

Lois et outils pour la visibilité

LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES DÉGRADÉES sont l'une des causes de perte de visibilité identifiées en introduction. Elles nous ont conduit à définir de manière générale la notion de distance de « visibilité atmosphérique ». Dans l'introduction, nous avons également fait un premier tour d'horizon des méthodes optiques permettant de mesurer cette distance. Cela nous a permis de montrer l'intérêt d'effectuer cette mesure de manière embarquée à bord d'un véhicule.

Ce premier chapitre propose de revenir plus en détail sur les conditions météorologiques dégradées, en particulier sur le brouillard. Bien comprendre les mécanismes de ce phénomène physique nous permet de distinguer ses différents effets sur la vision routière. Deux lois sont proposées pour les prendre en compte. La loi de Koschmieder [?] permet de modéliser simplement le brouillard diurne. Le modèle étendu d'Éric Dumont [Dumont, 2002] permet de prendre en compte l'ensemble des perturbations dues au brouillard.

De ces lois ou modèles découle la notion de distance de visibilité « météorologique » qui est directement reliée à la densité du brouillard. C'est ce que nous verrons quand nous énumérerons de manière plus précise les définitions existantes de la visibilité et de la distance de visibilité par conditions météorologiques dégradées. Pour cela, le vocabulaire international de l'éclairage, proposé par la Commission Internationale de l'Éclairage [CIE, 1987], nous est d'une grande utilité et est abondamment cité.

Enfin, ayant à disposition les modèles adaptés et sachant quelle distance mesurer, nous examinons à tour de rôle et donnons les principes de fonctionnement des différents capteurs et méthodes optiques que nous pourrions utiliser pour estimer la visibilité atmosphérique de manière embarquée : les visibilimètres routiers, déjà abordés en introduction, le laser, le radar et la caméra. En l'occurrence, les deux seules méthodes de mesure de visibilité par caméra embarquée portées à notre connaissance avant le début de la thèse, sont décrites de manière détaillée.

Mis à part le dernier, ces paragraphes s'inspirent largement des travaux effectués au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées sur le thème de recherche : « Approche physique de la perception de la route dans le brouillard ». Notamment les travaux d'Éric Dumont [Dumont, 2002] sur la caractérisation, la modélisation et la simulation des effets visuels du brouillard pour l'usager de la route, sont repris partiellement, car ils sont indispensables à la bonne compréhension de la suite du mémoire de thèse.

1.1 Caractéristiques du brouillard

Pour appréhender les conséquences du brouillard sur la vision, il convient tout d'abord de définir précisément le brouillard, notamment ses mécanismes de formation et sa structure physique. C'est l'objet de ce paragraphe.

1.1.1 Définition

Le brouillard est un amas de fines gouttelettes ou de fins cristaux de glace, accompagné de fines particules hygroscopiques saturées d'eau souvent de taille microscopique, réduisant la visibilité en surface. Sa composition est identique à celle d'un nuage dont la base toucherait le sol. Lorsque la visibilité horizontale est réduite à moins de 1 km, on parle de brouillard. Lorsque la visibilité atteint ou dépasse cette valeur, on parle plutôt de brume.

1.1.2 Généralités sur la formation du brouillard

Le brouillard se forme d'une façon quasi identique à celle des nuages, c'est-à-dire d'air saturé par refroidissement autour d'une quantité suffisante de noyaux de condensation. L'ajout de vapeur d'eau provient soit de l'évaporation du sol ou de la mer, soit des précipitations. Près des côtes, c'est essentiellement le sel marin qui forme les noyaux, tandis que dans les terres, ils sont surtout constitués de particules de poussière, de fumée ou de pollution automobile et industrielle.

Par ailleurs, la dissipation et le déplacement du brouillard sont liés à la disparition des processus physiques l'ayant engendré ou le maintenant. Au-dessus du sol, le premier de ces processus a trait au rayonnement du soleil, qui le dissipe en le réchauffant à condition qu'aucun nuage n'interfère. Sur mer, le brouillard se dissipe de façon différente. Comme le soleil ne peut réchauffer l'eau suffisamment, le brouillard ne se dissipera qu'avec un changement de direction du vent, ou si la surface marine en aval est plus chaude et que le vent accélère. Par contre, il se maintiendra si le vent le pousse vers une surface marine plus froide.

1.1.3 Les principaux types de brouillard

Brouillard de rayonnement

La nuit ou très tôt le matin, lorsque l'air contient assez d'humidité pour permettre la condensation à la suite du refroidissement par rayonnement, il se forme un brouillard de rayonnement. Mais encore faut-il que l'effet de refroidissement nécessaire à l'atteinte du point de rosée soit maintenu ou renforcé par un ciel clair ou un ciel nuageux associé à des vents faibles.

Ce type de brouillard se dissipe généralement une heure ou deux après le lever du soleil, c'est-à-dire au moment où son rayonnement devient assez important pour augmenter la température du sol. En revanche, si une couche nuageuse empêche le soleil de le réchauffer suffisamment, il peut persister une bonne partie de la matinée, s'épaissir davantage, ou encore se soulever en formant une couche de stratus à basse altitude. Cette couche peut persister quelques heures, mais cela reste peu fréquent.

La topographie a une influence importante sur la formation du brouillard de rayonnement. Il se formera plus volontiers dans les vallées ou les terres basses, plus rarement sur les plateaux, les collines ou les flancs de montagne, et presque jamais sur les grands plans d'eau.

Brouillard d'advection

Lorsqu'une masse d'air chaud et humide est poussée au-dessus d'une surface relativement froide, l'air est refroidi par contact avec cette surface. Si la température de l'air atteint le point de rosée en diminuant, l'air deviendra saturé et il se formera un brouillard de rayonnement. Dans certains cas, la température de l'air et du point de rosée diminuera encore un peu sous l'action de la surface froide et on aura un brouillard d'advection. Ce brouillard peut être accompagné de vents violents. La turbulence mécanique peut alors soulever le brouillard et former des stratus.

Le brouillard d'advection peut se former lorsque de l'air humide passe d'une zone chaude de l'océan à une zone où l'eau est froide. Dans ce cas, le brouillard s'étale et demeure jusqu'à ce que la direction du vent change. Comme la surface de l'eau ne subit pas les effets du réchauffement diurne de façon importante, le brouillard ne se dissipera pas au cours de la journée. Au-dessus du sol, ce brouillard se forme lorsque l'air provient de la mer. Dans certains cas, il s'étale loin à l'intérieur des terres, mais la présence d'une rangée de collines le retiendra sur la côte. Si le réchauffement est suffisant, le brouillard terrestre s'amenuise ou se lève au cours de la journée pour se reformer la nuit. Si une nappe nuageuse se trouve au-dessus du brouillard, celui-ci peut ne pas s'amincir ou se lever et demeurer jusqu'à ce que la direction du vent change.

1.1.4 Structure physique des brouillards

Quel que soit leur mode de formation, tous ces brouillards ont en commun d'être formés d'un ensemble de micro-gouttelettes d'eau, suffisamment petites pour être en suspension dans l'atmosphère. Le brouillard est couramment caractérisé par deux paramètres : la répartition granulométrique des gouttelettes et leur concentration. Ces paramètres dépendent entre autres du processus de formation, de l'altitude, de la température et de la durée de l'événement « brouillard ».

1.1.5 Cheminement de la lumière dans le brouillard

De façon schématique, c'est dans un aérosol contenant un grand nombre de gouttelettes d'eau de quelques micromètres de diamètre que doit cheminer la lumière visible dont la longueur d'onde se situe entre 400 et 700 nm.

Lors de son parcours, le flux lumineux se trouve atténué par deux phénomènes : l'absorption et la diffusion, ce qui conduit à caractériser le brouillard par un coefficient d'extinction k , somme des coefficients d'absorption et de diffusion. En fait, le phénomène d'absorption est négligeable dans ce type d'aérosol. Ainsi, le phénomène prépondérant dans l'atténuation de la lumière est la diffusion, qui dévie les rayons de leur direction initiale. Il est également à la base de « l'illumination du brouillard » ou « luminance de voile » dont les conséquences sont importantes en visibilité routière. Le brouillard est donc caractérisé par un coefficient d'extinction k égal au coefficient de diffusion.

Si Φ_0 est le flux lumineux émis par une source, le flux Φ transmis sur la distance d à travers le brouillard est donné par la loi de Beer-Lambert :

$$\Phi = \Phi_0 T = \Phi_0 e^{-kd} \quad (1.1)$$

T est le facteur de transmission de la couche de brouillard d'épaisseur d , k est le coefficient d'extinction du milieu et le produit kd représente la densité optique de l'épaisseur de brouillard traversée.

Le coefficient d'extinction k dépend de la distribution granulométrique des gouttelettes :

$$k = \pi \sum_i Q_{ext_i} n_i r_i^2 = \sum_i C_{ext_i} n_i \quad (1.2)$$

n_i représente la concentration des différentes classes de particules de rayon r_i . Q_{ext_i} et C_{ext_i} sont respectivement le facteur efficace d'extinction et la section efficace d'extinction de ces mêmes classes.

Pour une goutte de diamètre donné, les équations de Lorenz-Mie [Rozé et Girasole, 2003] permettent de calculer la section efficace d'extinction ainsi que la fonction de phase qui caractérise la répartition spatiale de la lumière diffusée. Dans un milieu tel que le brouillard naturel constitué de gouttelettes de tailles différentes (polydispersé), on peut calculer la section efficace d'extinction et la fonction de phase d'un milieu équivalent monodispersé en tenant compte des fractions granulométriques de la distribution.

1.2 Les effets visuels du brouillard

Dans le paragraphe précédent, nous avons défini quelle était la structure physique du brouillard et le phénomène qui en résultait, à savoir la diffusion de la lumière visible. Dans ce paragraphe, nous proposons de présenter les différents effets de cette diffusion sur la vision.

1.2.1 L'effet de halo

Le brouillard altère le signal visuel en diffusant la lumière émise par chaque source lumineuse. Une partie de cette énergie est diffusée dans la direction de l'œil ou de la caméra, mais depuis une direction excentrée par rapport à celle de la source ajoutant un halo autour du signal transmis, selon un effet analogue à une convolution. Ainsi, par analogie avec un filtre optique, il est possible de caractériser une tranche de brouillard par une fonction de transfert de modulation (*FTM*).

Il a été montré [Dumont, 2002] que la *FTM* varie non seulement avec la densité optique (produit de la distance d par le coefficient d'extinction k), mais également avec la distribution granulométrique du brouillard : plus les gouttelettes sont grosses, plus le halo est intense. Toutefois, cet effet reste secondaire par rapport à la luminance transmise.

Il a également été établi [Dumont, 2002] que la *FTM*, notée M , d'une tranche de brouillard d'épaisseur d et de coefficient d'extinction k quelconques pouvait être déduite de la *FTM*, notée F , d'une tranche de densité optique unitaire du même brouillard, appelée opérateur fréquentiel de contraste (*OFC*), en utilisant la relation suivante dans le domaine de Fourier :

$$M = F^{kd} \quad (1.3)$$

L'effet de halo est illustré dans le cas d'une scène routière par la figure 1.1a.

1.2.2 L'effet d'extinction

De jour, le ciel est la principale source d'énergie lumineuse. Il génère un éclairage relativement uniforme en tout point de l'environnement, variable en fonction de l'heure, de l'endroit et des conditions météorologiques. Une partie de l'énergie lumineuse reçue du ciel est réfléchiée vers l'observateur, ce qui résulte en une luminance intrinsèque L_0 des objets présents dans la scène.



FIG. 1.1 – Illustration des effets du brouillard sur la vision : (a) effet de halo, (b) effet de voile atmosphérique, (c) effet de voile rétro-diffusé.

De nuit, seul l'éclairage artificiel contribue à la luminance intrinsèque de ces objets. Chaque source lumineuse apporte une part de la luminance intrinsèque. En présence de brouillard, le phénomène de diffusion atténue cette contribution d'un facteur égal à la transmissivité e^{-kd_s} , où d_s est la distance qui sépare la source de l'élément de surface considéré, et k est le coefficient d'extinction du brouillard.

La luminance intrinsèque d'un objet est due à la fois à l'éclairage naturel et artificiel. Une partie de cette énergie est diffusée par le brouillard sur le trajet de longueur d qui sépare l'objet de l'observateur. Il s'en suit une atténuation de la luminance d'un facteur égal à la transmissivité e^{-kd} .

1.2.3 Les effets de voile

Le voile atmosphérique

De jour, les gouttelettes en suspension dans l'air entre l'observateur et les éléments de l'environnement routier contribuent également à la luminance apparente en diffusant vers l'œil une partie de l'énergie lumineuse reçue du ciel et des autres gouttelettes. La luminance de voile atmosphérique L_a qui en résulte augmente avec la distance d , jusqu'à se confondre avec la luminance L_f du brouillard à l'horizon. Ce phénomène est illustré visuellement par la figure 1.1b.

$$L_a = (1 - e^{-kd})L_f \quad (1.4)$$

Le voile rétro-diffusé

Le flux lumineux émis par un véhicule aux phares allumés interagit avec les gouttelettes de brouillard devant les projecteurs, et une partie est rétro-diffusée vers le conducteur. La luminance de ce voile rétro-diffusé L_r reste faible par rapport à la luminance de voile atmosphérique de jour, mais elle doit être prise en compte en conditions de conduite de nuit. Cet effet est illustré par la figure 1.1c.

1.3 Modélisation des effets visuels du brouillard

Nous venons de présenter et de définir précisément les différents effets majeurs provoqués par le brouillard sur le signal visuel : effets de halo, d'extinction et de voile. Dans ce paragraphe,

nous présentons deux modèles synthétiques, issus de la littérature, permettant de les prendre en compte.

1.3.1 La loi de Koschmieder

C'est en 1924 que Koschmieder [?] propose sa théorie sur la distance de visibilité 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 reliant la distance d'observation d d'un objet noir et sa luminance apparente L :

$$L = L_0 e^{-kd} + L_f (1 - e^{-kd}) \quad (1.5)$$

Cette loi est élégante. Malheureusement, elle est réservée à l'observation diurne d'objets non lumineux.

1.3.2 Le modèle étendu

Éric Dumont [Dumont, 2002] a proposé un modèle étendu des effets du brouillard qui reprend les trois effets décrits au paragraphe 1.2, à savoir halo, atténuation et voile. Les données du modèle sont le coefficient d'extinction k du brouillard et l'opérateur fréquentiel de contraste OFC . L'expression de la luminance apparente est alors la suivante :

$$L = L_1 + L_2 + (1 - e^{-kd})L_f + L_r \quad (1.6)$$

L_1 modélise l'effet de halo caractérisé par la donnée de l' OFC appliqué aux trajets lumineux directs, et s'exprime sous la forme :

$$L_1 = L_i * \mathfrak{F}^{-1}\{F^{kd}\} \quad (1.7)$$

où L_i désigne la luminance intrinsèque de la source lumineuse et \mathfrak{F} symbolise la transformée de Fourier.

L_2 résulte de l'atténuation de la luminance L_0 issue de l'éclairage naturel et des luminances L_s issues des sources lumineuses artificielles s , et s'exprime sous la forme :

$$L_2 = e^{-kd} \left(L_0 + \sum_s e^{-kds} L_s \right) \quad (1.8)$$

Ce modèle permet de modéliser les effets du brouillard quelles que soient la scène ou les conditions d'illumination rencontrées. L'inconvénient d'une telle généralité est la complexité et la difficulté à renseigner certains paramètres dans le cadre d'une simulation photométrique ou à extraire ces informations de la scène dans le cadre d'une analyse d'images.

1.4 Visibilité et distances de visibilité « atmosphériques »

La perte de visibilité due aux conditions météorologiques dégradées nous a conduit à proposer la notion de « visibilité atmosphérique ». En particulier dans le brouillard, nous avons montré que la perte de visibilité est due aux gouttelettes constituant le brouillard qui perturbent la propagation de la lumière en la soumettant à de multiples diffusions. Deux modélisations de ce phénomène viennent d'être proposées.

Nous avons choisi le terme de « visibilité atmosphérique » pour désigner de manière générique l'ensemble des perturbations dues aux conditions atmosphériques dégradées. En revanche, il existe dans la littérature différentes définitions précises de la visibilité et de la distance de visibilité permettant de qualifier l'atmosphère à travers laquelle est faite une observation visuelle, mais qui sont souvent restreintes. Ce paragraphe permet de lister certaines d'entre elles et de les relier avec les lois ou modèles physiques vus précédemment. Cela permet d'aboutir à une définition précise de la distance de visibilité en conditions météorologiques dégradées.

1.4.1 Définitions de la visibilité

Dans le domaine de l'aéronautique, la visibilité est la distance déterminée par les conditions atmosphériques et exprimée en unités de longueur, à laquelle on peut voir et identifier, de jour, des objets remarquables non éclairés et, de nuit, des objets remarquables éclairés. Dans le domaine maritime, on retrouve à peu près la même définition, à savoir la propriété de l'atmosphère qui fixe l'aptitude d'un observateur à voir et à identifier, de jour des objets remarquables, et de nuit des feux ou des objets lumineux.

Par ailleurs, on définit couramment la notion de visibilité « météorologique » comme la plus grande distance à laquelle un objet noir de dimensions convenables peut être reconnu de jour sur le ciel à l'horizon. Cette définition n'est pas assez précise pour être applicable directement. Ainsi, dans le vocabulaire international de l'éclairage [CIE, 1987], d'autres distances de visibilité sont proposées et permettent de se ramener à la notion de visibilité « météorologique ».

1.4.2 Les différentes distances de visibilité

En pratique, la distance de visibilité est définie comme la plus grande distance à laquelle il est possible de voir et d'identifier à l'œil nu un objet étendu sur le ciel à l'horizon de jour, et une source lumineuse diffuse d'intensité modérée de nuit.

La distinction des conditions diurnes et nocturnes conduit à l'utilisation de deux distances de visibilité. Dans le vocabulaire international de l'éclairage [CIE, 1987], la « portée visuelle » est utilisée de jour, et la « portée lumineuse » est utilisée de nuit. Une troisième distance de visibilité est également introduite, la « portée optique météorologique » qui permet de faire le lien entre les deux définitions précédentes et qui a été choisie dans la terminologie de la météorologie routière [AFNOR, 1998].

La portée visuelle

La portée visuelle est la distance à laquelle un objet donné peut être reconnu dans des conditions déterminées, avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil de contraste [CIE, 1987]. Elle est utilisée comme distance de visibilité de jour, car elle correspond à l'atténuation du contraste C entre l'objet, de luminance L , et le fond sur lequel il se détache, de luminance L_f :

$$C = \frac{L - L_f}{L_f} \quad (1.9)$$

On peut la mettre en relation avec la loi de Koschmieder, qui relie le contraste apparent C d'un objet observé sur fond de ciel à l'horizon, à une distance d'observation d , au contraste C_0

de cet objet lorsqu'il est observé à courte distance et au coefficient d'extinction atmosphérique k que l'on suppose uniforme :

$$C = C_0 e^{-kd} \quad (1.10)$$

La portée lumineuse

La portée lumineuse est la plus grande distance à laquelle un feu donné peut être reconnu dans des conditions d'observation déterminées, avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil d'éclairement sur l'œil de l'observateur [CIE, 1987]. Elle est utilisée comme distance de visibilité de nuit, car elle correspond à l'atténuation atmosphérique du flux lumineux.

On peut la mettre en relation avec la loi d'Allard, qui donne l'éclairement lumineux E produit sur une surface par une source lumineuse en fonction de l'intensité lumineuse I de la source dans la direction de la surface, de la distance d entre la surface et la source et du coefficient d'extinction k que l'on suppose uniforme. La surface est normale à la direction de la source et celle-ci est suffisamment éloignée pour qu'on puisse la considérer comme une source ponctuelle :

$$E = \frac{I}{d^2} e^{-kd} \quad (1.11)$$

La portée optique météorologique

La portée optique météorologique V est la longueur d'un trajet dans l'atmosphère sur lequel le flux lumineux d'un faisceau quasi parallèle de rayonnement, émanant d'une source de lumière de température de couleur 2700 K, est réduit de 95 % [CIE, 1987].

La valeur de l'atténuation a été choisie de telle sorte que, pour un objet noir ($C_0 = 1$), ce terme conduise à une mesure approximative de la visibilité météorologique pour un seuil de contraste C_s fixé arbitrairement à 5 %.

La portée optique météorologique est reliée au coefficient d'extinction atmosphérique k par la formule suivante :

$$e^{-kV} = C_s \quad (1.12)$$

qui s'écrit plus couramment, pour un seuil de contraste de 5 % :

$$V = -\frac{1}{k} \ln(0,05) \simeq \frac{3}{k} \quad (1.13)$$

En réalité, le contraste seuil est fonction de la luminance du fond (ou luminance d'adaptation dans le cas de fonds complexes), de la dimension de l'objet (acuité visuelle) et de son temps d'observation. Il faut également tenir compte de la présence éventuelle de sources éblouissantes et du taux de probabilité de détection souhaité [Adrian, 1989].

Par la suite et compte tenu du seuil de contraste choisi, nous confondons distance de visibilité météorologique et portée optique météorologique et adaptons la notation commune V_{met} pour désigner cette distance. De même, nous utilisons dans la suite du mémoire de thèse, le terme de visibilité météorologique, désormais défini précisément, en lieu et place du terme de « visibilité atmosphérique », utilisé par défaut dans le début du mémoire.

1.5 Mesure de la visibilité par des capteurs optiques

Nous venons de donner une définition précise à la notion de distance de visibilité météorologique et l'avons reliée au coefficient d'extinction k du brouillard. Pour pouvoir mesurer celle-ci, on peut alors imaginer d'employer différents capteurs optiques plus ou moins dédiés. Les visibilimètres routiers sont spécifiques au brouillard. Le laser, le radar ou la caméra sont des capteurs plus génériques, mais que l'on peut envisager d'utiliser pour cette application.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les avantages et inconvénients des différents capteurs possibles. En particulier, nous détaillons deux méthodes existantes de mesure embarquée utilisant des techniques d'analyse d'images.

1.5.1 Les visibilimètres routiers

Sous ce vocable, on désigne principalement deux types d'instruments qui permettent de détecter le brouillard en mesurant le coefficient d'extinction k : les transmissiomètres et les diffusiomètres.

Les transmissiomètres

Leur principe de base consiste à mesurer la transmissivité moyenne de l'atmosphère le long d'un parcours déterminé (cf. figure 1.2). Ils sont composés :

- d'un projecteur constitué d'une source émettant un flux lumineux Φ_0 dans le domaine visible,
- d'un ensemble récepteur situé à une distance invariante d mesurant le flux lumineux Φ reçu.

D'après la loi de Beer-Lambert présentée à l'équation (1.1), le coefficient d'extinction du brouillard, à partir duquel est calculée la distance de visibilité, est donné par :

$$k = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \quad (1.14)$$

Les transmissiomètres sont fiables. Leur sensibilité est liée à la longueur de la base de mesure d . Celle-ci, de plusieurs mètres voire dizaines de mètres, leur procure une bonne représentativité compte tenu des hétérogénéités fréquemment rencontrées dans le brouillard. Malheureusement, ils sont coûteux et l'alignement des blocs optiques est souvent délicat. En outre, compte tenu de la longueur de la base de mesure, ils ne peuvent pas être embarqués à bord d'un véhicule.

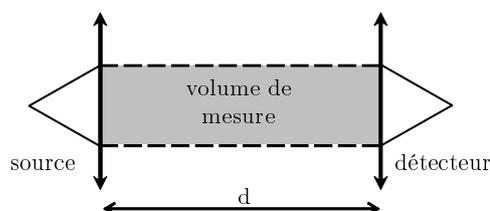


FIG. 1.2 – Le principe d'un transmissiomètre est de mesurer la transmissivité moyenne de l'atmosphère le long d'un parcours déterminé.

Les diffusiomètres

Ces dispositifs ont été développés pour des applications routières, c'est-à-dire essentiellement pour la mesure dans les brouillards denses. Ils permettent de mesurer la lumière diffusée dans un angle solide suffisamment grand et bien défini. Pour effectuer cette mesure, un faisceau lumineux est concentré sur un petit volume d'air (cf. figure 1.3). La proportion de lumière diffusée vers le récepteur est :

$$I = AI_0Vf(\theta)e^{-kd} \quad (1.15)$$

Avec :

- I : intensité diffusée vers le récepteur
- A : constante dépendant de la puissance et de l'optique de la source
- I_0 : intensité de la source
- V : volume diffusant
- $f(\theta)$: valeur de la fonction de diffusion dans la direction θ
- k : coefficient d'extinction
- d : longueur du trajet optique entre émetteur et récepteur.

Généralement, le trajet optique d est petit et le facteur de transmission e^{-kd} est assimilé à 1. Comme $f(\theta)$ est proportionnel à k , l'équation (1.15) peut s'écrire :

$$I = A'I_0k \text{ donc } k = \frac{1}{A'} \frac{I}{I_0} \quad (1.16)$$

où A' désigne une constante, fonction des caractéristiques du matériel.

A son crédit, nous pouvons dire qu'un diffusiomètre est moins cher qu'un transmissiomètre et qu'il n'impose pas d'aligner les blocs optiques (source et détecteur). En revanche, la faible dimension du volume diffusant rend la mesure très sensible aux hétérogénéités du brouillard. De plus, si l'erreur relative commise sur la mesure de distance de visibilité est acceptable pour des visibilités supérieures à 50 m (elle est en ce cas inférieure à 10 %), elle est très importante pour les très faibles visibilités (82 % à 10 m). Cette erreur relative reste cependant acceptable pour l'usage routier, puisque l'erreur absolue est dans tous les cas de l'ordre de quelques mètres.

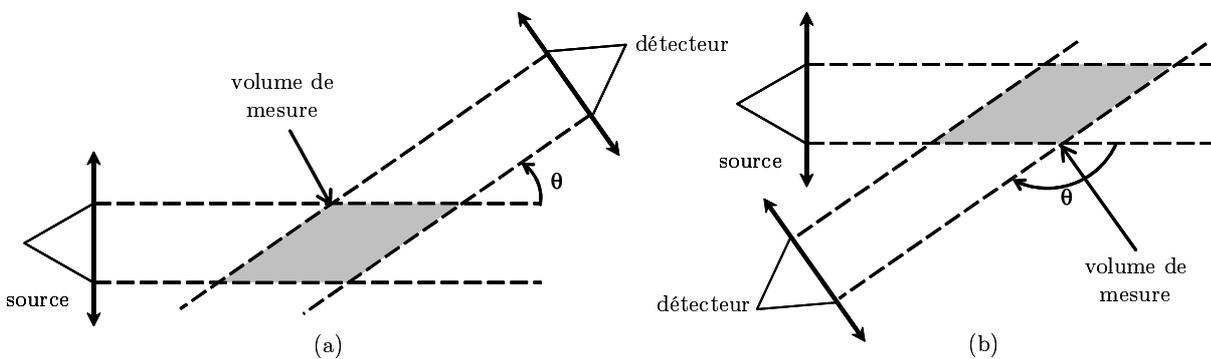


FIG. 1.3 – Le principe (a) d'un diffusiomètre ou (b) d'un rétrodiffusiomètre est de mesurer la lumière diffusée dans un angle solide bien défini.

En revanche, cette sensibilité aux hétérogénéités empêche de concevoir un diffusiomètre embarqué. D'une part, la mesure ne sera représentative que de l'endroit précis où se trouve le

véhicule et aucunement de l'environnement du véhicule. D'autre part, les turbulences qui sont créées par le déplacement du véhicule ne feront que renforcer les hétérogénéités de la masse d'air prise en compte par le diffusiomètre pour la mesure.

1.5.2 Le laser

Dans la littérature, on peut trouver quelques tentatives d'utilisation d'un laser en présence de brouillard. On peut classer les applications en deux catégories. Une première application consiste à détecter des objets situés à une distance supérieure à la distance de visibilité météorologique en émettant un faisceau laser dont la puissance est supérieure à l'atténuation atmosphérique. C'est le cas de Renault dans le cadre du projet Prometheus² ou encore de Pirroda [Pirroda, 1997].

Une autre application consiste à estimer la densité du brouillard. Boehlau [Boehlau, 2001] décrit un ensemble de capteurs optiques utiles pour l'AFS (Adaptative Front Lighting System). Pour adapter le réglage d'un feu anti-brouillard, il utilise un laser qui détecte le signal rétrodiffusé par l'atmosphère. Richter [Richter *et al.*, 2001] décrit un capteur intégré pour l'AFS composé, entre autres, d'un laser pour estimer les conditions de visibilité atmosphériques. Dans les deux articles, les courbes de signal rétrodiffusé sont similaires (figure 1.4). Dans le cadre du projet FOG³, une étude a été menée pour savoir si le laser peut effectivement servir de capteur de visibilité météorologique embarqué. Il en ressort que le laser permet d'avoir une répartition de l'homogénéité spatiale du brouillard, alors qu'un transmissiomètre ou un diffusiomètre donnent une valeur globale. Par contre pour le laser, il faut adapter la puissance et le gain en fonction de la longueur que l'on souhaite explorer et de la densité du brouillard. L'étude faite dans le projet FOG a eu l'intérêt de montrer les performances et les limites du système testé.

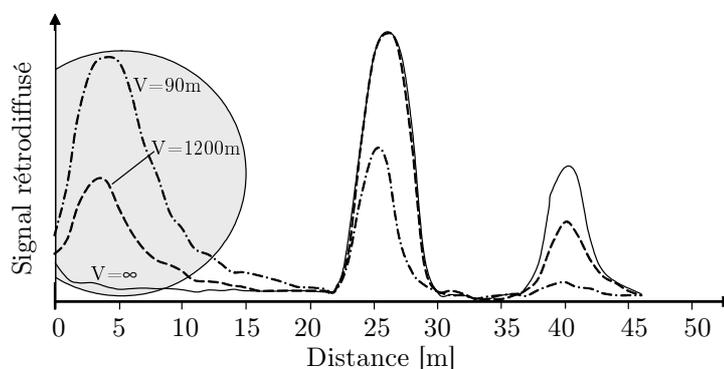


FIG. 1.4 – Signal rétrodiffusé par un laser en présence de brouillard artificiel. Le diagramme montre également la détection de deux cibles fixes.

1.5.3 Le radar

En observant l'atténuation atmosphérique donnée sur les courbes [Bhartia et Bahl, 1984] de la figure 1.5, on constate que les radars automobiles fonctionnant à 77 GHz ou 24 GHz sont peu perturbés par la présence de brouillard. En outre, les radars à 24 GHz sont également peu perturbés par la pluie. De ce fait, ils ne constituent pas un outil adéquat pour la détection des conditions de visibilité, car le phénomène est quasi-transparent pour eux.

²Projet Européen dans le cadre de l'initiative Eureka (1987-1995)

³Projet financé par la Commission Européenne "Improvement of transport safety by control of fog production in a chamber" contrat G6RD-CT-2000-00211 (2000-2003)

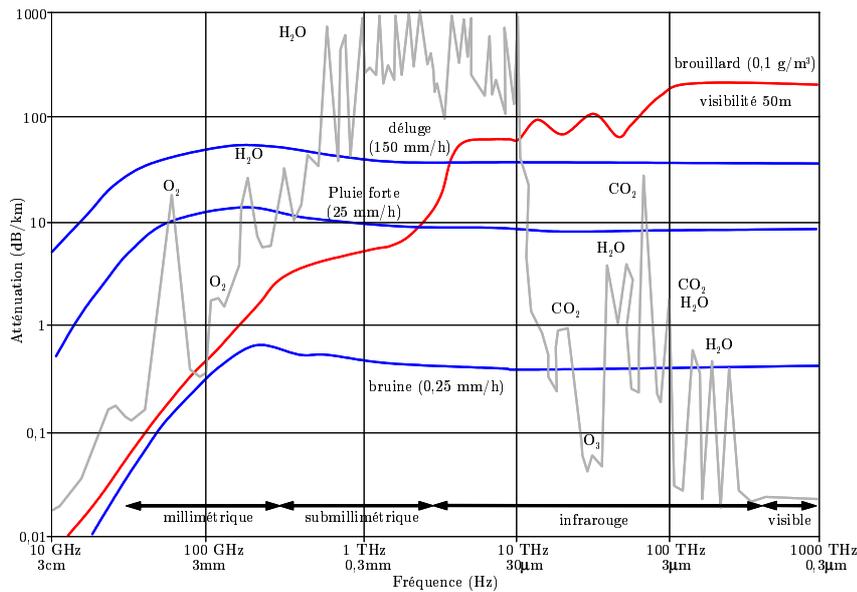


FIG. 1.5 – Courbes caractéristiques de l'atténuation et de l'absorption atmosphériques.

1.5.4 La caméra

L'utilisation d'une caméra n'impose pas d'aligner précisément des blocs optiques, comme dans le cas d'un transmissiomètre, tout en donnant une image représentative de son environnement, ce qui n'est pas le cas d'un diffusiomètre. Elle ne nécessite pas non plus de modifier le réglage de la caméra en fonction de la densité du brouillard. Enfin, dans le cas d'une caméra classique, le spectre pris en compte est essentiellement celui de la lumière visible. L'image issue d'une caméra est donc perturbée par la présence de brouillard.

La plupart des approches utilisent une caméra fixe sur l'infrastructure, ce qui simplifie la tâche puisqu'on dispose alors toujours d'une image de référence. Certaines méthodes cherchent à restaurer le contraste tandis que d'autres recherchent plutôt un seuil de contraste dans l'image. Le contraste dans l'image étant dégradé par les conditions atmosphériques, certains proposent des méthodes pour le restaurer. Ils utilisent, entre autres, la loi de Koschmieder pour modéliser la dégradation des contrastes en fonction de la distance. Ce sujet est abordé spécifiquement dans le paragraphe 2.4.

Kwon [Kwon, 2004] mesure la « visibilité relative » en exprimant la visibilité comme un pourcentage de points visible sur l'image courante par rapport à une image de référence. Ses travaux ne trouvent donc pas d'intérêt immédiat pour une approche embarquée. Bush [Bush et Debes, 1998] a recours à une caméra fixe placée au-dessus de la route pour mesurer la distance de visibilité. Pour cela, il calcule les contours dans l'image à l'aide d'une transformée en ondelettes et mesure la distance au point de contour le plus éloigné possédant un contraste supérieur à 5 %. Cependant, il utilise un masque a priori de l'emplacement de la route et fait l'hypothèse d'une route plane. Sa mesure de visibilité est donc faussée par la présence de véhicules sur la route.

Beaucoup plus rares sont en revanche les systèmes exploitant une caméra embarquée. Deux systèmes ont été publiés et sont décrits dans ce qui suit. Toutefois, il semble que les militaires et les équipementiers automobiles travaillent également sur ce sujet. Malheureusement, rien n'est publié.

L'approche de Carnegie Mellon University (CMU)

FIG. 1.6 – Image du système RALPH développé par CMU. Son principe repose sur la détection d'une zone d'intérêt trapézoïdale devant le véhicule.

Pomerleau [Pomerleau, 1997] estime la visibilité en mesurant l'atténuation du contraste des marquages routiers à différentes distances devant un véhicule. Pour cela, il a recours au système RALPH de Carnegie Mellon University. Celui-ci utilise l'inversion perspective d'une région trapézoïdale (cf. figure 1.6) de l'image pour la détection des lignes parallèles. Dans l'image inversée, une simple transformation linéaire (cisaillement) permet alors de mesurer la courbure de la route en choisissant la transformation alignant les marquages.

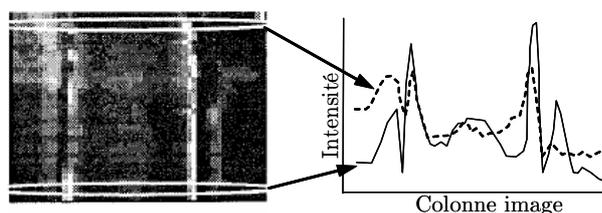


FIG. 1.7 – Principe de mesure de la visibilité de CMU.

Une fois les marquages alignés (cf. figure 1.7), il mesure l'intensité médiane de la route et des marquages et mesure le contraste pic-vallée à deux hauteurs différentes dans l'image. Il en déduit une atténuation du contraste entre le bas et le haut de l'image. Connaissant la profondeur dans la scène des lignes considérées, il obtient un coefficient d'atténuation du contraste par mètre, qu'il normalise par rapport à une situation par beau temps. Ce coefficient normalisé constitue un indice relatif de visibilité.

Cette approche n'a pas réellement d'inconvénients mis à part le fait qu'elle estime une visibilité relative et qu'elle a besoin de la présence et de la détection de marquages routiers pour fonctionner. De ce fait, elle est également sensible à la qualité des marquages, de même qu'à l'homogénéité du revêtement routier entre le haut et le bas de l'image.

L'approche de NEXYAD S.A.

Les travaux sur le système visuel humain ont permis d'étudier sa sensibilité au contraste en fonction de différentes fréquences spatiales [Committee on Vision, 1985]. Une méthode consiste

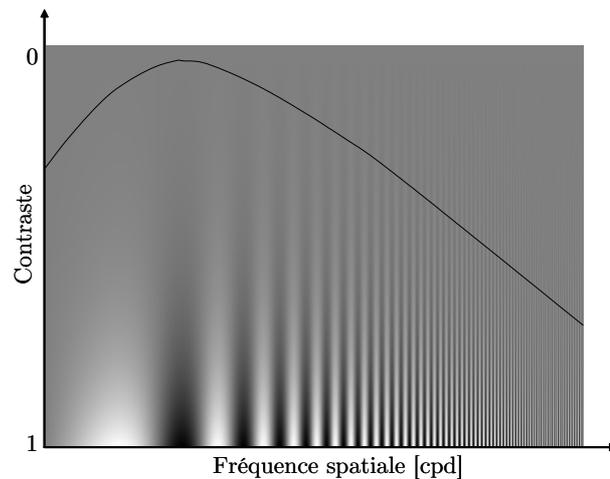


FIG. 1.8 – Fonction de sensibilité au contraste (*CSF*) du système visuel humain.

à présenter à des sujets des mires périodiques de différentes fréquences spatiales et de contraste variable puis de noter la plus petite valeur de contraste permettant de détecter le réseau. L'inverse de cette valeur représente la sensibilité au contraste et l'ensemble des points constitue la Fonction de Sensibilité au Contraste du sujet examiné (*FSC* ou *CSF* en anglais). Un exemple de *CSF* est représenté sur la figure 1.8.

L'approche de NEXYAD S.A. [Yahiaoui et Da Silva Dias, 2003] consiste à comparer la distribution des fréquences spatiales contenues dans l'image de la scène routière (*MTF*) avec l'inverse de la *CSF* proposée par Mannos [Mannos et Sakrison, 1974] et notée *CTF* (Fonction de Seuil de Contraste). Ce principe est illustré sur la figure 1.9. L'intersection des deux courbes donne la fréquence spatiale maximale disponible dans l'image. Par la suite, en se fixant une taille d'objet à détecter (piéton de deux mètres par exemple), la méthode permet par hypothèse « monde plan » d'estimer la distance à laquelle un tel objet serait détectable au sens de Johnson [Johnson, 1958]. L'aire située entre les deux courbes permet également d'évaluer la qualité de l'image. En cas de présence de brouillard et en supposant que la route est plane, cette mesure peut donc être assimilée à une distance de « visibilité atmosphérique » établie pour l'œil humain.

Malheureusement, la présence d'un objet vertical proche du véhicule équipé induit la présence

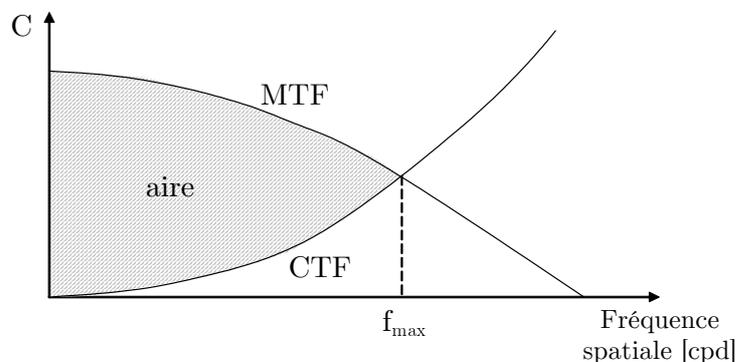


FIG. 1.9 – Principe de la mesure de visibilité proposée par NEXYAD S.A.

de fréquences spatiales élevées dans l'image et par là-même l'obtention d'une distance de visibilité nécessairement surévaluée. Sans information supplémentaire sur la profondeur des objets perçus, la méthode est cantonnée à l'estimation de l'état de surface des organes de transmission (pare-brise par exemple). En outre, si la résolution angulaire des caméras utilisée est inférieure à la fréquence spatiale maximale de sensibilité de l'œil humain, la distance de visibilité estimée est toujours faible quelle que soit la scène rencontrée.

1.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre nous a tout d'abord permis de comprendre la raison pour laquelle les conditions atmosphériques dégradées, tout particulièrement le brouillard, constituaient une source de perte de visibilité. Pour cela, les mécanismes de formation du brouillard ont été détaillés, ainsi que sa structure physique. Cela a permis de comprendre le chemin complexe que doit parcourir la lumière visible à travers les nombreuses gouttelettes d'eau constituant le brouillard. Ce processus constitue le phénomène de diffusion de la lumière.

Nous avons ensuite détaillé les différentes conséquences sur la vision routière de ce phénomène : effets de halo atmosphérique, de voile atmosphérique, d'extinction, de voile rétro-diffusé. Le modèle de Koschmieder, remarquable par sa simplicité, ou le modèle étendu d'Éric Dumont, remarquable par sa généralité, ont permis de modéliser les effets du brouillard sur le signal visuel en prenant en compte ces différents effets.

De la loi de Koschmieder découle une définition précise de la notion courante de distance de visibilité météorologique, que nous avons située dans le vocabulaire international de l'éclairage et assimilée à celle de la portée optique météorologique. Cela nous a également conduit à remplacer le terme générique de distance de « visibilité atmosphérique » par celui de visibilité météorologique, mieux défini.

Enfin, le tour d'horizon des différents capteurs et méthodes optiques pour l'estimation de la visibilité météorologique, nous montre que très peu de tentatives de mesure embarquée ont été réalisées. Compte tenu de leur encombrement, les transmissiomètres ne peuvent être embarqués à bord d'un véhicule. Les diffusiomètres sont trop sensibles aux hétérogénéités du brouillard et ne peuvent donc pas non plus être embarqués. L'utilisation d'un laser est envisageable mais semble tout de même limitée, compte tenu des réglages nécessaires pour détecter correctement la densité du brouillard. Le radar est peu perturbé par les conditions météorologiques et ne peut donc servir de détecteur de ces dites conditions.

La caméra semble adaptée à nos objectifs. En revanche, peu de méthodes ont été publiées. Seules deux méthodes ont été portées à notre connaissance. En outre, elles semblent insuffisantes : celle développée par CMU et celle développée par NEXYAD S.A. La première nécessite la présence et la détection de marquages routiers pour fonctionner. La deuxième est invalidée par la présence d'objets verticaux comportant des fréquences spatiales élevées proches du véhicule équipé.

Au bilan, ce chapitre nous a permis de présenter les différentes lois et outils que nous étions susceptibles d'utiliser pour construire des méthodes adaptées à notre objectif. Cela nous a amené à aborder de multiples champs disciplinaires de manière parfois très synthétique. Parmi la foison d'informations délivrées, seuls quelques points précis sont exploités dans la suite du mémoire. Ceux-ci sont listés ci-dessous :

- Le brouillard, qui se caractérise principalement par un coefficient d'extinction k , a trois effets majeurs : voile, extinction et halo.
- La loi de Koschmieder, qui fait intervenir le coefficient d'extinction k , est adaptée pour décrire la luminance apparente des objets plongés dans le brouillard diurne,
- La distance de visibilité météorologique, qui est la distance au-delà de laquelle un objet noir de dimensions suffisantes est perçu de jour avec un contraste inférieur à 5 % sur fond de ciel, s'exprime directement par $\frac{3}{k}$,
- La caméra semble l'outil le plus adapté pour effectuer une mesure embarquée de la distance de visibilité météorologique, et deux approches utilisant une caméra embarquée existent dans la littérature mais sont insuffisantes.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une technique qui détecte le brouillard diurne et estime la distance de visibilité météorologique en s'appuyant sur une propriété mathématique de la loi de Koschmieder.

Exploitation de l'effet de voile atmosphérique

LES DIFFÉRENTS EFFETS DU BROUILLARD SUR LA VISION ont été présentés et modélisés dans le premier chapitre. Trois effets majeurs ont été décrits. Les effets de halo atmosphérique et de voile rétro-diffusé sont plus significatifs la nuit que le jour. L'effet de voile atmosphérique, quant à lui, est spécifique au brouillard diurne. Ce dernier est bien modélisé par la loi de Koschmieder, qui permet d'exprimer la luminance apparente d'un objet en fonction de sa luminance intrinsèque, de sa distance d'observation, de la densité du brouillard et de la luminance du ciel à l'horizon.

En exploitant une propriété mathématique de la loi de Koschmieder, il est possible, à l'aide d'une seule caméra, d'instancier ce modèle et d'estimer le coefficient d'extinction du brouillard. La distance de visibilité météorologique est alors directement déduite. Nous proposons, dans ce chapitre, de présenter cette méthode. Voici comment ce dernier est organisé.

Tout d'abord, nous présentons notre capteur mono-caméra et l'hypothèse « monde plan » qui lui est étroitement associée, étudions sa portée et sa résolution, et abordons le problème de son calibrage. Puis, à l'aide de l'hypothèse « monde plan », nous étudions d'un point de vue théorique une propriété intéressante de la loi de Koschmieder. Dans un troisième temps, nous montrons comment exploiter en pratique cette dernière. Pour cela, un algorithme d'analyse d'images en trois phases est décrit. Un indice de confiance sur la mesure est construit. Puis une analyse de sensibilité de la méthode conclut le paragraphe.

Nous montrons ensuite les points forts et les limites de notre méthode. Pour en combler certaines, nous montrons que nous pouvons nous ramener facilement à l'approche de Pomerleau [Pomerleau, 1997] et rendre les deux approches complémentaires. Ainsi, nous développons une méthode permettant d'estimer la distance de visibilité météorologique dans de nombreuses situations.

Finalement, la visibilité météorologique étant correctement estimée, nous présentons une application directe de notre méthode à la restauration du contraste appliquée à des images de brouillard diurne.

2.1 Modélisation du capteur mono-caméra dans son environnement

Dans ce chapitre, la méthode développée repose sur l'utilisation d'une seule caméra embarquée à bord du véhicule. Dans ce paragraphe, nous présentons la caméra utilisée dans les véhicules expérimentaux du LIVIC. Une modélisation, communément appelée hypothèse « monde plan », en vue d'estimer la profondeur des objets dans les images est décrite. Nous étudions ensuite les performances d'un tel capteur, notamment en terme de résolution. Finalement, le problème du calibrage du capteur est rapidement abordé.

2.1.1 Présentation du capteur utilisé



FIG. 2.1 – Disposition de la caméra dans le véhicule.

Dans ce chapitre, notre capteur est une simple caméra noir et blanc installée derrière le pare-brise du véhicule comme sur la figure 2.1. La figure 2.2 présente la modélisation du capteur dans l'environnement du véhicule. Dans le repère de l'image, la position d'un pixel est donnée par ses coordonnées (u, v) . Les coordonnées de la projection du centre optique dans l'image sont désignées par (u_0, v_0) . θ est l'angle entre l'axe optique de la caméra et l'horizontale. v_h désigne la position verticale de la ligne d'horizon. Les paramètres intrinsèques de la caméra sont sa longueur focale f , la taille horizontale t_{pu} et verticale t_{pv} d'un pixel. Nous utilisons aussi $\alpha_u = \frac{f}{t_{pu}}$ et $\alpha_v = \frac{f}{t_{pv}}$. De manière usuelle, nous considérons $\alpha_u \approx \alpha_v = \alpha$.

2.1.2 Modèle de calcul de la profondeur d'un point vu dans l'image

Étant donné que nous n'utilisons qu'une seule caméra, nous ne pouvons avoir accès à l'information de profondeur. Nous contournerons le problème en faisant l'hypothèse d'une route plane. Ceci nous permet d'associer une distance à chaque ligne de l'image. Dans la suite du paragraphe, nous allons présenter ce modèle de calcul de distance.

En utilisant le modèle sténopé pour la caméra, la projection sur le plan image d'un point de coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) dans le repère de la caméra s'exprime par :

$$\begin{cases} u = u_0 + \alpha \frac{x}{z} \\ v = v_0 + \alpha \frac{y}{z} \end{cases} \quad (2.1)$$

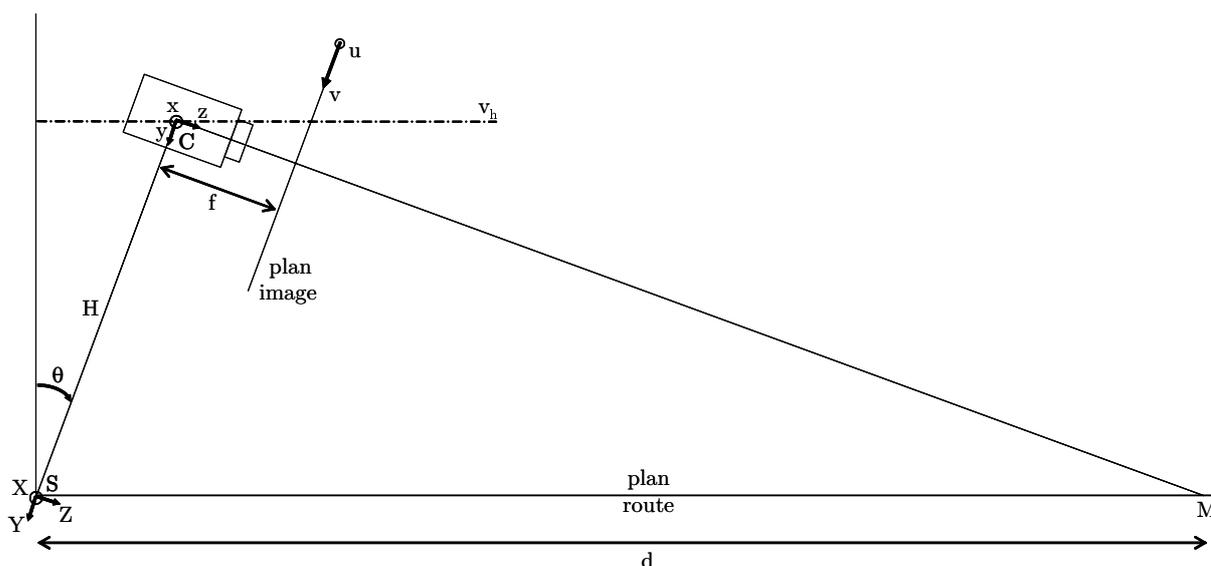


FIG. 2.2 – Modélisation de la caméra dans son environnement. Elle est située à la pseudo-hauteur H dans le repère (S, X, Y, Z) lié à la scène. Ses paramètres intrinsèques sont sa longueur focale f et la taille t d'un pixel. θ est l'angle entre l'axe optique de la caméra et l'horizontale. Dans le repère de l'image, (u, v) désigne la position d'un pixel, (u_0, v_0) l'intersection entre l'axe optique et le plan image, C le centre optique et v_h la position verticale de la ligne d'horizon.

D'après la figure 2.2, la ligne horizontale passant par le centre optique fait un angle θ avec l'axe z de la caméra. Ainsi, dans le plan image, la ligne d'horizon s'exprime par :

$$v_h = v_0 - \alpha \tan(\theta) \quad (2.2)$$

Grâce à l'équation (2.1), nous déduisons :

$$\frac{v - v_h}{\alpha} = \frac{y}{z} + \tan(\theta) \quad (2.3)$$

Si l'on se place dans le repère (S, X, Y, Z) lié à la scène, l'équation (2.3) devient :

$$\frac{v - v_h}{\alpha} = \frac{Y + H}{Z} + \tan(\theta) \quad (2.4)$$

Un point M situé sur la route à une distance d de l'origine S est paramétré comme suit :

$$M \begin{pmatrix} X \\ -d \sin(\theta) \\ d \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

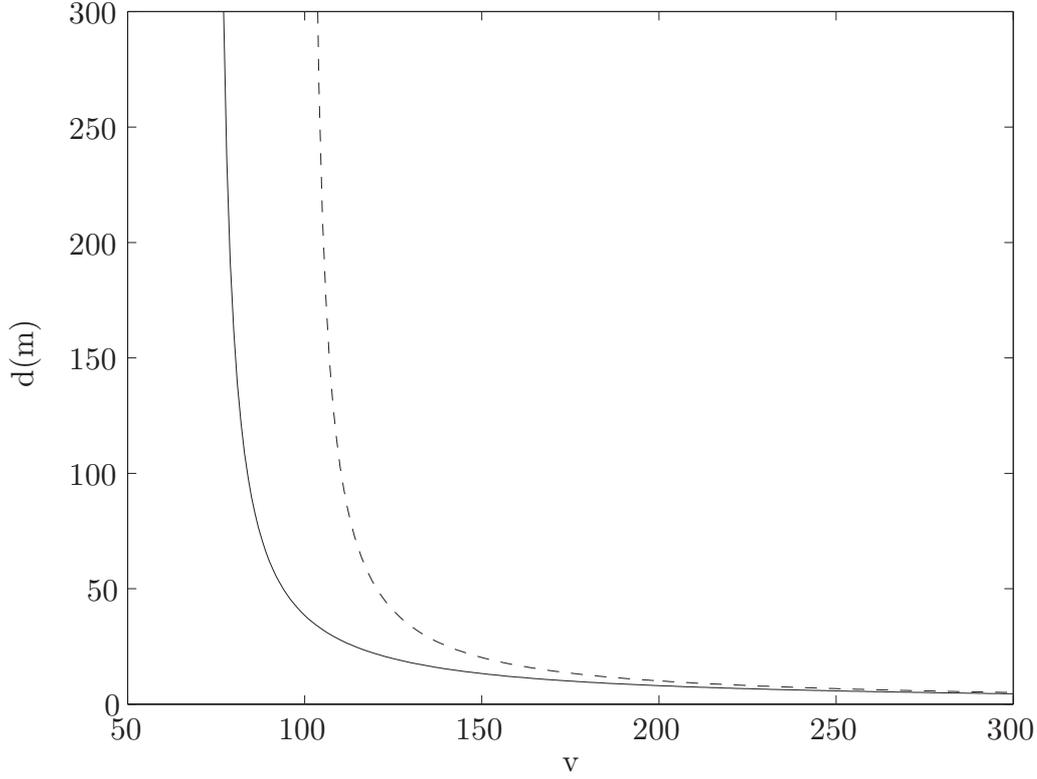


FIG. 2.3 – Illustration de la formule de calcul de profondeur d'un point dans l'image en fonction de l'angle de tangage de la caméra (—) $\theta = 8^\circ$, (- -) $\theta = 5^\circ$. Les paramètres communs utilisés sont $H = 2$ m, le rapport de la focale de la caméra sur la taille d'un pixel $\alpha = 500$, et la demi-hauteur de l'image $v_0 = 144$. Horizontalement, on a le numéro de ligne de l'image. Verticalement, on obtient la distance à la caméra en mètres.

On en déduit que :

$$\frac{v - v_h}{\alpha} = \frac{H}{d \cos(\theta)} \quad (2.6)$$

Finalement, la distance d s'exprime donc par :

$$d = \begin{cases} \frac{\lambda}{(v-v_h)} & \text{si } v > v_h \\ \infty & \text{si } v \leq v_h \end{cases} \quad \text{où } \lambda = \frac{H\alpha}{\cos(\theta)} \quad (2.7)$$

La figure 2.3 représente la distance d calculée par l'équation (2.7) en fonction du numéro de ligne de l'image et ce pour deux angles de tangage différents de la caméra. La formule étant hyperbolique, l'imprécision ou plus précisément la surface couverte par un pixel augmente avec la distance. En conséquence, l'estimation de la distance sera moins précise et stable pour de grandes distances que pour des petites distances. Ceci fait l'objet du paragraphe suivant.