

**cachan
estp**

**XXème
colloque
A.F.T.**

nov. 96



applications de la topographie moderne aux travaux publics

la localisation temps-réel des machines de travaux publics une nouvelle branche de la topographie

*François Peyret. Ingénieur ESMA.
Chef de la Section Robotique de Chantier.
LCPC de Nantes*

Résumé

L'article rappelle d'abord la signification du terme « localisation » dans le contexte des Travaux Publics et énumère les principaux domaines d'application. Il insiste particulièrement sur les systèmes à base de satellites, tels la « Global Positioning System » (GPS), qui présentent des caractéristiques remarquables les rendant particulièrement bien adaptés aux grands chantiers linéaires.

Plus précisément, dans le domaine des chantiers de construction de routes, l'article explique pourquoi l'utilisation de tels systèmes de localisation ouvre la porte à l'application du concept de « construction intégrée ». Dans cette nouvelle méthodologie, des bases de données géométriques communes peuvent être partagées entre les acteurs de la conception, de la construction et du contrôle, réduisant ainsi considérablement les risques d'erreurs humaines.

Quelques développements en cours sont ensuite cités, en particulier ceux qui sont menés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), pionnier de ce nouveau domaine de recherche.

Mots clés : Travaux publics, chantiers, localisation, temps réel, automatisation, aide à la conduite, CAO, GPS.



1. LA FONCTION LOCALISATION DANS LES TRAVAUX PUBLICS

Le terme « localisation », tel qu'il est utilisé dans cet article, doit s'entendre au sens de mesure en *temps réel* d'un ou 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 à 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. La maîtrise de la position a donc comme enjeu principal la *qualité* de l'ouvrage réalisé.

Dans le domaine des travaux publics, 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 [1].

Pratiquement tous les types de chantier de construction sont concernés : terrassements, bâtiments, ouvrages d'art, voies ferrées, routes, aérodromes, etc.

À partir de cette analogie, il est facile de comprendre que l'apport principal 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 publics, 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 imaginés [2]. 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 à posteriori.

2. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE LOCALISATION

2.1. Localisation à l'estime et localisation absolue

Deux grandes familles de méthodes peuvent être identifiées pour localiser un mobile sur un chantier [3] :

- 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,

- 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).

2.2. Les systèmes de localisation à balises

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 :

- 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 » ;
- la dérive en précision des systèmes à l'estime les contraignent à se recalculer à l'aide de systèmes à balises, ce qui rendent ces derniers incontournables.

Les facteurs discriminants des systèmes à balises sont :

- la nature des balises (actives, semi-actives ou passives),
- le type et le nombre de grandeurs géométriques mesurées (angles ou/et distances),
- la nature de l'onde servant de vecteur à la mesure (lumineuse ou hyper-fréquence).

La combinaison des différents facteurs discriminants permet d'envisager de multiples configurations, qui sont pour la plupart réalisables physiquement.

Parmi les récents systèmes particulièrement intéressants pour les travaux publics, outre le GPS auquel nous consacrerons le chapitre suivant, nous pouvons citer :

- *les stations totales motorisées*, versions évoluées de l'instrument maintenant classique des géomètres, pouvant asservir leur visée sur une cible en mouvement (prisme) et délivrer ainsi en temps réel les trois coordonnées X, Y, Z de la cible ;
- les systèmes de triangulation optique plane, tel CAPSY™ distribué par Spectra-Physics, qui délivrent les coordonnées planimétriques X, Y du mobile sur lequel ils sont installés, ainsi que l'angle de cap (ou le « lacet ») ;
- *les systèmes de triangulation optique à trois dimensions*, versions évoluées des précédents, permettant de délivrer les six degrés de liberté du mobile (systèmes prometteurs mais n'existant actuellement qu'à l'état de prototypes).

3. Le GPS (Global Positioning System)

3.1. Rappels

Parmi les nouvelles techniques de localisation les plus prometteuses, le GPS (Global Positioning System) tient la vedette [4].

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 1, extraite d'un document de la Sagem, récapitule les principaux modes, leur précision et leur domaine d'application privilégié.

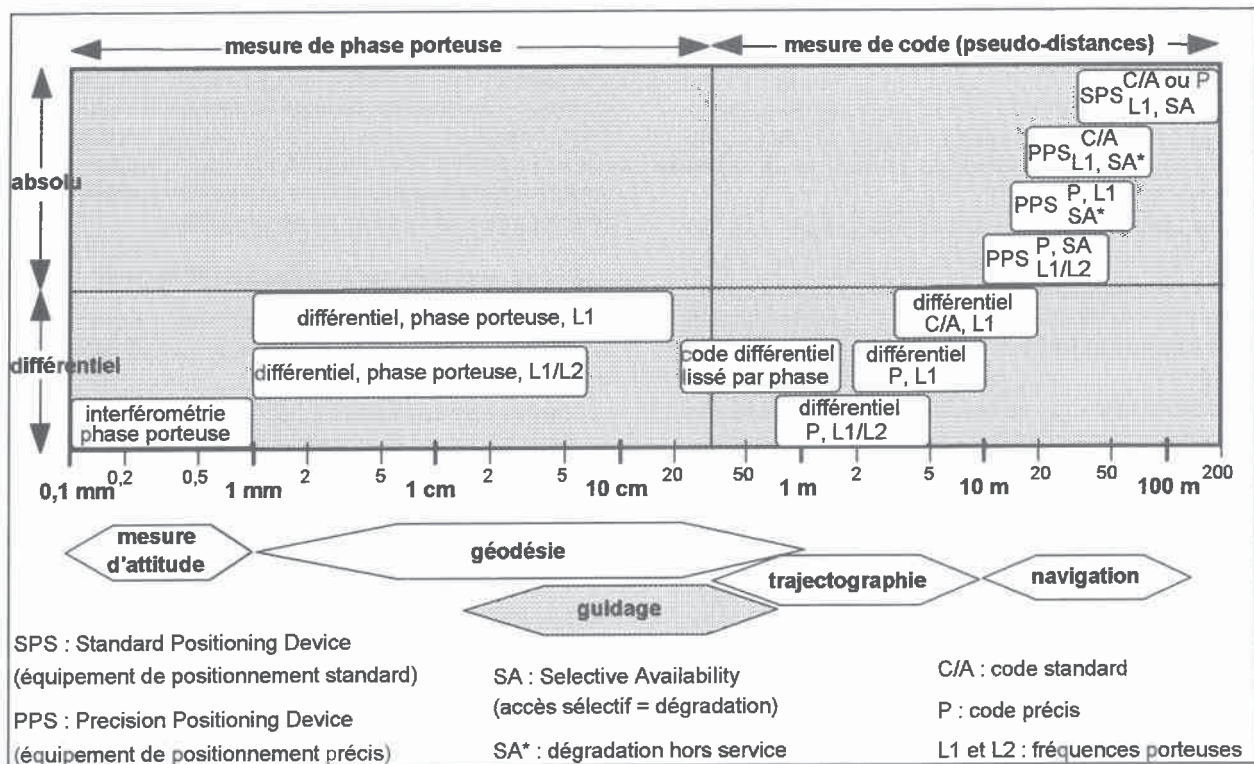


Fig. 1 : Modes d'utilisation et domaines d'application du GPS

3.2. 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 ou décimétrique*. Ceux-ci correspondent à l'utilisation en temps réel des modes « différentiel, phase porteuse » situés dans le quadrant inférieur gauche de la figure. Ce mode est appelé « RTK » pour « Real Time Kinematic ». Les premiers produits datent de 1994.

Les algorithmes de traitement « RTK » font actuellement l'objet d'importants travaux de recherche et développement chez les principaux industriels du domaine (Ashtech, SerCEL, Leica, Trimble, Geotronics, Novatel...).

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.

Le problème technique majeur à résoudre dans ce mode d'utilisation est le *levé des ambiguïtés de phase* pour le recalage des mesures en cas de perte momentanée des signaux (il faut recevoir *en permanence* au moins cinq satellites). Les meilleurs systèmes actuels nécessitent au moins une minute avant de retrouver « au vol » la pleine précision 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 répandage des dernières couches de chaussées, la précision centi-

métrique actuelle (*écart type* - suivant les produits - de 10 mm à 30 mm en X, Y et Z) peut ne pas être suffisante pour un contrôle très fin de l'altitude.

3.3. Intérêts et inconvénients du GPS

Ses principaux intérêts sont les suivants :

- La « *cohérence spatiale* », c'est-à-dire l'existence d'une liaison structurelle entre les trois coordonnées X, Y, Z qui sont calculées en bloc dans un référentiel par nature tridimensionnel (référentiel géodésique spatial).
- La « *cohérence temporelle* », c'est-à-dire la pérennité du référentiel utilisé qui permet de garantir la reproductibilité des mesures, aux erreurs intrinsèques du système près.
- L'*universalité* du système, qui utilise un référentiel global, donc commun à tous les intervenants, quelles que soient leur nationalité et leur culture, pour exprimer et traiter les grandeurs géométriques mesurables.

Un certain nombre d'inconvénients existent néanmoins et ne doivent pas être ignorés :

- Le système, par principe, est *inopérant dans les environnements fermés* ou semi-fermés.
- Les *mesures fines de niveaux* sont délicates compte tenu de la définition non gravimétrique de la verticale et des hauteurs (mesurées par rapport à un ellipsoïde conventionnel et non par rapport au géoïde - surface équipotentielle de gravité-).
- Compte tenu de son principe de base, il est recommandé de posséder un minimum de *culture en géodésie* pour une utilisation optimale.
- Le maître d'ouvrage du système étant le Ministère de la Défense des USA, il existe une *dépendance politique* des utilisateurs, absolument pas sensible pour les applications terrestres civiles mais néanmoins réelle.

4. LE CONCEPT DE CONSTRUCTION DES ROUTES INTÉGRÉE

4.1. Principe

Les outils de localisation possédant cohérence spatiale et cohérence temporelle sont aptes à remplir le rôle de passerelle entre toutes les phases du chantier en mettant à la disposition des intervenants un référentiel commun, fiable et pérenne. On peut alors commencer à parler de « construction intégrée par ordinateur », comme on parle, maintenant depuis longtemps, de « fabrication intégrée par ordinateur » pour l'industrie manufacturière [5].

Le domaine des grands ouvrages linéaires tels que les infrastructures routières se prête particulièrement bien à l'application de ce concept pour plusieurs raisons :

- l'environnement généralement dégagé du chantier facilite l'utilisation du système GPS, jouant en l'occurrence un rôle attractif non négligeable,
- Les plans de tous les ouvrages neufs existent maintenant systématiquement sous forme numérique,
- la plupart des grandes entreprises Françaises et Européennes sont de plus en plus sensibilisées à l'intérêt de ce concept et motivées pour participer activement à son développement [6].

L'application de ce concept peut prendre différentes formes, suivant la nature des informations géométriques traitées et le mode d'action.

Schématiquement, pour un engin de chantier constitué d'un tracteur et d'un outil, on peut s'intéresser à deux types de données :

- les données relatives à la position en plan du tracteur (faire la route où elle doit être faite),
- les données relatives à la position dans l'espace de l'outil de travail (faire la route en respectant les épaisseurs et les pentes de consigne).

Pratiquement tous les paramètres de localisation sont couplés et la position dans l'espace de l'outil permet de solutionner tous les problèmes. Néanmoins, dans une démarche pas à pas d'automatisation progressive, il peut

être intéressant d'appliquer un traitement de nature différente au contrôle de la position du tracteur et à celui de l'outil : aide à la conduite ou contrôle automatique.

4.2. Exemple

À titre d'exemple, les figures 2 et 3 schématisent comment sont exécutés traditionnellement les travaux de répandage des couches de fondation routières et comment on peut envisager de travailler en utilisant ce nouveau concept.

Dans le premier cas, toutes les informations numériques relatives au projet se trouvent réduites, pour les opérateurs de la machine, à l'état de piquets de bois et de fils d'acier tendus qui servent de référence matérielle. Généralement un opérateur est responsable de la trajectoire de la machine (« chauffeur ») est un deuxième de la bonne position de l'outil (« régleur »). Le régleur est secondé dans certains cas par des dispositifs d'asservissement utilisant des « palpeurs-suiveurs » électromécaniques.

Dans le deuxième cas, la consigne est transmise à la machine sous une forme numérique, à partir de l'exploitation directe des fichiers de CAO, et l'écart par rapport à la consigne est élaboré en utilisant un système de localisation temps réel embarqué sur l'outil. Un seul opérateur est nécessaire, celui-ci pouvant garder à sa charge la conduite manuelle de l'engin, aidé par une interface d'aide à la conduite. Un système de commande automatique de la position de l'outil se chargeant, comme dans le cas précédent, de respecter les consignes de niveau et de dévers.

Le travail du géomètre s'en trouvera profondément modifié. Son rôle ne se limitera pas à la seule implantation des références, mais s'étendra à la maintenance de tout le dispositif de localisation, en étroite collaboration avec l'entreprise. Son rôle, en tant que garant de la qualité des informations exploitées sera absolument primordial.

Il est évident que la mise en œuvre de ce nouveau concept présuppose la meilleure coïncidence possible entre le référentiel géométrique dans lequel a été élaboré le projet et celui que le système de localisation utilise sur le chantier.

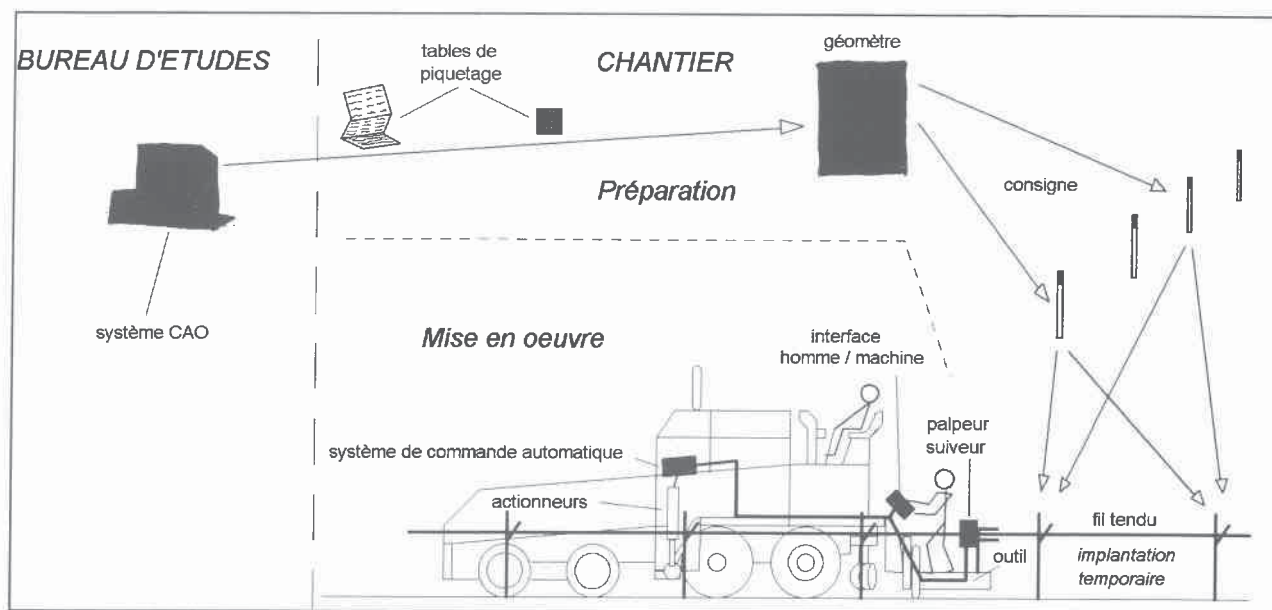


Fig. 2 : Répandage par méthode traditionnelle avec consigne matérielle

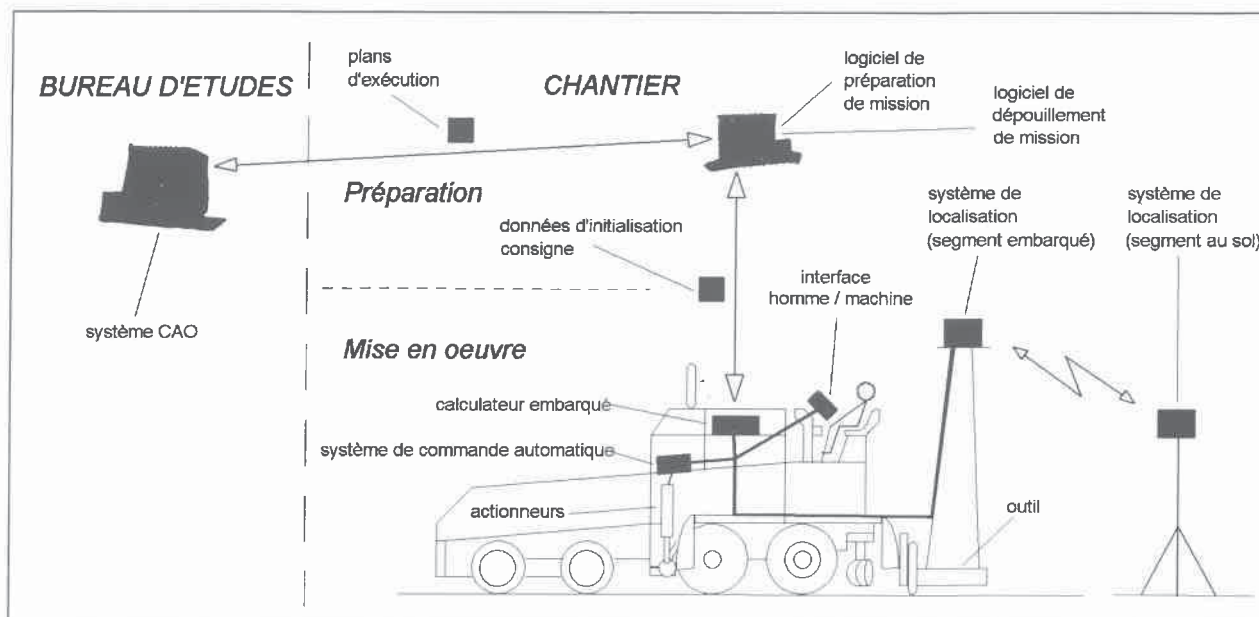


Fig. 3 : Répartition des tâches avec localisation temps réel et consigne immatérielle

5. LES PRINCIPAUX DÉVELOPPEMENTS EN COURS

5.1. Les premières expériences en Europe

Le concept d'exploitation en temps réel des données projet sur une machine de construction des routes est déjà mis en œuvre en Europe, sous différentes formes, depuis le début des années 1990 [7] :

- en Angleterre, par la société « John Kelly Lasers Ltd », sur des bulldozers, finisseurs, niveleuses, machines à coffrage glissant, machines de ballastage
- en France, en utilisant les mêmes technologies qu'outre-Manche, sur des fraiseuses ou des finisseurs, par la société « Laser Consult »,
- en Suède, par la société « Contractor Tools », essentiellement sur des finisseurs travaillant sur des pistes d'aérodromes.

Ces chantiers pilotes ont visiblement satisfait les maîtres d'ouvrages concernés, prouvant ainsi l'intérêt du concept, malgré leur côté encore artisanal et la mauvaise adéquation des technologies de positionnement utilisées. En effet, ni l'association d'un plan laser et d'une roue codeuse (Angleterre et France), ni une station totale de géomètre motorisée (Suède) ne remplissent les critères de cohérence spatiale et de cohérence temporelle requis. Ces outils n'ont pas été conçus pour cet usage, leur mise en œuvre nécessite encore trop d'opérations humaines, sources d'erreurs multiples.

Il faudra attendre la mise en œuvre de systèmes tels le GPS pour pouvoir atteindre un niveau d'automatisation suffisant pour garantir la qualité attendue.

5.2. Les recherches et développements menés au LCPC

Le LCPC s'est investi depuis maintenant sept années dans ce nouveau domaine de recherche appliquée, à la frontière entre le génie civil et la robotique mobile, visant

à introduire les technologies de l'automatisme aux processus de construction et d'entretien des routes.

Dans le domaine de la construction, ses efforts ont principalement porté sur 3 sujets :

- la *localisation*, avec en particulier l'évaluation fine, dans les conditions réelles de chantier, des systèmes de localisation sur un banc d'essai spécialement développé à cette intention,
- l'*application de la localisation à l'aide à la conduite des machines de « surfacage »* (ne nécessitant la connaissance que de leur position dans leur surface de roulement),
- l'*application de la localisation à l'automatisation des machines de « profilage »* (nécessitant la connaissance de la position dans l'espace de leur outil).

Le banc d'essai SESSYL (Station d'Études des Systèmes de Localisation) est présenté sur la figure 4 [8].

Il est opérationnel sur le site de Nantes du LCPC depuis mi-95.

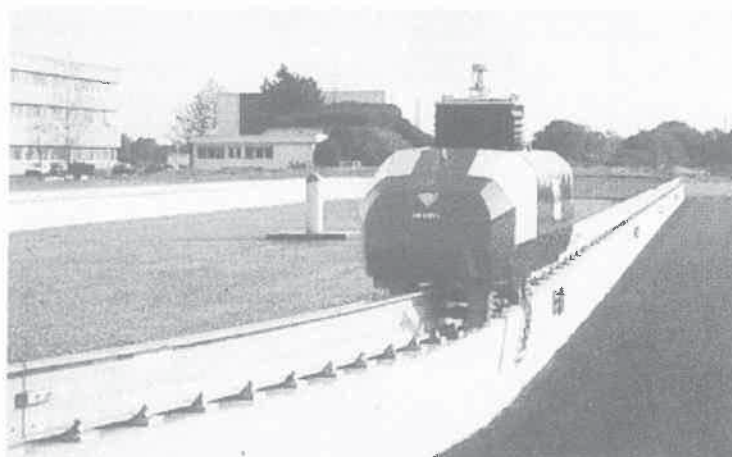


Fig. 4 : SESSYL effectuant un essai sur un récepteur GPS

Son principe de fonctionnement consiste à faire décrire au système en essai une trajectoire programmable et parfaitement connue. À cet effet, le système est embarqué sur un chariot circulant sur un rail métallique et muni d'une plate-forme motorisée trois axes. La comparaison entre la trajectoire réelle et la trajectoire mesurée par le système renseigne sur la qualité de celui-ci.

Les courses et les précisions disponibles sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Degré de liberté	X	Y	Z	lacet	roulis	tangage
Course	81 m	16 m	300 mm	360°	±6°	±6°
Précision	< ±1 cm	< ±1 cm	< ±2 mm	< ±0,1°	< ±0,05°	< ±0,05°

Dans le cadre du deuxième sujet, 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 [9]. Le procédé a fait l'objet d'un dépôt de brevet par le LCPC en août 1995.

Le processus de compactage est ainsi le premier sur lequel le concept de construction des routes intégrée a été appliquée en utilisant un système GPS.

À partir d'une localisation temps réel par un système GPS différentiel de précision centimétrique, il offre au conducteur un certain nombre d'indications sur un écran embarqué lui permettant de maîtriser parfaitement sa trajectoire. Celui-ci peut ainsi savoir exactement où et combien de fois il est passé avec sa machine et garantir ainsi le respect de son « plan de balayage », synonyme de qualité dans le cas présent.

Un exemple d'affichage est présenté sur la figure 5.

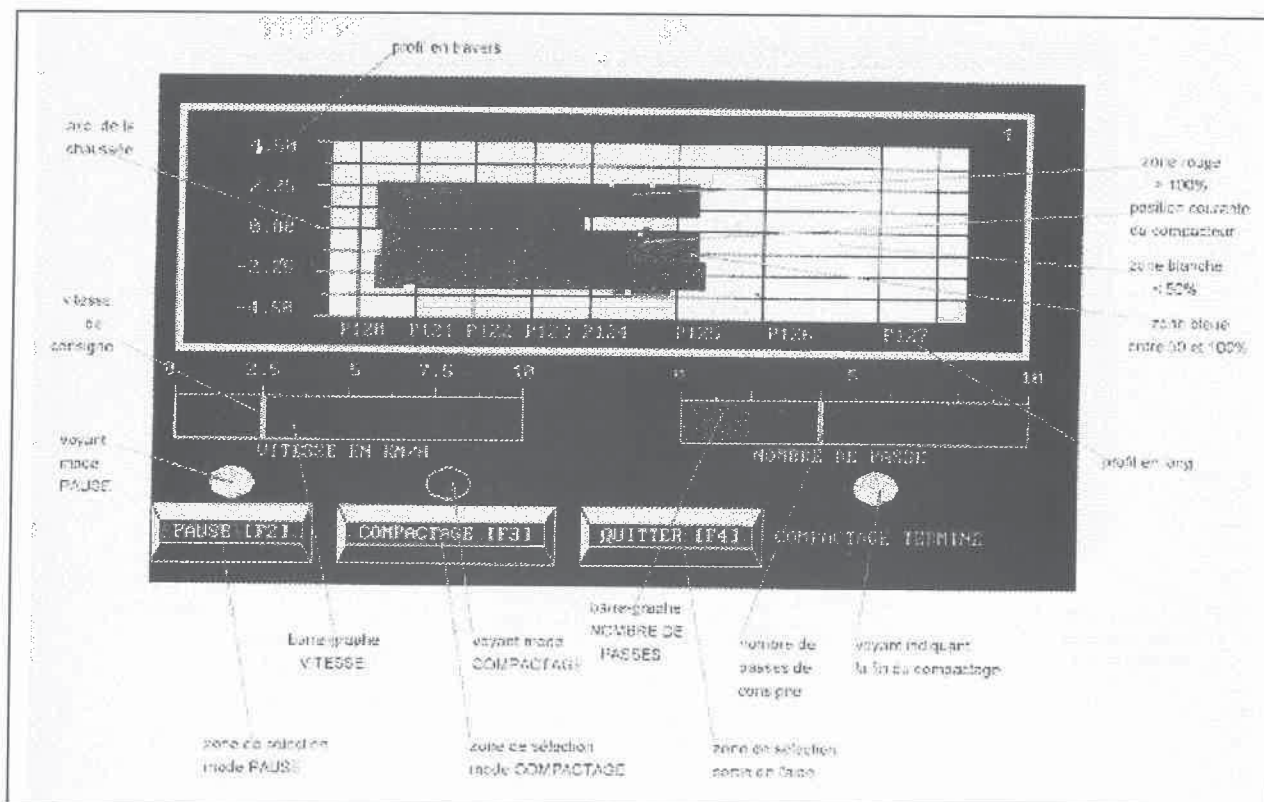


Fig. 5 : L'écran d'aide à la conduite du système MACC

Le système a été évalué l'été dernier sur un chantier expérimental, en collaboration avec l'entreprise routière Cochery Bourdin Chaussé et a donné entière satisfaction à l'entreprise comme au maître d'ouvrage.

Le troisième sujet est moins avancé d'un point de vue réalisation matérielle. Il a cependant fait l'objet de plusieurs années de recherche qui ont été synthétisées sous la forme d'un logiciel de simulation appelé SimuCIRC (CIRC signifie « Computer Integrated Road Construction »).

Ce logiciel constitue un environnement de recherche et de développement des différents modules qui constituent une application complète de construction des routes intégrée.

La figure 6 présente la fenêtre regroupant les commandes et la visualisation d'un engin de type finisseur en cours de répandage.

6. CONCLUSION

Un tournant fondamental s'amorce dans le milieu de la construction BTP, dû à la récente ou prochaine 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 phrases 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.

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

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* et aux différents projets applicatifs qui ont été lancés à son initiative.

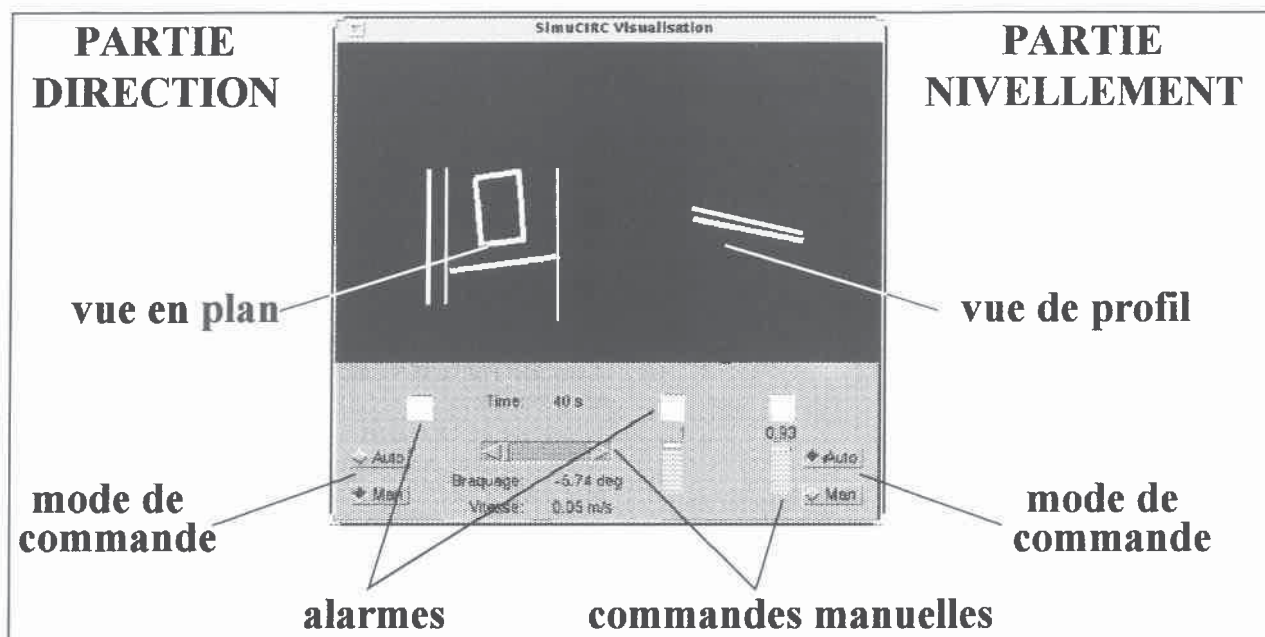


Fig. 6 : Fenêtre principale du simulateur SimuCIRC

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Peyret F., Le Corre J.F.
La robotisation des engins de construction routière, d'abord se localiser
Route et Informatique, Paris, pp. 294-303, mars 1990.
- [2] Beliveau Y.J.
3-D positioning for construction surveying and automation
Construction Congress II., ASCE, Boston, Mass, pp. 656-661, April 1991
- [3] Fargeon C., Quin J.P.
Robotique Mobile
Ouvrage collectif, Teknea, Toulouse, pp. 75-85, 1993.
- [4] Botton S. et al.
GPS localisation et navigation
Ouvrage collectif, Hermès, Paris, 159 p., 1996
- [5] Peyret F., Philippe H.
Towards Computer Integrated Construction
9th ISARC, Tokyo, pp. 859-868, June 1992.
- [6] Le Gentil H., Martineau Y.
A 83 : une première dans le guidage automatique en nivellement des finisseurs
Revue Générale des Routes et Aérodrômes n° 713, 1993.
- [7] Berthomier A.M., Peyret F.
L'évolution des techniques de guidage des machines de répartition
Revue Générale des Routes et Aérodrômes n° 733, pp. 93-96, 1995.
- [8] Peyret F.
Sessyl : the study of the positioning systems for road construction robotic
12th ISARC, Warsaw, pp. 55-62, June 1994
- [9] Froumentin M., Peyret F.
An operator aiding system for compactors
13th ISARC, Tokyo, pp. 359-368, June 1995