

# Évaluation expérimentale des méthodes

---

DEUX MÉTHODES DE MESURE DE LA DISTANCE DE VISIBILITÉ ont été présentées dans les chapitres précédents. Dans le chapitre 2, nous avons proposé une première méthode s'appuyant sur une propriété mathématique de la loi de Koschmieder pour estimer la distance de visibilité météorologique à l'aide d'une seule caméra. Dans le chapitre 3, nous avons proposé, à l'aide d'un capteur stéréoscopique, d'estimer la distance de visibilité mobilisée, c'est-à-dire la distance à l'objet le plus éloigné possédant un contraste supérieur à 5 %. L'objet de ce chapitre est de montrer que ces deux méthodes fournissent des résultats pertinents. Pour cela, nous procédons à une évaluation expérimentale de celles-ci.

Le problème majeur est que nous n'avons pas de capteur de référence. Celui-ci nous aurait permis de disposer en permanence d'une mesure à laquelle comparer celles issues de nos méthodes embarquées. Mais étant donné qu'un tel capteur n'existe pas et que l'objectif de la thèse est précisément d'en construire un, nous avons dû procéder autrement.

Dans un premier temps, nous avons acquis des séquences vidéo sous différentes conditions météorologiques à l'aide des véhicules expérimentaux du LIVIC. Nous avons testé les méthodes sur ces différentes séquences et estimé une distance de visibilité en fonction du temps. Cela constitue une évaluation qualitative en conditions dynamiques des méthodes présentées que l'on a souhaitée la plus en accord possible avec la perception que nous pouvions avoir des images à l'œil nu.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à quantifier précisément les performances de nos méthodes. Pour cela, nous avons équipé une zone située sur les pistes de Satory avec des mires de référence et acquis des images de ce site sous différentes conditions météorologiques. En estimant la distance de visibilité, à l'aide des mires d'une part et à l'aide des méthodes embarquées d'autre part, nous proposons ainsi une évaluation quantitative du travail réalisé en conditions statiques.

Ce chapitre est organisé de la façon suivante. Une première partie est consacrée à la validation qualitative des deux méthodes. Pour chacune, nous présentons différentes séquences vidéo puis les mesures de distance de visibilité obtenues sur celles-ci. Une deuxième partie présente une évaluation quantitative des méthodes. Tout d'abord, le site dédié au calibrage des méthodes est présenté ainsi que le protocole expérimental qui lui est associé. Nous validons ce dernier à l'aide de simulations photométriques. Cela nous permet ensuite de donner des résultats quantitatifs à l'aide de ces mêmes simulations photométriques d'une part et d'images réelles du site d'autre part.

## 4.1 Évaluation qualitative des méthodes

Dans ce paragraphe, nous proposons d'évaluer séparément chaque méthode à l'aide de différentes séquences vidéo acquises à bord des véhicules expérimentaux sous différentes conditions météorologiques. Bien que fournissant une mesure chiffrée de la visibilité, nous qualifions cette évaluation de qualitative car nous ne pouvons pas fournir de mesure *vraie* de la visibilité sur ces séquences.

### 4.1.1 Approche monoculaire fondée sur la loi de Koschmieder

#### *Séquences vidéo de test*

La méthode présentée au chapitre 2 a été testée sur trois séquences vidéo de plus de 150 images chacune. De façon à mettre en évidence les points forts de l'algorithme, chaque séquence présente une difficulté différente. Ainsi dans la première, le véhicule équipé suit deux voitures, double une des voitures tout en suivant l'autre dans un brouillard peu dense. La difficulté est double. Le brouillard est peu dense donc la mesure est sensible aux mouvements de la caméra et à la détermination de la ligne d'horizon. D'autre part, le suivi des véhicules implique de faire passer la bande de mesure entre ces derniers.

Dans la seconde séquence, le véhicule équipé en croise deux autres en ligne droite sur une route dont la visibilité est fortement dégradée par un brouillard très dense. La difficulté est liée au croisement des véhicules et à la route qui possède peu d'indices visuels à cause de son état et de la densité du brouillard.

Dans la troisième séquence, le véhicule est dans un virage dans un brouillard très dense. En outre, la route est bordée de chaque côté par de hauts talus. Dans ce cas, le ciel ne se trouve pas dans l'axe du véhicule à cause des talus. Le brouillard très dense et le virage ont pour conséquence de confondre les deux éléments ciel et talus, ce qui est source d'erreur.

Ces trois séquences sont chacune illustrées par trois images sur la figure 4.1.

#### **Résultats**

La figure 4.2 montre les résultats du filtre de Canny-Deriche sur trois images représentatives des séquences présentées dans le paragraphe 4.1.1. Il est clair que plus le brouillard est dense, plus le nombre de contours détectés est faible. Sur ces images, on voit l'intérêt du seuillage par Hystérésis. Il n'y a que très peu de contours parasites détectés sur la chaussée. Hormis l'image en haut à droite, les contours ne sont pas fermés au niveau de l'horizon, permettant à la croissance de région de s'effectuer jusqu'en haut de l'image.

Les résultats de la détection de la région d'intérêt sont présentés sur la figure 4.3. On peut y voir que l'algorithme de croissance de région ne détecte ni la route, ni le ciel dans sa globalité. Il détecte une zone suffisamment vaste sur la route et le ciel pour permettre la mesure de la variation de luminance. On peut également remarquer la manière dont la région se faufile entre les véhicules permettant de s'affranchir d'un masquage partiel de la route.

Sur l'image en haut à droite, la croissance de région n'a pu être terminée à cause de la présence d'une voiture et d'un panneau routier bouchant l'horizon. Ainsi, la croissance de région

ne peut pas s'effectuer car les hypothèses de la méthode exploitant la loi de Koschmieder ne sont pas remplies, ce qui constitue un point fort du système, qui sait dire s'il est opérant ou non.

Finalement, sur la figure 4.4, on obtient le résultat final de la méthode. La bande de mesure est mise en place, permettant d'obtenir la ligne blanche horizontale représentative de la distance de visibilité. Un triangle, en haut à gauche de chaque image, permet de donner l'état du système. En blanc, le système est opérant, alors qu'en noir (image en haut à droite), le système est déclaré temporairement inopérant.

La figure 4.5 présente l'évolution temporelle de la mesure de distance de visibilité sur les différentes séquences vidéos. En cas de brouillard faible, la distance mesurée est grande. Compte tenu de la surface couverte par un pixel à ces distances (voir paragraphe 2.1.3), la mesure varie assez fortement durant la séquence. Cependant, on pourrait très bien considérer qu'au delà d'une mesure de 250 m par exemple, la visibilité disponible pour le capteur caméra est suffisante et on pourrait donc écrêter la mesure à 250 m. En revanche, dans le brouillard dense, condition privilégiée de fonctionnement de la méthode, la mesure est stable.



FIG. 4.1 – Illustration des trois séquences vidéos de tests.

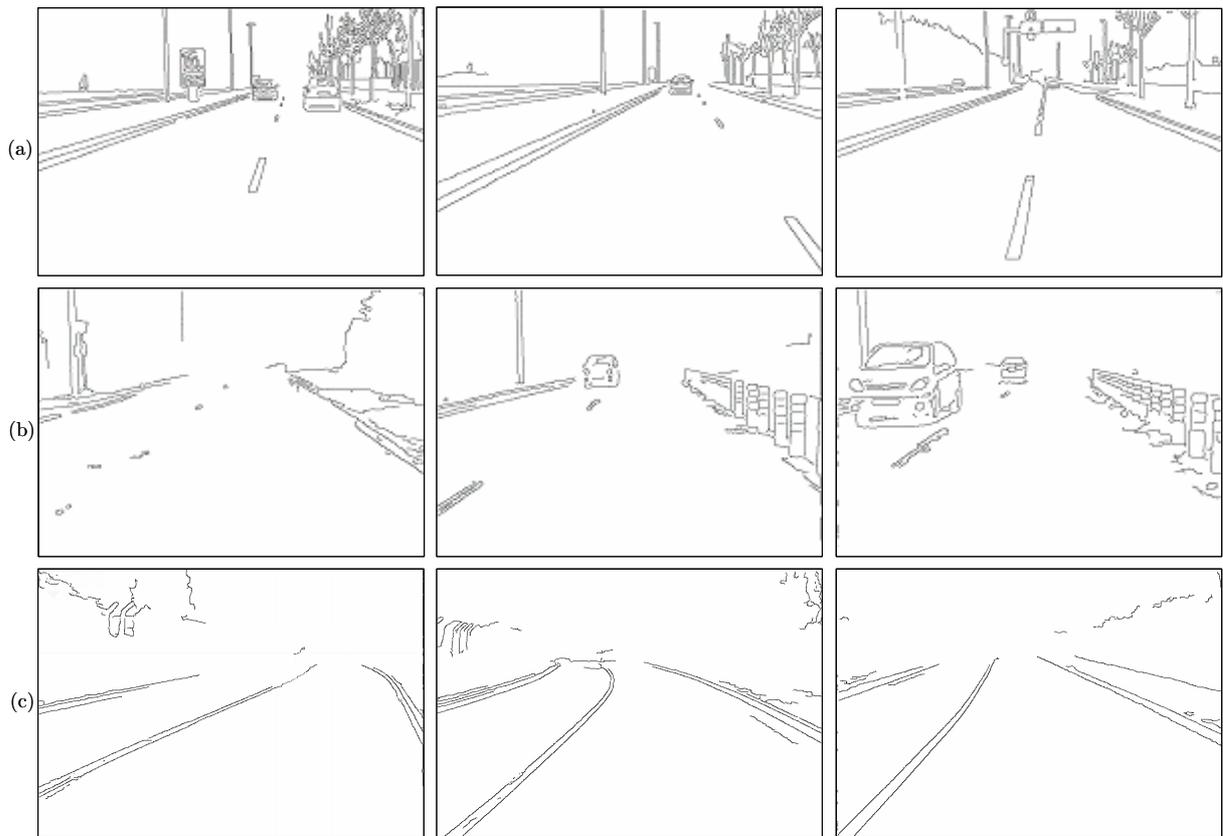


FIG. 4.2 – Résultats de la détection des contours par le filtre de Canny-Deriche (écart-type du filtre  $\alpha = 1$ ).

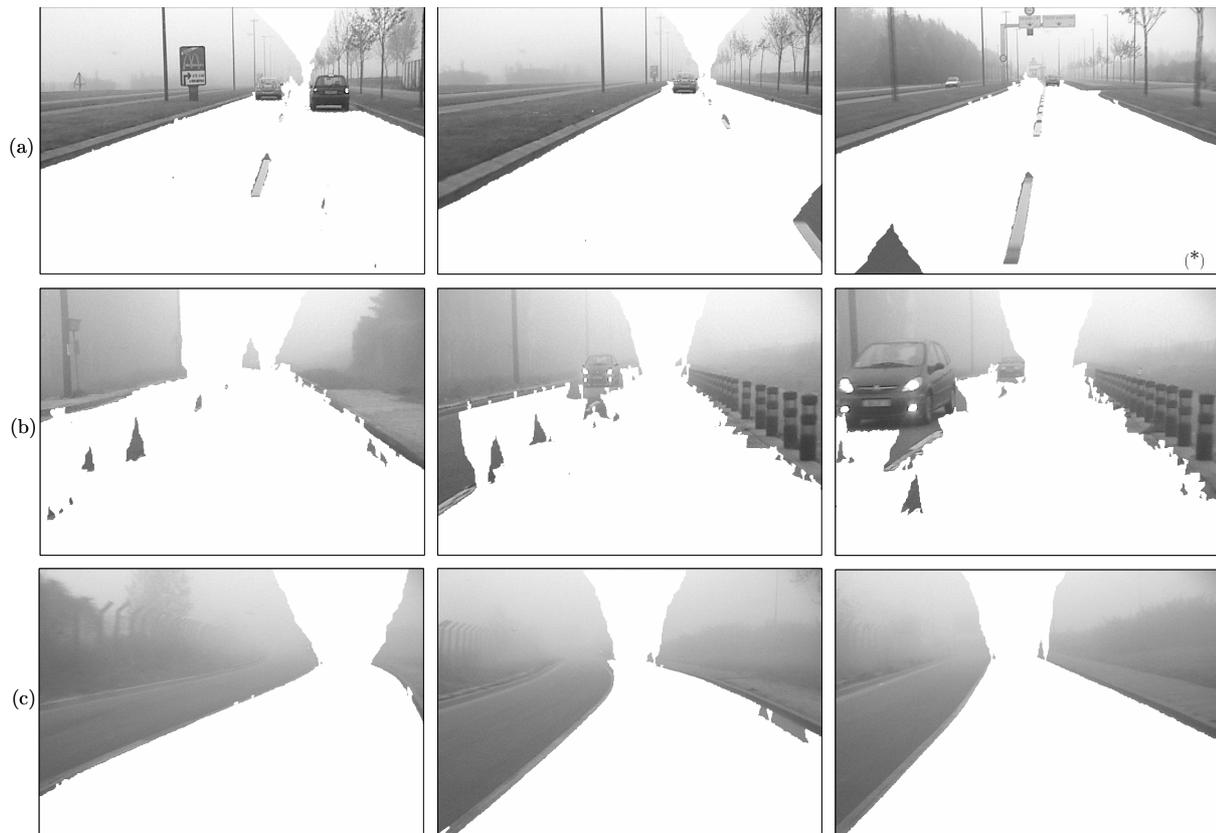


FIG. 4.3 – Résultats de la croissance de région. La région d'intérêt est peinte en blanche. Toutes les croissances de région sont réussies, sauf l'image (\*).



FIG. 4.4 – La ligne blanche horizontale représente l'estimation de la distance de visibilité. Le petit triangle blanc en haut à gauche indique que le système est opérant, alors qu'en noir il est temporairement inopérant.

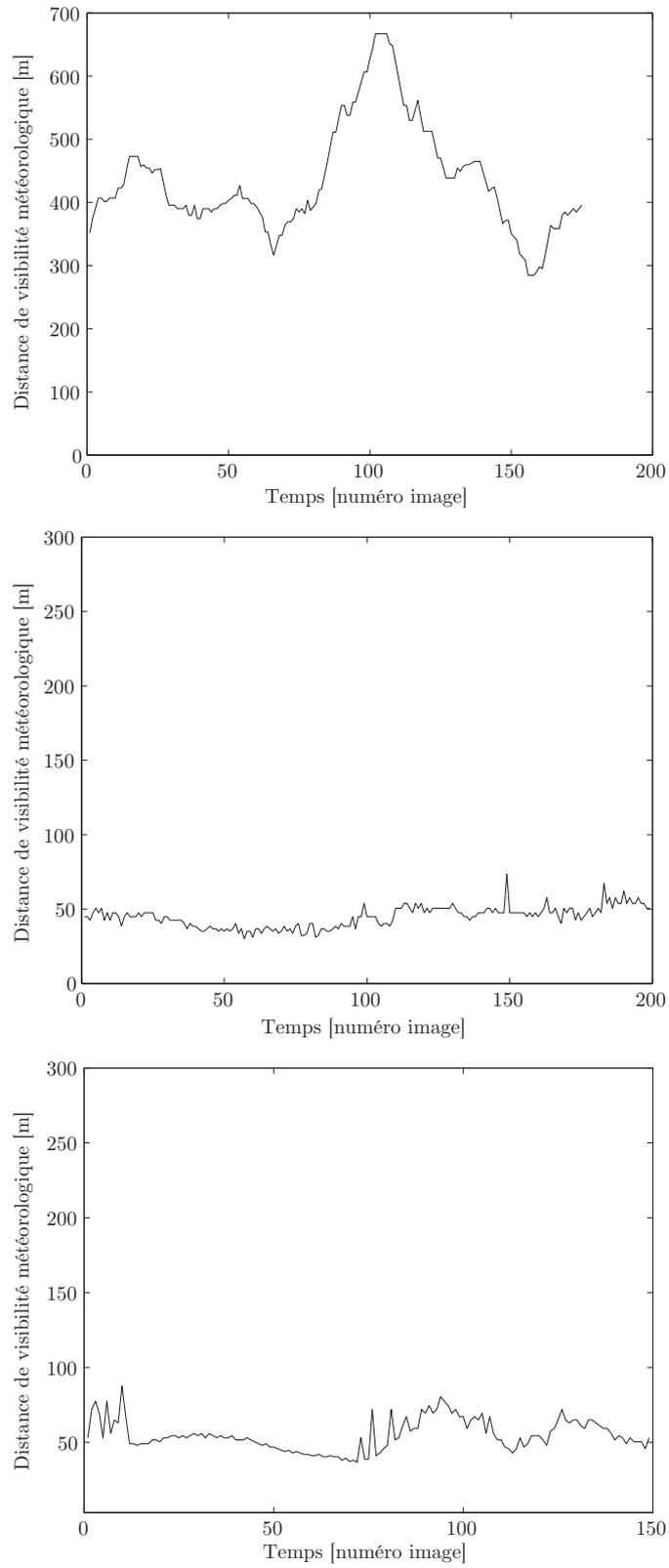


FIG. 4.5 – Mesures de distance de visibilité réalisées sur les trois séquences d'images.

## 4.1.2 Approche stéréoscopique fondée sur l'atténuation des contrastes

### *Présentation des séquences vidéo utilisées*

La méthode présentée au chapitre 3 a été testée de manière qualitative sur trois séquences vidéo. Chacune d'entre elles contient environ 1000 images. Dans la première séquence, le véhicule instrumenté suit un autre véhicule à différentes distances et s'arrête devant différents obstacles. La météo est bonne. La visibilité n'est limitée que par la végétation.

Dans la seconde séquence vidéo, le véhicule instrumenté suit un autre véhicule. Celui-ci finit par s'éloigner et disparaît progressivement à travers un épais brouillard diurne. L'effet de voile est très marqué sur cette séquence et la transition route ciel est très brutale.

Dans la dernière séquence, le véhicule roule sur la piste à travers un épais brouillard à la tombée de la nuit. Les caméras fournissent une image relativement bruitée. Le véhicule instrumenté est seul sur la piste.

Toutes ces séquences ont été enregistrées sur la même portion de la piste de Satory. Les séquences sont chacune illustrées par trois images sur la figure 4.6.

### *Résultats*

Sur la figure 4.7, les résultats du calcul du contraste local sur les images entières sont représentés. En fait, comme cela est expliqué dans le paragraphe 3.5.2, le calcul n'est normalement pas effectué sur l'image entière pour gagner en temps de calcul. On voit clairement une baisse du contraste en fonction des conditions de visibilité. Comme nous l'avons montré précédemment, le calcul du contraste ne semble pas trop perturbé par le bruit du capteur. Les contours détectés semblent pertinents. Il est à noter que la méthode est plus sensible dans la troisième séquence, de nuit, que dans les deux autres. Ceci est dû principalement à la formule de contraste utilisée, plus sensible dans le bas de l'échelle de gris.

Sur la figure 4.8, les résultats du calcul des cartes de disparité améliorées sont présentés. On voit en particulier que les objets verticaux et les objets au-dessus de la ligne d'horizon sont considérés comme obstacles et sont clairement mis en évidence. La disparité des points appartenant à la surface de la route est calculée et semble cohérente. On voit ici l'intérêt du calcul de la carte de disparité en deux passes, qui permet de s'assurer de la cohérence globale de la disparité des pixels appartenant à la surface de la route. Ainsi, les cartes de disparité ont la structure souhaitée : en ne tenant pas compte des pixels dits obstacles et en balayant l'image de haut en bas en partant de la ligne d'horizon, les pixels, dont la disparité est connue, sont de plus en plus proche du capteur. Cependant, comme nous l'avons déjà dit, il y a relativement peu de pixels dont la disparité est connue, du fait de l'utilisation d'une méthode stéréoscopique éparse.

Sur la figure 4.9, le résultat final est représenté. Le voisinage le plus éloigné ayant un contraste supérieur à 5 %, sur lequel la disparité d'un pixel est connue, est peint en blanc. Le pixel, dont la disparité est connue, est identifié au moyen d'une croix noire à l'intérieur de ce voisinage blanc. Il faut remarquer qu'en présence d'un objet masquant temporairement la scène routière, l'algorithme parvient à s'affranchir du problème et à donner une solution cohérente. Par beau temps, on voit que la solution proposée est très proche de la ligne d'horizon. Ainsi, le nombre d'étapes de calcul du contraste est très restreint. Par conditions météorologiques dégradées, la solution proposée est plus basse dans l'image. Cependant, le nombre d'étapes de calcul du

contraste n'est pas plus élevé, car il y a peu de pixels dont la disparité est connue. Ainsi, quelles que soient les conditions de visibilité, on s'assure d'un temps de calcul relativement constant.

Finalement, sur la figure 4.10, les courbes de mesure de la distance de visibilité mobilisée sont tracées pour les différentes séquences vidéo. Par beau temps, la résolution maximale du capteur stéréoscopique est atteinte. Par temps de brouillard, les mesures sont relativement stables, ce qui laisse penser que la méthode est efficace par conditions météorologiques dégradées. Dans les séquences de brouillard, les visibilité estimées semblent en accord avec l'impression visuelle que nous avons eue en capturant ces séquences.



FIG. 4.6 – Images capturées à bord du véhicule (a) par beau temps; (b) par temps de brouillard; (c) par temps de brouillard à la tombée de la nuit.

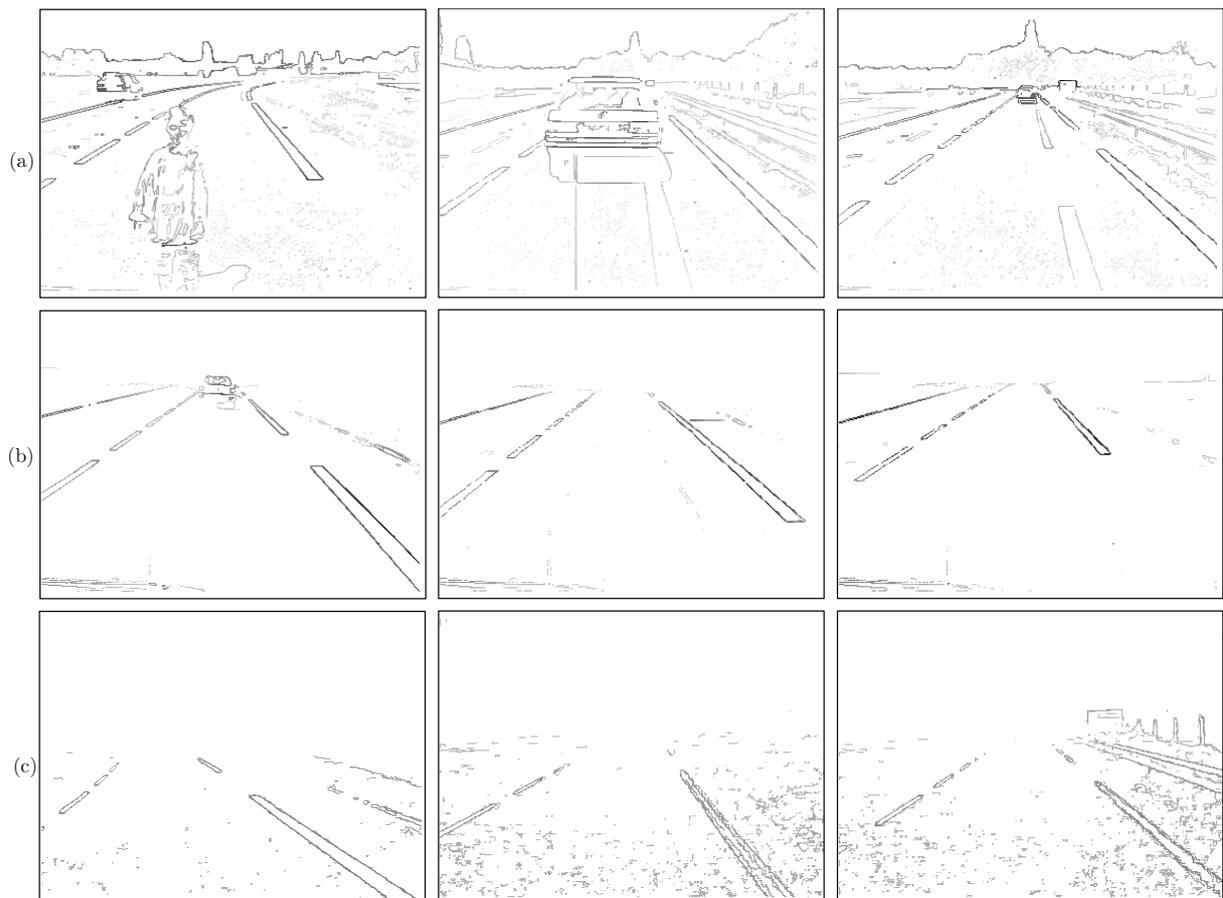


FIG. 4.7 – Exemples de calculs de contraste supérieur à 5 % (a) par beau temps ; (b) par temps de brouillard ; (c) par temps de brouillard à la tombée de la nuit.

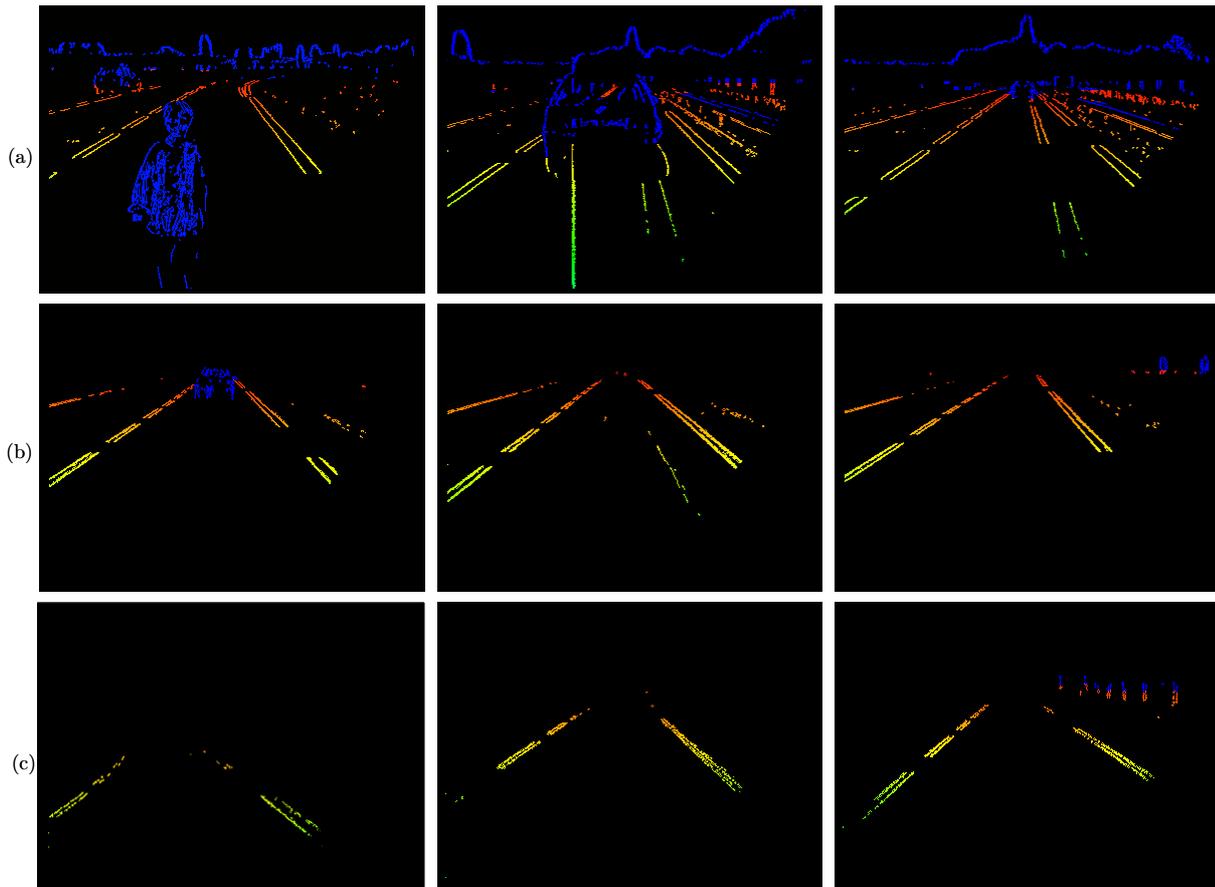


FIG. 4.8 – Exemples de cartes de disparités de l’environnement du véhicule (a) par beau temps; (b) par temps de brouillard; (c) par temps de brouillard à la tombée de la nuit. Les points bleus sont considérés comme des points obstacles. La couleur associée aux pixels est proportionnelle à leur disparité.

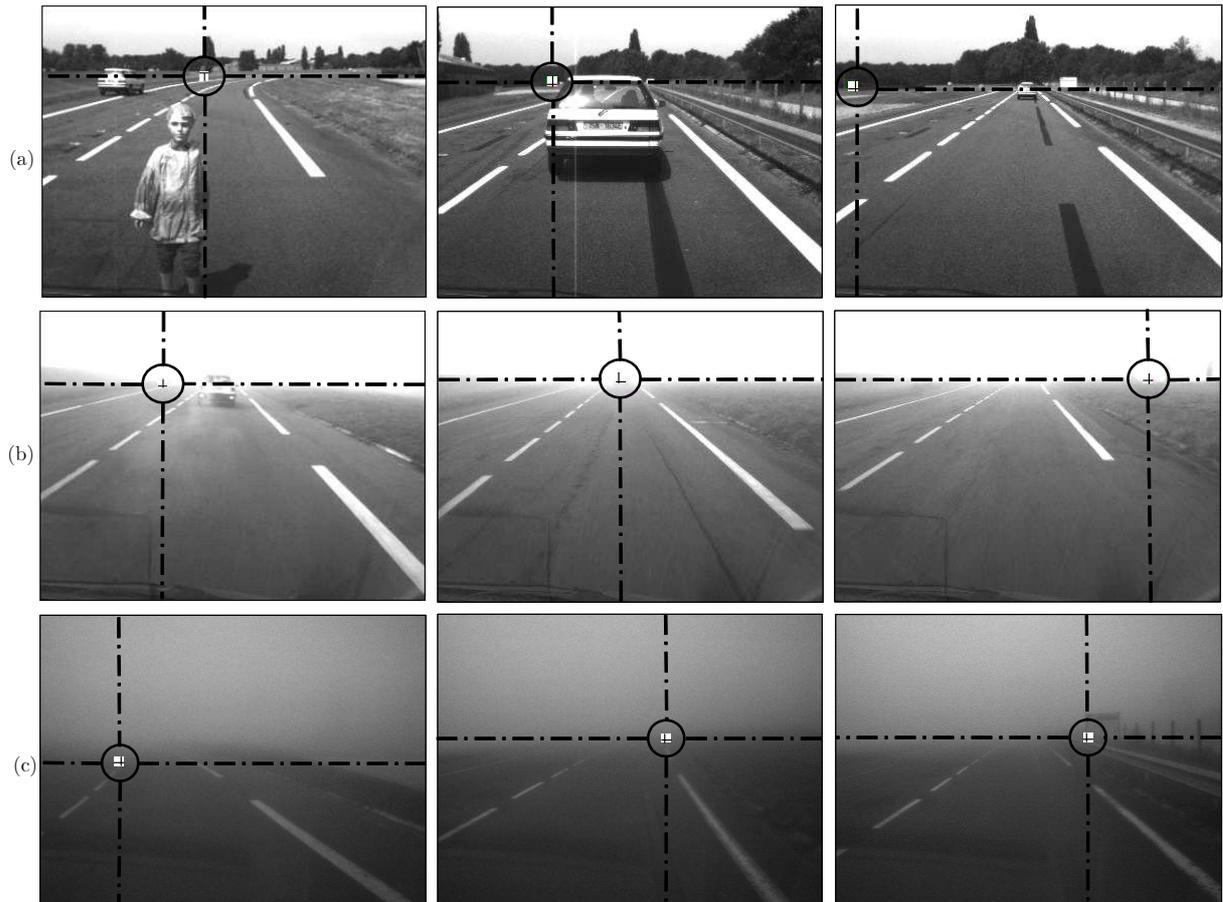


FIG. 4.9 – Résultat final du calcul de distance de visibilité mobilisée : la fenêtre la plus éloignée possédant un contraste supérieur à 5 % au sein de laquelle la disparité d'un pixel est connue, est peinte en blanc, (a) par beau temps ( $V_{mob} \approx 250m$ ), (b) par temps de brouillard ( $V_{mob} \approx 75m$ ), (c) par temps de brouillard à la tombée de la nuit ( $V_{mob} \approx 30m$ ).

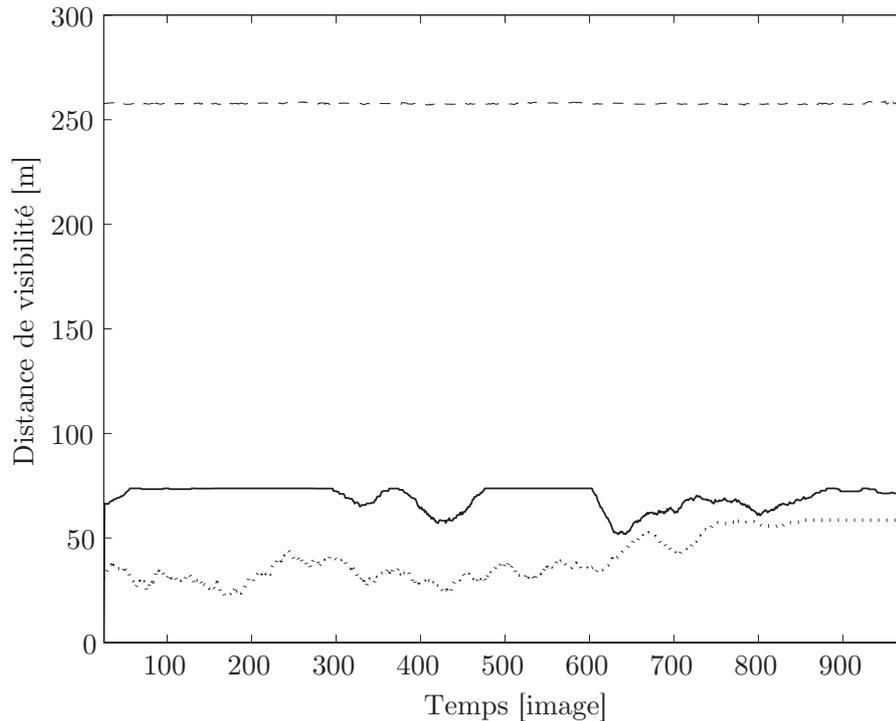


FIG. 4.10 – Courbes de distance de visibilité mobilisée mesurées sur les séquences de test, (–) par beau temps, (—) par temps de brouillard, (...) par temps de brouillard à la tombée de la nuit .

### 4.1.3 Bilan de l'évaluation qualitative

L'évaluation qualitative présentée dans ce paragraphe et menée séparément sur les deux méthodes a permis de montrer une bonne corrélation entre la mesure retournée par les algorithmes en conditions dynamiques et l'impression visuelle que l'on peut avoir des images présentées.

C'est suffisant si l'on souhaite qualifier les conditions de visibilité en créant des grandes classes de visibilité : visibilité très faible, faible, moyenne, bonne, excellente... C'est donc déjà un résultat très intéressant qui peut suffire dans de nombreux cas.

En revanche, si l'on veut quantifier précisément la visibilité, une telle évaluation qualitative ne permet pas de se forger une opinion sur la pertinence des méthodes proposées. Pour combler cette lacune, nous proposons donc dans le paragraphe suivant une évaluation quantitative des méthodes.

## 4.2 Évaluation quantitative des méthodes

Ne disposant pas d'un capteur de référence, nous ne sommes pas en mesure de comparer directement les sorties de nos algorithmes à une mesure de référence. Nous proposons une alternative qui consiste à utiliser des images contenant une ou plusieurs références parfaitement connues en terme de photométrie et de distance.

Nous n'avons pas pu non plus avoir accès à un capteur fixe (diffusiomètre par exemple) pour des raisons de non disponibilité des capteurs, pourtant existants, au sein du réseau scientifique et technique du Ministère de l'Équipement. Dans l'avenir, nous avons tout de même bon espoir d'en obtenir un.

Puisque ces références ne peuvent pas être présentes dans l'environnement quand le véhicule roule, la seule solution est de procéder de manière statique. Pour cela, nous avons décidé de concevoir des mires spécifiques et de les installer sur un site situé sur les pistes de Versailles Satory. L'idée est de capturer des images de scènes routières comportant ces mires sous différentes conditions météorologiques.

Pour instrumenter ce site, il nous a fallu choisir le graphisme et la photométrie des mires ainsi que leur nombre, disposition et taille. Une fois le site équipé, il a fallu établir un protocole expérimental et s'assurer de son adéquation avec les objectifs initiaux. Ceci étant fait, nous avons pu valider quantitativement nos approches. Ce paragraphe se propose de détailler l'ensemble de ce processus expérimental.

### 4.2.1 Réalisation d'un site dédié

Ce paragraphe présente les caractéristiques du site de calibrage réalisé. Tout d'abord, nous détaillons les contraintes que doivent respecter les mires. Puis, nous donnons les différentes alternatives possibles pour implanter sur site le dispositif. Finalement, nous décrivons la solution retenue.

#### *Caractéristiques des mires*

**Photométrie** La définition de la distance de visibilité météorologique selon la Commission Internationale de l'Éclairage est la distance au-delà de laquelle un objet noir de dimensions suffisantes est perçu avec un contraste inférieur à 5 % par rapport au ciel. Compte tenu de cette définition, la photométrie la plus adaptée pour les mires est celle d'un objet noir sur fond blanc.

**Fréquence spatiale** A priori, les méthodes développées ne prennent pas en compte la fréquence spatiale des objets pour décider s'ils sont visibles ou non. La fréquence spatiale n'est donc pas un facteur crucial dans la conception des mires. Néanmoins, on peut envisager d'en tenir compte dans le cas d'une méthode tirant partie d'une modélisation de la vision humaine, comme c'est le cas de la méthode de NEXYAD S.A.

**Orientation** Notre méthode de calcul du contraste local utilise un voisinage  $V_4$ . A priori, elle est donc plus adaptée au calcul du contraste sur les contours horizontaux et verticaux. Qu'en est-il sur les contours à  $45^\circ$ ? L'utilisation d'un voisinage  $V_8$  est-elle préférable? À la vue de ces propos, il semble intéressant de disposer de mires proposant trois orientations, à savoir  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ .

**Géométrie** La principale caractéristique géométrique des cibles à considérer est la largeur minimale détectable d'une bande noire. Plus exactement, c'est l'angle solide que représente cette largeur au niveau du point de mesure, autrement dit sa fréquence spatiale. Cette largeur de bande minimale  $t_{min}$  à la distance  $d$  est donnée par :

$$t_{min} = n \frac{d}{\alpha} \quad (4.1)$$

où  $\alpha$  est le rapport de la focale de la caméra et de la taille des pixels et  $n$  le seuil en pixels de détection d'une bande noire. Pour obtenir la largeur de frange souhaitée, il reste à se fixer un seuil de détection d'une frange noire et de savoir à quelle distance on observe celle-ci. Le tableau ci-dessous donne la taille d'une telle bande noire en fonction du seuil de détection souhaité. Le calcul est effectué pour les caméras et la focale utilisées dans les véhicules expérimentaux du LIVIC.

Distance (m)	Seuil de détection (nb de pixels)		
	n=2	n=4	n=8
50	0,1	0,2	0,4
100	0,2	0,4	0,8
150	0,3	0,6	1,2
200	0,4	0,8	1,6

TAB. 4.1 – Largeur d'une bande noire en mètres en fonction du seuil de détection et de la distance de prise de vue pour une image PAL (matrice 1/2",  $f = 8,5\text{mm}$ )

### Implantation sur site du dispositif

Deux solutions sont possibles. Soit on construit un seul grand panneau regroupant  $p$  fréquences spatiales différentes correspondant à  $p$  distances de prise de vue. Ceci oblige donc à effectuer  $p$  acquisitions. Soit on construit  $p$  panneaux à fréquence spatiale constante que l'on place à  $p$  emplacements. Dans ce cas, une seule acquisition est nécessaire. Il faut alors veiller à bien orienter les panneaux de façon à avoir l'ensemble des panneaux dans le champ de vue de la caméra sans recouvrement des panneaux entre eux. Ces deux implantations sont schématisées sur la figure 4.11.

### Solution retenue

La solution retenue consiste à utiliser plusieurs panneaux compacts à trois orientations ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) signées, c'est-à-dire noir sur fond blanc d'une part et blanc sur fond noir d'autre part, pour une prise de vue unique. Le graphisme des panneaux retenus est présenté sur la figure 4.12.

L'orientation des panneaux est normale à la droite joignant le point de prise de vue au centre des panneaux. La hauteur des panneaux a été fixée de façon à ce que leur centre soit à la hauteur des caméras dans le véhicule. La taille des panneaux est fixée en respectant deux règles. Premièrement, la bande de largeur  $t$  (cf. figure 4.12) à la distance souhaitée doit être visible et donc comporter plus de deux pixels pour éviter les effets dus à la quantification. Deuxièmement, les panneaux doivent être les plus compacts possibles pour éviter une trop forte prise au vent et le recouvrement d'un panneau sur l'autre. Enfin, nous avons souhaité que leur taille apparente dans l'image soit la même pour faciliter au maximum l'écriture de l'algorithme d'analyse d'images permettant de les détecter.

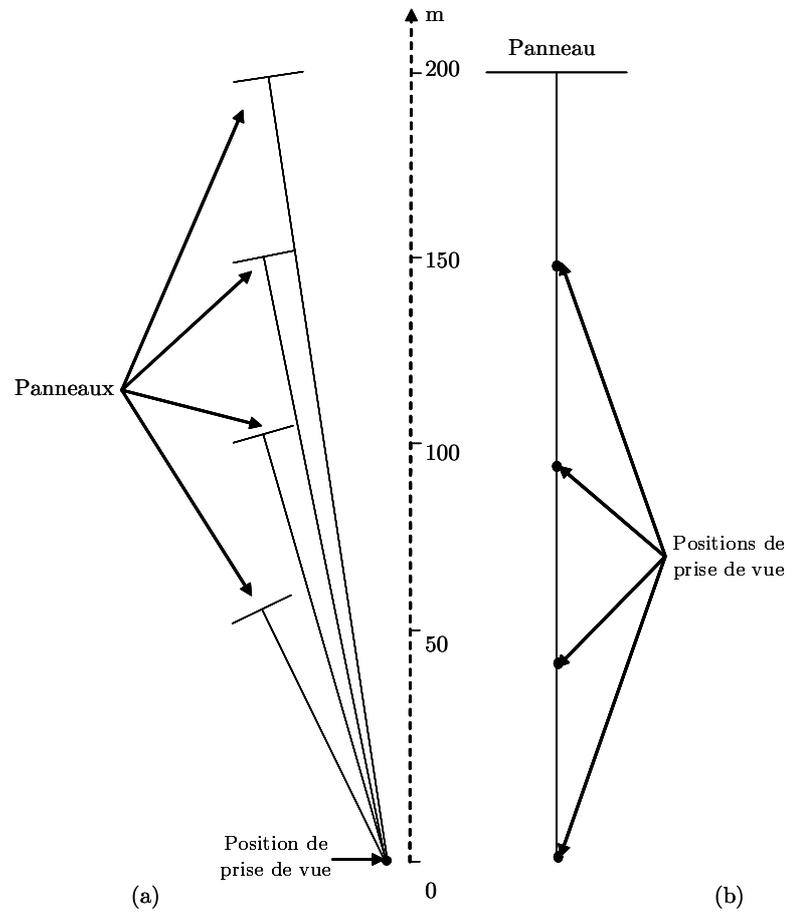


FIG. 4.11 – Implantation sur site des mires de calibration : (a) utilisation de  $p$  panneaux conduisant à une seule acquisition d'image ; (b) utilisation d'un seul panneau conduisant à  $p$  acquisitions d'image.

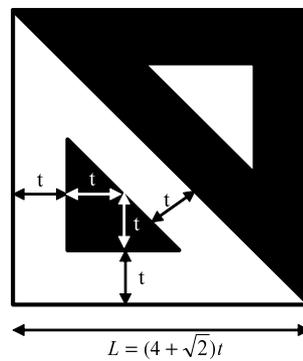


FIG. 4.12 – Graphisme retenu pour les panneaux.

Au bilan, nous avons placé cinq panneaux dont les dimensions et les positions sont données dans le tableau 4.2. Un sixième panneau, le plus petit d'entre eux, est mobile pour permettre de mesurer les très faibles visibilités. Une photographie du site comportant les cinq mires fixes est donnée sur la figure 4.13.

Les positions des panneaux peuvent paraître étonnantes. En fait, nous ne disposons que d'un terrain de 195 m de long au lieu des 200 m prévus. Une fois l'emplacement du premier panneau défini, nous avons calculé l'angle solide que celui-ci représentait et positionné de proche en proche les différents panneaux de façon à ce que l'angle solide soit le même pour chaque panneau et que leurs surfaces soient normales à la direction d'observation, tout en vérifiant qu'ils ne se recouvraient pas. Cela a été réalisé à l'aide d'un théodolite à visée laser, ce qui explique que les positions des panneaux soient connues aussi précisément.

Numéro de la mire	1	2	3	4	5	6
Distance d'observation (m)	0-35	65,2	97,6	130,7	162,4	195
Largeur de la mire $L$ (m)	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Largeur de la bande $t$ (m)	0,1	0,19	0,28	0,37	0,47	0,56

TAB. 4.2 – Position et dimensions des différentes mires réalisées.

En se référant au tableau 4.1, nous voyons que la largeur de la bande noire  $t$  est proche du seuil minimum de détection, soit  $n = 2$ , car il a fallu faire un compromis acceptable sur la taille des mires. La plus éloignée est déjà très impressionnante ( $9 \text{ m}^2$ ) et offre une prise au vent importante. D'ailleurs, en décembre 2004, des vents de 140 km/h ont balayé les Yvelines. Des branches d'arbres ont été cassées sur les arbres bordant les pistes. Pourtant les mires n'ont pas bougé, ce qui nous a rassuré sur le travail réalisé en commun avec la société SES.



FIG. 4.13 – Les cinq mires fixes de calibrage installées sur les pistes de Satory.

Concernant la localisation et la qualité des mires mises en place, le site réalisé correspond parfaitement à nos attentes. Malheureusement, la surface de la route nous convient moins bien. En effet, celle-ci est bétonnée, donc plutôt blanche, et n'est pas marquée sur la totalité de sa longueur. Nous ne sommes donc pas réellement dans les hypothèses de nos méthodes, qui supposent une route noire se confondant avec un ciel blanc d'une part, et des objets blancs sur fond noir d'autre part. En France, les chaussées en béton sont plutôt rares même si, sous l'impulsion

du Ministère de l'Équipement, un certain nombre de kilomètres de chaussées en béton est réalisé chaque année pour conserver le savoir-faire. Ainsi, en cas de crise pétrolière, les chaussées en béton redeviendraient économiquement viables et remplaceraient les chaussées bitumineuses. En outre, les chaussées en béton réalisées le sont sur autoroute, elles sont donc nécessairement marquées. La chaussée à notre disposition n'est donc pas réellement représentative d'une route française. Pour rétablir la situation, nous avons souhaité et souhaitons toujours réaliser deux grands marquages juxtaposés (un blanc et un noir) le long du site. Malheureusement, cela n'a pas encore été possible. Comme nous le verrons par la suite, cela pose un problème pour l'évaluation de la distance de visibilité mobilisée.

#### 4.2.2 Évaluation du site de calibrage réalisé

Le site étant équipé de mires au format souhaité, il nous faut désormais démontrer l'adéquation du site avec notre objectif qui est de comparer la visibilité estimée à l'aide des panneaux et à l'aide des deux méthodes embarquées, qui, pour leur part, ne nécessitent pas de référence. Dans un premier temps, nous montrons comment évaluer la distance de visibilité météorologique à l'aide des mires d'un point de vue théorique et pratique. Puis, nous évaluons ce principe à l'aide de simulations photométriques sur lesquelles la distance de visibilité météorologique est parfaitement connue.

##### *Aspects théoriques*

Positionnons deux mires noires à différentes distances dans le champ de la caméra. Convenons que ces mires, de luminance intrinsèque nulle ( $L_N(0) = 0$ ), sont situées respectivement à des distances  $d_1$  et  $d_2$  de la caméra. Dans le brouillard, d'après la loi de Koschmieder, leurs luminances apparentes respectives sont :

$$\begin{cases} L_N(d_1) &= (1 - e^{-kd_1})L_f \\ L_N(d_2) &= (1 - e^{-kd_2})L_f \end{cases} \quad (4.2)$$

En faisant le rapport de ces deux valeurs, on obtient l'égalité suivante :

$$\frac{1 - e^{-kd_2}}{1 - e^{-kd_1}} = \frac{L_N(d_2)}{L_N(d_1)} \quad (4.3)$$

Si, de plus, on a positionné les cibles de manière à ce que  $d_2 = 2d_1$ , alors :

$$\frac{1 - (e^{-kd_1})^2}{1 - e^{-kd_1}} = \frac{L_N(2d_1)}{L_N(d_1)} \quad (4.4)$$

soit

$$e^{-kd_1} = \frac{L_N(2d_1)}{L_N(d_1)} - 1 \quad (4.5)$$

On en déduit directement la valeur du coefficient d'extinction  $k$ .

$$k = -\frac{1}{d_1} \ln \left( \frac{L_N(2d_1)}{L_N(d_1)} - 1 \right) \quad (4.6)$$

Une technique alternative consiste à utiliser non plus le noir des mires, mais à la fois le noir et le blanc. Du système 4.2, on passe alors à un système plus riche :

$$\begin{cases} L_B(d_1) &= e^{-kd_1}L_B(0) + (1 - e^{-kd_1})L_f \\ L_B(d_2) &= e^{-kd_2}L_B(0) + (1 - e^{-kd_2})L_f \\ L_N(d_1) &= (1 - e^{-kd_1})L_f \\ L_N(d_2) &= (1 - e^{-kd_2})L_f \end{cases} \quad (4.7)$$

où  $L_B(d)$  et  $L_N(d)$  sont les luminances apparentes respectives de la partie noire et de la partie blanche de la mire située à la distance  $d$ . Il en ressort que :

$$\begin{cases} L_B(d_1) - L_N(d_1) &= e^{-kd_1}L_B(0) \\ L_B(d_2) - L_N(d_2) &= e^{-kd_2}L_B(0) \end{cases} \quad (4.8)$$

et donc

$$e^{k(d_1-d_2)} = \frac{L_B(d_2) - L_N(d_2)}{L_B(d_1) - L_N(d_1)} \quad (4.9)$$

soit

$$k = -\frac{1}{d_2 - d_1} \ln \left( \frac{L_B(d_2) - L_N(d_2)}{L_B(d_1) - L_N(d_1)} \right) \quad (4.10)$$

Notons qu'on n'a pas besoin de contraindre la relation entre  $d_1$  et  $d_2$  pour obtenir ce résultat. Si maintenant on ajoute la contrainte  $d_2 = 2d_1$ , on peut comparer les estimations du coefficient d'extinction de façons différentes, ce qui donne un moyen supplémentaire de quantifier la pertinence de la méthode.

On en conclut que, d'un point de vue théorique, outre la localisation spatiale des mires, la seule connaissance de la luminance des parties noires et blanches des différentes mires suffit à calibrer les méthodes embarquées de mesure de la distance de visibilité.

### *Mise en œuvre pratique*

Pour détecter le centre des mires et mesurer les luminances des parties noires et blanches, nous procédons de manière classique en trois temps :

- Nous détectons les gradients à 45° par un opérateur de Kirsch (cf. figure 4.14b),
- Pour chaque pixel  $x$  détecté à l'étape précédente, nous calculons le score de corrélation entre la fenêtre  $16 \times 16$  (taille des mires dans l'image) binarisée centrée sur  $x$  et une mire synthétisée. Nous gardons les points  $x$  dont la corrélation est supérieure à un seuil. Puis, dans chaque fenêtre  $8 \times 8$  centrée sur les pixels détectés à l'étape précédente, nous conservons le meilleur, ce qui permet d'affiner la localisation du centre de la mire (cf. figure 4.14c),
- On segmente et on érode d'un pixel les parties blanches et noires des mires pour éviter les effets de bords sur les contours (cf. figure 4.14d).

On met ainsi à profit l'orientation à 45° de la diagonale des mires, leur photométrie noire et blanche et leur taille unique de  $16 \times 16$  pixels dans l'image. Ceci nous permet de les détecter jusqu'à un contraste de l'ordre de 2 % au sens de Weber sur les images de synthèse du paragraphe suivant. Ce processus de détection des mires est illustré sur la figure 4.14.

Ayant détecté les mires et distingué leurs parties noires et blanches, il ne reste plus qu'à estimer leurs niveaux de gris médian et à utiliser les formules 4.6 ou 4.10 pour estimer la distance de visibilité météorologique.

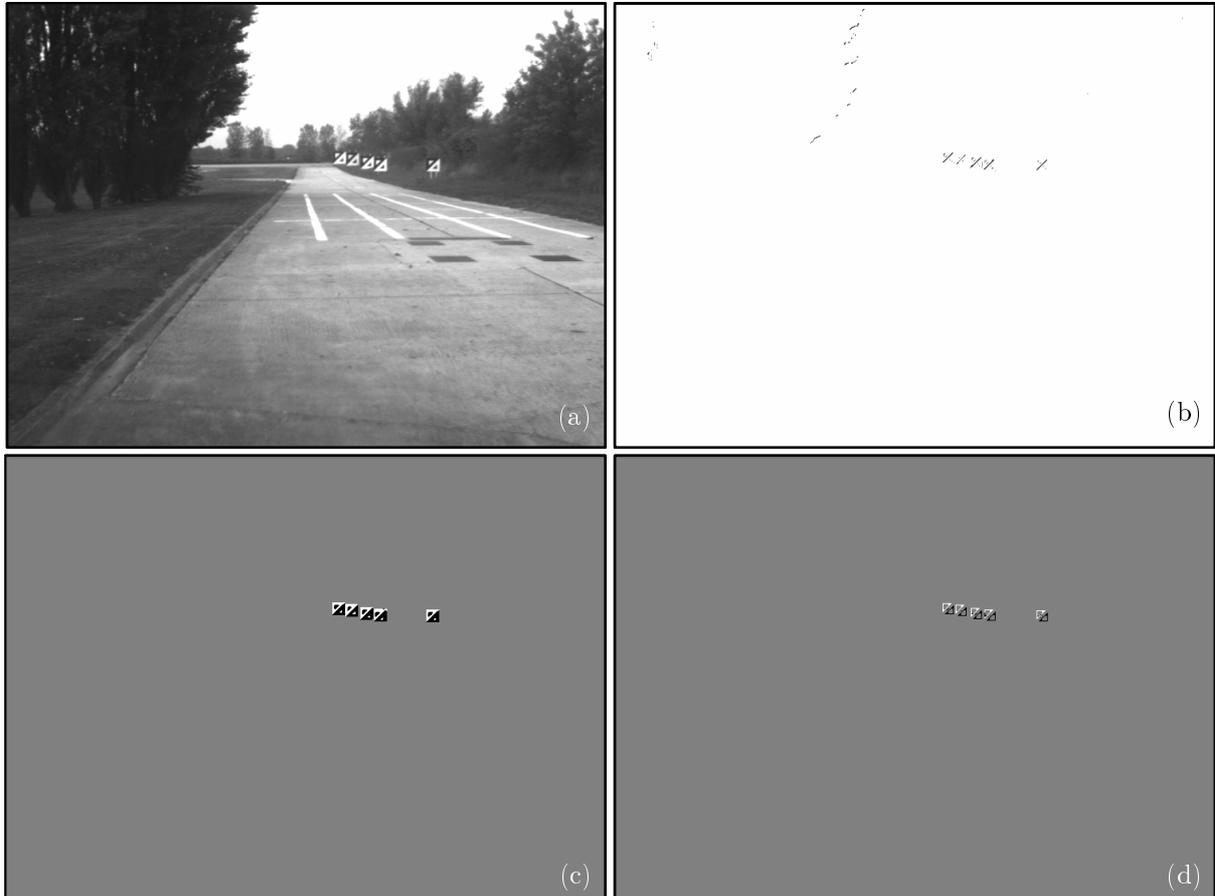


FIG. 4.14 – *Processus de détection des mires en trois étapes. (a) Image originale ; (b) Détection des gradients à 45° par opérateur de Kirsch ; (c) Détection des mires par une technique de corrélation ; (d) Érosion des mires détectées pour éviter les effets de bord.*

### Évaluation du procédé expérimental

Il nous faut qualifier le processus de calibrage de mesure de la visibilité météorologique par mires. Pour cela, la Division ESE du LCPC a reconstruit le site en images de synthèse et a effectué des simulations photométriques de brouillard pour différentes distances de visibilité météorologique  $V_{met}$  : 33 m, 66 m, 100 m, 133 m, 166 m et 200 m. Elles sont représentées sur la figure 4.18.

On parle de simulations photométriques plutôt que d'images de synthèse, car ce sont des niveaux de luminance qui sont manipulés. Ce n'est qu'à la fin du processus que les résultats sont traduits en niveaux de gris pour constituer une image à proprement dit. La dynamique de l'image très élevée sur les simulations photométriques est alors ramenée à 256 valeurs entières pour constituer une image.

Les intensités médianes des mires relevées sur ces images sont données dans le tableau 4.3. Les distances de visibilité météorologique estimées respectivement à partir des formules 4.6 et 4.10 sont données dans les tableaux 4.4 et 4.5. Nous notons  $\widehat{V}_{met}$ , la distance de visibilité météorologique estimée à l'aide des mires.

En utilisant la formule 4.6 qui suppose  $d_2 = 2d_1$ , seuls deux couples de mires peuvent être utilisés. En revanche, en utilisant la formule 4.10 qui ne contraint pas les distances entre elles, dix couples de mires peuvent être employés. La mire 1, qui dans la réalité est mobile et se positionne entre 0 et 35 m, n'était pas construite quand les simulations photométriques ont été réalisées, elle n'est donc pas présente dans les tableaux. De ce fait, les tableaux sont un peu creux.

$V_{met}$ (m)		33	66	100	133	166	200
<b>Mire 2</b>	$L_B$	-	247	233	219	207	196
	$L_N$	-	242	220	198	178	161
<b>Mire 3</b>	$L_B$	-	-	247	238	228	219
	$L_N$	-	-	242	228	213	198
<b>Mire 4</b>	$L_B$	-	-	-	247	240	233
	$L_N$	-	-	-	242	232	220
<b>Mire 5</b>	$L_B$	-	-	-	-	247	241
	$L_N$	-	-	-	-	242	234
<b>Mire 6</b>	$L_B$	-	-	-	-	-	247
	$L_N$	-	-	-	-	-	242

TAB. 4.3 – Mesures des intensités médianes des parties noires  $L_N$  et blanches  $L_B$  des mires plongées dans différentes densités de brouillard.

$\widehat{V}_{met}$ (m)		$V_{met}$ (m)					
		<b>33</b>	<b>66</b>	<b>100</b>	<b>133</b>	<b>166</b>	<b>200</b>
<b>Paire de mires</b>	2 → 4	-	-	-	-	-	207
	3 → 6	-	-	-	143	157	206

TAB. 4.4 – Mesures de distance de visibilité météorologique estimée à partir de l'équation (4.6).

A la vue des tableaux qui précédent, les résultats obtenus sont diversement appréciables. En particulier, certains résultats dans le bas du tableau ne sont pas bons, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, la dynamique des images est compressée pour traduire en niveaux de gris les simulations photométriques, problème auquel s'ajoute un problème d'arrondi. Par la suite, la formule 4.10, logarithmique, est plus sensible aux faibles différences d'intensité des mires éloignées, qu'aux grandes différences d'intensité des mires proches. La visibilité estimée est donc nécessairement moins bonne en utilisant les mires éloignées. Malgré tout, en considérant deux mires toutes deux proches de la caméra ou deux mires éloignées l'une par rapport à l'autre, les résultats sont bons. Ainsi, la figure 4.15 représente la distance de visibilité estimée en fonction de la distance de visibilité simulée pour ces couples de mires spécifiques. Le coefficient de corrélation linéaire est très proche de 1, ce qui laisse penser que le procédé expérimental est adapté à nos objectifs.

$\hat{V}_{met}$ (m)		$V_{met}$ (m)					
		33	66	100	133	166	200
Paire de mires	2 → 3	-	-	106,75	137,5	155	200
	2 → 4	-	-	-	140	156	203
	2 → 5	-	-	-	-	171	186
	2 → 6	-	-	-	-	-	207
	3 → 4	-	-	-	143	157	206
	3 → 5	-	-	-	-	183	183
	3 → 6	-	-	-	-	-	211
	4 → 5	-	-	-	-	211	160
	4 → 6	-	-	-	-	-	210
	5 → 6	-	-	-	-	-	303

TAB. 4.5 – Mesures de distance de visibilité météorologique estimée à partir de l'équation (4.10).

Au bilan, à condition de bien choisir les couples de mires pour appliquer les formules 4.6 ou 4.10, nous pouvons dire que l'utilisation des mires pour estimer la distance de visibilité météorologique est possible et fournit des résultats intéressants pour l'évaluation des méthodes embarquées.

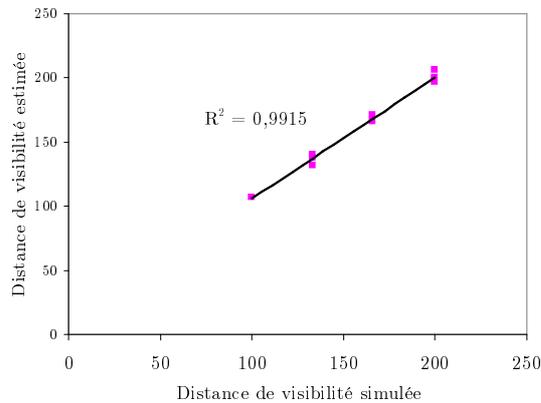


FIG. 4.15 – Visibilité estimée à l'aide des mires en fonction de la distance de visibilité simulée. Seuls les couples où les mires sont éloignées l'une de l'autre, ou bien toutes les deux proches du capteur sont représentés.

### 4.2.3 Mise en œuvre du site de calibrage

Dans le chapitre 3, nous avons souhaité disposer d'une méthode de mesure comportant très peu d'hypothèses et fonctionnant sous toutes les conditions météorologiques. Cela nous a amené à construire notre technique estimant la distance de visibilité mobilisée. Celle-ci repose sur l'hypothèse fondamentale suivante : le contraste des objets présents dans la scène diminue avec la distance et ce d'autant plus rapidement que les conditions météorologiques sont dégradées.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons capturé des images du site de calibrage sous différentes conditions météorologiques : beau temps, bruine, brume, chute de neige, brouillard. Pour chaque condition météorologique, nous avons mesuré la distance de visibilité météorologique à l'aide des mires. Ces images ainsi que les distances de visibilité correspondantes sont données sur la figure 4.16.



FIG. 4.16 – Visibilité estimée à l'aide des mires par différentes conditions météorologiques : beau temps, pluie légère, brume, chute de neige, brouillard léger, brouillard dense.

Il ressort des différents essais réalisés une bonne corrélation entre les distances de visibilité estimées à l'aide des mires et l'impression visuelle. Les images présentées sur la figure 4.16 tendraient donc à confirmer notre hypothèse fondamentale. L'utilisation du site de calibrage nous permet donc déjà de valider une partie des travaux.

Par la suite, compte tenu de la portée des capteurs utilisés, la distance de visibilité maximale estimée est de l'ordre de 250 m. Ainsi, nos méthodes ne s'appliquent que pour des conditions météorologiques très dégradées, ce qui est uniquement le cas sur les deux dernières images de la figure 4.16. Celles-ci correspondent à des images de brouillard. Nous n'évaluerons donc les méthodes de manière quantitative qu'avec des images de brouillard. Ceci ne constitue pas pour autant une limitation de nos méthodes. Effectivement, nous considérons qu'au delà de 250 m, la réduction de la distance de visibilité météorologique ne constitue pas un problème pour l'entité en charge de la conduite.

#### 4.2.4 Résultats quantitatifs sur simulations photométriques

Une première étape de validation quantitative consiste à utiliser des images dont la distance de visibilité météorologique est parfaitement connue. C'est le cas des simulations photométriques que nous venons d'utiliser pour valider le site de calibrage (paragraphe 4.2.2).

##### *Estimation de la visibilité météorologique*

Le tableau 4.6 donne les mesures de distance de visibilité météorologique, notées  $\tilde{V}_{met}$ , obtenues à l'aide de la méthode monoculaire basée sur la loi de Koschmieder et présentée au chapitre 2.

$V_{met}$ (m)	33	66	100	133	166	200
$\tilde{V}_{met}$ (m)	32,9	68	100,3	131,7	162	191,5
<b>Erreur absolue (m)</b>	0,1	2	0,3	1,3	4	8,5
<b>Erreur relative (%)</b>	0,3	3	0,3	1	2,4	4,25

TAB. 4.6 – Performances quantitatives de l'algorithme de mesure de la distance de visibilité météorologique.

En représentant la visibilité estimée  $\tilde{V}_{met}$  en fonction de la visibilité simulée  $V_{met}$  (cf. figure 4.17), le coefficient de corrélation linéaire est très proche de 1. Les images correspondant à ces mesures sont données sur la figure 4.18. Elles laissent penser que la méthode présentée au chapitre 2 est précise. Les résultats sont même meilleurs qu'en utilisant les mires de référence. Nous proposons deux explications à ce résultat plutôt surprenant.

Premièrement, les images ont été synthétisées à l'aide la loi de Koschmieder. La méthode de mesure reposant également sur celle-ci, les résultats sont donc nécessairement bons, puisque le même modèle est utilisé aux deux bouts de la chaîne de validation expérimentale. Deuxièmement, la méthode se fonde sur une dérivée de la courbe représentative de la loi de Koschmieder. Ainsi, la mesure effectuée en relatif, ne souffre pas de la compression linéaire de dynamique réalisée sur les simulations photométriques.

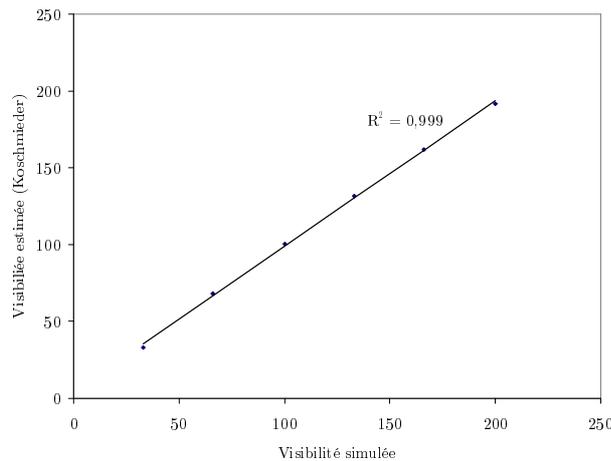


FIG. 4.17 – Visibilité estimée  $\tilde{V}_{met}$  à l'aide de la méthode fondée sur la loi de Koschmieder (chapitre 2) en fonction de la distance de visibilité simulée  $V_{met}$ .

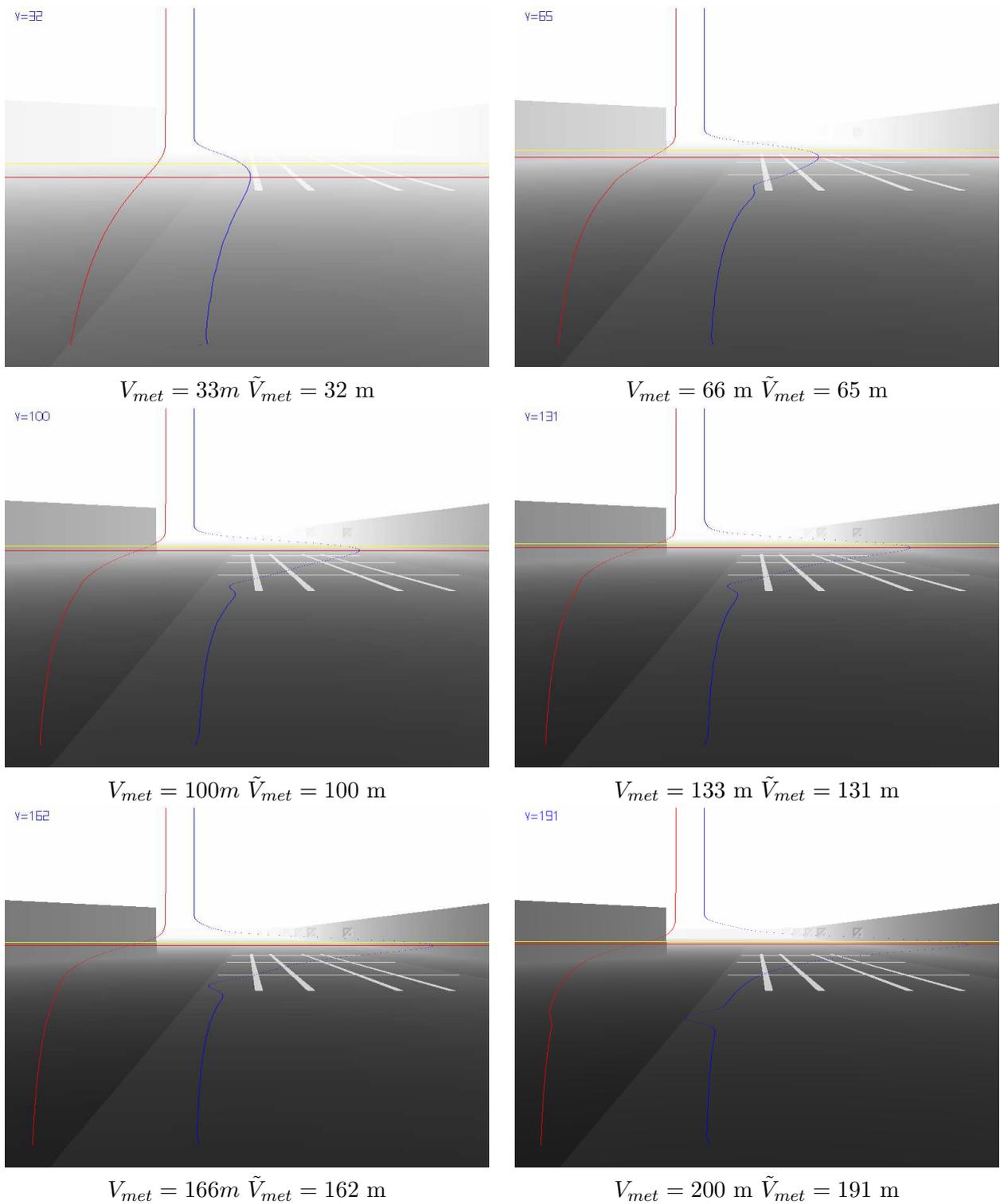


FIG. 4.18 – Mesure de la distance de visibilité météorologique  $\tilde{V}_{met}$  sur simulations photométriques

**Estimation de la visibilité mobilisée**

Le tableau 4.7 donne les estimations de la distance de visibilité mobilisée  $\tilde{V}_{mob}$  effectuées sur les simulations photométriques. Puisque nous ne disposons pas d'un couple d'images stéréo pour ces images, les mesures de distance sont fondées sur le calcul du contraste supérieur à 5 % et la connaissance a priori de la géométrie de la scène.

Nous exploitons également la présence des mires pour estimer la distance de visibilité mobilisée. En effet, la pauvreté de la scène, c'est-à-dire essentiellement l'absence de marquages le long du site, et la compression de dynamique, qui conduit à un affaiblissement du contraste, donnent une distance de visibilité mobilisée très faible quand on utilise uniquement les objets présents à la surface de la route. En fin de chapitre 2, nous avons montré que l'utilisation de l'ensemble des données 3-D de la scène était plus riche. C'est le cas sur ces images, où l'exploitation du monde vertical, c'est-à-dire des mires permet d'obtenir une distance de visibilité mobilisée supérieure, plus proche de la distance de visibilité météorologique.

En exploitant le contraste supérieur à 5 % sur les mires, on peut voir sur la figure 4.20 que la distance de visibilité mobilisée est égale à la distance de visibilité météorologique simulée sur les deux images possédant la plus grande visibilité et est inférieure dans les autres cas. Ceci est lié au fait que les deux mires les plus éloignées ont leur sommet sur fond de ciel, contrairement aux trois autres qui sont sur fond de végétation. Ainsi, compte tenu de la définition de la visibilité météorologique (objet noir sur fond de ciel), le contraste par rapport au ciel de ces deux mires est supérieur à 5 %, conduisant à une erreur inférieure sur les visibilités plus élevées.

$V_{met}$ (m)	33	66	100	133	166	200
$\tilde{V}_{mob}$ (m)	30	46	80	110	166	200
<b>Erreur absolue (m)</b>	3	20	20	23	0	0
<b>Erreur relative (%)</b>	9	30	20	17	0	0

TAB. 4.7 – Performances quantitatives de l'algorithme de mesure de la distance de visibilité mobilisée.

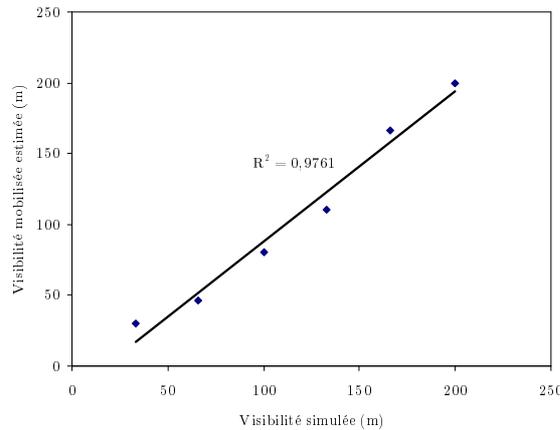


FIG. 4.19 – Visibilité mobilisée  $\tilde{V}_{mob}$  (chapitre 3) en fonction de la distance de visibilité simulée  $V_{met}$  sur simulations photométriques.

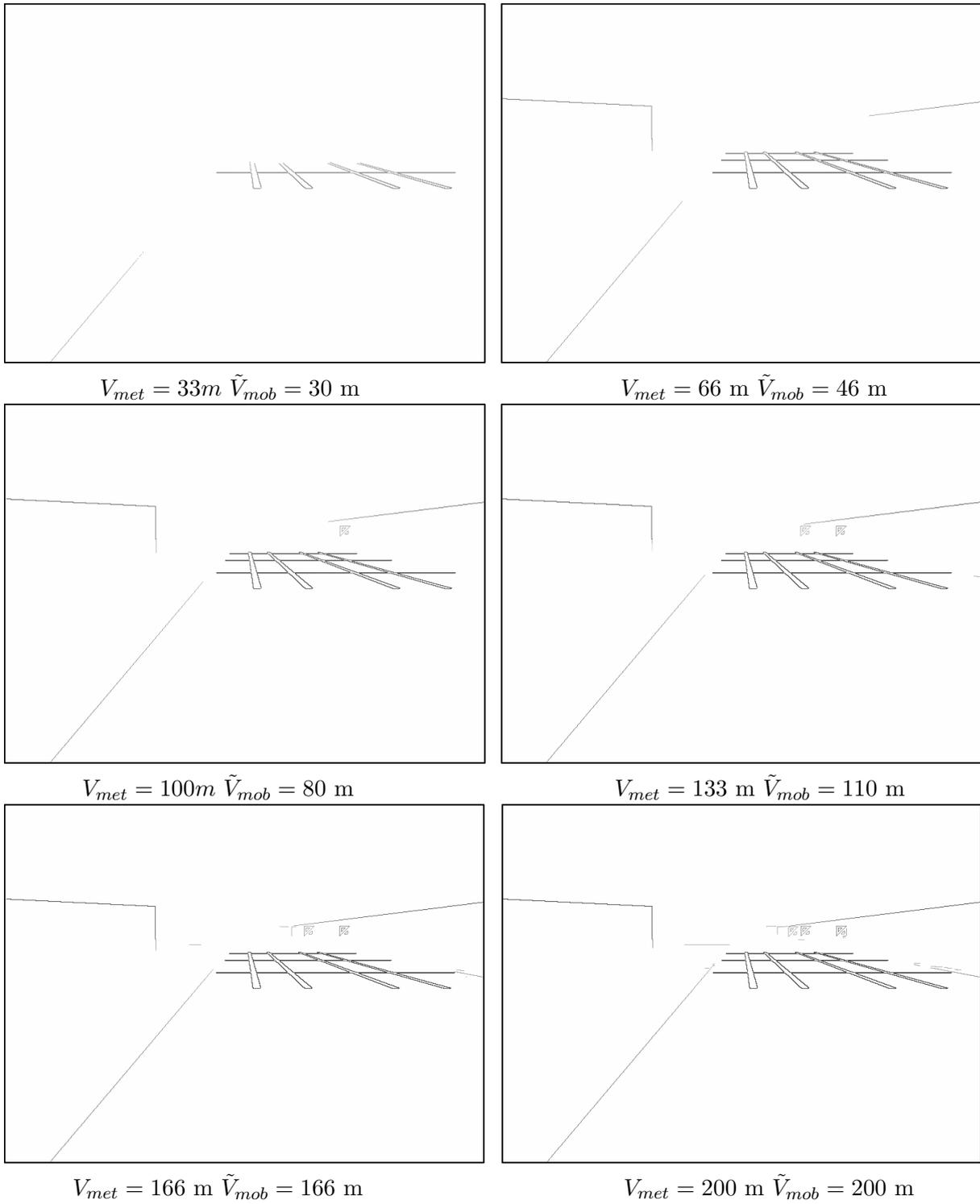


FIG. 4.20 – Contraste supérieur à 5 % et mesure de la distance de visibilité mobilisée sur simulations photométriques

### 4.2.5 Résultats quantitatifs sur images réelles

Les mesures obtenues sur des images simulées dont la visibilité météorologique était parfaitement connue peuvent être considérées comme fiables. En particulier, la mesure de la distance de visibilité météorologique basée sur la loi de Koschmieder donne de très bons résultats, ce qui était prévisible du fait de l'utilisation de la loi de Koschmieder pour à la fois simuler et estimer le brouillard. Dans ce paragraphe, nous proposons d'utiliser, non plus des simulations photométriques, mais des images réelles acquises sur le site de calibrage. Pour pouvoir exploiter celles-ci, nous procédons en quatre étapes :

- Estimation de la position de la ligne d'horizon,
- Estimation de la distance de visibilité météorologique  $\hat{V}_{met}$  à l'aide des panneaux,
- Estimation de la distance de visibilité météorologique  $\tilde{V}_{met}$  à l'aide de la méthode fondée sur la loi de Koschmieder,
- Estimation de la distance de visibilité mobilisée  $\tilde{V}_{mob}$ .

#### *Estimation de la position de la ligne d'horizon*

Pour pouvoir mettre en œuvre l'hypothèse « monde plan », nous devons estimer la position de la ligne d'horizon dans l'image. Celle-ci correspond à la ligne support du point de fuite dans l'image. De nombreux auteurs ont travaillé sur la détection des points de fuite pour identifier les marquages routiers et faire du suivi de routes. Le principe de ces méthodes est de faire voter les segments détectés et de trouver le lieu où la plupart s'intersectent.

Au sein du LIVIC, un algorithme d'extraction de segments a été développé et breveté [Tarel *et al.*, 2001]. Pour obtenir la ligne d'horizon, on construit un histogramme où chaque segment contribue proportionnellement à sa longueur à l'endroit où il s'intersecte avec une droite horizontale. La ligne d'horizon est celle qui donne le meilleur pic d'histogramme. Pour avoir plus de détails sur la construction d'un tel histogramme, il faut se référer à [Tarel, 2002]. Ce procédé est illustré sur deux images tests sur la figure 4.21.



FIG. 4.21 – Extraction de la position de ligne d'horizon

**Estimation de la distance de visibilité météorologique**

Nous avons réussi à capturer, non sans mal, trois séries d’images du site de calibrage par temps de brouillard dense, ce qui représente un total d’une centaine d’images. La densité du brouillard variant légèrement en fonction du temps, nous avons ainsi pu photographier environ une dizaine de conditions de visibilité différentes.

La distance de visibilité météorologique estimée sur ces images à l’aide des panneaux d’une part et à l’aide de la méthode embarquée ont été évaluées. Elles sont tracées l’une en fonction de l’autre sur la figure 4.23. La corrélation entre les mesures est supérieure à 90 %, ce qui est un bon résultat. Deux images de résultats sont données sur la figure 4.22.



FIG. 4.22 – Mesure de la distance de visibilité météorologique sur images réelles : (a)  $\tilde{V}_{met} = 95m$ ,  $\hat{V}_{met} = 94m$  ; (b)  $\tilde{V}_{met} = 61m$ ,  $\hat{V}_{met} = 61m$ .

Bien entendu avec dix mesures, nous ne pouvons pas prétendre avoir traité un échantillon de scénarii statistiquement représentatif. Mais, compte tenu de la difficulté que nous avons eues à obtenir ces quelques images, nous pensons que la tâche est ardue, du fait que nous ne pouvons pas être sur le site en permanence. Pour augmenter la taille de l’échantillon traité, il faudrait entièrement automatiser le processus, ce qui pourrait être envisagé dans l’avenir.

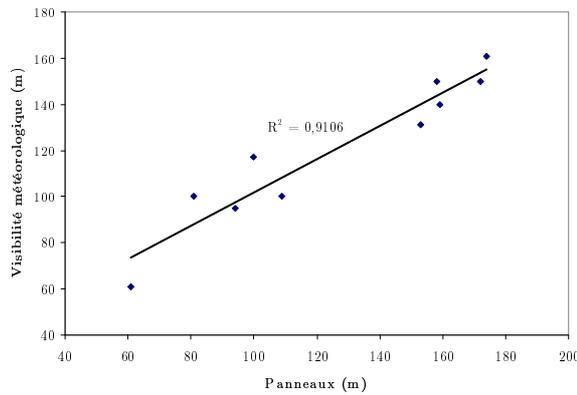


FIG. 4.23 – Distance de visibilité météorologique  $\tilde{V}_{met}$  sur images réelles en fonction de la visibilité estimée à l’aide des panneaux  $\hat{V}_{met}$ .

*Estimation de la distance de visibilité mobilisée*

La distance de visibilité mobilisée estimée sur ces images à l'aide de la méthode embarquée a été évaluée. Sur la figure 4.25, elle est tracée en fonction de la distance de visibilité estimée à l'aide des panneaux. La corrélation entre les mesures est supérieure à 80 %. Deux images de résultat sont données sur la figure 4.24 et les trois phases de calcul sont détaillées.

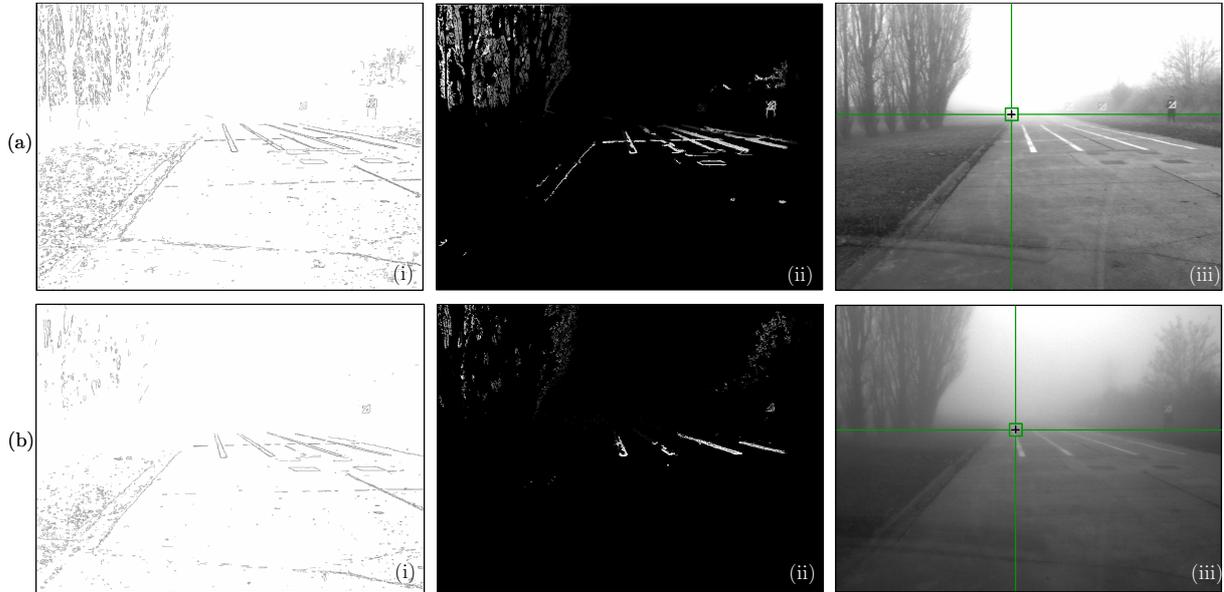


FIG. 4.24 – Mesure de la distance de visibilité mobilisée sur images réelles : (i) Contraste supérieur à 5 % ; (ii) Carte de disparité quasi-dense ; (iii) Résultat final. (a)  $\tilde{V}_{mob} = 80$  m,  $\hat{V}_{met} = 94$  m ; (b)  $\tilde{V}_{mob} = 40$  m,  $\hat{V}_{met} = 61$  m.

Ce résultat est bon mais l'est moins que pour l'estimation de la visibilité météorologique. Ceci est directement lié à la distribution spatiale discontinue des panneaux. De ce fait, le résultat est à notre avis tout à fait satisfaisant.

Il est à noter que l'on retrouve bien que la distance de visibilité mobilisée est inférieure à la distance de visibilité météorologique, comme la théorie le prévoyait.

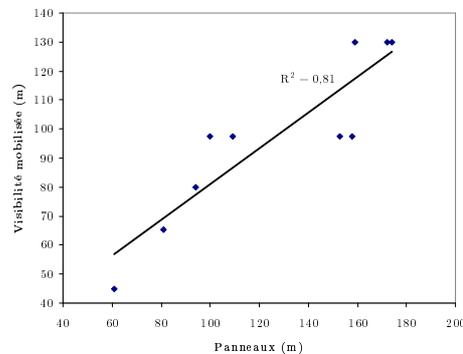


FIG. 4.25 – Distance de visibilité mobilisée  $\tilde{V}_{mob}$  sur images réelles en fonction de la visibilité estimée à l'aide des panneaux  $\hat{V}_{met}$ .

### 4.2.6 Bilan de l'évaluation quantitative

L'utilisation de mires de référence en lieu et place d'un capteur de référence a permis de construire une mesure de référence et ainsi d'évaluer quantitativement les méthodes embarquées de mesure de la distance de visibilité.

Pour cela, nous avons tout d'abord présenté les contraintes pour réaliser un site de calibrage adapté équipé de mires, en termes de photométrie, fréquence spatiale, orientation et géométrie. Deux implantations possibles du dispositif ont été proposées. Finalement, une solution fondée sur l'utilisation de plusieurs mires compactes à base de triangles a été proposée.

Nous avons ensuite montré comment en théorie et en pratique évaluer la distance de visibilité météorologique à l'aide de telles mires. Nous avons vérifié que notre proposition était valide à l'aide de simulations photométriques de brouillard. Il en ressort que c'est le cas à condition d'utiliser des mires éloignées l'une de l'autre, ou toutes deux proches du capteur. En dehors de cela, l'erreur commise semble importante et peut être reliée à la compression de dynamique qu'il a fallu réaliser pour transformer les simulations photométriques en images à niveaux de gris.

Puis, les méthodes ont été testées sur ces simulations photométriques. La méthode présentée au chapitre 2 donne de très bons résultats car elle est insensible à la dynamique réduite des images. La méthode présentée au chapitre 3, testée en utilisant une connaissance a priori de la géométrie de la scène, donne de bons résultats.

Finalement, les méthodes embarquées ont été testées à l'aide d'images réelles. L'estimation de la distance de visibilité météorologique est très correcte. L'estimation de la distance de visibilité mobilisée est correcte mais repose en partie sur la détection des mires qui sont les seuls indices visuels sur la scène, faute d'une chaussée noire et marquée. Il faudra remédier à cela dans l'avenir. Par ailleurs, l'échantillon de scénarios traités est relativement restreint, mais semble difficile à étoffer.

## 4.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons traité de l'évaluation expérimentale des méthodes décrites aux chapitres 2 et 3.

Dans un premier temps, une étude qualitative à l'aide de séquences enregistrées à bord des véhicules expérimentaux sous différentes conditions météorologiques a été réalisée. Il en ressort que les deux méthodes semblent donner des résultats en accord avec la perception que l'on peut avoir des images à l'œil nu. Il semble y avoir corrélation entre les mesures obtenues et les conditions météorologiques présentes dans la scène.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes livrés à une étude quantitative des performances des méthodes. Par manque de capteur de référence, nous avons procédé de manière statique à l'aide d'un site que nous avons équipé de mires spécifiques, dont les positions, la photométrie et la géométrie sont connues. À l'aide de simulations photométriques de brouillards parfaitement déterminés, nous avons montré que l'utilisation de ces mires était adaptée pour estimer la visibilité météorologique de manière statique. Nous avons profité de ces simulations photométriques pour vérifier que nos méthodes embarquées fonctionnaient correctement sur ces images de synthèse. Finalement, nous avons comparé, sur des images réelles du site de calibrage

par temps de brouillard, les distances de visibilité fournies par les méthodes embarquées et la distance de visibilité estimée à l'aide des mires. Il semble y avoir une bonne corrélation entre ces différents résultats, ce qui nous laisse penser que nos méthodes embarquées sont fiables. Cependant, l'échantillon restreint traité ne permet pas de donner une conclusion statistiquement valide.

L'évaluation qualitative des méthodes nous a donc permis de montrer que les méthodes embarquées se comportaient de bonne manière en dynamique. L'évaluation quantitative nous a montré une bonne fiabilité des méthodes en condition statique. Tout ceci nous permet de croire à un comportement dynamique fiable et adapté des méthodes embarquées.