

# DESCRIPTION DES LOGICIELS IMPLANTES DANS LE PROCESSEUR PMM

## Note n° 3

Serge BEUCHER

Avril 1994

### 1. Introduction

Cette troisième note décrit les procédures de calibrage statique et dynamique du processeur PMM. Ces procédures permettent de déterminer certains paramètres indispensables à l'évaluation des mesures de distance réelles à partir de l'image 2D. Ces paramètres ont été introduits dans la note n° 1. Nous allons donner ici l'ensemble des opérations nécessaires à l'obtention de ces paramètres. Ces opérations seront illustrées à partir d'un exemple concret.

Par rapport à la note n° 1, et pour des raisons de compatibilité avec le module de calcul des coordonnées du processeur PMM, les coordonnées image utilisées dans cette note seront définies selon la Figure 1.

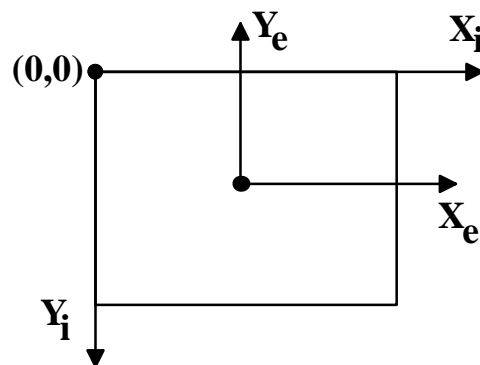


Figure 1: Les différents systèmes de coordonnées

L'origine des coordonnées est en haut à gauche de l'image. L'image étant de dimension (256, 256), ces nouvelles coordonnées sont liées aux anciennes ( $X_e$ ,  $Y_e$ ) par les formules:

$$\begin{aligned}x_i &= x_e + 128 \\y_i &= 128 - y_e\end{aligned}\quad (1)$$

### 2. Calibrage statique

La première procédure est le calibrage statique. Ce calibrage effectué le véhicule à l'arrêt va permettre la détermination des facteurs d'échelle nécessaires au calcul des dimensions réelles. En particulier, ce calibrage permet l'estimation du paramètre D (voir note

n° 1), la distance focale "virtuelle" du système de vision. Ce paramètre est un paramètre intrinsèque qui ne sera pas affecté par le mouvement du véhicule.

L'ensemble des paramètres estimés, aussi bien dans la procédure statique que dans les mesures dynamiques, sont dérivés de l'équation des droites-frontière de la voie empruntée et du calcul des coordonnées du point de fuite correspondant. Dans le cas du calibrage statique, ces droites sont tracées manuellement, alors qu'elles sont sensées être déterminées automatiquement lorsque le véhicule roule grâce aux différents types de segmentation des voies.

Les différentes étapes du calibrage statique sont décrites ci-dessous.

- Le véhicule est supposé être sur une voie, dans l'axe de celle-ci (on pourrait également utiliser une image d'une séquence en mouvement pourvu que des repères au sol de dimension connue soient présents dans cette image). Sur l'image acquise (Figure 2), on place quatre points A, B, C et D sur les bords de la voie. Les coordonnées de ces quatre points permettent le calcul des coefficients  $a_e, b_e, a'_e$  et  $b'_e$  des deux droites AB et CD (on donnera ces coefficients dans l'ancien système de coordonnées, bien que les coordonnées des quatre points soient exprimées dans le nouveau système).

On a :

$$a_e = \frac{y_i^A - y_i^B}{x_i^B - x_i^A} \quad (2)$$

$$b_e = 128 - 128 \left( \frac{y_i^B - y_i^A}{x_i^B - x_i^A} \right) + \frac{y_i^B x_i^A - y_i^A x_i^B}{x_i^B - x_i^A} \quad (3)$$

$$a'_e = \frac{y_i^C - y_i^D}{x_i^D - x_i^C} \quad (4)$$

$$b'_e = 128 - 128 \left( \frac{y_i^D - y_i^C}{x_i^D - x_i^C} \right) + \frac{y_i^D x_i^C - y_i^C x_i^D}{x_i^D - x_i^C} \quad (5)$$

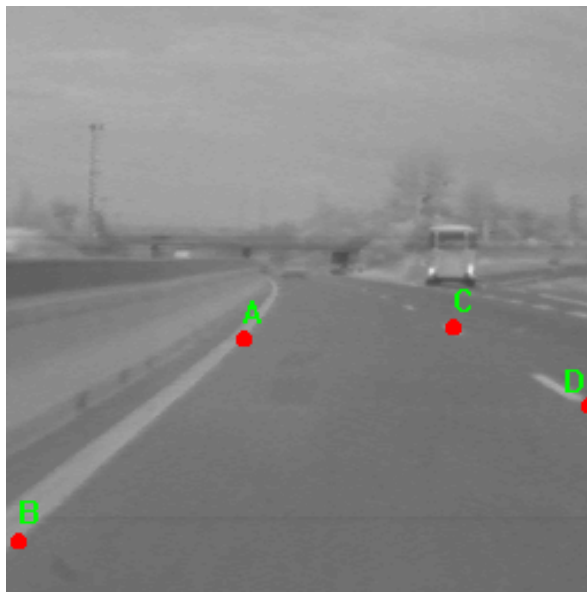


Figure 2: Points utilisés pour le tracé des bords de voie

- On pointe alors sur l'image les extrémités d'un repère au sol de dimension connue. Ce repère au sol doit être parallèle au bord de la voie (c'est la raison pour laquelle le mieux est de prendre les lignes de rive ou le marquage central). La dimension réelle de cet objet est supposée connue et égale à  $\Delta d$ . Les extrémités de ce repère correspondent sur l'image aux points G et H. Les coordonnées de ces points permettent de calculer la distance  $d_0$  entre la voiture et le point correspondant au milieu de l'image (Figure 3):

$$l_0 = \frac{a'_e b_e - a_e b'_e}{a_e a'_e} \quad (6)$$

$$l = \frac{(a_e - a'_e)(128 - y_i^G)}{a_e a'_e} + l_0 \quad (7)$$

$$l' = \frac{(a_e - a'_e)(128 - y_i^H)}{a_e a'_e} + l_0 \quad (8)$$

$$d_0 = \frac{\Delta d l'}{l_0(l-l')} \quad (9)$$

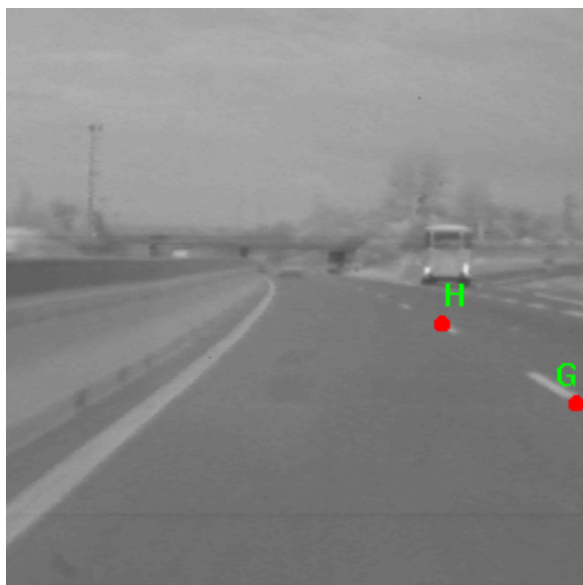


Figure 3: Points utilisés pour calibrer les distances au sol

- On peut alors calculer le paramètre  $R_0$  (distance de la caméra au centre de la scène):

$$R_0 = \left[ \frac{d_0^2 + \sqrt{\Delta}}{2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

avec :

$$\Delta = d_0^4 + \frac{4Ld_0^2 a_e'^2 a_e^2}{(a_e - a'_e)^2} \quad (11)$$

où  $L$  est la largeur réelle de la voie, supposée connue ou mesurée.

- On détermine les coordonnées  $x_i^F$  et  $y_i^F$  du point de fuite (point d'intersection des droites frontières) :

$$y_i^F = 128 + \frac{(a'_e b_e - a_e b'_e)}{a_e - a'_e} \quad (12)$$

$$x_i^F = \frac{b'_e - b_e}{a_e - a'_e} + 128 \quad (13)$$

En fait, seule l'ordonnée  $y_i^F$  nous sera utile.

- Enfin, on calcule la focale virtuelle D:

$$D = \left| \frac{(128 - y_i^F) R_0 (a_e - a'_e)}{L a_e a'_e} \right| \quad (14)$$

Ce paramètre associé à la largeur L de la voie permettra le calcul de tous les autres paramètres mesurés en fonctionnement dynamique.

### **3. Les paramètres dynamiques**

En fonctionnement dynamique, la segmentation de la voie, qu'elle soit de type 1 ou 2, fournit les coefficients des deux droites ajustées sur les bords de la voie.

Dans la segmentation de type 1, ces coefficients sont calculés simplement à partir des coordonnées de quatre points situés sur deux droites horizontales données, de façon similaire au calcul effectué dans le cas du calibrage statique (équations (2) à (5)).

Dans la segmentation de type 2, ces coefficients sont estimés par régression linéaire à partir des coordonnées  $(x_i, y_i)$  des points-frontière détectés (cf note n° 2). Avec le nouveau repère-image, ces coefficients  $a_e$  et  $b_e$  sont donnés par:

$$a_e = \frac{S_1 S_2 - N S_5}{N S_3 - S_1^2} \quad (15)$$

$$b_e = \frac{(S_1 S_5 - S_2 S_3) + 128 [S_1 (S_2 - S_1) + N (S_3 - S_5)]}{N S_3 - S_1^2} \quad (16)$$

les valeurs  $S_1, \dots, S_5$  ayant les définitions identiques à celles données dans la note n° 1, page 8.

On calcule de la même façon les coefficients  $a'_e$  et  $b'_e$  correspondant à la deuxième droite (rive droite).

On peut alors, dans les deux cas, calculer les coordonnées du point de fuite (équations 12 et 13). Ces coordonnées  $x_i^F$  et  $y_i^F$  seront utilisées avec la valeur D de la "focale" fournie par le calibrage statique pour calculer les divers paramètres de position et de distance des obstacles, ainsi que ceux se rapportant à la position du véhicule.

#### **3.1. Les informations accessibles**

Nous allons donner les équations permettant le calcul des divers paramètres accessibles.

- *L'angle caméra*

L'angle de la caméra avec le plan de la route est donné par:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{128 - y_i^F}{D}\right) \quad (17)$$

- *Distance de la caméra au centre de la scène*

Ce paramètre R (qui varie avec le mouvement) est donné par:

$$R = \frac{LDa_e a'_e}{(a'_e b_e - a_e b'_e)} \sqrt{\frac{D^2 + y_i^{f^2} + x_i^{f^2} - 256(x_i^f + y_i^f)}{D^2 + (128 - y_i^f)^2}} \quad (18)$$

L étant la largeur de la voie.

**Nota Bene:**

Ce paramètre R peut être négatif si l'angle formé par l'axe de la caméra avec le sol est négatif (c'est-à-dire si la caméra pointe vers le haut). Dans ce cas, l'image formée sur l'écran est une image virtuelle de la scène située à l'arrière de la caméra. Ce phénomène n'enlève rien à la généralité des équations.

- *Distance à la voiture d'un point dont les coordonnées image sont  $(x_i, y_i)$*

Cette équation permet notamment de déterminer la distance des obstacles à la voiture. Elle est donnée par:

$$d = \frac{R(128 - y_i^f)[D^2 - (128 - y_i^f)(128 - y_i)]}{D[D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2}(y_i - y_i^f)} \quad (19)$$

- *Ordonnée  $y_i$  d'un point de la scène à la distance  $d$*

C'est l'équation inverse de la précédente. Elle est utilisée notamment pour positionner dans l'image des fenêtres d'analyse.

$$y_i = 128 - \frac{D(128 - y_i^f)(RD - d[D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2})}{R(128 - y_i^f)^2 - dD[D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2}} \quad (20)$$

- *Largeur apparente d'une voie de largeur  $L$  réelle à la distance  $d$  (ou à l'ordonnée image  $y_i$ )*

Cette mesure permet notamment de vérifier la qualité de la segmentation car elle permet de connaître la largeur en pixels d'une voie. On peut ainsi contrôler que la région extraite a des caractéristiques conformes à celles d'une voie normalisée. On a :

$$l = \frac{L(y_i - y_i^f)D}{R(128 - y_i^f)} \quad (21)$$

ou encore :

$$l = \frac{DL[(128 - y_i^f)^2 - D^2]}{R(128 - y_i^f)^2 - dD[D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2}} \quad (22)$$

- *Cap et position du véhicule par rapport à la voie*

Le cap est l'angle formé par l'axe du véhicule avec le bord de la voie (Figure 4).

On a :

$$a = \arctan a \quad (23)$$

Soit :

$$a_1 = \arctan \frac{128 - y_i^f - b_e}{a_e[D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2}} \quad (24)$$

pour l'angle calculé avec le bord gauche et:

$$a_2 = \arctan \frac{128 - y_i^f - b'_e}{a'_e[D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2}} \quad (25)$$

pour l'angle calculé avec le bord droit.

Le cap  $a$  peut être estimé en faisant la moyenne de ces deux angles:

$$a = (a_1 + a_2)/2 \quad (26)$$

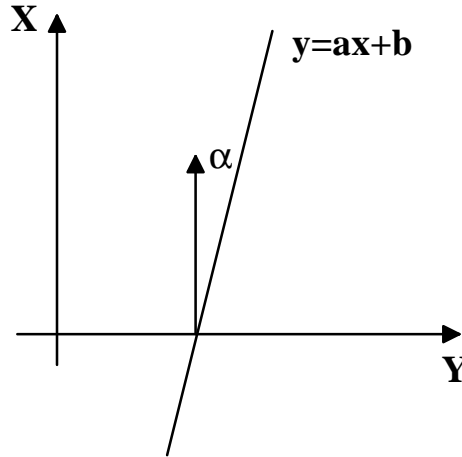


Figure 4: Cap du véhicule

La position du véhicule par rapport au bord est donnée par:

$$p_1 = \frac{|Rb'_e| [D^2 + (128 - y_i^F)^2]^{1/2}}{D[(128 - y_i^F - b'_e)^2 + a'^2 [D^2 + (128 - y_i^F)^2]^{1/2}}} \quad (27)$$

(distance au bord droit).

La distance au bord gauche  $p_2$  s'obtient en remplaçant  $a'_e$  et  $b'_e$  par  $a_e$  et  $b_e$  dans l'équation précédente.

On peut là encore faire la moyenne des deux mesures pour obtenir la distance  $p$  au bord droit, la largeur  $L$  de la chaussée étant connue:

$$p = (L + p_1 - p_2)/2 \quad (28)$$

Cette mesure permet également de mettre en évidence le changement de voie. En effet, la variation de  $p$  sera très importante lorsque le changement de voie se produit entre les images  $n$  et  $n+1$ . Le sens de cette variation indique également le sens du changement de voie.

Si:

$$\Delta p = p_{n+1} - p_n \quad (29)$$

$p_{n+1}$ , distance à l'instant  $n+1$

$p_n$ , distance à l'instant  $n$

on peut donc écrire que, en appelant par  $V$  le  $n^\circ$  de la voie courante ( $V=1$  correspond à la voie la plus à droite):

$$\text{si } |\Delta p| > L/2, V = V + |\Delta p|/\Delta p \quad (30)$$

### 3.2. Calcul des fenêtres de traitement

La détermination des fenêtres de traitement est primordiale pour la détection des obstacles. Il faut calculer en permanence les valeurs  $S_x$  et  $S_y$ , tailles horizontale et verticale de la fenêtre, ainsi que les coordonnées  $X_w$  et  $Y_w$  de l'origine (coin supérieur gauche). Pour ce faire, il faut estimer l'ordonnée  $y_i$  d'un point de la scène 3D à la distance  $d$  de la caméra et à l'altitude  $h$  (Figure 5). La relation trouvée permet alors de calculer la fenêtre. En effet, pour détecter les obstacles il suffit de déterminer la fenêtre centrée sur la voie scrutée

correspondant au minimum à une distance de  $m$  mètres de la voiture ( $m$  est en pratique de 10m maximum) et au maximum à  $m'$  mètres ( $m'$  est de l'ordre de la centaine de mètres) pour des obstacles de hauteur maximale  $h$  ( $h$  est généralement inférieur à 2 m).

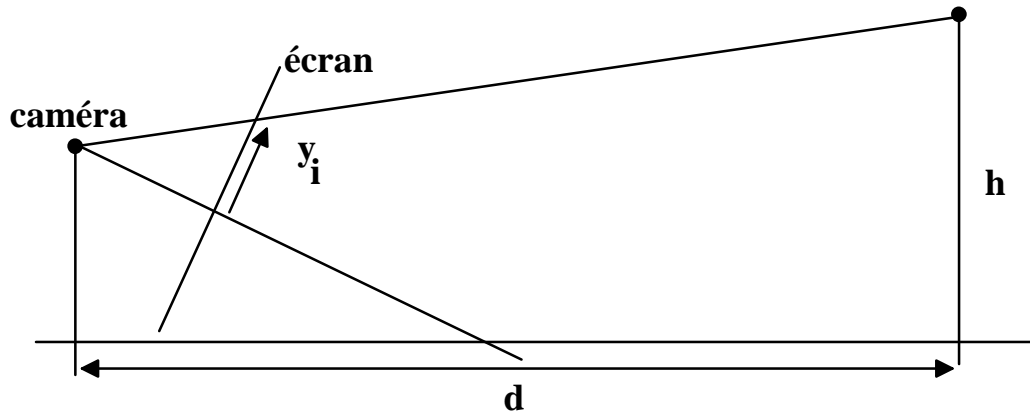


Figure 5: Calcul de l'ordonnée 2D d'un objet de hauteur  $h$

L'ordonnée  $y_i$  d'un point situé à la distance  $d$  et à l'altitude  $h$  est donnée par:

$$y_i(d, h) = 128 - \frac{Dk[hD+d(128-y_i^f)]-RD^2(128-y_i^f)}{[dD-h(128-y_i^f)]k-R(128-y_i^f)^2} \quad (31)$$

avec:

$$k = [D^2 + (128 - y_i^f)^2]^{1/2} \quad (32)$$

On peut alors calculer  $y_i(m, h)$  et  $y_i(m', h)$  d'une part,  $y_i(m, 0)$  et  $y_i(m', 0)$  d'autre part (ces valeurs peuvent aussi être obtenues par la formule (20)), puis en déduire  $S_y$  :

$$S_y = \sup[y_i(m, 0), y_i(m', 0)] - \inf[y_i(m, h), y_i(m', h)] \quad (33)$$

Quant à la taille horizontale, on l'obtient par l'équation (22) avec  $d=m$ . Les coordonnées de l'origine s'obtiennent de la façon suivante:

$$Y_w = \inf[y_i(m, h), y_i(m', h)] \quad (34)$$

$$X_w = \frac{128 - \sup[y_i(m, 0), y_i(m', 0)] - b_e}{a_e} + 128 \quad (35)$$

On remarquera qu'il n'est pas nécessaire de calculer les tailles des fenêtres correspondant aux distances minimale et maximale. En effet, si la hauteur de la caméra est toujours inférieure à la hauteur maximale choisie pour les obstacles, alors  $y_i(m, h) < y_i(m', h)$ .

#### 4. Un exemple pas à pas

Nous allons reprendre l'exemple de la Figure 2 pour calculer les différents paramètres indiqués précédemment.

$$\begin{array}{ll} x_A = 103 & x_B = 6 \\ y_A = 144 & y_B = 231 \\ x_C = 193 & x_D = 254 \end{array}$$

$$y_C = 139 \quad y_D = 173$$

$$x_H = 189 \quad x_G = 251$$

$$y_H = 137 \quad y_G = 171$$

$d = 16$  m (distance correspondant à deux traits de marquage séparés par un intervalle).

Les valeurs suivantes ont été calculées avec les équations dont le numéro figure en référence.

- (2)  $a_e = 0,8969$
- (3)  $b_e = + 6,4$
- (4)  $a'_e = - 0,5574$
- (5)  $b'_e = + 25,2$
- (6)  $l_o = 52,3$  m
- (7)  $l = 177,4$  m
- (8)  $l' = 78,5$  m
- (9)  $d_o = 43,1$  m
- (11)  $\Delta = 3.455.184$  ( $L = 3,5$  m, largeur de voie normalisée)
- (10)  $R_o = 43,1$  m
- (12)  $y_i^F = 110$
- (13)  $x_i^F = 141$
- (14)  $D = 644,8$

Le dernier paramètre  $D$  est la distance focale virtuelle ou équivalente du système de vision. Ce paramètre est intrinsèque et n'est pas modifié par le mouvement du véhicule et les déplacements de la caméra.

L'image de la Figure 6 a été utilisée pour illustrer les paramètres mesurés en fonctionnement dynamique.

La segmentation fournit les coefficients des deux droites frontières de la voie:

$$a_e = 0,7667$$

$$b_e = 9,6$$

$$a'_e = - 0,6351$$

$$b'_e = 27,4$$

$$y_i^F = 109$$

$$x_i^F = 141$$

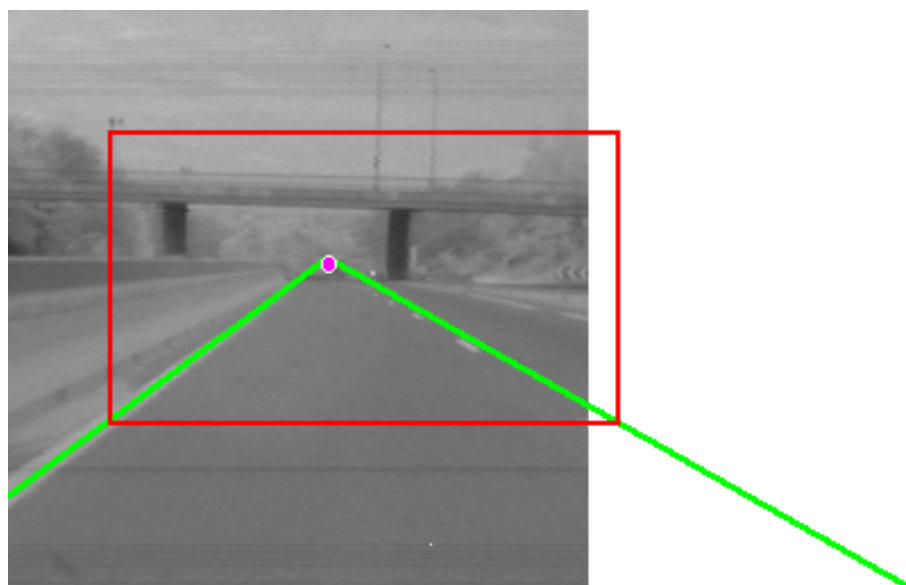


Figure 6: Calcul de la fenêtre de détection des obstacles



- *Inclinaison de la caméra*

$$\varphi = 1^{\circ}41' \quad (\text{équation 17})$$

- *Paramètre R*

$$R = 38,92 \text{ m} \quad (\text{équation 18})$$

- *Distance réelle du point de coordonnée  $y_i = 118$  (ce point correspond au premier véhicule sur la voie)*

$$d = 71,6 \text{ m} \quad (\text{équation 19})$$

- *Largeur apparente de la voie à cette distance*

$$l = 27 \quad (\text{équation 21})$$

- *Cap du véhicule*

$$a_1 = 1^{\circ}5'20''$$

$$a_2 = 1^{\circ}10'29''$$

$$a = 1^{\circ}84'$$

- *Distance du véhicule aux bords*

$$p_1 = 2,60 \text{ m}$$

$$p_2 = 0,76 \text{ m}$$

$$p = 2,67 \text{ m}$$

- *Coordonnées et taille d'une fenêtre*

Cette fenêtre permet l'analyse des obstacles sur la voie courante pour une distance comprise entre 10 et 100 m, hauteur des obstacles limitée à 2 m.

- Calcul de  $y_i(10,2)$ ,  $y_i(100,2)$

$$k = 645,08$$

$$y_i(10,2) = 53$$

$$y_i(100,2) = 103$$

- Calcul de  $y_i(10,0)$  et  $y_i(100,0)$

$$y_i(10,0) = 183$$

$$y_i(100,0) = 116$$

$$S_y = 183 - 53 = 130$$

$$S_x = 226$$

$$Y_w = 53$$

$$X_w = 44$$

En pratique, la taille de la fenêtre est limitée à la taille de l'image (c'est le cas dans l'exemple ci-dessus).

De la même façon, si  $d = 80$  m et  $h = 5$  m, on trouve  $y_i = 78$  (Figure 7).



Figure 7: Fenêtre correspondant à des objets de hauteur 5 m à 80 m

- *Paramètres du traitement d'images*

Le calibrage permet également le calcul de certains paramètres de taille utilisés dans le traitement des images. On peut ainsi déterminer la taille de la transformation chapeau haut-de-forme utilisée pour détecter le marquage au sol. En effet, ce marquage au sol normalisé a une largeur de 10 cm. On peut donc calculer par le biais de l'équation (21) la largeur apparente de ce marquage au sol à l'ordonnée  $y_i = 255$  (là où il est le plus large). Dans l'exemple ci-dessus, on trouve:

$$l_{\text{marq}} = 12,73$$

ce qui entraîne une taille de transformation égale à 13.

De la même façon, on peut déterminer la taille de l'érosion appliquée sur le bassin versant de la voie à l'instant  $t$  avant de l'injecter dans l'algorithme de segmentation à l'instant  $t+1$ . Cette taille est liée en effet à la vitesse maximale de déplacement latéral du véhicule. En appelant  $V_1$  cette vitesse et  $\Delta t$  l'intervalle de temps entre deux images, le déplacement latéral maximal sera  $V_1 \Delta t$ . La largeur apparente correspondante et donc la taille de l'érosion qui assure que le marqueur tombe bien dans la voie à l'instant  $t+1$  sera donnée en remplaçant  $L$  par  $V_1 \Delta t$  et  $y_i$  par 255 dans l'équation (21). Avec une vitesse latérale maximale de 1.6 m/s et un intervalle de temps de 200 ms, on trouve:

$$V_1 \Delta t = 0,32 \text{ m}$$

et la taille  $s$  de l'érodé égale à:

$$s \approx 40$$

Enfin, cette formule permet de déterminer la largeur apparente des obstacles pour toutes les positions dans l'image et par conséquent de calculer avec précision la taille des filtres utilisés pour les mettre en évidence.