

# Guidage et commande de machines de chantier

## De l'implantation statique à celle cinématique

■ Werner STEMPFHUBER - Hilmar INGENSAND - traduction : François GIGON, Florence VAUDAN

### MOTS-CLÉS

Contrôle et commande de machines de chantier, capteurs de mesures 3D, construction

*La problématique du guidage et de la commande de machines de chantier doit être considérée et comprise comme un domaine de l'ingénierie géodésique*

*précisément de la navigation. Les tâches requises, telles que l'acquisition et la vérification des données, l'élaboration des données planimétriques ainsi que le calcul des paramètres de navigation, sont exécutées en rapport avec les disciplines spécifiques de la fabrication de machines, de la cybernétique et le personnel qualifié de la construction. Par conséquent, le spectre tout entier des techniques de mesures géodésiques va y être utilisé. De plus, la compréhension géométrique entre la trajectoire 3D et les informations complémentaires correspondantes (orientation de la machine, pentes longitudinale et transversale de l'outil, données du modèle) est indispensable. L'article ci-dessous fait le point sur la technique et le rôle de l'ingénierie géodésique et, simultanément, met en évidence les nouvelles exigences qui en résultent.*

Lors de la réalisation de grands travaux publics, tels que construction de tunnels, de voies de chemins de fer, d'aéroport et de routes, de lourdes machines de chantier sont engagées. Traditionnellement, des niveleuses, des fraiseuses, des finisseuses à coffrages glissants et des finisseuses d'asphalte sont commandées au moyen d'un balayage mécanique de fils conducteurs en plan et en nivellement. Les travaux avec excavatrices, machines à chenilles ou à rouleau n'étaient jusqu'ici qu'indirectement contrôlés, i.e. par des travaux de mesures classiques. Des systèmes basés sur un laser rotatif et utilisant un plan horizontal ou légèrement incliné comme référence altimétrique des travaux de terrassement, existent depuis une vingtaine d'années. De ce fait et depuis plusieurs années, des systèmes qui balayent des fils conducteurs à l'aide de capteurs ultrasoniques ou copient une altitude de référence (p. ex. un revêtement de chaussée ancien ou fraisé) au moyen de capteurs ultrason, sont employés pour

l'affichage mais aussi pour le réglage des hauteurs. Au milieu des années 90, la possibilité de décrire un mouvement dans un ordre de grandeur proche du centimètre fit son apparition grâce au développement de nouvelles technologies telles que les tachéomètres motorisés et les récepteurs GPS en mode "Real-Time-Kinematic". Plus ou moins au même moment débuta l'engagement de capteurs 3D pour le guidage ou la commande de machines de chantier. À côté de la commande de tunneliers au moyen de tachéomètres motorisés, l'aiguillage tridimensionnel d'une finisseuse à coffrages glissants de marque Wirtgen pour la construction du nouveau tracé ICE entre Frankfort et Cologne fut une première en la matière. Également à la même époque, une finisseuse d'asphalte était guidée par tachéomètres motorisés sur un tronçon d'autoroute à proximité de St-Gall.

De nos jours, les travaux de terrassement, de pose et de rénovation de couches d'asphalte ou de béton requièrent de plus en plus souvent des systèmes de guidage visuel, pour une régulation des altitudes ou même pour un guidage 3D totalement automatisé. Cette approche basée sur un positionnement tridimensionnel en temps réel doit être considérée



**Figure 1.** Projet pilote : aiguillage tridimensionnel d'une finisseuse à coffrages glissants de marque Wirtgen pour la construction du nouveau tracé ICE entre Frankfort et Cologne, 1999 (à gauche) ; commande 3D d'une finisseuse d'asphalte pendant l'assainissement de l'autoroute à St-Gall - Suisse, 2000 (à droite)

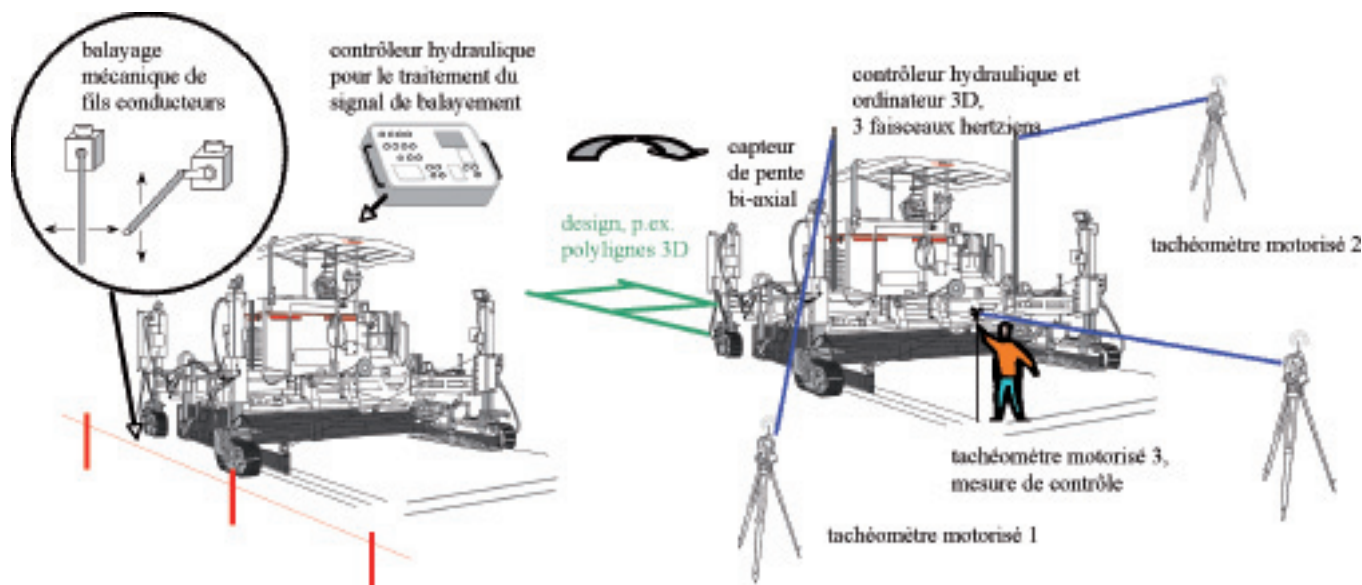


Figure 2. Procédé classique au moyen de fils conducteurs / Procédé 3D sans fil de finisseurs à coffrages glissants (Stempfhuber 2006)

comme faisant partie de l'ingénierie géodésique de par ses applications de réduction de pentes longitudinale et transversale et de détermination de l'orientation de la machine. L'exemple d'un système sans fil conventionnel pour finisseuses à coffrages glissants illustre bien cette transition (figure 2).

## Classification des différents champs d'application

Lors de projets de grande envergure, comme par exemple la construction d'un nouveau tronçon d'autoroute, les différentes phases de travail se divisent en acquisition des données, levé préalable, préparation des données et élaboration d'un modèle, travaux de terrassement, rénovation et construction de couches ainsi que vitrification des couches.

Il en résulte une classification des systèmes en 1D ou 3D pour le guidage, la commande semi-automatique et celle entièrement automatique.

Cependant, les domaines de l'acquisition des données, de l'élaboration du modèle numérique de terrain correspondant ou de celle des polygones 3D sont à discuter. En raison de la diversité des formats de données, cette étape occupe un rôle central dans l'ensemble du projet. Différents fournisseurs de systèmes ont réalisé un flux de données plus ou moins continu entre leurs logiciels de bureau, un enregistreur de données pour récepteur GNSS et des tachéomètres avec fonctions de contrôle et vérification. La difficulté réside en général dans l'échange de données de différentes provenances. De plus, l'orientation visuelle, précisément le contrôle des fils conducteurs sur le chantier, fait défaut lors de l'utilisation de la commande de machines de chantier. Quelques

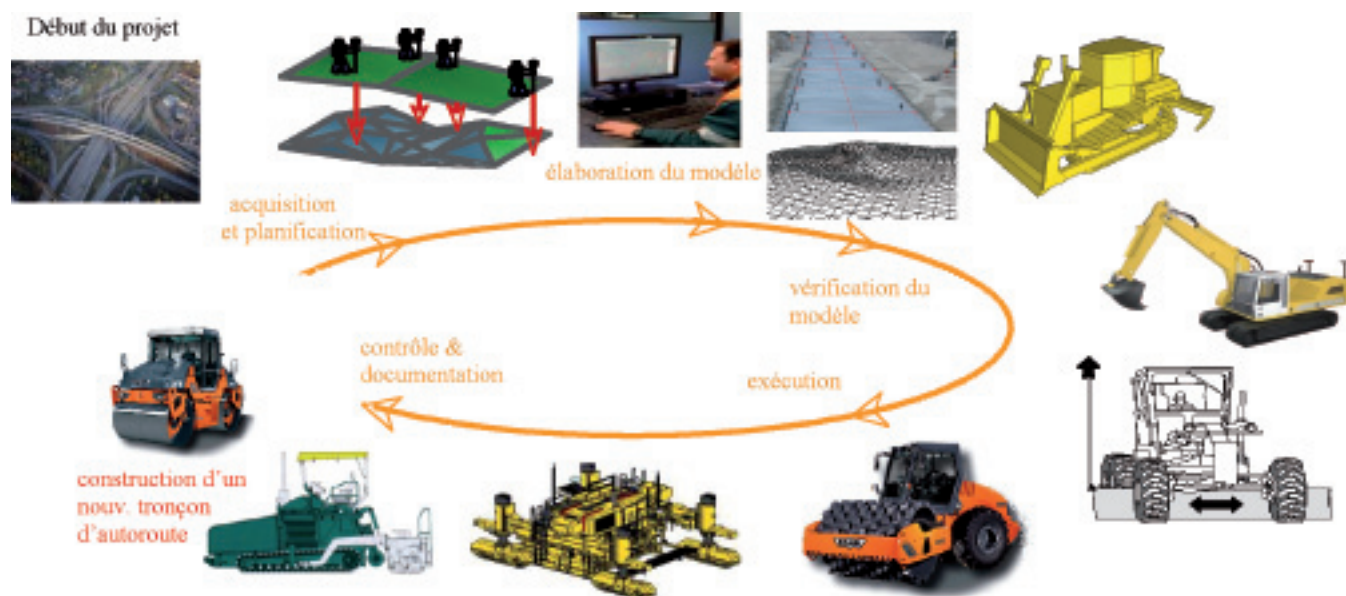


Figure 3. Application dans le cadre d'un nouveau tronçon d'autoroute

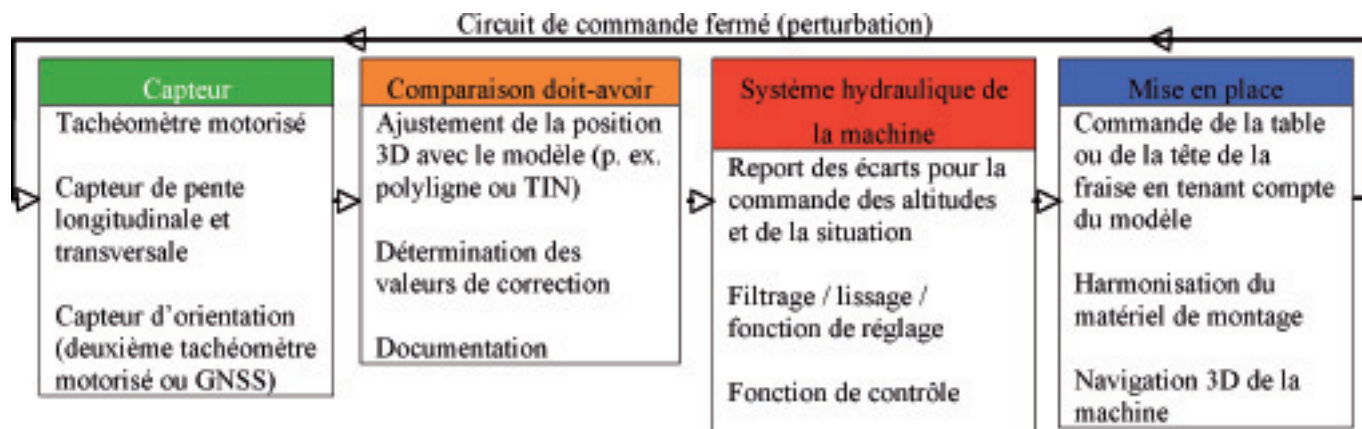


Figure 4. Circuit de réglage fermé comme exemple d'une commande tridimensionnelle totalement automatisée.

logiciels offrent des contrôles de plausibilité comme par exemple des relations de voisinage (le plus utilisé étant le maillage TIN ? Triangular Irregular Network) avec détermination du gradient maximum. En raison du manque de référence optique, le modèle de données doit absolument être vérifié avec l'engagement des machines. Il est parfois possible de réaliser un modèle simple directement sur le terrain, à partir des mesures, et de l'importer ensuite aussitôt sur l'ordinateur des machines.

### ■ Subdivision en systèmes de guidage et de commande

Pour faire preuve de plus d'exactitude avec la terminologie, il convient de distinguer les systèmes de guidage, également appelés systèmes de conduite, des systèmes de commande. Les systèmes de commande automatique sont aussi bien utilisés pour un réglage altimétrique automatique que pour un réglage tridimensionnel. Une classification s'effectue de la manière suivante :

#### Systèmes de guidage

Les systèmes de guidage (English = Indicate or Guidance Systems) utilisent des procédés dans lesquels des informations visuelles qui concernent la manipulation de la machine, respectivement de l'outil (p. ex. la pelle d'une excavatrice ou des lames de bulldozers, de niveleuses), sont préparées à l'intention du machiniste. Ces indications peuvent être référencées en 1D avec mention de hauteur ou de pente, ou en 3D. Le circuit hydraulique de la machine n'est ici pas l'objet d'une discussion. Etant donné que l'opérateur commande sa machine manuellement, les aspects importants de sécurité des systèmes sont à respecter dans une moindre mesure. L'obtention de bons résultats exige ici encore et toujours un machiniste expérimenté.

#### Systèmes semi-automatiques

Dans le cas de systèmes semi-automatiques (English = Control Systems or Grade Control), la position 2D de la machine est représentée graphiquement par rapport au modèle de données et la hauteur de l'outil est réglée avec la pente transversale correspondante. Le principe de réglage altimétrique est semblable aussi bien pour les procédés

conventionnels que pour ceux basés sur un positionnement 3D. L'écart altimétrique entre le "doit" et l'"avoir" est transmis au circuit hydraulique en tant que grandeurs de commande préalablement filtrées. Un contrôleur universel endosse ici la communication entre le système de mesure et la soupape hydraulique. De tels systèmes sont surtout utilisés avec des niveleuses, des véhicules chenillés, des raboteuses mais aussi des finisseuses d'asphalte, pour lesquels le réglage altimétrique d'une table flottante représente un processus complexe lors de la pose de l'asphalte. Le machiniste conduit et dirige seul la machine, alors que le circuit de réglage fermé commande l'outil ou le soc automatiquement. Les premiers systèmes qui permettent un réglage altimétrique de la pelle d'une excavatrice existent également.

#### Système de commande 3D entièrement automatique

Les systèmes de commande 3D entièrement automatique (English = 3D-Control) sont actuellement employés exclusivement avec les finisseuses à coffrages glissants, i.e. pour la pose de béton. A cette occasion, on effectue aussi bien la commande altimétrique que la commande directionnelle, i.e. une navigation autonome de la machine. La comparaison 3D entre le "doit" et l'"avoir" définit en même temps les grandeurs de commande hydraulique. Le machiniste n'a plus qu'à réguler la vitesse. Ces applications qui demandent une précision de l'ordre de 5 mm, fixent de très hautes exigences pour l'entier du système et ne peuvent être atteintes que si, d'une part l'instrumentation est à même d'atteindre ces performances, d'autre part les capteurs sont synchronisés de manière suffisante.

Un circuit de réglage fermé constitue le fondement aussi bien des systèmes de commande semi-automatique que des systèmes de commande entièrement automatique. Les étapes suivantes seront exécutées séquentiellement par le logiciel (figure 4). Un listage des applications les plus courantes (tableau 1), groupées par machine de chantier, avec les subdivisions correspondant aux systèmes de guidage et de commande ainsi qu'aux attributions des exigences de précision et de vitesse maximale, peut être utilisé comme aperçu. Des variations à l'intérieur même de ce tableau sont certainement à prévoir, dans un contexte global, pour chacun des projets de construction de routes considérés.





Machine \ Paramètre	Précision altimétrique	Précision planimétrique	Vitesse	Guidage de machine	Commande de machine
Niveleuse	10-20 mm	20-30 mm	Jusqu'à 35 km/h	✓	Altimétrie uniquement
Véhicule chenillé	20-30 mm	20-50 mm	Jusqu'à 12 km/h	✓	Altimétrie uniquement
Excavatrice	20-30 mm	20-50 mm	-	✓	X
Finisseuse d'asphalte	5 mm	5 mm	Jusqu'à 10 m/min	X	Altimétrie uniquement / 3D
Finisseuse de béton	5 mm	5 mm	Jusqu'à 3 m/min	X	✓
Curb & Gutter	5 mm	5 mm	Jusqu'à 5 m/min	X	✓
Fraise	5-10 mm	10-20 mm	Jusqu'à 15 km/h	X	Altimétrie uniquement / 3D
Rouleau	-	10-20 mm	Jusqu'à 10 km/h	✓	X

**Tableau 1.** Classification selon le domaine d'utilisation, ✓ = système existant / X = système pas (encore) existant

Les systèmes de guidage 1D avec pente transversale sont fréquemment considérés, selon la terminologie employée pour le guidage et la commande de machines de chantier, comme étant des systèmes 2D. Il en va de même pour les systèmes semi-automatiques définis comme systèmes de commande 3D. D'un point de vue géodésique, cette définition n'est pas commune.

### ■ Fournisseur de système

Des fabricants d'instruments de mesure géodésiques comme Trimble et Topcon/Sauer-Danfoss offrent simultanément des systèmes pour le guidage et la commande de machines de chantier. Les produits de Leica Geosystems se réduisent, à quelques exceptions près, à ceux des entreprises SBG, Mikrofynd, Scanlaser et Topolaser dans la "Hexagon Machine Control Division", bien que celles-ci n'apparaissent pas sous un "Brand Label" commun. D'autres systèmes sont, notamment, proposés par les entreprises Carlson, Moba, Wirth, Novatron, Romar, Prolec, Novariant et Axiomatic. Les systèmes 3D basés sur la technologie GNSS ou sur des tachéomètres motorisés ne représentent ici qu'un infime pourcentage du marché mondial estimé à plus de 100 Mio d'euros. Cette section définit toutefois l'interface entre l'ingénierie géodésique et le domaine de guidage et de commande 3D de machines de chantier.

## Technique sensorielle de mesure

Les applications non basées sur des capteurs de positionnement 3D utilisent des lasers rotatifs, des capteurs ultrason, un balayage de fils conducteurs optique ou mécanique en relation avec des capteurs de pente, pour la détermination des paramètres de réglage. Le laser rotatif définit un plan homogène et horizontal ou légèrement incliné dans un rayon de quelques centaines de mètres. Au moyen d'un ou deux récepteurs laser placés sur la machine, il est possible d'afficher les hauteurs relative et absolue. Cette hauteur peut également être utilisée en tant que paramètre pour le réglage altimétrique (Stempfhuber 2007). Les capteurs ultrason "mesurent" la différence de hauteur jusqu'au revêtement de la chaussée et permettent de gérer la hauteur de l'outil à gauche et à droite au moyen de régulateurs de pente transversale supplémentaires. Par exemple, le Moba Big Sonic Ski combine chaque distance mesurée par les capteurs ultrason puis calcule une distance moyenne à la surface existante de la chaussée (fig. 5). Ce procédé est utilisé par presque toutes les finisseuses d'asphalte.

Les capteurs de mesures 3D sont généralement utilisés avec des modèles inhomogènes. Mis à part cette application, les capteurs de mesures 3D représentent d'importants fondements pour les systèmes de commande 3D entièrement automatique.



**Figure 5.** Report altimétrique à partir de mesures de distance qui proviennent de plusieurs capteurs ultrason, à l'exemple de Moba Big Sonic Ski ([www.moba.de](http://www.moba.de)).

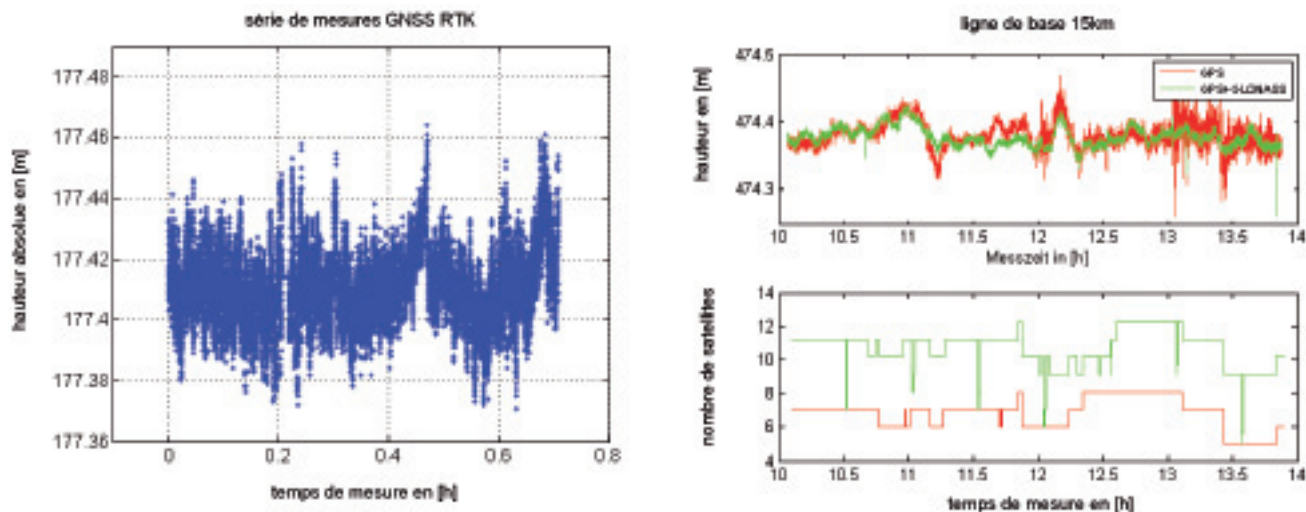


Figure 6. Précision altimétrique d'un point statique à partir de mesures cinématiques GNSS.



### ■ Récepteur GNSS

Tous les fabricants et utilisateurs essaient de couvrir un domaine d'application aussi large que possible au travers de la technologie GNSS. Pour le machiniste, l'utilisation est certainement plus simple qu'avec des tachéomètres motorisés. Ceci est notamment dû à la configuration du système et au déroulement de la transformation de coordonnées. Chaque utilisation s'appuie et est évaluée sur la base des paramètres de la constellation satellite (nombre de satellites et valeurs DOP). Les paramètres de transformation du système de projection sont établis, en règle générale, au moyen du modèle de données fourni par les géodésiens, puis transférés dans le système de commande de la machine. Tout comme la vérification des données, cette tâche doit cependant faire l'objet d'une attention particulière. Le système est poussé à ses limites physiques lorsque la précision altimétrique doit atteindre 1 à 2 cm, notamment en cas de mauvaise couverture satellites ou d'applications en temps réel. Les récepteurs GNSS fournissent, pour les applications en temps réel, une précision altimétrique de l'ordre de plusieurs centimètres (fig. 6 et 7) qui dépend de l'endroit où l'on se trouve. A titre d'exemple, une représentation altimétrique typique de mouvements horizontaux.

La vérification des observations GNSS avec et sans satellites GLONASS doit, en raison de la complexité, être l'objet d'une évaluation minutieuse. L'augmentation de la précision au moyen de satellite GLONASS ne fait ici l'objet d'aucun complément. De manière différente à celle de l'illustration droite de la figure 6, l'influence des satellites GLONASS peut aussi se traduire, le cas échéant, par des pertes de précision. Une disponibilité plus élevée de satellites est certainement un pas vers l'acceptation de ce procédé d'observation. Trimble (GCS900 Laser Augmentation) tout comme Topcon (mmGPS) proposent différentes technologies pour augmenter la précision altimétrique en combinant laser rotatif et récepteur GNSS. Il convient encore de prendre en considération, lors de projets de construction de routes, la correction entre les hauteurs orthométriques et ellipsoïdales.

A côté des informations altimétriques et planimétriques, l'orientation de la machine, relativement au modèle, doit être connue dans un ordre de grandeur de 1°. Pour cette raison, plusieurs applications utilisent une seconde antenne Rover afin de déterminer une ligne de base. Par conséquent, les points de contrôle excentriques ainsi que la position de la machine se laissent calculer de manière absolue par rapport au modèle. Le premier brevet en la matière a été déposé par Caterpillar en 1995. Les capteurs de direction (boussole GPS p.ex.) qui se basent sur la fréquence L1 et une courte ligne de base, ne peuvent pas atteindre la précision exigée ci-dessus pour la détermination de directions. Des tests ont révélé des écarts qui s'élèvent jusqu'à 10° pour des constellations satellites défavorables. Un capteur qui mesure le champ magnétique n'est, en raison des perturbations métalliques, qu'une alternative très limitée. Une approche totalement nouvelle consiste à déterminer l'orientation absolue d'une antenne GNSS à partir d'une certaine dégradation du signal satellite. Cette manière de procéder est actuellement vérifiée et approfondie dans un environnement universitaire à l'institut de géodésie et de photogrammétrie (IGP) de l'EPF Zurich (Grimm 2007).

### ■ Tachéomètre motorisé

Les tachéomètres motorisés sont employés pour la détermination précise de la position d'un objet en mouvement lent. En prenant en compte tous les facteurs qui influencent les mesures, il est possible d'atteindre une précision de 5 mm dans un rayon de 50 m. Pour une distance croissante entre le prisme 360° et l'instrument, la précision planimétrique et altimétrique atteint rapidement l'ordre du centimètre. Par le passé, plusieurs travaux ont été consacrés à l'analyse de la précision ainsi qu'à la calibration des composantes de tels systèmes (Hennes 1999, Kuhlmann 1999, ou Stempfhuber 2004). Entre-temps, les tachéomètres motorisés ont été optimisés pour des applications cinématiques en raison des exigences posées par la commande de machines de chantier. A l'heure actuelle, des entreprises telles Topcon, Leica, Trimble

et Sokia, proposent des instruments qui remplissent les exigences énoncées ci-dessus. Les influences des erreurs systématiques, dues par exemple à une synchronisation rudimentaire des mesures angulaires ou de distance, sont réduites au moyen d'interpolations qui dépendent du domaine temporel (Wagner 2006). Les grandeurs suivantes doivent être optimisées pour une utilisation exacte de commande 3D :

- Stabilité du Lock (qualité de la poursuite de la cible)
- Concordance entre la poursuite de la cible et le servomoteur (algorithme de régulation)
- Vitesse des servomoteurs
- Stabilité du transfert de données (liaison radio), réduction des perturbations du signal
- Procédé pour une recherche rapide de prismes
- Utilisation d'un capteur bi-axial lors d'applications cinématiques
- Fréquence de mesure suffisante d'au moins 10 Hz
- Minimisation du temps de latence (relatif et absolu)
- Robustesse de l'instrument soumis aux conditions du chantier
- Qualité et précision des prismes 360°
- Convivialité des applications
- Précision absolue du positionnement planimétrique des mesures cinématiques

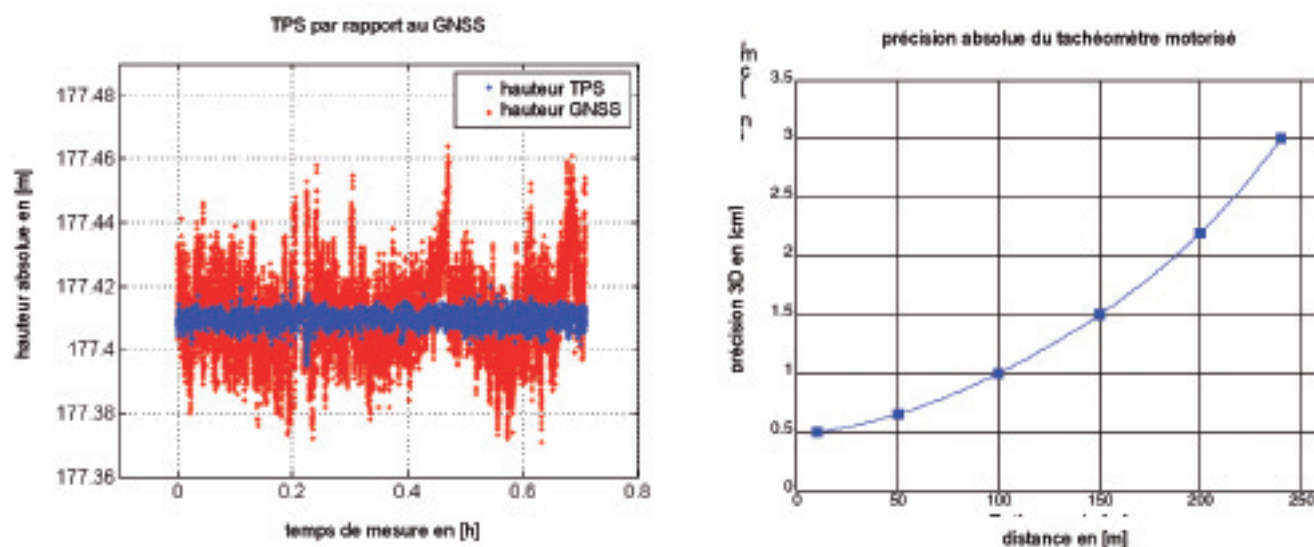
Ces paramètres qui décrivent l'aptitude au terrain et la précision des tachéomètres motorisés, doivent être pris en considération lors de l'évaluation des applications cinématiques. Généralement, l'utilisation des instruments de mesures terrestres pour une détermination précise de la position tridimensionnelle de machines de chantier est moindre en comparaison à la technologie GNSS. De la configuration de l'instrument à l'installation de la liaison radio jusqu'à la machine via le positionnement de la machine et de la station libre, ce sont ici bien plus d'étapes à réaliser pour le tachéomètre motorisé. La réactivité aux erreurs et la nécessité d'avoir une visibilité directe sont des critères supplémentaires qui réduisent le champ d'application. De plus, en raison de la diminu-

tion de la précision lors de longues distances, il est nécessaire de déplacer fréquemment l'instrument. La comparaison directe de ces deux procédés aide à faire le choix du système le plus approprié. La juxtaposition dans l'illustration de gauche (cf. fig. 7) de la composante altimétrique du GNSS avec les observations simultanées d'un tachéomètre motorisé confirme cet énoncé pour un domaine proche (modèle horizontal, vitesse de la machine de chantier d'environ trois mètres par minute). L'illustration de droite résulte d'une estimation théorique de toutes les influences en fonction de la distance.

Ces énoncés sur la précision sont actuellement vérifiés à l'aide du rail de calibration de l'IGP de l'EPF Zurich avec différents instruments. Un interféromètre laser fixe la référence. De surcroît, on analyse la qualité de la poursuite de la cible plus exactement. Comme énoncé au paragraphe 3.1, l'orientation de la machine est obtenue simplement à partir d'un second positionnement 3D. Ceci peut aussi bien se réaliser à l'aide d'un Rover GNSS que d'un second tachéomètre motorisé, dans quel cas deux réflecteurs perturbent fréquemment la poursuite de la cible. Simultanément au positionnement 3D et à l'orientation absolue de la machine, les pentes longitudinale et transversale, relatives au modèle, vont être déterminées. Des capteurs de pente qui s'appuient sur diverses techniques de mesures vont être employés à cet effet.

### ■ Capteurs de pentes bi-axiaux

Les capteurs de pentes bi-axiaux permettent de déterminer deux des six degrés de liberté qui définissent l'orientation d'une machine de chantier. L'université technique de Graz (TU Graz) étudie les capteurs modernes du point de vue de la stabilité de leur point neutre, de leur comportement vis-à-vis de la chaleur et en présence de variations de température ainsi que leur comportement cinématique (Brunner 2006). Les aspects les plus importants sont ici le comportement dans les conditions d'un chantier ainsi que l'exacte définition du temps de latence. Une configuration idéale du capteur passe par une



Capteur	Grandeur mesurée / grandeur de sortie	Précision cinématique	Portée	Fréquence de mesure	Temps mort
Récepteur GNSS	Dérivé : XYZ et temps	Situation : 2-3 cm Altimétrie : 3-5 cm	Radio RTK (env. 5-6 km de portée en Europe)	20 Hz	20-50 ms
Tachéomètre motorisé	Distance et direction / XYZ	Situation : 1 cm, Altimétrie : 1 cm, (dépend de la distance, cf. fig. 7)	env. 200-250 m, mesures jusqu'à env. 1000 m possibles par bonnes conditions	env. 10 Hz	50-250 ms
Laser rotatif	Référence altimétrique relative ou absolue	2-5 mm jusqu'à 100 m	200-300 m		< 10 ms
Capteurs de pente	Pentes longitudinale et transversale	0.1-0.3°	Directement sur l'objet	> 100 Hz	80-500 ms
Capteur d'orientation GPS	Gisement	10°	Directement sur l'objet	10 Hz	< 10 ms
Capteur ultrason	Distance	1 mm	Quelques mètres	> 100 Hz	Aucune indication

**Tableau 2.** Assemblage de différents procédés de mesures pour le guidage et la commande de machine de chantier.

pesée d'intérêts entre la durée et le type de la formation de la valeur moyenne. Lors de temps de réponse très courts, un bruit trop élevé dans les mesures en résulte. Une formation de la moyenne plus longue sur la base d'une grande quantité de mesures isolées conduit rapidement à un temps de réponse supérieur à 500 ms. Différentes recherches confirment ceci par opposition aux mesures optimisées de pentes et de positionnement 3D. Par conséquent, la configuration de celui-ci, basée en règle générale sur des capteurs CAN Bus, doit satisfaire à l'application correspondante.

Le tableau ci-dessus, basé sur les indications trouvées dans Bayer 2004, donne un aperçu des capteurs de mesures actuels qui servent aux applications de guidage et de commande de machines de chantier.

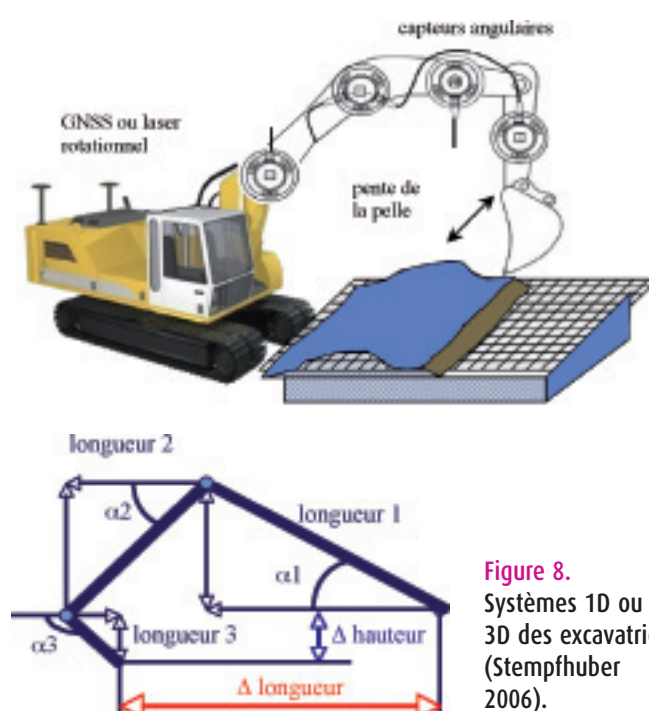
Étant donné que les systèmes de mesure inertiels ne sont pas employés pour le guidage et la commande de machine de chantier, ils ne sont pas présentés dans le tableau ci-dessus.

## Calcul des grandeurs de commande

Pour les applications en 1D (niveleuses et véhicules chenillés) la détermination de la hauteur "doit" se calculer très simplement. La plupart du temps, on ajuste au laser rotatif une base altimétrique absolue en relation à un point de référence. Sur la machine, la mesure est affichée sous forme de différence de hauteur par rapport à l'altitude de référence. Il existe des systèmes avec un récepteur laser et un couplage du capteur de pente transversale ainsi que des systèmes avec deux récepteurs laser de part et d'autre du soc. Le domaine d'activité est limité, de par la grandeur du récepteur laser, à quelques décimètres. Différents systèmes modifient toutefois mécaniquement la hauteur du bras et élargissent du même coup le domaine d'activité. Les systèmes de commande semi-automatique se basent sur une approche identique. Pour ce faire,

les valeurs d'ajustage gauche et droite ne sont pas affichées graphiquement, mais régulées au moyen du circuit hydraulique. Le modèle de données n'est ici pas nécessaire, on utilisera uniquement un plan de référence.

Les applications 1D des excavatrices utilisent également un laser rotatif, combiné avec des capteurs angulaires placés sur le bras de l'excavatrice, pour le calcul de la hauteur "doit" de la pelle. S'il fallait réaliser un modèle complexe, comme par exemple des talus inclinés, on utiliserait alors un système 3D. La position et l'orientation absolues des deux antennes Rover GNSS sur le châssis de l'excavatrice seront réduites au



**Figure 8.** Systèmes 1D ou 3D des excavatrice (Stempfhuber 2006).



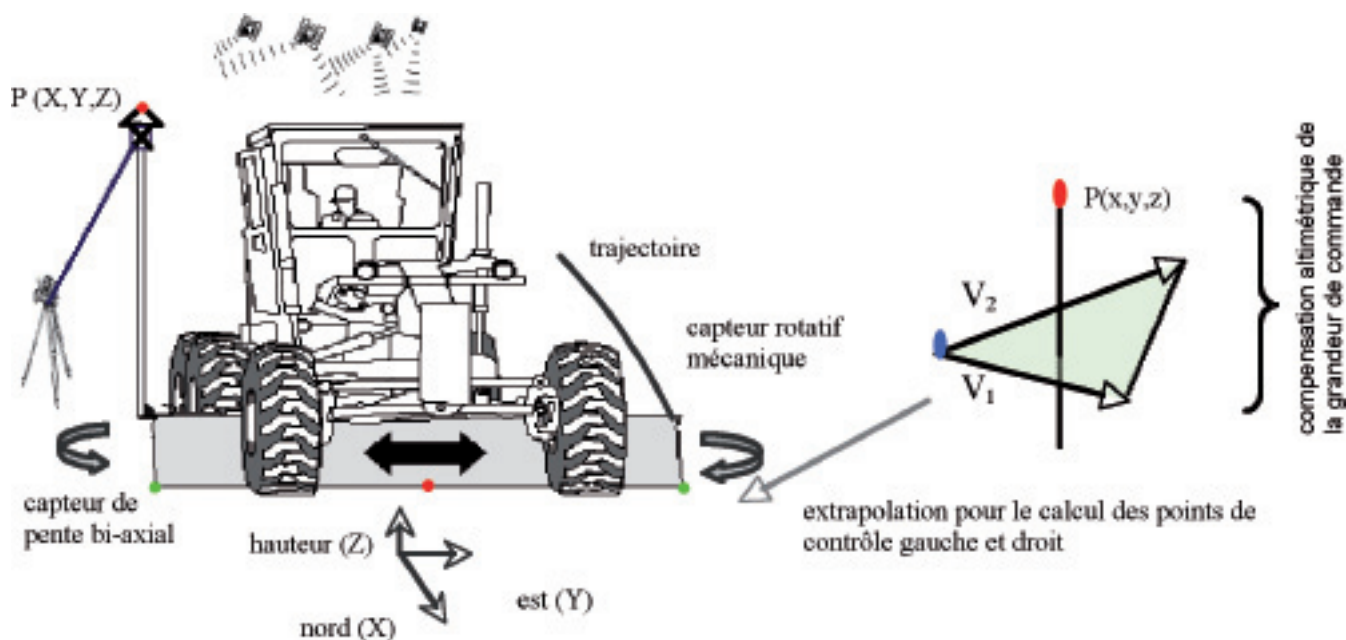


Figure 9. Calcul des grandeurs de commandes pour une niveleuse / Détermination du point de poussée dans le modèle TIN

modèle 3D par des méthodes de calcul identiques à celles énoncées ci-dessus.

Les systèmes de commande semi-automatique, i.e. de régulation altimétrique automatique, sont définis par deux points de contrôle gauche et droit. Ces étapes de calcul sont commentées pour l'exemple d'une commande altimétrique de niveleuse et peuvent être reportées pour les applications des véhicules chenillés, les fraises et les finisseuses d'asphalte via une arête définie de la table.

Dans ce but, on calculera les deux valeurs "doit" de l'outil à partir d'un point connu en 3D (GNSS ou tachéomètre motorisé), de l'orientation (à partir de la trajectoire ou au moyen d'un capteur additionnel) et des indications relatives à la pente. Les étapes de calcul suivantes seront implémentées de manière séquentielle dans un algorithme de régulation (circuit fermé) :

- Acquisition de la position 3D (Fréquence de mesure d'env. 10-20 Hz)
- Acquisition ou calcul de l'orientation absolue de la machine par rapport au modèle
- Réduction des pentes longitudinale et transversale resp. d'un point moyen sur le soc
- Extrapolation à partir d'une mesure locale pour la détermination des arêtes inférieures gauche et droite du soc
- Correction de la rotation du soc et du déplacement latéral (uniquement pour la niveleuse)
- Transformation de ces deux grandeurs absolues dans le modèle (en règle générale, un MNT avec maillage triangulaire)
- Détermination des écarts altimétriques gauche et droit et le cas échéant extrapolation à la couronne du modèle
- Multiplication avec les paramètres de réglage (le cas échéant, filtrage des données)
- Envoi des paramètres de régulation à la soupape hydraulique

A l'avenir, les soupapes mécaniques de régulation sur la machine de chantier seront certainement dirigeables électriquement. Par conséquent, les valeurs de commande altimétrique et tridimensionnelle pourront être directement écrites dans le "bus" de la machine. Une conversion du signal analogue pour le contrôleur de la machine est cependant obsolète.

Contrairement à ce qui précède, on définit pour les finisseuses à coffrages glissants quatre points altimétriques de contrôle sur les bords de la table et deux points planimétriques de contrôle soit sur les arêtes gauche et droite de la table, soit au milieu de celle-ci. Le procédé des étapes de calcul est, lui, comparable à celui notamment des niveleuses, bien que l'orientation de la machine doive ici être déterminée sans exception au moyen d'une deuxième position 3D.

La manière de procéder pour déterminer chaque point de contrôle et la comparaison "doit-avoir" par rapport à un modèle de données s'appuie pour l'essentiel sur une approche semblable. De simples réductions géométriques permettent la mesure excentrique des valeurs de commande.

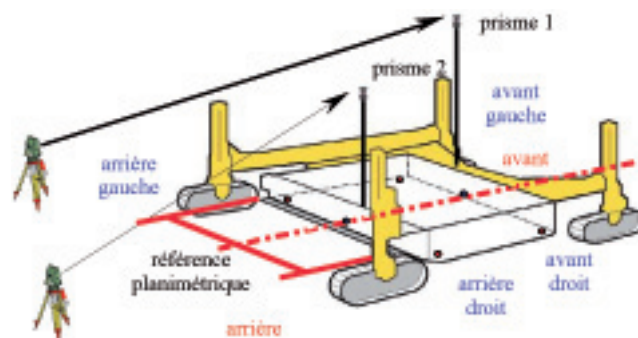


Figure 10. Points de contrôle sur une finisseuse à coffrages glissants de grande envergure (Stempfhuber 2007)



## Perspectives

Depuis la fin des années 90, cette tendance mondiale se répand sur plusieurs chantiers. Une motivation pour l'utilisation des méthodes cinématiques d'implantation en lieu et place des méthodes conventionnelles réside dans des critères tels que l'augmentation de l'efficacité et de la précision ainsi que la réduction des frais de personnel mais aussi de matériel. Les tâches traditionnelles, telles que l'implantation de fils conducteurs ou le contrôle des terrassements, disparaissent. De nouvelles tâches naissent : l'acquisition et la modélisation de données, l'encadrement ainsi que la vérification du système. Cette transition dans un monde virtuel représente des changements fondamentaux dans l'ingénierie géodésique. Le travail d'un ingénieur en mensuration se transforme en celui d'un ingénieur système. Celui-ci vient encadrer l'entier du processus de travail et garantit un déroulement des guidages et commandes de machines de chantier sans difficulté et exempt d'erreur. Le niveau d'encadrement dépend ici fortement de l'application. La préparation du travail est une tâche prioritaire dans le domaine du terrassement. Les applications 3D avec des finisseuses à coffrages glissants ou des finisseuses d'asphalte sont encadrées continuellement par les géodésiens. Actuellement, la nouvelle direction prise par ce type de travaux s'impose de par l'introduction de données digitales avec les procédés cinématiques d'implantation.

Les développements rapides, dus aussi bien à la communication entre le système de mesure et la machine qu'à l'optimisation des instruments utilisés, ont apporté une contribution importante. Cependant, nous ne sommes qu'au commencement de ce segment mondial croissant. La prochaine étape sera d'imposer, de manière identique aux systèmes de navigation dans l'industrie automobile, des systèmes intégrés. Les systèmes de mesure et de traitement devront être adaptés à ces nouvelles exigences. L'ingénierie géodésique doit emboîter le pas à ces rapides évolutions. Aucun autre professionnel ne couvre mieux, au travers de sa formation, un tel domaine. ●

## Contacts

**Werner STEMPFHUBER**  
**Hilmar INGENSAND**

Institut de géodésie et de photogrammétrie, ETH Zurich  
Stempfhuber@geod.baug.ethz.ch  
Ingensand@geod.baug.ethz.ch

## Bibliographie

**Bayer, G.** Geometrische Führung von Baumaschinen.  
In: DVW Schriftenreihe Band 45/2004, Kinematische Messmethoden, Vermessung in Bewegung, S. 215-232, Wittwer Verlag Augsburg, 2004.

**Brunner, K.** Neigungssensoren: Untersuchungen.  
In: Sitzung der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel, ETH Zürich, 2006.

**Grimm, D.** GPS Direction Finding, Neringa 2007.  
In: GEODESZIJA IR KARTOGRAFIJA,  
(en préparation, [www.vtu.lt/leidiniai](http://www.vtu.lt/leidiniai)), 2008.

**Hennes, M.** Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern.  
AVN 106, S. 374-385, 1999.

**Kuhlmann, H.** Sensorik - zielverfolgender Tachymeter.  
In: Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des DVW, 46 Jahrgang, Heft 2, Stuttgart, 1999.

**Schwieger, V.** Optimierung von Regelalgorithmen zur Baumaschinensteuerung am Beispiel eines Simulators.  
In: Brunner, F. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, S. 355-368, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.

**Stempfhuber, W.** Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. DKG-Reihe C, Heft Nr. 576, 2004.

**Stempfhuber, W.** 1D and 3D Systems in Machine Automation.  
FIG 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 2006.

**Stempfhuber, W.** Herausforderungen der 3D-Baumaschinensteuerung. In: Brunner, F. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, S. 343-354, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.

**Wagner, M.** Trimble ATS-Totalstation: Moderne hochgenaue Tracking-Systeme für Anwendungen in der Baubranche. ([www.trimble.com/ats\\_wp.asp](http://www.trimble.com/ats_wp.asp)), 2006.

**Zimmermann, D.** Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen.  
In: Ingensand, H. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 04, 14<sup>th</sup> International Course on Engineering Surveying, ETH Zurich, S. 193-204, 2004.

## ABSTRACT

**Key words:** Machine guidance and control, 3D measurement sensor, construction

*Machine Control and Machine Guidance is a subarea of Engineering Geodesy. All required tasks such as data collection and -verification, design data processing, calculation of the control parameters have to be in a close collaboration with the machine construction engineer, the experts in the field of cybernetics and the fore man of the construction site. This new technology covers the full range of Geodetic Metrology and Engineering Geodesy. Furthermore, an overall understanding of the geometric configuration between the 3D-trajectory, all additional information such as the machine orientation, the long- and cross slope related to all control points and the interaction of the design data. The aim of this report is to describe and to define all requirements of our professional skills.*