

Détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée

Nicolas Hautière^{1,2}, Didier Aubert¹ et Michel Jourlin²

¹LIVIC

Unité mixte de l'INRETS et du LCPC
Bâtiment 824, 14 route de la minière
78000 Versailles
nicolas.hautiere@lcpc.fr
didier.aubert@inrets.fr

²TSI

UMR de l'Univ. J. Monnet et du CNRS
10 rue Barrouin
42000 Saint-Étienne
michel.jourlin@univ-st-etienne.fr

Résumé : Dans cet article, nous présentons des méthodes de mesure de la visibilité atmosphérique à l'aide de caméras embarquées, dans le but de réaliser des aides à la conduite. Une analyse fonctionnelle des sources de perte de visibilité conduit à discerner différents types d'applications ainsi que des contraintes de choix et d'emplacement pour les capteurs. Une modélisation des effets du brouillard permet de définir différentes distances de visibilité et de construire les méthodes correspondantes de mesure en temps réel. Des résultats de mesure de visibilité sur images réelles permettent d'évaluer le travail réalisé.

Mots-clés : Imagerie, transports intelligents, aide à la conduite, distance de visibilité atmosphérique, brouillard, atténuation du contraste.

1 INTRODUCTION

On considère que, en conduite automobile, la majorité des informations traitées (90 %) sont d'origine visuelle. Par conséquent, les pertes de visibilité sont sources d'accidents. Elles peuvent avoir différentes causes. Nous proposons de les classer selon la cause de la dégradation de la visibilité.

1.1 La perception du tracé routier

La conception des routes répond à des normes géométriques. L'usager doit avoir suffisamment de visibilité pour s'arrêter, effectuer une manoeuvre, détecter un éventuel obstacle ou appréhender un virage. Les règles de construction routière se déclinent à la fois pour le profil en long, le tracé en plan et le profil en travers. Elles sont synthétisées dans [Faure, 1997].

Malgré ces règles, la visibilité de l'infrastructure n'est pas toujours suffisante du fait de la présence d'un virage très prononcé ou d'un sommet de rampe. C'est une première source de perte de visibilité.

1.2 Le masquage temporaire de l'infrastructure

Lorsque l'on suit un autre véhicule de près, en particulier un poids-lourd, celui-ci restreint le champ de vue que l'on

a de l'infrastructure et de la circulation. Outre le fait que cela représente un danger, d'un point de vue fonctionnel, cela représente une cause de perte de visibilité.

1.3 L'altération de la visibilité par des facteurs conjoncturels

La dernière source de perte de visibilité est liée à des facteurs plus conjoncturels, en particulier état du pare-brise, conditions d'éclairage et météo.

Puisque le conducteur voit l'environnement routier à travers le pare-brise de son véhicule, la perception qu'il en a est altérée par tout ce qui en affecte la surface.

Les conditions d'illumination de la scène (éblouissement, éclairage insuffisant) constituent un deuxième facteur conjoncturel de réduction de la distance de visibilité. Enfin, les conditions atmosphériques, en particulier la pluie et le brouillard, constituent une dernière cause, et non des moindres, de perte de visibilité.

Nous nous intéressons dans cet article uniquement à la perte de visibilité causée par les conditions météorologiques dégradées. C'est un sujet de recherche très actif en sécurité routière depuis plus de dix ans [LCPC, 1993]. Il a notamment été montré que par temps de brouillard, les conducteurs surestiment les distances [Cavallo, 2000]. Dans ce contexte, on comprend qu'un système fournissant la distance de visibilité serait intéressant en termes de sécurité routière.

La première partie de l'article concerne la mesure de cette distance, que nous appelons distance de "visibilité atmosphérique" et l'utilisation qui peut en être faite. Compte tenu des limites des méthodes existantes, nous proposons d'utiliser une caméra embarquée. Selon l'application envisagée, la caméra ne sera pas la même et ne sera pas placée au même endroit. Nous essaierons ensuite de comprendre de quelle manière de mauvaises conditions météorologiques dégradent la visibilité et définirons dans ce cadre différentes distances de visibilité. Une fois les liens établis entre ces distances, nous détaillerons les méthodes mises au point au cours de la thèse pour les mesurer et les évaluerons à l'aide d'images réelles.

2 MESURE DE LA DISTANCE DE VISIBILITÉ MÉTÉOROLOGIQUE

Des expériences d'équipement de l'infrastructure avec des visibilimètres routiers ont été menées [Shepard, 1996]. Sous ce vocable, on désigne principalement deux types d'instruments détectant le brouillard en mesurant le coefficient d'extinction du brouillard : les transmissiomètres et les diffusiomètres [LCPC, 1993].

Les transmissiomètres sont fiables. Malheureusement, ils sont encombrants, coûteux et l'alignement des blocs optiques (émetteur et détecteur) distants de plusieurs dizaines de mètres est souvent délicat. Les diffusiomètres ont été développés pour des applications routières et permettent de mesurer la lumière diffusée dans un angle solide suffisamment grand et bien défini. En revanche, la faible dimension du volume diffusant rend la mesure très sensible aux inhomogénéités du brouillard.

L'utilisation d'une caméra n'impose pas d'aligner des blocs optiques tout en donnant une image représentative de l'environnement. La plupart des approches [Kwon, 2004][Bush, 1998] utilisent une caméra fixe sur l'infrastructure, ce qui simplifie la tâche, puisqu'on dispose alors toujours d'une image de référence. En communiquant les mesures issues de ces appareils à des panneaux à messages variables, l'équipement de l'infrastructure peut donc répondre en partie au problème [Perrin, 2002].

Cependant, de tels capteurs n'équipent pas l'ensemble du réseau routier. De ce fait, il est intéressant de pouvoir mesurer la distance de visibilité atmosphérique à l'aide de caméras embarquées à bord du véhicule.

On envisage deux applications à cette mesure, qui débouchent sur deux types d'aides à la conduite.

Il s'agirait dans le premier cas de déterminer la vitesse adaptée aux conditions météorologiques mesurées, de façon à indiquer au conducteur, si nécessaire, que sa vitesse est trop élevée, voire à limiter automatiquement celle-ci. Pour cela, le système devra impérativement reproduire fidèlement ce que voit le conducteur.

L'intérêt de disposer d'une mesure de la distance de visibilité atmosphérique va au-delà. En effet, les équipements de perception des véhicules à venir (caméras, radar, laser...) sont conçus pour fonctionner dans une gamme de situations et de conditions - météorologiques, de luminosité-, certes variables, mais entre certaines limites. Détecter que l'on franchit une de ces limites est un enjeu fort, si l'on veut assurer un bon niveau de fiabilité à l'assistance au conducteur qui s'appuie sur les sorties de cet équipement. Dans ce contexte, on attendra d'un système de mesure de visibilité atmosphérique qu'il permette de quantifier le fonctionnement du ou des capteurs extéroceptifs embarqués, information qui sera exploitée pour adapter, dans la mesure du possible, le fonctionnement du capteur, ainsi que les traitements qui lui sont associés. Au-delà d'un certain niveau de dégradation, les seuils sont dépassés et il est alors indispensable de prévenir le conducteur que son système d'assistance est momentanément inopérant.

Les principes qui président à l'estimation de la visibilité météorologique sont les mêmes dans les deux cas. La différence porte sur les contraintes en ce qui concerne le choix de la caméra et de son emplacement.

3 ADÉQUATION DU CAPTEUR À L'APPLICATION ENVISAGÉE

Selon que l'on cherche à quantifier la visibilité pour un conducteur humain ou un capteur extéroceptif, on ne choisira pas le même capteur et on ne le placera pas nécessairement au même endroit.

3.1 Visibilité pour un conducteur humain

Si l'on souhaite créer un système d'avertissement du conducteur, l'image capturée par le système de vision doit être comparable à ce que voit le conducteur. Deux contraintes fortes se dégagent naturellement. Premièrement, le cône de vision de la caméra doit intercepter celui du conducteur. La caméra doit donc être installée derrière le pare-brise, le plus près possible du conducteur.

Deuxièmement, la nature même de l'image doit être cohérente avec celle perçue par le conducteur, en terme de résolution, de dynamique, de richesse spectrale et de sensibilité.

3.2 Visibilité pour un capteur extéroceptif

Si le but du système est de détecter le moment où un système extéroceptif sort de ses limites de fonctionnement, alors les deux systèmes doivent nécessairement partager les mêmes capteurs. Outre le fait que les deux capteurs doivent posséder les mêmes dynamique, résolution et sensibilité, ils doivent nécessairement être au même emplacement pour avoir le même angle de vue et donc la même vision de la scène routière.

4 PERCEPTION VISUELLE PAR CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES DÉGRADÉES

Dans l'atmosphère, la lumière visible doit cheminer dans un aérosol contenant un grand nombre de gouttelettes d'eau. Lors de son parcours, le flux lumineux se trouve principalement atténué par le phénomène de diffusion, qui dévie les rayons de leur direction initiale et qui conduit à caractériser l'atmosphère par un coefficient d'extinction. Cette atténuation croît avec la distance et est accentuée par le brouillard. C'est l'origine du phénomène de luminance du brouillard [Paulmier, 2003].

4.1 Distance de visibilité météorologique

C'est en 1924 que Koschmieder [Middleton, 1952] propose sa théorie sur la luminance apparente des objets observés sur fond de ciel à l'horizon. Constatant qu'un objet lointain finit par se confondre avec le ciel, il établit une relation simple exprimant la luminance apparente L d'un objet de luminance intrinsèque L_0 en fonction de sa distance d :

$$L = L_0 e^{-kd} + L_f (1 - e^{-kd}) \quad (1)$$

où L_f désigne la luminance du ciel et k le coefficient d'extinction de l'atmosphère.

À partir de ces résultats, Duntley [Middleton, 1952] établit une loi d'atténuation des contrastes par l'atmosphère :

$$C = C_0 e^{-kd} \quad (2)$$

où C désigne le contraste apparent à la distance d et C_0 le contraste intrinsèque de l'objet sur son fond.

Cette loi s'applique seulement dans le cas d'un éclairage uniforme de l'atmosphère. Pour que l'objet soit visible, il suffit que C soit supérieur au seuil de contraste et noté ε . En pratique, la Commission Internationale de l'Éclairage [CIE, 1987] a adopté une valeur moyenne de 0,05 pour le seuil de contraste de façon à définir une distance conventionnelle, appelée "distance de visibilité météorologique" V_{met} , qui est la plus grande distance à laquelle un objet noir ($C_0 = 1$) de dimension convenable peut être vu sur le ciel à l'horizon. Nous montrerons dans la partie 5 comment il est possible d'estimer cette distance.

$$V_{met} = -\frac{1}{k} \ln(0,05) \simeq \frac{3}{k} \quad (3)$$

Cette distance de visibilité météorologique est la traduction en termes de distance d'un paramètre physique de l'atmosphère. Ce seul paramètre ne suffit pas à décrire la manière dont la scène est perçue. En effet, l'atmosphère peut très bien avoir le même coefficient d'extinction de jour et de nuit. Or, la perception que l'on a de la scène n'est plus du tout la même. La notion de distance de visibilité météorologique n'est donc pas suffisante. Nous proposons de la compléter par l'estimation de la distance à l'objet le plus éloigné possédant un contraste suffisant par rapport à son fond, que nous appelons distance de visibilité mobilisée V_{mob} . Nous sommes ce faisant très proches de la définition de la CIE.

4.2 Distances de visibilité mobilisée et mobilisable

Compte tenu de sa définition, la distance de visibilité mobilisée dépend de la scène routière, à savoir des objets qui sont effectivement présents sur celle-ci. Prenons l'exemple de la Fig. 1. Sur celle-ci nous représentons de manière simplifiée une route plongée dans le brouillard. Sur la Fig. 1a, on suppose que l'objet visible le plus éloigné est l'extrémité du marquage routier (cela pourrait aussi être le bord de la chaussée). Sur la Fig. 1b, le véhicule s'est déplacé et un nouveau marquage routier plus éloigné est maintenant visible. La distance de visibilité mobilisée a augmenté entre les deux scènes.

Nous définissons à présent une distance théorique, qui pour sa part ne dépend pas de la scène routière : c'est la distance de visibilité mobilisée de l'objet le plus éloigné que l'on aurait pu détecter s'il avait existé dans la scène routière. Nous l'appelons distance de visibilité mobilisable. Par définition, c'est une borne de l'ensemble des distances de visibilité mobilisées.

Dans le cas de la Fig. 1, si un marquage supplémentaire avait existé à la distance V_{max} , il aurait été visible.

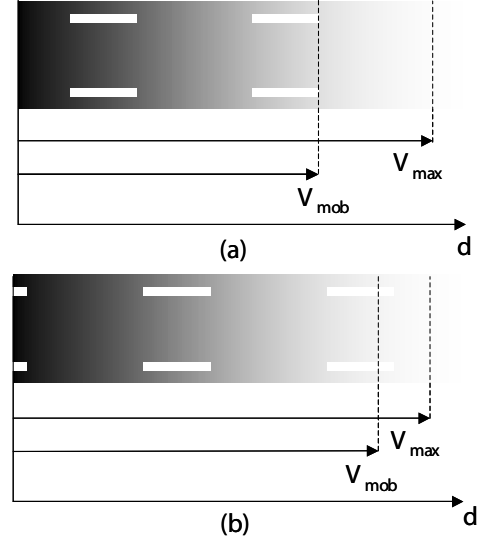


FIG. 1 – Exemples de distances de visibilité mobilisée et mobilisable.

4.3 Lien entre distance de visibilité mobilisable et météorologique

Nous allons voir dans ce paragraphe le lien qui peut exister entre la distance de visibilité mobilisable et la distance de visibilité météorologique.

Soit B l'objet le plus éloigné considéré comme visible. Nous avons défini ci-dessus la distance à cet objet comme la distance de visibilité mobilisée. Soient L_{n_0} et L_{b_0} les luminances intrinsèques de la route N et de l'objet B et L_n et L_b leurs luminances à la distance d .

La loi de Koschmieder donne les variations théoriques de ces grandeurs en fonction de la distance d . Exprimons le contraste C_{BN} de B par rapport à N au sens de Weber [Cornsweet, 1970] :

$$C_{BN} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(L_{b_0} - L_{n_0})e^{-kd}}{L_{n_0}e^{-kd} + L_f(1 - e^{-kd})} \quad (4)$$

Nous déduisons l'expression de d en fonction des paramètres photométriques, du contraste C_{BN} et de la densité du brouillard k :

$$d = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{C_{BN} L_f}{L_{b_0} - L_{n_0} + C_{BN}(L_f - L_{n_0})} \right) \quad (5)$$

L'expression (3) nous permet alors de lier cette grandeur à la distance de visibilité météorologique V_{met} . De manière analogue à la Commission Internationale de l'Éclairage, nous pouvons fixer un seuil $\tilde{C}_{BN}$ en dessous duquel l'objet est considéré comme non visible. Comme pour le calcul de la distance de visibilité météorologique, nous supposons que la route a une luminance intrinsèque nulle. Ainsi, après maximisation, nous obtenons la distance de visibilité mobilisable V_{max} valable pour tout seuil de contraste par :

$$V_{max} = -\frac{V_{met}}{3} \ln \left(\frac{\tilde{C}_{BN}}{1 + \tilde{C}_{BN}} \right) \quad (6)$$

La valeur de $\tilde{C}_{BN}$ pour laquelle $V_{max} = V_{met}$ s'obtient alors facilement :

$$\tilde{C}_{BN} = \frac{1}{e^3 - 1} \approx 5 \% \quad (7)$$

Nous en déduisons qu'en fixant un contraste seuil $\tilde{C}_{BN}$ de 5 %, la distance de visibilité mobilisable V_{max} , est peu différente de la distance de visibilité météorologique V_{met} .

5 APPROCHE MONOVISION : EXPLOITATION DU VOILE ATMOSPHÉRIQUE

5.1 Principe de la mesure

Le phénomène de voile atmosphérique est caractéristique du brouillard diurne. Nous l'avons mis à profit pour détecter la présence de brouillard diurne et estimer la distance de visibilité météorologique à l'aide d'une seule caméra embarquée. Cette méthode a été brevetée en 2002 [Lavenant, 2002].

En remplaçant la distance d par l'expression de la ligne image correspondante et en dérivant deux fois l'équation (1) par rapport à la ligne image v , on obtient une expression simple fournissant directement le paramètre k en fonction du point d'inflexion et de la ligne d'horizon. La distance de visibilité météorologique est alors obtenue par $V_{met} = \frac{3}{k}$, en suivant les recommandations de la Commission Internationale de l'Éclairage. Or pour fonctionner correctement cette méthode nécessite uniquement la présence d'une région homogène devant le véhicule (la chaussée) et du ciel dans l'image. Se pose alors le problème de la sélection de la région image qu'il faut traiter pour être compatible avec les hypothèses de la méthode. Un calcul de gradients dans l'image met en évidence les ruptures de contraste telles que les bords de voies, les véhicules croisés, les véhicules suivis, les arbres... Dans un deuxième temps, une croissance de région permet d'extraire une région de l'image compatible avec la loi de Koschmieder. Bien que ne recherchant pas explicitement la route, il se trouve que la zone homogène (au sens de Koschmieder) détectée par cette technique est la route et le ciel. Si la région trouvée traverse l'image de bas en haut, alors du brouillard est détecté, et inversement (cf. Fig. 2a).

Si la croissance de région est un succès, une bande de mesure est positionnée sur la région détectée. Pour ce faire, on recherche dans la région le chemin le plus vertical possible pour aller de bas en haut de l'image. Ce chemin constitue alors le centre d'une bande de mesure que l'on déploie de part et d'autre de ce chemin dans les limites de la région, jusqu'à l'obtention d'une largeur de bande maximale paramétrable (en noir vertical sur la Fig. 2b). Finalement, on mesure, par ligne, la luminance médiane dans la bande, ce qui permet d'obtenir la courbe représentative de la variation verticale de luminance de l'image. Une dérivée seconde de cette courbe fournit le point d'inflexion et donc la valeur du coefficient d'extinction k du brouillard et la distance de visibilité météorologique (ligne noire horizontale sur la Fig. 2b). Pour plus de détails, on peut se référer à [Hautière, 2003].

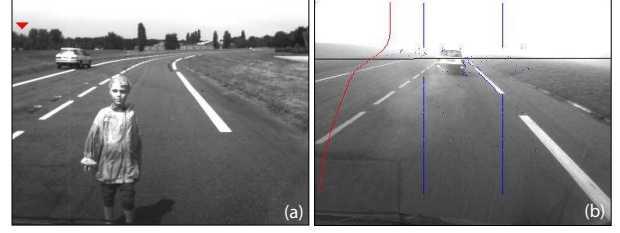


FIG. 2 – Détection de brouillard sur des images capturées dans le véhicule (a) par beau temps. Aucun brouillard n'a été détecté, ce qui est symbolisé par le triangle, (b) par temps de brouillard.

5.2 Application à la restauration du contraste

Comme on l'a vu précédemment, le brouillard a pour effet de dégrader fortement le contraste. Plus que d'estimer la détérioration des conditions de visibilité, on peut imaginer de retrouver une image non dégradée.

La restauration du contraste est une discipline très abordée en vision artificielle. Cependant, les méthodes existantes sont pour la plupart synonymes de fortes contraintes, qui empêchent notamment d'envisager leur installation à bord d'un véhicule. Certaines techniques requièrent une connaissance a priori de la scène pour fonctionner [Oakley, 1998]. D'autres nécessitent du matériel dédié pour estimer les conditions météorologiques.

Des techniques ne se fondent que sur les images acquises et exploitent la diffusion atmosphérique pour calculer la géométrie de la scène [Narasimhan, 2003]. Cependant, elles nécessitent que les conditions météorologiques changent entre deux acquisitions. Des filtres polarisants peuvent également être utilisés pour réduire l'effet du brouillard dans la scène [Schechner, 2001]. Mais là aussi, deux prises de vues avec un filtre différent sont nécessaires. Cela empêche donc ces méthodes, fournissant pourtant des résultats impressionnants, de fonctionner sur un véhicule.

Notre mesure de la distance de visibilité permet de réaliser une telle technique à l'aide d'une seule image et sans autre hypothèse que celle d'un monde plan. Comme nous l'avons vu, l'instantiation du modèle de Koschmieder présentée dans le paragraphe 5 nous permet, à l'aide d'une seule caméra, d'estimer le coefficient d'extinction du brouillard k ainsi que la luminance du ciel L_f .

$$k = \frac{2(v_i - v_h)}{\lambda} \quad (8)$$

$$L_f = L_i + \frac{v_i - v_h}{2} \frac{dL}{dv} \Big|_{v=v_i} \quad (9)$$

Ces deux variables définissent le brouillard présent dans la scène routière et sont indépendantes du point considéré. Si l'on prend un point appartenant à la surface de la route, ce point obéit à la loi de Koschmieder et nous connaissons la distance à laquelle il est situé par hypothèse monde plan. Il nous est donc possible de calculer sa luminance intrinsèque L_o qui s'exprime alors ainsi :

$$L_o = Le^{kd} + L_f(1 - e^{kd}) \quad (10)$$

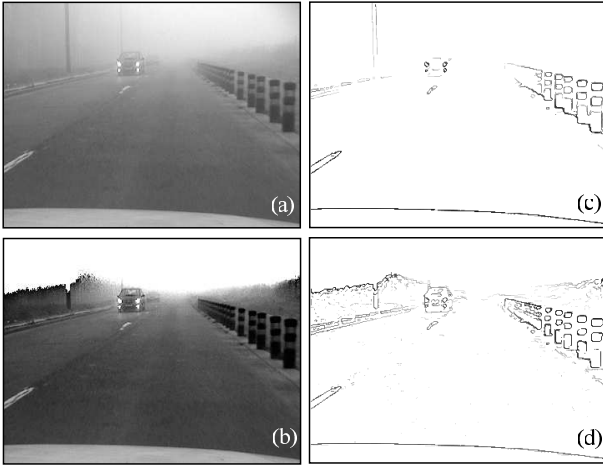


FIG. 3 – Image capturée par condition de brouillard dense. Le véhicule instrumenté croise deux autres véhicules. Sur (a), seul le premier véhicule est réellement visible. Aucun contraste supérieur à 5 % n'est détecté sur le second comme le montre (c). Inversement, sur (b) le premier véhicule est plus contrasté. Maintenant le second véhicule est détecté, comme on peut le voir sur (d). Les marquages routiers sont également mieux perçus sur (d). L'utilisation d'une hypothèse monde plan conduit cependant à effacer rapidement les objets très hauts.

avec $kd = 2 \frac{v_i - v_h}{v - v_h}$. En répétant la procédure pour tous les points de l'image, L_o étant indépendant des conditions météorologiques, nous restaurons le contraste des points visibles appartenant à la surface de la route, comme le montre l'exemple de la Fig. 3.

Une telle application peut être utilisée comme aide à la conduite dans le brouillard à l'image de ce qui est fait pour la nuit en infrarouge. Elle peut aussi servir de pré-traitement d'image à destination d'un détecteur de marquages ou d'obstacles routiers.

6 APPROCHE STÉRÉOVISION : EXPLOITATION DE L'EFFET D'ATTÉNUATION

La méthode que nous venons de décrire est effectivement capable de détecter la présence de brouillard diurne et fournit une estimation acceptable de la distance de visibilité. Elle est malheureusement restreinte à un fonctionnement de jour et ne prend en compte que le brouillard comme perturbation météorologique.

Nous avons donc par la suite développé une méthode suffisamment générale pour permettre d'estimer la distance de visibilité mobilisée (cf. 4.2), quelles que soient les conditions météorologiques et de jour comme de nuit. Cependant, cette méthode, qui se fonde sur la théorie d'atténuation des contrastes de Duntley, n'est pas capable de détecter que l'atténuation est provoquée par du brouillard. Nous la compléterons donc par la méthode fondée sur le modèle de Koschmieder.

6.1 Méthode générique proposée

Nous proposons d'estimer la distance de visibilité mobilisée en recherchant l'objet le plus éloigné ayant un contraste d'au moins 5 %. Ce processus se décompose naturellement en deux tâches. La première phase est le calcul des contrastes dans l'image et la sélection de ceux supérieurs à 5 %. La deuxième phase est l'estimation de la profondeur des primitives détectées. Il reste ensuite à sélectionner celle qui est la plus éloignée.

6.2 Mesure du contraste local supérieur à 5 %

Dans le modèle LIP, Logarithmic Image Processing, Jourlin [Jourlin, 2001] définit la notion de contraste logarithmique valable en lumière transmise entre deux points d'une image. Il est parmi les premiers à avoir défini la notion de contraste local. Il en découle la notion de contraste à une frontière.

La méthode que nous avons développée fait partie de cette famille et utilise l'algorithme de Köhler [Köhler, 1981] pour calculer le contraste sur un voisinage de l'image. Il est robuste au bruit et s'adapte à la formulation locale du contraste que l'on souhaite utiliser. L'algorithme de Köhler a été initialement conçu pour binariser une image en retenant le seuil qui maximise le contraste entre les deux régions de l'image. Cet algorithme, très coûteux, quand il est utilisé globalement sur une image, a été optimisé en temps de calcul. Des exemples de calcul de contrastes supérieurs à 5 % sont présentés sur la Fig. 4. Nous avons choisi d'estimer le contraste logarithmique de façon à être cohérent avec la formulation du contraste retenue par la CIE pour établir la définition de la distance de visibilité météorologique.

6.3 Calcul robuste d'une carte de profondeur de l'environnement

La vision mono-caméra ne permet pas d'obtenir une estimation des distances sans contraintes fortes sur la scène (hypothèse d'un "monde plan", par exemple). Pour cette raison, la méthode générale est difficilement applicable dans ce cas.

Nous nous sommes donc tournés vers une technique de stéréovision, car elle permet de retrouver l'information de distance par un processus de triangulation. D'ailleurs, le LIVIC a développé une technique performante de stéréovision [Aubert, 2005], appelée "v-disparité", permettant de localiser les objets situés au-dessus de la surface de

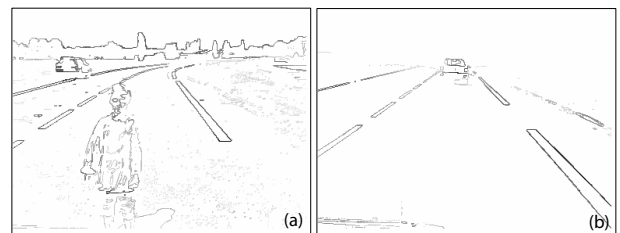


FIG. 4 – Exemples de calculs de contraste au-dessus de 5 % sur les images entières, (a) par beau temps, (b) par temps de brouillard.

la route, non restreinte à l'hypothèse monde plan. Grâce à cette technique, des cartes de profondeur (disparité) de bonne qualité sont obtenues par un algorithme en deux passes. Au bilan, sur la carte de disparité finale figurent en blanc les obstacles et en niveaux de gris la carte de profondeur des contours détectés sur la surface de la route. En incluant cette technique dans notre méthode, nous disposerons, en plus de la distance de visibilité, de la distance à l'obstacle, c'est-à-dire la distance correspondant à la notion de masquage temporaire (cf. paragraphe 1.2). Des exemples de carte de disparité améliorée sont présentées sur la Fig. 5.

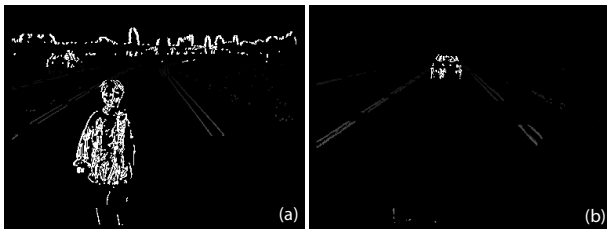


FIG. 5 – Exemples de cartes de disparité de l'environnement du véhicule (a) par beau temps, (b) par temps de brouillard. Les points blancs sont considérés comme des obstacles. Le niveau de gris des autres points est proportionnel à leur disparité et par là-même à leur profondeur.

Par la suite, compte tenu de la structure de la carte de disparité, en balayant celle-ci de haut en bas, les objets rencontrés sont sur la surface de la route et de plus en plus près du véhicule équipé. Par conséquent, la méthode développée consiste à balayer la carte de disparité de haut en bas à partir de la ligne d'horizon et à calculer le contraste associé à chaque pixel rencontré dont la disparité est connue. Dès lors que le contraste trouvé est supérieur à 5 %, le calcul s'arrête. La connaissance de la disparité permet alors de remonter à la distance au voisinage considéré et par là-même à la distance de visibilité mobilisée. Ainsi, on extrait la distance à l'objet le plus éloigné appartenant au plan de la route dont le contraste est supérieur à 5 %, répondant ainsi aux objectifs fixés. Cette méthode a également été brevetée. Pour plus de détails, on peut se référer à [Hautière, 2005b]. Des exemples de résultats sont présentés sur la Fig. 6.

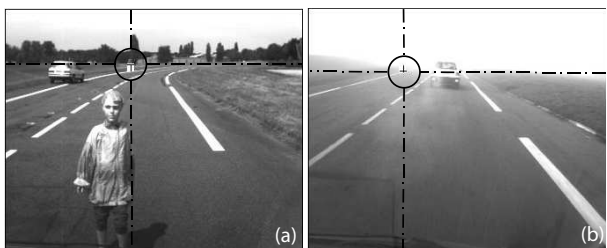


FIG. 6 – Estimation de la distance de visibilité mobilisée (croix noire) (a) par beau temps ($V_{mob} \approx 250m$), (b) par temps de brouillard ($V_{mob} \approx 75m$).

7 CALIBRAGE ET ÉVALUATION DES APPROCHES

7.1 Calibrage statique des méthodes

La mesure de la distance de visibilité par caméra embarquée se heurte fortement au manque de références. En effet, le caractère embarqué de l'application fait que l'on ne dispose pas à tout instant d'image de référence à laquelle comparer l'image courante. De plus, il n'existe aucun appareil embarqué dédié à la mesure de distance de visibilité permettant d'établir une mesure de référence.

Pour évaluer de manière quantitative les performances de nos méthodes, nous avons installé à la fin de l'année 2004 cinq grands panneaux régulièrement espacés, sur une distance de 130 m le long de la piste d'essais de Satory à Versailles. À partir d'une position donnée, des images de ces cibles spécifiques ont été acquises à l'aide du système de vision embarqué que nous avons décrit et ce, dans différentes conditions de visibilité. Ceci permet d'estimer le coefficient d'extinction de l'atmosphère en considérant l'atténuation du contraste quand on passe d'une cible à l'autre. Confronter cette estimation en conditions statiques, fondée sur des cibles de référence, aux estimations fournies par le système embarqué, qui se passe pour sa part de référence, permet de calibrer les méthodes et constitue une validation quantitative. Les premiers résultats obtenus sont très prometteurs et sont publiés dans [Hautière, 2005a].

7.2 Résultats qualitatifs sur images réelles

La méthode générale a été testée sur deux séquences vidéo de 1000 images chacune. Dans la première séquence, le véhicule instrumenté suit un autre véhicule à différentes distances et s'arrête devant différents obstacles comme un piéton, une moto. Les conditions météorologiques sont bonnes. Dans la seconde séquence, le véhicule instrumenté suit un véhicule qui finit par disparaître progressivement à travers un brouillard épais. Les deux séquences ont été enregistrées sur les pistes de Satory à Versailles. Un extrait de chacune des séquences est donné sur la Fig. 4. Sur la Fig. 8, nous avons tracé les courbes de distance de visibilité mobilisée et de distance à l'obstacle.

Nous avons appliqué la méthode fondée sur la loi de Koschmieder à la deuxième séquence, enregistrée par temps de brouillard. On a pris ici comme ligne d'horizon, non pas les données issues d'un calibrage préalable comme dans le cas mono-caméra, mais l'horizon trouvé directement par la stéréovision [Aubert, 2005], plus fiable. Sur la Fig. 10, nous avons tracé également la courbe de distance de visibilité météorologique pour cette seconde séquence.

Par beau temps, la résolution maximale du capteur stéréoscopique est atteinte. Par temps de brouillard, les mesures sont assez stables et sont très comparables à celles obtenues par la première méthode, ce qui nous laisse penser que les deux méthodes sont efficaces par temps de brouillard.



FIG. 7 – Site dédié au calibrage des algorithmes de mesure de visibilité atmosphérique comportant les cinq cibles spécifiques. (a) Image du site par beau temps ; (b) Image du site par temps de brouillard léger ($V_{met} \approx 200$ m).

8 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons tout d'abord analysé la notion de distance de visibilité et distingué trois sources de réduction de celle-ci, liées à la géométrie de l'infrastructure, à la présence d'obstacles et à des facteurs conjoncturels. À ce dernier point se rattache le problème des conditions météorologiques dégradées qui fait l'objet de la suite de l'article.

Après avoir montré les limites des méthodes statiques, actuellement utilisées pour la mesure de la distance de visibilité atmosphérique, nous avons décrit les applications d'une telle mesure réalisée à bord d'un véhicule. Nous discernons celles qui peuvent servir directement à informer le conducteur et celles qui fournissent une information à d'autres capteurs embarqués. Cela nous a donné les éléments de compréhension pour aborder les questions de choix et d'emplacement des capteurs. Après avoir modélisé les effets de l'atmosphère sur la vision, nous avons présenté nos méthodes de mesure de la distance de visibilité et les avons évaluées sur des séquences d'images réelles.

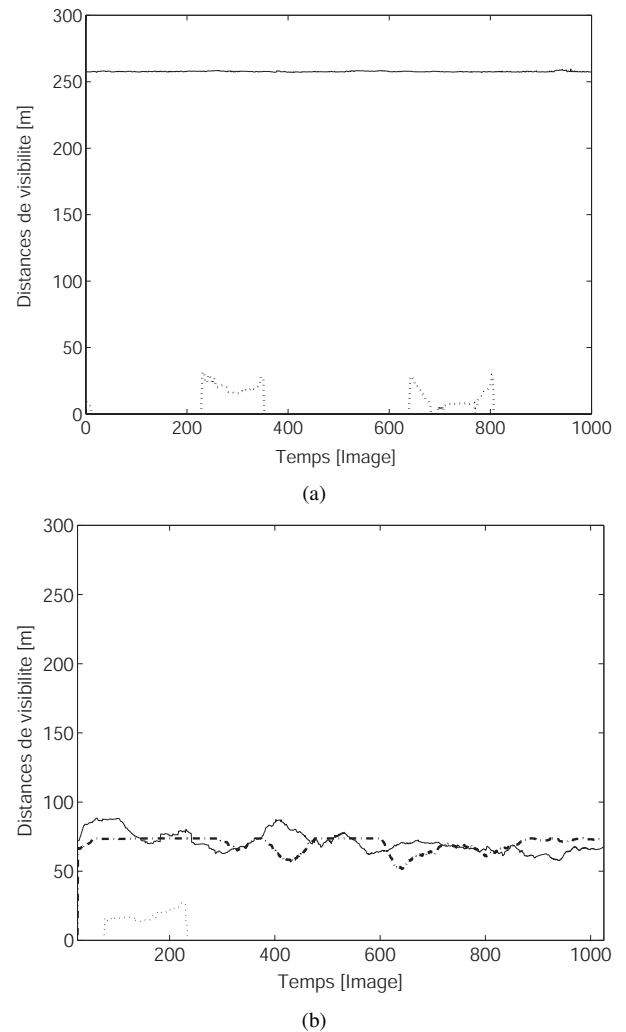


FIG. 8 – Courbes des mesures obtenues : (---) distance de visibilité mobilisée, (—) distance de visibilité météorologique, (...) distance à l'obstacle (a) par beau temps ; (b) par temps de brouillard.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Éric Dumont, chercheur au LCPC. Ce travail a été financé en grande partie par le projet ARCOS du PREDIT.

BIBLIOGRAPHIE

- [CIE, 1987] *International lighting vocabulary*. Number 17.4. Commission Internationale de l'Éclairage.
- [Aubert, 2005] Aubert D. et Labayrade R., Détection d'obstacles par stéréovision : l'approche "v-disparité". *Annales des Télécommunications*, 60(3-4) :299–325.
- [Bush, 1998] Bush C. et Debes E., Wavelet transform for analyzing fog visibility. *IEEE Intelligent Systems*, 13(6) :66–71.
- [Cavallo, 2000] Cavallo V., Colomb M. et Doré J., La surestimation de la distance intervéhiculaire dans le brouillard. *Recherche Transports Sécurité*, 66(1).
- [Cornsweet, 1970] Cornsweet T., *Visual perception*. Academic Press.

- [Faure, 1997] Faure M., *Cours de Routes*, volume 1. ALÉAS, les cours de l'ENTPE edition.
- [Hautière, 2003] Hautière N. et Aubert D., Driving assistance : automatic fog detection and measure of the visibility distance. *ITS World Congress, Madrid, Spain*.
- [Hautière, 2005a] Hautière N., Aubert D. et Dumont E., Onboard measurement of the atmospheric visibility : Static calibration and quantitative evaluation. *17th TRB Biennial Symposium on Visibility and Traffic Control Devices, Washington DC, USA*.
- [Hautière, 2005b] Hautière N., Labayrade R. et Aubert D., Estimation of the visibility distance by stereovision : a generic approach. *IAPR Conference on Machine Vision and Applications*.
- [Jourlin, 2001] Jourlin M. et Pinoli J.-C., Logarithmic image processing. *Advances In Imaging and Electron Physics*, 115 :129–196.
- [Köhler, 1981] Köhler R., A segmentation system based on thresholding. *Graphical Models and Image Processing*, 15 :319–338.
- [Kwon, 2004] Kwon T. M., Atmospheric visibility measurements using video cameras : Relative visibility. Rapport technique, University of Minnesota Duluth.
- [Lavenant, 2002] Lavenant J., Tarel J.-P. et Aubert D., Procédé de détermination de la distance de visibilité et procédé de détermination de la présence d'un brouillard. Brevet français 0201822 soumis par LCPC / INRETS.
- [LCPC, 1993] LCPC, editor *bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, volume Hors série thématique : visibilité.
- [Middleton, 1952] Middleton W., *Vision through the atmosphere*. University of Toronto Press.
- [Narasimhan, 2003] Narasimhan S. G. et Nayar S. K., Contrast restoration of weather degraded images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(6) :713–724.
- [Oakley, 1998] Oakley J. P. et Satherley B. L., Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation. *IEEE Transactions on Image Processing*, number 7, pages 167–179.
- [Paulmier, 2003] Paulmier G. et Carta V., La luminance des brouillards diurnes, élément d'altération de la visibilité. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, (243) :71–81.
- [Perrin, 2002] Perrin J. et Martin, P. T. C. B., Testing the adverse visibility information system evaluation (ADVISE) - safer driving in fog. *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*.
- [Schechner, 2001] Schechner Y. Y., Narasimhan S. G. et Nayar S. K., Instant dehazing of images using polarization. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- [Shepard, 1996] Shepard F. D., Nchrp synthesis of highway practice 228, reduced visibility due to fog on the highway. Rapport technique, TRB National Research Council.