# Mesure semi-automatique de largeur de chaussée

## État d'avancement et perspectives au premier semestre 2001

**Pierre CHARBONNIER**
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

**Philippe NICOLLE**
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

## Introduction

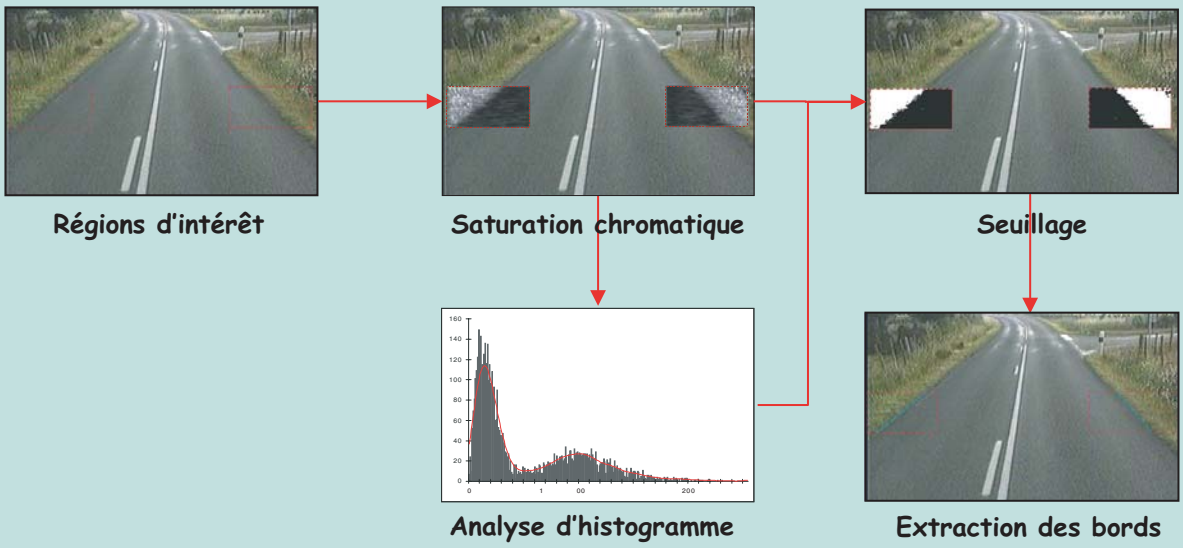
### Historique de l'étude

L'analyse semi-automatique des images routières vise à obtenir des informations sur la chaussée et son environnement, sans exposer le personnel aux dangers de la route. Le relevé de la largeur de chaussée doit permettre d'améliorer la connaissance des réseaux routiers afin de faciliter leur gestion et d'améliorer l'information et la sécurité des usagers.

Les recherches concernant la détection automatique des bords de chaussée menées les années précédentes ont permis en 1997 l'écriture d'un programme démonstrateur capable d'analyser des séquences d'images en couleurs [1]. Un algorithme fondé sur l'utilisation de l'information de couleur [2] localise les bords de la chaussée revêtue dans deux régions d'intérêt, positionnées de part et d'autre de l'image (*cf.* encadré 1). Le système étant calibré, toute mesure à l'image peut être transformée en mesure métrique : le programme calcule alors la largeur de la chaussée et sauvegarde les mesures dans un fichier texte, en les localisant en abscisse curviligne.

### ENCADRÉ 1
### Principe de la détection des bords de chaussée revêtue

Le principe de la détection automatique des bords du revêtement de chaussée est le suivant : dans un premier temps, deux régions d'intérêt sont positionnées de part et d'autre de l'image de façon à limiter les calculs. À l'intérieur de ces régions, on calcule en chaque point la saturation chromatique, qui mesure la quantité de couleur présente dans le pixel. Cette quantité a l'avantage d'être indépendante de l'intensité, donc d'être robuste à la présence de marquages, ombres portées, réparations de chaussées, etc. La plupart du temps, l'histogramme de saturation présente deux modes, correspondant respectivement à la chaussée et aux bas-côtés (dans le cas contraire, l'échec de la détection est immédiatement signalé au programme principal). Une analyse automatique de l'histogramme détermine alors un seuil de saturation permettant de classer les pixels des régions d'intérêt selon leur appartenance ou non à la chaussée. Enfin, une méthode de régression robuste extrait les paramètres de pente et d'abscisse à l'origine des segments représentant les bords de la chaussée revêtue.



En parallèle, les besoins des utilisateurs étaient exprimés dans un cahier des charges fonctionnel rédigé par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Clermont-Ferrand [3]. En 1998 a eu lieu la première expérimentation « en vraie grandeur » du logiciel de mesure automatique de largeur de chaussée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et les LRPC de Clermont-Ferrand et de Strasbourg. Après calibrage du système [4], 2 000 km de prises de vues ont été réalisés dans le département de l'Allier. Un échantillon de 80 km a fait l'objet d'une mesure automatique de largeur [5]. Les écarts constatés entre les mesures manuelles et les mesures par vidéo, sur vingt échantillons de 200 m, étaient de l'ordre de 5 %. Ces performances avaient permis d'envisager la validation du logiciel.

### Bilan de l'expérience de validation de 1999 – Améliorations prévues

Une expérience de validation a été menée en juin 1999, conjointement par les LRPC de Lille, d'Angers et de Strasbourg et le LCPC. Dix secteurs test ont été choisis sur un itinéraire jugé représentatif du réseau routier. La largeur a été mesurée sur site par deux équipes différentes. Deux séries de prises de vues ont ensuite été réalisées et exploitées à l'aide du logiciel démonstrateur de mesure de largeur. Une analyse détaillée des résultats ainsi que des propositions d'améliorations sont proposées dans [6]. Les écarts entre mesure manuelle et mesure par vidéo étaient compris entre 0 et 10 %. Ils étaient supérieurs à 5 % dans un cas sur deux, principalement dans les secteurs sinueux.

Cette expérience a, d'une part, mis en évidence un problème de sous-mesurage des grandes largeurs et de surmesurage des petites. Ceci a motivé l'introduction d'un modèle géométrique plus complet que celui initialement proposé. Ce modèle, appelé modèle sténopé, est classique en vision par ordinateur [7]. Il permet de tenir compte de la distorsion due à l'objectif. Son utilisation est détaillée dans [8]. Par ailleurs, la façon de mesurer en virage n'était pas satisfaisante et entraînait une tendance au surmesurage. L'algorithme a donc été modifié de façon à réaliser une mesure selon la perpendiculaire, au sol, aux bords de la chaussée. Enfin, il est apparu impératif d'éliminer les détections erronées, afin d'améliorer le résultat moyen et de diminuer la dispersion des mesures. Ces deux dernières modifications, ainsi que leur influence sur les résultats de mesure, sont présentées dans le paragraphe « Améliorations de la mesure ».

En ce qui concerne l'outil logiciel, il semblait globalement bien perçu par les utilisateurs. Trois améliorations avaient cependant été demandées. La première était la possibilité d'effectuer des mesures à partir de séquences d'images prénumérisées, archivées sur cédérom par exemple. Ceci devait faciliter l'exploitation des images issues du matériel de prises de vues IRCAN (Imagerie Routière par CAméra Numérique) [9], permettre d'améliorer l'ergonomie du logiciel et le rendre accessible au plus grand nombre en évitant le recours à une carte de numérisation spécifique. La deuxième amélioration était l'adaptation au format MEC (Moyens d'Essais Chaussées) du logiciel, afin de faciliter l'exploitation des mesures grâce aux fonctionnalités du logiciel SEMI (Système d'Exploitation Multi-mesures par Itinéraire) [10]. La troisième amélioration était la « mise au propre » du démonstrateur, issu de trois ans d'évolution de recherches, afin de préparer sa diffusion au sein du réseau technique pour une validation plus large. Ces transformations sont présentées dans le paragraphe « Transformations du logiciel ».

## Améliorations de la mesure

Dans ce paragraphe sont d'abord décrites les deux principales améliorations apportées au système de mesure depuis 1999 : la mesure non horizontale et le suivi temporel des bords de chaussée avec élimination des mesures erronées. On étudie ensuite l'impact de ces améliorations sur les performances de l'algorithme, à l'aide des données recueillies sur les dix secteurs test définis en 1999.

### Mesure non horizontale et ajustement des régions d'intérêt

Lors de l'expérimentation de juin 1999, on avait constaté une surévaluation de la mesure de largeur sur les sections sinueuses. Cette tendance systématique pouvait s'expliquer par le principe initialement retenu pour la mesure. Celle-ci était effectuée selon une ligne horizontale dans l'image, ce qui se justifie dans le cas des lignes droites lorsque le véhicule est aligné sur la chaussée. Cependant, en dehors de ces conditions et notamment en virage, la mesure horizontale est systématiquement trop élevée, comme l'illustre l'exemple montré sur la figure 1.

*Fig. 1 - Principe de la recherche de la plus courte distance au sol entre les deux bords détectés.*
*En noir, la ligne de mesure horizontale (largeur 5,5 m), en bleu clair, la ligne de mesure effective (largeur 5,1 m).*
*Pour information, la mesure maximale relevée manuellement dans ce virage est de 5,15 mètres.*

Partant de l'hypothèse que les bords de la chaussée au sol sont localement parallèles, une des améliorations possibles est de rechercher la mesure de longueur minimale dans la scène. Cela revient à mesurer au sol selon la perpendiculaire aux bords détectés. La méthode retenue consiste à fixer un premier point de mesure au centre du segment représentant l'un des bords. On recherche alors la plus petite mesure au sol, en déplaçant le second point de mesure le long du segment représentant le bord opposé. L'opération est renouvelée en inversant le sens de mesure. Le minimum des deux largeurs ainsi calculées est retenu, et les points de mesure associés sont enregistrés.

La position des régions d'intérêt (matérialisées par des rectangles sur la figure 1) est ensuite réajustée pour l'analyse de l'image suivante dans la séquence. Cela consiste à recentrer chaque région d'intérêt sur le point de mesure précédemment retenu. Cette procédure permet d'assurer un meilleur suivi, en virage notamment.

## Suivi temporel des bords pour l'élimination des erreurs de détection

La procédure de détection fournit les coefficients des deux segments représentant les bords de chaussée dans l'image (*cf.* encadré 1). Ces coefficients représentent la pente et l'abscisse à l'origine des segments. Tout échec de la détection est signalé par la procédure et la mesure de largeur n'a pas lieu. Par contre, il arrive que l'algorithme produise de fausses détections ou *faux-positifs*. C'est le cas lorsqu'on croise un véhicule coloré ou des piétons. De plus, en entrée ou sortie d'intersection, les segments, habituellement dirigés vers le point de fuite de la scène, peuvent soudainement diverger. Ces *faux-positifs* entraînent souvent des mesures de largeur erronées, qu'il convient de filtrer.

Une solution consiste à effectuer un suivi des paramètres des segments modélisant les bords de chaussée. En effet, les variations de ces paramètres sont normalement assez lentes, les sauts brusques correspondant aux fausses détections qui doivent être éliminées.

### *Suivi temporel des statistiques*

Une première idée a été d'effectuer des statistiques sur les $n$ derniers coefficients produits par la détection : moyenne $\mu$ et écart type $\sigma$. En considérant que le coefficient est une réalisation d'une variable aléatoire gaussienne, on effectue un test d'hypothèse avec un intervalle de confiance à 98 % : lorsqu'une nouvelle valeur de coefficient est mesurée, on vérifie qu'elle appartient à l'intervalle $\mu \pm 3\sigma$. Si cela n'est pas le cas, la valeur est invalidée et la mesure de largeur n'a pas lieu. Le coefficient concerné n'intervient pas non plus dans la mise à jour des statistiques. L'inconvénient de cet algorithme est le choix arbitraire du paramètre $n$. De plus, ce système n'est pas robuste aux dérives se produisant, par exemple, en virage : si plusieurs mesures sont éliminées au début, les valeurs suivantes peuvent se trouver durablement en dehors de l'intervalle d'acceptation. Il faudrait alors mettre en place une procédure *ad hoc* de réinitialisation du système. C'est pourquoi l'étude s'est orientée vers une méthode mieux fondée théoriquement : le filtrage de Kalman.

### *Algorithme de suivi, élimination des faux-positifs*

Le filtre de Kalman est un outil d'estimation désormais classique [11] permettant de déterminer récursivement à chaque instant l'état d'un système dynamique à partir d'une mesure. Cette méthode est utilisée pour la navigation de robots [12] ou l'aide à la conduite [13].

L'algorithme de base du filtre de Kalman est décrit en annexe dans le cas scalaire. Il met en jeu un modèle qui décrit l'évolution temporelle de l'état du système et un modèle qui relie cet état à la mesure que l'on peut en faire. Le filtrage se compose de trois étapes :

❶ la *prédiction* utilise le modèle d'état pour estimer la valeur prévue du paramètre d'état ainsi que de celle de la variance associée (ou matrice de covariance dans le cas vectoriel),
❷ l'*observation* consiste à recueillir une mesure,
❸ l'*estimation* pondère la mesure effectuée et la prédiction pour mettre à jour la variable d'état et la variance associée.

Dans cette application, la variable d'état est constituée des attributs (pente et/ou abscisse à l'origine) du segment représentant chaque bord de chaussée. L'observation est la mesure de ces paramètres à partir de l'image, effectuée par la procédure de détection automatique.

L'idée de l'algorithme proposé est similaire à celle décrite au paragraphe « Suivi temporel des statistiques », à la différence qu'on se sert de la valeur prédite et de la variance, fournies par le filtre de Kalman. La méthode met en œuvre un test d'hypothèse gaussienne avec un intervalle de confiance à 98 % autour de la valeur prédite. L'hypothèse gaussienne est bien adaptée, puisque le bruit d'observation est considéré comme gaussien dans le filtre de Kalman. L'utilisation d'un tel intervalle de confiance est classique pour le suivi de segments dans les séquences d'images [14, 12].

Ainsi, si la mesure du coefficient est comprise dans un intervalle de trois écarts types autour de la valeur prédite, elle est acceptée. Elle entre alors en jeu au niveau du filtre dans l'estimation de la valeur et de la variance de l'état. Sinon, c'est la prédiction qui est conservée, mais l'étape d'estimation n'est pas effectuée : la matrice de covariance n'est donc pas remise à jour. Enfin, si le contraste chromatique est insuffisant, le filtre n'est pas du tout sollicité.

La formulation scalaire du filtre présenté en annexe permet d'interpréter plus facilement le comportement de l'algorithme proposé, puisque celui-ci reprend le schéma classique auquel on ajoute un test d'hypothèse sur la validité de l'observation. On peut constater qu'en l'absence de détection erronée, la variance de l'estimée va décroître vers une valeur constante, plus ou moins vite selon la variance du bruit d'observation. La limite dépend de la variance du bruit d'état et pourrait être calculée en résolvant des équations appelées équations de Riccati [12]. Dans le cas de l'algorithme proposé, ce n'est cependant pas possible, du fait de l'introduction du test d'hypothèse. Au contraire, lorsque plusieurs mesures successives sont invalidées, le filtre

n'utilise que l'équation de prédiction et l'écart type croît. Cet élargissement se fait plus ou moins vite, en fonction de la variance du bruit d'état toléré, jusqu'à ce que l'on accepte de nouveau une mesure, ce qui permet de rentrer dans un nouveau cycle de convergence. La valeur initiale de la variance de l'estimée est choisie arbitrairement grande, ce qui force le filtre à accepter les premières mesures, puisque l'intervalle de confiance est très grand.

### Réglage des paramètres

Une des difficultés pratiques de l'application du filtre réside dans le choix des paramètres, notamment des variances du bruit d'état et du bruit de mesure. Dans le cas du suivi de bords de chaussée, il est difficile de modéliser théoriquement le bruit d'état. Pour cette expérience de faisabilité, une méthode empirique a donc été employée. Des mesures de pente et d'abscisse à l'origine ont été effectuées sur un grand nombre d'observations. Les statistiques des variations temporelles des attributs sont approchées par des gaussiennes à moyenne nulle. La figure 2 montre l'histogramme des variations d'abscisse à l'origine entre images successives, pour le bord droit, ainsi que la courbe gaussienne approchant cette distribution. On constate visuellement qu'une approximation gaussienne est raisonnable. Cependant, de brusques variations peuvent se produire avec une probabilité non nulle, ce qui justifie l'utilisation du test d'hypothèse. La valeur de la variance est estimée par régression non linéaire à partir de l'histogramme. Cette valeur a été affinée par un processus d'essai-erreur sous le contrôle d'un opérateur.

Le réglage de la variance du bruit de mesure a également été effectué par un processus d'essai-erreur, supervisé par un opérateur, en partant d'une valeur identique à celle du bruit d'état.

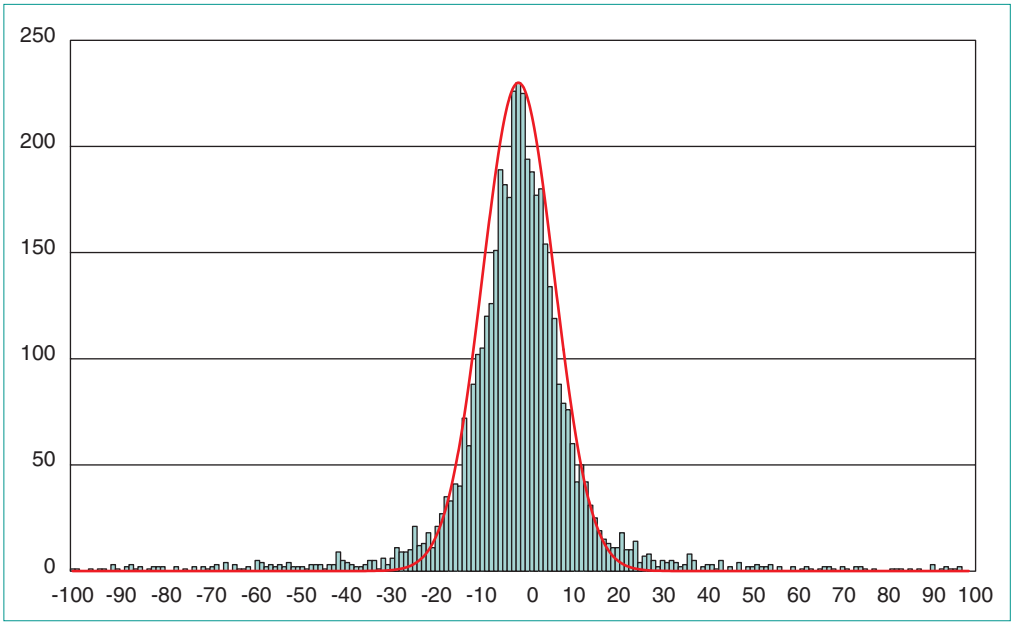



*Fig. 2 - Histogramme des variations d'abscisses à l'origine de la droite du bord droit et son approximation gaussienne. Statistiques calculées après analyse d'images prises sur un tronçon de 5 km, à raison d'une image tous les 5 mètres.*

### Exemple

L'exemple de la figure 3 illustre le suivi de l'abscisse à l'origine d'un bord sur le secteur de référence n° 9. Le secteur se compose d'une courte ligne droite, suivie d'un virage à droite, de nouveau une ligne droite puis un virage à gauche, et enfin une ligne droite avec passage dans une intersection et sur un pont en dos d'âne. Dans le premier virage ainsi que dans l'intersection, on note plusieurs pertes de détection, dues à un problème de cadrage dans le premier cas et à une absence de contraste chromatique dans le second.

L'initialisation de la variance à une valeur arbitrairement grande explique l'écart important entre les limites de validité initiales. Le filtre converge rapidement dans la première ligne droite et on observe que l'intervalle de confiance diminue.

Dans le virage a lieu une perte de suivi, due à une variation rapide de l'abscisse à l'origine et les mesures sont (trop) rapidement considérées comme invalides. On touche ici la limite du modèle dynamique très simple utilisé : pour permettre une meilleure prise en compte des virages, il serait possible d'augmenter la variance du bruit de modèle toléré, mais cela se ferait au détriment des performances du système en ligne droite. Une solution plus viable consiste à considérer un modèle dynamique plus élaboré. On peut observer que tant que le filtre fonctionne en prédiction, l'intervalle de confiance augmente de nouveau.

Pendant la perte de détection qui suit, le filtre n'est pas remis à jour et l'intervalle de confiance reste identique.

À l'entrée de la ligne droite suivante, les mesures reviennent dans l'intervalle de confiance et le système les accepte à nouveau. Le filtre recommence à converger et l'intervalle de confiance diminue. Dans le virage à gauche, on observe également plusieurs « décrochements ».

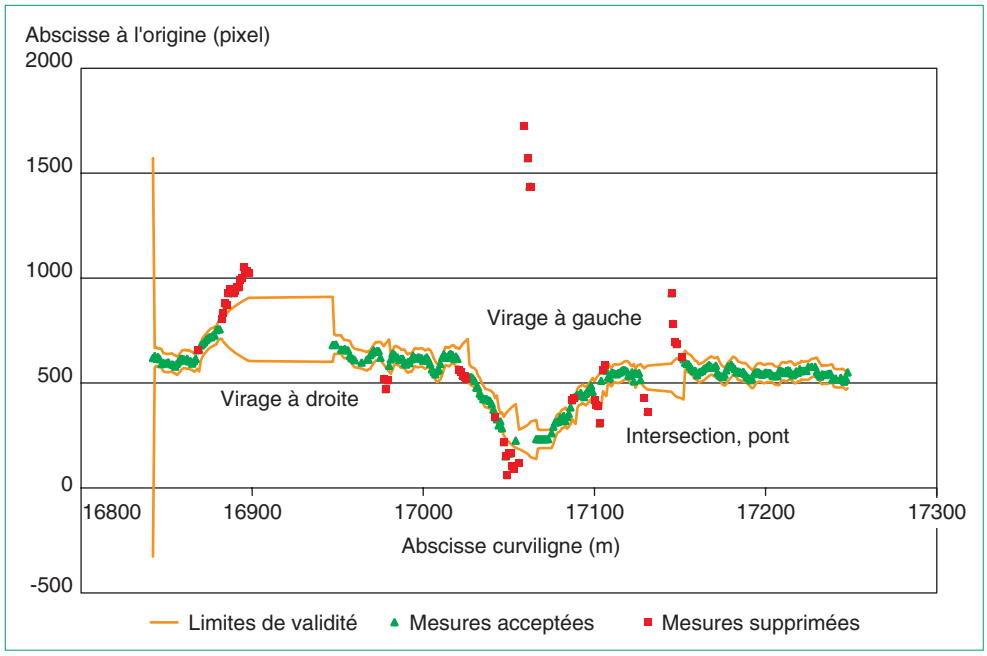



*Fig. 3 - Exemple de filtrage appliqué à l'abscisse à l'origine de la droite de bord, secteur test n° 9. Les mesures refusées sont marquées par un carré rouge.*

Dans le but de valider le principe du suivi, le modèle d'état le plus simple a été mis en œuvre. Il s'agit du modèle à vitesse nulle : le vecteur d'état est considéré comme constant au cours du temps, à un *bruit d'état* près. Même si cela se fait parfois au détriment de mesures en virage, à cause de la simplicité du modèle, on constate que le système parvient bien à éliminer les mesures erronées.

Le paragraphe « Évaluation de l'impact des améliorations » présente une évaluation quantitative systématique de l'impact des améliorations présentées ici sur les dix secteurs test considérés.

## Remarque

La valeur estimée par le filtre n'est pas utilisée en ce qui concerne la mesure. La valeur effectivement écrite dans le fichier résultat est la valeur brute obtenue à partir des segments fournis par l'algorithme de détection.

## Évaluation de l'impact des améliorations

Une série de tests a été menée afin de valider les améliorations apportées au système de mesure de largeur de chaussée : utilisation du modèle sténopé, mesure non horizontale à l'image, élimination des faux-positifs de la détection. Les tests ont été réalisés à partir des images des secteurs de test prises en 1999 par le LRPC d'Angers et numérisées sur cédérom au pas de 1 mètre. On pourra se référer à [6] pour un descriptif détaillé de ces secteurs.

Le tableau I donne les résultats comparatifs, en mesure brute (largeurs moyennes par secteur). La première ligne correspond à la largeur moyenne mesurée sur site à l'aide d'un décamètre. La deuxième rappelle la largeur moyenne mesurée à partir de la vidéo en 1999. La troisième ligne donne les mesures obtenues à l'aide de la nouvelle version du démonstrateur, à partir des images numérisées et archivées sur cédérom. Le tableau II compare les mesures avant et après amélioration du système de mesure, en écart relatif à la mesure manuelle. Les valeurs en vert correspondent aux écarts supérieurs à 5 %.

On observe une nette amélioration sur l'ensemble des secteurs : la différence est la plupart du temps inférieure à 5 %. L'utilisation du modèle sténopé annule l'effet de sous-mesurage des grandes largeurs et de surmesurage des petites, constaté en 1999 [6, 8]. La mesure non horizontale améliore les résultats sur les secteurs sinueux comme le secteur 9. Enfin, la suppression des variations brusques des bords élimine les mesures aberrantes.

En contrepartie, les pourcentages de non-détection sont parfois forts, comme on le constate dans le tableau III, notamment dans des secteurs comportant des virages serrés comme les secteurs 8 et 9. Ceci peut s'expliquer par la simplicité du modèle utilisé pour cette expérience, lequel ne permet pas une prise en compte de ce type de virages et par les pertes de visibilité constatées en virages serrés. D'autres facteurs peuvent aussi intervenir, comme la qualité des bords de chaussée et les conditions de prise de vues. Ainsi, dans le cas du secteur 11, le nombre de détections éliminées s'explique par la présence de nombreux accès riverains [6, 8]. Le secteur 10 cumule de nombreuses zones ombragées et une mauvaise délimitation du revêtement.

Sur cette série de mesures, seules celles effectuées sur le secteur 8 présentent un écart supérieur à 5 % par rapport à la mesure manuelle, ce qui s'explique par :

➢ la présence d'une rigole de terre et de cailloux qui entraîne une mauvaise détection systématique du bord droit : le bord détecté est le bord de cette zone et non pas le bord réel du revêtement, ce qui entraîne une surlargeur systématique. Cette mauvaise détection est régulière sur toute la séquence, et ne peut donc pas être détectée par l'algorithme de suivi ;

**TABLEAU I**

**Comparaison des mesures de largeur sur les dix secteurs test**

| Secteur | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Décamètre | 7,66 | 3,81 | 4,7 | 5,74 | 6,22 | 4,295 | 4,265 | 4,335 | 4,625 | 5,455 |
| Largeur 1999 (m) | 7,27 | 4,02 | 4,65 | 5,69 | 5,96 | 4,55 | 4,67 | 4,66 | 4,73 | 5,37 |
| Largeur 2000 (m) | 7,64 | 3,96 | 4,71 | 5,68 | 6,03 | 4,47 | 4,6 | 4,54 | 4,8 | 5,5 |

**TABLEAU II**

**Comparaison des écarts relatifs à la mesure manuelle**

| Secteur | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Largeur 1999 | – 5,09 % | 5,51 % | – 1,06 % | – 0,87 % | – 4,18 % | 5,94 % | 9,50 % | 7,50 % | 2,27 % | – 1,56 % |
| Largeur 2000 | – 0,26 % | 3,94 % | 0,21 % | – 1,05 % | – 3,05 % | 4,07 % | 7,85 % | 4,73 % | 3,78 % | 0,82 % |

➢ les images qui sont difficiles à traiter sur ce secteur, du fait de la présence d'ombres portées à gauche et d'une légère surexposition à droite, du flou, et des mouvements chahutés du véhicule.

Les résultats obtenus sur ce secteur mettent en évidence l'importance d'un contrôle de la détection par un opérateur, comme cela était d'ailleurs prévu dans le cahier des charges initial [3]. Il s'agit de permettre à celui-ci de forcer la validation d'une mesure ou bien de relancer le programme sur un secteur donné lorsque le suivi s'est mal déroulé.

Bien que le modèle dynamique utilisé par le filtrage de Kalman soit simple, ces expériences montrent que les mesures peuvent notablement être améliorées grâce à une élimination des faux-positifs issus de l'algorithme de détection.

**TABLEAU III**

**Rayon de virage minimal et pourcentages de non-détection par secteur (les rayons sont plafonnés à 500 m pour les lignes droites)**

| Secteur | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rayon de virage minimal (m) | 500 | – 105 | – 90 | 219 | 500 | 226 | – 43 | 45 | 218 | – 415 |
| Non-détections (%) | 9,52 | 5,42 | 28,38 | 3,04 | 1,96 | 2,39 | 20,53 | 36,67 | 21,92 | 44,66 |

## Transformations du logiciel

Afin de préparer le logiciel à sa diffusion au sein du réseau technique, celui-ci a fait l'objet d'une refonte complète en tenant compte des conclusions de l'expérimentation 1999. Le nouveau démonstrateur présente un nouvel aspect (*cf.* encadré 2) et de nouvelles fonctionnalités.

Le logiciel est désormais indépendant de toute carte d'acquisition. Il est compatible avec des séquences d'images numériques répertoriées selon le format MEC. Les fichiers générés sont également au format MEC, ce qui permet d'utiliser pleinement les fonctionnalités du logiciel SEMI pour l'exploitation des mesures.

Les possibilités d'interaction avec l'utilisateur ont été renforcées. Des fonctionnalités de contrôle visuel *a posteriori* ont été ajoutées, en particulier par utilisation d'une courbe active. Celle-ci permet d'identifier rapidement les points singuliers sur un itinéraire. Il est également possible de reprendre la mesure sur une partie d'itinéraire, si nécessaire.

Certaines fonctions sont encore en cours d'implantation et quelques corrections et tests restent à effectuer. Par ailleurs, la grande taille des images issues du matériel IRCAN obligera à une modification de l'interface (affichage en demi-résolution, notamment). La documentation en ligne et sous forme de manuel imprimé sont en cours de rédaction. Ces modifications devraient permettre d'envisager rapidement la qualification informatique du démonstrateur.

## Perspectives

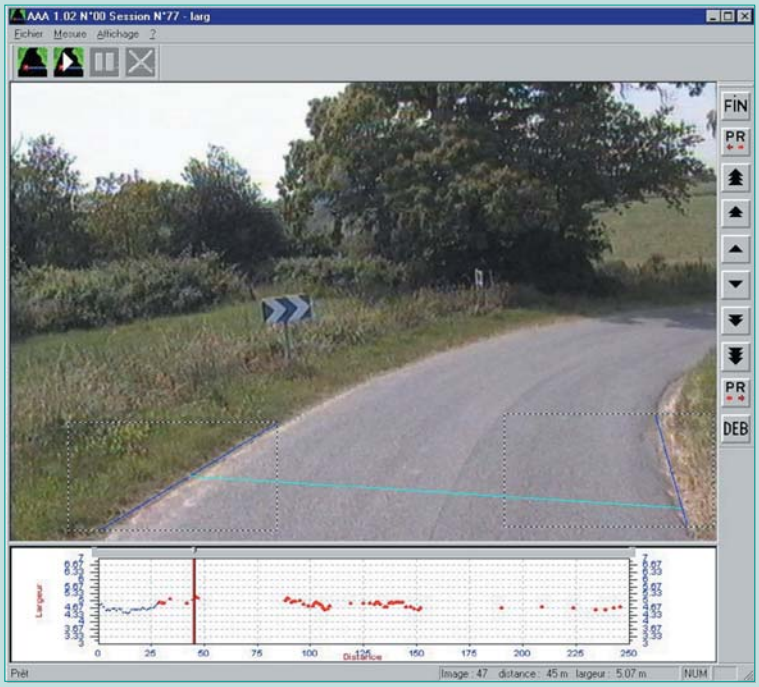
### Application pratique par les LRPC

L'application de l'outil de mesure semi-automatique de largeur de chaussée nécessite le calibrage préalable des paramètres du modèle sténopé. Dans le cadre de nos recherches, nous avons développé plusieurs outils de calibrage [15, 8, 16, 17, 18]. D'une manière pratique, l'opération est actuellement effectuée par le LRPC de Strasbourg ou l'équipe « traitement d'images » du LCPC à Nantes. Les procédures utilisent des mires simples (fig. 4) pouvant être réalisées par les LRPC ; on pourrait envisager à court terme la mise à disposition d'un logiciel de calibrage.

## ENCADRÉ 2
## Description de l'interface utilisateur du logiciel

L'interface utilisateur comprend, outre le menu général de l'application :

- une barre d'outils donnant accès aux fonctions de mesure ;
- une fenêtre permettant l'affichage des images et des mesures en superposition ;
- une barre d'outils, semblable à celle du logiciel d'exploitation IRCAN, permettant de se déplacer dans la séquence d'images ;
- un graphique présentant les mesures au fur et à mesure de leur réalisation. En fin de session, il permet également la relecture des mesures effectuées. Cette notion de courbe active reprend un besoin exprimé dans le cahier des charges établi en 1997 par A Poumarat et P. Lambert [3] : l'opérateur doit pouvoir être sollicité pour un contrôle visuel et d'éventuelles corrections dans les cas difficiles. L'utilisateur peut ainsi revisionner aisément les tronçons qui l'intéressent : il lui suffit d'utiliser le curseur de la courbe active (ou la roulette de la souris) pour visualiser une image quelconque de la séquence, ainsi que la mesure associée. Il a alors la possibilité de valider ou d'invalider la mesure. Il peut également réinitialiser et relancer la mesure à partir du point courant.



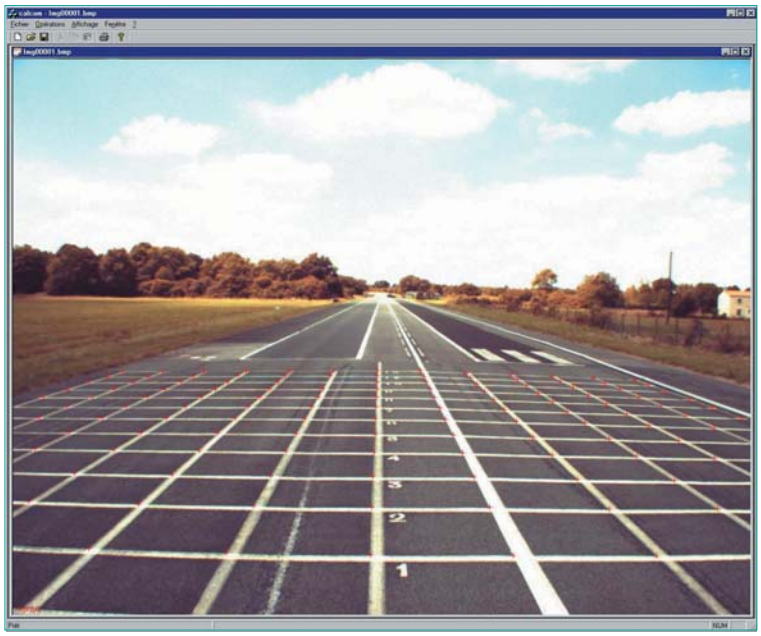



*Fig. 4 - Interface du logiciel de calibrage « calcam », image de la grille de calibrage du LCPC de Nantes, acquise par le prototype IRCAN du LRPC de Bordeaux.*

## Recherches en cours

Plusieurs aspects du système de mesure font l'objet d'études qui pourraient déboucher, à moyen terme, sur des améliorations du logiciel.

L'amélioration des modèles mis en œuvre dans la procédure de suivi et d'élimination des détections erronées fait l'objet d'un stage ingénieur au LCPC. L'utilisation d'un modèle simple, à vitesse nulle, a montré l'intérêt d'une telle procédure. Les travaux du stage portent sur l'utilisation de modèles plus élaborés permettant une meilleure gestion des virages serrés, ainsi que sur le réglage des paramètres de l'algorithme. Par ailleurs, la procédure de filtrage elle-même fait l'objet d'une collaboration avec le Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs (LIVIC) qui étudie ce type d'outils pour les applications d'aide à la conduite. L'algorithme présenté ici est en réalité un exemple simple de filtrage de Kalman robuste, dont nous proposons une étude plus générale dans [19].

Outre l'amélioration du système de détection, une seconde piste de recherche concerne l'amélioration de la mesure de largeur. Le système actuel a en effet recours à une hypothèse classique pour les systèmes mono-caméra, l'hypothèse du « monde plan ». Celle-ci consiste à supposer que la chaussée est comprise dans un plan dont l'équation est déterminée au moment du calibrage. Cela n'est pas toujours vérifié dans la réalité, à cause des mouvements du véhicule et du profil longitudinal de la route, ce qui peut engendrer des erreurs de mesure. D'une manière simple, on limite cet effet en effectuant la mesure au plus près du véhicule. Une autre solution consiste à utiliser deux caméras pour établir par stéréovision le profil longitudinal de la chaussée afin de prendre en compte les variations du plan de référence. Enfin, il est envisagé de s'affranchir complètement de l'hypothèse « monde plan ». Il s'agit alors de mettre à profit l'information 3D obtenue à l'aide des deux images issue du système de prise de vues pour obtenir l'équation des bords de chaussée dans l'espace. Le marquage central, lorsqu'il est présent, permettrait d'approcher la forme « en toit » de la chaussée.

## Détection des mesures en virage

Le filtrage récursif des détections n'est pour l'instant utilisé que pour assurer la validité des bords détectés. Une autre application est cependant envisageable. Une fois éliminées les mesures erronées, il devient possible d'utiliser les paramètres des droites, lissés temporellement par l'algorithme, pour calculer la position du point de fuite des bords de la chaussée. Or, il est facile de montrer que la position latérale de ce point de fuite sur la ligne d'horizon dépend de l'orientation de la chaussée [20]. Cela permet une détection des virages, comme proposé dans [6]. Il est alors envisageable de « marquer » les mesures selon qu'elles sont prises ou non en virage, ce qui ouvre des perspectives nouvelles pour l'exploitation des mesures. Afin d'illustrer cette idée, nous avons comparé des mesures effectuées à l'aide d'un gyromètre avec celles de la position du point de fuite sur la ligne d'horizon. Les résultats sont montrés sur la figure 5. Les mesures au gyromètre ont été effectuées par le LRPC de Nancy, dans le département de l'Aube, sur une section de 5 km. Elles ont été réalisées en même temps que les prises de vues utilisées.

Un facteur d'échelle arbitraire a été appliqué en ordonnées de façon à mettre en correspondance visuelle les deux courbes. Le décalage croissant en abscisse provient du fait que les mesures au gyromètre sont fournies après recalage dans un bornage de référence, contrairement aux mesures issues des images.

Étant donnée la sévérité du filtre utilisé, très peu de mesures sont conservées en virage. Quand c'est le cas, cependant, on voit que les courbes sont proches. Ce résultat est à confirmer, mais paraît plutôt encourageant.

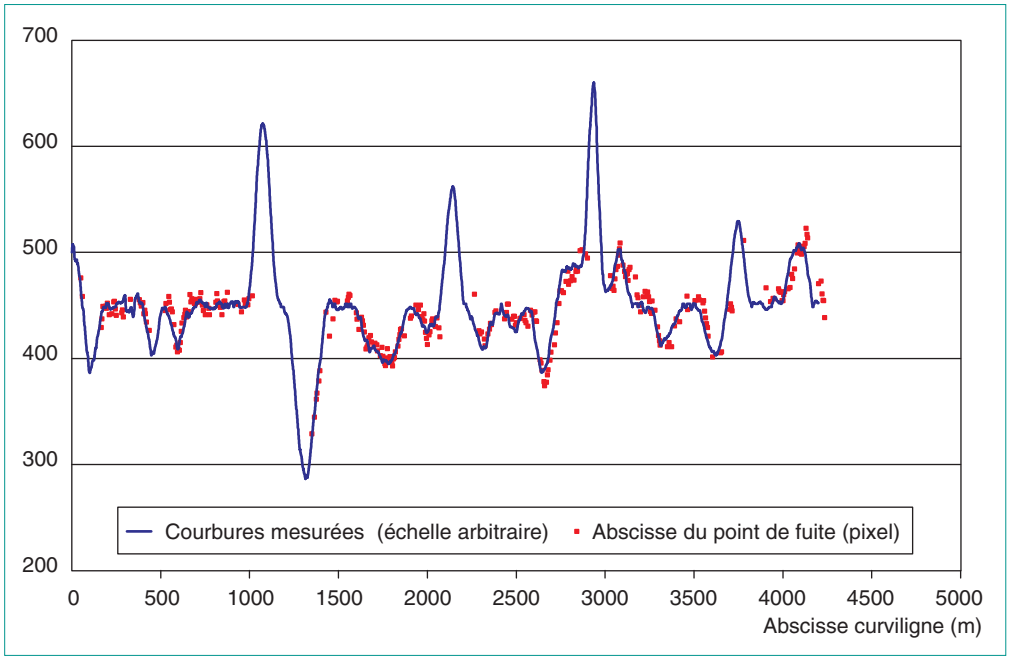



*Fig. 5 - Comparaison entre des mesures de courbure acquises par un gyromètre et la position du point de fuite sur la ligne d'horizon.*

## Conclusion

Dans ce document ont été présentées les transformations apportées au logiciel à la suite de l'expérimentation de 1999 :

➢ la modification de l'algorithme de mesure et l'implantation d'un suivi temporel des bords de chaussée, permettant d'éliminer les mesures erronées, ont permis d'améliorer les performances du système. Les premiers résultats, obtenus avec un modèle simple, sont encourageants : l'écart à la mesure manuelle est inférieur à 5 % sur la plupart des secteurs test de 1999 ;

➢ le logiciel a été transformé conformément aux vœux des utilisateurs pour prendre en compte les séquences d'images au format MEC issues du matériel LPC d'acquisition d'images numériques, IRCAN. Cette version a été présentée aux membres du groupe prototype IRCAN, en mai 2001. Elle est d'ores et déjà à la disposition des LRPC souhaitant l'évaluer.

Il semble désormais possible d'aller vers une démarche de qualification du logiciel sous forme de logiciel des LPC.

En parallèle, d'autres améliorations du système font l'objet d'études, dont les grandes lignes ont été tracées au paragraphe « Perspectives ». Leurs résultats pourraient être inclus dans une version ultérieure du programme.

## ANNEXE
## Algorithme de suivi des attributs de bords de chaussée

### Filtre de Kalman à vitesse nulle

Le filtre de Kalman est fondé sur deux modèles : un modèle décrivant la variation temporelle de l'état du système et un modèle liant la mesure effectuée à l'état du système. En ce qui concerne la dynamique du système, on a choisi, dans un premier temps, le modèle le plus simple : le filtre à vitesse nulle, que nous décrivons ici.

L'état du système est donné par la variable *x* représentant ici, soit la pente, soit l'abscisse à l'origine de la droite d'approximation du bord. On suppose que la variable ne varie pas au cours du temps, à un bruit près :

$$x^{t+1} = x^t + N(0,\sigma_s)$$

Ce *bruit d'état* inclut les variations dues au tracé de la route (virages, défauts de parallélisme), ainsi que celles dues à la trajectoire du véhicule relativement aux bords de la chaussée.

La mesure consiste à observer une réalisation dégradée par un *bruit d'observation* ou *bruit de mesure* de la variable d'état *x*. Réalisation que l'on notera *y* :

$$y^{t+1} = x^t + N(0,\sigma_o)$$

Les bruits considérés sont blancs, gaussiens, indépendants et identiquement distribués, à moyenne nulle. Ils doivent vérifier les hypothèses d'indépendance classiques du filtrage de Kalman [11].

On indice par *p* les valeurs prédites et par *e* les valeurs estimées des variables. La variable *G* est le gain du filtre de Kalman. Les trois étapes de l'algorithme sont les suivantes.

*Prédiction*

$$\begin{cases} x_p^{t+1} = x_e^t \\ (\sigma_p^{t+1})^2 = (\sigma_e^t)^2 + \sigma_s^2 \end{cases}$$

*Observation*

$$y^{t+1}$$

*Estimation*

$$\begin{cases} G^{k+1} = \dfrac{(\sigma_p^{t+1})^2}{(\sigma_p^{t+1})^2 + \sigma_o^2} \\ x_e^{t+1} = x_p^{t+1} + G^{k+1}(y - x_p^{t+1}) \\ (\sigma_e^{t+1})^2 = (1 - G^{k+1})(\sigma_p^{t+1})^2 \end{cases}$$

Il faut noter que, dans le cas du modèle à vitesse nulle, on se ramène à un algorithme de type moindres-carrés récursif [21, page 131]. Ces équations sont données ici dans le cas scalaire (le vecteur d'état ne contient qu'un paramètre, qui représente la pente ou l'abscisse à l'origine d'un segment), mais se généralisent à plusieurs dimensions.

[1] CHARBONNIER P., NICOLLE Ph., *Mesure semi-automatique de largeur de chaussée par analyse d'images couleurs*, Rapport d'étude, avril **1998**.

[2] CHARBONNIER P., NICOLLE Ph., GUILLARD Y., CHARRIER J., Road boundaries detection using color saturation, *Actes de la conférence EUSIPCO 98*, Rhodes (Grèce), 8-11 septembre **1998**, pp. 2553-2556.

[3] POUMARAT A., LAMBERT P., *Cahier de charges mesure automatique de largeurs de chaussée par traitement automatique d'images couleurs*, Rapport d'étude, janvier **1998**.

[4] NICOLLE Ph., CHARBONNIER P., *Mesure semi-automatique de largeur de chaussée : compte-rendu 1998*, Rapport d'étude, août **1999**.

[5] POUMARAT A., LAMBERT P., *Mesures semi-automatiques de largeurs de chaussées, Expérimentation du logiciel sur routes départementales de troisième catégorie du département de l'Allier*, Rapport d'étude, août **1999**.

[6] CHARBONNIER P., NICOLLE Ph., BONTE R., MUCHEMBLED A., BOUTREUX P., BEUNARDEAU C., *Évaluation du logiciel de mesure de largeur de chaussées par vidéo : compte-rendu de l'expérimentation de juin 1999*, Rapport d'étude, mai **2000**.

[7] HORAUD R., MONGA O., *Vision par ordinateur – Outils fondamentaux* – 2e édition revue et augmentée, Traité des Nouvelles Technologies, Série informatique, Hermes, Paris, **1995**.

[8] CHARBONNIER P., NICOLLE Ph., *Vision 3D : compte-rendu des travaux 1999*, Rapport d'étude, juillet **2000.**

[9] Consultation pour l'étude et la réalisation d'un système d'acquisition d'images numériques, *Fiche opération prototype (FOP) n° 600 2999 Système d'acquisition d'images numériques d'environnement de la route*, 30 mars **2000.**

[10] LEPERT Ph., MARTIN J.-M., MEIGNEN D., LEFEBVRE J., L'exploitation des mesures routières, maillon essentiel de la gestion des routes, *14e Congrès mondial de la route IRF*, 11-15 juin **2001,** Paris.

[11] KAY S., *Fundamentals of statistical Signal Processing, Estimation theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, **1993.**

[12] DERICHE R., FAUGERAS O., Tracking line segments, *Image and Vision Computing*, **vol. 8, 1990,** pp. 261-270.

[13] CHAPUIS R., *Suivi de primitives images, application à la conduite automatique sur route*, Thèse de l'université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, janvier **1991.**

[14] CROWLEY J.L., STELMASZYL P., DISCOURS C., Measuring image flow by tracking edge-lines, *Actes de la conférence IEEE CVPR*, San Diego, USA, **1989,** pp. 658-664.

[15] HETZEL C., *Numérisation d'images et mesures*, rapport de stage professionnel ST40, Université technologique de Belfort, Montbéliard, 30 février **2000.**

[16] TSAI R.Y., An Efficient an Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, *in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami Beach, FL, **1986,** pp. 364-374.

[17] TSAI R.Y., A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision technology using off-the-shelf TV camera and lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **3(4), 1987,** pp. 323-344.

[18] ZHANG Z., *A flexible new technique for camera calibration*, Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, décembre **1998.**

[19] IENG S.S., TAREL J.-P., CHARBONNIER P., *Robust Estimation and its application to Lateral Control of a Vehicle by Vision*, Accepté pour publication à European Conference on Computer Vision (ECCV) **2002,** Copenhague.

[20] TAREL J.-P., *Perception des bords de voie par caméra et application au positionnement automatique d'un véhicule*, Rapport de recherche LIVIC LCPC-INRETS, 17 juillet **2001.**

[21] BJÖRK A., *Numerical methods for least squares problems*, SIAM, Philadelphia, USA, **1990.**

## Site WEB

http//www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalmanIntro.html