

# Détection des lignes de marquage au sol

## 3.1. Motivations

Les situations de collisions et de sorties de route sont celles qui précèdent immédiatement la plus grande partie des accidents. En Allemagne par exemple, les sorties de voie sont la cause d'un des six types d'accident les plus sérieux et plus d'un tiers des morts sur la route est dû à ce type d'accidents (Daimler).

Ainsi, la détection des lignes de marquage au sol est l'un des composants fondamentaux dans un système d'aide à la conduite automobile. Détecter ces lignes blanches (ou jaunes) peut permettre entre autre de prévenir automatiquement le conducteur en cas de sortie de voie involontaire, quand le conducteur n'active par ses clignotants par exemple, de contrôler l'attention du conducteur par rapport à sa ligne de conduite et de le prévenir en cas d'éventuelle fatigue, de faire du contrôle automatique du véhicule pour éviter la sortie de voie (Figure 128).

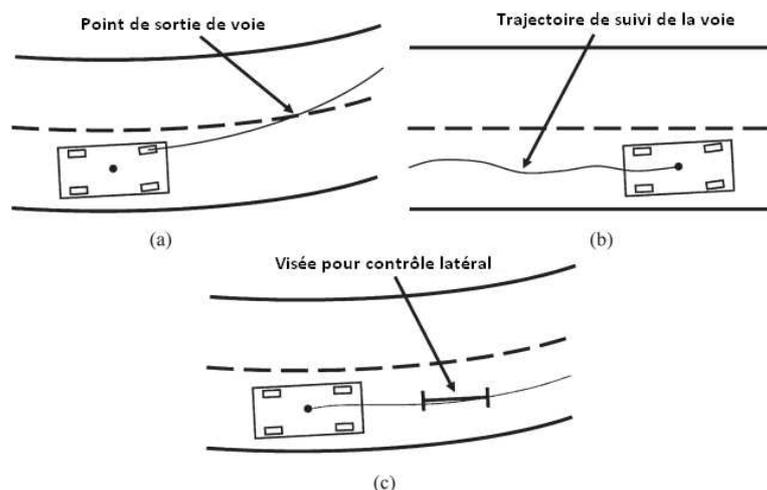


Figure 128 – Illustrations de systèmes requérant une détection des lignes de marquage au sol : (a) Prévention de sortie de voie, (b) Surveillance de l'attention du conducteur, (c) Contrôle du véhicule

Le problème de prévention de sortie de voie (Lane Departure System – LDS) n'est pas nouveau et intéresse depuis une dizaine d'années les constructeurs automobiles qui le commercialisent déjà en option sur certaines voitures haut de gamme (Wikipedia). Ainsi le premier à avoir vendu un tel système sur une de ses voitures fut **Nissan** en 2001 avec la Cima. **Toyota** l'a suivi en 2002 avec ses voitures Cardina et Alphard vendus au Japon. Puis **Honda** en 2003 avec l'Inspire. Tous ces systèmes

intègrent une caméra derrière le rétroviseur central pour effectuer la détection des lignes de marquage au sol. En 2004, **Citroën** a développé ce système en utilisant des diodes et capteurs infrarouge placés sous le bouclier avant du véhicule et en équipe depuis 2005 ses véhicules C3, C4 et maintenant C6. En 2006, **Lexus** a commercialisé la LS460 qui utilise une paire de caméras stéréoscopiques pour la détection des lignes. Depuis 2008, **General Motors** propose ce système sur ses véhicules Cadillac STS et DTS et sur ses Buick Lucerne ; la même année **Volvo** le propose sur ses modèles S80 et V70 ; ainsi que **BMW** avec ses Série 5 et Série 6. Le système utilisé par ces 3 derniers constructeurs est développé par la société Mobileye. Enfin, depuis 2009, **Merces-Benz** propose aussi ce système sur sa nouvelle classe E. Il est donc clair que tous les constructeurs portent un grand intérêt à ce problème, gage d'un enjeu majeur des systèmes d'aide à la conduite automobile.

La détection des lignes de marquage au sol, si elle estime la courbure de la route, peut permettre de réaliser un grand nombre d'applications ADAS de plus haut niveau. Il est par exemple possible d'alerter le conducteur d'un éventuel risque si sa vitesse est trop importante face à un prochain virage. Couplée à un système de détection de véhicule, celle-ci permet de prévenir des collisions entre véhicules empruntant la même voie. Par exemple, dans la Figure 129, un système de détection de véhicule dirait que la voiture n'est pas en « face » de nous et qu'il n'y aurait pas de risque. En estimant la courbure de la route, le système saurait que ce véhicule est en fait dans notre voie, et il pourrait prévenir d'un risque éventuel en cas d'accélération de notre véhicule ou de freinage brutal du véhicule en amont.



Figure 129 - Cas où il est nécessaire de coupler un système de détection des lignes de marquage au sol à un système de détection de véhicule pour créer un système, de plus haut niveau, d'évitement de collision

Il peut aussi être déduit d'une détection des lignes de marquage au sol le nombre de voies que comporte la route et surtout sur quelle voie le véhicule roule. Cependant cela n'est possible que lorsque la route est assez dégagée et donc que les marquages sont apparents (non occultés par d'autres véhicules). Un tel système sur le cas de la Figure 129 pourrait aisément déduire que cette route comporte au moins 3 voies et que le véhicule roule sur la voie centrale. Couplé à un système de détection de sortie de voie, il serait envisageable de détecter un changement de voie et de savoir si le véhicule emprunte, par exemple, une voie de sortie. Cela serait, dans le cas du problème de la

prise en compte des détections des panneaux de limitation de vitesse, un atout considérable quand à la prise de décision de notre système.

## 3.2. Etat de l'art

---

Les travaux sur la détection des lignes de marquage au sol en utilisant une caméra remontent à plusieurs dizaines d'années (Dickmanns, et al., 1992) et continue de nos jours à être approfondis (Ślot, et al., 2009). Cependant la majorité de ces travaux peut être décomposée en trois ou quatre étapes comme le relève (McCall, et al., 2006), qui comporte un état de l'art complet sur ce sujet :

- La définition d'un modèle de route, qui est généralement basé sur une représentation polynomiale du premier ou du second ordre (des clothoïdes) ;
- L'extraction des caractéristiques des lignes de marquage au sol, dont la majorité des travaux utilisent l'extraction des contours des lignes ;
- L'analyse des ses caractéristiques, qui se fait généralement en utilisant l'algorithme de Hough ;
- Et optionnellement d'opérations de post-traitement.

A ces méthodes, il faut ajouter d'autres approches basées sur la segmentation de la route (segmentation de région).

Plus concrètement la détection des lignes de marquage au sol peut se faire, comme pour la détection des panneaux de limitation de vitesse, soit par détection des contours de forme (recherche de ligne) soit par segmentation couleur (les lignes étant blanches).

L'extraction des caractéristiques des lignes de marquage au sol par extraction par contour de forme (donc sur des images en niveau de gris) se fait en utilisant des algorithmes bien connus de traitement d'images. Ainsi, est généralement utilisé le filtre de Canny - Deriche pour obtenir une image des contours de forme (dont les contours ne sont représentés que par 1 pixel) très peu sujette au bruit comme l'utilisent (Macek, et al., 2004), (Nedevschi, et al., 2004), (Wang, et al., 2004), (Tian, et al., 2006) et (Hetrick, et al., 2007). D'autres types de filtres du domaine du traitement d'image sont aussi utilisés, par exemple un filtre Gaussien dans (Aly, 2008) ou le filtre LoG (Laplacian of Gaussian) dans (Macek, et al., 2004) et (Ślot, et al., 2009), qui est plus sujet au bruit que le filtre de Canny (Figure 130), mais beaucoup plus rapide à appliquer sur une image. Les techniques issues du domaine de la morphologie mathématique sont utilisées dans (Tsai, et al., 2008) où par différenciation des images résultantes d'ouvertures et de fermetures ils arrivent à trouver, après seuillage, les contours des lignes de marquages au sol. Enfin, certains travaux, sur la base de l'hypothèse qu'une ligne de marquage au sol constitue un changement de luminosité horizontale (et donc de contraste) sur le sol de type foncée / claire / foncée, recherche soit directement ce type de changement dans l'image (Southall, et al., 2001) et (Liu, et al., 2008) ou par une convolution de l'image en utilisant un noyau unidimensionnel comme dans le système ARCADE de (Kluge, 1994).

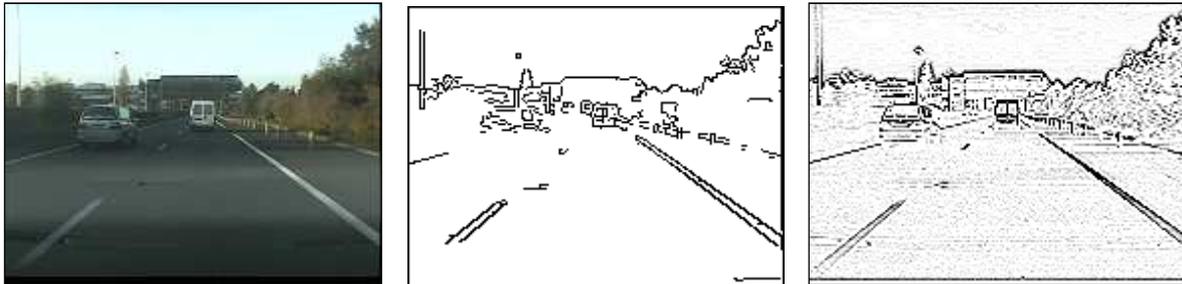


Figure 130 - Exemple de résultat d'extraction de contour sur l'image témoin (à gauche) via filtre de Canny (au centre) et le filtre Laplacian of Gaussian (à droite)

L'extraction via segmentation par couleur fait l'hypothèse que les lignes sont blanches (ou jaunes) sur un sol plutôt foncé. Ainsi dans leurs travaux, (Macek, et al., 2004) comparent chaque composante couleur RGB de chaque pixel par rapport à la valeur moyenne des composantes de la route afin de classifier les pixels en type « route » ou « ligne ». Si la différence de ces deux composantes est supérieure au seuil défini par l'écart-type de la couleur de la route, alors le pixel est considéré comme ne faisant pas partie de la route. Cependant, comme stipulé au chapitre 1 sur la détection des panneaux de limitation de vitesse, une segmentation par couleur souffre forcément des variations de condition lumineuse. Pour pallier ce problème, (Macek, et al., 2004) recalcule constamment la couleur moyenne et la variance des pixels de la route (sur une zone prédéfinie dans l'image). Ce type de calcul de seuil dynamique pour répondre aux changements de conditions lumineuses est aussi effectué par (Southall, et al., 2001). D'autres effectuent de la segmentation couleur en se basant sur un autre espace de couleur, moins sensible aux variations lumineuses, comme (Ślot, et al., 2009) qui effectuent un seuillage sur la composante Hue de la représentation HSV. Enfin, certains définissent leur propre espace de couleur où la route et les lignes de marquages au sol auraient toujours les mêmes valeurs quel que soient les variations lumineuses. Ainsi (Cheng, et al., 2006) définisse un espace de couleur  $D_1D_2D_3$  résultant de la différentiation des canaux du modèle RGB de la caméra ( $D_1 = \text{rouge} - \text{bleu}$  /  $D_2 = \text{bleu} - \text{vert}$  /  $D_3 = \text{rouge} - \text{vert}$ ), la segmentation se faisant ensuite par un seuillage sur ce modèle.

Certains travaux fusionnent les résultats de différents types de segmentation afin d'obtenir un résultat global amélioré. Par exemple (Macek, et al., 2004) utilisent 3 segmentations (Canny, LoG et couleur) et attribue à chaque segmentation un niveau de confiance se basant sur le résultat des détections précédentes ; la segmentation ayant le plus grand niveau de confiance est retenue. (Ślot, et al., 2009) superposent simplement les images de contours obtenues par leurs différentes segmentations (couleur et contour de forme).

Enfin, certains travaux s'essayent à utiliser les techniques issues de l'intelligence artificielle afin de détecter les lignes de marquage au sol dans les images. Par exemple, (Gopalan, et al., 2009) utilisent la technique du boosting (via l'algorithme d'Adaboost) avec des sous-classificateurs faibles de type Haar. Une comparaison de différents algorithmes (SVM, Réseaux de neurones, Bayes) appliqués à la segmentation des lignes de marquage au sol, a été proposée par (Kim, 2008). Il a montré que ces

algorithmes présentent de meilleurs résultats que l'approche couramment utilisé pour la détection des lignes de marquage au sol (i.e. la segmentation par contraste), les SVM donnant les meilleures détections.

Dans tous les cas, l'image résultante de la segmentation doit être traitée afin d'y reconnaître et de modéliser les lignes de marquage au sol. Il est possible de modéliser ces lignes par des droites (en faisant donc l'hypothèse que la route est plate ou localement plate), par des courbes ou par des modèles plus complexes comme une modélisation en 3 dimensions de la route. L'approche la plus simple étant de modéliser les lignes de marquage au sol par une ligne droite, il suffit d'appliquer le filtre de Hough qui est capable de trouver les lignes dans une image même bruitée comme le font (Macek, et al., 2004), (Hetrick, et al., 2007) et (Aly, 2008). D'une manière similaire, (Wang, et al., 2004) et (Tian, et al., 2006) utilisent le filtre de Hough, mais au lieu de l'appliquer sur toute l'image issue de la segmentation, ils divisent cette image en 5 zones horizontales puis appliquent le filtre sur chacune de ces 5 zones. Ceci leur permet de détecter la courbure de la route en retenant les points trouvés par Hough comme appartenant aux lignes de marquage au sol, et en utilisant un algorithme de contour actif (Snake) sur ces points afin de trouver les paramètres d'une courbe de type B-Spline. Dans (Aly, 2008), ils utilisent une détection par Hough, comme zone de recherche pour l'algorithme RANSAC (RANdom SAMple Consensus) afin de trouver les Splines (courbes) qui collent au mieux aux points segmentés. RANSAC est une méthode itérative permettant d'estimer les paramètres d'un modèle mathématique (une ligne, une courbe,...) à partir d'un ensemble de données observées qui contiennent des données aberrantes (ici les point segmentés de l'image originale). Enfin certains travaux essayent de modéliser la route en 3 dimensions (i.e. en calculant les courbures horizontale et verticale). L'utilisation d'une paire de caméra permet à (Nedevschi, et al., 2004) de calculer la hauteur des points détectés (appartenance aux lignes de marquage au sol) dans l'image. L'utilisation de l'algorithme de Hough, sur plusieurs zones, leur permet de trouver dans ce nuage de points, la pente de la route (Figure 131).

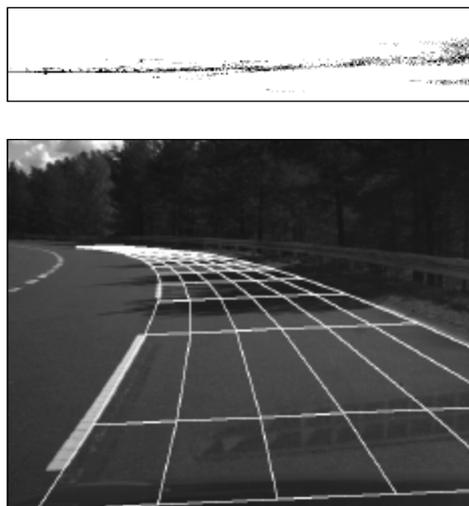


Figure 131 - Détection et modélisation en 3 dimensions de la route (Nedevschi, et al., 2004) – En haut, hauteur des points des lignes de marquage au sol, en bas résultat d'une détection.

Quelque soit la nature de la modélisation, de fausses détections sont à prévoir. Ainsi tous les travaux filtrent leurs reconnaissances afin de supprimer ces fausses détections. De par la nature très contrainte des lignes de marquage au sol, il est facile de supprimer ces fausses détections. En effet, tout comme l'hypothèse émise dans l'ensemble des travaux, ces lignes convergent à l'horizon et ne peuvent être représentées que d'une certaine manière dans l'image (par exemple, il ne peut y avoir une ligne de marquage au sol détecté verticalement sur un des côtés de l'image). De plus, la largeur des voies étant assez normalisée, certains travaux valident les détections par paire de ligne (Bertozzi, et al., 1997).

La dernière étape, qui n'est pas toujours effectuée dans les travaux de la littérature, est celle du suivi temporel. L'intérêt de cette étape est multiple : elle permet de définir une zone de recherche des lignes de marquage au sol dans l'image courante par rapport aux détections précédentes afin de réduire le temps de calcul ; elle permet aussi de lisser les résultats et pallier les non détections à certains moments (en cas d'occultation d'une ligne de marquage au sol, quand un véhicule change de voie par exemple). Ainsi, (LIM, et al., 2009) définissent une simple zone de recherche d'une largeur fixe autour des lignes (droites) détectés à l'image précédente. (Nedevschi, et al., 2004) quant à eux définissent une zone de recherche un peu plus complexe. Tout d'abord ils prédisent la position 3d de la ligne de marquage au sol via un filtre de Kalman, ce qui leur permet de pallier aux problèmes éventuels de non détection dans une image. Ensuite cette prédiction est couplée aux informations fournies par la centrale inertielle (qui détermine les angles de tangage et de roulis de la voiture) afin de définir des zones de recherche « 3d » des lignes projetées sur la nouvelle image (Figure 132). La prédiction par filtre de Kalman (simple ou étendu) est couramment utilisée dans les divers algorithmes des systèmes ADAS. Ainsi, (McCall, et al., 2006) l'utilisent aussi afin de prédire la position des lignes de marquage au sol. L'utilisation de la détection par contour actif permet à (Wang, et al., 2004) d'utiliser les paramètres des courbes précédentes, qui doivent être sensiblement équivalentes à ceux des lignes courantes, comme initialisation à leur algorithme de contour actif. Enfin, l'utilisation des filtres particuliers via l'algorithme Condensation (Conditional Density Propagation) est aussi envisagé dans (Southall, et al., 2001) et (Liu, et al., 2008). En effet cet algorithme a initialement été développé pour répondre au problème du suivi temporel de courbes dans des images (Isard, et al., 1998) et est plus robuste au bruit que le filtre de Kalman (Southall, et al., 2001).

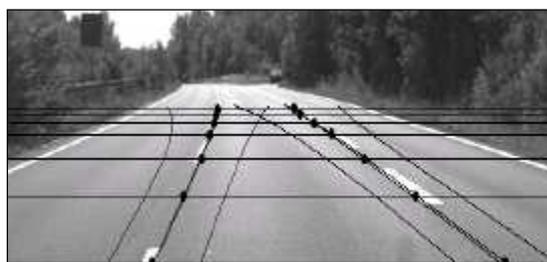


Figure 132 - Résultat de la prédiction de la position des lignes de marquage au sol ainsi que les zones de recherche

Enfin d'autres méthodes plus hétéroclites ont été proposées dans la littérature. Par exemple, (Bertozi, et al., 2002) utilisent l'algorithme évolutionnaire des Fourmis pour reconnaître les lignes de marquage au sol dans l'image des contours segmentés. Le système RALPH (Pomerleau, 1995) quant à lui, propose une approche assez originale : l'utilisation d'un processus du type « prédiction / vérification ». Dans un premier temps l'image en perspective inversée (inverse perspective mapping – IPM) de la route (Figure 133) est transformée en 5 images possibles selon 5 hypothèses statiques de courbures (forte courbure gauche, faible courbure gauche, pas de courbure, faible courbure droite, forte courbure droite). La bonne hypothèse de courbure (l'étape de vérification) est représentée par une image de ligne de marquage au sol rectiligne qui est facilement détectable parmi ces 5 images via une analyse d'histogramme. L'utilisation d'image IPM dans les travaux de détection des lignes de marquage au sol est souvent utilisés afin de simplifier la détection (Bertozi, et al., 2002), (Bertozi, et al., 1997), (Pomerleau, 1995), (Cheng, et al., 2008) et (Aly, 2008), mais elle implique de connaître le tangage de la voiture.

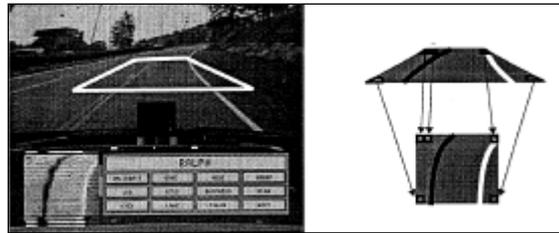


Figure 133 – Image originale avec sa région analysée à gauche, Image en perspective inversée à droite

### 3.3. Système développé

L'application visée ici par le système de détection de lignes de marquage au sol est de pouvoir détecter les changements de voie du véhicule et optionnellement pouvoir compter le nombre de voies afin de désambiguïser certaines situations complexes pour la reconnaissance des panneaux de limitation de vitesse.

L'algorithme développé suit les 4 grandes étapes définies dans la littérature :

- Le modèle de route défini est celui d'une route plane sans courbe (i.e. une ligne dans l'image), le modèle le plus simple qu'on puisse utiliser, mais qui répond à notre problématique ;
- L'extraction des caractéristiques des lignes de marquage au sol, se fait, comme la majorité des travaux de la littérature, via une extraction des contours des lignes ;
- L'analyse des caractéristiques extraites, se fait là aussi comme la plus grande partie des travaux, en utilisant l'algorithme de Hough ;

- Une dernière étape de suivi spatio-temporel des lignes afin de gérer les cas d'occultation des lignes.

### 3.3.1. Extraction de contours

#### a) Le filtre

Cette première étape se base sur l'étude effectuée par un ancien doctorant du laboratoire, Pierre Coulombeau, réalisée en 2002.

Les lignes de marquage au sol montrent toujours un contraste (i.e. un passage brut d'une zone foncée à une zone claire ou inversement) plus ou moins important avec la couleur de la route. Dans la littérature, plusieurs filtres linéaires ont été utilisés afin de détecter ces changements de contraste, comme les filtres  $[-1 \dots -1 \ 0 \ 1 \dots 1]$  ou  $[-1 \dots -1 \ 1 \dots 1]$  (Pomerleau, 1995). Les efficacités respectives de ces deux filtres sont assez proches, ainsi le second filtre a été retenu arbitrairement comme base d'étude au module d'extraction de contours mis en place ici.

L'application du filtre  $[-1 \dots -1 \ 1 \dots 1]$ , de longueur  $2L$ , est définie par l'Équation 5, où *NegSum* est la somme des valeurs des  $L$  pixels à gauche de la position courante dans l'image, et *PosSum* celles des  $L$  pixels de droite.

$$v = 128 + \left\lfloor \frac{PosSum - NegSum}{2 * L} \right\rfloor$$

Équation 5 - Application du filtre linéaire  $[-1 \dots -1 \ 1 \dots 1]$

Appliquons ce filtre de longueur 7 à deux cas extrêmes :

- Dans le cas d'une hausse brutale du niveau de gris, le pixel dans la nouvelle image est blanc :

0	0	0	128	255	255	255

$$v = 128 + \left\lfloor \frac{255 * 3 - 0 * 3}{2 * 3} \right\rfloor = 255$$

- Dans le cas d'une chute brutale du niveau de gris, le pixel dans la nouvelle image est noir :

255	255	255	128	0	0	0

$$v = 128 + \left\lfloor \frac{0 * 3 - 255 * 3}{2 * 3} \right\rfloor = 0$$

Ces deux cas ne sont bien entendus jamais rencontrés dans la réalité. En effet la route est plutôt grise que noire et les lignes blanches ne sont pas toujours à un niveau de gris de 255 (ombres, peinture effacée, etc.) Le profil d'une ligne de l'image avec un marquage après application de ce filtre

est donc de la forme idéale décrite par la Figure 134. Le premier pic (vers le haut) décrit le premier changement de contraste (i.e. de la route sombre vers la ligne blanche claire), le second pic (vers le bas) décrit le second changement de contraste (i.e. de la ligne blanche claire vers la route sombre).

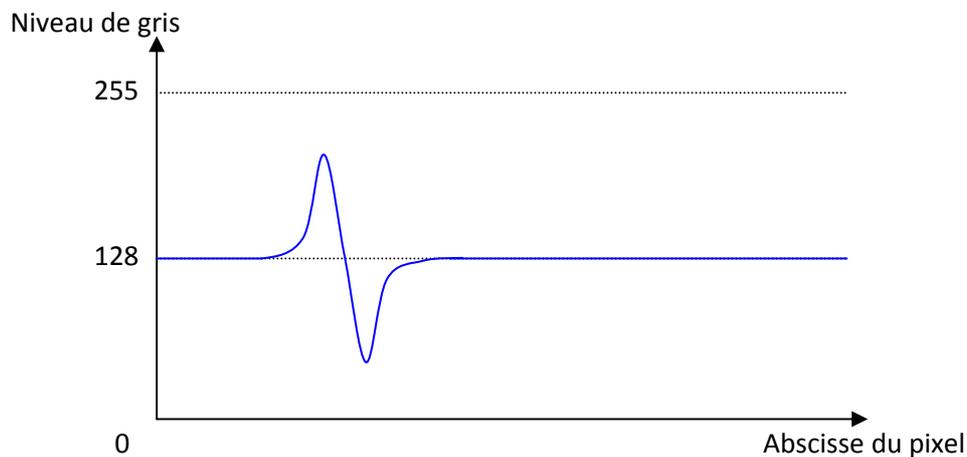


Figure 134 - Profil d'une ligne de l'image traité avec le filtre [-1 ... -1 1 ... 1]

### *b) Taille du filtre et réduction de bruit*

Un filtre efficace de détection de marquages doit être capable de faire ressortir le marquage tout en atténuant le bruit. Il apparaît que si le bruit sur l'image est uniforme, le bruit contenu dans les deux termes (PosSum et NegSum) de notre filtre [-1 ... -1 0 1 ... 1] a tendance à se compenser. On observe aussi que plus la moyenne spatiale est grande (c'est à dire plus L est grand), plus l'effet du bruit est atténué. Il y aurait donc intérêt à prendre une largeur de filtre L aussi grande que possible pour éliminer les effets du bruit. Voici quelques résultats de simulation qui montrent cet effet sur un marquage au sol de largeur 21 pixels dans l'image avec du bruit uniforme d'une amplitude de 30 (Figure 135 à Figure 138).

Intensité (niveaux de gris)

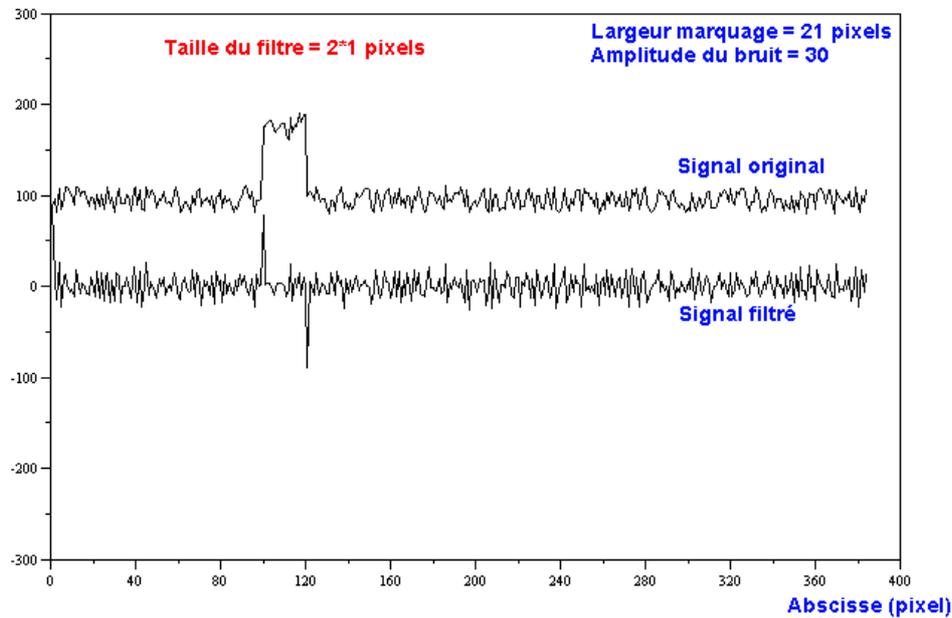


Figure 135 - Filtre de demi-longueur 1 sur un marquage de longueur 21 pixels. Le signal original représente une ligne dans l'image.

Intensité (niveaux de gris)

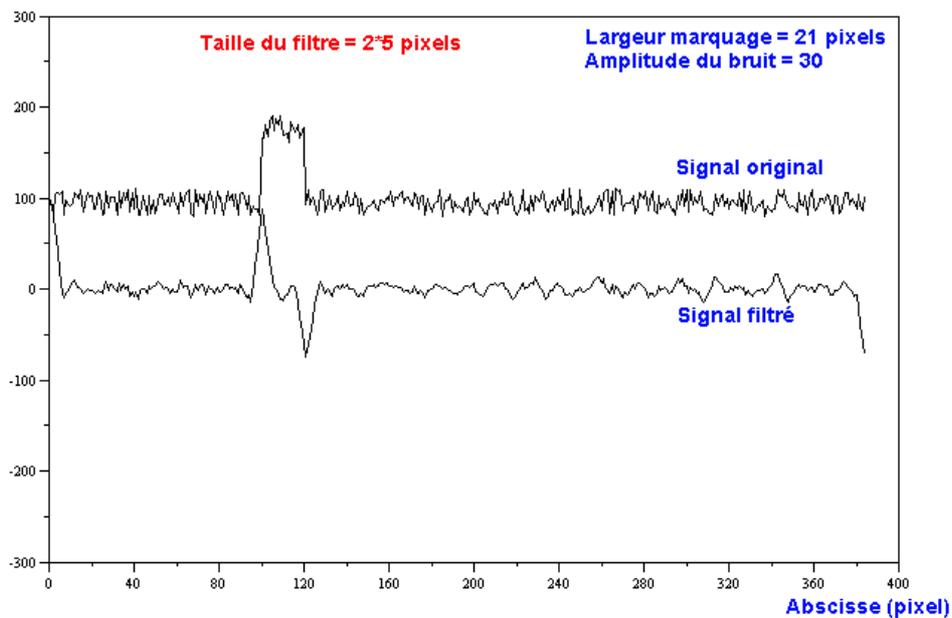


Figure 136 - Filtre de demi-longueur 5 sur un marquage de longueur 21 pixels

Intensité (niveaux de gris)

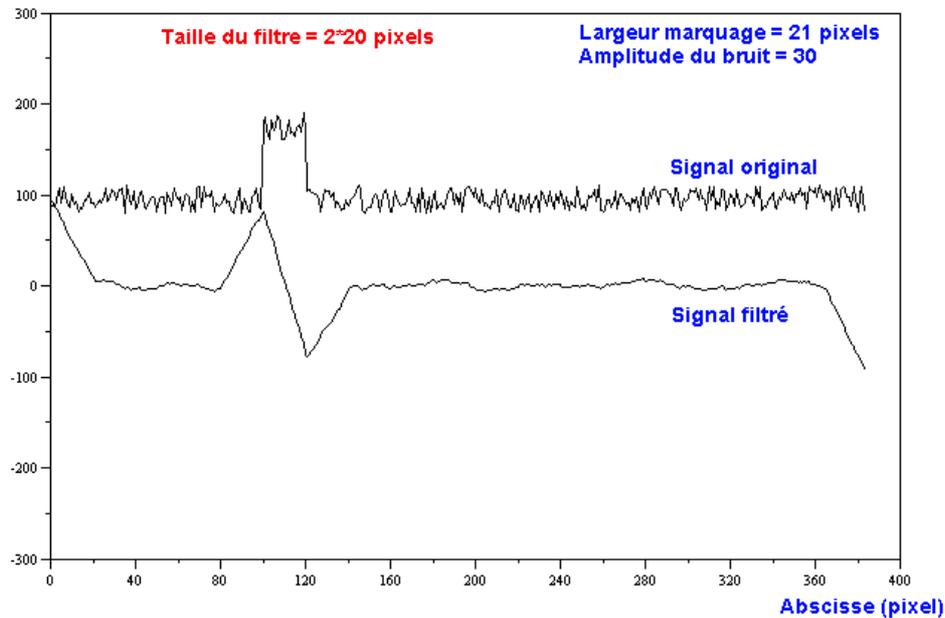


Figure 137 - Filtres de demi-longueur 20 sur un marquage de longueur 21 pixels

Intensité (niveaux de gris)

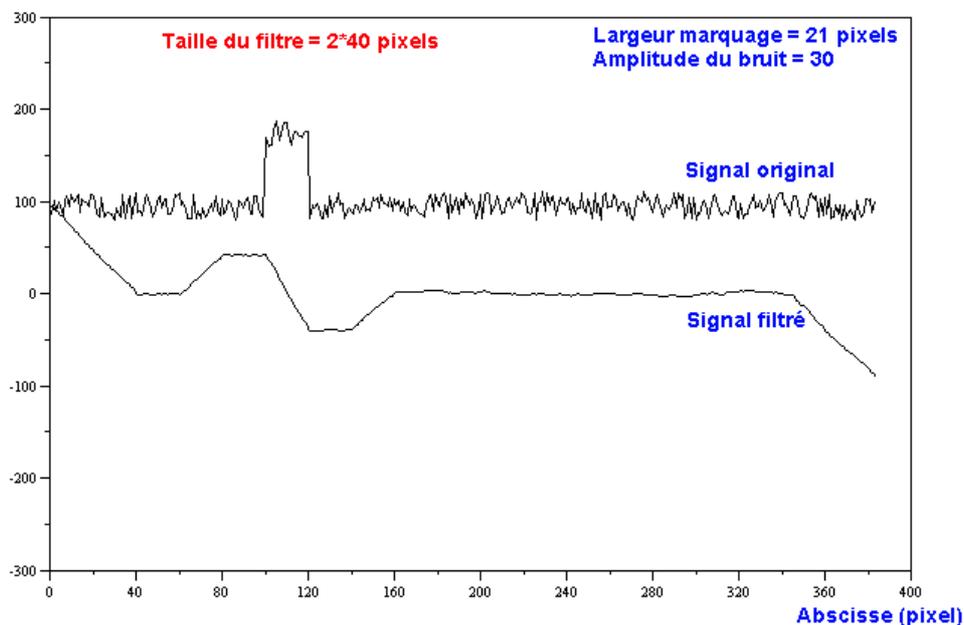


Figure 138 - Filtre de demi-longueur 40 sur un marquage de longueur 21 pixels

Observons maintenant quelques résultats de simulation qui montrent cet effet sur un marquage au sol idéal (i.e. sans bruit) de largeur 21 pixels dans l'image (Figure 139 à Figure 141).

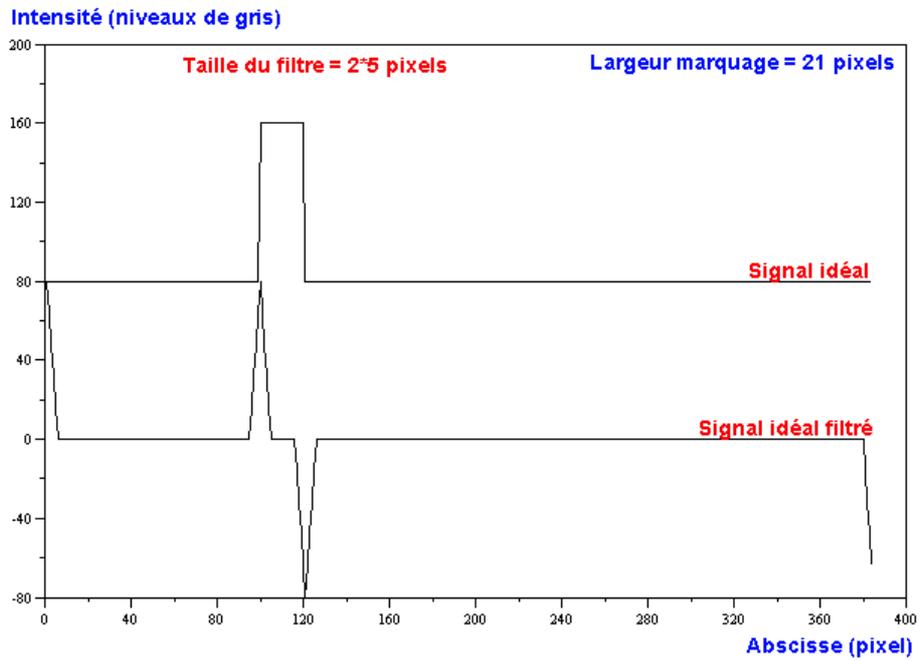


Figure 139 - Effet du filtre de demi-longueur 5 pixels sur un créneau idéal

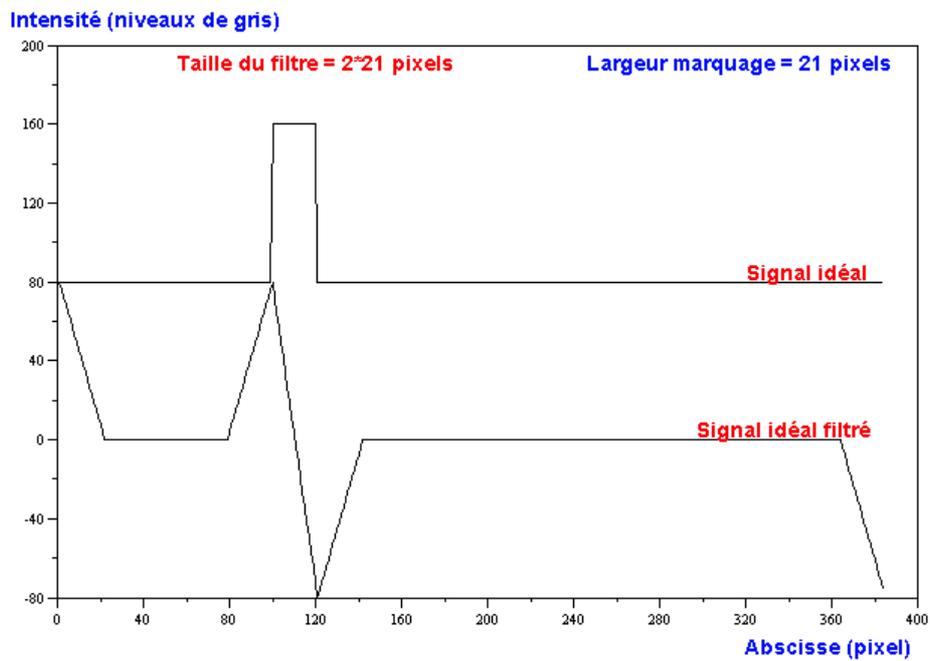


Figure 140 - Effet du filtre de demi-longueur 21 pixels sur un créneau idéal

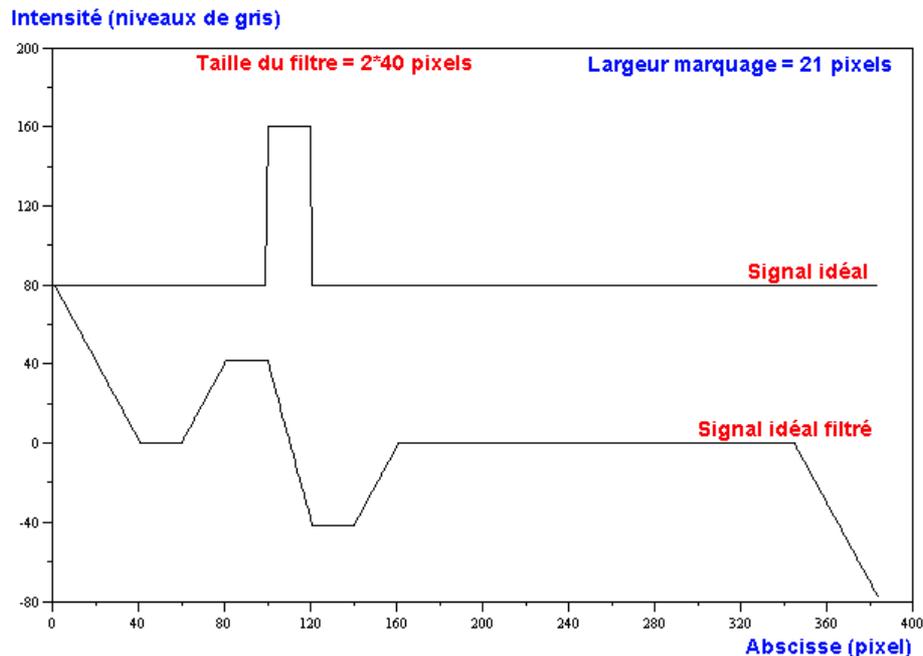


Figure 141 - Effet du filtre de demi-longueur 40 pixels sur un créneau idéal

Ces résultats montrent que tant que la largeur du filtre ne dépasse pas celle du marquage, il y a création d'une dent de scie positive centrée sur le début du marquage suivi d'une dent de scie négative centrée sur la fin du marquage. La largeur de chaque dent de scie est égale à  $2*L$  (cela correspond à la largeur du filtre), et l'amplitude entre le maximum et le minimum est égale au double de celle du marquage idéal non filtré. En revanche, lorsque la demi-largeur du filtre devient supérieure à la taille du marquage, les pics sont d'autant plus érodés que  $L$  augmente.

Optimiser le rapport Signal/Bruit demande donc d'utiliser la demi-largeur de filtre la plus grande possible sans dépasser la largeur (ou taille) du marquage.

### c) Filtre adaptatif

Les différentes approches bibliographiques utilisant un filtre de convolution de type  $[-1...-1 \ 1...1]$  ont toujours proposé un filtre de taille constante sur l'ensemble de l'image. Ces approches ne tiennent pas compte du fait que l'effet de ces filtres est différent suivant la hauteur à laquelle on se trouve dans l'image, c'est-à-dire suivant la largeur du marquage dans l'image.

En effet, pour une taille de marquage donnée, la taille de filtre la mieux adaptée (c'est-à-dire qui gomme au mieux le bruit sans éroder les pics correspondants aux bords des marquages gauches et droits) est celle qui est égale à la largeur du marquage en pixels, pour la ligne de l'image considérée. La largeur de marquage variant pratiquement linéairement suivant l'ordonnée dans l'image, il en est de même pour la largeur du filtre. Par exemple, Figure 142, le filtre a été appliqué sans variation de

sa taille ; en revanche, Figure 143, la taille du filtre a été adaptée en fonction de la largeur du marquage attendu. Le bruit s'en trouve fortement atténué et les marquages ressortent clairement sur cette dernière image.

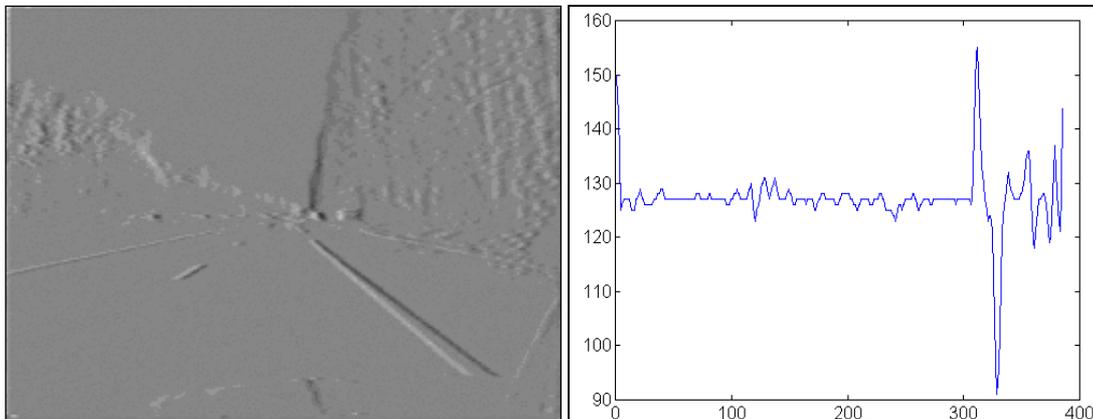


Figure 142 - Application d'un filtre de taille constante sur l'image

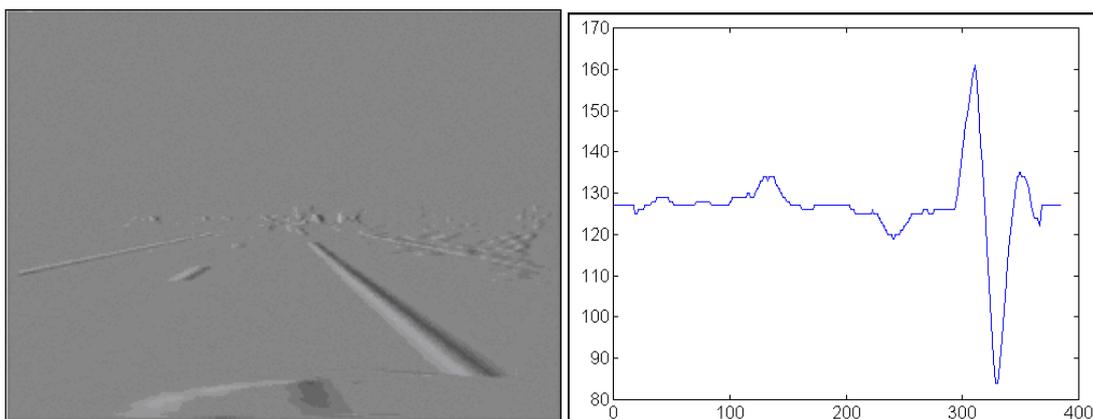


Figure 143 - Application d'un filtre de taille variable sur l'image

Ainsi, pour obtenir une détection optimale, les paramètres du filtre devraient être adaptés en fonction de la taille du marquage attendu dans l'image qui varie selon de multiples facteurs (variations d'assiette du véhicule d'une image à la suivante, inclinaison de la caméra, position latérale sur la voie...).

#### *d) De l'image des contours aux centres des marquages*

Après application du filtre adaptatif de convolution on dispose d'une nouvelle image en niveaux de gris dont il est désormais possible d'extraire les lignes. La présence d'un marquage sur la route se traduit dans l'image filtrée par la présence d'un maximum d'intensité suivi d'un minimum. Cette

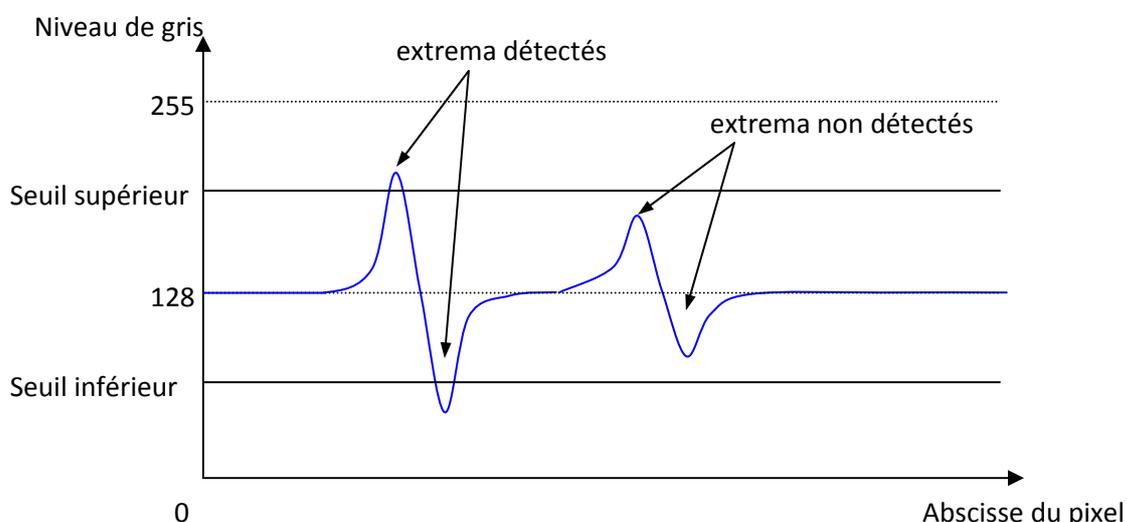
propriété nous permet d'utiliser un algorithme relativement simple pour détecter les marquages en recherchant la présence sur chaque ligne de cet enchaînement maximum local – minimum local.

Pour ce faire, l'algorithme recense tous les minima et maxima locaux qui sont situés au-delà (pour les maxima) ou en deçà (pour les minima) d'un seuil défini à l'avance (Figure 144).

Une fois les extrema détectés, l'algorithme les apparie (il fait correspondre un maximum avec un minimum). Pour être appariés, un pic et un creux doivent forcément se trouver dans cet ordre (il ne peut y avoir un creux puis un pic, car un marquage est une succession foncé – clair – foncé), et tel que la distance entre les deux soit la plus faible possible (et dans tous les cas inférieure à un seuil fixé à l'avance : la largeur maximale de marquage attendue). Les extrema qui ne sont pas appariés ne sont pas considérés comme étant des bords de marquage (Exemple 3).

creux - pic - pic - creux - creux  
  
 extrema appariés

**Exemple 3 - Appariement des extrema pour la détection des marquages**



**Figure 144 - Filtrage des extrema dans l'image filtrée avec le filtre [-1 ... -1 1 ... 1]**

L'un des principaux problèmes soulevé dans la littérature est la détection de ligne quand des ombres sont présentes sur la chaussée (ombres des arbres sur une route boisée par exemple) qui font apparaître de forts contrastes (alternance ombre – soleil) entre la route et les marquages au sol d'une zone à l'autre de l'image. L'utilisation ici d'une approche locale pour la recherche des transitions maximum – minimum nous permet de nous affranchir des problèmes de changement de contraste dans l'image. Enfin, la connaissance a priori sur la largeur d'un marquage au sol selon son

ordonnée dans l'image est utilisée pour ne conserver que les transitions maxima – minima de largeurs comprises dans l'intervalle de largeur de marquage souhaité.

Ensuite est calculé le milieu entre le pic et le creux, qui est enfin enregistré comme étant le centre du marquage. Les points aberrants sont ensuite éliminés en considérant le fait que les marquages s'étalent sur plusieurs lignes de l'image tout en gardant une continuité au niveau de leur largeur et de leur positionnement. La Figure 145 montre un exemple de détection des centres des marquages.



Figure 145 - Exemple de détection des centres de marquage

### 3.3.2. Détection des lignes

Après la phase d'extraction nous disposons d'un ensemble de points correspondant aux centres des différents marquages présents sur la route. Dans cet ensemble sont aussi présents des points qui n'appartiennent à aucun marquage et qui n'ont pas été éliminés par le premier filtrage (Figure 145).

Pour éliminer le bruit de cet ensemble et regrouper les points correspondant aux différents marquages entre eux, l'algorithme de Hough est utilisé. En effet, comme mentionné précédemment dans l'état de l'art, la transformation de Hough est une technique optimale pour détecter les droites

dans une image même très bruitées car cette technique ne dépend pas de la continuité des droites dans l'image.

Idéalement l'algorithme de Hough devrait trouver les lignes de marquage au sol (Figure 146). Malheureusement, cet algorithme n'est pas magique, le cas idéal ne se présente jamais et de nombreux problèmes apparaissent lors de l'utilisation de cette technique.

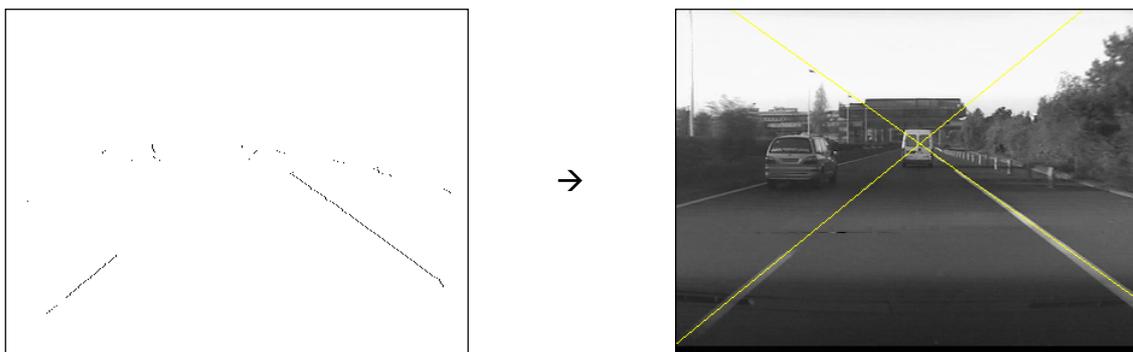


Figure 146 - Cas idéal de l'application de la transformée de Hough

#### a) Plusieurs droites détectées pour une même ligne

La transformation de Hough permet de détecter la présence de droites dans une image mais parfois propose plusieurs droites pour représenter en fait la même ligne. Ce problème vient du fait que les pixels représentant une droite sont rarement alignés. Il est donc nécessaire de filtrer les résultats de l'algorithme en regroupant les droites détectées qui sont similaires (i.e. ayant sensiblement les mêmes paramètres). Chaque groupe est ensuite représenté par une droite résultant de la moyenne de toutes les droites du groupe (Figure 147).

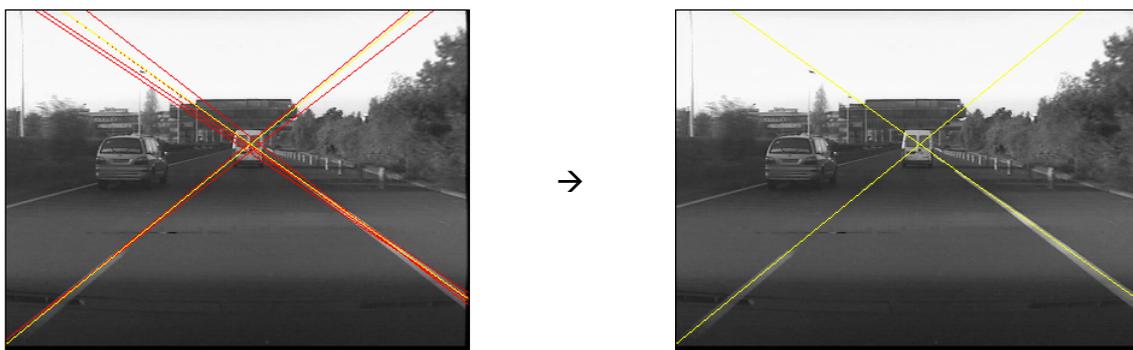


Figure 147 - La transformée de Hough détecte plusieurs droite pour une même ligne

#### b) Fausses détections

Pour de nombreuses raisons, l'application de la transformée de Hough pour détecter les lignes de marquage au sol peut détecter des lignes qui ne sont pas celles des marquages. Par exemple, dans la Figure 148, l'application du filtre fait apparaître des lignes au niveau des poteaux qui forment dans l'image une alternance foncé – clair – foncé comme le ferait une ligne de marquage au sol.

Pour pallier à ce problème, plusieurs processus entrent en jeu.

Premièrement, la détection de contour n'a lieu que sur la partie inférieure de l'image. En effet, comme décrit précédemment, l'application du filtre adaptatif d'extraction de contour, recherche ligne par ligne dans l'image des alternances foncé – clair – foncé de taille variable corrélée à la hauteur dans l'image. Ainsi au dessus de l'horizon, aucune alternance n'est cherchée puisque la largeur hypothétique d'une ligne serait en dessous de 0 pixel.

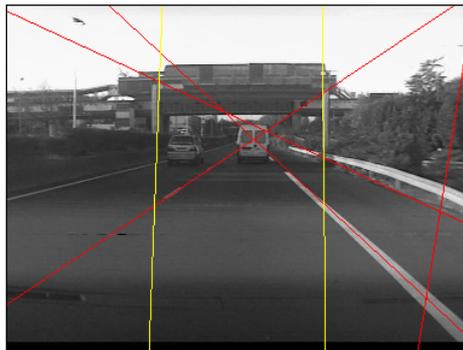


Figure 148 - Cas de mauvaises détections par la transformée de Hough

Deuxièmement les droites dont la position dans l'image est telle qu'elles ne peuvent pas provenir de lignes de marquage au sol sont éliminées. En particulier, toutes les droites horizontales, ou faisant un angle trop faible avec l'horizontale, sont considérées comme non admissibles. Les droites « trop verticales » et situées vers le bord de l'écran sont elles aussi déclarées comme non admissibles, étant donné le fait que la voiture possède toujours un angle de lacet limité par rapport à sa voie (Figure 149).

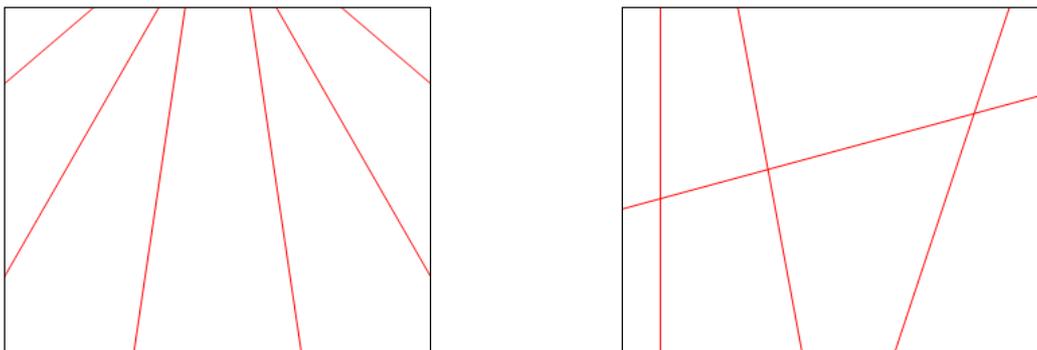


Figure 149 - Exemples de droites admissibles (à gauche) et non admissibles (à droite)

Enfin, la dernière méthode utilisée pour filtrer les fausses détections dans l'image est l'utilisation d'un filtre temporel. En effet, les fausses détections sont habituellement très ponctuelles. Ainsi, si une ligne est détectée plus de X images à la suite, cette ligne est considérée comme ligne de marquage au sol et non plus comme du bruit de détection. Le nombre 'X' d'images est un nombre très faible de l'ordre de 5, c'est-à-dire qu'une ligne doit être détectée sur plus d'un cinquième de seconde à la suite.

### c) *Obstructions et lignes pointillées*

Le problème qui apparaît lors de l'étape de détection des lignes de marquage au sol est celui de l'absence de ligne à détecter. Ce problème intervient dans deux situations :

- Dans le cas des lignes pointillées (milieu de route) qui produisent une alternance régulière dans le flux vidéo de la présence / absence d'un marquage (Figure 150).

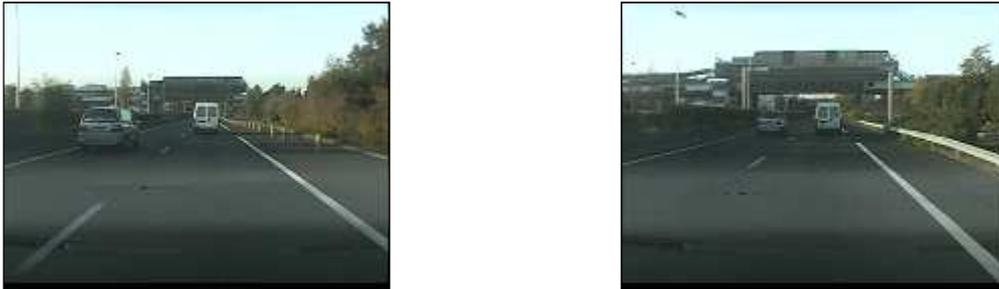


Figure 150 - Ligne pointillé visible (à gauche) et 'non' visible (à droite)

- Dans le cas d'une obstruction, quand la ligne de marquage au sol est cachée, généralement par une voiture qui change de voie (Figure 151).



Figure 151 - Cas d'une ligne de marquage au sol occultée

Il est clair que ces deux cas engendrent des problèmes de lignes non visibles temporairement, sur un laps de temps assez court. La solution la plus simple du problème apparaît alors comme l'utilisation d'un filtre de suivi spatio-temporel.

Tout d'abord ce filtre utilise un tampon de stockage des lignes, c'est-à-dire d'une zone mémoire des lignes présentes à l'image précédente dans le flux vidéo. En effet, si une ligne est présente à l'instant 't-1' elle sera forcément présente à l'instant 't' : une ligne de marquage au sol ne disparaît pas de l'image instantanément. La longévité de cette mémoire tampon est intimement liée à la vitesse de la voiture. En effet, prenons le cas des lignes pointillées, l'absence temporaire du marquage saura d'autant plus long que la voiture roule lentement (et inversement).

Ensuite ce filtre apparie les lignes de sa mémoire tampon, avec celles détectés à l'instant courant. Cet appariement se fait de la même façon que lors du regroupement de toutes les droites détectées pour une même ligne.

Une dernière étape de l'algorithme consiste à calculer l'intersection des lignes détectés (qui correspond normalement au point de fuite dans l'image) afin d'utiliser la hauteur de ce point comme hauteur de l'horizon en paramètre de l'application du filtre d'extraction de contour, pour qu'il adapte dynamiquement la taille du filtre utilisé.

### 3.4. Expérimentation et résultats

Voici pour résumer comment fonctionne l'algorithme de détection des lignes de marquage au sol mis en place (Figure 152):

1. A partir d'une image en niveau de gris
2. Un filtre  $[-1 \dots -1 \ 1 \dots 1]$  de largeur adaptative d'extraction de contour est appliqué
3. De l'image filtrée sont extraits les centres des marquages
4. L'application de l'algorithme de Hough permet d'y trouver les lignes
5. Un filtrage des résultats frame par frame et temporellement permet de ne conserver que la détection des lignes de marquage au sol



Figure 152 - Etapes successives de la détection des lignes de marquage au sol

Cet algorithme a été soumis à de nombreux cas de figures différents et répond aux problèmes exposés par l'ensemble des auteurs des algorithmes vus dans l'état de l'art, dont voici quelques résultats.

#### a) Cas d'ombres sur la route

Les ombres peuvent produire des artefacts à la surface de la route pour l'extraction de contours et détériorer les résultats de la détection des lignes de marquage au sol soit par la présence d'une alternance uniforme de grosses zones ombragées ou non, soit par la présence de multiples petites

« taches » d’ombres. L’utilisation couplée du filtre adaptatif (qui supprime les alternances non voulues des zones foncé – clair – foncé) et de l’algorithme de Hough (qui arrive à retrouver des lignes dans un nuage de point même bruité) permet de bien distinguer les lignes dans ces cas de figure (Figure 153).

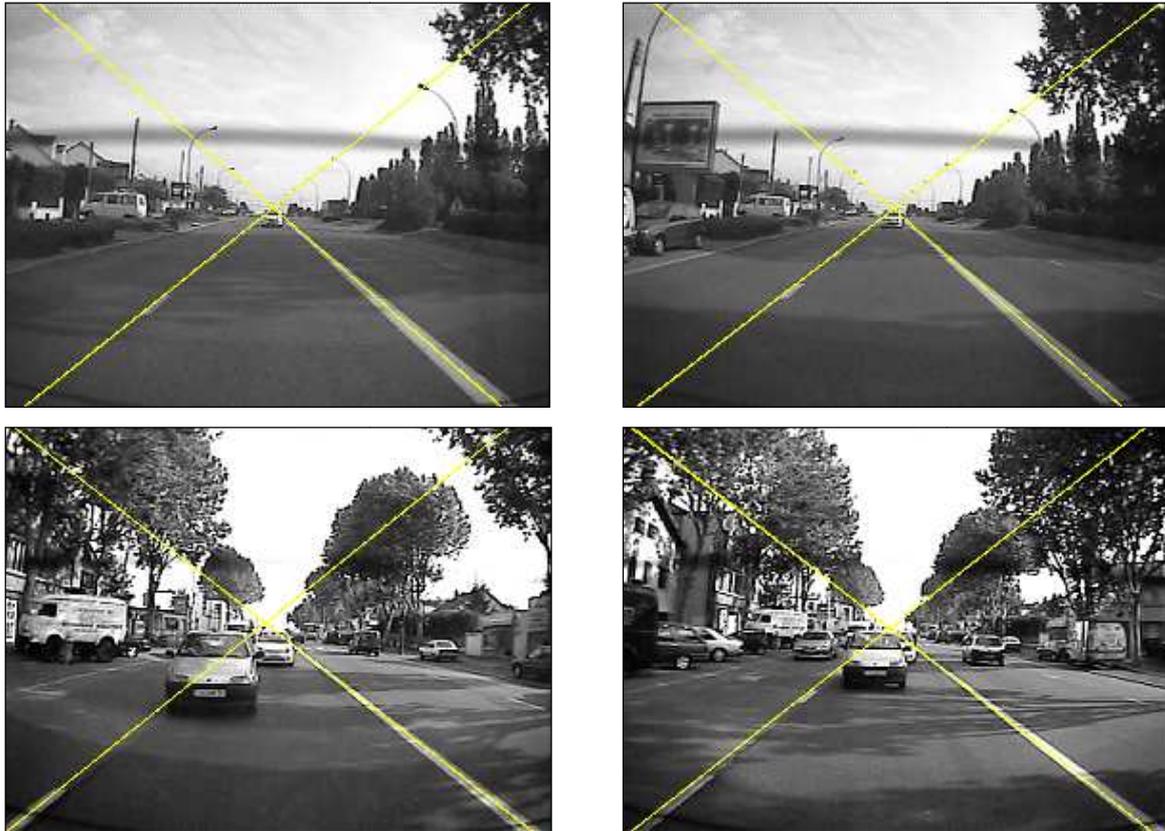


Figure 153 - Détection des lignes de marquage au sol avec des ombres présentes sur la route

### *b) Cas des lignes partiellement occultées*

Le passage d'une voiture d'une voie à une autre occulte temporairement la ligne de marquage au sol qui sépare les deux voies. Le filtre de suivi spatio-temporel permet de palier à ce problème (Figure 155). Il est notamment intéressant de voir que sur une frame, d'après l'image des contours, l'algorithme arrive à « reconnaître » les lignes de marquage au sol dans un tel cas (Figure 154).

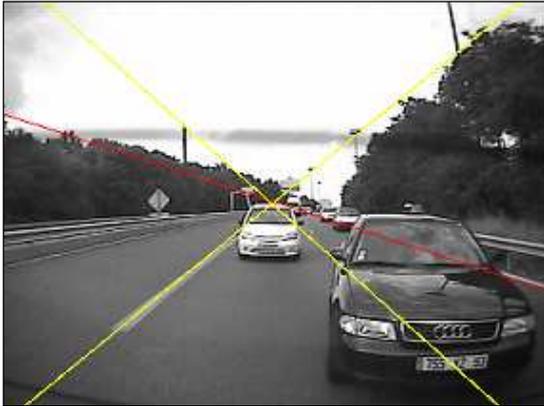


Figure 154 - Détection des lignes de marquage au sol (à droite) et image des contours (à gauche) lors d'occultation des lignes



Figure 155 – Détection des lignes de marquage au sol lors d'un changement de voie d'une voiture

### c) Cas des différentes conditions de luminosités

Les changements de conditions lumineuses, qui peuvent arriver par exemple lors de passage sous un pont, font drastiquement changer les contrastes des lignes de marquage au sol par rapport à la route dans l'image qui devient beaucoup plus clair ou beaucoup plus foncé. L'utilisation d'un seuil local lors de la sélection des extrema dans l'image des contours permet d'outre passer ce problème relevé dans la littérature (Figure 156).



Figure 156 - Détection des lignes de marquage au sol sous différentes conditions lumineuses

### d) Cas de changement de voie

Le cas des changements de voie est très peu décrit dans la littérature. Or, l'utilisation d'une mémoire pour pallier aux problèmes d'occultation peut faire apparaître des problèmes de détection lors des changements de voie de son propre véhicule. En effet, comme le véhicule se déplace latéralement, les lignes détectées se déplaceront d'un côté à l'autre de l'image (en fait elles subiront une rotation autour du point de fuite de l'image) plus ou moins rapidement selon le temps mis pour effectuer le changement de voie par le véhicule (Figure 157). Un appariement spatio-temporel qui ne tiendrait pas compte de cette problématique ferait apparaître des artefacts de détections entre la détection précédente et la détection courante. Ici, cette problématique a été étudiée (Figure 158).

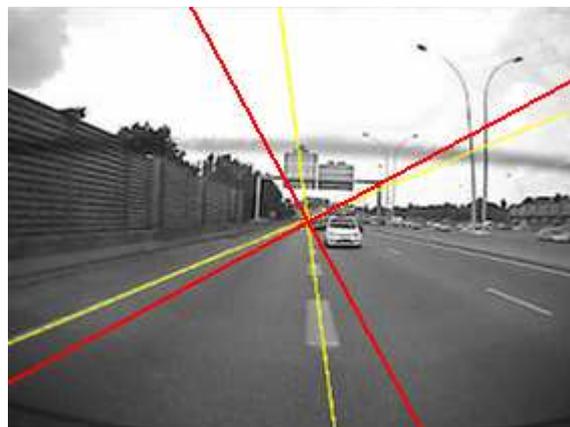


Figure 157 - Détection précédente (en rouge) et courante (en jaune) des lignes de marquage au sol lors d'un changement de voie du véhicule (de la gauche vers la droite)

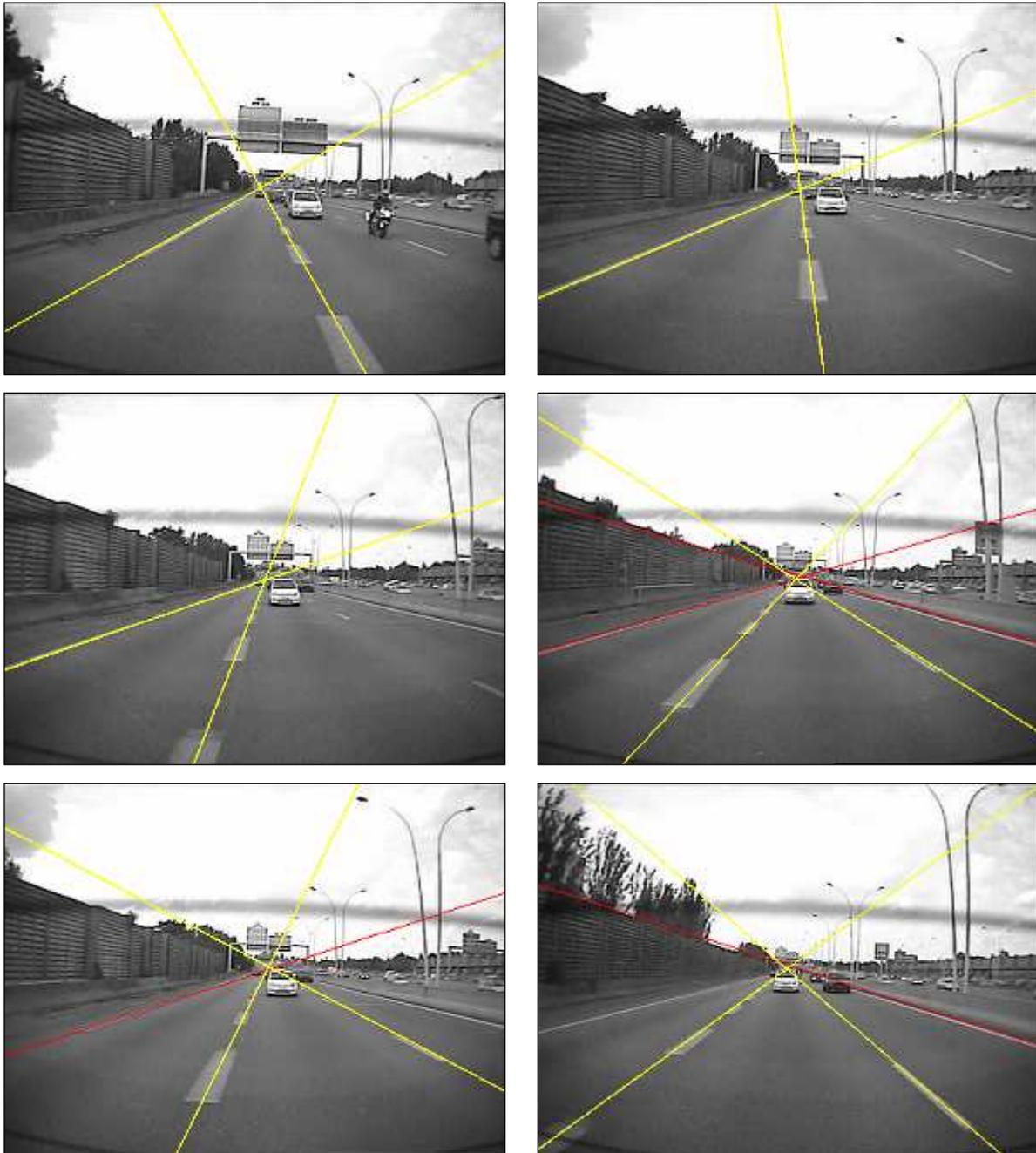


Figure 158 - Détection des lignes de marquage au sol lors d'un changement de voie de son propre véhicule

### 3.5. Perspectives et applications

---

Un point difficile soulevé à plusieurs reprises par les évaluateurs industriels et par des observateurs extérieurs, est l'existence pendant les périodes de travaux de zones comportant plusieurs marquages superposés, l'un temporaire et valide, l'autre non valide, existant au préalable et restant visible au sol. Face à cette situation, l'être humain fait naturellement appel à des éléments extérieurs pour analyser la scène de travaux. Aucun algorithme de vision ne sait traiter ce problème de manière systématique, ce qui est aussi le cas de l'algorithme présenté ici, incapable de faire cette différence.

L'utilisation de l'information de couleur, si une image en couleur est disponible, pourrait aider à résoudre ce problème en distinguant les lignes temporaires (jaunes) des lignes officielles (blanches).

La modélisation de la route sous forme de ligne droite, permet d'envisager de nombreuses applications et notamment celle qui nous intéresse ici : la détection des changements des voie de notre véhicule. Cependant, améliorer cette modélisation afin d'estimer la courbure de la route, ne devrait pas poser beaucoup de problème au vu de la méthode couramment utilisé dans la littérature : effectuer une détection de lignes par transformée de Hough, non pas comme il est fait ici sur toute l'image, mais sur 5 zones horizontales prédéfinies de l'image, puis calculer les paramètres d'une courbe de Bézier / B-Spline correspondant au mieux à ces séries de 5 segments.

L'utilisation de cet algorithme en vue d'implémenter des algorithmes ADAS de plus haut niveau est envisageable. Par exemple il est possible de calculer dynamiquement le tangage, le roulis et le lacet du véhicule en comparant la position du point de fuite détecté (point de croisement des lignes) avec la position du centre optique de la caméra dans l'image (position idéale du point de fuite sans mouvement du véhicule). L'utilisation de cette information peut permettre de stabiliser le flux vidéo en corrigeant chacune des images (par le calcul d'une rotation en 3 dimensions des pixels de l'image) par rapport à ces paramètres comme le font (Liang, et al., 2004). Cette méthode a été implémentée dans le cadre de mon stage (Bargeton, 2005).

Plusieurs autres applications décrites dans la première partie de ce chapitre peuvent être facilement mis en place à partir de cet algorithme de détection de ligne de marquage au sol, comme par exemple :

- La prévention de sortie de voie en détectant si une ligne se rapproche dangereusement du centre de l'image ;
- Coupler à une détection d'obstacle, il serait aisé, en ligne de droite, de déterminer si cet obstacle est présent dans notre voie ou non ;
- Créer un système auto cruise plus intelligent qui garderait le véhicule dans sa voie ; et qui, couplé à un système de détection des limitations de vitesse, adapterait automatiquement la vitesse du véhicule à la vitesse légale.