

**DÉTERMINATION DE L'ALIGNEMENT ROUTIER
À PARTIR DE TRACES GPS**

Karsten Baass, Ing., Ph.D., Professeur à l'Ecole Polytechnique de Montréal

karsten.baass@polymtl.ca

Jérôme Vouland, M.Sc.A., Etudiant de l'Ecole Polytechnique de Montréal

jerome.vouland@polymtl.ca

Article préparé pour présentation

À la session Géométrie routière

CONGRÈS ANNUEL 2005 DE L'ATC

Calgary, Alberta

Résumé

Les outils d'analyse des réseaux routiers à la disposition des gestionnaires nécessitent dans la plupart des cas que soient connues les caractéristiques géométriques des routes. Cependant, dans un grand nombre de cas, aucune base de données n'est disponible ou suffisamment fiable pour permettre qu'elle soit exploitée à ces fins.

Cet article présente un outil de reconstitution des alignements routiers, à savoir du tracé en plan et du profil en long, à partir de levées géoréférencées par GPS de l'axe central de la chaussée. Les performances de cet outil sont éprouvées sur des alignements routiers fictifs, puis sur des levées GPS de routes du Québec. Quelques applications d'analyse de réseau nécessitant la connaissance d'alignements routiers sont également présentées.

Abstract

Analysis tools for road network managers require in many cases geometrical characteristics of the horizontal and vertical alignments to be known. However, in many cases, no databases are available or data are not sufficiently reliable to allow such analysis.

This study presents the development of a tool, which allows determining horizontal and vertical alignments from continuous three dimensional GPS data measured on the centre-line of two-lane rural roads. Generation of straight lines, circles and parabolas from GPS data is not a simple task and has to be done by special constrained regression procedures in order to assure that the resulting elements are tangent to each other. Special procedures allow the user to do the analysis using default values or in a way as to follow more or less the oscillations of the measured GPS data. Performances of this tool were tested as well on fictive alignments as on real GPS databases provided by the ministry of transportation of the province of Quebec. Some useful applications of alignments generated by the algorithm are also presented.

Introduction

Les gestionnaires de réseaux routiers ont depuis de nombreuses années des outils à leur disposition pour analyser et gérer de façon efficace ces mêmes réseaux. L'utilisation de ces outils requiert cependant des entrées de données de terrain : celles-ci peuvent concerner le trafic, les vitesses pratiquées et les caractéristiques géométriques de la route. Cependant, ces dernières données ne sont pas toujours disponibles soit qu'elles n'ont jamais été relevées à cause de l'âge du réseau soit que les plans utilisés lors de la construction n'ont pas été conservés. Il y a donc une lacune d'informations, lacune qui empêche une utilisation efficace des outils de gestion.

La collecte des données concernant la géométrie routière par des techniques traditionnelles d'arpentage n'est pas souvent pratiquée à une échelle globale car ces techniques sont fastidieuses, longues et coûteuses à mettre en place. L'alternative réside donc dans des solutions plus automatisées et notamment dans l'utilisation des informations recueillies par GPS.

La récente amélioration du système GPS, permet aujourd'hui d'obtenir des précisions suffisantes et c'est l'objectif de cet article de présenter un outil permettant au gestionnaire du réseau routier de reconstituer les tracés routiers dans leurs moindres éléments géométriques (tracé en plan et profil en long d'une route) à partir de relevés GPS. Ces éléments géométriques, une fois traités par l'outil, fournissent une base de travail permettant de réaliser des analyses de circulation ou de constituer des bases de données des caractéristiques du réseau routier étudié.

Revue de la littérature

Etant donné la très récente émergence de la technologie GPS pour des applications civiles, assez peu de travaux ont été réalisés sur ce sujet.

Des études relatives à l'utilisation de traces GPS pour déterminer les caractéristiques du profil en long de routes nouvellement construites ont été conduites en Grèce par le professeur Savvaidis (2002). Le travail réalisé consistait principalement à vérifier la faisabilité et la précision des relevés GPS. Les conclusions qui en découlent indiquent que la technologie GPS est adaptée pour de telles applications et qu'elle présente de nombreux avantages comparativement aux techniques classiques d'arpentage.

Une étude conduite par Lee et al. (2001) utilise également la technologie GPS pour déterminer les éléments géométriques de l'alignement horizontal. Des régressions aux moindres carrés permettent d'obtenir les caractéristiques des alignements. Il n'est cependant nulle part fait état de la nécessité de continuité de l'alignement : lignes droites et courbes sont traitées indépendamment, ainsi ces dernières ne sont pas nécessairement en tangence. Les auteurs règlent ce problème en insérant une clothoïde dans cette discontinuité. Leur algorithme fournit des résultats satisfaisants mais n'a été appliqué qu'à un seul segment de route.

L'outil choisi pour la collecte de données est donc le GPS, données fournies par le Ministère des Transports du Québec. La levée des traces est effectuée au moyen de récepteurs GPS capables de recevoir des informations en mouvement, avec positionnement toutes les secondes. Ces données sont retraitées par la suite pour une correction différentielle (DGPS). La précision de ces relevés est estimée par les services d'arpentage du Ministère des Transports du Québec à 25 cm en horizontal et à 50 cm en vertical.

Le principe de l'algorithme proposé

Développement d'un indicateur pour détecter les changements dans la géométrie routière

Le problème de la reconstitution de l'alignement routier est celui de détecter les endroits où commencent et finissent les différents éléments géométriques et ceci pour le tracé en plan et pour le profil en long. Il s'agit donc de déterminer un indicateur qui peut être calculé à partir des données GPS pour trouver ces endroits.

a) L'alignement horizontal

L'alignement horizontal de la route est composé de lignes droites, de courbes circulaires et de clothoïdes. Les courbes sont introduites pour permettre un changement graduel de direction. La direction de la route en n'importe quel point de l'alignement est indiquée par le gisement de la tangente à cet endroit. Le gisement est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre sur 360 degrés et ceci à partir du Nord.

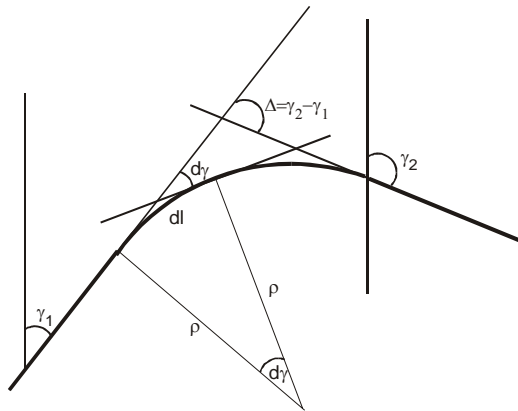


Figure 1 Définition de la courbure d'une courbe

La courbe sur la Figure 1 permet le changement graduel de la direction γ_1 vers la direction γ_2 à la fin de la courbe. Si on considère un segment dl assez court de cette courbe, son rayon ρ restera inchangé le long de dl et on a la relation suivante:

$$\frac{d\gamma^{rad}}{dl} = \frac{1}{\rho} = \kappa$$

Ceci est la définition de la courbure d'une courbe donnée. Le changement total de direction sur la longueur L de la courbe sera obtenu par:

$$\gamma^{rad} = \int_0^L \frac{1}{\rho} dl$$

La Figure 2 illustre le cas des trois courbes utilisées communément pour constituer un alignement horizontal.

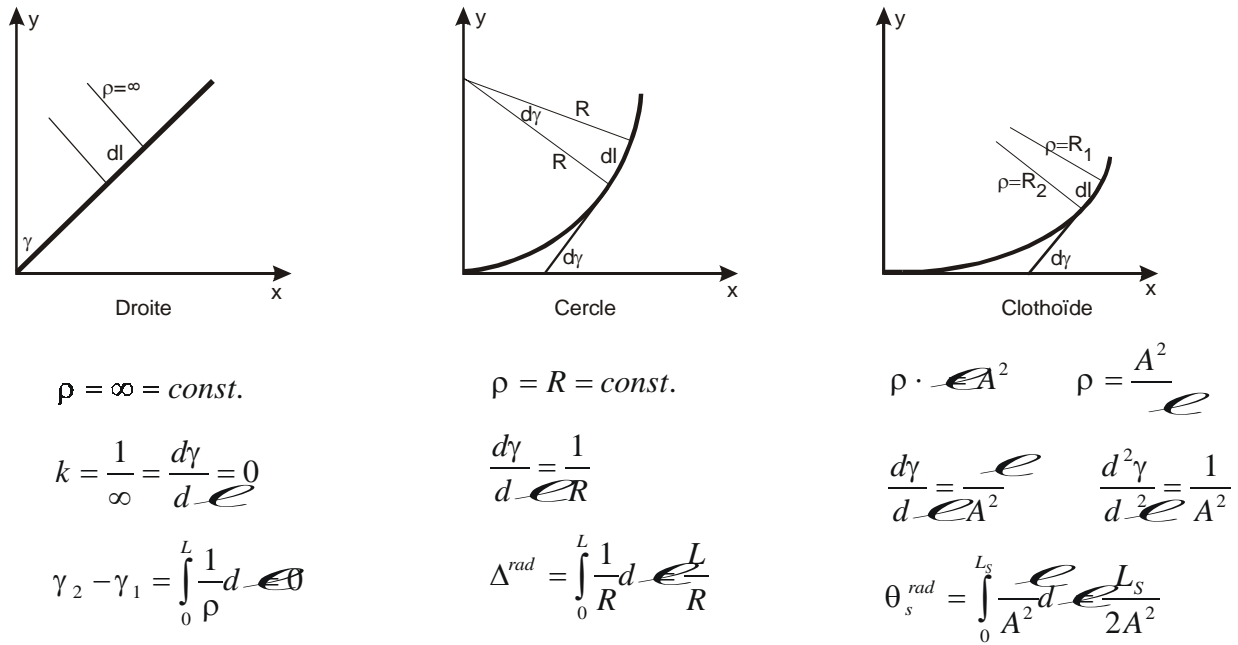


Figure 2 La courbure définie pour les trois courbes utilisées pour l'alignement horizontal

Si on trace un graphique (Figure 3) montrant le gisement par rapport au chaînage, on distingue plus ou moins bien les débuts et les fins des différentes courbes. Cependant, le graphique $d\gamma/d\ell$ montré à la Figure 4 a l'avantage d'indiquer directement la courbure dans le cas du cercle et donne donc le rayon de la courbe ainsi que son début et sa fin. On voit par exemple que la première courbe circulaire sur ce graphique a une courbure de -0.7162 . Cela revient à un rayon de -400 m, le signe indiquant que la courbe va vers la droite. Le pas de chaînage est ici $\Delta l = 5$ m.

$$R = \frac{180 \cdot \Delta l}{(d\gamma/d\ell) \cdot \pi}$$

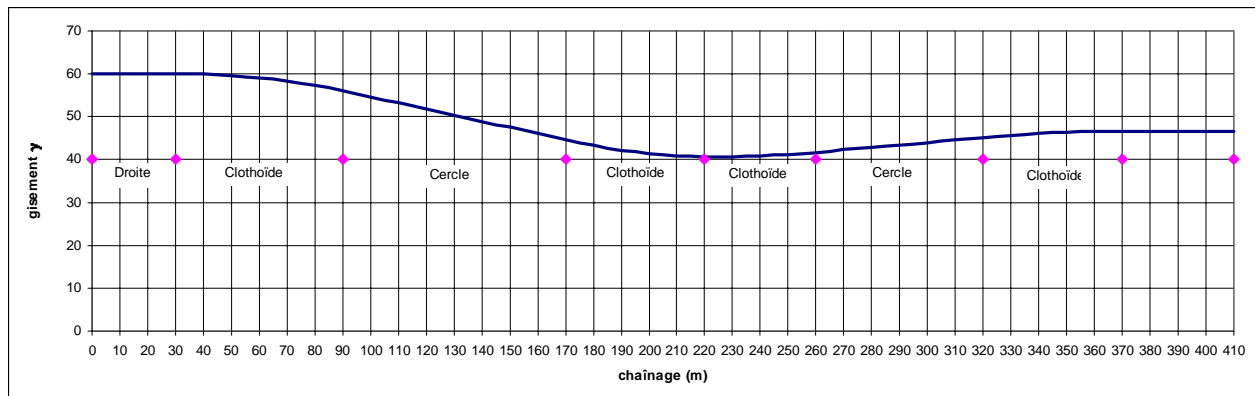


Figure 3 Le gisement le long de l'alignement horizontal

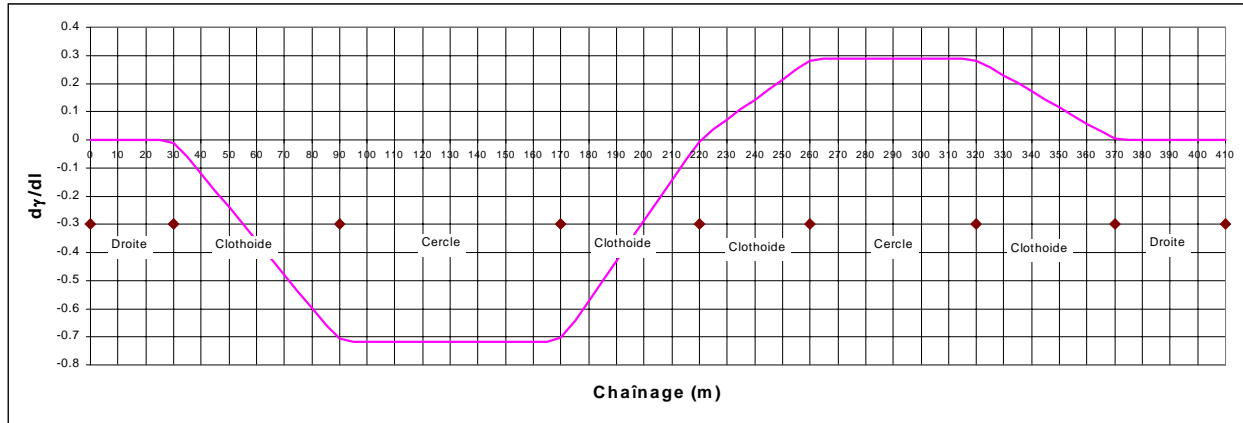


Figure 4 Le changement du gisement le long de l'alignement horizontal ($d\gamma/dl$)

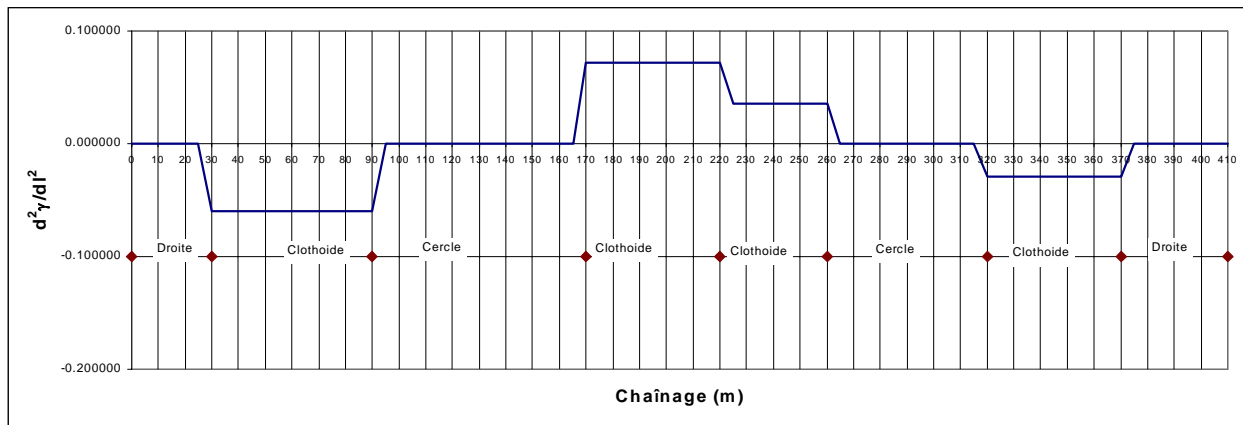


Figure 5 $d^2\gamma/dl^2$ le long de l'alignement horizontal

Le graphique $d^2\gamma/dl^2$ révèle la taille et la position des clothoïdes qui se manifestent par une droite avec l'ordonnée $1/A^2$ (voir Figure 5). Le paramètre A de la première clothoïde se calcule avec $d^2\gamma/dl^2 = -0.05968$ et $\Delta l=5$ par:

$$A = \sqrt{\frac{180 \cdot \Delta l^2}{(d^2\gamma/dl^2) \cdot \pi}} = 154.919 \text{ m}$$

Le changement du gisement par rapport au chaînage $d\gamma/dl$ représente donc un bon indicateur pour détecter la présence de lignes droites et de courbes circulaires, tandis que $d^2\gamma/dl^2$ indique les clothoïdes.

La reconstitution d'un alignement horizontal revient donc à déterminer à chaque point de l'alignement le gisement γ , le changement $d\gamma/dl$ ainsi que $d^2\gamma/dl^2$. On obtient les courbes circulaires ainsi que leurs débuts et fins en détectant les débuts et les fins des lignes horizontales dans le graphe $d\gamma/dl$. Les clothoïdes peuvent être identifiées sur le graphique $d^2\gamma/dl^2$ ce qui donne toutes les indications nécessaires sur la géométrie de l'alignement.

En pratique, nous disposons de la trace GPS avec ses coordonnées x, y, z le long de l'axe de la route. Les coordonnées x, y de deux points consécutifs permettent de calculer le gisement. Avec trois points consécutifs on calcule $d\gamma/dl$ et avec 4 points on obtient $d^2\gamma/dl^2$.

Cependant, une difficulté de taille intervient, car ces points ne se trouvent pas toujours précisément sur l'axe de la route, à cause des erreurs inhérentes au GPS et aussi à cause des variations dans la trajectoire du véhicule relevant les points GPS. De plus, la distance relativement grande entre les points GPS empêche la détection avec précision de très courtes courbes comme c'est souvent le cas des clothoïdes. Nous avons donc, dans un premier temps, concentré nos efforts sur les routes rurales qui ne possèdent pas de clothoïdes, par contre l'existence de courbes circulaires composées ne présente pas d'obstacle.

En inspectant le graphique $d\gamma/dl$ nous pouvons trouver les points GPS qui appartiennent à une ligne droite ou à un cercle. Cependant, même si la condition $d\gamma/dl = 0$ révèle l'existence d'une ligne droite, en pratique, il reste le défi de trouver la ligne droite dont la position minimise l'écart entre elle et la position des points GPS mesurés. Le problème est encore plus délicat lorsqu'il s'agit de segments de cercle (condition $d\gamma/dl \neq 0 = \text{const.}$) qui devraient représenter le mieux les points GPS tout en étant en tangence aux lignes droites obtenues au préalable. La méthode choisie pour trouver l'élément géométrique optimal est basée sur l'approche des moindres carrés et est décrite dans la section suivante.

b) L'alignement vertical

L'alignement vertical de la route est composé de lignes droites et de courbes paraboliques. Les courbes sont introduites pour permettre un changement graduel de la pente. La déclivité de la route en n'importe quel point de l'alignement est indiquée par la pente de la tangente à cet endroit. La Figure 6 montre les deux courbes utilisées pour constituer l'alignement vertical.

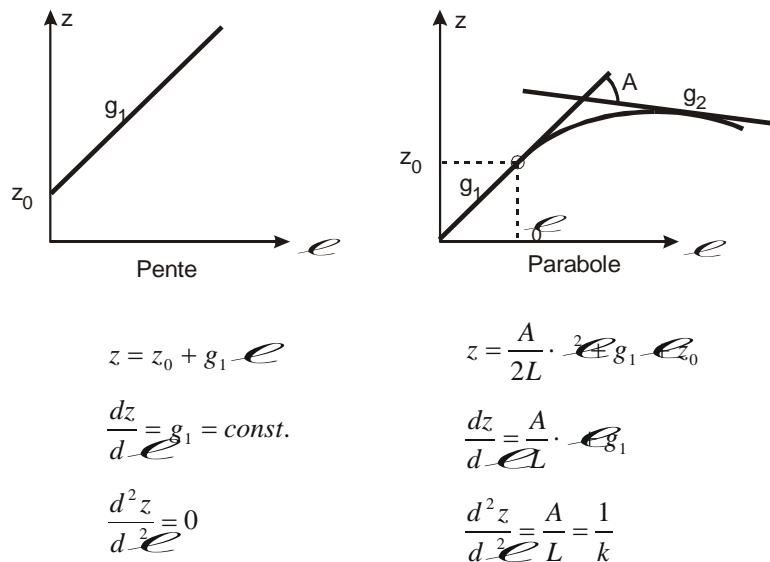


Figure 6 Les deux courbes utilisées pour le profil en long

Si on trace un graphique (Figure 7) montrant l'altitude par rapport au chaînage, on distingue plus ou moins bien les débuts et les fins des différentes courbes. Cependant, le graphique dz/dl a l'avantage d'indiquer directement la pente des lignes droites, pente que l'on lit directement sur les lignes parallèles à

l'abscisse, tandis que les paraboles dans ce graphique sont identifiées par des droites ayant une pente non nulle, pente qui varie linéairement avec le chaînage. Il est plus pratique d'utiliser directement le graphique d^2z/dl^2 où les paraboles sont indiquées par leur paramètre (voir Figure 9).

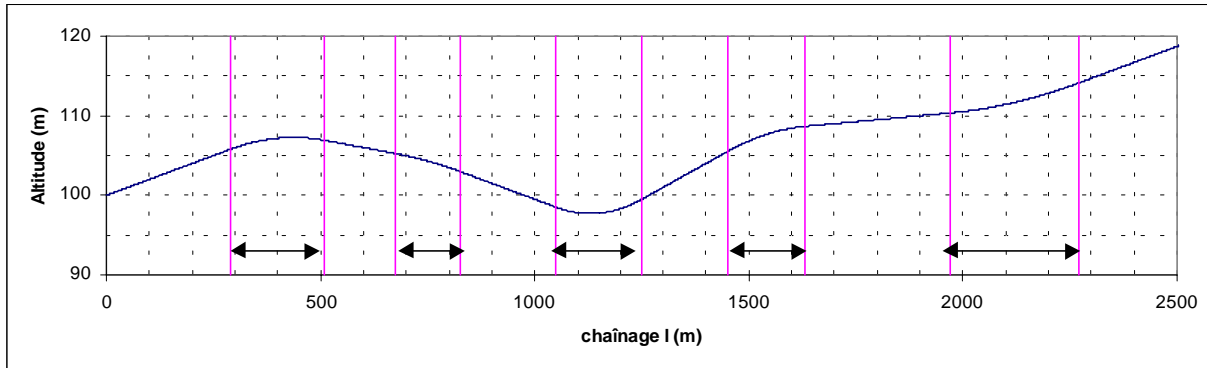


Figure 7 Le profil en long d'une route

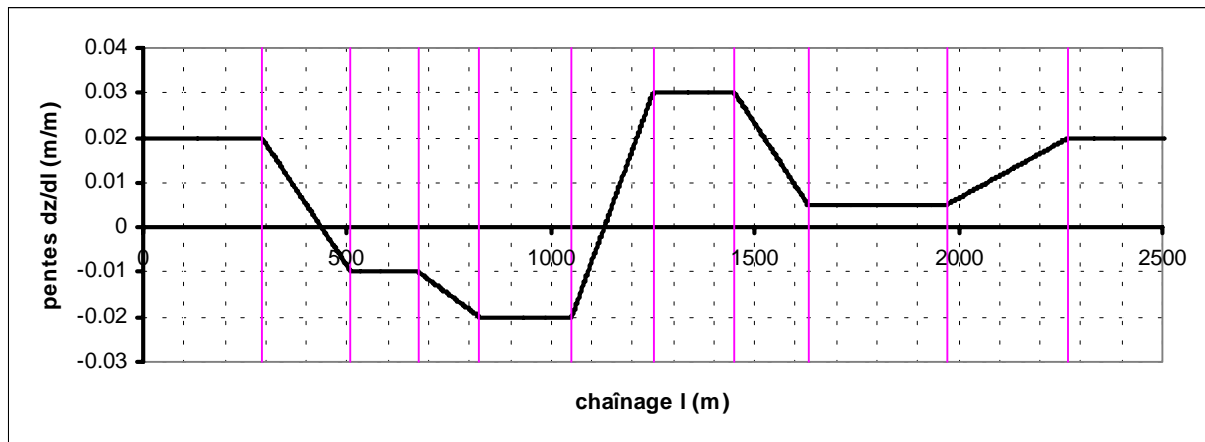


Figure 8 La pente du profil en long par rapport au chaînage

Le graphique d^2z/dl^2 donne clairement les paramètres k des paraboles ainsi que les débuts et les fins des courbes (voir Figure 9).

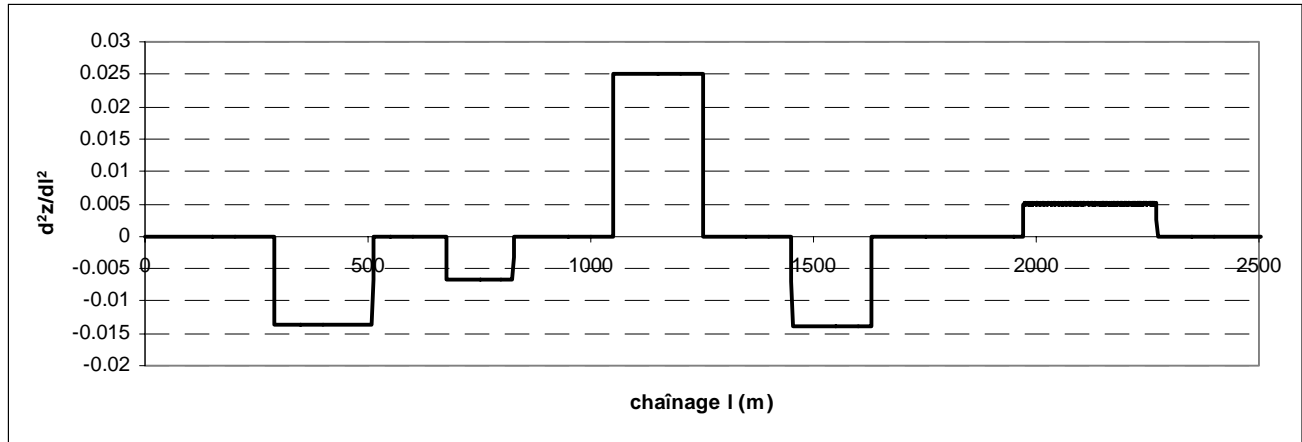


Figure 9 Le changement de la pente le long du profil en long

En pratique, nous disposons de la trace GPS avec les coordonnées x , y , z le long de l'axe de la route. Les ordonnées z et le chaînage entre deux points consécutifs permettent de calculer la pente. Avec trois points consécutifs on calcule d^2z/dl^2 . On obtient donc ainsi une estimation du paramètre k de la parabole.

Pour la reconstitution de l'alignement vertical, les mêmes remarques s'appliquent que pour l'alignement horizontal.

Algorithme pour la détection des éléments géométriques

Les données brutes consistent en une liste de coordonnées (X , Y , Z) de points géoréférencés.

L'objectif est dans un premier temps de déterminer quels ensembles de points vont être utilisés pour représenter les lignes droites et quels ensembles seront utilisés pour les courbes.

L'étude théorique des alignements routiers montre que l'évolution des gisements (en plan) ou des pentes (en profil) le long d'un tracé peut être exploitée afin de déterminer les débuts et fins des éléments géométriques de ces alignements. En se basant sur ces éléments, deux indicateurs sont construits pour détecter les différents éléments géométriques, et affecter les points GPS aux éléments appropriés.

Les indicateurs retenus sont:

- pour l'alignement horizontal (voir Figure 4.) : le taux de variation du gisement par rapport à la

distance entre deux points
$$I_{horizontal} = \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{dl_i}$$

- pour le profil en long (voir Figure 8) : le taux de variation de la pente par rapport à la distance

entre deux points
$$I_{vertical} = \frac{g_{i+1} - g_i}{dl_i}$$

Figure 10 Indicateur de l'alignement horizontal

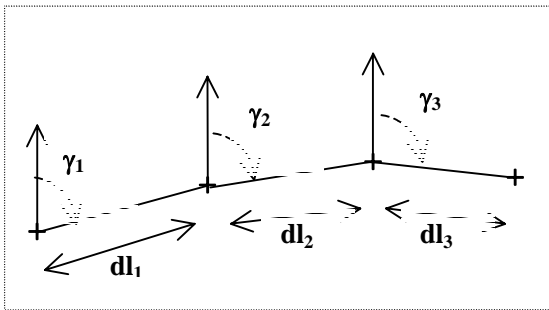
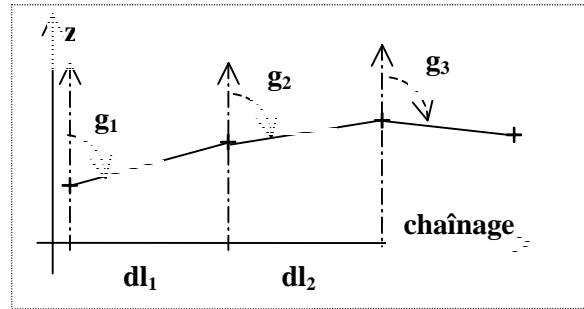


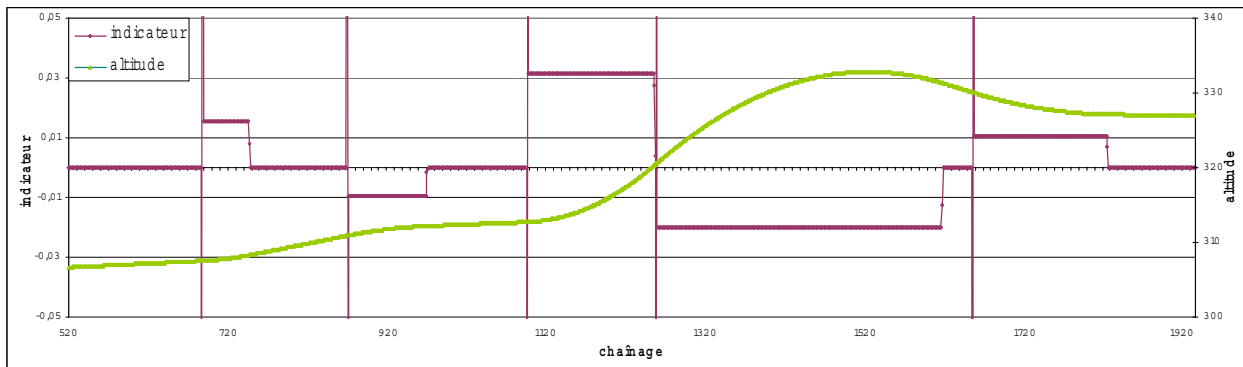
Figure 11 Indicateur de l'alignement vertical



Le but de ces indicateurs est de présenter une variation significative lorsque se produit un changement de direction (gisement) pour le tracé en plan ou un changement d'inclinaison de la pente pour le profil en long.

L'exemple de l'analyse d'un tracé fictif confirme que l'indicateur subit des variations significatives en fonction de l'évolution du tracé routier et traduit fidèlement chaque variation de pente.

Figure 12 Indicateur du profil en long pour un tracé fictif



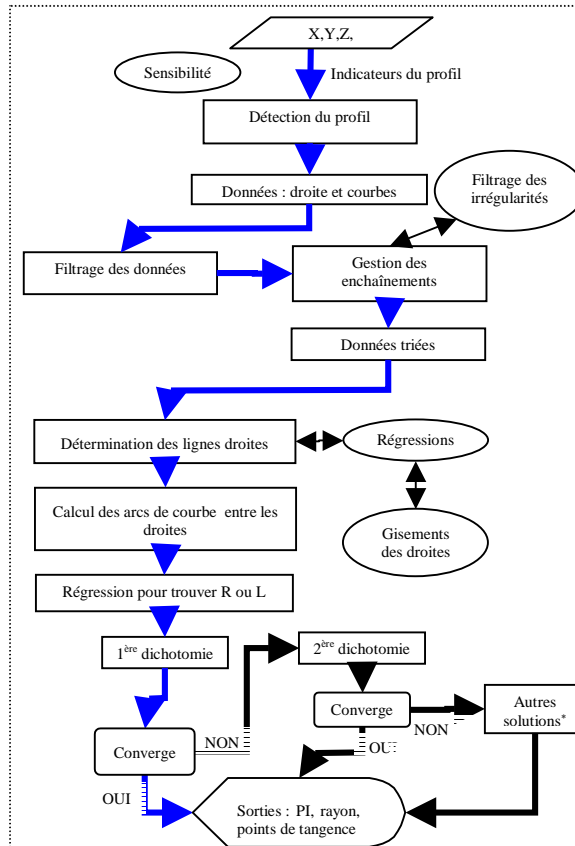
On peut donc déterminer de cette manière quels points correspondent à une courbe (ce sont ceux pour lesquels l'indicateur est non nul); et lesquels correspondent à une section rectiligne (ce sont ceux pour lesquels l'indicateur est nul). Le procédé est le même pour l'alignement horizontal.

Cependant, il est nécessaire d'introduire un paramètre supplémentaire qui va venir supprimer les effets causés par les imperfections des relevés GPS. Lorsqu'on applique l'indicateur à une trace GPS, on constate que de nombreuses irrégularités viennent brouiller les résultats. Pour cette raison, on utilise un filtrage qui ne laisse passer que les valeurs significatives de l'indicateur. Ce filtrage, qu'on peut aussi nommer « sensibilité » de détection, permet également de définir le type d'analyse qu'on souhaite réaliser à partir d'une trace donnée : soit une analyse détaillée qui fera ressortir tous les détails de l'alignement (ce qui n'est pas toujours souhaitable), soit une analyse rapide, mais moins précise.

La sensibilité se résume simplement à une valeur limite qui détermine l'appartenance de points à un type de classe : ligne droite, ou courbe. Ce paramètre permet de gérer la précision de la reconstitution, et constitue un levier de contrôle de l'algorithme. Chaque point GPS est affecté à une classe donnée de manière à pouvoir être par la suite utilisé pour réaliser les régressions aux moindres carrés.

L'algorithme est codé en langage Visual Basic (sous application Excel), il regroupe les différents éléments nécessaires au filtrage des données GPS, au calcul des régressions, aux méthodes de convergence, à l'affichage des résultats, à la reconstitution des alignements et à l'évaluation des performances de cette reconstitution. La Figure 13 illustre la procédure de calcul permettant d'aboutir à la reconstitution des alignements.

Figure 13 Organigramme de l'algorithme



1

Obtention des éléments géométriques par des régression aux moindres carrés

Dans la partie précédente, chaque point a été rattaché soit à une ligne droite, soit à une courbe. À cause des variations des points autour de l'axe de la route, nous ne pouvons pas directement dériver les paramètres des courbes, les gisements, les pentes et les débuts et fins de courbes comme cela a été montré dans la partie théorique.

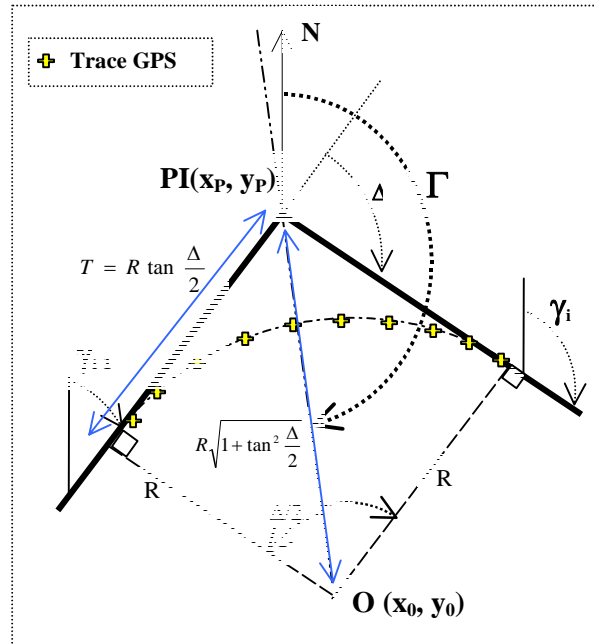
La procédure commence par une régression selon le principe des moindres carrés sur les points appartenant à l'ensemble des lignes droites. Une fois ces droites obtenues, nous effectuons des régressions circulaires ou paraboliques selon le cas avec une contrainte supplémentaire, c'est à dire la contrainte que la courbe doit être en tangence aux droites.

¹ Organigramme de principe (simplifié) de l'algorithme ne présentant pas tous les détails des opérations effectuées.

Les méthodes permettant de déterminer la meilleure droite passant par un nuage de points sont bien connues. En revanche, il est moins aisé d'effectuer ce genre de régression sur des arcs de cercle. Des travaux ont été réalisés à ce sujet (Brandon et Cowley, 1983) mais ceux-ci ne satisfont pas nécessairement à nos attentes. En effet, il est indispensable de concevoir un modèle qui permette de trouver des courbes qui soient en tangence avec les lignes droites en entrée et en sortie de courbe, de manière à ce que la continuité de la section de route soit assurée.

Tracé en plan

Figure 14 Positionnement du rayon d'un arc de cercle



Les données disponibles pour le tracé en plan, obtenues à partir des caractéristiques des lignes droites sont les suivantes (cf. Figure 14) : gisement des droites en entrée et sortie de courbe (γ_{i-1} et γ_i), coordonnées du point d'intersection des deux droites (PI) ainsi que l'angle de déflexion entre les deux droites (Δ).

Il faut à partir de cela pouvoir retrouver l'arc de cercle qui minimise l'écart entre lui-même et les points GPS et qui satisfasse aux deux contraintes de tangence en entrée et sortie de courbe.

Par des considérations géométriques, on montre que les coordonnées du centre du cercle sont :

$$\begin{cases} x_0 = x_p + R\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\Delta}{2}} \sin \Gamma = x_p + R \cdot a \\ y_0 = y_p + R\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\Delta}{2}} \cos \Gamma = y_p + R \cdot b \end{cases}$$

Pour toutes les courbes circulaires ayant un rayon R, on calcule le centre de façon à ce que l'arc de cercle soit en tangence avec les lignes droites déterminées auparavant.

Une première estimation du rayon donne comme valeur $R = \frac{180 \cdot L_{approx}}{\pi \cdot \Delta}$ (étant donné que l'angle au centre vaut également Δ).

Le début exact de la courbe n'est pas parfaitement identifié, ainsi la longueur est une inconnue. Ceci est dû au fait que le relevé GPS est ponctuel, et non continu, avec un pas d'environ 18 m : le point de tangence peut ainsi se situer entre deux relevés. La seule information disponible est qu'en ce point arc et droite sont en tangence.

La détermination du meilleur rayon représentant le nuage de points est faite selon la méthode de régression suivante:

On appelle (x_i, y_i) les coordonnées des points GPS et \hat{R} le rayon estimé par régression dont le centre est à O (x_0, y_0) .

L'écart mesuré radialement entre le point i et l'arc de cercle est donné par (voir Figure 15):

$$e = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - \hat{R}$$

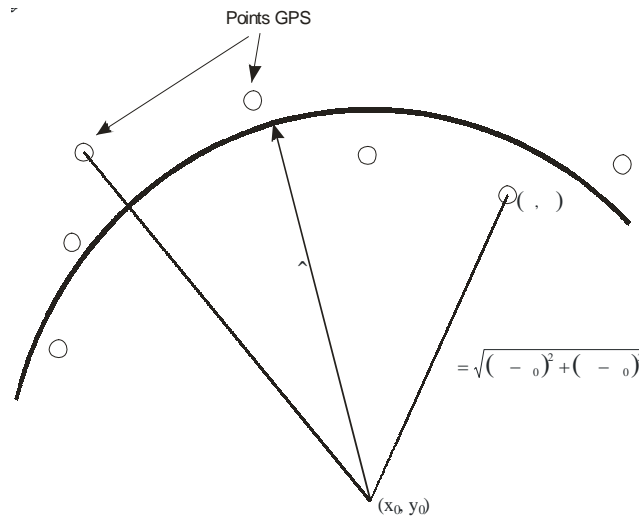


Figure 15 Le meilleur cercle défini par les points GPS

Il est plus aisé de minimiser les écarts entre les surfaces du cercle passant par le point i et le cercle décrit par le rayon à estimer:

$$e = \pi \cdot R_i^2 - \pi \cdot \hat{R}^2$$

La fonction à minimiser sera donc:

$$F = e^2 = \pi^2 \sum_i (R_i^2 - \hat{R}^2)^2 = \pi^2 \sum_i ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - \hat{R}^2)^2$$

Ceci donne, puisque x_0 et y_0 dépendent de \hat{R} :

$$F = \pi^2 \sum_i \left((x_i - x_p - \hat{R} \cdot a)^2 + (y_i - y_p - \hat{R} \cdot b)^2 - \hat{R}^2 \right)^2$$

En différentiant cette expression par rapport à \hat{R} , on obtient l'expression de la fonction cible F à annuler pour trouver la valeur optimale du rayon satisfaisant aux deux contraintes :

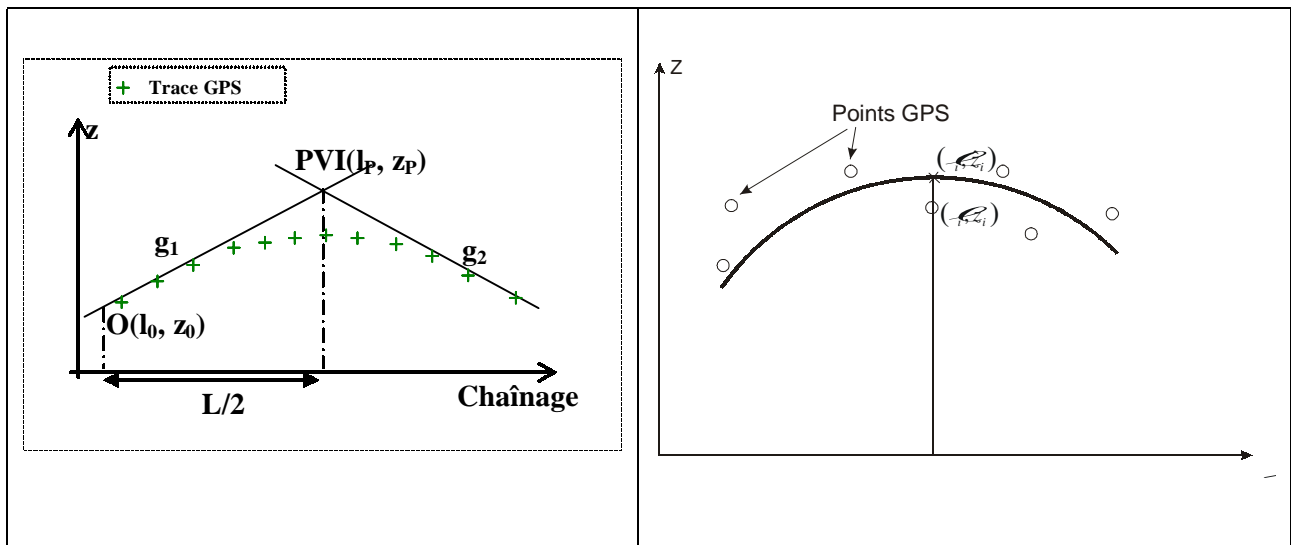
$$\sum_{i=1}^n \left\{ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - \hat{R}^2 \right\} \cdot \left[a \cdot (x_i - x_0) + b \cdot (y_i - y_0) + \hat{R} \right] = 0$$

avec $a = R \sqrt{1 + \tan^2 \frac{\Delta}{2}} \sin \Gamma$ et $b = R \sqrt{1 + \tan^2 \frac{\Delta}{2}} \cos \Gamma$

Profil en long

Les données disponibles pour le profil en long sont de même nature : pentes des droites avant et après la courbe, coordonnées du point vertical d'intersection (PVI), et différence algébrique des pentes A. La méthode est sensiblement la même pour le profil en long que pour le tracé en plan, mis à part qu'il s'agit là de déterminer les paramètres d'une parabole.

Figure 16 Eléments de calcul pour le profil en long



Le point GPS a les coordonnées (ℓ_i, z_i) et le point correspondant sur la meilleure parabole a les coordonnées (ℓ_i, \hat{z}_i) , où ℓ est le chaînage et z l'altitude du point.

Si on appelle O le début de la courbe, connaissant les pentes avant et après (respectivement g_1 et g_2) et les coordonnées du PVI, alors les coordonnées de O sont, pour une parabole symétrique (dans une très large majorité des cas, les paraboles implantées sur les alignements verticaux sont symétriques) :

$$\ell_o = \ell_p - \frac{\hat{L}}{2} \quad z_o = z_p - g_1 \cdot \frac{\hat{L}}{2}$$

Comme pour l'alignement horizontal, la position du début de la courbe n'est pas connue précisément, seule la position du PVI est clairement identifiée. La seule inconnue est donc la longueur L de la courbe, et les contraintes sont les conditions de tangence avant et après la parabole, et la minimisation des écarts entre points GPS et courbe.

On peut montrer que l'équation d'une parabole contrainte par des tangentes de pente g_1 et g_2 est :

$$\hat{z}_i = \frac{g_2 - g_1}{2L} (\ell_i - \ell_o)^2 + g_1 (\ell_i - \ell_o) + z_o$$

La fonction à minimiser est:

$$F = \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2$$

Ainsi, en sommant sur l'ensemble des points GPS (x_i, z_i) constituant la parabole, il est possible d'estimer la fonction F représentant l'écart entre les points i et une parabole de longueur L :

$$F = \sum_{i=1}^n \left(z_i - \frac{A}{2\hat{L}} (\ell_i - \ell_p + \frac{\hat{L}}{2})^2 - g_1 (\ell_i - \ell_p) - z_p \right)^2$$

En différentiant par rapport à \hat{L} (l'inconnue à déterminer), on obtient la fonction cible à annuler pour trouver la parabole optimale répondant aux deux conditions énoncées :

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[z_i - \frac{A}{2\hat{L}} (\ell_i^2 - \ell_p^2 - 2\ell_i \ell_p) - \frac{A}{2} \left(\ell_i - \ell_p + \frac{\hat{L}}{4} \right) - g_1 (\ell_i - \ell_p) - z_p \right] \cdot \left[\ell_i^2 + \ell_p^2 - 2\ell_i \ell_p - \frac{\hat{L}^2}{4} \right] \right\} = 0$$

Dans les deux cas présentés ici, la solution optimale est obtenue par itération. Une première valeur approximative (soit R soit L, selon le cas) est introduite, puis la convergence vers une solution est obtenue par une méthode itérative.

Performances de l'algorithme

Les performances de l'algorithme de reconstitution des alignements routiers sont mesurées de deux manières. Dans un premier temps, l'algorithme est évalué à partir de traces GPS fictifs qui ont été obtenues à partir d'un alignement dont la géométrie était parfaitement connue. Ces alignements représentaient la

plus grande variété possible de « difficultés ». Ceci a permis entre autre de calibrer l’outil et de vérifier la fiabilité de la théorie développée. En second lieu, des traces GPS de routes du Québec ont été utilisées pour tester le programme, et valider ses performances. Les traces utilisées sont celles de portions des routes 101 (Abitibi), 329 (Laurentides), 222 et 147 (Estrie) dans la province du Québec. Au total, ces traces GPS représentent environ 60km de routes à deux voies.

Traces GPS fictives

Un alignement fictif de 2.6 km est créé, et est soumis à l’algorithme de détermination des caractéristiques géométriques. Les Figure 17 et Figure 18 représentent le tracé en plan et le profil en long tel qu’ils sont reconstitués par l’algorithme.

Figure 17 Trace GPS fictive et tracé en plan reconstitué

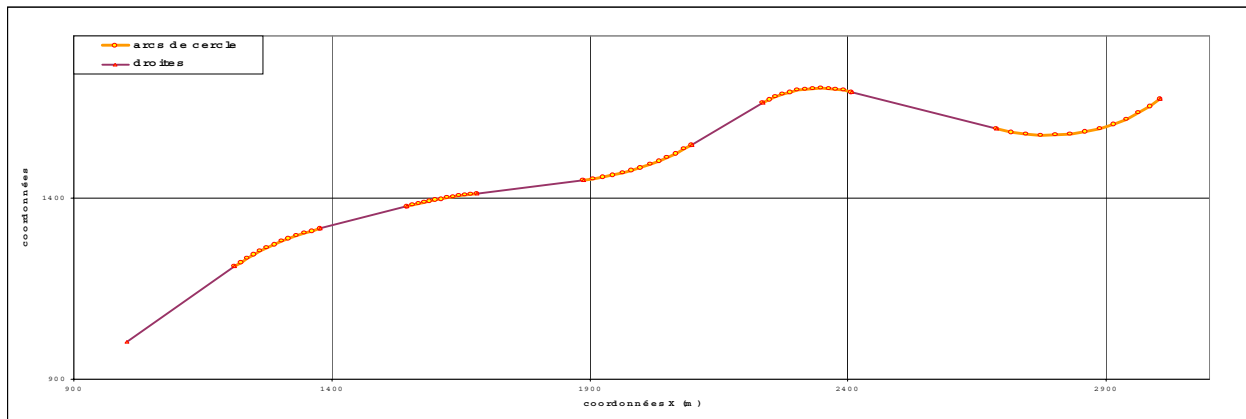
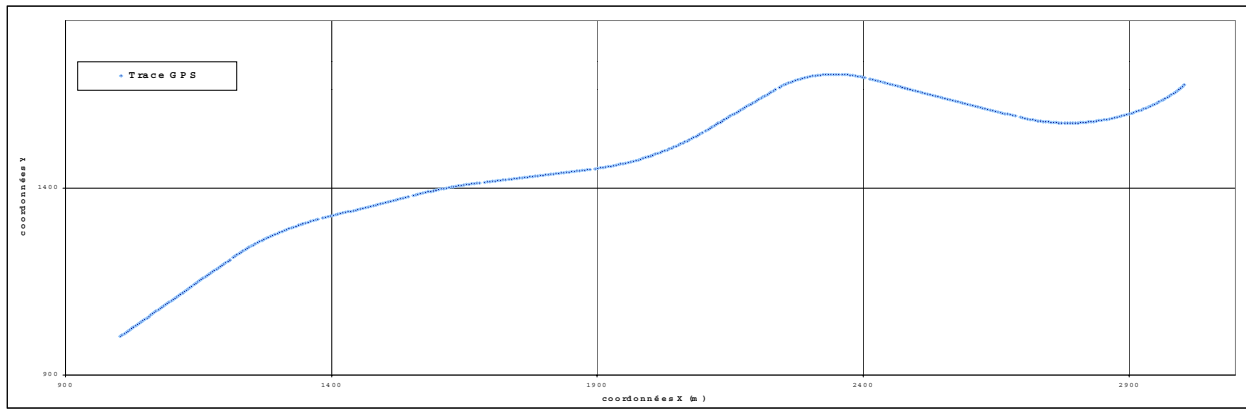
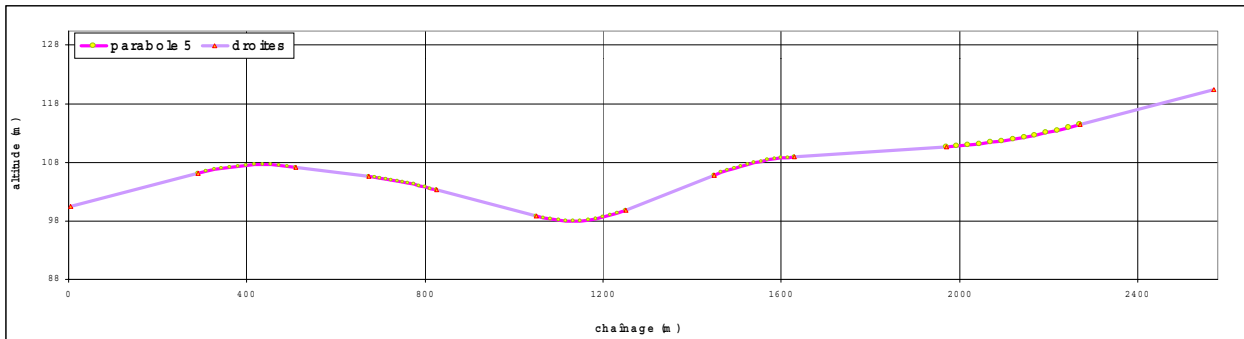
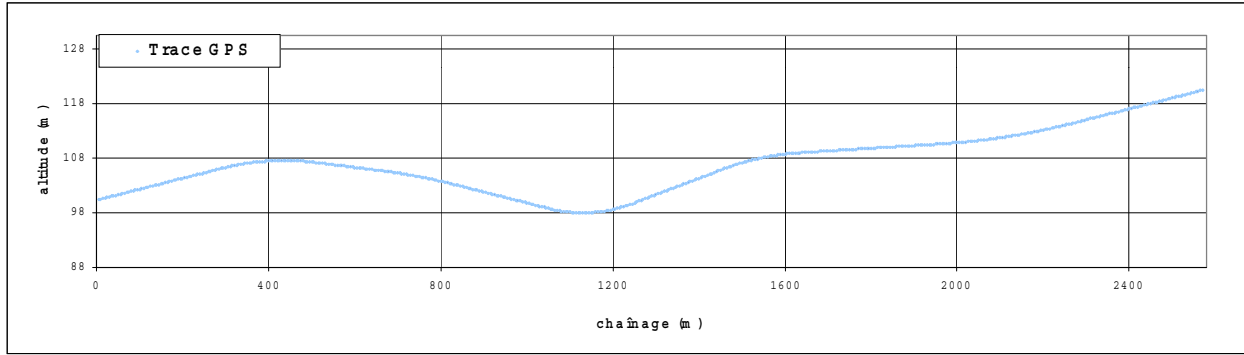


Figure 18 Trace GPS fictive et profil en long reconstitué



On évalue ensuite les performances en mesurant la distance (euclidienne) des points GPS par rapport au tracé reconstitué.

La ligne droite est définie par les coefficients a et b ou par le gisement et un point (x_p, y_p) à travers lequel elle passe:

$$y = ax + b \quad \text{ou} \quad y = \frac{1}{\tan \gamma} x + \left(y_p - \frac{x_p}{\tan \gamma} \right)$$

La distance est alors:

$$d_i = \frac{y_i - ax_i - b}{\sqrt{1 + a^2}}$$

La distance entre un point GPS (x_i, y_i) et la courbe circulaire (rayon R) dont le centre est à O (x_0, y_0) :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - R$$

Pour le tracé fictif de l'exemple, l'erreur moyenne est de 0.6 mm pour le tracé en plan et de moins de 0.001 mm pour le profil en long. Il s'agit là des ordres de grandeurs observés sur les reconstitutions d'alignements fictifs. Bien que ces chiffres n'aient aucune réalité pratique, ils montrent que l'outil est très précis, et qu'il peut fournir des résultats satisfaisants pour une reconstitution des alignements.

Traces GPS de routes du Québec

L'exemple concerne une portion de 4 km de la route 101 en Abitibi. Les éléments reconstitués sont reproduits sur les Figure 19 et Figure 20. Pour ce qui est de la précision, celle-ci est parfaitement acceptable. On trouve pour le profil en long une précision moyenne de 0.15 m avec une valeur maximale de 1.2 m, et pour le tracé en plan, la moyenne est de 0.32 m et l'erreur maximale de 1.56 m.

Figure 19 Profil en long reconstitué sur 4km de route 101

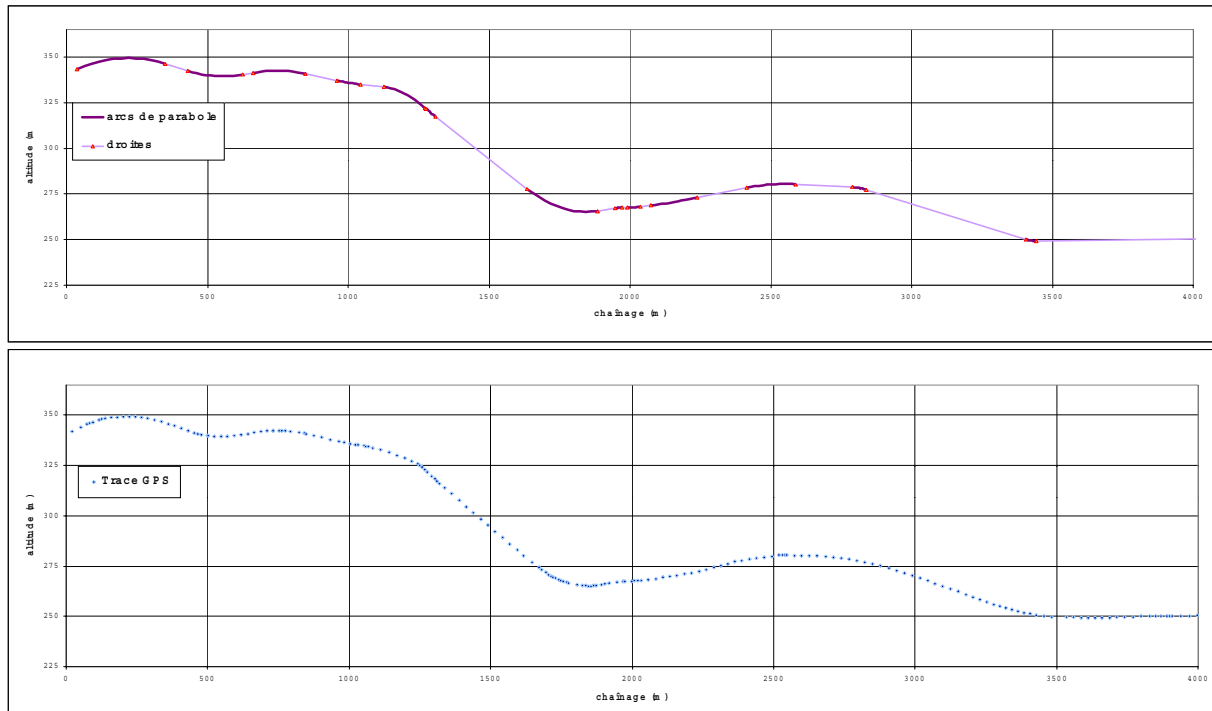
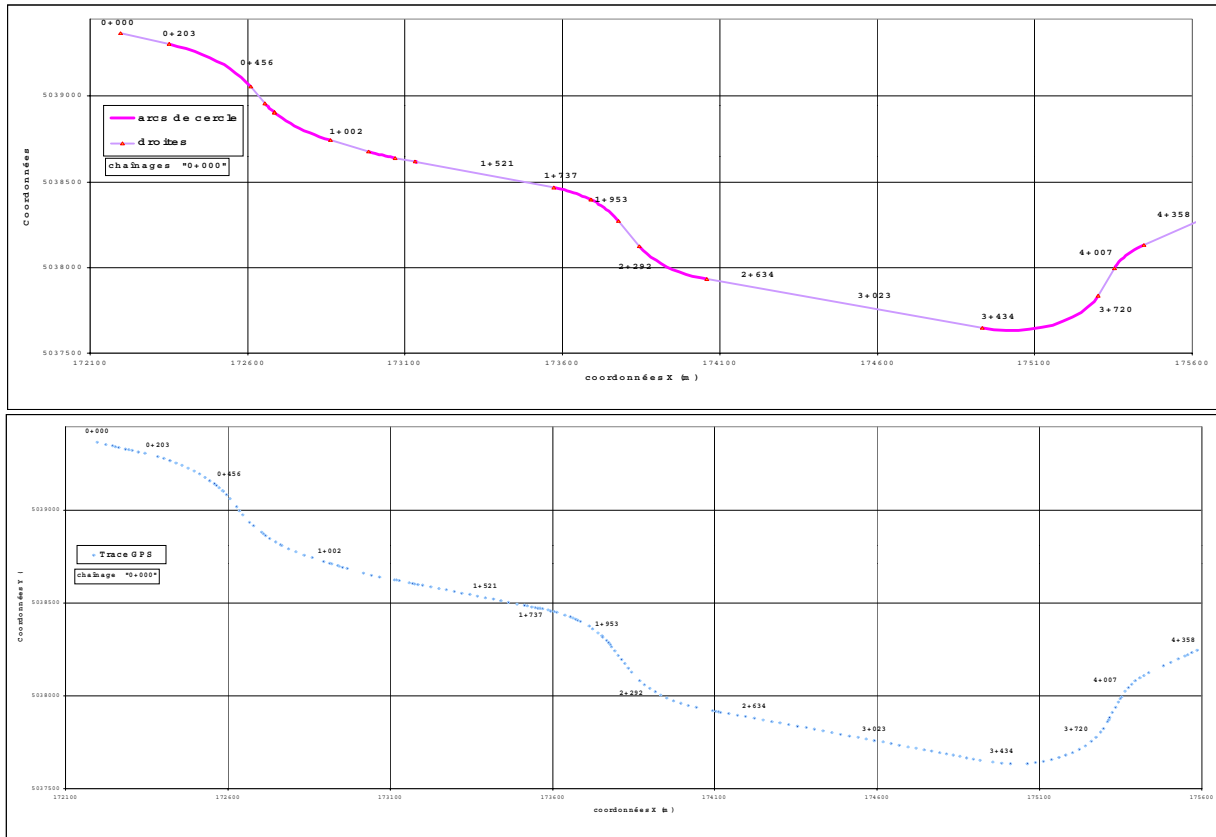
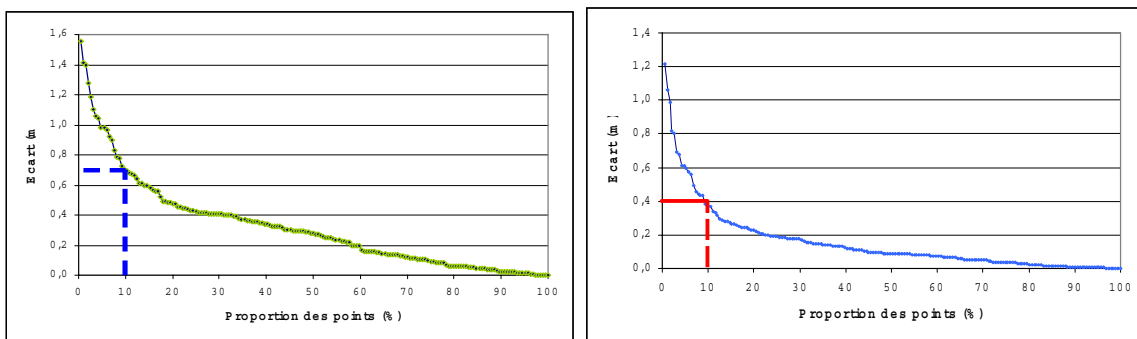


Figure 20 Tracé en plan reconstitué sur 4km de la route 101



La Figure 21 représente également la répartition des écarts selon la proportion des points, et montre que 90% d'entre eux se trouvent à une distance inférieure à 0.7 m en plan et inférieure à 0.4 m en profil.

Figure 21 Ecart sur l'ensemble des points pour la route 101 : à gauche tracé en plan ; à droite profil en long



De nombreux échantillons de routes ont ainsi été analysés, et présentent tous le même type de distribution des erreurs. Il apparaît que les erreurs sont très faibles et très largement acceptables pour des reconstitutions d'alignements routiers.

Il est tout de même important de souligner qu'il est possible d'améliorer les performances de l'algorithme en affinant le filtrage des données, c'est-à-dire en ajustant la valeur de la sensibilité de détection des événements. Le résultat est donc un alignement plus précis, mais également plus morcelé : l'algorithme va capter toutes les irrégularités du terrain et les fera ressortir au travers d'un alignement comportant davantage de courbes (arcs de cercle ou arcs de parabole) et de lignes droites de plus petites longueurs. De tels résultats ne sont cependant pas toujours souhaitables. Il y a donc un compromis à trouver entre performance et efficacité.

Applications pratiques des résultats

Les possibilités d'application de cet outil sont assez nombreuses pour le gestionnaire de réseau. Nous en citerons ici trois à titre d'exemple.

Tout d'abord l'algorithme de reconstitution des alignements routiers peut être utilisé pour constituer une base de données fiable recensant les caractéristiques des routes d'un réseau. Il existe au Québec des inventaires de ces caractéristiques (« Inventaires : Capacité – Courbes – Pentés des routes du Québec ») réalisés dans les années 70 qui compilent ce genre de données. Ces inventaires manquent cependant de précision, étant donné les méthodes utilisées pour dresser ces bases de données. Il serait donc envisageable, dans la mesure où il existe des traces GPS fiables, de constituer relativement rapidement des bases de données fiables et précises de l'ensemble d'un réseau routier.

D'autre part, l'outil peut être utilisé comme instrument permettant certains types d'analyses de circulation. Le guide canadien de conception géométrique des routes (ATC, 1999) contient par exemple une méthode d'évaluation de l'homogénéité des vitesses (*speed consistency*) le long d'un tracé routier (en plan) présentant des enchaînements de courbes et de tangentes. Les caractéristiques du tracé sont requises pour cette étude. D'autres analyses macroscopiques présentées dans le Manuel de capacité HCM (TRB, 2000) pourraient également être facilitées au moyen de cet outil.

Enfin, la troisième possibilité d'application concerne les analyses de circulation par microsimulation sur routes rurales (modèles TWOPAS, TRARR, etc.) qui nécessitent dans la plupart des cas que soient entrées les caractéristiques géométriques de la route à analyser. L'outil constitue là encore une solution rapide et efficace pour ce genre d'applications.

Conclusion

Le modèle fournit des résultats de reconstitution d'alignements routiers satisfaisants du point de vue des écarts de distance entre tracé reconstitué et trace GPS. L'outil développé permet entre autre de compiler relativement rapidement des bases de données utiles des caractéristiques des éléments géométriques des alignements routiers.

Il n'en reste pas moins que les performances de cet algorithme sont étroitement liées aux bases de données qu'il exploite. Les travaux présentés ici ont été conduits à partir de traces GPS présentant un pas de mesure moyen de 18 mètres. Les analyses menées sur des traces fictives ont démontré que les résultats de reconstitution sont d'autant plus précis que le pas de mesure de la trace GPS est petit. Ainsi il serait souhaitable, pour une utilisation optimale de l'algorithme, que les traces GPS employées aient un pas de mesure le plus faible possible (Savvaïdis et al., 2002).

D'autre part, les leviers de contrôle de l'algorithme² (notamment la sensibilité de détection) permettent de raffiner les reconstitutions ou au contraire de réaliser des reconstitutions plus « sommaires » et moins détaillées, ce qui autorise une certaine latitude dans les reconstitutions d'alignement.

² On notera que certains fonctionnements particuliers de l'algorithme n'ont pas été abordés dans cet article, de même que les problèmes rencontrés et les moyens de les résoudre.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies pour l'aide financière, le Ministère des Transports du Québec pour sa collaboration dans ce projet, ainsi que les Directions Territoriales de l'Abitibi, de l'Estrie, et des Laurentides- Lanaudière pour leur contribution.

Références

ATC. Association des Transports du Canada (ou TAC). 1999. *Geometric Design Guide for Canadian Roads*, Chap 1.4, Design Consistency, Chap 2.1.2, Horizontal Alignment, 46 p.

BRANDON, J.A, COWLEY, A. 1983. *A weighted least squares method for circle fitting to frequency response data*, Journal of Sound and Vibration. 83(3) pp.419-424.

LEE, J., SEO, J., HEO, J. 2001. *Estimation of the Design Elements of Horizontal Alignment by the Method of Least Squares*. International Conference FIG Working Week 2001. Seoul. Korea 6–11 May 2001.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (MTQ). mai 2002. *Guide de la codification et du mesurage du réseau routier*, Ministère des transports du Québec, 58 pp.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (MTQ). mai 2002. *Guide de relevés numériques du réseau routier*. Projet 2, phase 2. SAI Géomatique (Solution Administrative et informatique). 57 pp.

SAVVAIDIS P., IFADIS I., LAKAKIS, K. 2000. *Modelling a Vehicle – GPS System for Road Geometrical Characteristics Verification: A First Approach*. Proceedings of IAIN 25th Anniversary World Congress. San Diego.

SAVVAIDIS, P., LAKAKIS, K., IFADIS, I. 2002. *A Mobile Monitoring System For The Verification Of Road Inclinations*. International Symposium on “Space Information-Technologies, Acquisition, Processing and Effective Application”. Nov 2002. Sofia, Bulgaria.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, (2000), *Highway Capacity Manual*, Washington DC., National Academy of Science, ISBN 0-309-06681-6.