

# Application des techniques de localisation à la robotique routière

François PEYRET  
Chargé de recherche 1  
Chef de la section Robotique de chantier  
Division Méthodes et matériels de construction  
et d'entretien des routes  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

## RÉSUMÉ

L'article donne d'abord quelques définitions permettant de situer le sujet, puis rappelle les principaux enjeux.

- Dans le domaine de la construction, les systèmes de localisation permettent de fusionner les données provenant respectivement de l'étude, de l'exécution et du contrôle et cette passerelle ouvre la porte à l'industrialisation des chantiers. Les besoins en localisation des engins de construction des routes sont exposés, avec les principes susceptibles de les satisfaire partiellement ou totalement. Une classification de ces principes de localisation est ensuite proposée, puis deux techniques prometteuses pour le domaine concerné sont détaillées : le GPS et les techniques de triangulation optique à trois dimensions.

- Dans le domaine de l'entretien courant, l'article explique pourquoi les solutions en développement font appel aux techniques de vision artificielle plutôt qu'aux techniques utilisées pour la construction.

- La nouvelle station d'étude des systèmes de localisation (SESSYL), récemment mise en place au Laboratoire central des Ponts et Chaussées, est enfin présentée.

**MOTS CLÉS** : 52-61 - Robot - Chantier - Construction routière - Localisation - Équipement - Aide électronique à la conduite - CAO - Entretien - Triangulation - Caméra - Automatisation - Temps réel.

## Présentation

Jean GIROUY

Chef de la division Méthodes et matériels de construction  
et d'entretien des routes  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

*Une information d'ensemble sur l'emploi et les performances réelles des diverses techniques de localisation est bienvenue au moment où la présentation séduisante de certains appareils pourrait laisser penser qu'il existe des solutions « passe-partout ».*

*Les enjeux de la localisation en continu sont considérables en matière de qualité de mise en œuvre et de productivité de chantiers routiers. On ne devrait pas tarder à en constater les premiers effets sur le terrain à condition de savoir sélectionner judicieusement les modes et les procédés adaptés aux applications envisagées.*

*Dans tous les cas, on ne pourra s'affranchir de la réflexion sur le choix et la conservation du référentiel spatial, garant du succès des applications d'un système de localisation et véritable trait d'union entre les acteurs.*

*Un progrès apporté par les techniques modernes de localisation dépasse tous les autres en intérêt : c'est celui de pouvoir donner des informations en temps réel avec un niveau de précision généralement suffisant. La connaissance de la position instantanée offre la possibilité de détecter et de corriger sans délai toute dérive. Le développement de cette fonction constitue un apport majeur à tout système d'aide à la conduite, et ultérieurement d'automatisation.*

*Aujourd'hui, les connaissances acquises sont suffisantes pour envisager l'équipement d'un matériel de chantier dans des cas classiques ; les appareils GPS occupent une place de choix mais nous verrons que d'autres techniques intéressantes ou complémentaires existent.*

*Le LCPC a su orienter ses études suffisamment tôt pour se trouver aujourd'hui associé aux programmes internationaux de recherches et pour disposer à temps d'un banc d'essai des systèmes de localisation opérationnel : SESSYL. C'est un équipement unique dont le carnet de commandes est déjà garni.*

## Qu'entend-on par robotique routière ?

Le terme « robotique » désigne des techniques nouvelles visant, dans un premier temps, à l'assistance à l'opérateur, puis à l'automatisation, enfin à la robotisation (fonctionnement autonome quand il est souhaitable) des machines concernées. Ces machines peuvent être soit existantes (dans la plupart des cas), soit nouvelles quand cela s'avère nécessaire. Les chantiers routiers sur lesquels elles travaillent sont les chantiers de terrassements, les chantiers de construction des couches de chaussées et des équipements de la route ainsi que les chantiers d'entretien (chaussée, équipements, abords).

## Pourquoi la localisation ?

Le terme « localisation », tel qu'il est utilisé dans cet article, doit s'entendre au sens de mesure en temps réel d'un ou de plusieurs paramètres de position d'un engin mobile ou de son outil.

On appelle « paramètre de position » un des six paramètres permettant de définir la position d'un repère mobile par rapport à un repère de référence. Ces six paramètres sont : les trois coordonnées (X, Y, Z) de l'origine du repère mobile et les trois angles d'attitude (lacet, roulis, tangage).

La notion de temps réel signifie que cette information doit être disponible, sous la forme d'un signal, au moment et à l'endroit où le travail est exécuté, et non pas *a posteriori*.

Tout acte de construction fait intervenir la fonction « localisation », à un certain niveau d'exigence et de précision. La raison en est simple : tout ouvrage est un objet tridimensionnel qui doit être construit à une position donnée, en respectant une géométrie imposée par le bureau d'études.

Dans le domaine de la route, une machine de construction est l'analogue d'un outil de machine-outil, façonnant l'environnement comme la fraise

façonne le métal. De même que la fraise, la machine de construction a besoin d'informations de position, le niveau du terrain ou de la couche de chaussée résultant du travail de son outil n'étant pas le même en tout point du chantier.

À partir de cette analogie, il est facile de comprendre que l'enjeu final de la localisation est la possibilité d'utiliser un référentiel commun à tous les intervenants, depuis le bureau d'études jusqu'au bureau de contrôle, en passant par tous les acteurs du chantier.

**La localisation est donc une fonction fondamentale pour les travaux routiers, verrou technologique pour toutes les actions d'automatisation.**

Un opérateur travaillant avec une machine munie d'un système de localisation peut à tout moment se référer à une consigne de travail, établie dans ce référentiel commun. Cette consigne est immatérielle mais pérenne et stable tout au long de la vie du chantier. À partir de cette consigne et de la position réelle de l'outil, toutes sortes de systèmes d'automatisation ou d'aide à la conduite peuvent être imaginées [1]. Les écarts entre consigne et mesure servent d'entrées aux systèmes de commande en temps réel mais peuvent également être enregistrés en tant qu'éléments de contrôle *a posteriori*.

## Les besoins en terrassements et construction des chaussées

Dans ce domaine, nous avons l'habitude de classer les engins en trois grandes familles, qui diffèrent suivant leurs exigences en matière de localisation [2] :

- les engins de terrassement évoluent sur le terrain naturel en manipulant d'importantes quantités de terre, suivant des trajectoires difficiles à programmer à l'avance (buteur, pelle, tombeur, décapeur, niveleuse, etc.),
- les engins de profilage modifient le profil de l'ouvrage en une seule passe par ajout ou enlèvement de matériau, en suivant une trajectoire continue parallèle à l'axe de la route (finisseur, autograde, niveleuse, fraiseuse, etc.),
- les engins de surfacage évoluent sur la surface du terrain ou de l'ouvrage sans en modifier notablement l'altitude, en s'efforçant de respecter une trajectoire constituée d'une succession de traces parallèles (compacteur, épandeur à pulvérisant, malaxeur, etc.).

Suivant les familles, les besoins diffèrent en termes de nombre de paramètres, de précision et de contraintes. L'expression du besoin et les solutions existantes font que les solutions émergentes se présentent sous des formes très variées.

Les engins appartenant aux deux premières familles nécessitent la connaissance d'au moins trois paramètres de position de leur outil, la plupart du temps, quatre sont nécessaires : X, Y, Z et roulis (ou dévers). La différence entre les deux familles provient du mode de travail. Les machines de la troisième famille ne nécessitent que deux paramètres de position : X et Y.

– Les engins de terrassement se déplacent à des vitesses excessivement variables, pouvant aller jusqu'à 20 km/h, suivant des trajectoires le plus souvent imprévisibles et forment de fait une famille plutôt hétéroclite. L'information sur la localisation sera d'abord intégrée dans des systèmes d'aide à la conduite avant de l'être dans des systèmes d'automatisation ou de robotisation. Les précisions requises sont de l'ordre de 10 à 20 cm.

– Les engins de profilage se déplacent à des vitesses faibles, de l'ordre de quelques mètres par minute et effectuent leur travail en une seule passe, suivant une trajectoire parallèle à l'axe de la route. L'automatisation, aussi bien de leur déplacement que de la commande de leur outil, n'est pas difficile à concevoir à partir du moment où les systèmes de localisation utilisés offrent la précision requise (de l'ordre de 1 cm en Z). Le partage des tâches entre l'automatisation et l'aide à la conduite se fera au moins autant en fonction de critères socio-économiques qu'en fonction de critères techniques.

– Les engins de surfacage se déplacent à des vitesses régulières mais cependant relativement élevées (entre 5 et 10 km/h). La non-monotonie de leur trajectoire, composée souvent d'un nombre élevé de passes aller et retour, les rend difficiles à commander automatiquement. Ils sont, comme ceux de la première famille, concernés dans un premier temps par des systèmes d'aide à la conduite.

À titre d'illustration, le fonctionnement d'un système de « Construction de routes assistée par ordinateur » (en anglais « CIRC » : Computer Integrated Road Construction) appliqué à un engin de profilage, utilisant en sortie un interface de type aide à la conduite, est représenté sur la figure 1.

La constitution physique d'un tel système, comprenant des modules matériels et des modules logiciels, est représentée schématiquement sur la figure 2.

Le premier processus sur lequel le concept CIRC a été appliqué est le processus de compactage. Un prototype de système d'aide à la conduite, dénommé « Matériel d'aide à la conduite pour compacteurs » (MACC), a été développé par le Centre d'expérimentations routières depuis 1992 et a fait l'objet d'un dépôt de brevet par le LCPC en août 1995.

Il offre au conducteur un certain nombre d'indications sur un écran embarqué lui permettant de maîtriser parfaitement sa trajectoire (plan de balayage). Un exemple d'affichage est présenté sur la figure 3.

Le système est en cours d'évaluation sur des chantiers expérimentaux, en collaboration avec l'entreprise routière Cochery Bourdin Chaussé.

Dans sa première version, il utilisait un système de localisation Capsy (Capsy est une marque déposée par Spectra-Physics. Son principe est celui d'une triangulation plane effectuée à partir de balises rétro-réfléchissantes codées et d'un faisceau laser tournant.) Le remplacement de Capsy par un système GPS (Global Positioning System) a été récemment réalisé.

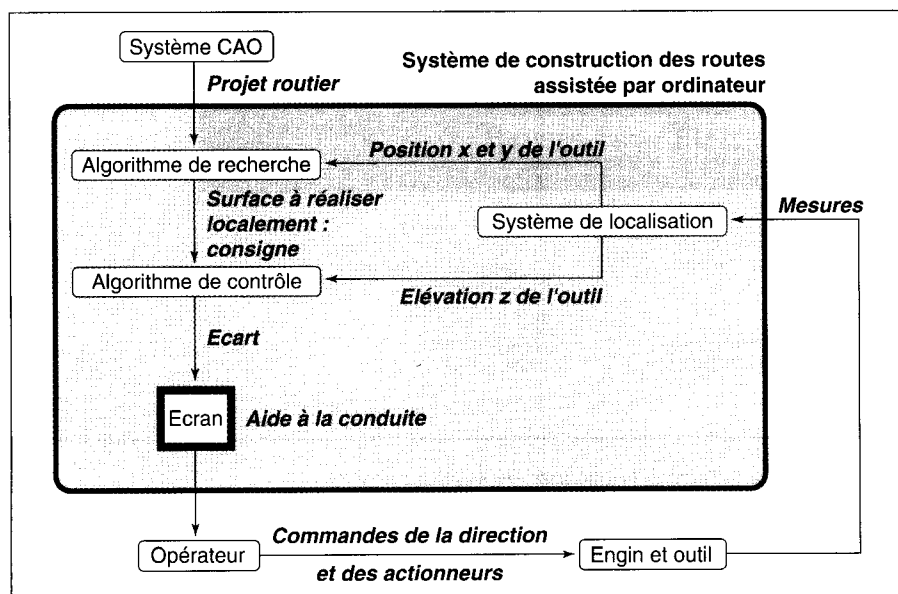


Fig. 1 - Schéma fonctionnel d'un système « CIRC » pour machine de profilage.

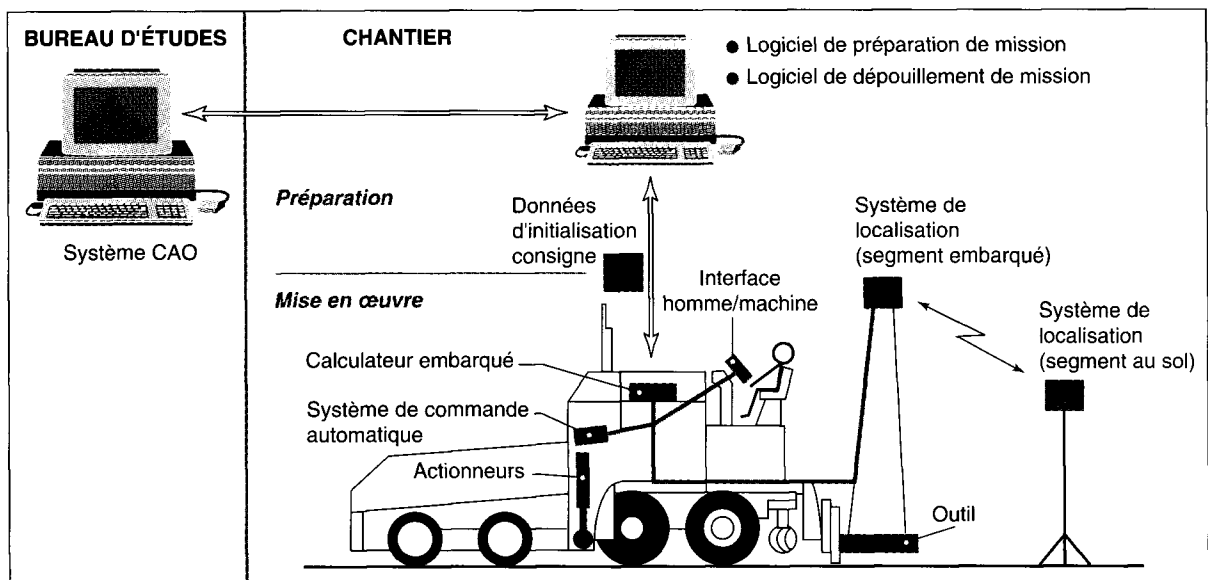


Fig. 2 - Schéma physique d'un système « CIRC » pour machine de profilage.

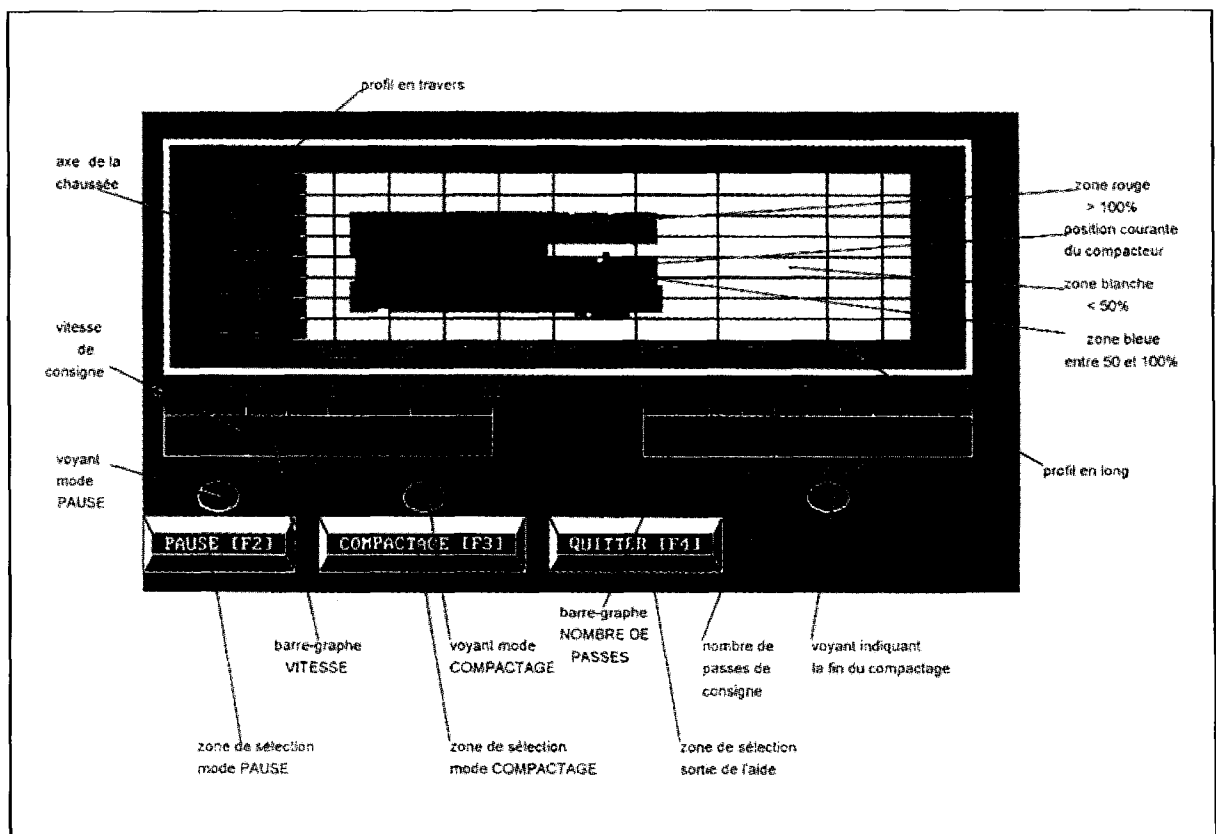


Fig. 3 - L'écran d'aide à la conduite du système MACC.

## Les principes de localisation adaptés à la construction (terrassements et chaussées)

### Localisation à l'estime et localisation absolue

Deux grandes familles de méthodes peuvent être identifiées :

- ① les méthodes de localisation dite « à l'estime », où l'on détermine la position courante par intégration de déplacements orientés successifs depuis la position de départ,
- ② les méthodes de localisation dite « absolue », où l'on détermine la position courante par des mesures utilisant des repères (ou balises), installées sur des positions connues. Ces balises sont généralement situées dans l'environnement proche de l'engin (à des distances de quelques mètres à quelques kilomètres), sauf dans le cas exceptionnel où celles-ci sont des satellites artificiels en orbite autour de la terre (système GPS).

Nous ne détaillerons dans la suite de cet article que les systèmes de localisation absolue, que nous appellerons systèmes « à balises ».

Ceux-ci offrent, en effet, deux avantages décisifs :

- ③ ils sont les seuls à permettre l'établissement d'un repère commun à toutes les tâches, pérenne et accessible en permanence (à partir du moment où le système de balises est entretenu comme il se doit). Nous appellerons cette qualité la « cohérence temporelle » ;
- ④ la dérive en précision des systèmes à l'estime les contraignent à se recalcr à l'aide de systèmes à balises, ce qui rendent ces derniers incontournables.

### Classification des méthodes de localisation par balises

À partir de ce principe général, plusieurs variantes existent et plusieurs technologies peuvent être utilisées.

Les facteurs discriminants sont :

- la nature des balises,
- le type et le nombre de grandeurs géométriques mesurées,
- la nature de l'onde servant de vecteur à la mesure.

#### Nature des balises

Les balises peuvent être actives, semi-actives, ou passives.

- Dans le premier cas, ce sont elles qui émettent l'onde qui est captée par l'équipement de mesure

(par exemple : source lumineuse ou antenne émettrice hyperfréquences).

- Dans le deuxième cas, elles n'émettent pas l'onde mais comportent un capteur actif qui détecte l'onde émise (par exemple : cellule photo-réceptrice).
- Dans le troisième cas, elles ne possèdent aucune source d'énergie propre et ne peuvent que réfléchir une onde provenant de l'équipement de mesure (par exemple : réflecteur optique de type miroir prismatique ou réflecteur radar).

#### Type de paramètres mesurés

Deux types de grandeurs géométriques peuvent être mesurés :

- des distances ; on parle alors de « télémétrie » pour les mesures élémentaires et de « multilatération » pour les calculs de position,
- des angles ; on parle alors de « goniométrie » et de « triangulation ».

Les systèmes télémétriques sont *a priori* mieux adaptés aux grandes étendues de mesure (> 100 m) car leur précision varie peu avec la distance.

Les systèmes goniométriques peuvent être plus précis sur de faibles étendues de mesure (< 100 m) mais l'erreur sur la localisation est proportionnelle à la distance.

Certains systèmes peuvent combiner les deux types de mesure (exemple : les stations totales des géomètres, qui mesurent deux angles et une distance).

Suivant le nombre de paramètres indépendants mesurés, on peut accéder par le calcul à une information de position plus ou moins riche, suivant la règle suivante : la mesure de N paramètres indépendants permet de calculer N degrés de liberté.

#### Nature de l'onde utilisée

Le vecteur support de la mesure peut être de trois types.

- ① Ondes ultrasonores,  $10 \text{ kHz} < f < 300 \text{ kHz}$  suivant les types de capteur. La portée pratique est limitée à 50 m dans le meilleur des cas, à 10 m si l'on veut une précision acceptable. La sensibilité aux conditions climatiques est très importante. Pour ces deux principales raisons, cette technologie paraît mal adaptée à notre problème.

- ② Ondes lumineuses, visibles ou invisibles (infrarouges), en lumière cohérente (laser) ou non cohérente. La portée peut atteindre plusieurs kilomètres. Cette technologie est déjà couramment utilisée en statique sur les chantiers, sous la forme d'appareils de levé et d'implantation.

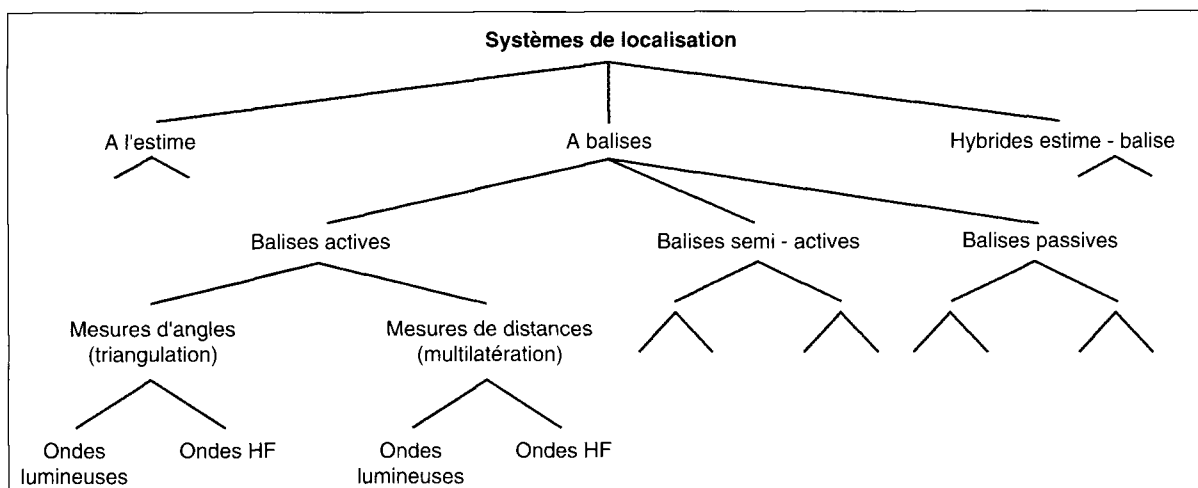


Fig. 4 - L'arbre des méthodes de localisation.

③ Ondes hyperfréquences, généralement centimétriques (quelques GHz). La portée peut être quasi illimitée pour les systèmes à base de satellites mais est de l'ordre de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres pour les systèmes à balises terrestres.

La combinaison des différents facteurs discriminants permet d'envisager de multiples configurations, qui sont pour la plupart réalisables physiquement. Une partie du graphe des combinaisons possibles est schématisé sur la figure 4.

## Le GPS (Global Positioning System)

### Généralités

Parmi les nouvelles techniques de localisation dont on parle beaucoup actuellement, le GPS (Global Positioning System) tient la vedette.

Il s'agit, suivant notre classification, d'un système :

- à balises actives (satellites), dont la position est supposée parfaitement connue à tout instant, ce qui permet de le ranger dans les systèmes à balises à poste fixe,
- de multilatération (mesure de distances),
- à ondes hyperfréquences.

Beaucoup de choses ont été dites et écrites sur ses performances, ce qui entraîne dans l'esprit du lecteur non averti une grande confusion, compte tenu des innombrables configurations et modes d'utilisation qui existent et ne cessent de se développer.

La figure 5 récapitule les principaux modes, leur précision et leur domaine d'application privilégié.

Pour faciliter la lecture, il faut rappeler au préalable que les systèmes GPS [3] :

- utilisent des signaux émis par une flotte de 24 satellites sur orbites circulaires (de rayon égal à 20 200 km) émettant des signaux ultra stables

sur deux fréquences, modulés par deux codes binaires pseudo aléatoires, ainsi que des messages d'information sur leur propre état ;

- effectuent des mesures de distance par rapport à  $n$  satellites ( $n \geq 4$ ) par des techniques de corrélation sur les codes et, éventuellement, des mesures de phase, ces deux types de mesures permettant d'accéder à la position (X, Y, Z) de l'antenne réceptrice, dans un repère ellipsoïdique mondial (WGS 84) ;

- peuvent fonctionner en mode absolu (un seul récepteur) ou en mode différentiel pour améliorer la précision (dans ce cas, c'est un vecteur tridimensionnel entre la station de référence et la station mobile qui est calculé) ;

- peuvent être utilisés en temps réel ou en temps différé (calculs en post-traitement).

### L'utilisation du GPS en localisation/guidage d'engins de chantier

Les modes qui nous intéressent sont ceux qui peuvent fonctionner en temps réel et qui fournissent une précision centimétrique (profilage) ou décimétrique (surfaçage). Ceux-ci correspondent à l'utilisation en temps réel des modes « différentiel, phase porteuse » situés dans le quadrant inférieur gauche de la figure. Ces systèmes s'intitulent « RTK » pour « Real Time Kinematic ».

Ces modes d'utilisation font actuellement l'objet d'importants travaux de recherche et développement chez les principaux industriels du domaine (Ashtech, Sercel, Leica, Trimble, Geotronics...) et les premiers produits datent de 1994.

La mise en œuvre d'un système de ce type nécessite la configuration suivante :

- un récepteur de référence à poste fixe, communiquant par voie hertzienne ses mesures de phase au récepteur mobile,
- un récepteur mobile installé sur le point à localiser, relié à un microcalculateur chargé d'effectuer les traitements temps réel.

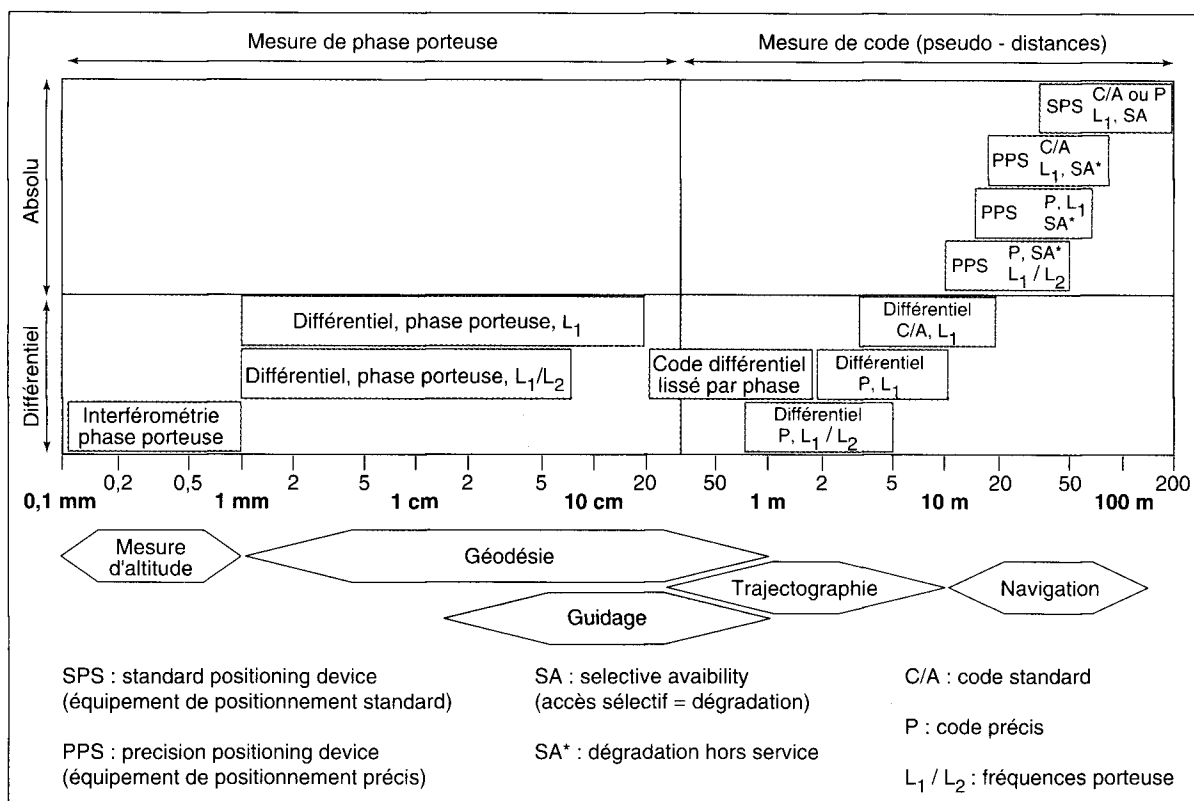


Fig. 5 - Modes d'utilisation et domaines d'application du GPS (source SAGEM).

Le problème technique majeur à résoudre dans ce mode d'utilisation est le levé des ambiguïtés de phase et les procédures de recalage en cas de perte momentanée des signaux (il faut recevoir en permanence au moins cinq satellites). Les meilleurs systèmes actuels nécessitent en moyenne deux minutes avant de retrouver « au vol » la pleine précision des mesures en cas de masquage total des satellites. Ceci imposera la mise en place de systèmes « relais » lors du franchissement des ouvrages d'art par exemple.

De plus, pour les travaux précis de type répannage des couches de surface, la précision centimétrique actuelle (écart type - suivant les produits - de 5 à 30 mm en X, Y et Z) peut ne pas être suffisante pour le contrôle de l'altitude.

Ces deux raisons font qu'il reste encore de la place pour d'autres catégories de techniques, telles que celles qui font l'objet du chapitre suivant.

## Les systèmes de triangulation optique à trois dimensions

### Principe

La différence par rapport à la triangulation classique à deux dimensions tient au fait que l'appareil de mesure et les points visés (à partir des-

quels les angles seront mesurés) n'appartiennent pas à un même plan.

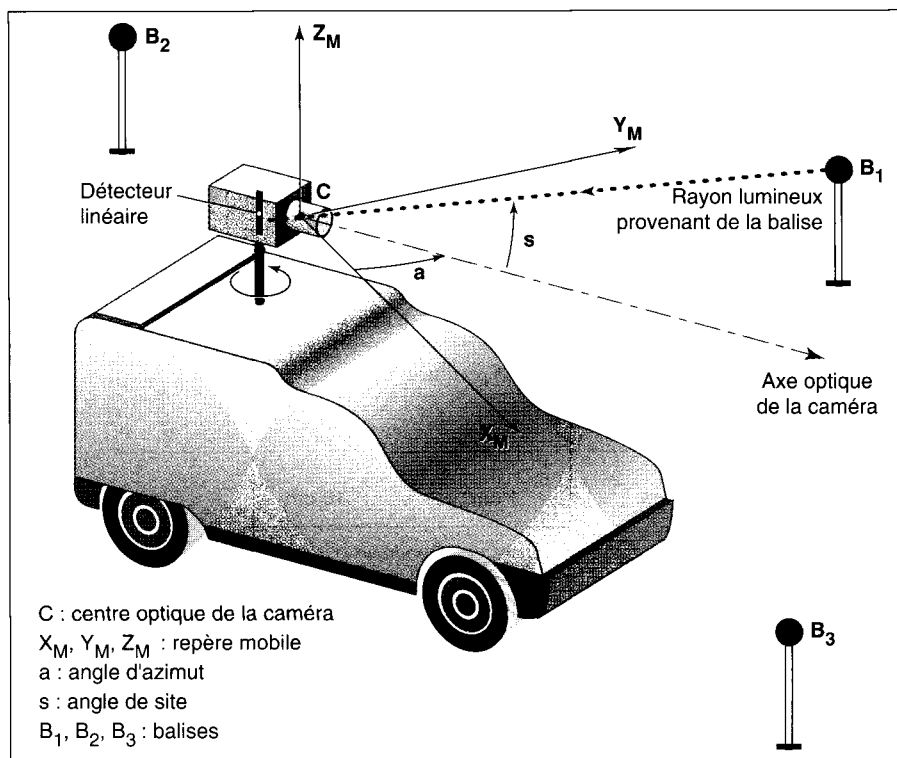
Il est donc nécessaire, pour pouvoir effectuer les calculs nécessaires, de tenir compte de cette différence de niveau et de mesurer, à chaque lecture de balise, l'angle de hauteur (ou de site) suivant lequel la balise est vue, en plus de l'angle d'azimut (ou de gisement).

Les systèmes qui relèvent de ce principe sont donc nettement plus complexes que les systèmes à deux dimensions, tant au plan des mesures elles mêmes, que des calculs. Les équations à résoudre ne sont plus des simples calculs d'intersection de cercles, mais des systèmes d'équations non linéaires dont la résolution nécessite des précautions pour assurer une bonne convergence. La méthode de résolution peut être déterministe ou stochastique, c'est-à-dire faisant appel à des méthodes de filtrage statistique de type filtrage de Kalman.

Ce principe peut être appliqué de multiples façons, suivant la configuration de l'application et les paramètres recherchés. Les balises peuvent être sur le mobile ou à poste fixe, elles peuvent être actives, semi-actives ou passives. Il faut généralement utiliser les mesures effectuées à partir de trois balises pour calculer un point.

La triangulation à trois dimensions est illustrée sur la figure 6 par le schéma de principe du système Sirem, qui est brièvement décrit ci-après.

Fig. 6 -  
Principe géométrique  
du système Sirem.



## Les systèmes existants et en développement

Trois systèmes, conçus pour des applications de type BTP, méritent d'être cités ici. Ils proviennent de recherches sur le sujet menées en parallèle dans différents pays : la France, la Russie et l'Angleterre.

### Le système Sirem

Sirem signifie « Système intégré de repérage d'engins mobiles ». Il a été conçu par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées dans le but d'apporter une solution au problème de localisation temps réel des engins de profilage. Il permet de connaître les six degrés de liberté du mobile sur lequel il est installé par rapport à un repère de référence [4]. Sirem utilise une caméra CCD linéaire tournante comme détecteur et des lampes halogènes comme balises. Sa portée est de l'ordre de 30 m. Le prototype, développé en collaboration entre le LCPC, Jean Lefebvre, le Ministère de la recherche et l'École centrale de Nantes, est actuellement en service dans le laboratoire de robotique de cette dernière. La précision en Z permet de descendre en dessous du seuil des 10 mm.

### Le système Russe

Il s'agit d'un petit frère oriental de Sirem, développé à la même époque dans le laboratoire NPO « VNIIshtormash » de Moscou par l'équipe du Professeur Malinovsky [5]. L'élément sensible est une cellule photo-réceptrice recevant la

lumière réfléchie par des balises passives (prismes). L'illumination est effectuée par deux plans laser tournant avec la cellule, l'un vertical, l'autre incliné d'un angle connu. Les précisions annoncées sont meilleures que celles de Sirem (1,5 mm en Z à 30 m), à la cadence de 10 Hz. Une version avec des balises semi-actives (cellules) et liaison radio existe également.

### Le système Anglais Lasertrac

Ce système a été développé par une équipe anglaise de l'Université de l'Est de Londres à Dagenham, spécifiquement pour l'aide à la conduite ou le guidage des machines de génie civil et des tunneliers [6]. Son principe de fonctionnement et la technologie utilisée le rendent extrêmement voisin du système Russe. Les angles sont également mesurés à partir de deux plans laser tournant (précision annoncée :  $5 \cdot 10^{-6}$  rad) et les balises peuvent être également semi-actives (cellules) ou passives (prismes). La cadence de mesure est de 1 Hz. Son utilisation a été prévue dans différents modes : les balises pouvant être à poste fixe (Lasertrac) ou installées sur le mobile à guider (Laserguide).

## Le domaine de l'entretien des routes

### Contexte des travaux

Les travaux d'entretien entrent dans deux catégories : l'entretien structurel et l'entretien courant.

- L'entretien structurel s'appelle aussi renforcement. Il met en jeu la reconstruction d'une ou de plusieurs couches de la chaussée. Les méthodes employées, localisation comprise, relèvent des méthodes utilisées en construction neuve.

- L'entretien courant met en jeu des travaux répétitifs, plus légers, visant à maintenir à un certain niveau de service : la surface de la route (d'un point de vue étanchéité, adhérence, signalisation horizontale...), ses équipements (glissières, panneaux de signalisation verticale...) et ses abords (terre-pleins, rives, fossés...).

Les travaux de peinture (essentiellement repassage) et de fauchage sont les activités les plus consommatrices de temps de personnel dans les centres d'entretien.

Une troisième tâche importante, non directement productive mais essentielle à tous les travaux sous circulation, est la tâche de signalisation des chantiers. Cette signalisation est de plus en plus souvent mobile (véhicule suiveur de type « Flèche lumineuse de rabattement »). La signalisation traditionnelle par cônes tend à disparaître quand elle n'est pas indispensable, pour des raisons évidentes de sécurité.

Ces travaux ne sont généralement pas exécutés par les entreprises de travaux qui construisent la route. Bien que financés par le même gestionnaire (maître d'ouvrage), ils sont gérés par des services différents à des périodes totalement déconnectées des périodes d'exécution de l'ouvrage neuf.

Pour ces raisons, les systèmes de repérage en abscisse curviligne utilisés au moment de la construction (profils) et ceux qui servent aux équipes d'entretien (points de repère kilométriques ou PR) sont totalement différents.

Les repères qui matérialisaient l'axe ou les rives pendant la construction ont disparu et seuls les bords de la route elle-même, ou ses équipements (glissières) permettent de se repérer transversalement.

La troisième dimension Z, associée à la notion de niveau ou d'épaisseur, n'a plus lieu d'être.

Le projet élaboré par le bureau d'études pour la construction, dans la plupart des cas, n'existe pas ou n'existe plus. Quand il existe, rien ne garantit qu'il est conforme à la réalité.

Dans ces conditions, le principe de passerelle numérique entre le bureau d'études et le chantier de construction (concept « CIRC ») semble pour l'instant difficile à prolonger jusqu'aux chantiers d'entretien.

### Les techniques de localisation relative par vision

N'ayant pas la possibilité (et souvent pas la nécessité) de disposer de consignes et de l'infor-

mation « localisation » dans un repère absolu, les machines d'entretien travaillent essentiellement de façon relative sur la chaussée.

Dans ces conditions, les technologies de localisation qui, pour le moment, s'avèrent les plus intéressantes font largement appel à la vision artificielle.

Les principaux besoins des tâches d'entretien citées ci-dessus sont :

- le positionnement sur les bandes de peinture usagées (pour les travaux de repassage des peintures),

- le positionnement par rapport aux bords de chaussée (pour les premiers marquages horizontaux, éventuellement le guidage latéral de toutes les machines, véhicules de signalisation mobile y compris).

### Le repassage des bandes de peinture

Le premier besoin semble relativement simple à satisfaire à partir d'un système utilisant une caméra à barrette CCD installée sur le chariot portant le pistolet à peinture de l'engin d'application et visant la surface de la route à courte portée (de l'ordre de 1 m).

Un projet est actuellement en cours sur ce sujet. Il s'intitule « Module de repassage automatique » (MRA) et est mené en partenariat entre des services départementaux de l'Équipement, le LCPC, des CETE et un industriel du marquage routier.

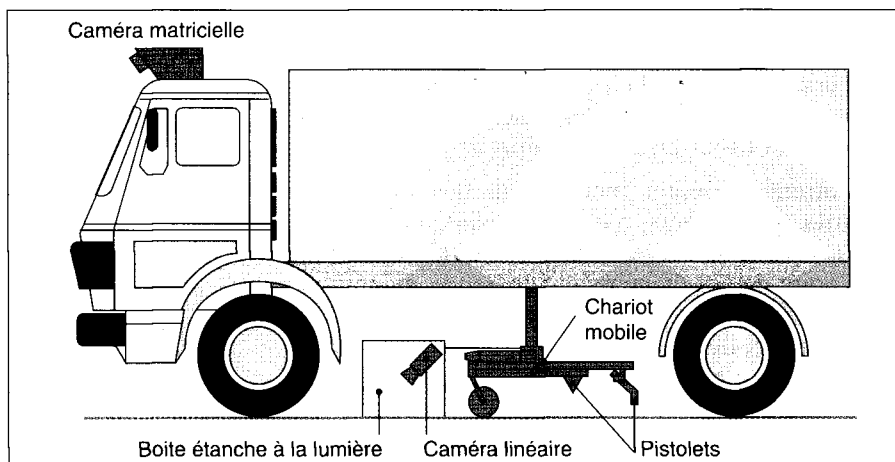
Le module, destiné à s'intégrer sur certains équipements de marquage existants, permet de positionner précisément l'outil de peinture sur la bande à repasser et de le déclencher automatiquement. Le prototype est actuellement en cours de mise au point.

Une étude d'automatisation plus poussée a été lancée sous la forme d'une thèse à l'Université de Strasbourg. L'objectif est de reconnaître la chaussée et les marquages se présentant devant la machine pour préparer automatiquement la configuration des outils et des automatismes. Cette étude s'appuie sur l'utilisation d'une autre caméra CCD, cette fois matricielle et couleur, visant à une distance de l'ordre de 50 m devant le camion.

La figure 7 représente schématiquement un module de repassage automatique monté sur un camion d'application.

Le chariot mobile (1) portant les pistolets (2) est commandé automatiquement à partir des mesures effectuées par la caméra linéaire (3) située dans une boîte étanche à la lumière (4). La caméra matricielle (5) placée sur la cabine du camion est destinée à la deuxième phase d'automatisation à l'étude (reconnaissance des marquages).

Fig. 7 -  
Schéma du module de  
repassage automatique  
monté sur un camion  
d'application.



### La détection des bords de route

Dans le contexte de l'automatisation des engins, la détection des bords de la route est une étape préliminaire à la localisation de l'engin et à son guidage sur cette même route.

D'innombrables travaux de recherche ont été déjà menés sur ce sujet, en Europe, aux États-Unis, au Japon, dans le but généralement de l'aide à la conduite sur automobile. La plupart de ces travaux s'appuient sur des algorithmes de traitement d'images utilisant les bandes de peinture, supposées en bon état.

Dans notre contexte, cette fonction peut être nécessaire soit sur un engin d'entretien évoluant sur une chaussée non marquée, soit sur un engin de repassage circulant (de façon logique) sur une chaussée avec un marquage dégradé. Par conséquent, le LCPC, qui a lancé en 1993 des travaux de recherche sur le sujet, a décidé de porter une attention particulière aux méthodes de détection des bords de chaussées dites « non structurées », c'est-à-dire sans signalisation horizontale.

Pour cela, la section « Image » du LCPC, dans le cadre du thème de recherche « Robotique de chantier », a étudié différentes méthodes. Celles qui semblent les plus prometteuses sont les méthodes de « segmentation chromatique », qui visent à séparer les pixels de l'image en différentes classes, dont une classe « route ».

Ces études sont menées en collaboration avec l'entreprise ITMI APTOR, qui possède une solide expérience du domaine, suite à des travaux menés pour le compte du Ministère de la Défense.

Actuellement, différentes méthodes, proposées par ITMI APTOR, sont en cours d'évaluation au LCPC Nantes. Celle qui semble donner les meil-

leurs résultats et une méthode baptisée NEWS-CARF, amélioration de l'algorithme SCARF qui a été développé à l'origine à l'Université Carnegie Mellon aux États-Unis. Il s'agit d'une méthode de type « classement optimal paramétrique avec apprentissage ».

La figure 8 donne un exemple de segmentation chromatique sur une image de route. On notera que, dans ce cas, l'algorithme a réalisé correctement son travail.

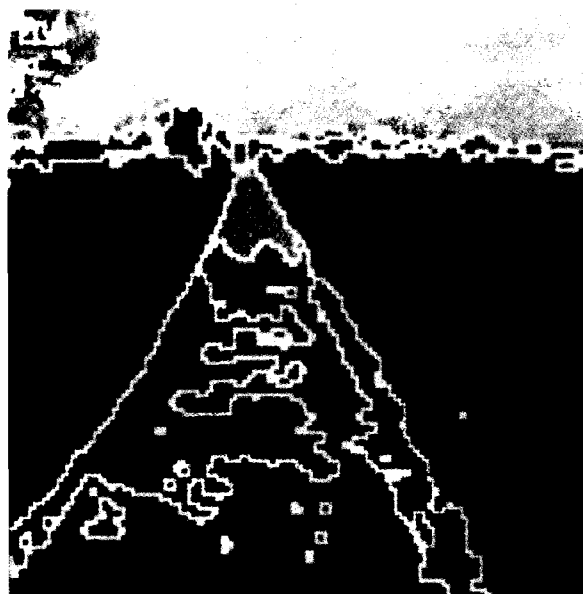


Fig. 8 - Segmentation chromatique d'une scène routière.

Ces méthodes purement chromatiques ne sont pas encore suffisamment robustes dans certains cas (ombres portées en particulier). Nos travaux portent actuellement sur l'amélioration des algorithmes de segmentation par prise en compte des attributs de texture en plus des attributs de couleur.

## L'évaluation des systèmes de localisation : SESSYL

Après avoir choisi de jouer un rôle décisif dans le développement d'outils de localisation adaptés aux travaux routiers, le LCPC a décidé fin 1992 de se doter d'un banc d'essai et d'études spécialisé.

Ce banc s'intitule SESSYL (Station d'étude des systèmes de localisation) et est situé à Nantes. Il est sans équivalent connu.

Il se compose d'une piste bouclée de dimensions hors tout 81 m × 16 m, constituée d'un monorail métallique fixé sur un muret en béton et d'un chariot mobile circulant sur la piste.

Toutes les précautions ont été prises pour garantir la stabilité géométrique du rail au cours du temps et suivant les conditions climatiques.

Le chariot comporte sur sa partie supérieure une plate-forme mobile en altitude, roulis et tangage, permettant ainsi de faire décrire à tout système de localisation embarqué une trajectoire dans l'espace en sollicitant les six degrés de liberté du système par rapport à un repère de référence. Ce repère de référence peut être soit local, soit national (projection Lambert + NGF), soit mondial (par exemple WGS 84 pour les essais des récepteurs GPS).

Tous les degrés de liberté sont programmables et différentes trajectoires d'essais peuvent être enchaînées, la commande des actionneurs et l'acquisition de toutes les mesures étant entièrement automatiques.

Les courses et les précisions disponibles sont indiquées dans le tableau I.

TABLEAU I  
Les courses et les précisions de SESSYL

Degré de liberté	Course	Précision
X	81 cm	$< \pm 1 \text{ cm}$
Y	16 m	$< \pm 1 \text{ cm}$
Z	300 mm	$< \pm 2 \text{ mm}$
lacet	360 °	$< \pm 1 ^\circ$
roulis	$\pm 6 ^\circ$	$< \pm 0,05 ^\circ$
tangage	$\pm 6 ^\circ$	$< \pm 0,05 ^\circ$

Deux gammes de vitesse de déplacement du chariot mobile sont disponibles :

- une gamme correspondant aux vitesses des engins de profilage : de 0 à 1 km/h,
- une gamme correspondant aux vitesses des engins de terrassement, de surfacage et d'entretien : de 1 à 20 km/h.

La masse embarquable peut être de 25 kg au maximum, la masse du chariot lui-même étant de l'ordre de 450 kg.

Pour l'instant, SESSYL a mené cinq campagnes d'essai : une campagne sur un système GPS en mode cinématique temps différé et quatre sur des systèmes GPS en mode cinématique temps réel (RTK). La station est en phase opérationnelle depuis le début de 1996.

## Conclusion

Un tournant fondamental s'amorce dans le milieu de la construction BTP, avec la récente arrivée sur le marché de systèmes de localisation en temps réel.

Ces systèmes constituent la passerelle qui fait défaut sur les chantiers actuels entre les phases d'études, très informatisées, et le chantier lui-même où toutes les données numériques disponibles se trouvent réduites à l'état de piquets en bois.

Ils permettent d'envisager des méthodes de travail nouvelles, plus rapides et plus précises, et ouvrent la voie vers une automatisation intelligente des engins.

L'offre en matière de systèmes de localisation se précise en fonction des différentes familles de machines :

- pour les engins de terrassement (bouteurs...), les systèmes à base de GPS RTK semblent les mieux adaptés ;
- pour les engins de surfacage (compacteurs...), la solution semble également devoir être cherchée dans la famille des GPS RTK, à condition que les problèmes de masquage soient réglés de façon satisfaisante, ce qui impose des capteurs complémentaires ;
- pour les engins de profilage (finisseurs...), les GPS RTK n'ont pas encore prouvé qu'ils pouvaient garantir dans tous les cas la précision nécessaire sur la cote Z, bien que les meilleurs d'entre eux aient démontré qu'ils pouvaient l'atteindre dans certaines conditions. Dans un autre domaine technologique, des prototypes extrêmement prometteurs utilisant la technique de triangulation optique à trois dimensions ont été développés et sont en attente d'un relais industriel et commercial. Les industriels qui sauront fusionner le meilleur des deux technologies tout en restant attractifs sur le plan économique seront sans doute ceux qui emporteront le marché ;
- pour les machines d'entretien courant, travaillant sans plans et essentiellement de façon relative par rapport à la chaussée, ce sont les techniques de vision artificielle qui semblent les mieux adaptées aux besoins.

Le Laboratoire central des Ponts et Chaussées entend jouer un rôle majeur dans cette nouvelle mouvance, grâce en particulier à sa station d'études SESSYL.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BELIVEAU Y.J. (1991), *3-D positioning for construction surveying and automation*, Construction Congress II., ASCE, Boston, Mass, avr., pp. 656-661.
- [2] PEYRET F., PHILIPPE H. (1992), *Towards Computer Integrated Construction*, 9th ISARC, Tokyo, juin, pp. 859-868.
- [3] DUQUENNE F. (1994), *Guide de l'utilisateur du GPS pour la localisation - Fascicule 1 : Le système GPS : Notions fondamentales*, Rapport IGN - CNIG, nov., 67 pages.
- [4] PEYRET F., LE CORRE J.-F. (1990), *La robotisation des engins de construction routière, d'abord se localiser*, Route et Informatique, Paris, mars, pp. 294-303.
- [5] MALINOVSKY Y., RUFOV V., KOVALEV V. (1991), *A system for determining the localization of construction equipment on the working site*, 8th ISARC, Stuttgart, juin, pp. 757-766.
- [6] GORHAM S.G. (1994), *The Laserguide system of automatic machine guidance*, 11th ISARC, Brighton, mai, pp. 327-332.

### ABSTRACT

#### Application of Positioning Techniques to Road Robots

F. PEYRET

The article begins with a few definitions to situate the subject, then recalls the main stakes.

- In the field of construction, positioning systems make it possible to merge the data from the design, construction, and inspection stages, and this gateway opens the door to the industrialization of construction sites. The positioning needs of road construction plant are discussed, together with the principles likely to meet them, partly or wholly. A classification of these positioning principles is then proposed, and two techniques that hold promise for the field concerned are then described in detail: GPS and three-dimensional optical triangulation techniques.

- In the field of routine maintenance, the article explains why the solutions being developed make use of artificial vision techniques rather than the techniques used in construction.

- Finally, the new positioning system investigation station (Sessyl) recently set up at the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées is presented.