

PREDIT 3 - 4

Système de Transport Intermédiaire sur Fer

Pose automatisée de voie ferrée

Procédé APPITRACK

Automatic Plate and Pin Insertion Track

Rappel

Gec Alsthom a proposé en 1995 la réalisation d'un système économique de transport urbain : le STUL. Pour réduire les coûts d'infrastructures du système STUL, le constructeur a proposé de réaliser une dalle en béton armé à l'avancement selon la méthode BAC (Béton Armé en Continu), nouvelle méthode de mise en oeuvre utilisée pour réparer ou réaliser les autoroutes en béton. Cette dalle en BA reprend tous les efforts transmis par les rails et leurs attaches, les traverses étant supprimées, la liaison rail - dalle se fait au moyen de selles noyées dans le béton et de tiges d'insertion, permettant la fixation des rails sur la dalle.

L'intérêt de cette méthode est de pouvoir réduire les temps de pose de la voie grâce à l'utilisation d'une machine à coffrage glissant (slip-form) et la suppression des traverses ; par ailleurs l'utilisation de matériaux et d'équipements déjà éprouvés sur les systèmes de tramways modernes en France et à l'étranger assurent les concepteurs, constructeurs et maîtres d'ouvrage de la tenue dans le temps de ce type de voie.

Nous concluions dans notre rapport éd. 2 du 31 octobre 1996 qu'après les études réalisées par Cegelec, confortées par le LCPC, une meilleure maîtrise du procédé de mise en oeuvre à la suite des essais en cours ont permis au constructeur de proposer une réduction du temps de pose par rapport à une pose classique sur traverses de 36 % sur le temps de pose de la voie ferrée. Ceci entraînait une réduction du coût global pour les postes Plateforme, Voie et Revêtement de l'ordre de 15 % sur les coûts constatés pour les voies du TFS à Nantes, Grenoble et Strasbourg¹.

Par ailleurs un autre avantage de réaliser la voie en béton armé est de pouvoir introduire dans la dalle avant coulage du béton des réservations notamment la multitungulaire nécessaire aux courants faibles et courants forts et les plots d'alimentation électrique nécessaires au système de commutation et d'alimentation (système d'alimentation statique par le sol, ALISS,

¹ La voie de Strasbourg a été dimensionnée pour le tramway de Grenoble, le changement de matériel roulant s'est fait ultérieurement.

par exemple) dans le cas où la caténaire ne serait pas utilisée pour alimenter le système de tramways.

Le gain obtenu en utilisant la voie BAC et l'introduction d'une multitubulaire dans la dalle au lieu de la pose traditionnelle a été estimé à 25 % par rapport aux coûts constatés pour les voies du TFS à Nantes, Grenoble et Strasbourg.

Introduction

L'objet de cette expertise est de vérifier la faisabilité du développement d'un système de guidage grâce à des moyens de localisation nouveaux (stations de topographie, plan laser, télémètre, repérage satellite GPS avec une précision améliorée, etc.), en vue de la localisation dynamique d'un atelier de mise en oeuvre comprenant une machine slip form pour la mise en oeuvre d'une dalle en béton et un robot pour la pose de selles et goujons têtes d'insertion) à l'avancement avec des tolérances au mm près dans les 3 dimensions X,Y et Z de manière à fixer ultérieurement les rails sans aucune difficulté. L'objectif d'avancement de l'atelier de pose de la voie automatisé est de 200 ml par jour contre 50 ml/jour pour un atelier de pose traditionnelle.

La voie APPITRACK

La faisabilité de la mise en oeuvre de la voie ferrée automatisée a été démontrée par des essais (cf. photos en annexe et film d'Alstom) et a fait l'objet d'un brevet : cette nouvelle méthode de pose est appelée APPITRACK. Le procédé APPITRACK consiste à insérer les pièces support de rail dans le béton frais, au moyen d'un atelier mobile constitué d'une machine automotrice slip-form qui coule la dalle, derrière laquelle se trouve un robot qui va placer les supports de rail directement à la bonne position (en X,Y et Z) dans la dalle. Les essais ont été réalisés (cf. vues en annexe) en prenant comme référence des rails extérieurs à l'emprise de la dalle à réaliser et qui ont servi comme rail de roulement à la machine slip-form et à l'appareillage mobile qui permet l'ancrage de selles dans le béton moulé. Ces rails extérieurs ont été implantés par des géomètres-topographes selon la méthode traditionnelle : à partir de la définition de l'axe de la future voie, implantation et déports de l'axe en dehors de la zone des travaux, implantation et nivellation des rails de chantier par polygonation, etc.. La mise en oeuvre de la voie en alignement droit n'a pas posé de problèmes particuliers mais dès qu'il y aura des courbes et des dévers l'implantation va se compliquer. En effet, les tolérances demandées dans le cas de la fixation des rails après la pose des selles sont plus strictes que dans le cas d'un rail posé sur traverses selon la méthode traditionnelle. La méthode traditionnelle consistant à accrocher aux rails maintenus au dessus du sol par des gabarits, les traverses formant ainsi des panneaux de voie, le coulage se fait après calage en nivellation et en plan de ces panneaux de voie, les rails prennent alors leur position définitive, les fixations des rails (traverses) se trouvent ainsi bien positionnées pour assurer le confort de la voie. Nous introduisons en annexe le synoptique des opérations de réalisation d'une voie classique de tramway moderne en milieu urbain, en l'occurrence il s'agit du synoptique de la réalisation des voies des lignes 3 Nord et 1 Ouest de Nantes qui montre qu'il y a 10 opérations à effectuer y compris le revêtement de la voie. Dans le cas de l'Appitrack ce nombre sera réduit à 5 opérations qui sont :

- 1 Réception de la plateforme.
- 2 Coulage de la dalle béton et pose des selles munies de leur ancrage.

- 3 Distribution et mise en place des rails et des attaches.
- 4 Mise en place de la bordure d'entrevoies, éclissage des rails.
- 5 Mise en place des revêtements.

I - Fonctionnalité prévue des recherches : nature des avantages procurés par l'innovation envisagée.

I-1 Topographie et localisation dynamique

La mise en oeuvre du premier tronçon d'essai de la voie APPITRACK a été réalisée à partir de deux rails légers pris comme référence, l'un donnant le niveling et l'axe de la voie, l'autre seulement le niveling. La pose de ces deux rails, référence de la future voie, demande une main d'oeuvre qualifiée de géomètre-topographes, une protection des points et une propreté de ces rails difficile à assurer dans un milieu où le chantier se situe nécessairement dans une emprise limitée.

Aussi le constructeur propose de rechercher d'autres modes de mise en oeuvre de références topographiques pouvant être utilisées par la machine à coffrage glissant ou slip-form de mise en oeuvre du béton et par l'appareillage mobile ou robot d'insertion des selles dans le béton frais et des goujons. La difficulté de la recherche proposée est de pouvoir réaliser une pose de selles et des tiges d'insertion au mm près dans les trois axes X,Y et Z. Nous avons donc cherché à savoir s'il n'existe pas à la SNCF, RATP, au CSTB, chez les constructeurs d'engins de travaux publics et d'équipements de topographie des méthodes et équipements permettant d'atteindre ce niveau de précision.

Il existe plusieurs modes de repérage et/ou de guidage utilisables pour cette application :

- **les stations de topographie** sont utilisées actuellement pour l'implantation et le contrôle de voies ferrées : elles nécessitent une main d'oeuvre qualifiée et sont adaptées à des mises en oeuvre de 40 mètres de voie simple par jour.

- **le fil de guidage** placé sur des fiches enfoncées dans la plateforme à l'extérieur mais très près de la voie dont l'intervalle varie de 1 à 5 mètres selon que l'on se situe en courbe ou en alignement droit très utilisé depuis 30 ans sur les machines de mise en oeuvre des couches de chaussées mais inadapté en site urbain pour la précision requise.

- **le plan laser** qui est utilisé pour le guidage des machines slip form et de mise en oeuvre des chaussées : la précision est de l'ordre de 5 mm.

- **la reconnaissance par l'analyse d'images** : cette méthode nécessite l'implantation d'une ligne de référence à partir de laquelle se positionnera l'appareillage d'insertion des selles, cette implantation nécessite des topographes qui utilisent les méthodes classiques de la topographie.

- **le télémètre** qui permet de mesurer des distances avec une précision de 1 à 2 mm mais n'est pas directement adapté au repérage en X,Y et Z.

- **le repérage GPS (Global Positioning System)** qui est 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.

I-2 Levé topographique par la méthode GPS en temps réel

Les modes de localisation/guidage qui intéressent les engins de travaux publics sont ceux qui peuvent fonctionner en temps réel et qui fournissent une précision centimétrique (profilage) ou décimétrique (surfaçage) (Peyret, 1996)². Ceux-ci correspondent à l'utilisation en temps réel des modes « différentiel, phase porteuse ». Ces systèmes s'intitulent « **RTK** » pour « **Real Time Kinematic** ». Ces modes d'utilisation font l'objet d'importants travaux de recherche et développement chez les principaux industriels du domaine (Ashtech, Dassault-Sercel, Leica, Trimble, Geotronics, etc.).

La mise en oeuvre 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 calculs en temps réel.

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 5 satellites³). Ceci impose la mise en place de systèmes « relais » lors du franchissement des ouvrages d'art par exemple. **Pour les travaux précis qui concerne la pose APPITRACK, la précision centimétrique n'est pas suffisante, il y a d'autres catégories de techniques.**

Une note de la SNCF Division de topographie introduite en annexe permet de rappeler les avantages et inconvénients de la méthode ainsi que les précisions obtenues.

Tout d'abord le principe de fonctionnement du GPS temps réel repose sur la détermination de la position de station(s) itinérante(s), mobile(s) ou non, à partir d'une station de référence fixe connue.

Les stations fixe et mobile(s) captent les signaux des mêmes satellites. La station fixe transmet aux stations itinérantes des informations par liaison radio qui permettent de calculer leurs positions, en temps réel. Après une initialisation des stations de une à trois minutes, il est possible de déterminer des points en quelques secondes ou des trajectoires avec une précision millimétrique ou centimétrique selon l'application, à condition de recevoir sans coupure les signaux provenant d'au moins quatre satellites.

La division de topographie de la SNCF est équipée du GPS temps réel depuis la fin de l'année 1996. **Le GPS temps réel est parfaitement adapté et simple d'utilisation pour des travaux nécessitant une précision supérieure ou égale à 5 cm.**

² Peyret F., 1996, »Application des techniques de localisation à la robotique routière», dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 205 - Septembre - Octobre 1996 - Ref. 4076 PP 3 - 14.

³ Actuellement ces satellites sont américains mais un projet européen Galileo est en phase de définition sur la période de juin 1999 à décembre 2000 : c'est un projet de satellite global de navigation par satellites sous contrôle civil. Il devrait compléter les deux systèmes militaires existants, l'américain GPS et le russe Glonass et être utilisé dans de nombreux domaines, en particulier celui des transports, par exemple la gestion du trafic routier, maritime et aérien ou les opérations de sauvetage.

Pour des précisions inférieures, il est important de prendre des précautions qui concernent particulièrement l'altimétrie et la définition du référentiel chantier qui est différent du référentiel GPS : le WGS84⁴.

Des tests de mesures réalisés dans différentes conditions nous permettent de qualifier le GPS temps réel dans des travaux nécessitant une précision entre +/- 5 mm à +/- 1 cm en planimétrie. Pour l'altimétrie la précision est évaluée entre +/-1 cm à +/-2 cm.

Ces fourchettes de précision dépendent de la définition et de la qualité du référentiel planimétrique et altimétrique ainsi que des conditions de réception des signaux de satellites (nombre de satellites, position, longueur de bases, nombre de points dans les référentiels...).

Précision intrinsèque du GPS Temps Réel

Pour mesurer la précision intrinsèque du GPS en temps réel, la SNCF, division de topographie, a mis en place deux stations fixes (référence + itinérante) sur des points connus avec une précision de +/- 1 mm ; elle a ensuite effectué des enregistrements avec une cadence de 30 secondes ou d'une minute afin d'observer les variations des coordonnées calculées de la station itinérante. L'utilisation de deux récepteurs fixes a permis d'étudier la précision de la mesure GPS en fonction de la constellation des satellites.

Sur environ 33 heures de mesures, les résultats du tableau ci-après ont été constatés : ils définissent les limites actuelles de la mesure GPS Temps réel

Mesures	Précision en mm	Tolérance en mm
Planimétrie	3,5	9
Altimétrie	8	21

Précision relative entre deux points et précision par rapport à un canevas

L'utilisation du GPS temps réel sur le chantier de la régénération de la Ligne à Grande Vitesse Paris - Sud-Est, a permis à la division de topographie de calculer les précisions de ce système de mesure en comparant des mesures optiques et GPS sur plus de 40 km. Les résultats obtenus sont :

- précision relative entre deux points

Mesures	Précision en mm
Planimétrie	+/- 5 mm
Altimétrie	+/- 9 mm

- précision par rapport au canevas

⁴ World Geodesic System ou système de référence géodésique produit par la DMA Defense Mapping Agency, Service géographique de l'armée des États Unis

Mesures	Précision en mm
Planimétrie	+/- 1 cm
Altimétrie	+/- 1 à 2 cm

I-3 Les systèmes DPS (Driving Positioning System)

Un groupe de travail dénommé Club Localisation Guidage de l’Institut pour la Recherche appliquée et l’EXpérimentation en génie civil IREX, indique une série d’applications sur chantiers du système de localisation guidage développé en France par la société D & PS (Driving & Positioning System). Ce système consiste en un capteur (théodolite vidéo-asservi ou balise fixe GPS) associé à un récepteur embarqué sur l’engin à guider, comportant un logiciel dans lequel est introduit le projet, selon une procédure simple utilisant les disquettes fournies par les bureaux d’études, et capable, soit de donner au conducteur des indications sur la position des outils de l’engin par rapport au projet, soit d’agir directement sur ces outils, soit encore de donner la combinaison des deux types d’informations.

Quelques applications

- Guidage d’opérateur topographique

Un opérateur se déplace avec un récepteur portant un petit écran sur lequel il lit sa position en X,Y,et Z au cm. L’opérateur peut en outre matérialiser et enregistrer ainsi un tracé linéaire, qui sera ensuite introduit dans le logiciel de l’engin chargé de réaliser la tâche. Cette dernière application a été utilisée pour la pose de glissières en bordure de route.

- Guidage d’autograde

Application à la réalisation, en pleine largeur, d’une couche de forme, avec un profil en toit et dévers variables. Les deux lames de l’engin et la conduite étaient asservies, le rôle du conducteur se bornant à régler la vitesse d’avancement et à s’assurer que tout se passe bien.

- Guidage d’un engin de fonçage de drains verticaux

L’engin n’étant pas asservi, le système donne sur le tableau de bord, la position de l’outil de forage en X,Y,Z. La profondeur imposée atteinte, il suffit au conducteur d’appuyer sur un bouton pour enregistrer ces données, et établir ainsi un document de récolement sans intervention ultérieure d’un topographe.

I-4 Comparaison entre théodolite vidéo-asservi et GPS

Les applications du type autograde ou finisseur, d’une part ne se satisfont pas de la précision en Z d’un capteur GPS, d’autre part s’adaptent bien des contraintes d’intervisibilité entre l’engin et le théodolite (de l’ordre de 400 m de part et d’autre du théodolite). Les niveleuses opèrent le plus souvent sur des ateliers de taille réduite où l’intervisibilité est assurée, leur guidage peut donc être assuré par un théodolite vidéo-asservi. La société D & PS estime que les capteurs GPS seraient mieux adaptés aux gros engins de terrassement, du type bouteur ou décapeuse, pour lesquels les ateliers s’étendent très au delà des distances d’intervisibilité, alors qu’en revanche la précision requise en Z s’accommode du GPS

différentiel. En outre, la balise GPS fixe peut servir plusieurs engins, ce qui n'est, par son principe même, pas le cas du théodolite vidéo-asservi. Cette possibilité diminuerait d'autant le coût global du guidage.

On constate à l'étranger, en Allemagne et en Suède, pays en avance sur la France en matière de guidage, que le GPS n'est guère employé dans plus de 15 à 20 % des cas de guidage, pour les raisons évoquées ci-dessus. Il y a un autre avantage au théodolite qui est de pouvoir faire de l'auto-contrôle : il suffit en effet de pointer périodiquement l'appareil sur un repère éloigné du chantier pour vérifier que sa position n'a pas changé. Cette possibilité n'est pas offerte à une balise GPS ni à un laser tournant.

Exemples d'utilisation du DPS pour guider les engins de travaux publics

L'arrivée du DPS et son adaptation aux finisseurs, puis aux autogrades est une réalité qui associe désormais topographie et guidage (Andrieu et al., 1999). À la base du système DPS, il y a un théodolite vidéo asservi et motorisé qui permet au géomètre de réaliser seul toutes les opérations topographiques du chantier - implantation, levé, récolement, etc.- sur site et de façon autonome. À chaque instant, alors qu'il se déplace avec une canne équipée avec un prisme à 360°, le géomètre est suivi par le théodolite : il peut connaître sa position en 3 D sur le chantier et la comparer, sur son ordinateur portable, aux données topographiques initialement prévues. Le logiciel dont il dispose lui donne en outre d'innombrables possibilités de calcul de paramètres comme par exemple, le déport d'axe, le décalage d'altimétrie ou encore le point kilométrique Pk. Les points caractéristiques (axe, points de départ, limites de plateforme, etc.) sont aussi identifiés et le géomètre avec ce système évolue directement et physiquement dans son projet mathématique tout en pouvant intervenir en temps réel sur les données topographiques du chantier, réduit au final à une disquette informatique.

L'utilisation d'un ensemble théodolite/prisme a trouvé naturellement d'autres applications notamment dans l'aide au guidage de machines. La combinaison d'un système d'aide au guidage et d'un système dédié à la topographie a permis d'imaginer l'asservissement d'engins routiers en mouvement lent, comme les autogrades ou les finisseurs qui sont **alors parfaitement repérés par rapport à une implantation topographique préétablie en X,Y et Z avec des niveaux de précision en altimétrie de +/- 5 mm.**

Ainsi l'entreprise Jean Lefebvre s'est équipée d'un nouvel autograde en 1996 ; il existe chez Leica un système DPS (Driving Positioning system) de positionnement dans l'espace utilisé pour faciliter le guidage des machines comme les tunneliers, les engins de forages opérant en galerie) où la visibilité du conducteur est très réduite, les machines à poser des voies ferrées (rails sur traverses) dans le tunnel sous la Manche, par exemple. Avec ce système, l'opérateur visualise sur un écran dans sa cabine, la position de son outil de travail et pilote les mouvements de celui-ci en suivant le profil à réaliser et la trajectoire à suivre. Dans le cas de l'autograde, cet équipement était insuffisant, car le conducteur n'aurait pas pu à la fois diriger la machine (deux vérins), approvisionner les matériaux avec les vis de répartition (quatre moteurs) et régler l'altitude de la lame (quatre vérins). L'idée a donc été d'associer à cet ensemble un automate pour piloter les vérins à la place du conducteur et remplacer de ce fait les deux fils de guidage classiques. Il s'agissait là de développer un système capable d'assister le pilotage de l'autograde aussi bien en direction qu'en altitude, avec une précision compatible avec les exigences dictées par la mise en oeuvre ou le reprofilage de couches pour la construction de pistes d'aéroports, de routes importantes ou d'autoroutes.

L'ensemble de ce système s'articulera finalement autour d'un théodolite motorisé video asservi Leica mis en station sur le chantier. Cet appareil servant à mesurer les angles, donne en permanence la position dans l'espace d'un point haut sur la machine (cible constituée par un prisme) en X,Y et Z et le communique trois à quatre fois par seconde. Le système radio de l'appareil transmet ces informations au DPS situé sur l'autograde qui compare ces mesures au positionnement théorique du projet. Enfin, un automate programmable, en phase avec un inclinomètre deux pentes, pilote les vérins de l'engin afin que celui-ci suive la trajectoire et les profils demandés et que la lame de coupe soit correctement positionnée à +/- 5 mm sur 10 mètres de largeur. La direction est assurée par deux vérins hydrauliques, un pour l'orientation des chenilles avant et l'autre pour l'arrière. Le positionnement vertical est quant à lui donné par quatre vérins d'élévation fixés dans les fûts situés au-dessus des chenilles. Le conducteur conserve comme par le passé les commandes des vis de répartition des matériaux devant la lame de réglage ainsi que la maîtrise de la vitesse d'avancement.

Nous reportons en annexe des fiches sur les possibilités du DPS pour le guidage d'engins de mise en oeuvre de plateforme et de couches de chaussée, **la précision annoncée peut atteindre 2 mm en altimétrie à partir du DPS pour la niveleuse, le slipform, le finisseur et le tunnelier, les systèmes GPS RTK donnant des précisions au cm.**

I-5 Autres systèmes de guidage conçus pour des applications de type BTP

Selon (Peyret, 1996) les systèmes existants et en développement conçus pour des applications de type BTP sont :

- le **système Sirem**, Système intégré de repérage d'engins mobiles, conçu par le LCPC, permet de connaître les 6 degrés de liberté du mobile sur lequel il est installé par rapport à un repère de référence. Sirem utilise une caméra CCD (cellule à déplacement de charges) linéaire tournante comme détecteur et des lampes halogènes comme balises. Sa portée est de 30 mètres, **sa précision en Z permet de descendre en dessous du seuil des 10 mm.**

- une **version russe du Sirem** utilise comme élément sensible une cellule photoréceptrice recevant la lumière réfléchie par des balises passives (prismes) : les précisions annoncées sont meilleures que celles du Sirem (**1,5 mm en Z à 30 m**) à la cadence de 10 Hz.

- le système anglais **Lasertrac** proche du système russe développé par une équipe de l'Université de l'Est de Londres à Dagenham (Barry J. Gorham), système avec lequel les angles sont également mesurés à partir de deux plans laser tournant (précision annoncée : **5.10⁻⁶ rad soit 1 seconde d'angle environ**) et les balises peuvent être également semi-actives (cellules) ou passives (prismes). La cadence de mesure est de 1 Hz.

Un programme européen de recherche intégrant un aspect système de guidage et de contrôle des machines utilisées pour la construction de routes, « **Computer Integrated Road Construction** » (CIRC) financé par la Commission Européenne (Direction XII), lancé en janvier 1997 est en cours d'achèvement (cf Fiche du projet CIRC en annexe). Des systèmes de précision pour le suivi en temps réel de la position des engins de construction routière vont être développés : ces systèmes seront connectés aux profils informatisés établis durant la phase projet et comparés aux mesures géométriques constatées sur le chantier en temps réel.

Les principales contraintes à respecter sont :

- le suivi de la position quel que soit l'environnement,
- la précision du positionnement adapté à l'application concernée : **+/- 10 cm en X, Y pour les compacteurs, +/- 1 cm en Z pour les finisseurs,**
- une manipulation pratique par les ouvriers du chantier,
- la robustesse du système sous des conditions difficiles de chantier (vibrations, poussière, conditions climatiques,etc.),
- la compatibilité avec différents modèles de tracé informatique.

Depuis plusieurs années, le LCPC dans le cadre de sa Division « Méthode et matériels pour la construction et l'entretien des routes » a entrepris une recherche qui porte sur l'étude des méthodes et des outils de positionnement dynamique pour les chantiers de génie civil, thème de réflexions croissant dans le monde (cf **les actes des colloques ISARC, International Symposium on Robotics in Construction** en références bibliographiques). Le LCPC dispose d'une station d'étude des systèmes de localisation Sessyl et d'un logiciel de simulation d'applications de construction de route assistée par ordinateur Simurcire et fait la promotion des techniques innovantes utilisées dont nous résumons ci-après les moyens utilisés.

Sessyl

Ce banc d'essai et d'étude permet d'expertiser et d'évaluer des systèmes de localisation statiques et dynamiques appliqués à l'automatisation et/ou à l'aide à la conduite d'une gamme de plus en plus étendue de matériels de BTP en particulier de matériels de construction et d'entretien routiers.

Ce banc se compose d'une piste fermée c'est à dire d'un monorail sur un muret sur lequel circule un chariot mobile. Un logiciel intégré permet de tester différents systèmes récepteurs GPS, systèmes de radio-positionnement à balises terrestres, systèmes optiques à triangulation laser, systèmes de nivellation à plan laser, etc..., embarqués sur la plateforme motorisée selon trois axes (altitude, roulis, tangage) du chariot se déplaçant sur le rail.

La comparaison entre des trajectoires de référence préalablement programmées et les trajectoires décrites par le système étudié en sollicitant ses 6 degrés de liberté par rapport à un repère local, national (Lambert + NGF) ou mondial (WGS 84 - World Geodesic System of 1984) permet d'en mesurer la précision et la fiabilité dans la limite des degrés de liberté programmables selon le tableau suivant :

Degrés 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 °

Source : RGRA n° 736 janvier 1996

On remarque ici que les précisions annoncées sont de l'ordre du cm en X et en Y et de +/- 2 mm en Z. Dans le cas du projet APPITRACK il est demandé une précision de l'ordre de 1 mm en X, Y et Z. Mais ce banc d'essai a été conçu pour évaluer des systèmes de localisation statique et dynamique appliqués à des matériels routiers.

Simucirc

Ce logiciel développé par le LCPC est destiné à trois types d'intervenants potentiels dans la construction et l'entretien des routes, c'est à dire :

- les futurs utilisateurs du concept « construction de routes assistée par ordinateur (CIRC), pour qui ce logiciel montre ce qu'il est possible de faire dans les domaines de l'élaboration et de la transmission de consignes informatisées aux interfaces hommes/machines.
- les créateurs de nouveaux programmes et méthodes qui peuvent y puiser des éléments d'intégration de CAO, aide à la conduite, automatisation de machines et localisation dynamique de celles-ci, etc.
- les laboratoires pour lesquels Simucirc peut être un outil de recherche et de développement d'applications qui leur sont propres.

Le logiciel Simurcic après programmation de Matlab pour l'environnement graphique et de Simulink pour la modélisation des matériels comme par exemple les finisseurs (mise en oeuvre de couches de chaussée en enrobés ou en béton armé, cas qui nous préoccupe), permet d'intégrer les données graphiques, techniques, normatives, contractuelles d'un projet de construction ou d'entretien routier.

En résumé, la méthode de pose APPITRACK pour atteindre son objectif d'une pose précise à raison de 200 mètres de voie simple par poste de travail de 8 heures doit se libérer d'un maximum de contraintes notamment la topographie classique à partir de points d'axes et départs d'axes implantés à l'avancement sur le chantier de pose de voie et utiliser une localisation des deux machines en temps réel (celle qui met en oeuvre la dalle béton à l'avancement et celle qui met en place dans le béton frais les selles et les fiches d'insertion, qui permettront ensuite de fixer les rails) à partir d'un ou plusieurs procédés offerts par les nouvelles technologies de localisation déjà utilisées sur les engins de travaux publics tels que les bulldozers pour le terrassement, les pelles hydrauliques pour les chantiers de drainage, les niveleuses pour la mise en place des couches de chaussée, les compacteurs pour les couches de chaussées, les finisseurs pour les couches de roulement en béton ou en béton bitumineux.

Après l'examen des technologies utilisées par la SNCF et les entreprises de travaux publics pour la mise en oeuvre de chaussée, il apparaît que les niveaux de précision obtenus par la SNCF avec le GPS temps réel, indépendamment de facteurs extérieurs, est de 3,5 mm en planimétrie et 8 mm en altimétrie. Le théodolite vidéo asservi du DPS permet d'atteindre des précisions de l'ordre de 2mm en altimétrie et de 2 à 1 mm + 1 ppm en planimétrie selon l'équipement utilisé. (cf fiches techniques Leica en annexe).

Dans le cas du développement de l'Appittrack il s'agit de mettre en oeuvre :

1) un système capable d'assister le pilotage de la machine à coffrage glissant (slip-form) aussi bien en direction qu'en altitude. Ce système va s'articuler autour d'un théodolite motorisé video asservi (de type Leica TCA 1800) mis en station sur le chantier de la voie à réaliser. Cet appareil servant à mesurer les angles donne en permanence la position dans l'espace d'un point haut sur la machine (cible constituée d'un prisme) en X,Y,Z et la communique 3 à 4 fois par secondes. Le système radio de l'appareil transmet ces informations au DPS situé sur la machine slip-form qui compare ces mesures au

positionnement théorique du projet. Un automate programmable en phase avec un inclinomètre pilote les vérins de l'engin afin que celui-ci suive la trajectoire et les profils en long et en travers de la dalle béton.

2) développer un système capable d'assister le pilotage du robot d'insertion situé sur le chariot automoteur. Un théodolite motorisé vidéo asservi (de type Leica TCA 2003) mis en station sur le chantier donne en permanence la position d'un point haut sur le chariot automoteur en X,Y,Z et la communique 3 à 4 fois par secondes. Le système radio de l'appareil transmet ces informations au DPS situé sur le chariot automoteur qui compare ces mesures au positionnement théorique du projet. Un automate programmable en phase avec un inclinomètre pilote les vérins du robot afin que celui-ci suive la trajectoire pour positionner les selles et tiges d'insertion au mm près à raison de 48 cycles à l'heure soit 36 ml dans la dalle constituée du béton mis en oeuvre à l'avancement.

II - Caractère innovant du projet, existence d'un risque sur le résultat.

La pose de voie ferrée pour tramway en site urbain se fait traditionnellement au moyen de rails fixés sur des traverses calées sur du béton dont l'épaisseur varie selon la nature du sous-sol, les caractéristiques des charges des véhicules selon les hypothèses d'offre en véhicules x km du système sur un certain nombre d'années d'exploitation. Cette pose se fait après différents réglages effectués en prenant appui sur le plan de roulement c'est à dire le dessus du champignon des rails : ce mode ne permet pas des vitesses de pose élevées, limitées à environ 40-50 m de voie simple par poste de travail, mettant ainsi cette tâche sur le chemin critique du projet de système de transport à réaliser.

La pose de voie ferrée automatisée telle que proposée dans le projet APPITRACK est prévue pour un avancement de 25 ml/heure soit 200 ml par poste de 8 heures. Le gain de temps devient alors important et les nuisances de chantier auprès des riverains et les coupures de la circulation générale au droit des carrefours sont réduites d'autant : une contrainte importante pour l'organisation du chantier est de libérer suffisamment de linéaire d'emprise en aval du poste « pose de voie » si possible sans coupures (circulation générale transversale, passage de réseaux de concessionnaires, etc.). La préparation de chantier doit être optimum si le maître d'ouvrage veut éviter l'arrêt de la machine de pose de voies et les réclamations correspondantes de l'entreprise de pose de voie. Néanmoins, cette machine est prévue actuellement pour réaliser une seule voie, elle est donc plus manœuvrable qu'un finisseur d'autoroute et peut faire des aller-retours passant de la voie 1 à la voie 2 effectuant un plus grand linéaire de voie ferrée, l'amortissement de cette machine se fera ainsi dans un délai plus court.

Le caractère innovant du projet APPITRACK est que la pose des fixations des rails se fait en même temps que la réalisation de la dalle en béton et en continu : un finisseur met en oeuvre le béton selon l'épaisseur demandée et un chariot-robot automoteur suiveur du finisseur vient plonger dans le béton frais vibré les deux selles et 4 goujons correspondant à deux files de rails d'une voie simple. Un autre caractère innovant de ce projet est l'utilisation pour le finisseur et le chariot automoteur de nouvelles technologies de localisation dynamique et de topographie décrites ci-dessus avec des équipements directement connectés à l'ordinateur de bord du finisseur pour les caractéristiques géométriques de la dalle et à l'ordinateur de bord du robot de pose des selles pour les caractéristiques de pose des rails avec des précisions de l'ordre du mm dans les trois axes. Les données théoriques du projet passent directement aux deux machines de mise en oeuvre ce qui limite les manipulations de plans de construction, les différentes erreurs de lecture de profil en long et en travers et

dévers rencontrées sur les chantiers traditionnels. Un autre caractère innovant de la méthode de pose de voie ferrée par rapport aux chantiers routiers réside dans la contrainte d'obtention d'une précision millimétrique alors que les engins de travaux publics qui utilisent ces nouvelles technologies de localisation (GPS différentiel, plan laser, stations topographiques, etc.) pour des chantiers routiers n'atteignent pas encore ce niveau de précision, celle-ci étant plutôt de l'ordre du cm pour le profilage (niveleuse, finisseur) et du décimètre pour le surfaçage (compactage).

Le constructeur limite les difficultés pour la réalisation de l'atelier prototype à la largeur d'une voie simple (environ 3,00 ml), si l'expérience est rapidement concluante on peut penser réaliser les deux voies parallèles d'une ligne de tramway en même temps avec un finisseur et robot de gabarit double, ce qui amènerait des gains de productivité supplémentaires si l'organisation du chantier en site urbain le permet.

Nous ne pensons pas qu'il y ait de risques majeurs pour l'obtention du résultat. Néanmoins le projet est difficile :

- la mise au point du chariot automoteur, de l'automate de production des cycles de pose des selles pour 48 cycles à l'heure ou 36 mètres de voie à l'heure et la validation du logiciel de contrôle et de commande de ses fonctions, l'asservissement et le guidage à partir d'un ordinateur et des données en X,Y,Z, l'obtention de la mise en place précise au mm près sur des profils en long et en travers de tracé urbain tourmenté (nombreuses courbes, clohoïdes et dévers) risque de prendre du temps, le délai de mise au point du prototype de chariot automoteur destiné à poser des selles sur le béton frais en raison des nombreuses interfaces pourrait augmenter et l'arrivée du procédé industriel décalé d'autant.

- mais l'enjeu est tel dans l'environnement des systèmes intermédiaires de transport public que les procédés de mise en oeuvre de structures routières ont tellement évolué en productivité que la pose de voie ferrée doit aussi évoluer dans ce sens et profiter des dernières techniques de localisation, de robotisation et d'informatisation. Nous pensons que le constructeur prendra donc toutes les dispositions pour obtenir le résultat qui le mettra en bonne position de concurrence pour la réalisation des infrastructures et des offres clé en main de système de métro léger ou tramway moderne.

- par ailleurs si ce système de pose de rail peut être mis au point pour la pose de rails de tramway il peut ultérieurement être adapté à des poses de voies de métro, de chemins de fer (trains urbains ou TGV), rails de voie industrielle pour grues porte-container, ponts roulants,etc. ou la pose de rail pour des systèmes intermédiaires sur pneus guidés (type TVR ou Translohr).

III - Evaluation des coûts du développement

L'entreprise Alstom se donne pour objectif d'avoir le guidage industriel au point pour la fin de l'année 2000 ce qui lui permet d'établir un programme qui se subdivise en 4 tâches principales que nous rappelons ci-après :

1 - Inventaire de l'offre et des travaux de recherche en cours

Étude de la proposition APPITRACK PREDIT 99

Durée prévue 1 mois, terminé fin novembre 1999. Pour cette tâche l'entreprise a prévu les moyens suivants :

- 2 mois d'ingénieur soit : $2 \times 38\ 000 \times 2,2 =$ 167 200 F HT

- 1/2 mois de projeteur soit : $0,5 \times 24\ 000 \times 2,2 =$ 26 400 F HT

Total prestation 1 : 193 600 F HT

2 - Conception d'un dispositif probatoire

Durée prévue 5 mois, terminé fin avril 2000.

Pour cette tâche l'entreprise a prévu les moyens suivants :

- 8 mois d'ingénieur soit : $8 \times 38\ 000 \times 2,2 =$ 668 800 F HT

- 4 mois de projeteur soit : $4 \times 24\ 000 \times 2,2 =$ 211 200 F HT

- 2 mois de dessinateur : $2 \times 19\ 000 \times 2,2 =$ 83 600 F HT

Total prestation 2 : 963 600 F HT

3 - Réalisation du dispositif probatoire et voie d'essais

Durée prévue 6 mois, terminé fin octobre 2000.

Pour cette tâche l'entreprise a prévu les moyens suivants :

- 10 mois d'ingénieur soit $10 \times 38\ 000 \times 2,2 =$ 836 000 F HT

- 2 mois de projeteur soit : $2 \times 24\ 000 \times 2,2 =$ 105 600 F HT

- 5 mois de dessinateur soit : $5 \times 19\ 000 \times 2,2 =$ 209 000 F HT

total : 1 150 600 F HT

Des travaux de sous-traitance qui consistent en :

I - Étude, réalisation et essais du dispositif probatoire de guidage :

- étude de faisabilité et étude de principe du système concerné :

35 000 F HT

- Equipement machine de pose des selles et goujons :

- phase 1

Études guidage ou définition du produit :

200 000 F HT

- phase 2

Construction et essais d'une machine pour un rendement de 25 m/h :

. guidage positionnement évalué à 60 % du montant relatif au chariot automoteur de base et les prestations complémentaires (essais, réception, formation personnel, transport sur site, protection anti-vandalisme, soit:

1 360 000 F HT

. matériel localisation et logiciel : 472 000 F HT

- Equipement de localisation-guidage du finisseur de mise en oeuvre de la dalle

:

ordinateur, logiciels, capteurs, etc. : 343 000 F HT

total : 2 410 000 F HT

II - Voie d'essai (environ 400 ml)

Le test du guidage et son aptitude à permettre un positionnement dans les tolérances (+/- 1 mm en X,Y et Z) avec une productivité nominale (200 ml/jour ou 25 ml/heure), le constructeur considère qu'il est nécessaire de prévoir 400 ml de voie.

Le coût d'exécution de cette voie est considéré comme rémunéré par son usage propre. Il est prévu néanmoins une provision pour frais divers, location de matériel de topographie, des expertises, mesures, etc.

300 000 F HT

Total sous-traitance : 2 710 000 F HT

Total prestation 3 : 3 860 600 F HT

4 - Conception de l'outil de réalisation industrielle de la voie

Durée prévue 3 mois, terminé fin décembre 2000.

Pour cette tâche l'entreprise a prévu les moyens suivants :

- 4 mois d'ingénieur soit $4 \times 38\ 000 \times 2,2 =$ 334 400 F HT

- 2 mois de projeteur soit : $2 \times 24\ 000 \times 2,2 =$ 105 600 F HT

- 1 mois de dessinateur soit : $1 \times 19\ 000 \times 2,2 =$ 41 800 F HT

Total prestation 4 : 481 800 F HT

Montant total du budget correspondant aux prestations 1 à 4 :

5 499 600 F HT

soit TTC

6 632 518 F TTC

Le détail des coûts unitaires de main d'oeuvre nous a été fourni par le constructeur ainsi que les devis détaillés correspondants aux prestations sous-traitées. Cette étude et réalisation d'un prototype d'une machine d'insertion pour une mise en place de selles et goujons avec une précision du mm fait appel à une main d'oeuvre très spécialisée pour réaliser un chariot automoteur et un robot de pose de selles dans un délai très court ce qui explique le montant des coûts unitaires de main d'oeuvre élevé, le nombre d'hommes mois (40,5 h.m) c'est à dire une équipe de 3 hommes pendant 1,12 année nous paraît correct compte tenu de l'enjeu.

Le montant sous-traité de 2 710 000 F HT (devis en notre possession) se répartit en 300 000 F HT pour les essais sur une voie d'essais, 235 000 F HT d'études pour le guidage, 1 360 000 F HT pour l'équipement de guidage et de positionnement d'un chariot automoteur pour 48 cycles à l'heure, 472 000 F HT pour le matériel embarqué sur machine de pose des selles (ordinateur, inclinomètre, logiciels, capteurs et automatismes), 343 000 F HT pour l'équipement embarqué du finisseur (ordinateur, inclinomètre, logiciels, capteurs et automates de régulation, prisme). Ces coûts sont homogènes avec ceux pratiqués dans la profession pour la conception et la réalisation d'équipements spéciaux et pour les systèmes de localisation et de topographie ainsi que la mise au point de modèles mathématiques : par ailleurs l'intervention d'au moins trois prestataires et autres fournisseurs (hydraulique, mécanique, etc.) entraînent le suivi et la coordination de nombreuses interfaces qui entraînent des surcoûts en aller retour, réunions de mises au point pour éviter d'éventuels contentieux ou des retards dans la livraison des équipements.

IV Conclusion

La faisabilité de la mise en oeuvre d'une voie ferrée automatisée a été démontrée par des essais et a fait l'objet d'un brevet déposé par le constructeur. L'implantation et le contrôle géométrique de la réalisation du premier tronçon d'essai ne sont pas satisfaisants : la tâche de topographie et de contrôle de la voie étant sur le chemin critique des différentes opérations de mise en oeuvre de la voie en site urbain, le constructeur souhaitant augmenter la cadence de mise en oeuvre de la voie de 40 à 200 ml de voie simple par jour, il est nécessaire de conduire l'atelier de mise en oeuvre de la voie et de pose des selles avec les nouveaux moyens de localisation dynamique proposés par les nouvelles technologies. Les constructeurs de matériels de travaux publics ont commencé à utiliser de nouvelles méthodes et équipements de conduite. Parmi toutes les méthodes examinées :

- il apparaît que le GPS temps réel ou RTK n'est pas encore assez précis (la SNCF a constaté une précision de 3,5 mm en planimétrie et 8 mm en altimétrie) et est tributaire d'un environnement adapté,

- le DPS avec le théodolite vidéo-asservi est adapté au conditions de réalisation d'un chantier de voie ferrée avec une intervisibilité de 400 m de part et d'autre de celui ci et des précisions de l'ordre de 2 mm à 1 mm + 1 ppm en altimétrie et planimétrie selon l'équipement utilisé.

Ce projet se caractérise par des systèmes de repérage automatiques et reliés au système informatique des données du projet (profil en long et en travers), les données du projet passent directement aux machines de mise en oeuvre par les ordinateurs de bord de la machine à coffrage glissant (slip-form) et du chariot automoteur supportant le robot d'insertion, ce qui limite les manipulations et risques d'erreurs.

L'atelier de pose de voie automatisée constitué de deux machines automotrices se distingue des ateliers de réalisation de chaussées routières par la contrainte d'obtention de la précision au mm dans les trois axes à l'avancement (30 ml/heure) ce qui à notre connaissance n'est pas encore réalisé industriellement sur un chantier de pose de voies ferrées.

En ce qui concerne le coût du développement, il se répartit en un coût de 40,5 h.m plus les charges salariales et les frais de structure pour les différentes études et une partie sous-traitée de 2,71 MF représentant le chariot automoteur et le robot, le matériel embarqué (ordinateur, inclinomètre, logiciels, capteurs et automatismes) sur le chariot et sur la machine à coffrage glissant ou slipform. Ces coûts sont homogènes avec ceux pratiqués dans la profession pour la conception et la réalisation d'équipements spéciaux, pour les systèmes de localisation dynamique et de topographie et l'adaptation de modèles de calcul : il ressort que le salaire moyen de l'homme x mois est de 25 000 F.

Nous pensons que le constructeur peut tenir son objectif : néanmoins le projet est difficile et le délai court proposé pourrait s'allonger si l'ensemble des interfaces n'est pas réglé rapidement : de nombreux essais en grandeur réelle devraient être effectués avant d'obtenir la qualification en vue de la réalisation de voies ferrées.

L'enjeu est tel dans l'environnement des systèmes intermédiaires de transport collectif qui s'adressent aux villes moyennes, que les procédés de mise en oeuvre des structures routières ont tellement évolué en productivité que la pose de voies ferrées doit aussi évoluer dans ce sens et profiter des dernières techniques de localisation dynamique, de robotisation, d'informatisation, etc. afin de se positionner dans une concurrence normale et internationale.

Ce procédé ayant pris sa dimension industrielle pourra être ensuite adapté pour la construction de voies de métro, de TGV, de RER, des voies industrielles et pour la pose de rail de guidage de systèmes intermédiaires sur pneus par exemple.

Personnes rencontrées

Alstom : M. Ehrsam, concepteur de la voie en béton armé en continu.

LCPC Nantes : M. Bétaille, chercheur travaillant avec M. Peyret sur la localisation des engins de travaux publics et le centre d'essais Sessyl.

SNCF, direction de la topographie: M. Hallé.

RATP, service voie ferrée : M. Boisson.

CSTB, direction des Projets & Développement : M. Salagnac.

Adresses Internet concernant les équipements de topographie et de guidage de matériels de travaux publics :

www.leica-geosystems.com
www.voegele-ag.com
www.wirtgen.de
www.gomaco.com
www.listech.com.au
www.sokkia.nl
www.trimble.com
www.cat.com
www.applanix.com

Bibliographie

Andrieu T., Barnadat C., Fourey H., Fabreguettes C., Miramalou J.P., Robillard J.P., Jean Lefebvre, « *La conduite assitée par ordinateur* », dans la RGRA n° 771 mars 1999.

Berthomier A.M., Peyret F., (1995), « *L'évolution des techniques de guidage des machines de répandage* », dans la Revue Générale des Routes d'octobre 1995.

Briquet P., LCPC, Blanché E., Godefroy J.P. CRET, Mairie de Paris,(1996), « *Métrologie des déplacements par GPS en milieu urbain dense* », dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 206 - Novembre-Décembre 1996 - Réf. 4078 - pp 5 - 15.

Botton S., Duquenne F., Egels Y., Even M., Willis P., Conseil National de l'Information Géographique, Groupe Positionnement Statique et Dynamique, « *GPS : localisation et navigation* », édition Hermes, Paris 1997, 159 p.

CIRC, Computer Integrated Road Construction, fiche du projet européen Brite - EuRam (BE-96-3039) CIRC financé par la Commission Européenne DG XII, lancé à Grenoble le 20 Janvier 1997.

De Vos L;, TNO-BOUW, Hasara B., Spectra Physics Laserplane, (1993), « *Field applications with CAPSY* », dans les actes de Automation and Robotics in construction X, 1993.

Ebneter F., SBB Bern, Köthe K., DB AG Frankfurt, (1994), « *Vermessung bei SBB und DB AG - Gemeinsame Aufgaben und Entwicklungen-* », article dans Eisenbahingenieur 45 (1994) 10. pp 728-735.

Fleury J., Risch A., Direction de l'Equipement de la SNCF, (1990), « *La topographie au service des TGV* », dans la Revue Générale des Chemins de Fer, mars 1990.

Fleury J., Chef de la division de Topographie SNCF, « *Implantation des voies ferrées pour TGV* » dans actes WCTR 1992.

Froumentin M., Cete de Normandie, Peyret F., LCPC, Martineau Y., Cochery Bourdin Chaussée, (1997), « *Le GPS vient en aide au conducteur de compacteur* », dans la RGRA n° 750, avril 1997.

Gallenne M.L, LCPC, Irastorza-Barbet D., Usirf, « *Des couches de chaussée, répandage des matériaux au finisseur* », dans la RGRA n° 746, décembre 1996.

Goto F., Takasaki factory, Saitoh T., Nippon Hodo Co, (1992), « *Development of advanced Asphalt finisher* », dans les actes du 9th ISARC, 3-5 juin 1992 Tokyo.

Gourdon J.L., Gallenne M.L., LCPC, (1989), « *Fonctionnement et automatisation des finisseurs* », dans le Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 159 - janvier - février 1989 Réf. 3365.

Gourdon J.L., Charonnat Y., Gallenne M.L., LCPC, Delorme J.L., Laboratoire Régional de l'Est Parisien, (1990), « *Aide à la conduite des engins de répandage : créer des informations et les visualiser* », dans les actes du colloque Route et Informatique, Paris mars 1990.

Gourdon J.L., Peyret F., LCPC, (1990), « *Modelling and controlling the road finishing process* », dans les actes du 7th ISARC, 1990.

Herbsman Z., Ellis R.D., University of Florida, (1988°, « *Potential application of robotics in highway construction* », dans les actes du 5th ISARC, june 6-8 1988, Tokyo.

Hintzy G., GTM Division Terrassements, Pichot C., Dassault-Sercel NP, (1999), « *Guidage d'engins de travaux publics par GPS : l'exploitation optimale des parcs de machines* », dans la Revue Générale des Routes et Aérodromes n° 771, mars 1999.

Köthe K., DB, (1992), « *Satellitengestützte Vermessung : Neue Technologien verändern die Vermessungstechnik* », article dans Eisenbahningenieur 43 (1992) 9. pp 536-541.

Kuschner R., (1999), « *Des travaux d'arase de chaussées guidés par GPS* », article du Moniteur des TP 1999.

Lahr B., (1999) « *Homogene Koordinaten durch GPS-Referenzstationen : Erfahrungen mit GPS-Echtzeitanwendungen in Hessen* », article dans Eisenbahningenieur 50 3/99. pp 38-41.

Lange W., DB netz, Zentrale - Infrastruktur Frankfurt am Main, (1998), « *Beiträge der Geodäsie zu einer Zukunftsorientierten Bahn* », article dans Eisenbahningenieur 49 12/98. pp 12-16.

La vie du rail, 5 janvier 2000, « *Lancement des études techniques pour définir le projet Galileo* », article en p19.

Le Corre J.F., Garcia G., ENSM, (1991), « *Determination of Six Degrees of freedom of a moving civil-engineering vehicle* », dans les actes du 8th ISARC, 1991.

Le Corre J.F., ENSM, Peyret F., LCPC, (1990), « *SIREM : the absolute location of civil engineering equipment* », dans les actes du 6th ISARC, 1990.

Lippok P., (1997), « *GPS im Einsatz bei der DB AG : ein Beispiel aus der Region München* », article dans Eisenbahningenieur 48 8/97. pp 43-44.

Martineau Y., Directeur du groupe Eurovia, (1997), « *Guidage automatique des niveleuses combinant laser/GPS, Une première pour Eurovia sur l'A 20, déviation de Châteauroux* », dans la RGRA n° 757, décembre 1997.

Peyret F., LCPC, Lecorre J.F., Laboratoire d'Automatique de Nantes-CNRS, (1990), « *La robotisation des engins de construction routière : d'abord se localiser* », dans les actes du colloque Route et Informatique, Paris mars 1990.

Peyret F, Hervé P., LCPC, (1992), « *Towards computer integrated road construction* », dans les actes du 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, june 3-5, 1992 Tokyo Japan.

Peyret F., Lemaire C., Bétaille D., LCPC, (1996), « *Mise en service de la station d'étude des systèmes de localisation Sessyl* », dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 205 - Septembre Octobre 1996 - Réf- Nit 4077 - pp 105-109.

Peyrret F., LCPC (1996), « *Application des techniques de localisation à la robotique routière* », dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 205 - Septembre Octobre 1996 - Réf- Nit 4077 - pp 3 - 14 .

Pieskä S., Mäkinen A., Kostamovaara J., Elsilä M., Myllylä R., Technical Research Center of Finland Electronics Laboratory, (1989), « *Bulldozer tracking and navigation using servo-controlled laser range finding technique* », dans les actes du 6th ISARC, 1989.

Sada T., Nakagawa Y., Tomonori T., Technical Research Institute, Mitsui Construction Co., (1991), « *A GPS application for positioning of earthwork equipments* », dans les actes du 8th ISARC, 1991.

Salagnac J.L., Siino S., CSTB, (1988), « *Structuration environment and guidance of a mobile robot for construction applications* », dans les actes du 5th ISARC, june 6-8 1988, Tokyo.

Salagnac J.L., CSTB, (1989), « *A general positionning system for construction robotics* », dans les actes du 6th ISARC, 1989.

Sauermann K., Schmiddem W., Schwarlose A., (1994), « *Satellitenvermessung mit GPS : effiziente Beobachtungs-verfahren zur Verdichtung des bestehenden Gerüstpolygons* », article dans Eisenbahningenieur 45 (1994)6. pp 431 - 433.

Siems E., DB Frankfurt (1988), « *Aufgabenfelder der Vermessungsingenieure für die neue Bahn* », article dans Eisenbahningenieur 39 (1988) 1. pp 19-23.

Tadashi K., Nishizawa S., Toida H., Construction Technology Development Dept, (1993), « *Survey Robot Using Satellite GPS* », dans les actes de Automation and Robotics in construction X, 1993.

Timm M., Europrojekt Verkehr, (1998), « *Der Wandel der geodätischen Aufgaben bei den deutschen Eisenbahnen : Aus der Sicht eines Ingenieurbüros* », article dans Eisenbahningenieur 49 2/98. pp 42-43.

Tochizawa M., Takeda S., Kamada S., Hirosawa K., Kikuchi Y., Wada T., Itoh S., Komatsu Ltd & Shimuzu Corporation, (1991), « *Automatic excavator* », dans les actes du 8th ISARC, 1991.

Étude de la proposition APPITRACK PREDIT 99

Ulrich A., Joseph Vögele AG, (1990), «*Automatic levelling in road construction*», dans les actes du 7th ISARC, 1990.

Umeda R., Ikeda H., Yasu H., Masuyama Y., Takagi Y., Goto F., Fukukawa M., Kinoshita S., Gocho T., Advanced construction technology center, the Nippon Road, (1993), «*Development of a robot asphalt paver*», dans les actes de Automation and Robotics in construction X, 1993.

Völter U., (1997), «*Vermessung Feste Fahrbahn : Vorschlag für ein Verfahren zur Ortsbestimmung des Fertigungsprozesses*», article dans Eisenbahningenieur 48 4/97. pp 32-34.

ANNEXE

-1. APPITRACK Prédit 99 (Alstom): 10 pages

- * résumé du besoin
- * État de l'art
- * Construction de la voie APPITRACK
- * Spécification détaillée du besoin
- * Programme des travaux
- * Budget de réalisation.

- 2. Synoptique des opérations de mise en oeuvre d'une voie ferrée sur traverses (tramway de Nantes, SEMITAN)). 11 pages

- 3. Lever topographique par méthode GPS Temps réel (SNCF, Division de Topographie) 11 pages.

- 4. Présentation des illustrations réalisées sur une voie d'essai effectuée par Cegelec en Île de France.7 pages.

- 5. Fiche de présentation du Programme de recherche européen : Computer Integrated Road Construction CIRC : 4 pages.

- 6. Fiches de DPS : DPS Finisseur, DPS Autograde/ Slipform, DPS Niveleuse, DPS Pack routier, Produits de D&P Systems.

- 7. Fiches Leica concernant les théodolites utilisés dans les stations totalement automatiques et leur précision :

Leica TCA 1100/ 1500/ 1700/ 1800 et TC 2003/ TCA 2003

- 8. Applanix'Position and Orientation System for Railroad Surveying & Track Geometry Measurment : POS/TG Fiche d'une technologie GPS/unité de mesure inertielle pour le contrôle des voies et de la géométrie des voies.

- 9. Vue schématique du DPS et d'un autograde de mise en oeuvre de structures de chaussée