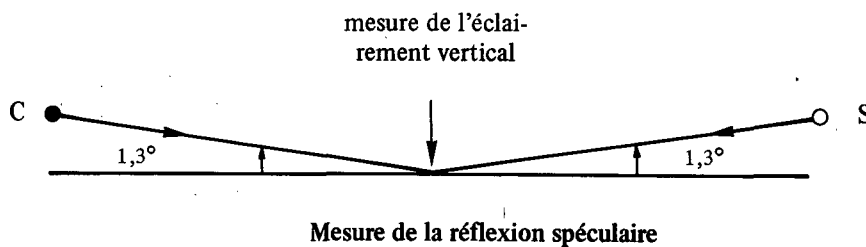
$y = 0,335$

3. PROPRIETES REFLECHISSANTES

— Conditions de mesure



- source lumineuse :
feux d'un véhicule
- Luminancemètre
Pritchard



— Résultats : rétro réflexion = $\approx 10 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$

réflexion spéculaire = $\approx 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$

ANNEXE 3 : LES CONFIGURATIONS DE PLOTS AVEC LEURS ECARTEMENTS (m)

1	M1	phare	CY-V	1	CY-V	2	CY-V	
2	M1	phare	CY-B	2	CY-B	1	CY-V	1
3	M1	phare	CY-B	1	CY-B	3	CY-B	
4	M1	phare	CY-B	1	CY-V	2	CY-V	2
5	M1	code	CY-V	1	CY-V	5	CY-B	2
6	M1	code	CY-V			7	CY-V	1
7	M1	code	CY-B	3	CY-V	2	CY-B	3
8	M1	code	CY-B	1	CY-B	7	CY-B	
9	M1	phare	F-V	1	F-V	2	F-V	
10	M2	phare	CT-B	2	CT-B	1	F-V	1
11	M2	phare	CT-B	1	CT-B	3	CT-B	
12	M2	phare	CT-B	1	F-V	2	F-V	2
13	M2	code	F-V	1	F-V	5	CT-B	2
14	M2	code	F-V			7	CT-B	1
15	M2	code	CT-B	3	F-V	2	CT-B	3
16	M2	code	CT-B	1	CT-B	7	CT-B	
17	M3	phare	S-V	1	S-V	2	S-V	
18	M3	phare	S-B	2	S-B	1	S-V	1
19	M3	phare	S-B	1	S-B	3	S-B	
20	M3	phare	S-B	1	S-V	2	S-V	2
21	M3	code	S-V	1	S-V	5	S-B	2
22	M3	code	S-V			7	S-V	1
23	M3	code	S-B	3	S-V	2	S-B	3
24	M3	code	S-B	1	S-B	7	S-B	

ANNEXE 4 : ECLAIREMENT REÇU PAR LES PLOTS

distance en m	codes : éclairement reçu par les plots en lux	phares : éclairement reçu par les plots en lux
500 m	0,01	0,07
475 m	0,01	0,17
450 m	0,05	0,15
425 m	0,01	0,23
400 m	0,02	0,23
375 m	0,02	0,17
350 m	0,09	0,26
325 m	0,02	0,46
300 m	0,10	0,37
275 m	0,07	0,56
250 m	0,13	0,57
225 m	0,16	0,81
200 m	0,16	0,88
175 m	0,24	1,50
150 m	0,44	1,47
125 m	0,52	1,40
100 m	0,95	4,54
75 m	1,40	6,22
50 m	3,67	24,40
25 m	13,54	41,40

ANNEXE 5 : DISTANCES DE VISIBILITE COMPAREES

PERFORMANCE MOYENNE ET PERFORMANCE AU 85e. PERCENTILE (m)

conditions d'éclairment	conditions d'éclairment		matériel					
			1 CYB	2 CTB	3 SB	4 CYV	5 FV	6 SV
Codes	sec	moyenne	157	255	252	119	195	203
		85e percentile	110	191	220	70	173	173
	humide	moyenne	117	165	222	100	142	169
		85e percentile	110	129	180	62	105	113
Phares	sec	moyenne	436	434	489	262	425	456
		85e percentile	375	362	490	197	371	455
	humide	moyenne	370	403	426	250	376	400
		85e percentile	283	325	290	112	275	350

