

**Zeitschrift:** Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =  
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =  
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

**Herausgeber:** geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und  
Landmanagement

**Band:** 101 (2003)

**Heft:** 7

**Artikel:** Trajectographie de courses de ski alpin avec GPS

**Autor:** Limpach, P. / Skaloud, J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-236038>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 29.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Trajectographie de courses de ski alpin avec GPS

Jusqu'à présent, les seules informations disponibles pour l'analyse des courses de ski se limitent aux temps intermédiaires et aux images vidéo. Bien que très spectaculaire pour le téléspectateur, une analyse vidéo, (telle que la technologie «SimulCam™» de Dartfish), ne fournit que des informations qualitatives et partielles. L'utilisation de la technique GPS permet d'obtenir des informations quantitatives très précises de trajectoire couvrant l'intégralité de la course, du départ jusqu'à l'arrivée. Ces informations peuvent être intégrées dans une visualisation 3D de réalité virtuelle. Ce système combiné GPS/visualisation 3D est destiné à offrir aux athlètes et à leurs entraîneurs, ainsi qu'aux téléspectateurs, un nouvel outil d'analyse de courses de ski très performant. Le prototype du système, développé en collaboration avec Dartfish, a été présenté lors des Championnats du Monde de Ski Alpin à St. Moritz en février 2003.

*Die einzig verfügbaren Informationen zur Analyse von Skirennen beschränken sich heute auf die gemessenen Zwischenzeiten sowie auf Videoaufnahmen. Eine Videoanalyse (z.B. mit der «SimulCam™»-Technologie von Dartfish) ist zwar sehr spektakulär für den Fernsehzuschauer, liefert aber nur qualitative und unvollständige Informationen. Die Anwendung der GPS-Technik im Bereich des Skisports erlaubt eine quantitative und hochpräzise Streckenaufzeichnung vom Start bis zum Ziel. Diese Streckeninformationen können in eine virtuelle 3D-Visualisation integriert werden. Dieses kombinierte System GPS/3D-Visualisation ermöglicht den Athleten und deren Trainer, aber auch dem Fernsehzuschauer, eine sehr effektive Analyse von Skirennen. Der in Zusammenarbeit mit Dartfish entwickelte Prototyp dieses Systems wurde während der Weltmeisterschaft in St. Moritz im Februar 2003 präsentiert.*

Fino a oggi le uniche informazioni disponibili per l'analisi delle gare di sci si limitano ai tempi intermedi e alle immagini video. Anche se molto spettacolare per il telespettatore, la videanalisi (come la tecnologia «SimulCam™» di Dartfish) fornisce solo informazioni qualitative e parziali. L'uso della tecnica GPS permette invece di ottenere delle informazioni quantitative molto precise su tutto il tracciato della gara, dalla partenza all'arrivo. Queste informazioni possono essere integrate in una visualizzazione tridimensionale della realtà virtuale. Questo sistema combinato GPS/visualizzazione tridimensionale offre ad atleti, allenatori e telespettatori un nuovo strumento all'avanguardia per analizzare le gare sci. Il prototipo di tale sistema, sviluppato in collaborazione con la Dartfish, è stato presentato in occasione dei Campionati mondiali di sci alpino di St. Moritz nel febbraio di quest'anno.

Ph. Limpach, J. Skaloud

## Contexte

### Nouvel outil d'analyse de courses de ski

Quelle était donc la trajectoire qui a permis à Mélanie Turgeon (Can) et Michael Walchhofer (Aut) de surpasser leurs adversaires lors des descentes des Cham-

pionnats du Monde de Ski à Saint-Moritz?

C'est pour répondre à ce genre de question que la SF-DRS, l'entreprise Dartfish, ainsi que les laboratoires de Communications Audiovisuelles (LCAV) et de Topométrie de l'EPFL, collaborent dans le cadre d'un projet soutenu par la Commission pour la Technique et l'Innovation (CTI) du gouvernement suisse. Ce partenariat a permis la création de séquences de réali-

té virtuelle en 3D, grâce auxquelles des millions de téléspectateurs ont pu imaginer les sensations extrêmes d'un skieur alpin en descente, sous des perspectives inédites à la télévision. La démarche pour élaborer de telles visualisations tridimensionnelles fait largement appel au savoir-faire géomatique. Le rôle principal du laboratoire de Topométrie fut le développement d'un système GPS pour la mesure de trajectoires de skieurs en vue de leur intégration dans les séquences de réalité virtuelle.

### Le challenge

Les applications aux sports dynamiques pour l'analyse précise de trajectoires représentent une nouvelle perspective pour la localisation GPS différentielle avec mesure de phase, mais aussi un défi considérable, à cause d'un environnement souvent hostile à la réception des signaux satellitaires. La localisation GPS cinématique en temps réel (RTK) au niveau du centimètre est certes réalisable aujourd'hui, mais uniquement sous des conditions incompatibles avec celles rencontrées en descente de ski alpin et avec un équipement dont le design n'est pas (encore) ergonomique. Le but est donc de rechercher un traitement automatisé des données GPS, très proche du temps réel.

### GPS vs vidéo

Une autre technique d'analyse déjà largement utilisée et médiatisée lors de nombreuses compétitions mondiales de ski alpin consiste à superposer les séquences vidéo de deux coureurs. Il s'agit de la technologie «SimulCam™» développée par Dartfish pour les entraînements et les transmissions télévisées. Celle-ci fournit une comparaison visuelle des trajectoires et des mouvements respectifs des deux coureurs. Certes très spectaculaire pour les téléspectateurs, cette méthode ne permet cependant qu'une comparaison qualitative et partielle, limitée par le champ de vision des différentes caméras.

La technique GPS, de son côté, fournit toutes les données quantitatives pour une analyse complète position/vitesse/accélération (PVA) et fonctionne indépendam-

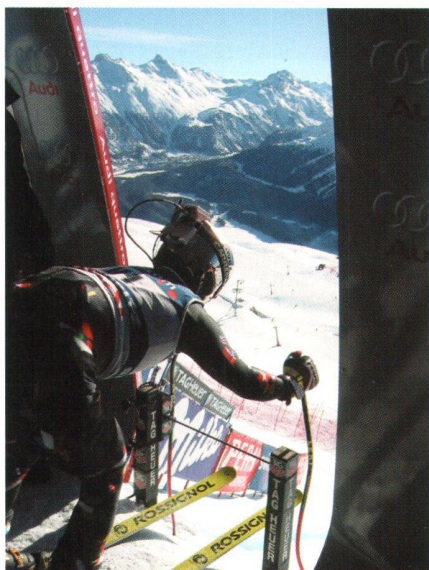


Fig. 1: Ouvreur au départ équipé du système GPS.

ment de la position des caméras. Les trajectoires mesurées par GPS peuvent ainsi être comparées sur la totalité de la piste. Il est par contre évident que seules les images vidéo réelles permettent de représenter la complexité des mouvements d'un skieur. La méthode basée sur le système GPS ne doit pas être considérée comme un produit concurrent aux techniques d'analyse vidéo, mais comme un outil complémentaire.

### Démarche pour la création des visualisations 3D

La démarche pour la création des visualisations 3D peut être divisée en quatre étapes:

1. Acquisition du modèle numérique de terrain
2. Levé topographique des portes
3. Détermination de la trajectoire du skieur avec GPS
4. Intégration de la trajectoire dans la visualisation 3D

### Acquisition du modèle numérique de terrain

Une représentation réaliste de la topographie exige l'acquisition d'un modèle numérique de terrain (MNT). Cette étape

peut être réalisée soit de manière classique par photogrammétrie aérienne, soit par laserscanning aérien. Selon la précision recherchée, il est également possible d'acquérir un modèle numérique auprès de swisstopo. Il s'agit d'une étape unique, à réaliser qu'une seule fois par site, à condition que le terrain n'ait pas été remodelé (artificiellement ou naturellement). Une des problématiques est la différence de hauteur de neige recouvrant le terrain. Le MNT utilisé dans ce travail a été créé par les laboratoires de Photogrammétrie et de Topométrie de l'EPFL, à partir d'images aériennes. Il présente une maille de 1 mètre et une précision altimétrique de 15 cm.

### Levé topographique des portes

La prochaine étape consiste à lever les portes des pistes de descente, et à déterminer leurs coordonnées dans le système de coordonnées suisse, afin de pouvoir d'une part les intégrer dans le modèle de visualisation 3D, et d'autre part déterminer les passages des skieurs au droit de chaque porte.

### Détermination de la trajectoire du skieur avec GPS

Lors des Championnats du Monde de St. Moritz, des mesures de trajectoire ont été réalisées sur les trois épreuves d'entraînement de descente masculine et féminine. Sur chacune de ces six épreuves, deux ouvreurs (forerunners) ont été équipés avec le système, constitué par une antenne GPS montée sur le casque et un récepteur attaché autour de la taille (fig. 1). La position des skieurs a été déterminée avec une fréquence de 10 Hz et avec une précision ( $1 \sigma$ ) de l'ordre de 10 cm.

### Matériel GPS utilisé

Le récepteur GPS utilisé pour la mesure des trajectoires est un récepteur de haute performance, capable d'enregistrer des mesures de pseudo-distances, de phase et d'effet Doppler, avec une fréquence al-

lant jusqu'à 20 Hz, sur les deux fréquences GPS (L1 et L2). A côté des avantages ergonomiques (petite taille et poids d'environ 400 g) par rapport à la plupart des récepteurs géodésiques sur le marché, il faut surtout relever les performances du récepteur dans la réacquisition rapide du signal (temps de réacquisition inférieur à 1 s), ce qui est une condition indispensable dans des applications à dynamique rapide, telles que les courses de ski.

Les caractéristiques de l'antenne nécessaire pour une application dans le domaine des courses de ski peuvent être définies comme suit:

- Double fréquence (L1/L2)
- Active (amplification du signal)
- Bon compromis entre taille/poids et performances

### Traitement automatisé des données GPS

A l'arrivée du coureur, les données enregistrées par le récepteur mobile et par la station de référence sont transférées sur un ordinateur. Le défi consiste à traiter ces données dans un délai de quelques minutes. Comme les données récoltées sur une même course de ski sont toutes de qualité plus ou moins homogène et du même type, un traitement automatisé avec des paramètres identiques peut être envisagé. Dans cette optique, un processus automatique, proche du temps réel, a été élaboré dans le cadre de ce travail, pour transférer, convertir, traiter et évaluer des données GPS. Il s'agit d'un programme basé sur les fichiers batch de commandes en ligne, qui exploite les DLL (Dynamic Link Library) d'un logiciel commercial de post-traitement.

### Technologie de visualisation 3D virtuelle

La dernière étape, réalisée par Dartfish et LCAV, consiste à intégrer les trajectoires déterminées par GPS dans les visualisations 3D virtuelles. En combinant la trajectoire mesurée avec le modèle de terrain, le skieur est immergé dans un monde virtuel du paysage alpin des pistes des Championnats du Monde pour un spec-

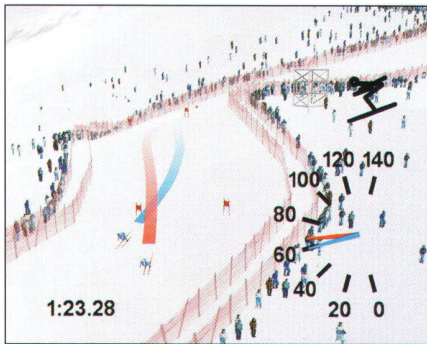


Fig. 2: Visualisation 3D de l'épreuve de descente, comparaison entre deux skieurs (image Dartfish).

table audiovisuel décoiffant. Pas de caméra rivée au sol: on peut placer librement une caméra virtuelle qui se déplace avec le coureur et qui garantit un angle de vue optimal tout au long de la course. La caméra peut même être placée de manière à fournir le point de vue du skieur. Ce développement innovateur indique également la variation de la vitesse et de la pente tout au long de la descente et permet la superposition des trajectoires de deux skieurs (fig. 2).

### Traitement des périodes de perte de signal GPS

Dans les applications en relation avec la télévision, il faut être capable de fournir

une trajectoire complète et continue du départ jusqu'à l'arrivée, même si on ne dispose pas de positions GPS sur la totalité de la trajectoire à cause d'obstructions induisant des pertes de signal. Il s'agissait donc de trouver un moyen efficace pour fournir des données en cas de pertes de signal GPS.

La méthode développée est basée sur l'interpolation par splines cubiques, ainsi que sur la condition de disposer d'une trajectoire de référence, c.-à-d. d'une trajectoire continue, sans perte de signal, mesurée antérieurement sur la même piste. Cette trajectoire de référence fournit des points d'ajustage pour le calcul de fonctions splines utilisées pour modéliser la trajectoire du skieur pendant la période de perte de signal.

### Analyse de trajectoires

A côté de l'analyse de trajectoire à l'aide des visualisations 3D virtuelles, les données GPS permettent de faire une multitude d'analyses quantitatives, certes moins spectaculaires pour le téléspectateur, mais très utiles pour les entraîneurs et les athlètes:

- Temps intermédiaire et vitesse au droit de chaque porte
- Distance curviligne parcourue entre les portes

- Courbure de la trajectoire
- Evolution de la vitesse

### Temps intermédiaire et vitesse au droit de chaque porte

Afin de disposer d'un moyen de comparaison efficace entre plusieurs skieurs, on détermine les temps intermédiaires correspondant aux passages des portes. Pour cela, il s'agit de déterminer l'intersection de la trajectoire avec le plan vertical passant par chaque porte. Pour la descente de St. Moritz, composée de 40 portes, on dispose ainsi d'un temps intermédiaire environ tous les 75 m ou toutes les 2 à 4 s (fig. 3). Ceci permet d'effectuer des comparaisons beaucoup plus fines qu'avec seulement deux ou trois temps intermédiaires, et de déterminer exactement entre quelles portes un skieur a perdu du temps sur son concurrent (fig. 4).

### Conclusions

Le matériel GPS utilisé a permis d'obtenir d'excellentes données de trajectoires, tant au niveau de la précision (de l'ordre de 10 cm dans la plupart des conditions) que de la continuité (pertes de signal très rares). Ceci ouvre de nouvelles perspectives à l'application du système GPS dans le domaine du ski alpin, notamment dans le domaine des entraînements, car les

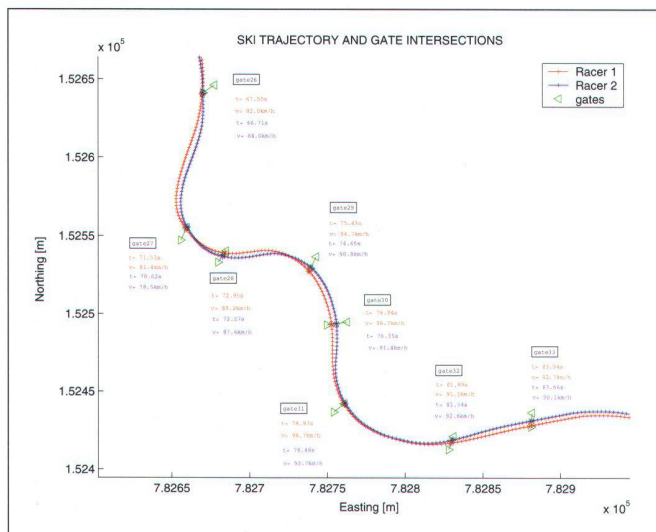


Fig. 3: Superposition 2D des trajectoires de deux skieurs mesurées avec GPS. Temps intermédiaires et vitesses au droit de chaque porte.

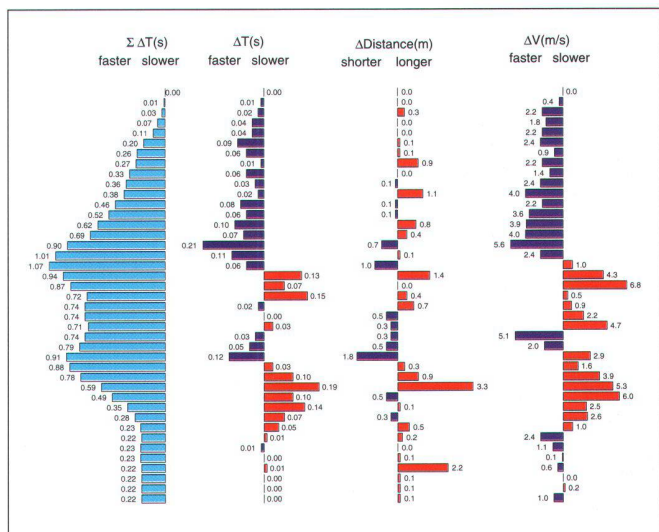


Fig. 4: Comparaison de deux skieurs au droit de chaque porte. Différences de temps, de distance parcourue et de vitesse.

données obtenues permettent de réaliser des analyses de trajectoire de haute précision et de fournir des réponses aux questions telles que: «Entre quelle porte un skieur a perdu du temps sur son concurrent? Quelle était la trajectoire exacte du vainqueur de la descente de St. Moritz?» Le système GPS serait ainsi en mesure d'aider les athlètes à trouver la ligne la plus rapide et d'identifier des fautes techniques, ce qui peut conduire à considérablement améliorer l'efficacité des entraînements et de la préparation, dans le but d'optimiser les performances, aussi bien de l'athlète que de son matériel.

### Perspectives

#### Evolution du matériel

Bien que le récepteur et l'antenne utilisés lors de ce travail soient déjà de poids et de tailles compatibles du point de vue ergonomique avec les courses de ski, le progrès en électronique ne va certainement pas s'arrêter là. Ceci ne peut fournir que des avantages pour des applications dans le domaine du ski alpin, où le matériel GPS ne pourra jamais être trop petit et léger. L'objectif ultime serait un système d'une ergonomie telle qu'il ne serait plus du tout ressenti par le skieur et qui pourrait même être utilisé durant les épreuves de compétition.

#### Temps réel

L'évolution ira certainement vers un système fonctionnant en temps réel. Ce système devra donc également comprendre un émetteur pour transmettre en temps réel les données du récepteur à une station de traitement («Inverse RTK»). Bien

que cette méthode soit opérationnelle aujourd'hui, le matériel ne présente pas encore une ergonomie suffisante et il faudra attendre des progrès en télécommunications afin de rendre plus fiable la liaison entre le rover et la station de traitement, notamment en milieu montagneux.

#### Modernisation du système GPS

La mise à disposition d'un signal (code) civil non crypté, appelé L2CS, sur la fréquence L2, sur les satellites lancés à partir de 2003, rendra le «tracking» de l'onde porteuse L2 plus facile, améliorera le ratio signal/bruit et réduira la probabilité d'une perte de signal lors d'application cinématiques. L'introduction d'une troisième fréquence, appelé L5, sur les satellites lancés à partir de 2005, contribuera à la résolution rapide des ambiguïtés.

#### Galileo

Avec le lancement du système européen Galileo, planifié pour 2008, le nombre de satellites se verra plus que doublé par rapport aux satellites GPS actuels. L'avantage pour des applications utilisant la phase, et notamment des applications RTK, viendra d'une part du nombre supplémentaire de signaux de haute qualité et d'autre part d'une amélioration de la géométrie des constellations, ce qui réduira le facteur PDOP. Le bénéfice le plus important sera la résolution plus rapide et plus fiable des ambiguïtés.

#### Fabricants

Le système GPS utilisé se compose d'un récepteur Javad Legacy GD et d'une an-

tenne bifréquence GPSsource conçue pour l'aviation. Le post-traitement automatisé des données GPS fut réalisé en exploitant les DLL de Waypoint Consulting.

#### Bibliographie:

- Gruenig, S. (2000). Analyse de courses de ski grâce à l'utilisation de mesures accélérométriques et de GPS. Travail de diplôme, EPFL, DGR, TOPO.
- Hofmann-Wellenhof, B., Eissfeller, B., Tiberius, C., Pany, T., Heinrichs, G. (2002). Real-Time Kinematic in the Light of GPS Modernisation and Galileo. Galileo's World, Autumn 2002.
- McLeod, R., Baart, L., (1998). Geometry and Interpolation of Curves and surfaces. Cambridge University Press.
- O'Neill, B. (1997). Elementary Differential Geometry. Academic Press, 2e édition.
- Skaloud, J., Merminod, B. (2000). DGPS-Calibrated Accelerometric System for Dynamic Sports Events. ION GPS 2000, Sept. 19-22 2000, Salt Lake City, UT.
- Skaloud, J., Ladetto, Q., Merminod, B., Vetterli, M., Gyr, M., Marcacci, A., Lüthi, P., Schutz, Y. (2001). Athletic Analysis with racing heart. GPS World, October 2001.

Philippe Limpach

Jan Skaloud

EPFL

Institut du Développement Territorial (INTER)

Laboratoire de Topométrie (TOPO)

Bâtiment GR

CH-1015 Lausanne

<http://topo.epfl.ch>

Wandeln Sie Ihr INTERLIS-Datenmodell in ein UML-Diagramm. Oder umgekehrt. Software herunterladen, testen.

# Ihr Datenmodell als Diagramm!



**EISENHUT INFORMATIK**

Rosenweg 14 • CH-3303 Jegenstorf • Tel 031 762 06 62 • Fax 031 762 06 64 • <http://www.eisenhutinformatik.ch>