

Titre:	Élaboration d'une méthode de détermination des zones de dépassement sur les routes à deux voies en fonction de la distance de visibilité disponible
Auteur:	Hervé Grange
Author:	
Date:	2004
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence:	Grange, H. (2004). Élaboration d'une méthode de détermination des zones de dépassement sur les routes à deux voies en fonction de la distance de visibilité disponible [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7388/
Citation:	

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7388/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Karsten Baass
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES ZONES DE
DÉPASSEMENT SUR LES ROUTES À DEUX VOIES EN FONCTION DE LA
DISTANCE DE VISIBILITÉ DISPONIBLE

HERVÉ GRANGE
DÉPARTEMENTS DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
OCTOBRE 2004



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 0-494-01334-6

Our file *Notre référence*

ISBN: 0-494-01334-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES ZONES DE
DÉPASSEMENT SUR LES ROUTES À DEUX VOIES EN FONCTION DE LA
DISTANCE DE VISIBILITÉ DISPONIBLE**

présenté par : GRANGE Hervé

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CHAPLEAU Robert, Ph.D., président

M. BAASS Karsten, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. TRÉPANIER Martin, Ph.D., membre

À *Melissa, métisse d'Ibiza.*

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon directeur de recherche Karsten Baass qui a su me faire confiance et me guider tout au long de mes recherches et de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble des personnes du Ministère des Transports du Québec qui ont collaboré à ce projet. En particulier Gaétan Lessard de la direction territoriale de Rouyn Noranda, Michel Charbonneau de Saint-Jérôme et Marc Robert de Sherbrooke pour avoir planifié et permis les mesures, et surtout, France Lagué et Jean-François Dubois de Sherbrooke pour l'aide particulière qu'ils m'ont apportée.

Enfin, je remercie les étudiants du laboratoire de circulation et sécurité routière de l'École Polytechnique de Montréal, et plus globalement l'ensemble des personnes au Canada ou ailleurs qui ont rendu mon séjour à Montréal agréable et enrichissant.

Résumé

Sur une route à deux voies contiguës, les manœuvres de dépassement sont nécessaires au maintien d'un bon niveau de service. L'accomplissement d'un dépassement dans des conditions sécuritaires est tributaire de nombreux facteurs extérieurs aux conducteurs, entre autre, le marquage axial. Ce marquage axial a pour objectif de différencier les zones sécuritaires (c'est-à-dire les zones où un dépassement en sécurité est envisageable), des zones non sécuritaires. La localisation de ces zones de dépassement est donc une tâche importante pour les gestionnaires de la route.

Il existe différents critères pour localiser les zones de dépassement. Le principal critère est la distance de visibilité minimum. Cette distance représente un seuil de la visibilité disponible au dessus duquel, un conducteur peut effectuer un dépassement en sécurité. La visibilité disponible est définie comme étant la distance à laquelle un conducteur circulant sur la voie de droite peut voir un véhicule venant en sens inverse sur la voie de gauche. La norme de la signalisation routière du Québec fournit les conditions d'obtention de cette distance de visibilité au dépassement disponible. La valeur du seuil que représente la visibilité minimum a été déterminée à partir d'études sur les distances et les temps de dépassement, et est donc différente selon la vitesse affichée sur les routes.

Le marquage axial représente alors les zones où la visibilité est supérieure à ce seuil (zones de dépassement), ou au contraire, y est inférieure (zone de non dépassement). Dans le cadre du projet intitulé « Problématique des zones de dépassement sur les routes à deux voies contiguës en milieu rural », proposé par le Ministère des Transports du Québec, cette étude propose une nouvelle méthode pour localiser ces zones en fournissant les chaînages de début et de fin, mais aussi les profils de visibilité, c'est-à-dire les courbes présentant la variation de la visibilité le long de la route.

En effet, les méthodes habituellement employées, si elles fournissent de bons résultats, présentent quelques défauts. Dans l'ensemble, elles sont longues, impliquent des équipes importantes et ne respectent pas toujours les normes. De plus, elles ne fournissent que les débuts et fins de zones, mais ne donnent pas d'information sur la visibilité réellement disponible le long de ces zones. Elles présentent également le désavantage de ne pas permettre de remise à jour. En effet, au cas où certains critères sont modifiés (distance de visibilité minimum, vitesse affichée, ...), il est nécessaire de reprendre « à zéro » les mesures.

Il existe également des méthodes calculatoires qui permettent de déterminer les profils de visibilité, qui associés au seuil de visibilité, permettent d'obtenir les débuts et fins de zone. Cependant, les algorithmes de calcul de ces méthodes sont peu pratiques car ils nécessitent des données qui ne sont pas toujours disponibles. En particulier le logiciel TWOPAS (*Two lane Passing*) utilise l'alignement de la route, c'est à dire les données géométriques des profils en long et des tracés en plan.

La nouvelle méthode proposée utilise un algorithme de calcul, dont la principale donnée d'entrées est une trace GPS (*Global Positioning System*) de la route. Cette trace GPS est une ligne de points GPS (coordonnées terrestres x, y, z) représentant l'axe central de la route. Cette trace GPS est déjà disponible dans la plupart des Directions Territoriales du Ministère des Transports du Québec. Si elle ne l'est pas, elle s'obtient rapidement et à peu de frais. Les autres données à entrer sont issues de la norme de la signalisation routière du Québec.

L'algorithme détermine la distance de visibilité en chaque point GPS en calculant par incrémentation. Il détermine en effet si la visibilité entre un point fixe représentant le conducteur (l'observateur) et un autre point représentant le véhicule en sens inverse (la cible) est disponible. Le calcul se fait indépendamment pour le profil en long et pour le tracé en plan. En combinant les visibilités obtenues pour le profil en long à celles obtenues pour le tracé en plan, l'algorithme fournit un profil de visibilité de la route. À

partir de la distance de visibilité minimum, les zones potentielles de dépassement peuvent être localisées.

Pour déterminer la valeur de la méthode proposée et surtout de son algorithme de calcul, il a fallu procéder à une campagne de mesures sur différentes routes du réseau Québécois. Cette campagne de mesure en collaboration avec des équipes du Ministère des Transports du Québec, a débuté par la mise en place d'une méthode pratique de mesure donnant les distances de dépassement réellement disponibles le long de la route. Ces mesures ont été effectuées à Sherbrooke, Saint-Jérôme et Rouyn Noranda, sur près de 40 kilomètres de route.

La validation de l'algorithme a consisté à comparer visuellement et numériquement les profils de visibilité que celui-ci a fourni, aux profils obtenus lors des mesures. Il a été constaté que l'algorithme donne des résultats très satisfaisants, puisqu'ils sont en accord tant avec les mesures qu'avec la théorie. De plus ces résultats sont directement liés à la précision et au pas du relevé GPS.

Ce travail de recherche permet d'aboutir dans une dernière partie à un guide d'utilisation en trois points de la méthode proposée :

- Relevé de la trace GPS de la route à étudier;
- Utilisation de l'algorithme à travers un programme codé en VBA (*Visual Basic for Application*) sous interface Excel®;
- Implantation des zones potentielles de dépassement sur la route.

Finalement cette nouvelle méthode doit s'inscrire parmi un ensemble d'outils à venir et à mettre à la disposition des gestionnaires de la route, pour tout ce qui concerne la problématique du dépassement.

Abstract

On a two lane highway, the overtaking manoeuvres are necessary to maintain a good level of service. The way to overtake in safe conditions depends on a lot of factors independent from the drivers, especially, the axial marking. The aim of this axial marking is to differentiate the safety zones (i.e. the zones where a safe overtaking can be considered) from the unsafe ones. The localisation of these passing zones is thus an important task for the road managers.

There are various criterions to localize these passing zones. The main one is the minimum sight distance. This distance represents a threshold of the available visibility above which a driver can overtake safely. The available sight is defined as being the distance to which a person driving on the right lane can see a vehicle coming from the opposite on the left lane. The norm of the Quebec road markings gives the conditions to obtain this available passing sight distance. The value of the threshold representing the minimum sight distance has been determined from studies on the distances and times to overtake and is thus different according to the speed limits on roads.

In that way, the axial marking represents the zones in which the sight is above this threshold (passing zones), or, on the contrary, is lower (no-passing zones). Within the limits of the project called “a problematic subject about passing zones on two lane rural highways” proposed by the Quebec Department of Transport (MTQ: *Ministère des Transport du Québec*), this study proposes a new method to localize these zones, in giving the beginning and end stations and also the sight profiles, that are the graphics presenting the variation of sight along the road.

Indeed, the methods usually used, if they provide good results, have some defects. On the whole, they are long, they imply important teams and don’t always respect the norms. Moreover, they only provide the beginnings and ends of the zones, but do not

give pieces of information about the real available sight along these zones. They also have the disadvantage not to allow updating. As a matter of fact, if some criterions are modified (minimum sight distance, limited speed, ...), it is necessary to start again all the measures.

There are also reckoning methods which enable to determine the sight profiles which associated to sight threshold, can provide the beginnings and ends of zones. However, the reckoning algorithms of these methods are not very practical because they require data which are not always available. In particular the TWOPAS software (TWO lane PAassing) uses the horizontal and vertical alignments.

The proposed new method uses a reckoning algorithm whose main input data is a GPS (Global Positioning System) track of the road. This GPS track is a line of GPS points (ground coordinates x, y, z) representing the central axis of the road. This GPS track is already available in most territorial offices of the MTQ. If it doesn't exist, it can be obtained quickly and cheaply. The other data to use come from the road sign norm in of the MTQ.

The algorithm used determines the sight distance for each GPS point by calculating by incrementation. As a matter of fact, it determines if the sight between a fixed point representing the driver (the observer) and an other point representing the vehicle coming from the opposite direction (the target) is available. The reckoning is done independently for the longitudinal section and the horizontal one. In combining the sights obtained in both alignments, the algorithm gives a sight profile of the road. From the minimum sight distance, the potential passing zones can be located.

To determine the value of the method which is suggested, and above all of its reckoning algorithm, it has been necessary to organize a campaign of measures on different roads in Quebec. This measuring done with the help of teams from the MTQ, started with the setting of a practical measuring method giving the passing sight distances really available along the road. These measures have been carried out in Sherbrooke, Saint-

Jerome and Rouyn Noranda on more than 35 kilometres. To validate the algorithm, we visually and numerically compared the sight profiles provided by it, with the profiles obtained when we made the measures. We then noted that the algorithm gives really satisfying results since they are in agreement at the same time with the measures and the theory. Moreover, these results are directly linked to the precision and the step of the GPS measures.

This research enables to realize a user's guide in 3 points for the proposed method:

- Recording of the GPS track on the studied road;
- Use of the algorithm with a VBA (Visual Basic for Application) program run under Excel;
- Setting up of the potential passing zones on the road.

In the end, this new method must take place among a future set of tools aimed at the road managers, for every task which concerns passing questions.

Table des matières

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxi
LISTE DES ANNEXES	xxii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 LA MANOEUVRE DE DÉPASSEMENT	3
1.1 Les phases du dépassement.....	3
1.2 La manière de dépasser	4
1.3 La distance de visibilité de dépassement	5
1.3.1 La distance nécessaire au dépassement.....	5
1.3.2 Conception et marquage.....	6
1.3.3 La distance de visibilité disponible.....	7
1.3.4 Les barrières à la visibilité	8
1.4 La législation	9
1.5 Les normes sur le marquage des zones de dépassement et la distance de visibilité de dépassement	10
1.5.1 La visibilité minimum.....	11
1.5.2 La mesure de la distance de visibilité disponible.....	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	15

2.1	Méthodes sur les lieux à détermination directe.....	15
2.1.1	La méthode en marchant	15
2.1.2	La méthode à deux véhicules	16
2.1.3	La méthode à un véhicule	17
2.1.4	Méthode avec télémètre	18
2.2	Méthodes sur les lieux avec post-traitement	18
2.2.1	Videolog/Photolog	18
2.2.2	Levés laser aéroportés (Leroux, 2003).....	19
2.2.3	Levés par caméra numérique	21
2.2.4	Levés GPS haute précision (Leroux, 1993)	22
2.3	Méthodes calculatoires.....	24
2.3.1	TWOPAS	24
2.3.2	Modèle 3D.....	27
2.3.3	Leçons	28
CHAPITRE 3 INSUFFISANCES DES MÉTHODES ET PROBLÉMATIQUE		29
CHAPITRE 4 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE		32
4.1	Objectifs	32
4.2	Méthodologie	32
CHAPITRE 5 RECHERCHE DE LA MÉTHODE		33
5.1	Principe calculatoire.....	33
5.2	Compréhension de la variation des profils de visibilité	37
5.2.1	Allure du profil de visibilité en courbe horizontale	37
5.2.2	Allure des courbes de visibilité en courbes verticales	40
CHAPITRE 6 DÉVELOPPEMENT DE L'ALGORITHME DE GÉNÉRATION DES PROFILS DE VISIBILITÉ		42
6.1	Obtention de la visibilité issue des contraintes verticales	43
6.1.1	Principe de calcul	43

6.1.2	Obtention des lignes caractéristiques du profil en long	45
6.1.3	Détails de l'algorithme pour la visibilité verticale.....	46
6.2	Obtention de la visibilité issue des contraintes horizontales.....	49
6.2.1	Principe de calcul	49
6.2.2	Obtention des lignes caractéristiques du tracé en plan.....	50
6.2.3	Détails de l'algorithme pour la visibilité horizontale.....	55
6.3	Distance de visibilité et zone de dépassement	59
6.3.1	Visibilité générale	59
6.3.2	Visibilité à pas constant	59
6.3.3	Détermination des zones de dépassement.....	60
6.4	Localisation des zones de dépassement et espacement des points GPS	63
6.5	Code du programme	65
CHAPITRE 7	MÉTHODE DE CUEILLETTE DE DONNÉES POUR FINS DE VALIDATION.....	66
7.1	Obtention de la visibilité	68
7.2	Les erreurs de mesure.....	71
7.2.1	Erreur systématique.....	71
7.2.2	Les erreurs ponctuelles ou aléatoires de mesure	80
7.2.3	Autres sources d'erreurs aléatoires	84
7.3	Remarques sur les données obtenues par la méthode pratique et leurs utilisations ultérieures pour validation de l'algorithme	84
CHAPITRE 8	CHOIX DES SITES	87
8.1	Route 101, Abitibi-Temiscamingue	88
8.2	Route 329, Laurentides	90
8.3	Route 147, Cantons de l'Est.....	93
8.4	Route 222, Cantons de l'Est.....	95
8.5	Obtention des caractéristiques géométriques des routes.....	96

CHAPITRE 9 APPLICATION, VALIDATION ET ANALYSE DE LA MÉTHODE.....	99
9.1 Application de l'algorithme aux sites choisis	99
9.1.1 Obtention de la trace GPS des routes	99
9.1.2 Obtention des résultats pour chaque route	100
9.2 Cueillette des données pour fins de validation.....	100
9.2.1 Présentation du protocole de la méthode pratique	100
9.2.2 Route 101, Abitibi-Temiscamingue	104
9.2.3 Route 329, Laurentides	104
9.2.4 Route 147, Cantons de l'Est.....	105
9.2.5 Route 222, Cantons de l'Est.....	105
9.2.6 Traitement des données.....	106
9.3 Analyses et validation	107
9.3.1 Comparaison des profils de visibilité.....	107
9.3.2 Comparaison des zones potentielles de dépassement obtenues	122
9.4 Conclusions de l'analyse.....	124
CHAPITRE 10 GUIDE D'UTILISATION DE LA MÉTHODE.....	127
10.1 Obtention des données d'entrée	127
10.2 Présentation du programme dans l'environnement Excel.....	128
10.3 Entrées des données nécessaires et lancement du calcul	128
10.4 Présentation des résultats	134
10.5 Implantation des résultats sur la route.....	138
CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	141
BIBLIOGRAPHIE.....	144
ANNEXES.....	149

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Les distances de visibilité au dépassement minimum pour le marquage des routes selon la norme québécoise.....	11
Tableau 5-1 Zone de dépassement potentielle du profil de visibilité de la figure 5-1	34
Tableau 5-2 Distance de visibilité dans le virage pour les 11 rayons de courbures étudiés, dans les conditions de largeur de voie et d'accotement utilisées.....	39
Tableau 6-1 Tableau de distance de visibilité associé à la figure 6-13	62
Tableau 8-1 Exemple de tableau de caractéristiques verticales	97
Tableau 8-2 Exemple de tableau de caractéristiques horizontales	98
Tableau 9-1 Étude des cas issus des conditions horizontales	112

Liste des figures

Figure 1-1 Les phases du dépassement	4
Figure 1-2 Les composantes de la visibilité de dépassement.....	5
Figure 1-3 Position du point critique	6
Figure 1-4 Exemple de profil de visibilité	7
Figure 1-5 Limite de visibilité dans les courbes horizontales.....	8
Figure 1-6 Limite de visibilité, courbes verticales convexes.....	9
Figure 1-7 Les hauteurs dans la norme du Québec	12
Figure 1-8 Les positions transversales pour un virage à droite dans la norme du Québec.....	13
Figure 1-9 Les positions transversales pour un virage à gauche dans la norme du Québec.....	14
Figure 2-1 Déroulement de la méthode à un véhicule	17
Figure 2-2 Séquence d'exploitation des données, laser aéroporté	20
Figure 2-3 Séquence d'exploitation des données GPS	23
Figure 2-4 Données d'entrées (INPUT) et sorties (OUPUT) de TWOPAS dans l'IHSDM	25
Figure 2-5 Courbes horizontales dans TWOPAS	26
Figure 2-6 Courbes verticales dans TWOPAS.....	27
Figure 3-1 Schéma représentatif de l'erreur commise entre un relevé habituel de la distance de visibilité et la distance de visibilité telle que définie dans la norme.....	31
Figure 5-1 Utilisation du profil de visibilité pour déterminer les zones de dépassement	33
Figure 5-2 Exemple d'utilisation du profil d'une route	35
Figure 5-3 Exemple d'utilisation d'un nuage de points	36
Figure 5-4 Allure du profil de visibilité pour une courbe horizontale	38
Figure 5-5 Allure des profils de visibilité pour une courbe verticale convexe	40
Figure 6-1 Entrées et sorties de l'algorithme	43

Figure 6-2 Utilisation du profil pour l'obtention de la distance de visibilité verticale	44
Figure 6-3 Schématisation du profil en long par 3 lignes	46
Figure 6-4 La condition verticale est vérifiée	47
Figure 6-5 La condition verticale n'est pas vérifiée.....	48
Figure 6-6 Utilisation du tracé en plan pour l'obtention de la distance de visibilité horizontale.....	50
Figure 6-7 droite d_i reliant les points $(x_{i-1} ; y_{i-1})$ et $(x_{i+1} ; y_{i+1})$	52
Figure 6-8 droite d'_i parallèle à d_i et passant par le point $(x_i ; y_i)$	52
Figure 6-9 droite d''_i	53
Figure 6-10 Schématisation du tracé en plan par 5 courbes.....	55
Figure 6-11 Les deux conditions sont vérifiées	57
Figure 6-12 La condition à droite n'est pas vérifiée	58
Figure 6-13 Courbe de visibilité utilisée dans l'exemple.....	61
Figure 6-14 Utilisation d'un petit pas de relevé GPS	64
Figure 6-15 Utilisation d'un grand pas GPS	64
Figure 6-16 Schéma séquentiel des principales tâches du programme	65
Figure 7-1 Schématisation de la méthode habituellement employée.....	66
Figure 7-2 Positions horizontales pour le relevé de la visibilité à gauche	67
Figure 7-3 Thalès appliqué aux positions des cibles dans un virage à droite	69
Figure 7-4 Thalès appliqué aux positions des cibles dans un virage à gauche	70
Figure 7-5 Écart de position de l'observateur.....	71
Figure 7-6 Erreurs de mesure impliquées par le protocole dans le cas d'un virage à droite	72
Figure 7-7 Erreurs de mesure impliquées par le protocole dans le cas d'un virage à gauche	73
Figure 7-8 Segment rectiligne	74
Figure 7-9 Profils de visibilité de la méthode idéale et de la méthode pratique dans un virage à droite de rayon $R=2000m$	75

Figure 7-10 Courbe de l'erreur relative entre la méthode idéale et la méthode pratique pour un virage à droite de rayon $R=2000\text{m}$	76
Figure 7-11 Profils de visibilité de la méthode idéale et de la méthode pratique dans un virage à gauche de rayon $R=2000\text{m}$	78
Figure 7-12 Courbe de l'erreur relative entre la méthode idéale et la méthode pratique pour un virage à gauche de rayon $R=2000\text{m}$	79
Figure 7-13 Influence de la largeur de l'accotement dans la mesure pratique des distances de visibilité	81
Figure 7-14 Allure de l'erreur relative de mesure pour une hauteur des yeux différente de 1,05 mètres.....	83
Figure 7-15 Différence entre visibilité mesurée et visibilité exacte	86
Figure 8-1 Tracé en plan de la route 101	89
Figure 8-2 Profil en long de la route 101	89
Figure 8-3 Situation de la route 101.....	90
Figure 8-4 Tracé en plan de la route 329	91
Figure 8-5 Profil en long de la route 329	91
Figure 8-6 Situation de la route 329.....	92
Figure 8-7 Situation de la route 147.....	93
Figure 8-8 Tracé en plan de la route 147	94
Figure 8-9 Profil en long de la route 147	94
Figure 8-10 Situation de la route 222.....	95
Figure 8-11 Tracé en plan de la route 222	96
Figure 8-12 Profil en long de la route 222	96
Figure 9-1 Schématisation de la méthode de mesure du protocole étalon : positions et notations	102
Figure 9-2 Profils de visibilité, route 147, sens 1, chaînages 2+050 à 3+600	109
Figure 9-3 Courbe d'erreur relative associée aux profils de la Figure 9-2	109
Figure 9-4 Cas 222.1.3, positions des deux profils de visibilité	111
Figure 9-5 Cas 222.2.1	113

Figure 9-6 Cas 101.1.1, hauteur d'œil pratiquée trop grande	116
Figure 9-7 Cas 101.2.4, hauteur d'œil pratiquée trop faible	116
Figure 9-8 cas 147.1.2, hauteur d'œil pratiquée trop grande	117
Figure 9-9 Cas 147.1.4, hauteur d'œil pratiquée trop grande	117
Figure 9-10 Cas 147.2.1, une bosse engendre un décalage vertical du profil.....	118
Figure 9-11 Cas 147.2.2, hauteur d'œil pratiquée trop grande	118
Figure 9-12 Cas 147.2.5, une bosse engendre un décalage vertical du profil.....	119
Figure 9-13 cas 222.1.2, hauteur d'œil pratiquée trop grande	119
Figure 9-14 Cas 222.1.4, hauteur d'œil pratiquée trop grande	120
Figure 9-15 Cas 222.2.4, hauteur d'œil pratiquée trop faible	120
Figure 9-16 Cas 222.2.7, une bosse engendre un décalage vertical du profil.....	121
Figure 9-17 Distribution des écarts de position entre les débuts et fins des zones déterminées par les mesures et par l'algorithme	123
Figure 10-1 Les 7 colonnes de la feuille « Données d'entrées »	129
Figure 10-2 Boîte de dialogue d'entrée des données constantes du programme (les valeurs par défaut sont celles indiquées sur la figure)	131
Figure 10-3 Exemple de message d'erreur pour la première boîte de dialogue	132
Figure 10-4 Boîte de dialogue "choix des résultats optionnels à afficher"	133
Figure 10-5 Exemple de message d'erreur affiché par le programme	134
Figure 10-6 Message indiquant la fin du calcul	134
Figure 10-7 Tableau « Liste des visibilités à pas constant » affiché par le programme ..	135
Figure 10-8 Tableau « Marquage des zones de dépassement potentielles » affiché par le programme	136
Figure 10-9 Tableau « Visibilité aux points GPS » affiché par le programme	137
Figure 10-10 Tableau « Visibilités horizontales » affiché par le programme.....	137
Figure 10-11 Tableau « Visibilités verticales » affiché par le programme.....	138
Figure 10-12 Méthode de vérification de l'implantation des zones.....	139

Liste des sigles et abréviations

AASHTO :American Association of State Highway and Transportations Officials

D-GPS: Differential GPS

DT: Direction Territoriale

FHWA: Federal Highway Administration

GPS: Global Positioning System

IHSMD: Interactive Highway Safety Design Model

MTM: Modifiée Transverse de Mercator

MTQ: Ministère des Transports du Québec

SAI : Solution Administrative et Informatique

TWOPAS : Two lane Passing

VBA : Visual Basic for Application

Liste des annexes

Annexe A:Détails des calculs utilisés pour la détermination théorique des distances de visibilité disponible dans une courbe horizontale	149
Annexe B : Code de l'algorithme.....	165
Annexe C: Les mesures terrains.....	195
Annexe D: Alignement des routes étudiées	198
Annexe E: Profils de visibilité (les différences majeures y sont indiquées)	214
Annexe F: Zones potentielles de dépassement	227
Annexe G: Courbes de l'erreur relative entre résultats de l'algorithme et des mesures.....	231

Introduction

Dans les domaines du design et de marquage des routes, le souci majeur est la mise en place d'un bon niveau de service associé à une sécurité des usagers maximum. Un bon niveau de service signifie une certaine fluidité du trafic, c'est-à-dire que chaque usager peut rouler à sa vitesse désirée en subissant au minimum les contraintes engendrées par la conduite des autres usagers tout en respectant les lois de la circulation. Le conducteur doit donc faire certains choix : à quelle vitesse rouler, quand dépasser, où dépasser. Le marquage au sol et les autres indications mises en place par les gestionnaires de la route permettent d'aider l'usager dans ses décisions et lui permettent de circuler en sécurité. La mise en place des zones de dépassement sur les routes à deux voies est donc très importante.

Un des principaux critères pour établir ces zones de dépassement, c'est-à-dire déterminer où et quels types (continu ou discontinu) de marquage placer, est la distance de visibilité de dépassement minimale. Cette distance représente un seuil de la distance de visibilité de dépassement disponible, seuil au dessus duquel, il est considéré qu'un conducteur peut entreprendre un dépassement de manière sécuritaire. Les segments de route où ce seuil est dépassé, sont alors des zones potentielles de dépassement.

La distance de visibilité de dépassement disponible en un point p est définie comme étant la distance à laquelle un conducteur placé en p et dont les yeux sont à une hauteur h au dessus de la chaussée, peut voir un véhicule d'une hauteur h' arrivant en sens inverse sur la voie opposée.

Si les méthodes principalement employées pour localiser les zones de dépassement permettent de déterminer les zones où la distance de visibilité est suffisante, elles ne visent pas à déterminer la visibilité disponible à chaque endroit. Or connaître cette

information apporterait de nombreux avantages pour les gestionnaires. D'une part, d'un point de vue pratique, à partir de profils de visibilité (courbes représentant les variations de la visibilité le long d'une route), il est simple de déterminer les chaînages où le seuil (représenté par la distance de visibilité minimale) est dépassé, et donc de localiser les débuts et fins de zone de dépassement potentielle. D'autre part la connaissance de la visibilité le long d'un tronçon peut être un outil décisionnel supplémentaire, et peut donc permettre une gestion plus facile de la route.

Mettre en place des méthodes qui permettent de réaliser la détermination systématique et efficace de la visibilité représente un intérêt incontestable. C'est dans cette optique, et à travers le projet du Ministère des Transports du Québec intitulé « Problématique des zones de dépassement sur les routes à deux voies contiguës en milieu rural », que ce mémoire s'inscrit. Ainsi, nous visons ici à présenter l'élaboration d'une nouvelle méthode de détermination des distances de visibilité de dépassement et de localisation des zones potentielles de dépassement.

Pour ce faire, à partir de réflexions sur les méthodes existantes ou référencées, nous dégagerons les principales clefs de l'élaboration de la nouvelle méthode, c'est-à-dire que la philosophie et le principe de celle-ci seront mis à jour. Cette méthode sera calculatoire et utilisera des coordonnées x, y, z de la route telles que obtenues par des mesures GPS. Une fois que l'algorithme de calcul sera déterminé, il faudra le confronter à des cas réels. Une campagne de cueillettes de données sera alors menée. Celle-ci nécessitera la collaboration d'équipes du Ministère des Transports du Québec. Cette coopération visera à sélectionner les sites d'étude et à entreprendre la cueillette proprement dite. La comparaison entre relevé pratique et résultats de l'algorithme, conduira à la validation de la nouvelle méthode proposée.

Au final, ce travail aboutira au mode d'emploi de la nouvelle méthode.

CHAPITRE 1 La manœuvre de dépassement

Pour comprendre les implications de l'implantation de zones de dépassement il est nécessaire de mieux connaître les considérations relatives à la manœuvre du dépassement. Cette manœuvre implique plusieurs véhicules qui sont en interaction. Elle va donc dépendre du comportement des utilisateurs de la route. Elle est aussi dépendante de l'environnement et entre autres de la visibilité.

1.1 Les phases du dépassement

Il est courant de décomposer la manœuvre du dépassement en quatre phases successives (AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials*) :

1. un véhicule se présente derrière un autre véhicule sur la même voie de circulation. Le véhicule suiveur désire circuler à une vitesse plus grande que le véhicule suivi.
2. le conducteur suiveur, après avoir jugé les circonstances de circulation, décide de dépasser. Il commence à sortir de la voie de droite tout en accélérant.
3. le véhicule dépassant (*passing vehicle*) roule sur la voie de gauche. Il continue à accélérer. Quand il juge qu'il peut se rabattre sur la voie avec une distance de sécurité suffisante par rapport au véhicule dépassé (*overtaken vehicle*), il commence à sortir de la voie de gauche.
4. le véhicule dépassant finit de se rabattre sur la voie de droite et continue sa route.

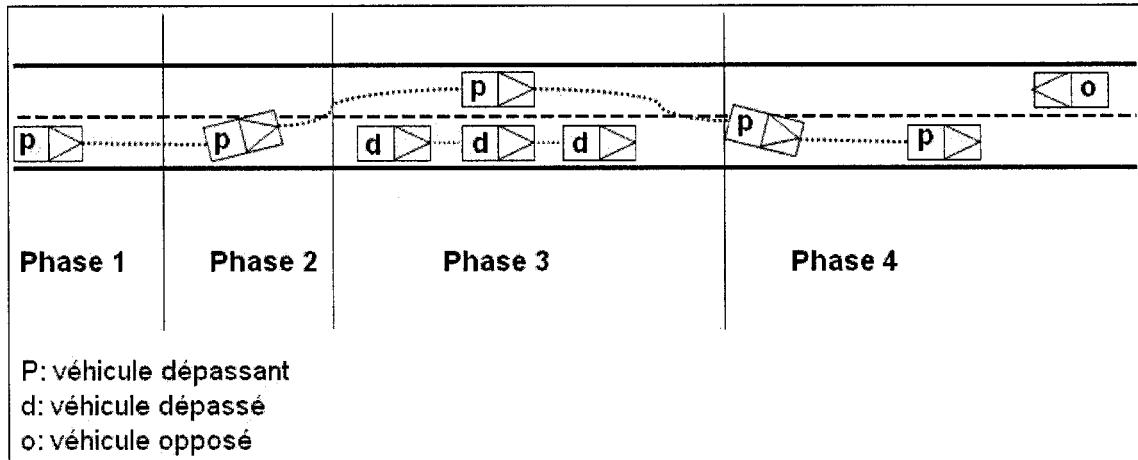


Figure 1-1 Les phases du dépassement

Remarques :

- le véhicule suiveur est considéré sur la voie de gauche dès que la partie avant gauche de son véhicule dépasse la ligne médiane et jusqu'à ce que la partie gauche de son pare choc soit revenu du côté droit de la ligne médiane.
- Lors de la manœuvre, il peut y avoir des véhicules circulant en sens opposé sur la voie de gauche. On les appelle alors véhicule opposé (*opposing vehicle* ou *oncoming vehicle*).

1.2 La manière de dépasser

Il faut distinguer deux manières de dépasser :

- Dépassement lancé (*flying pass*) : le véhicule dépassant a une vitesse plus élevée que celui à dépasser et déboîte sans ralentir et sans se ranger derrière celui-ci ;
- Dépassement avec attente (*delayed pass*) : le véhicule qui dépasse commence sa manœuvre après avoir roulé à la même vitesse que le véhicule dépassé et derrière celui lui. Ce type de dépassement est celui qui demande la plus grande distance donc une visibilité plus importante. Il est donc considéré comme la manœuvre critique.

1.3 La distance de visibilité de dépassement

1.3.1 La distance nécessaire au dépassement

De la même manière que le dépassement se compose de quatre étapes, la distance nécessaire pour le dépassement peut se décomposer en quatre parties :

- D_1 = Distance parcourue pendant le temps de perception/réaction dans la voie de droite;
- D_2 = Distance parcourue par le véhicule dépassant pendant que celui-ci occupe la voie de gauche;
- D_3 = Distance de sécurité entre le véhicule dépassant et celui qui vient en sens opposé quand le véhicule dépassant s'est rabattu sur la voie de droite;
- D_4 = distance parcourue par le véhicule venant en sens opposé pendant que le véhicule dépassant occupe la voie de gauche.

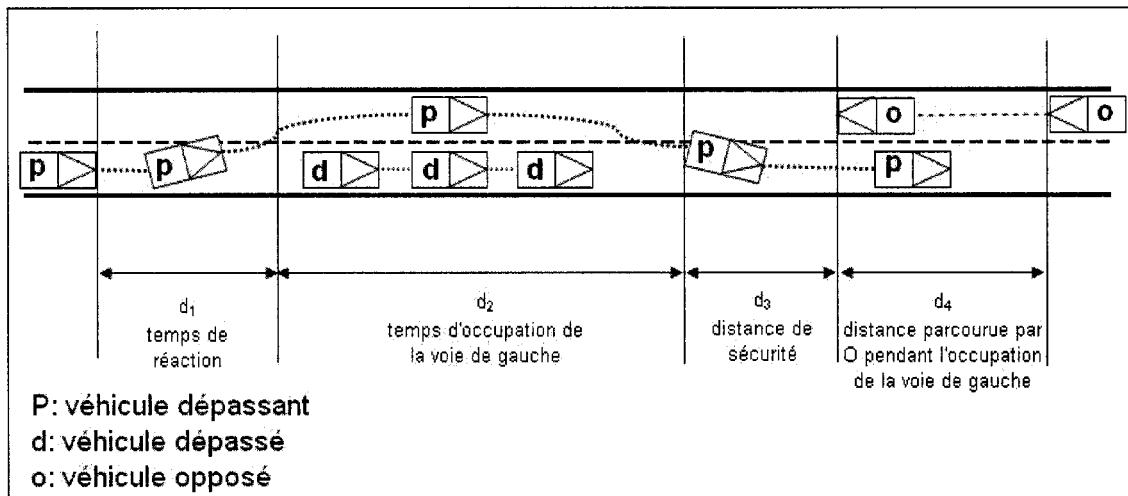


Figure 1-2 Les composantes de la visibilité de dépassement

La distance de dépassement est donc fonction de plusieurs facteurs; entre autres le temps de réaction, le jugement, l'accélération et la vitesse pratiquée par le conducteur du

véhicule dépassant. Ces facteurs sont selon les pays et les provinces, ce qui va conduire à des distances de visibilité différentes.

1.3.2 Conception et marquage

Il faut remarquer que dans la littérature, on retrouve deux approches de la distance de visibilité de dépassement. La première est utilisée pour la conception géométrique des routes et la seconde pour le marquage. Cette différence a une explication historique (BAASS, 1993).

Dans le cas de la conception des routes, il faut prendre $DVD=d_1+d_2+d_3+d_4$ comme valeur de la distance de dépassement.

Pour le marquage des routes, on va prendre en compte le jugement du conducteur. On suppose que même s'il a placé son véhicule sur la voie opposée, il peut prendre la décision d'avorter son dépassement tant qu'il n'a pas dépassé le point critique. Ce point critique est défini comme l'endroit où la distance pour finir le dépassement est égal à celle pour l'abandonner. C'est environ le point où le véhicule dépassant et le véhicule dépassé se trouvent côté à côté.

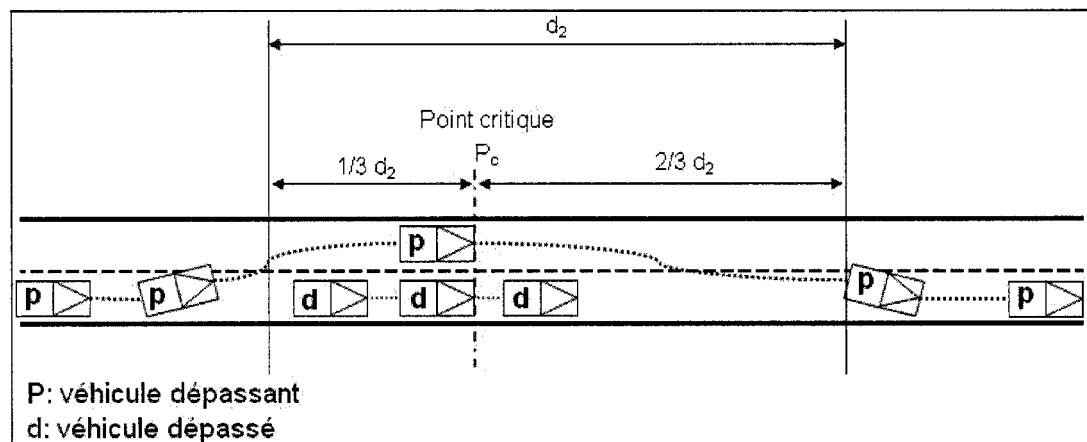


Figure 1-3 Position du point critique

La distance de visibilité de dépassement est alors la somme de d_3 , d_4 et d'une partie de d_2 .

1.3.3 La distance de visibilité disponible

On appelle distance de visibilité de dépassement disponible la distance à laquelle un conducteur circulant sur la route peut voir un obstacle (automobile, camion, bus...) venant en sens inverse sur la voie de gauche. Différents facteurs interviennent pour déterminer cette distance de visibilité disponible, entre autres, la hauteur des yeux du conducteur, la hauteur de l'obstacle, les obstructions visuelles comme les bancs de neige, la végétation ou encore les bâtiments sur le bord de l'emprise.

La distance de visibilité de dépassement le long de la route évolue donc selon le profil, le plan, et l'environnement de la route. Il existe donc pour chaque segment de route, un profil de visibilité qui représente la distance de visibilité pour chaque point du segment.

La figure suivante montre l'allure typique du profil de visibilité :

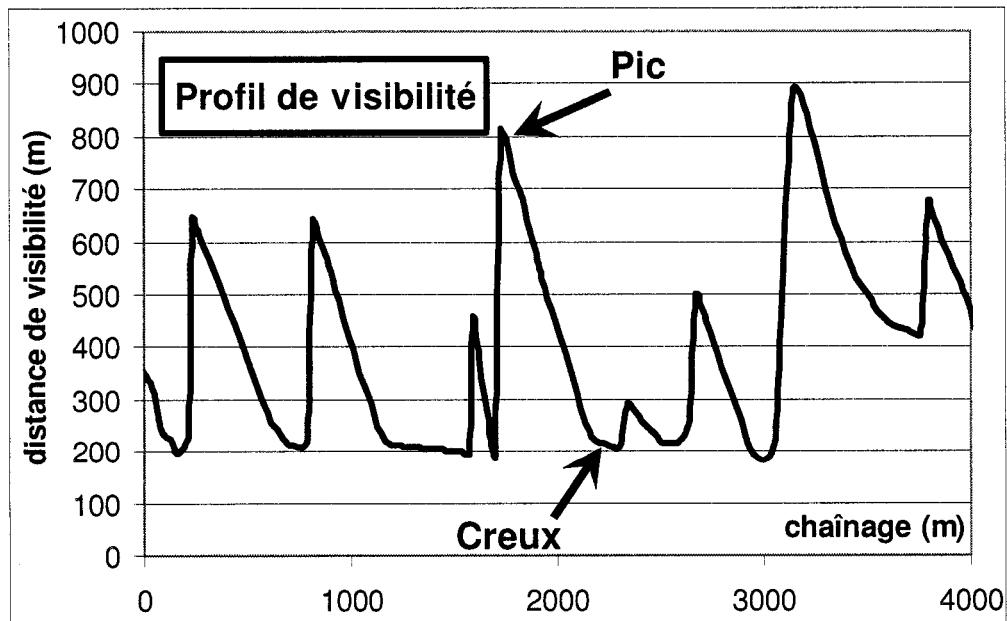


Figure 1-4 Exemple de profil de visibilité

Comme on le voit sur l'exemple de profil de visibilité, l'allure d'un profil est composée d'une succession de pics et de creux. Sur les pics, la visibilité est importante mais décroît ensuite jusqu'au creux. Les variations (croissances) de visibilité entre un creux et un pic se font de manière très rapide (sur quelques dizaines de mètres), alors que la visibilité décroît plus lentement entre un pic et le creux suivant (centaines de mètres).

1.3.4 Les barrières à la visibilité

Sur les routes, on dénombre deux principales sources de réductions de la distance de visibilité, il s'agit des courbes verticales (succession de courbes convexes et concaves) et des courbes horizontales (virages).

1.3.4.1 Les courbes horizontales

La végétation, les constructions, les bancs de neige peuvent limiter le rayon visuel des conducteurs. Ces obstructions, étant placées sur le bord de l'emprise, interviennent dans les courbes horizontales et y limitent la visibilité. Elles peuvent avoir un caractère périodique (neige, cultures,...) ou bien être un masque tout au long de l'année (immeubles, arbres,...).

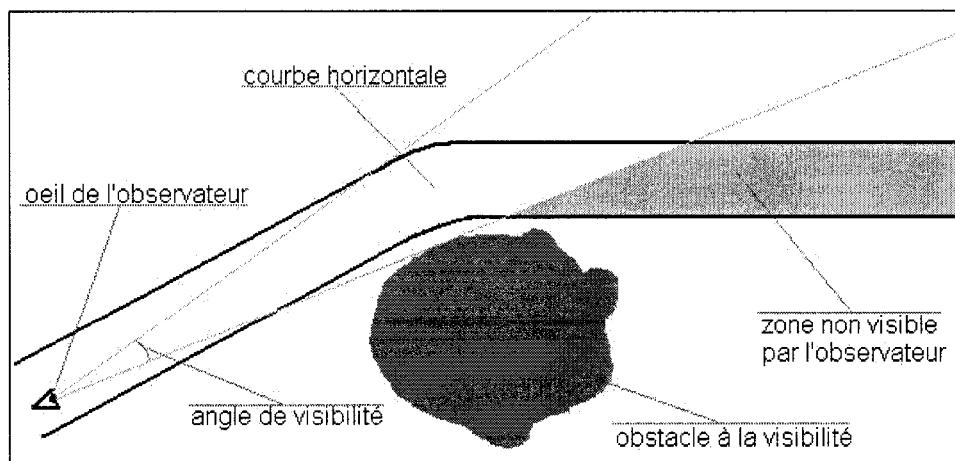


Figure 1-5 Limite de visibilité dans les courbes horizontales

1.3.4.2 Les courbes verticales

Les courbes convexes (bosses) ou concaves (creux) qui composent le profil en long de la route peuvent limiter la visibilité. Par exemple, un conducteur situé au fond d'un creux ne peut pas voir ce qu'il y a derrière la bosse suivante.

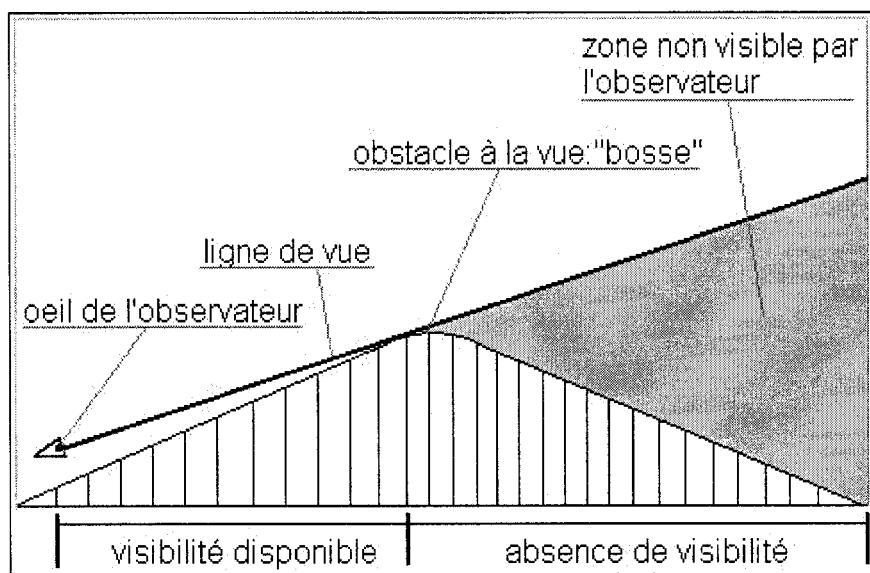


Figure 1-6 Limite de visibilité, courbes verticales convexes

La visibilité générale est donc limitée par les obstructions transversales (courbes horizontales) et les obstructions verticales (suite de courbes verticales convexes et concaves). Les différentes hypothèses sur la combinaison des deux obstructions seront abordées plus loin dans ce document.

1.4 La législation

Le Code de la Sécurité Routière comporte certaines règles spécifiques à la manœuvre du dépassement. On recense entre autres trois articles importants :

1. Article 339 : « Sur une chaussée à circulation dans les deux sens, le conducteur d'un véhicule routier qui en dépasse un autre doit, après avoir

signalé son intention et s'être assuré qu'il peut le faire sans danger pour le véhicule dépassé, revenir sur la voie de droite le plus tôt possible. » Cet article propose donc la présence d'une distance de sécurité qui devra être pris en compte dans la détermination de la distance de visibilité de dépassement. Ce point sera détaillé au chapitre suivant.

2. Article 340 : « Le conducteur d'un véhicule routier dépassé ou sur le point de l'être ne peut augmenter la vitesse de son véhicule pendant la manœuvre. »; le véhicule dépassé roule donc à vitesse constante.

3. Article 348 : Nul ne peut effectuer un dépassement dans les cas suivants:

1° le conducteur d'un véhicule venant de l'arrière a déjà signalé son intention d'effectuer un dépassement ou a déjà entrepris cette manœuvre;

2° la visibilité est insuffisante pour permettre de s'engager sur l'autre partie de la chaussée sans danger;

3° sur une chaussée à circulation dans les deux sens, lorsque l'autre partie de la chaussée n'est pas libre sur une distance suffisante pour effectuer sans danger le dépassement et le retour à la droite.

1.5 Les normes sur le marquage des zones de dépassement et la distance de visibilité de dépassement

Comme nous avons pu le voir plus haut, le concept de distance de visibilité de dépassement est utilisé pour la mise en place de zone de dépassement. À ce sujet, les normes proposent deux parties. La première concerne la distance de visibilité minimum pour pouvoir mettre en place une zone de dépassement. Les critères concernant la mesure de cette distance de visibilité sont traités dans la seconde partie. Au Québec, le texte de la norme est disponible sous la référence : MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. « Normes Ouvrages routiers, tome V, Signalisation Routière Volume 2,

Chapitre 6, pages 15 et 16 ». avril 2001. et « Normes-Ouvrages routiers, tome V, Signalisation Routière Volume 2, Chapitre 6, numéros 63 et 64 ». Juin 2002.

1.5.1 La visibilité minimum

D'après ce qui précède, la distance de visibilité minimum dépend du temps passé par le véhicule dépassant dans la voie de gauche. Ce temps est fonction avant tout de la vitesse des véhicules. La visibilité minimum va donc également être différente selon la vitesse affichée de la route. Le Tableau 1-1 présente les distances de visibilité minimums pour établir une zone de dépassement selon les vitesses affichées des routes :

Tableau 1-1 Les distances de visibilité au dépassement minimum pour le marquage des routes selon la norme québécoise

Vitesse affichée (km/h)	Distance de visibilité minimum de dépassement pour le marquage (m)
50	150
60	200
70	250
80	300
90	350
100	400
110	475

Si une zone de dépassement ne peut être implantée que si la distance de visibilité le permet, il est également nécessaire que la longueur de cette zone de dépassement soit supérieure à 100 mètres.

1.5.2 La mesure de la distance de visibilité disponible

La distance de visibilité disponible est la distance à laquelle un conducteur peut voir un obstacle arriver en sens inverse. Dans la norme, on considère les positions suivantes de l'observateur (conducteur) et la cible (obstacle) pour mesurer cette distance de visibilité au dépassement disponible :

- La hauteur de l'œil du conducteur : 1,05 m;
- La hauteur de l'obstacle : 1,15 m;

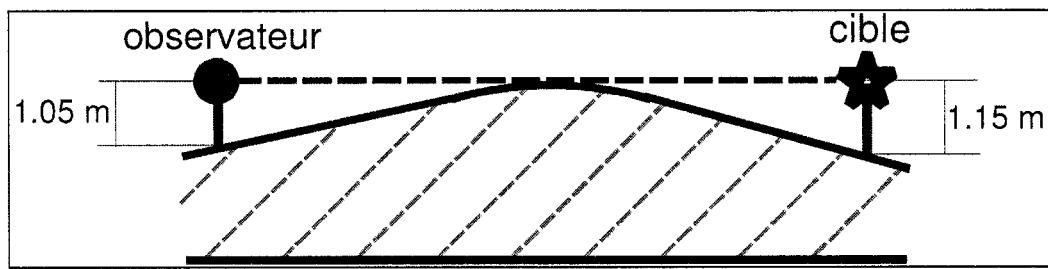


Figure 1-7 Les hauteurs dans la norme du Québec

- La position de l'œil du conducteur : il faut considérer que le conducteur est en milieu de voie de droite;
- La position de l'obstacle arrivant en sens inverse se situe en milieu de voie de gauche;
- La position des obstructions visuelles transversales :
 - Obstructions à gauche de la route (dans le sens de circulation du véhicule désirant dépasser) : il faut considérer une ligne d'obstructions fictives au niveau du bord extérieur de l'accotement.
 - Obstructions à droite de la route (dans le sens de circulation du véhicule désirant dépasser) : il faut considérer une ligne d'obstructions fictives au niveau du bord extérieur de la voie de droite. Les origines et la justification de ce choix ne sont pas mentionnées dans la norme et ne se retrouvent pas dans la littérature. Cette considération étant trop limitante,

nous préconisons de déplacer cette ligne fictive au bord extérieur de l'accotement pour harmoniser la position des obstructions transversales. Dans la suite de ce document, nous considérerons toujours le bord extérieur de l'accotement comme limite à la visibilité à droite comme à gauche.

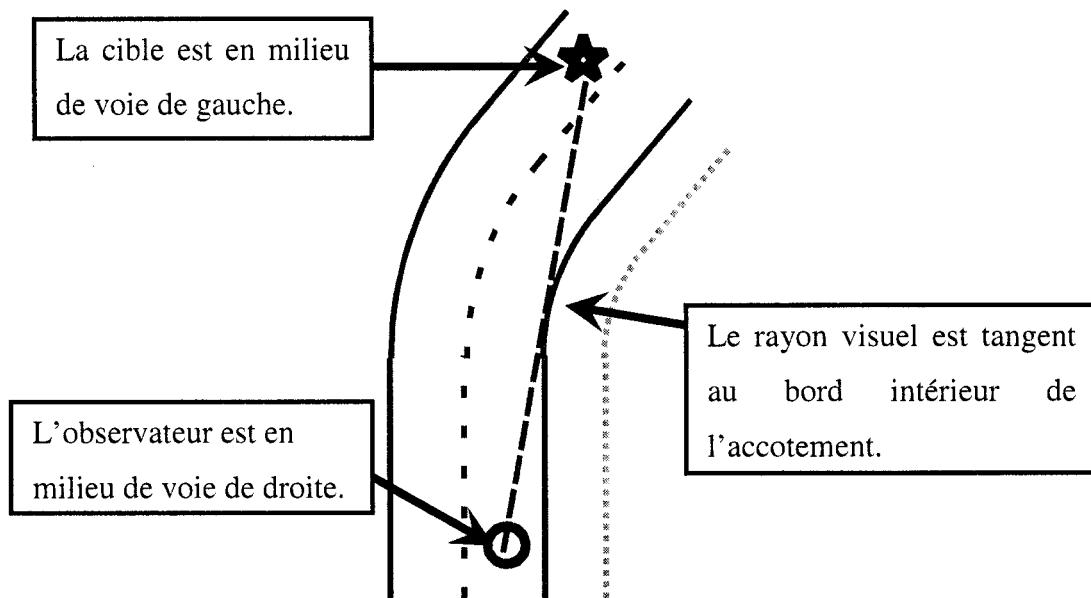


Figure 1-8 Les positions transversales pour un virage à droite dans la norme du Québec

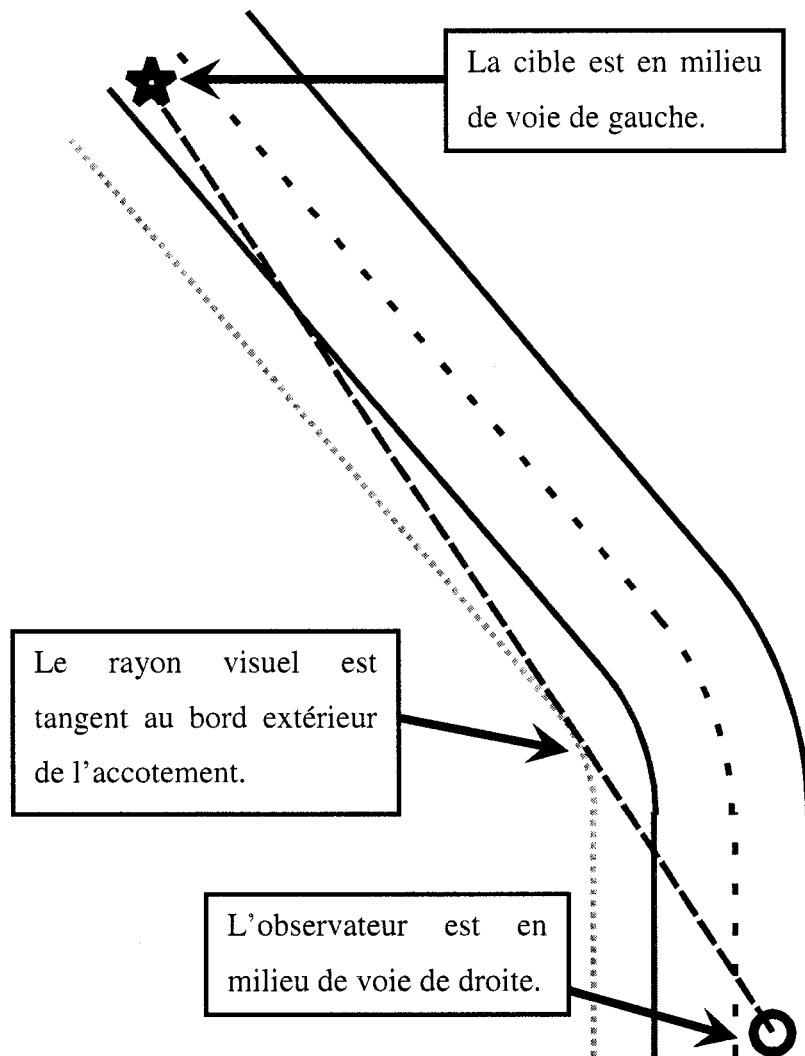


Figure 1-9 Les positions transversales pour un virage à gauche dans la norme du Québec

CHAPITRE 2 Revue de la littérature

Les premières méthodes pour délimiter les zones de dépassement ont plus de 60 ans, mais elles prenaient déjà en compte les principaux critères, entre autre la distance de visibilité minimale.

Les méthodes actuelles utilisées n'ont que peu changées depuis celles d'il y a 60 ans et consistent à relever directement sur les lieux les débuts et fins de zone. Mais il existe également d'autres méthodes plus instrumentées et qui nécessitent un post-traitement informatique. Si elles sont plus lourdes, ces nouvelles méthodes présentent l'avantage d'être plus rapides et plus précises.

Il existe également des méthodes calculatoires, qui prennent en compte les caractéristiques géométriques de la route.

2.1 Méthodes sur les lieux à détermination directe

2.1.1 La méthode en marchant

Cette méthode est la plus ancienne pour déterminer les zones de non dépassement et offre des bons résultats, mais elle ne permet pas la détermination de la visibilité réelle.

2.1.1.1 **Protocole**

Deux techniciens se déplacent le long de la route à étudier, en tenant chacun une cible identique. Ces cibles possèdent une fente à une hauteur de 1,05m. Les deux cibles sont séparées physiquement par une chaîne de la distance minimale de visibilité (Brown et Hummer, 1995). Le technicien situé en arrière regarde à travers la fente. Dès que la cible à l'avant lui devient invisible dans le cadre des limites de visibilité définies par les normes, il fait une première marque au sol. Quand la cible avant lui redevient visible, il fait une seconde marque. Une zone d'interdiction de dépasser pour ce sens de circulation est alors définie entre les deux marques. Les deux « marcheurs » doivent parcourir la route dans les deux sens pour marquer les zones de non dépassement.

2.1.1.2 Résultats

Cette méthode associe un équipement réduit à une bonne précision. En effet, la visibilité est vérifiée de manière continue et à faible vitesse. Les débuts et fins de zone sont donc déterminés avec une très faible erreur en position.

Mais, cette méthode est longue et doit être associé à un matériel plus important si l'on veut connaître les chaînages de début et fin de zone. De plus elle ne fournit pas d'information sur la visibilité disponible le long de la route.

2.1.2 La méthode à deux véhicules

Avec la méthode «en marchant», la méthode à deux véhicules est l'autre méthode présentée dans la littérature (FHWA, 1991). Cette méthode est la plus utilisée lorsque les sites ne demandent pas une trop grande précision. Comme son nom l'indique, la méthode utilise deux véhicules équipés de systèmes de communication et d'instruments de mesure de la distance (odomètre).

Le protocole est identique à la méthode en marchant. Il suffit de remplacer les deux «marcheurs» par les deux conducteurs. Ceux-ci conservent entre eux un écart constant (visibilité minimum) en avançant le long de la route. Une cible est fixée à l'arrière du véhicule avant. Lorsque le conducteur arrière ne voit plus la cible, il marque sur la chaussée le début de la zone de non dépassement. Il marque la fin de la zone quand il voit réapparaître la cible.

Cette méthode, si elle est plus rapide que la précédente, ne fournit pas la même précision. En effet même à faible vitesse, il est difficile de conserver toujours le bon écart et la hauteur de l'œil du conducteur arrière qui est aussi l'observateur n'est pas garantie à la bonne hauteur mais est supposée (Brown, 1996). De plus, cible et observateur sont du même côté de la route (ce qui va à l'encontre des prescriptions de la norme).

2.1.3 La méthode à un véhicule

Dans cette méthode il s'agit de faire appel au jugement du conducteur. Celui-ci parcourt la route à étudier et marque sur le sol les points où la visibilité devient suffisante pour dépasser ou au contraire trop faible. Le déroulement de la méthode dans une courbe se fait comme indiqué sur la figure suivante.

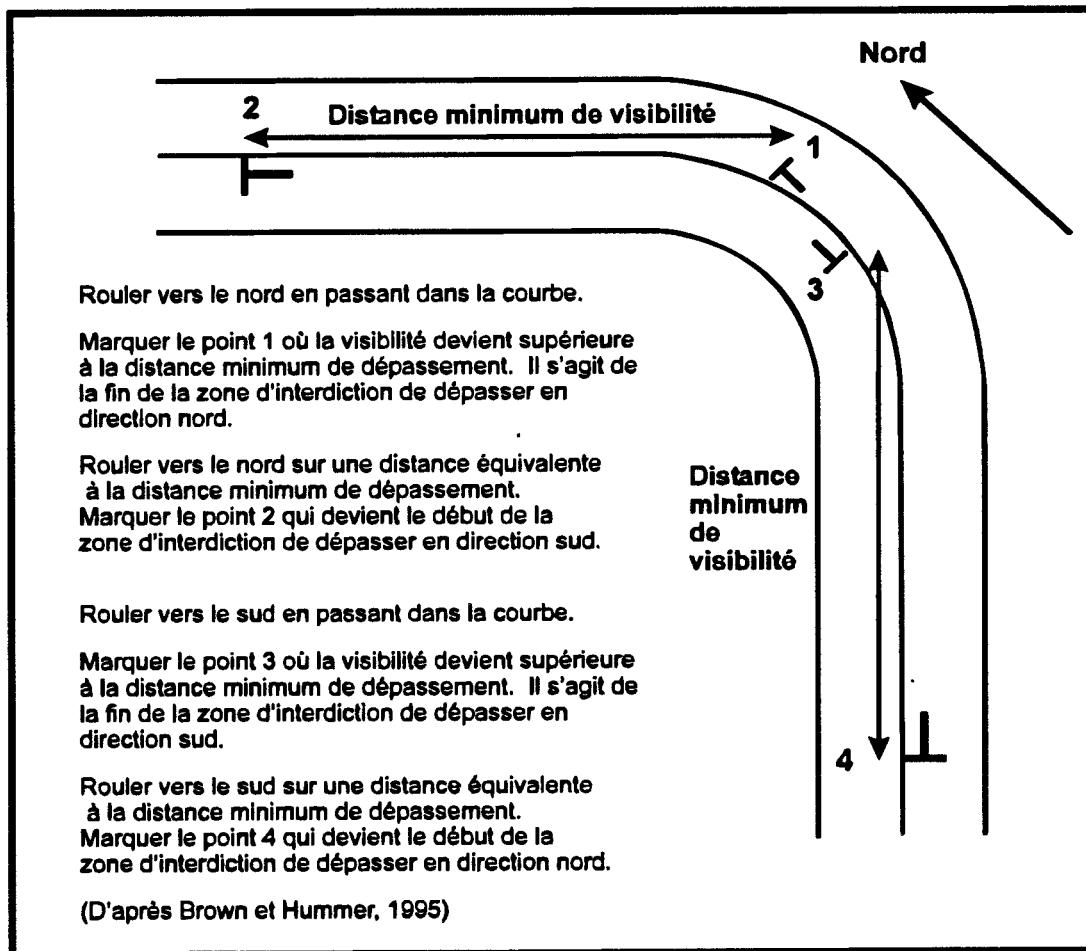


Figure 2-1 Déroulement de la méthode à un véhicule

(Leroux, 2003)

Cette méthode, faisant appel au libre arbitre du conducteur, n'est pas vraiment précise. Le début des zones de non dépassement peut être déterminé avec une erreur de 15 à 30 m (Brown et Hummer, 1995). Elle a par contre pour avantage de ne nécessiter qu'une seule personne et presque pas de matériel. Elle est également très rapide puisque le véhicule peut avancer à une vitesse de 10 km/h.

Une variante de cette méthode vise à déterminer la visibilité tout au long de la route. Il suffit d'avancer avec un pas constant et de déterminer la limite de visibilité à chaque arrêt.

2.1.4 Méthode avec télémètre

Il s'agit de parcourir la section à étudier en voiture et de s'arrêter à pas constant. À chaque arrêt, il faut déterminer la distance de visibilité à l'aide d'un télémètre et de prendre pour cible un véhicule apparaissant en sens inverse.

Cette méthode a pour avantage de fournir une visibilité pour chaque arrêt. Mais la visibilité ainsi obtenue est une distance linéaire et non curviligne.

Il est possible d'améliorer cette méthode en enregistrant la vitesse du véhicule arrivant à l'aide du télémètre et d'enregistrer le temps que met le véhicule à parcourir la distance qui la sépare de sa position initiale de la position des observateurs. On obtient alors la distance curviligne. Mais cette méthode demande une grande rapidité d'exécution et elle ne fournit pas une grande précision puisque la hauteur de la cible n'est pas respectée.

2.2 Méthodes sur les lieux avec post-traitement

2.2.1 Videolog/Photolog

Les directions territoriales des États de Virginie, Wisconsin, Arizona, New York et Connecticut utilisent des véhicules expérimentaux pour mesurer les distances de visibilité de dépassement. Ces véhicules d'une valeur de 400 000 à 1 200 000\$, sont équipés de matériel vidéo associé à un système de géoréférence. En parcourant la section

de route à étudier, le système enregistre une vidéo de la route. Cette vidéo est ensuite exploitée par des logiciels qui fournissent les distances de visibilité le long de la section. L'inconvénient de ces méthodes est le prix, car en plus du prix à l'achat, l'exploitation des données enregistrées se révèle très dispendieuses puisqu'il faut compter 2 000\$ de frais par jour de mesure seulement pour l'exploitation par les logiciels.

2.2.2 Levés laser aéroportés (Leroux, 2003)

Un avion volant à une altitude de 400 mètres au dessus de la section à étudier est équipé de la technologie LIDAR (Light Detection And Ranging). Ce système, associé à des systèmes de positionnement GPS, utilise la lumière laser. Ainsi des rayons sont envoyés sur le sol et le temps qu'ils mettent pour être réfléchis par le sol et renvoyés vers l'avion, permet d'établir un profil 3D de la section. Un modèle numérique d'élévation (MNE) est produit à partir du relevé. Après un lourd traitement des données, le résultat est amené dans un module d'analyse de visibilité (VISIA). Pour chaque point relevé, VISIA détermine si la distance de visibilité est suffisante ou non. Les résultats sont importés sous MapInfo pour être visualisés.

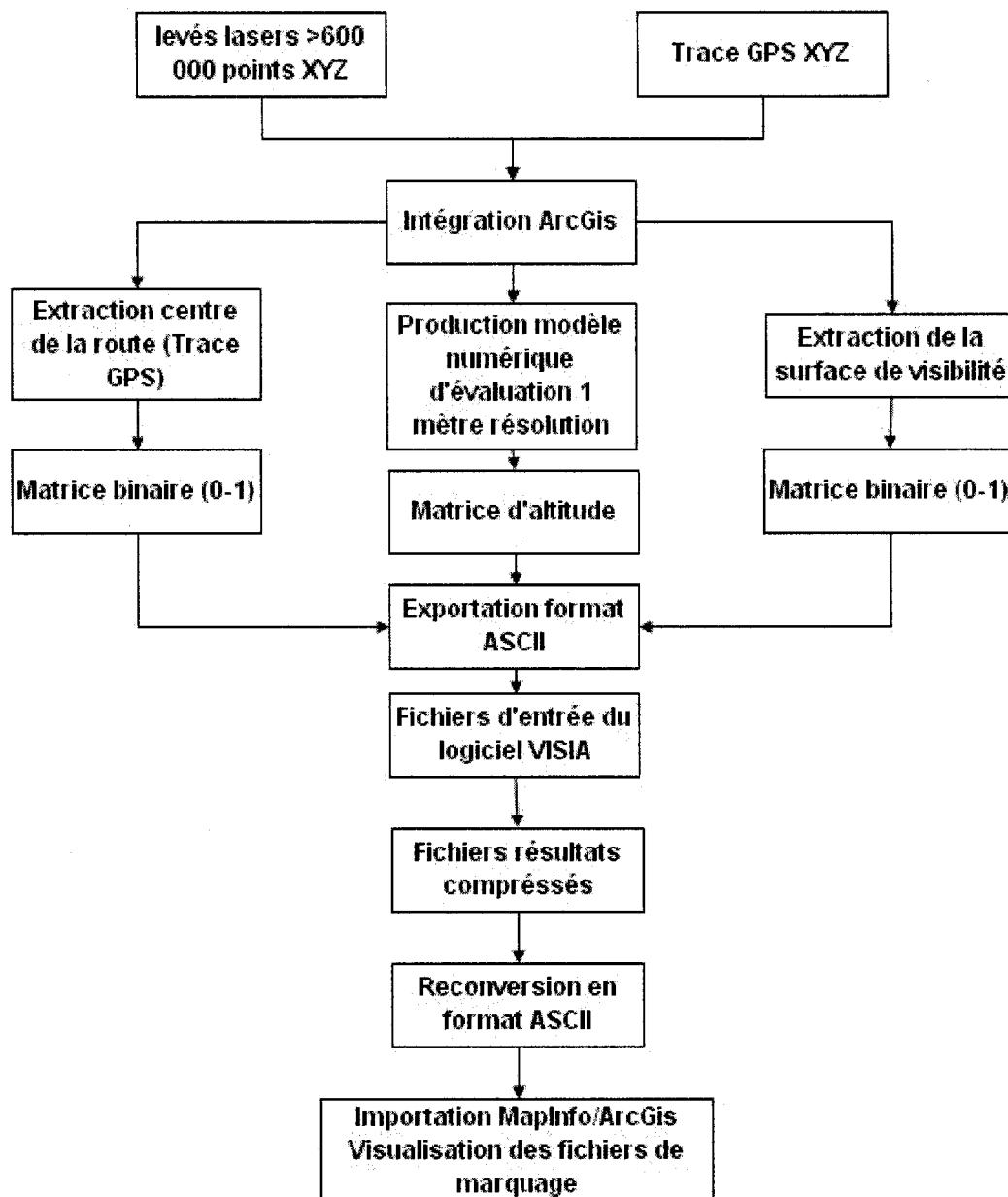


Figure 2-2 Séquence d'exploitation des données, laser aéroporté

(D'après Leroux, 2003)

Cette méthode est très coûteuse puisqu'elle nécessite beaucoup de matériel (avion, lasers, GPS,...), le traitement des données est relativement long et pénible et nécessite

des logiciels spécialisés. De plus, les conditions dans lesquelles l'expérience doit être menée sont limitées. En effet l'émission, la réflexion et la réception du faisceau laser doivent se faire dans des conditions toutes particulières.

2.2.3 Levés par caméra numérique

Les levés par caméra numérique exploitent une technologie développée par la firme GEO-3D qui permet la production d'imagerie numérique en trois dimensions associée au positionnement par satellites (Leroux, 2003). Il s'agit d'installer des caméras numériques, associées à des D-GPS et des générateurs de code temps, le tout connecté à un ordinateur portable, sur des véhicules.

Les expériences conduites par Denis Leroux avec cette méthode ont été menées de quatre manières différentes :

Deux caméras frontales juxtaposées : les deux caméras sont installées l'une à côté de l'autre à une distance de 2 mètres sur le véhicule. Elles se comportent donc comme deux yeux et permettent d'obtenir une image en 3D.

Simple caméra frontale : pour obtenir l'effet de profondeur, on prend l'image du même objet à deux positions différentes.

Deux caméras juxtaposées à focale différentes : l'une des caméras, munie d'un téléobjectif, fournit une image nette de la zone située à la distance de visibilité voulue. L'autre caméra est montée en mode standard. Si les éléments visibles de la route sont similaires sur les deux caméras, alors il y a visibilité suffisante et permission de dépasser.

Deux véhicules distancés par GPS : il s'agit de travailler comme dans la méthode à deux véhicules. Mais l'utilisation des caméras et de GPS permet un traitement ultérieur des résultats et donc un temps de mesure diminué.

Le traitement des données enregistrées se fait avec le logiciel TRIDENT-3D par la firme GEO-3D. Seul les données obtenues avec la méthode à deux véhicules ont pu être

exploitées. En effet, la qualité des images dans les autres expériences n'est pas suffisante.

La méthode à deux véhicules et deux caméras donnent de très bons résultats mais s'avèrent relativement dispendieuses, mais elle permet d'obtenir le profil de visibilité de la route.

2.2.4 Levés GPS haute précision (Leroux, 1993)

Il s'agit de relever en roulant les données GPS du centre de la route. En avançant à vitesse constante et en relevant les points à intervalle fixe, il est possible d'obtenir un nuage de points qui représentent le profil en long de la chaussée. Le traitement des données est effectué selon le schéma présenté à la Figure 2-3.

Le traitement effectué détermine à intervalle constant le long de la route si la visibilité est supérieure au minimum nécessaire pour planter une zone de dépassement, et fournit la liste des zones de dépassement ainsi obtenues avec les débuts et fins selon le chaînage.

Les résultats obtenus par Denis Leroux avec la technologie GPS sont très bons en comparaison aux deux autres technologies employées (lasers aéroportés et caméra numérique). De plus le prix de la méthode est de beaucoup inférieur aux autres méthodes instrumentées, elle semble donc être la plus intéressante à utiliser.

Pourtant certains points seraient à améliorer, comme la production des élévations et le traitement à travers les différents logiciels.

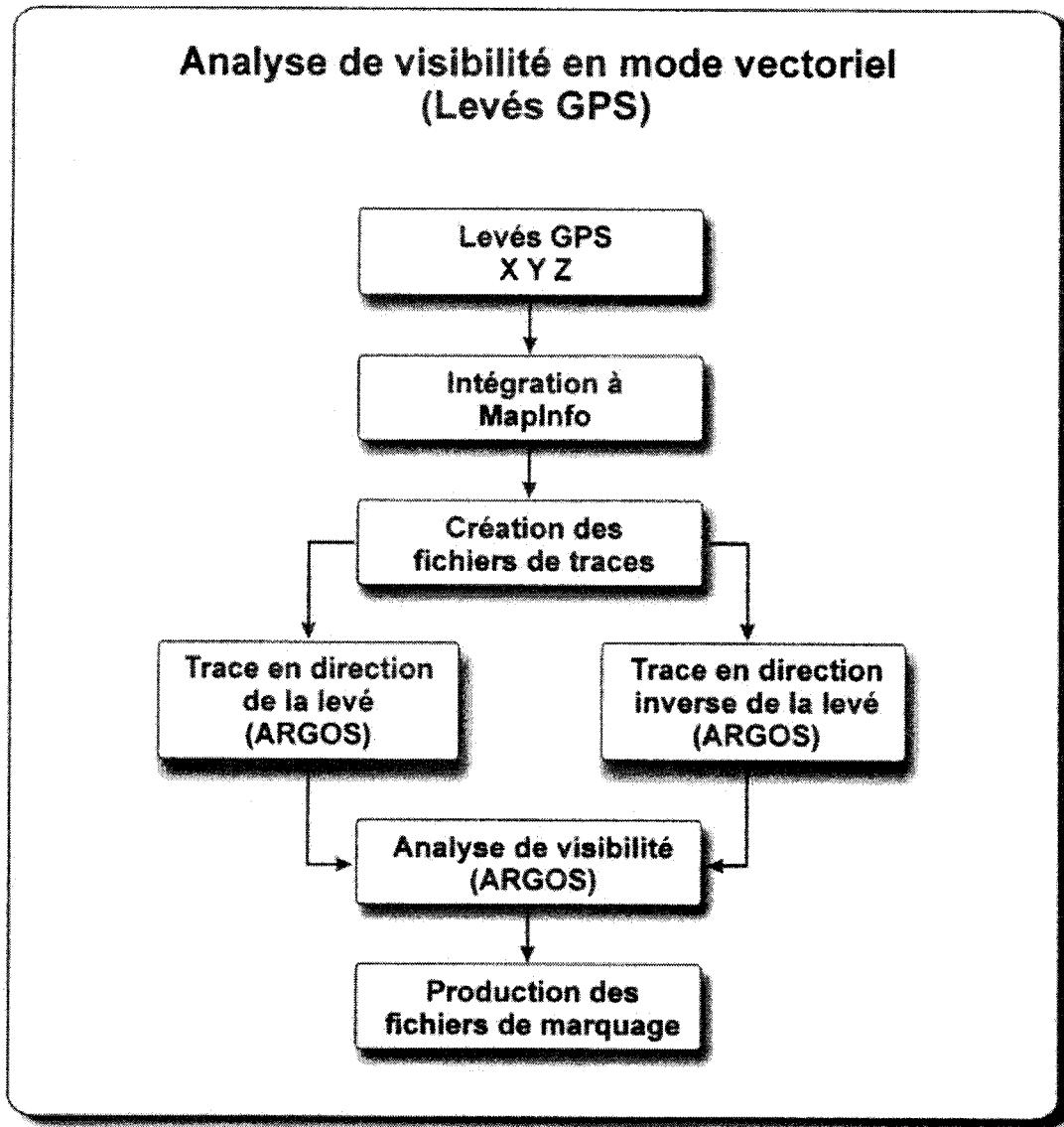


Figure 2-3 Séquence d'exploitation des données GPS

(Leroux, 2003)

2.3 Méthodes calculatoires

2.3.1 TWOPAS

TWOPAS (*Two lane Passing*) est un programme développé par le *Midwest Research Institute* sous l'égide du FHWA. Ce programme est un modèle de simulation de la circulation routière sur les routes rurales à deux voies. Parmi ses fonctionnalités, il est possible de déterminer le profil de visibilité d'une route. TWOPAS est aujourd'hui intégré dans la plateforme IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) qui regroupe plusieurs logiciels de conception, de design ou encore de sécurité routière.

Pour déterminer le profil de visibilité d'une route, TWOPAS prend en compte la géométrie de la route, par le biais d'un alignement simplifié du profil en long et du tracé en plan. Simplifié car, pour le tracé en plan, il est réduit à une succession de segments rectilignes et d'arcs de cercle. La justification de ce choix indiquée dans le document *TWOPAS Model Improvements* (Leiman, 1998) est simple : les transitions entre les droites et les courbes n'ont pas une grosse importance dans le calcul automatique de la distance de visibilité, car il existe d'autres facteurs plus déterminants. Ainsi, l'hypothèse que les obstructions latérales sont parallèles à l'axe de la route est plus importante. Qu'il existe des transitions ou non, ces obstructions restent parallèles à la route.

Une autre simplification par rapport à la réalité dans l'algorithme est la position des véhicules. Observateur et cible sont supposés circuler sur l'axe centrale. Cette simplification ne génère pas une grande différence de distance de visibilité.

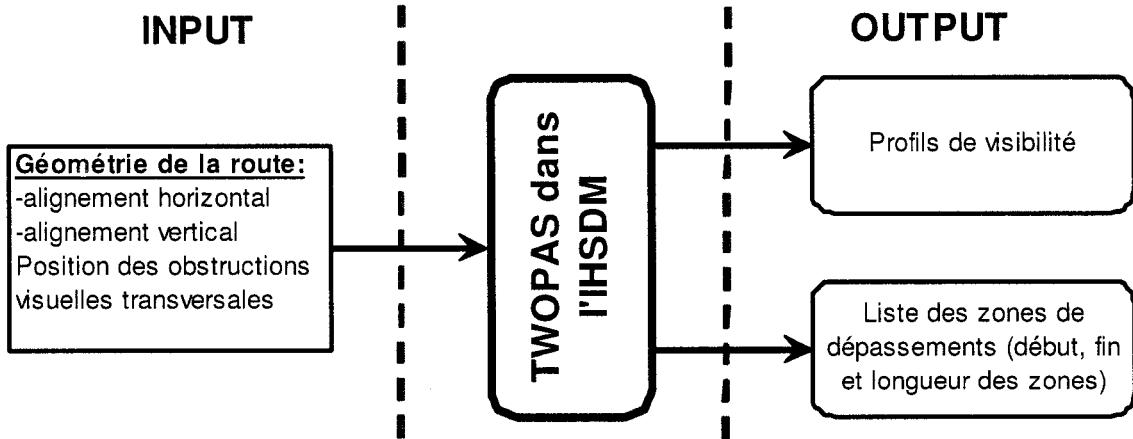


Figure 2-4 Données d'entrées (INPUT) et sorties (OUTPUT) de TWOPAS dans l'IHSDM

Pour déterminer la distance de visibilité, deux calculs parallèles sont menés : la distance de visibilité sur le tracé en plan, et la distance de visibilité sur le profil en long.

2.3.1.1 Calcul de la distance de visibilité dans le tracé en plan (visibilité horizontale)

L'algorithme utilisé suit le processus simplifié suivant :

1. calcul des coordonnées du point P dont on veut connaître la distance de visibilité ;
2. choix de la courbe directement après P, cette courbe est nommée j ;
3. détermination de la tangente T à j passant par P;
4. calcul de la première intersection de T et de l'axe de la route, le point I est obtenu, incrémentation de la distance de visibilité horizontale DVhor (DVhor=chaînage I - chaînage P) ;
5. choix de la courbe j', suivant j ;
6. détermination de la tangente T' à j' passant par P ;
7. si T croise les courbes d'obstruction entre j' et P, la boucle se termine ; sinon calcul de l'intersection de T' et de l'axe de la route, le point I' est

obtenu, incrémentation de la distance de visibilité horizontale :

$DV_{hor} = \text{chaînage } I' - \text{chaînage } P$;

8. reprendre la boucle à l'étape 5 ;

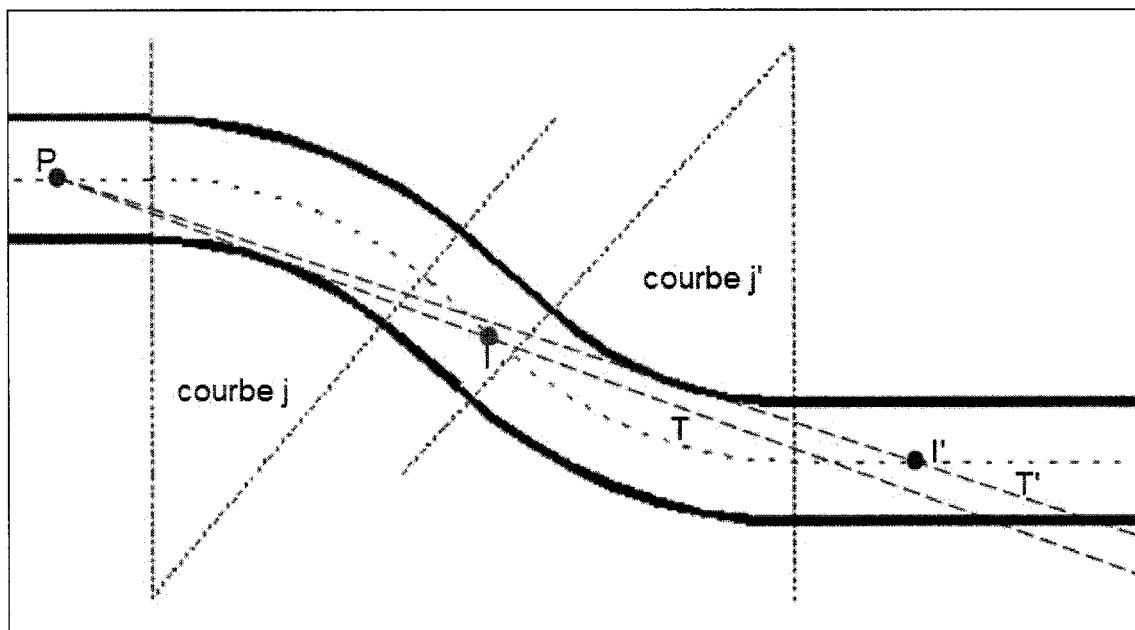


Figure 2-5 Courbes horizontales dans TWOPAS

2.3.1.2 Calcul de la distance de visibilité sur le profil en long (visibilité verticale)

Le processus est le suivant :

1. choix du point P dont on veut déterminer la distance de visibilité, ce point P est à une hauteur h_1 par rapport à la route ;
2. choix de la courbe verticale directement après P, cette courbe est nommée j' ;
3. détermination de la tangente T à j passant par P, si cette tangente n'existe pas, passer directement à l'étape 5 ;
4. calcul de la première intersection I entre T et le profil de la route ;

5. si, entre le point de tangence et I, il existe au moins un point pour lequel la séparation verticale entre T et la route est supérieure à h_2 (h_2 est la hauteur de la cible), alors la visibilité est perdue, passer à l'étape 10, sinon étape 6 ;
6. choix de la courbe j' , suivant j ;
7. détermination de la tangente T' à j' passant par P ;
8. calcul de la première intersection I' entre T' et le profil de la route ;
9. si, entre le point de tangence et I' , il existe au moins 1 point pour lequel la séparation verticale entre T' et la route est supérieure à h_2 , alors la visibilité est perdue, passer à l'étape 10, sinon retour à l'étape 6 ;
10. détermination de SD, premier point selon le chaînage où la visibilité est perdue, grâce à la procédure *SightDistOnCrest*, la visibilité verticale est alors DVver=chaînage SD – chaînage P.

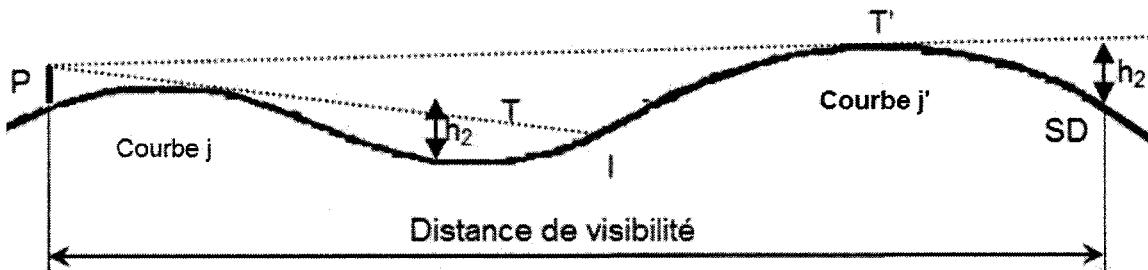


Figure 2-6 Courbes verticales dans TWOPAS

La distance de visibilité est ensuite obtenue en prenant le minimum des deux distances calculées. Cette méthode restreint la distance de visibilité à un problème en deux dimensions.

2.3.2 Modèle 3D

Un modèle en trois dimensions a été construit par Ms Hassan, Easa et Abd El Halim. Ce modèle a été baptisé MARKC.

Dans les modèles traditionnels, l'axe de la route est considéré comme obstacle à la vue dans le profil en long. Or ceci est faux si le dévers de la route est pris en compte. En effet s'il est vrai que sur les segments rectilignes, le profil en travers étant en toit, le rayon visuel est tangent à la route en son centre, c'est-à-dire sur l'axe central. Or dans les courbes, le profil en travers est en plan incliné, le point de tangence se déplace alors transversalement. Un exemple proposé par Hassan, Easa et Abd El Halim (1996) montre une différence de 10 mètres dans la longueur de la distance de visibilité calculée entre un modèle 2D (197.2 m) et son modèle 3D (207.7 m). Mais cette différence (<5%) n'est pas significative.

Dans MARKC, les obstructions prises en compte sont également plus importantes que dans TWOPAS. Ainsi, les pertes de visibilité, les obstacles surplombant la route (pont), la visibilité de nuit sont considérées.

2.3.3 Leçons

L'ajout du facteur 3D ne semble pas aussi important que le laissent entendre les concepteurs de MARKC. En effet, dans les cas où le dévers apporte une erreur, celle-ci est faible. De plus la considération de la 3D alourdit trop fortement les modèles pour qu'ils soient utilisables simplement avec peu de données sur la route.

L'alignement de la route n'étant pas une information toujours connue et pas facilement déterminable, il semble peu judicieux de l'utiliser comme donnée d'entrée au modèle. Il est plus prudent de travailler avec des données GPS de la route (comme le recommande Leroux (2003)).

Les différentes positions transversales de l'observateur, de la cible et des obstructions sont des soucis majeurs. En effet, il est nécessaire d'étudier l'incidence de décalages et l'utilisation d'une ligne parallèle à la route dans le cas des obstructions.

CHAPITRE 3 Insuffisances des méthodes et problématique

Pour assurer l'adéquation la meilleure du point de vue du dépassement entre sécurité et niveau de service, il est nécessaire de placer au mieux les zones de dépassement. Comme il est indiqué dans la revue de littérature au chapitre 2, les méthodes actuellement employées au Québec pour marquer les zones sont des méthodes lourdes en temps et en personnel et dont les résultats sont limités (c'est-à-dire qu'elles fournissent que peu d'information supplémentaire). Ainsi si les débuts et fins de zones sont déterminés, les distances de visibilité dans les zones de dépassement ou de non dépassement restent inconnues. De plus, ces méthodes ne permettent pas une mise à jour des zones si les normes viennent à changer. Ainsi si jamais la vitesse affichée, la distance minimale de visibilité, la hauteur des yeux ou de l'obstacle sont modifiées, il est nécessaire de reprendre les mesures sur le terrain pour déterminer les nouvelles zones de dépassement.

Des quatre méthodes sur le terrain qui nécessitent un post-traitement, seule la méthode avec GPS de Leroux ressort. En effet, les trois autres méthodes demandent des investissements trop importants. L'utilisation des technologies GPS devient courante chez les gestionnaires de la route, les données pour la méthode GPS sont simples à obtenir, cette méthode est donc intéressante. Le traitement informatique des données et le type des informations de sortie sont pourtant à améliorer.

La méthode calculatoire de TWOPAS est très intéressante car en plus de fournir la liste des zones de dépassement, elle fournit le profil de visibilité le long de la route. Non seulement cette méthode permet d'actualiser simplement les zones selon les changements de norme (hauteur des yeux, de l'obstacle), mais la connaissance de la visibilité réellement disponible est intéressante car cela permet de mieux analyser les situations ambiguës. L'utilisation de TWOPAS n'est pour autant pas simple, car il est nécessaire de connaître les caractéristiques géométriques de la route (alignement horizontal et profil en long) qui ne sont pas toujours disponibles et qui sont pénibles à obtenir et à mettre à jour en cas de travaux ou de changement de design. Les

simplifications sur les considérations de l'obtention de la visibilité, utilisée dans TWOPAS, n'impliquent pas trop d'erreurs. Mais pour la position transversale de l'observateur et de la cible, il est facile d'adopter les bonnes positions. Quant à la combinaison des distances de visibilité verticale et horizontales, il est raisonnable de considérer le minimum des deux, ce qui n'engendre qu'une faible erreur (et sur des cas isolés) pour un raisonnement géométrique plus aisé.

À l'instar de TWOPAS, la mise en place d'une méthode fondée sur un algorithme de génération de profil de visibilité paraît une excellente méthode. Mais cette nouvelle méthode ne devrait pas utiliser le plan et profil de la route, mais des données d'entrées plus simples à obtenir. Une méthode qui utiliserait des relevés GPS que traiteraient un algorithme comme dans la méthode de Leroux est intéressante. En effet cette méthode serait précise, peu coûteuse, rapide et les mises à jour seraient simples. Pour valider une telle méthode et calibrer l'algorithme, il est nécessaire de relever sur le terrain la visibilité au dépassement disponible sur un échantillon de sections de route du réseau du Québec. Ces sections de route dont la distance de visibilité sera connue doivent couvrir tous les cas d'alignement possibles et fourniront une banque de routes étalons.

Or la méthode « idéale », c'est-à-dire la méthode qui respecte les indications de la norme, implique un positionnement trop contraignant lors des mesures. L'observateur devrait se placer en milieu de voie de droite et observer une cible située en milieu de voie de gauche. Pour pratiquer cette méthode, il faudrait donc fermer la route à la circulation pour assurer la sécurité de l'équipe de mesure. Comme le temps de fermeture de la route serait fonction de la vitesse d'avancement des mesures et comme la vitesse d'avancement n'est pas grande (le pas d'avancement est d'environ 20 mètres), la route serait fermée sur une période trop importante, les coûts de mesure seraient donc trop importants. Il faut alors employer des méthodes plus « pratiques » qui permettent la circulation sur la route tout en assurant la sécurité de l'équipe de mesure.

Mais la méthode habituellement employée fournit une distance de visibilité erronée. Le schéma suivant montre un exemple de l'erreur commise entre la distance de visibilité relevée et la distance de visibilité telle que définie dans la norme.

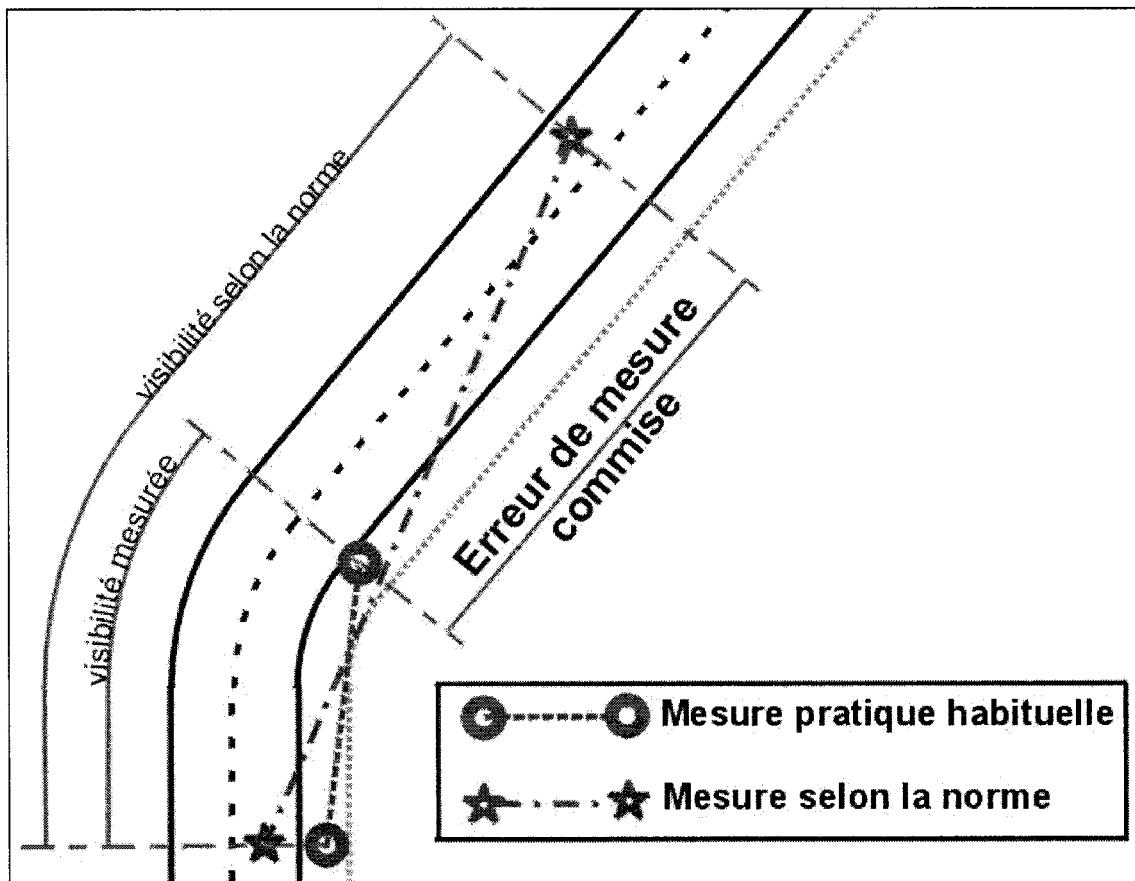


Figure 3-1 Schéma représentatif de l'erreur commise entre un relevé habituel de la distance de visibilité et la distance de visibilité telle que définie dans la norme

Pour ces raisons pratiques, il est donc souhaitable de mettre en place un nouveau protocole de relevé et à étudier plus en détail les erreurs commises afin de trouver des corrections adéquates aux mesures issues du nouveau protocole.

Les mesures ainsi obtenues à l'aide de cette méthode constituent les données servant à vérifier l'algorithme de calcul.

CHAPITRE 4 Objectifs et méthodologie

4.1 Objectifs

Le but du travail de recherche présenté dans ce document est l'élaboration d'une méthode de détermination des débuts et fins de zones de dépassement. Cette méthode doit répondre aux attentes extraites de la problématique exposée plus haut. Pour atteindre l'objectif, nous nous sommes fixés des sous objectifs :

- Développer un algorithme de calcul qui fournit les débuts et fins de zone de dépassement. Cet algorithme devra être simple d'utilisation et devra fournir des informations supplémentaires sur la visibilité disponible;
- Vérifier cet algorithme sur des cas réels en collaboration avec le Ministère des Transports du Québec;
- Fournir un mode d'emploi de la méthode recommandée.

4.2 Méthodologie

1. Recherche de la méthode :
 - 1.1. Principe calculatoire
 - 1.2. Compréhension de la visibilité
2. Développement de l'algorithme de calcul
3. Validation de l'algorithme
 - 3.1. Choix des sites
 - 3.2. Application de l'algorithme aux sites choisis
 - 3.3. Cueillettes de données pour fins de validation
 - Recherche de la méthode de cueillettes
 - Relevés des données
 - Traitement des données
4. Conclusions sur l'algorithme et mode d'emploi de la méthode calculatoire

CHAPITRE 5 Recherche de la méthode

5.1 Principe calculatoire

Comme nous l'avons vu dans la problématique, il serait intéressant de déterminer les zones de dépassement à partir du profil de visibilité. Il s'agit de déterminer les segments de route où la visibilité est supérieure à la distance de visibilité minimum. On pourrait alors directement lire sur le graphique les débuts et fins de zones potentielles. Il ne reste alors plus qu'à vérifier qu'elles aient la longueur suffisante (100 mètres), et les valider sur le terrain. Le graphique suivant expose le principe.

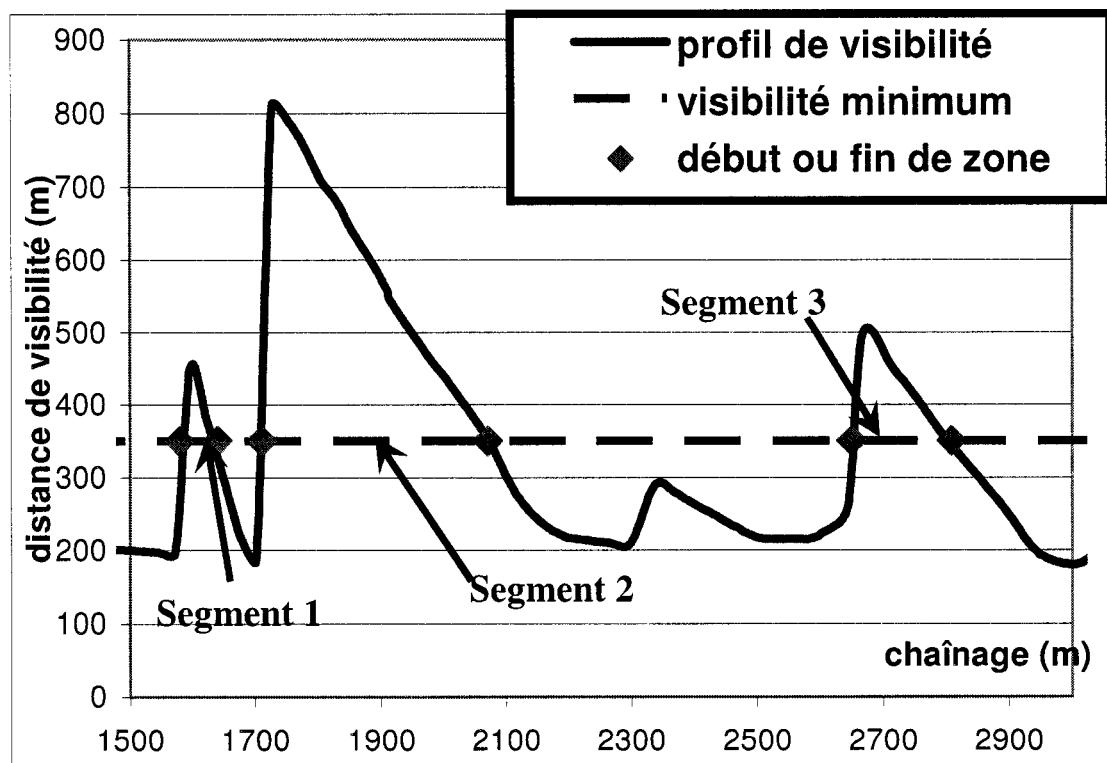


Figure 5-1 Utilisation du profil de visibilité pour déterminer les zones de dépassement

Sur le graphique de la Figure 5-1, il existe trois zones pour lesquelles les distances de visibilité de dépassement sont supérieures à la distance de visibilité minimum. Le tableau suivant indique le début et fin de chacune de ces zones :

Tableau 5-1 Zone de dépassement potentielle du profil de visibilité de la Figure 5-1

	Chaînage pour lequel la visibilité devient supérieure à la visibilité minimum (m)	Chaînage pour lequel la visibilité redevient inférieure à la visibilité minimum (m)
Segment 1	1580	1640
Segment 2	1710	2070
Segment 3	2650	2810

Il existe donc deux segments dont la longueur est supérieure à la longueur minimum d'une zone de dépassement (100 mètres). Ces deux segments (segment 2, 360 mètres et segment 3, 160 mètres) sont des zones de dépassements potentielles.

Mais la lecture des débuts et fins de zone sur un graphique n'étant pas précise, il est préférable d'obtenir ces positions particulières à partir de la liste des distances de visibilité qui a servi à tracer le profil. La détermination des débuts et fins se ferait alors de manière automatique dans un algorithme.

Il s'agit alors d'obtenir la liste de ces distances de visibilité.

Pour cela, il existe deux possibilités :

- Utiliser le plan et profil de la route;

- Utiliser une trace de la route. Cette trace est une représentation de l'axe central de la route par un nuage de points (de coordonnées x, y, z).

L'utilisation du plan et profil de la route, implique la connaissance des caractéristiques géométriques de la route. Or ces caractéristiques ne sont pas toujours connues et sont longues à obtenir (par topométrie, ou par le dessin). Pour obtenir le plan et profil de la route, il est parfois nécessaire de lisser les courbes, ce qui peut engendrer une perte d'information concernant les irrégularités de cette même route. De plus, à partir du plan et profil de la route, l'obtention de la visibilité implique de lourds calculs mathématiques (recherche de tangence, formule de courbes en S, point de croisement entre une droite et une courbe). Dans l'exemple représenté sur la figure suivante, à partir de l'observateur, il faut déterminer l'équation de la droite portant le rayon visuel qui est tangent à la première courbe. Il faut ensuite déterminer les points de croisement entre ce rayon visuel et la trajectoire de l'obstacle (qui est parallèle à l'axe de la route). Pour obtenir ces points de croisement les calculs sont fastidieux.

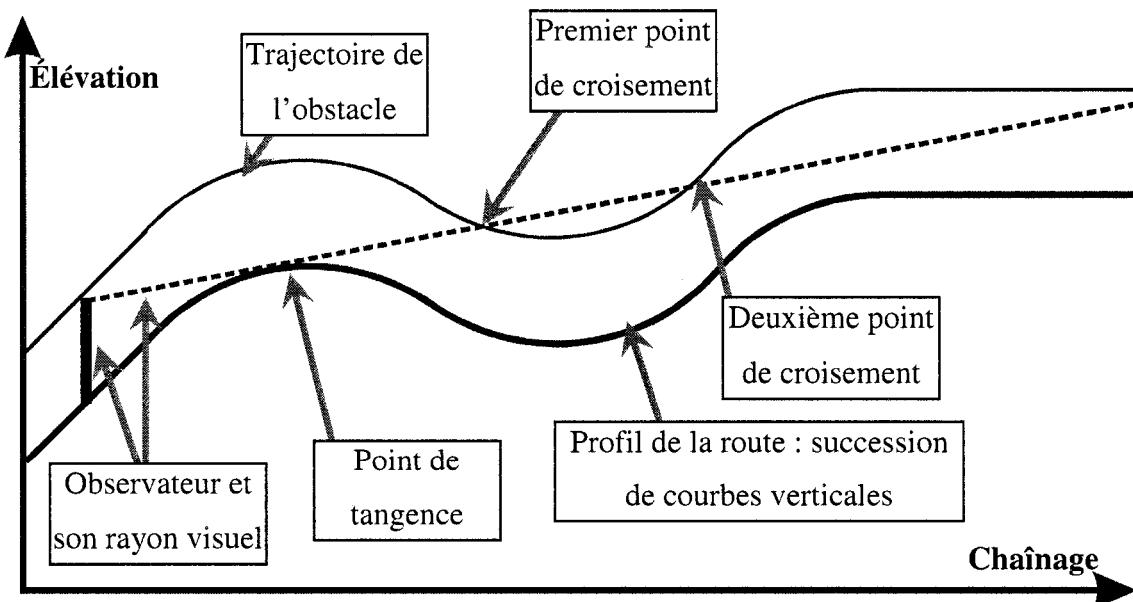


Figure 5-2 Exemple d'utilisation du profil d'une route

L'utilisation d'un nuage de points pour représenter l'axe de la route est plus simple. En effet, l'obtention de ce nuage de points peut se faire soit par topométrie, soit à l'aide d'un appareil GPS. Cette obtention est donc simple et rapide. De plus, ce nuage de points représente au mieux les variations de la route.

L'autre avantage de cette méthode est la simplicité des calculs. En effet, il s'agit simplement de déterminer l'équation d'une droite entre deux points et de vérifier quels sont les points au dessus ou au dessous de cette droite. Dans l'exemple suivant, il suffit de déterminer, si tous les points qui forment le profil de la route sont en dessous du rayon visuel entre l'observateur et un point de la trajectoire de la cible (condition de visibilité). En raisonnant ensuite par incrémentation du point cible (c'est-à-dire en prenant comme point cible, un point de plus en plus éloigné), il est possible de déterminer pour quel point la visibilité est perdue (quand la droite (observateur-cible) passe en dessous d'au moins un des points du profil de la route).

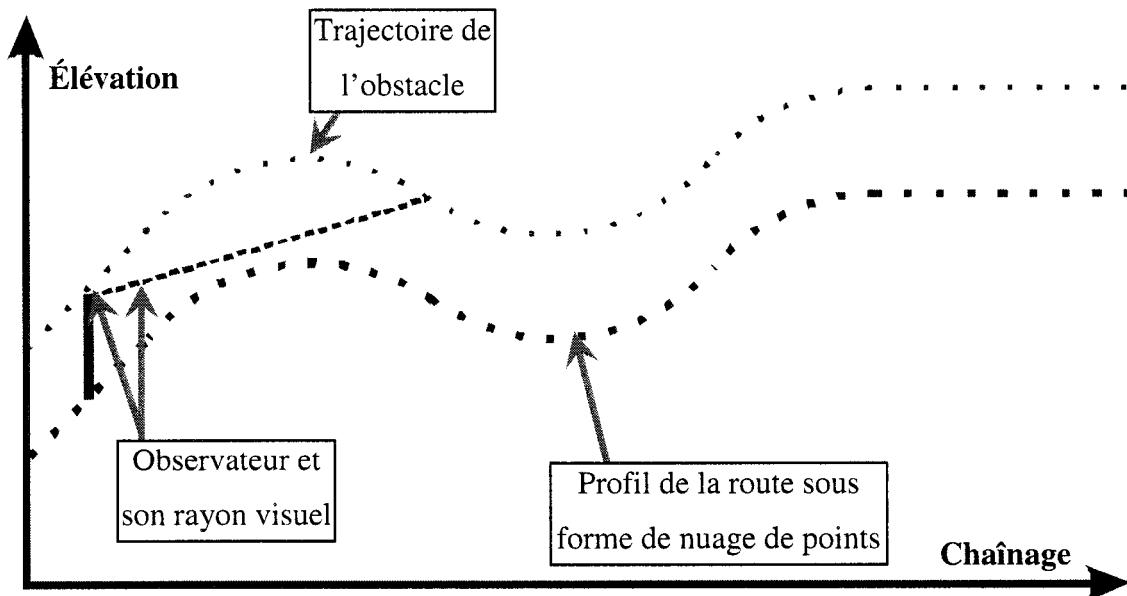


Figure 5-3 Exemple d'utilisation d'un nuage de points

Pour atteindre l'objectif d'obtenir les débuts et fins de zones de dépassement d'une route, nous allons donc utiliser le profil de visibilité de cette route. Ce profil de visibilité sera obtenu à partir d'un algorithme de calcul qui prend en compte une trace GPS de cette route (nuage de points qui représente l'axe central).

5.2 Compréhension de la variation des profils de visibilité

Comme nous l'avons vu au chapitre 1.3.3, un profil de visibilité est constitué de creux et de pics. Les creux correspondent à la limitation de la visibilité par les obstacles verticaux ou horizontaux. La visibilité varie donc selon la taille et l'éloignement de ces obstacles. À partir de considérations géométriques et mathématiques, nous avons étudié l'évolution de la visibilité dans différents cas pour mieux comprendre les variations. Ces calculs ont été menés pour des courbes horizontales circulaires et des courbes verticales convexes et paraboliques.

5.2.1 Allure du profil de visibilité en courbe horizontale

Les considérations mathématiques, les hypothèses de calcul, et les calculs eux-mêmes sont présentés en annexe A. Pour 11 valeurs de rayon de courbure ($R=100, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000m$), les profils de visibilité ont été établis. Pour les 11 valeurs de R , l'allure de la courbe de visibilité s'est avérée être identique. Cette allure est représentée sur la figure suivante :

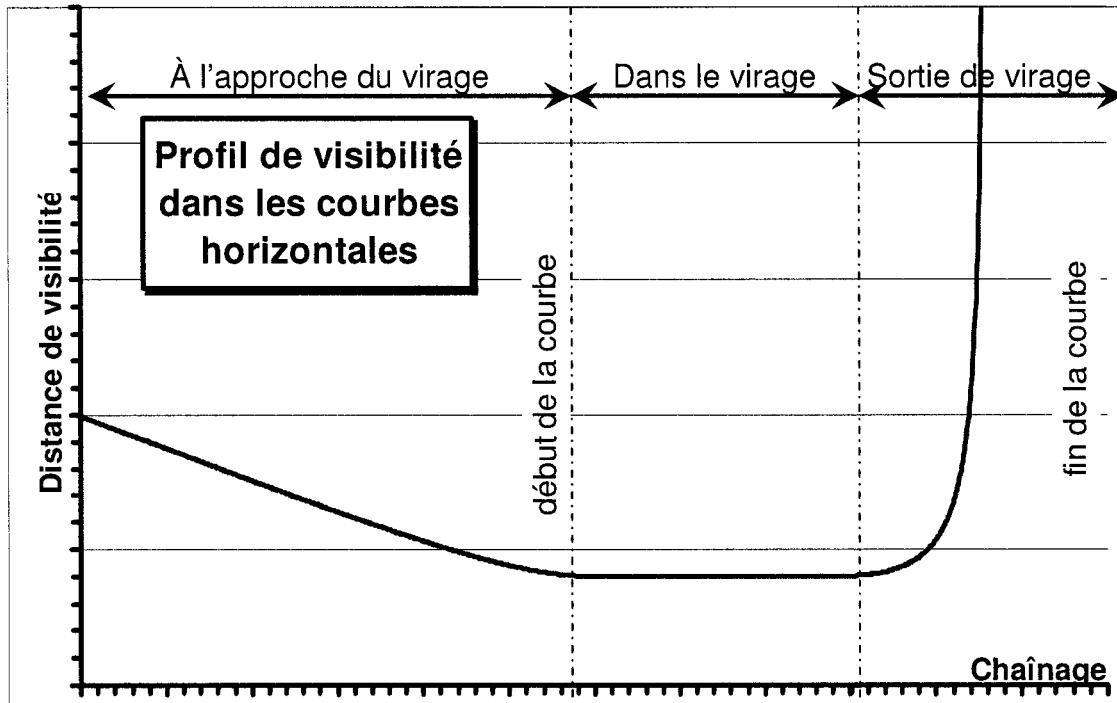


Figure 5-4 Allure du profil de visibilité pour une courbe horizontale

La courbe de la distance de visibilité peut être découpée en trois portions selon les variations :

1. portion à l'approche du virage : la distance de visibilité décroît presque linéairement ;
2. portion dans le virage (cette portion peut ne pas apparaître si le virage est trop court, on passe alors directement de la portion 1 à la portion 3): la distance de visibilité est constante tant que observateur et cible sont dans le virage. Ce palier de visibilité est fonction de la longueur de la courbe et du rayon de courbure. Pour chaque valeur du rayon de courbure R étudiée et pour les caractéristiques géométriques des contraintes citées en annexe, la distance de visibilité dans le virage est indiquée dans le Tableau 5-2.

Les calculs montrent que cette distance de visibilité est fonction de R_1 , R_2 et R_3 où R_1 est le rayon de courbure de la trajectoire de l'observatoire, R_2

le rayon de courbure de la trajectoire de la cible et R_3 le rayon de courbure du bord extérieur de l'accotement (obstacle visuel transversal fictif). On a :

$$DVD_{\min} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_3^2 + 2\sqrt{R_1^2 - R_3^2} * \sqrt{R_2^2 - R_3^2}}$$

En appliquant à cette formule, les différentes valeurs d'écartement de la cible ($R_2=R+1,75$), de l'observateur ($R_1=R-1,75$) et de l'accotement ($R_3=R-6,5$), on peut approximer la distance de visibilité minimum dans un virage de rayon R et l'exprimer en fonction de la racine carré de ce rayon R :

$$DVD_{\min}(R) = 7,1 * \sqrt{R}$$

Tableau 5-2 Distance de visibilité dans le virage pour les 11 rayons de courbures étudiés, dans les conditions de largeur de voie et d'accotement utilisées.

R (m)	Distance de visibilité dans le virage (m)
100	70.3
250	112.3
500	159.3
750	195.2
1000	225.6
1500	276.4
2000	319.2
2500	357.0
3000	391.1
4000	451.7
5000	505.0

3. portion en sortie de virage : rapide croissance de la distance de visibilité.

Cette croissance a lieu sur quelques dizaines de mètres et s'arrête lorsque le rayon visuel rencontre l'obstacle suivant (virages ou bosses).

5.2.2 Allure des courbes de visibilité en courbes verticales

Seules les courbes convexes sont un obstacle à la visibilité. La théorie mathématique et géométrique pour cette étude est issue des notes du cours CIV4602 de Conception des routes donné en 2002 par Karsten Baass à l'École Polytechnique de Montréal. En considérant un grand nombre de courbes convexes (longueurs et /ou pentes différentes), nous avons constaté que l'allure des courbes de visibilité est identique quelles que soient les considérations de pentes et de longueurs et est semblable à la courbe suivante :

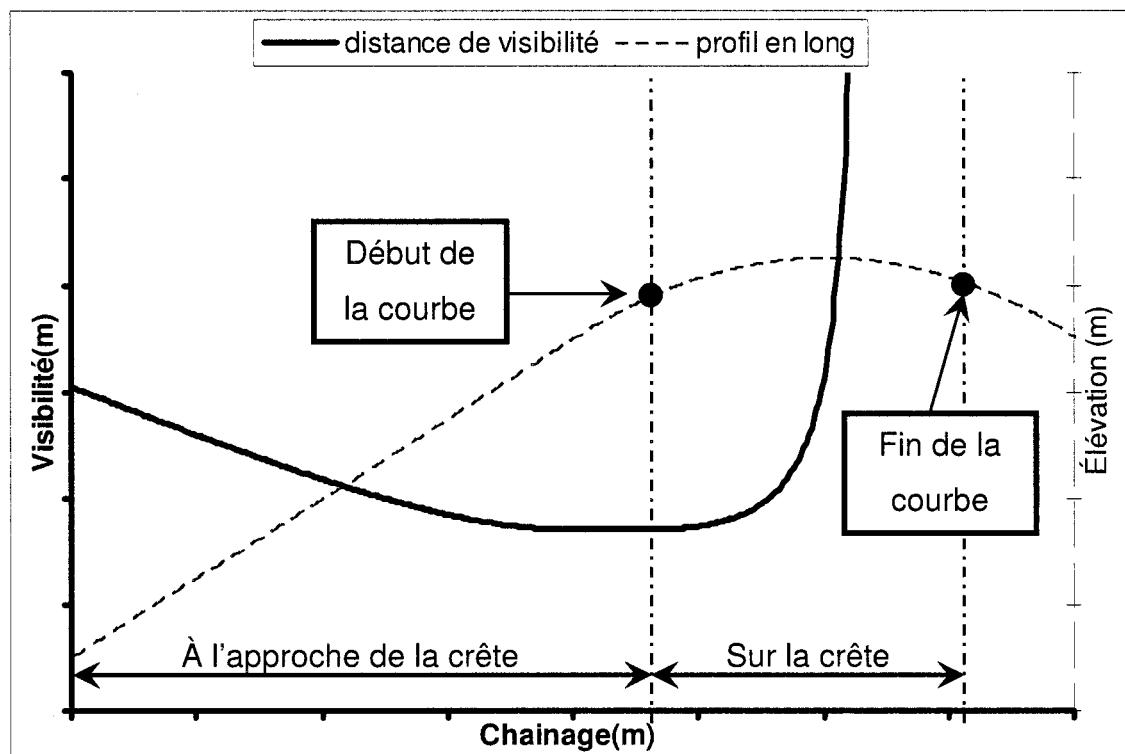


Figure 5-5 Allure des profils de visibilité pour une courbe verticale convexe

Sur ces profils de visibilité, deux phases se distinguent :

1. à l'approche de la crête : la visibilité décroît presque linéairement pour atteindre une valeur constante ;
2. sur la crête : la visibilité augmente rapidement et passe de la valeur minimum à l'infini en quelques dizaines de mètres.

Remarque : si la courbe est assez longue, on peut également constater un palier de visibilité entre les deux phases

Dans les deux cas (courbes horizontales et verticales), la visibilité suit donc le même comportement : décroissance, palier plus ou moins long puis rapide croissance.

CHAPITRE 6 Développement de l'algorithme de génération des profils de visibilité

Cet algorithme prend en compte le relevé GPS de la ligne axiale de la section de route à étudier. Les points relevés sont numérotés de 1 à n, où n est le nombre de mesures. Un point intermédiaire est numéroté i. L'algorithme prend également comme entrée différentes caractéristiques de la route (largeur des voies et largeur des accotements) et différentes valeurs précisées dans les normes (hauteur de l'œil, hauteur de la cible, position transversale de la cible et de l'observateur, distance de visibilité minimale, longueur minimale de zone de dépassement). L'algorithme peut fournir différents résultats pour chaque sens de circulation:

- une liste des distances de visibilité le long de la route avec un pas constant ;
- une liste des distances de visibilité le long de la route pour chaque point GPS associée à la nature des obstacles visuels (horizontaux ou verticaux);
- une liste des distances de visibilité verticale pour chaque point GPS;
- une liste des distances de visibilité horizontale pour chaque point GPS;
- le profil des visibilités le long de la route ;
- la liste des zones de dépassement (début et fin de zone, longueur de la zone), selon les critères de norme indiqués.

Pour aboutir aux distances de visibilité, l'algorithme calcule les distances de visibilité verticale (c'est-à-dire les distances de visibilité en fonction des seuls obstacles verticaux), et les distances de visibilité horizontale. Il les combine ensuite en prenant le minimum des deux, pour obtenir la visibilité générale.

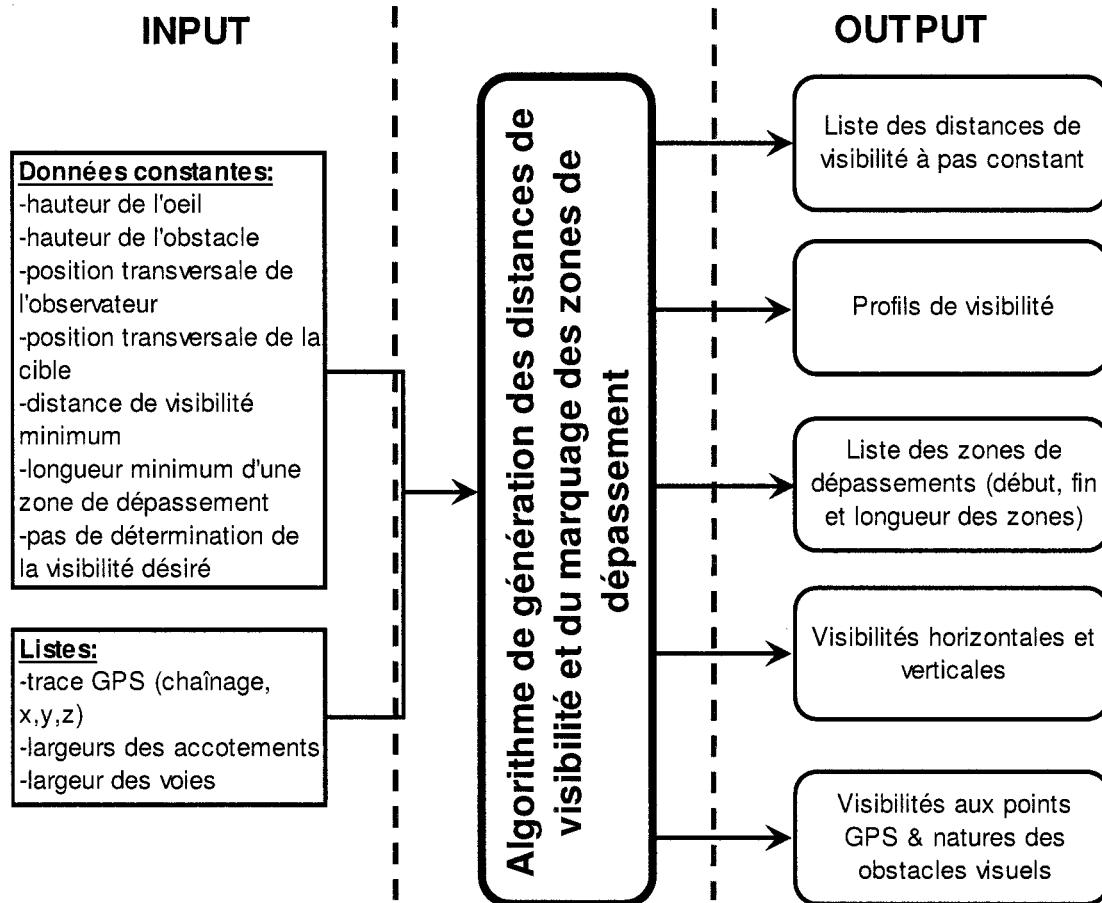


Figure 6-1 Entrées et sorties de l'algorithme

6.1 Obtention de la visibilité issue des contraintes verticales

L'algorithme utilise la visibilité verticale et la visibilité horizontale pour obtenir la visibilité générale. Cette partie vise à expliquer l'obtention par l'algorithme de la visibilité sur le profil en long (ici appelée visibilité verticale).

6.1.1 Principe de calcul

Pour obtenir la distance de visibilité verticale au chaînage i , il faut utiliser le profil de la route. Il s'agit d'observer à partir d'un point représentant l'observateur, une ligne fictive représentant la trajectoire de la cible. L'observation se fait de manière croissante, c'est-à-

dire que l'on commence à regarder un point très proche pour ensuite éloigner le regard. Dès le rayon visuel rencontre un obstacle (point de l'accotement), on obtient la distance de visibilité du point où est placé l'observateur.

L'exemple représenté sur la figure suivante montre que à partir de l'œil de l'observateur placé en i , on génère un rayon visuel de l'observateur vers un point j de la trajectoire de la cible proche de i (segment 1 sur la figure suivante). Si tous les points du profil de la route entre i et j sont sous le rayon visuel, alors la visibilité de i vers j est disponible. On génère alors un second rayon visuel (segment 2) entre i et j' (où j' est un point de la trajectoire de la cible situé après j). Si tous les points du profil de la route entre i et j' sont sous le rayon visuel, alors la visibilité de i vers j' est disponible. On génère alors un troisième rayon visuel (segment 3) entre i et j'' , puis un quatrième (segment 4) entre i et j''' et ainsi de suite jusqu'à déterminer un point j^n pour lequel la visibilité n'est plus disponible, c'est-à-dire que le profil entre i et j^n croise le rayon visuel $[i;j^n]$. Sur la figure, il s'agit du rayon 5 et du point j'''' . Le point pour lequel la visibilité est perdue, est alors compris entre j^{n-1} et j^n (sur la figure, entre j''' et j''''). La distance de visibilité est alors la distance selon le chaînage qui sépare i de j^n .

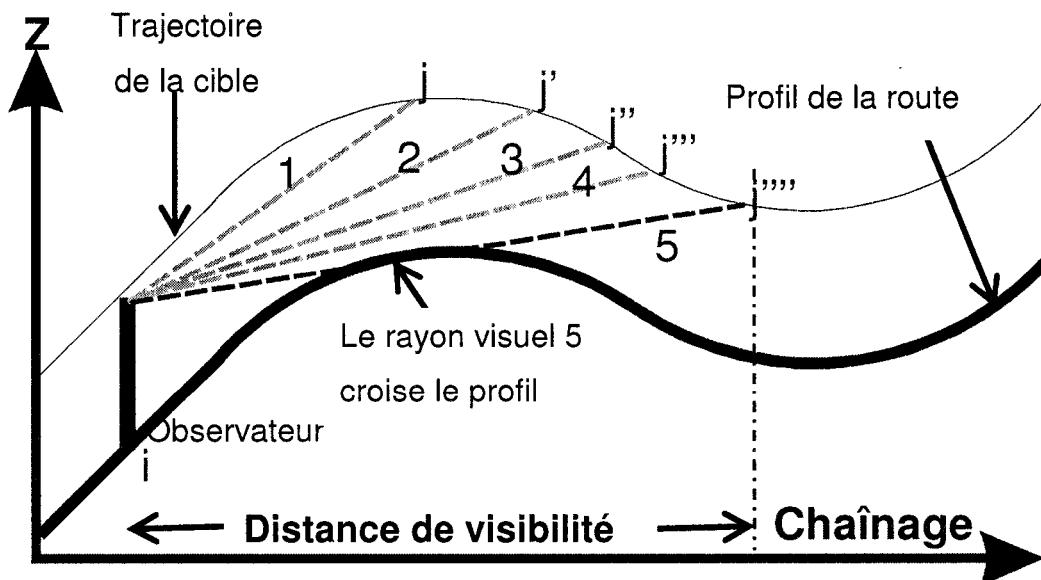


Figure 6-2 Utilisation du profil pour l'obtention de la distance de visibilité verticale

La distance de visibilité obtenue au chaînage i , l'algorithme calcule la distance de visibilité au chaînage $i+1$.

Comme nous utilisons la trace verticale GPS de la route (couple chaînage, z), les différents points i pour lesquels nous déterminerons la visibilité sont les points qui forment la trace. Or nous ne disposons pour le moment que de la trace de l'axe central de la route, il nous faut donc générer la trace verticale de la trajectoire de la cible et de l'observateur.

6.1.2 Obtention des lignes caractéristiques du profil en long

On définit 3 courbes caractéristiques pour le profil en long, chacune de ces courbes est une suite de points :

1. ligne axe : profil en long de l'axe de la route ;
2. ligne de l'observateur : translation verticale de l'axe de la route d'une hauteur variable selon la nature du véhicule considéré, correspondant à la hauteur de l'œil et fixée par la norme de signalisation routière, Ministère des Transports du Québec (1999) à 1.05 m (ou 2.40 m pour les camions) ;
3. ligne de cible : translation verticale de l'axe de la route d'une hauteur correspondant à la hauteur de l'obstacle ou du véhicule à repérer (Ministère des Transports du Québec (2003) : 1.15 m).

Chacune de ces lignes est définie par une liste de points dont les coordonnées sont le chaînage pour l'abscisse et l'élévation z pour l'ordonnée.

1. La ligne axe est donnée par les relevées GPS. Le couple de coordonnées pour le point i est donc ($\text{chaînage } i; z_i$)
2. La ligne de l'observateur est obtenue à partir de la ligne axe pour laquelle on ajoute à l'élévation z , la valeur de la hauteur de l'œil $h_{\text{œil}}$ telle

que définie dans la norme. Le couple de coordonnées de la ligne œil est pour le point i : (chaînage i ; $z_i + h_{oeil}$).

3. La ligne de cible est obtenue à partir de la ligne axe pour laquelle on ajoute à la valeur de z , la hauteur de la cible h_{cible} telle que mentionnée dans la norme. Le couple de coordonnées de la ligne obstacle est pour le point i : (chaînage i ; $z_i + h_{cible}$).

Le profil en long est donc représenté par ces trois lignes et est schématisé tel que sur la figure suivante :

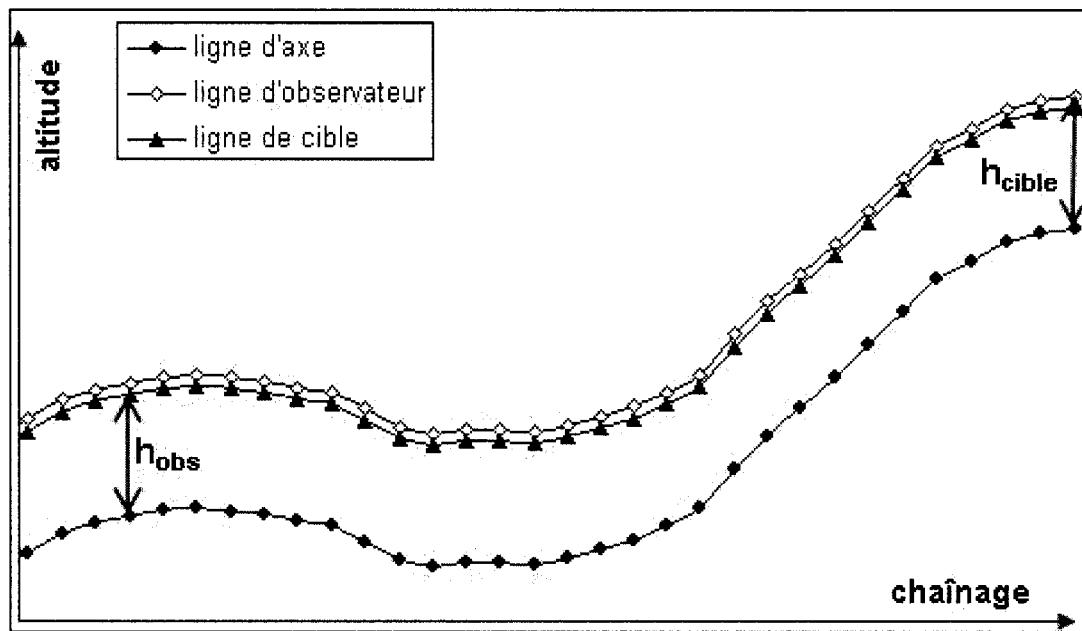


Figure 6-3 Schématisation du profil en long par 3 lignes

6.1.3 Détails de l'algorithme pour la visibilité verticale

La distance de visibilité issue des contraintes verticales est déterminée à partir du profil en long et des trois lignes qui le composent, i.e. la ligne d'axe, la ligne de l'observateur et la ligne de cible.

Pour chaque point i pour lequel on veut déterminer cette distance de visibilité, on génère une droite qui représente le rayon visuel entre l'observateur au chaînage i (c_i) et la cible au chaînage j (c_j). Si cette droite ne coupe pas la ligne d'axe, la visibilité est disponible entre i et j , si cette droite coupe la ligne d'axe, la visibilité est obstruée. Cette vérification est faite à partir du point suivant directement l'observateur ($j=i+1$) et tant que la visibilité reste disponible. Il faut donc suivre le cheminement suivant :

1. on pose $j=i+1$
2. tracer la droite $D(z=\alpha c + \beta)$ passant par les points $(c_i ; z_i + h_{\text{obs}})$ et $(c_j ; z_j + h_{\text{cible}})$;
3. pour chaque point k $i < k < j$ on vérifie que $z_k < \alpha(c_k) + \beta$, c'est-à-dire que la droite D reste au dessus de la ligne axiale ;
4. si la condition est vérifiée, on incrémente j , i.e. $j=j+1$ et on retourne à l'étape 2.

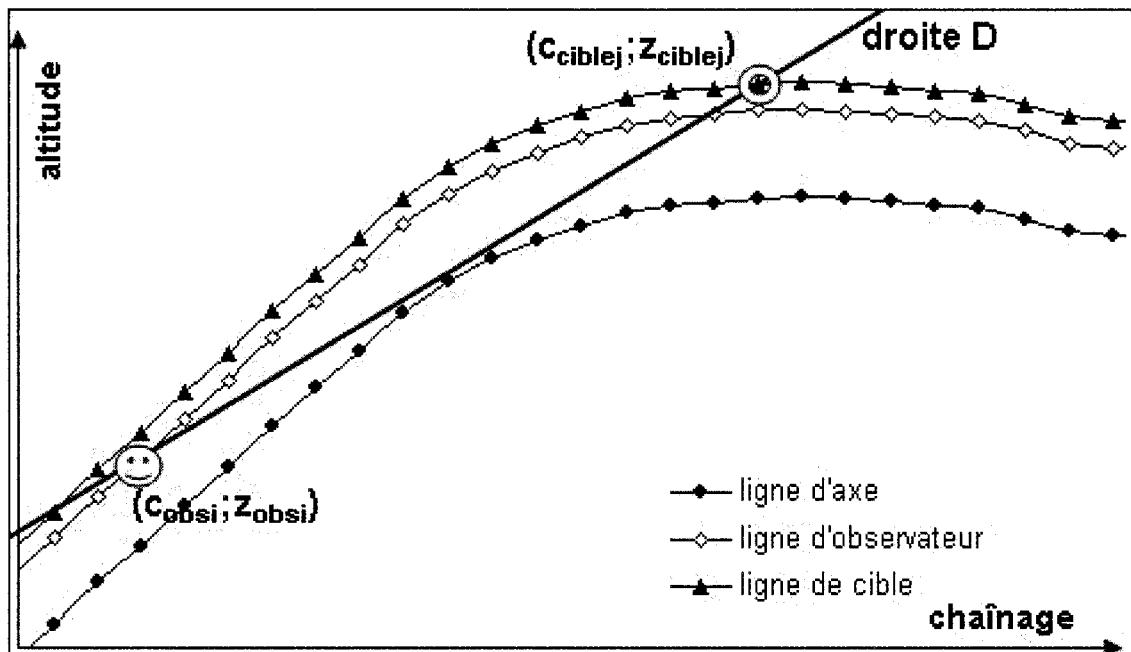


Figure 6-4 La condition verticale est vérifiée

5. si la condition n'est pas vérifiée, la boucle s'arrête, la visibilité a été perdue entre les chaînages $j-1$ et j . En supposant que la visibilité a été perdue au milieu de c_{j-1} et c_j , la distance de visibilité issue des contraintes verticales DVV au chaînage i est :

$$DVV_i = \frac{c_j - c_{j-1}}{2} - c_i$$

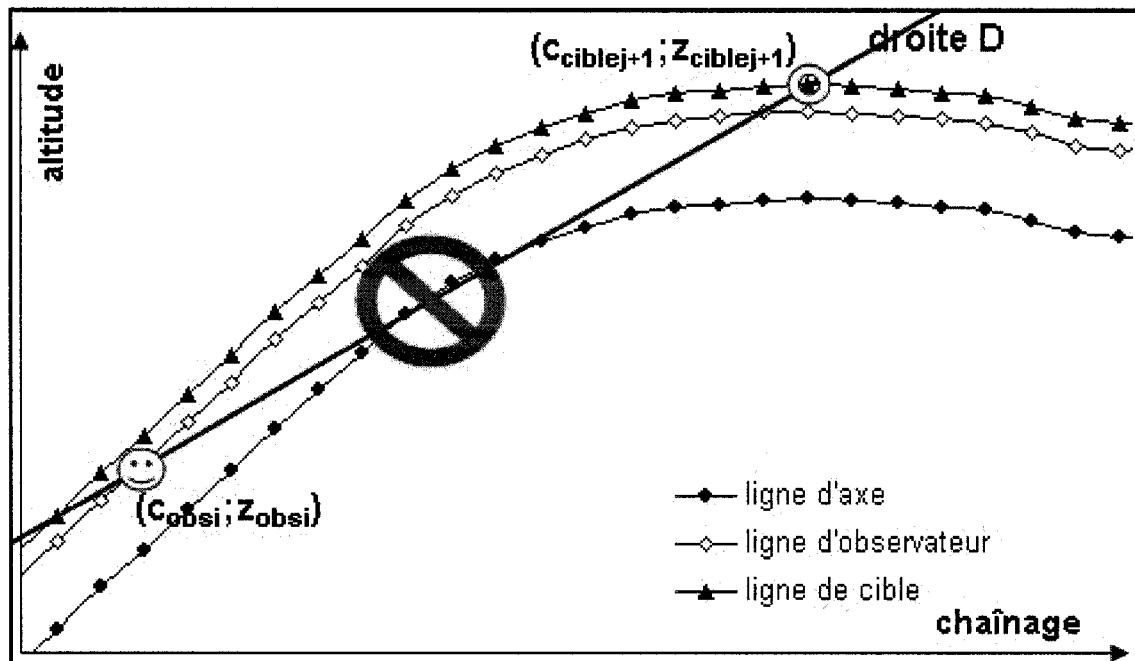


Figure 6-5 La condition verticale n'est pas vérifiée

Pour chacun des points i , la distance de visibilité issue des contraintes verticales DVV_i est ainsi calculée.

Remarques sur l'algorithme :

- La vérification de pseudo tangence (c'est-à-dire de la position du rayon visuel par rapport à la ligne de l'axe) est ponctuelle et non continue. Mais l'erreur qui en

découle est en moyenne égale à la moitié du pas de mesure. Plus ce pas est petit, meilleure est la précision.

- Si la visibilité reste disponible en c_i jusqu'à $j=n$, l'incrémentation en j est arrêtée. La visibilité ne peut donc pas être déterminée et l'algorithme renvoie l'information « 0 ».

6.2 Obtention de la visibilité issue des contraintes horizontales

6.2.1 Principe de calcul

Pour obtenir la distance de visibilité au chaînage i , il faut utiliser le tracé en plan de la route. Il s'agit d'observer à partir d'un point représentant l'observateur, une ligne fictive représentant la trajectoire de la cible. L'observation se fait de manière croissante, c'est-à-dire que l'on commence à regarder un point très proche pour ensuite éloigner le regard. Dès qu'un obstacle (ligne d'accotement à gauche ou ligne d'accotement à droite) coupe le rayon visuel, on obtient la distance de visibilité du point où est placé l'observateur.

L'exemple représenté sur la Figure 6-6 montre que à partir de l'œil de l'observateur placé en i , on génère un rayon visuel de l'observateur vers un point j de la trajectoire de la cible proche de i (segment 1 sur la figure suivante). Si tous les points de la ligne représentant l'accotement droit de la route entre i et j sont à droite (dans le sens du rayon visuel) du rayon visuel, alors la visibilité de i vers j est disponible, il faut également vérifier que tous les points de la ligne représentant l'accotement gauche entre i et j sont à gauche du rayon visuel. On génère alors un deuxième rayon visuel (segment 2) entre i et j' , puis un troisième rayon visuel (segment 3) entre i et j'' , et ainsi de suite jusqu'à déterminer un point j^n pour lequel la visibilité n'est plus disponible, c'est-à-dire que au moins l'une des deux lignes représentant les accotements entre i et j^n croise le rayon visuel $[i;j^n]$. Sur la figure, il s'agit du rayon 4 et du point j'''' . Le point pour lequel la visibilité est perdue, est alors compris entre j^{n-1} et j^n (sur la figure, entre j''' et j''''). La distance de visibilité est alors la distance curviligne qui sépare i de j^n .

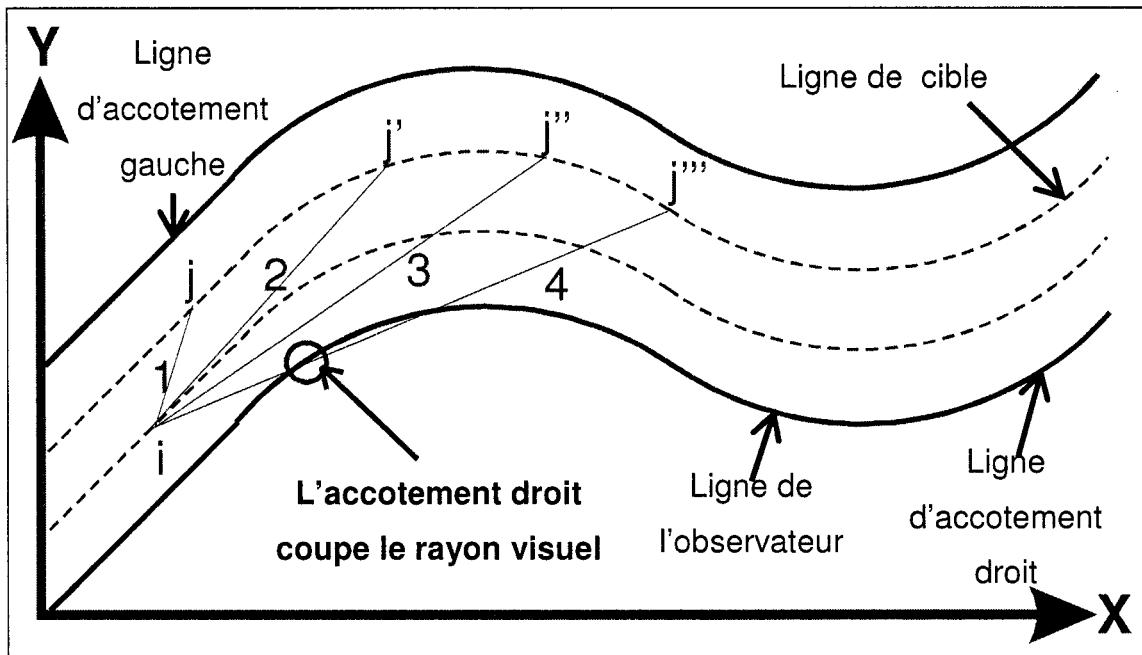


Figure 6-6 Utilisation du tracé en plan pour l'obtention de la distance de visibilité horizontale

La distance de visibilité obtenue au chaînage i , l'algorithme calcule la distance de visibilité au chaînage $i+1$.

Comme nous utilisons la trace horizontale GPS de la route (couple x, y), les différents points i pour lesquels nous déterminerons la visibilité sont les points qui forment la trace. Or nous ne disposons pour le moment que de la trace de l'axe central de la route, il nous faut donc générer la trace horizontale de la trajectoire de la cible et de l'observateur, ainsi que des lignes d'accotement :

6.2.2 Obtention des lignes caractéristiques du tracé en plan

La route est représentée en plan par 4 alignements curvilignes, chacun d'eux étant une suite de points. Ces 4 courbes sont parallèles à la ligne axiale qui est la ligne relevée par le GPS et dont les points i ont pour coordonnées $(x_i ; y_i)$. Ce sont :

1. la ligne de l'observateur, qui représente la ligne fictive sur laquelle circule le conducteur, cette ligne est à une distance l_{obs} de la ligne axiale. Les coordonnées des points i constituant cette ligne sont $(x_{obsi}; y_{obsi})$;
2. la ligne de cible, qui représente la ligne fictive sur laquelle circule l'obstacle, c'est-à-dire le véhicule arrivant en sens inverse. La distance qui sépare la ligne axiale de l'axe de l'observateur est l_{cible} et les coordonnées du point i de cette courbe sont $(x_{ciblei}; y_{ciblei})$;
3. la ligne d'accotement gauche, qui représente le bord extérieur de l'accotement gauche de la route. La distance qui sépare cette ligne de la ligne axiale est de $l_{voie}+l_{accg}$, et les coordonnées du point i de cette ligne sont $(x_{accgi}; y_{accgi})$;
4. la ligne d'accotement droit, à une distance $l_{voie}+l_{accd}$, et de coordonnées $(x_{accdi}; y_{accdi})$.

Chaque point i de ces quatre courbes est obtenu à partir du point i de la ligne axiale et selon la même méthode :

1. tracer la droite d_i ($y=ax+b$) reliant les points $(x_{i-1}; y_{i-1})$ et $(x_{i+1}; y_{i+1})$;

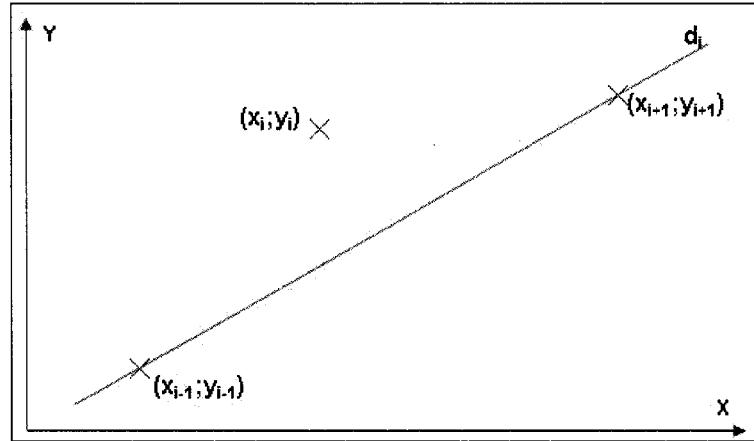


Figure 6-7 droite d_i reliant les points $(x_{i-1}; y_{i-1})$ et $(x_{i+1}; y_{i+1})$

2. tracer la droite d'_i ($y=ax+b'$) parallèle à d_i et passant par le point $(x_i; y_i)$;

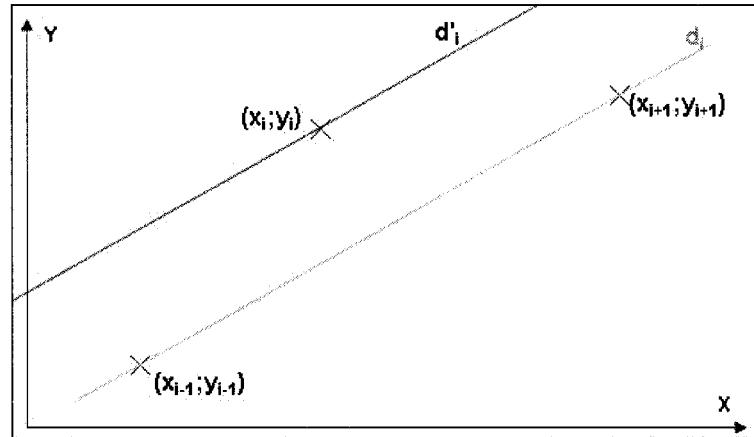
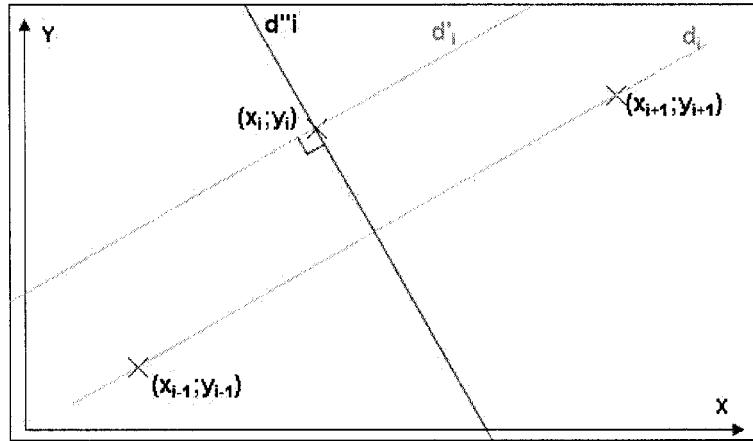


Figure 6-8 droite d'_i parallèle à d_i et passant par le point $(x_i; y_i)$

3. tracer la droite d''_i ($y=a''x+b''$, où $a''=-1/a$) perpendiculaire à d'_i en $(x_i; y_i)$, les points des 4 courbes sont alors sur cette droite d''_i à une distance l_{obs} , l_{cible} , $l_{\text{voie}}+l_{\text{accd}}$, $l_{\text{voie}}+l_{\text{accg}}$ respectivement pour les point des lignes de l'observateur, de la cible et des accotements (droite et gauche);

Figure 6-9 droite d''_i

4. déterminer les coordonnées des points de la ligne de l'observateur, de la ligne de cible, de la ligne de l'accotement gauche et de la ligne de l'accotement droit selon les conditions suivantes :

- si $y_{i-1} > y_i$ alors :

observateur :

$$x_{obsi} = x_i - \frac{l_{obsi}}{2\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{obsi} = a''(x_{obsi} - x_i) + y_i$$

cible :

$$x_{ciblei} = x_i + \frac{l_{ciblei}}{2\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{ciblei} = a''(x_{ciblei} - x_i) + y_i$$

accotement droit :

$$x_{accdi} = x_i - \frac{l_{voiei} + l_{accdi}}{\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{accdi} = a''(x_{accdi} - x_i) + y_i$$

accotement gauche :

$$x_{accgi} = x_i + \frac{l_{voiei} + l_{accgi}}{\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{accgi} = a''(x_{accgi} - x_i) + y_i$$

- si $y_{i-1} < y_i$ alors :

observateur :

$$x_{obsi} = x_i + \frac{l_{obsi}}{2\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{obsi} = a''(x_{obsi} - x_i) + y_i$$

cible :

$$x_{ciblei} = x_i - \frac{l_{ciblei}}{2\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{ciblei} = a''(x_{ciblei} - x_i) + y_i$$

accotement droit :

$$x_{accdi} = x_i + \frac{l_{voiei} + l_{accdi}}{\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{accdi} = a''(x_{accdi} - x_i) + y_i$$

accotement gauche :

$$x_{accgi} = x_i - \frac{l_{voiei} + l_{accgi}}{\sqrt{1+a''^2}} \text{ et } y_{accgi} = a''(x_{accgi} - x_i) + y_i$$

Remarques sur l'algorithme :

- si la ligne axiale est composée de n points alors les quatre lignes obtenues par l'algorithme n'en ont que $n-2$, car pour obtenir le point i , il faut connaître le point $i-1$ et le point $i+1$ de l'axe. Ce qui n'est pas le cas pour $i=1$ et $i=n$;
- l'obtention des quatre lignes au mieux parallèles à la ligne axiale dépend du pas de mesure ; plus celui-ci est court et constant au plus les courbes obtenues sont justes ;
- l'algorithme permet d'utiliser des largeurs de voie et d'accotement non constantes ; ainsi, il serait possible de rentrer cette information pour chaque point i relevé ;

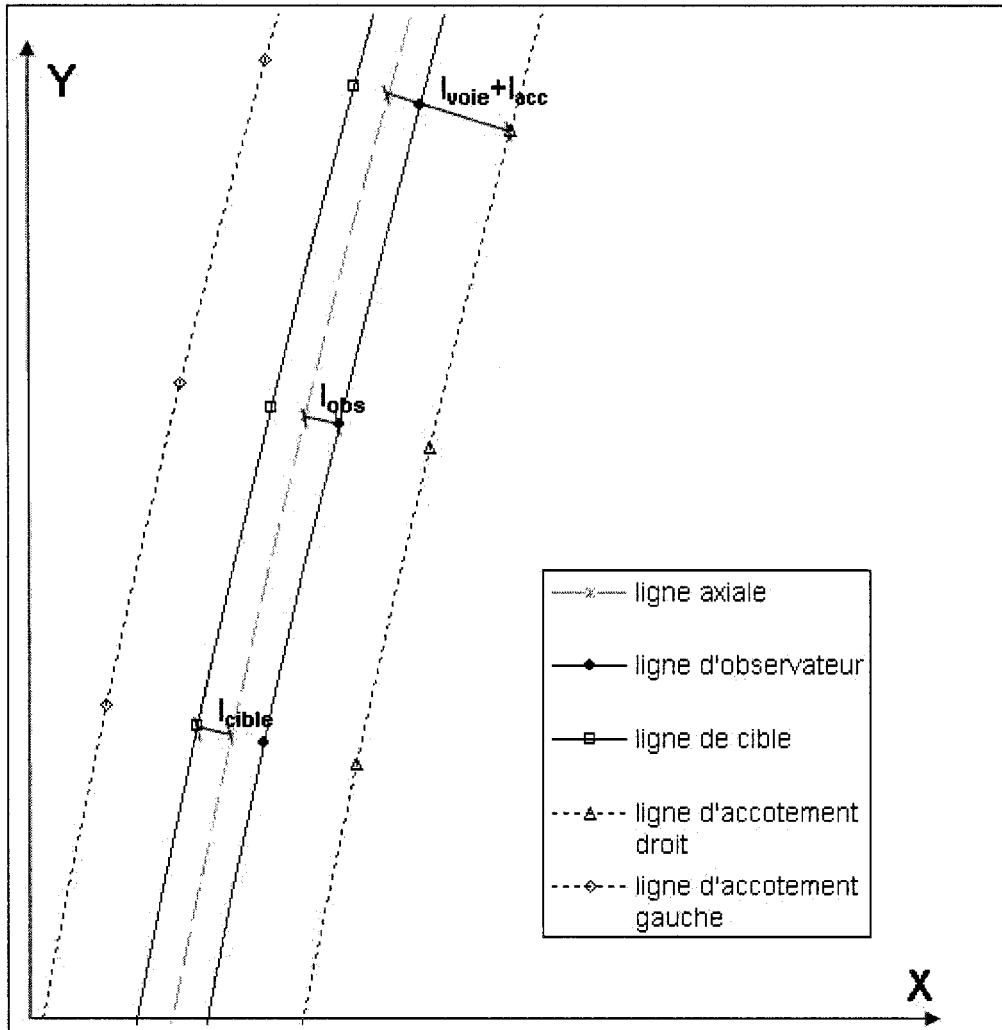


Figure 6-10 Schématisation du tracé en plan par 5 courbes

6.2.3 Détails de l'algorithme pour la visibilité horizontale

Cette distance de visibilité issue des contraintes horizontales est déterminée à partir du tracé en plan et des quatre lignes qui le composent, i.e. la ligne d'observateur, la ligne de cible, la ligne d'accotement gauche et la ligne d'accotement droit.

Pour chaque point i pour lequel on veut déterminer cette distance de visibilité, on génère une droite qui représente le rayon visuel entre l'observateur au chaînage i (c_i) et la cible au chaînage j (c_j). Si cette droite ne coupe pas les lignes d'obstacles transversales, i.e. les

lignes d'accotement droit et gauche, la visibilité est disponible entre i et j . Si cette droite coupe soit la ligne d'accotement gauche soit la ligne d'accotement droit, la visibilité est obstruée. Cette vérification est faite à partir du point directement après l'observateur ($j=i+1$) et tant que la visibilité reste disponible. Il faut donc suivre le cheminement suivant :

1. on pose $j=i+1$;
2. tracer le rayon visuel représenté par la droite $\Delta(y=\gamma x+\rho)$ passant par les points $(x_i ; y_i)$ et $(x_j ; y_j)$;
3. pour chaque point k $i < k < j$ on fait une double vérification :
 - si $x_i < x_j$, alors $y_{accdk} < \gamma(x_{accdk}) + \rho$, c'est-à-dire que la droite Δ ne coupe pas la ligne d'accotement droit entre i et j , et $y_{accgk} > \gamma(x_{accgk}) + \rho$, c'est-à-dire que la droite Δ ne coupe pas la ligne d'accotement gauche entre i et j ;
 - si $x_i > x_j$, alors $y_{accdk} > \gamma(x_{accdk}) + \rho$, c'est-à-dire que la droite Δ ne coupe pas la ligne d'accotement droit entre i et j , et $y_{accgk} < \gamma(x_{accgk}) + \rho$, c'est-à-dire que la droite Δ ne coupe pas la ligne d'accotement gauche entre i et j ;
4. si les deux conditions sont vérifiées, on incrémente j , i.e. $j=j+1$ et on retourne à l'étape 2.

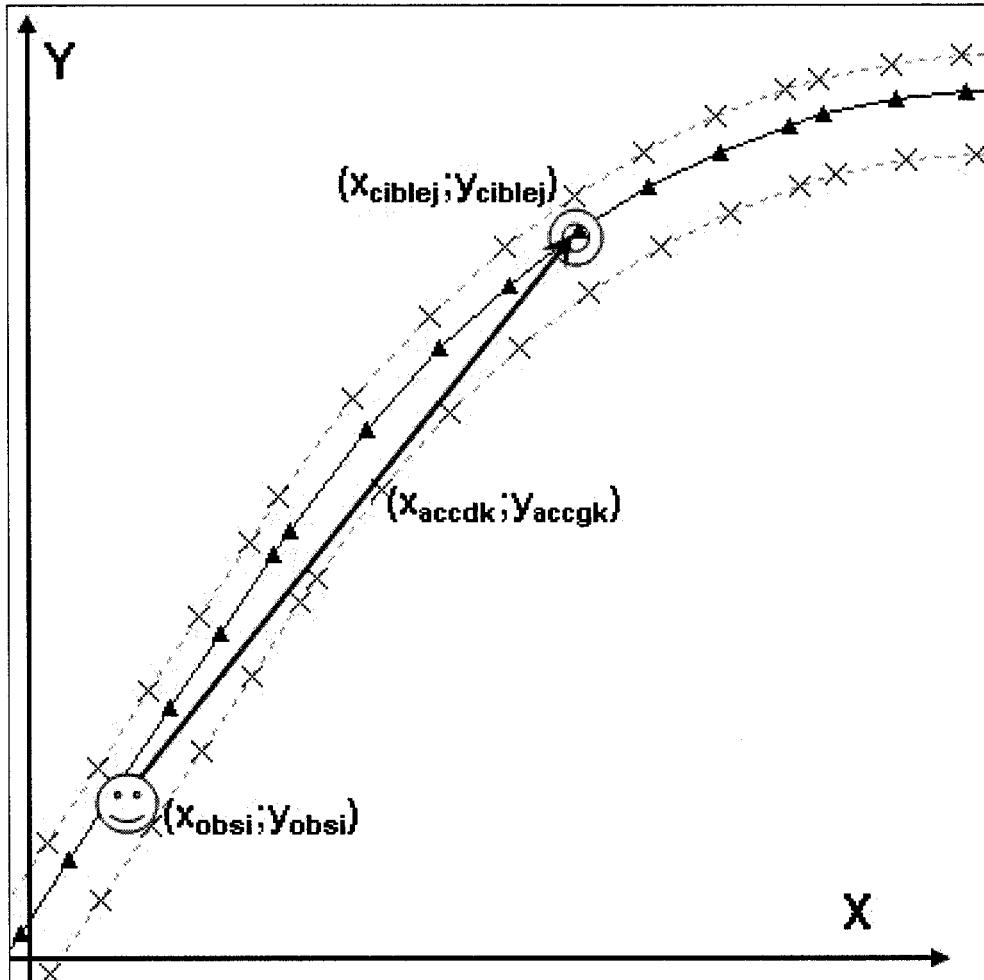


Figure 6-11 Les deux conditions sont vérifiées

5. si une des deux conditions n'est pas vérifiée, la boucle s'arrête, la visibilité a été perdue entre les chaînages $j-1$ et j . En supposant que la visibilité a été perdue au milieu de c_{j-1} et c_j , la distance de visibilité issue des contraintes verticales DVV au chaînage i est :

$$DVV_i = \frac{c_j - c_{j-1}}{2} - c_i$$

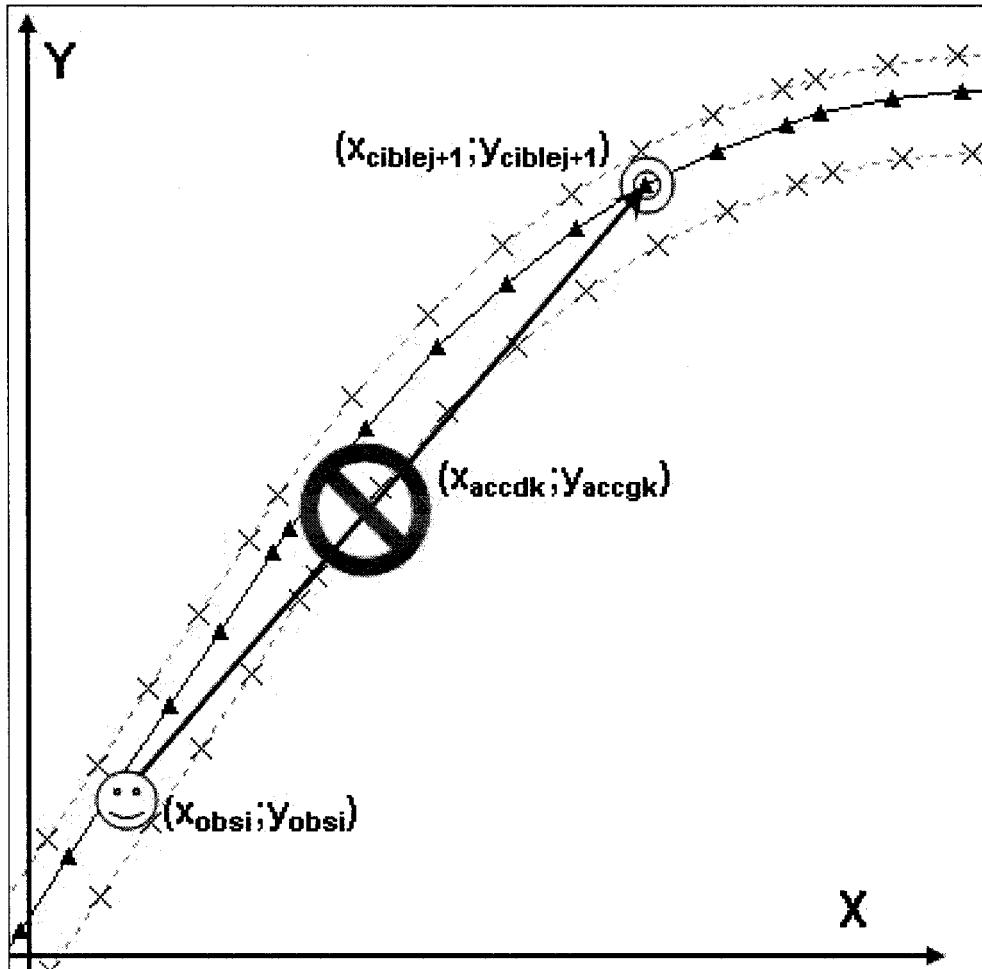


Figure 6-12 La condition à droite n'est pas vérifiée

Pour chacun des points i , la distance de visibilité issue des contraintes verticales DVV_i est ainsi calculée.

Remarques sur l'algorithme :

- La vérification de pseudo tangence (c'est-à-dire de la position du rayon visuel par rapport aux deux lignes d'accotement) est ponctuelle et non continue. Mais l'erreur qui en découle est en moyenne égale à la moitié du pas de mesure. Plus ce pas est petit, meilleure est la précision.

- Si la visibilité reste disponible en c_i jusqu'à $j=n$, l'incrémentation en j est arrêté. La visibilité ne peut donc pas être déterminée et l'algorithme renvoie l'information « 0 ».

6.3 Distance de visibilité et zone de dépassement

6.3.1 Visibilité générale

Pour chaque point i , deux informations concernant la visibilité sont donc disponibles : la distance de visibilité issue des contraintes verticales et la distance de visibilité issue des contraintes horizontales. En considérant le minimum de ces deux distances, nous obtenons la distance de visibilité générale ($DV_j = \min(DV_{horj}; DV_{verj})$). Cette démarche (choisir le minimum des deux) est une simplification de la réalité car l'influence de la 3D n'est alors pas prise en compte. Mais comme indiqué dans la revue de littérature, cette approximation est justifiée par l'erreur négligeable que l'on commet.

Une liste des distances de visibilité de dépassement pour tout point i est alors disponible. De cette liste nous pouvons générer le profil de visibilité.

6.3.2 Visibilité à pas constant

Un des objectifs de l'algorithme est l'obtention de la distance de visibilité le long de la route à des chaînages constants (tous les 10, 20 ou 30 mètres par exemple selon les besoins, et selon le choix de l'utilisateur). Nous disposons pour le moment de la visibilité pour chaque point GPS. Pour obtenir la visibilité le long de la route à intervalle constant il faut différencier deux cas selon l'allure de la courbe de visibilité aux chaînages considérés:

- la visibilité est décroissante ou n'est que légèrement croissante : la visibilité au chaînage constant s'obtient par interpolation linéaire de la visibilité entre les chaînages de visibilité connue au point précédent et au point suivant;

- le chaînage pour lequel on veut déterminer la visibilité se situe dans un « saut » de visibilité, c'est-à-dire sur une portion pour laquelle la visibilité croît très rapidement entre deux points de visibilité connue : la visibilité s'obtient alors par linéarité de la visibilité avec les deux chaînages précédents ou avec les deux chaînages suivants, selon la distance entre le chaînage à déterminer et les chaînages connus.

Une liste de visibilité pour des chaînages à intervalle constant est calculée et est proposée à l'utilisateur.

6.3.3 Détermination des zones de dépassement

À partir de la liste des distances de visibilité (DV_j) et de la distance de visibilité minimum (DV_{min} qui est une entrée de l'algorithme), nous obtenons une succession de zones de dépassement potentiel (c'est-à-dire un segment de la route pour lequel les distances de visibilité sont toujours supérieurs à la visibilité minimum) et de zones de non dépassement (distances de visibilité inférieures à la visibilité minimum).

Ces zones sont définies par leur chaînage de début, leur chaînage de fin et leur longueur :

- Le début de la zone (c_{deb}) est approximée par le chaînage pour lequel la visibilité dépasse la visibilité minimum :

$$c_{deb}=c_j, \text{ si } DV_j > DV_{min} \text{ et } DV_{j-1} < DV_{min};$$

- La fin de la zone c_{fin} est le barycentre entre le dernier chaînage pour lequel la visibilité est suffisante et le chaînage suivant pour lequel la visibilité est perdue. La pondération se fait en fonction de la différence de visibilité par rapport à la visibilité minimum. En fait on suppose une variation linéaire de la visibilité entre deux chaînages consécutifs :

$$c_{fin} = c_j + \frac{(DV_{min} - DV_j)(c_j - c_{j+1})}{DV_j - DV_{j+1}} \text{ si } DV_j > DV_{min} \text{ et } DV_{j+1} < DV_{min} ;$$

- La longueur de la zone est : $L_{zone} = c_{fin} - c_{deb}$.

Une autre entrée de l'algorithme est la longueur minimale d'une zone de dépassement (L_{min}). Si $L_{zone} < L_{min}$, alors cette zone est rejetée en tant que zone de dépassement et le marquage à appliquer est celui d'une zone d'interdiction de dépassement. Si $L_{zone} > L_{min}$, alors la zone est acceptée en tant que zone de dépassement et le dépassement doit y être autorisé.

L'exemple suivant expose le cheminement :

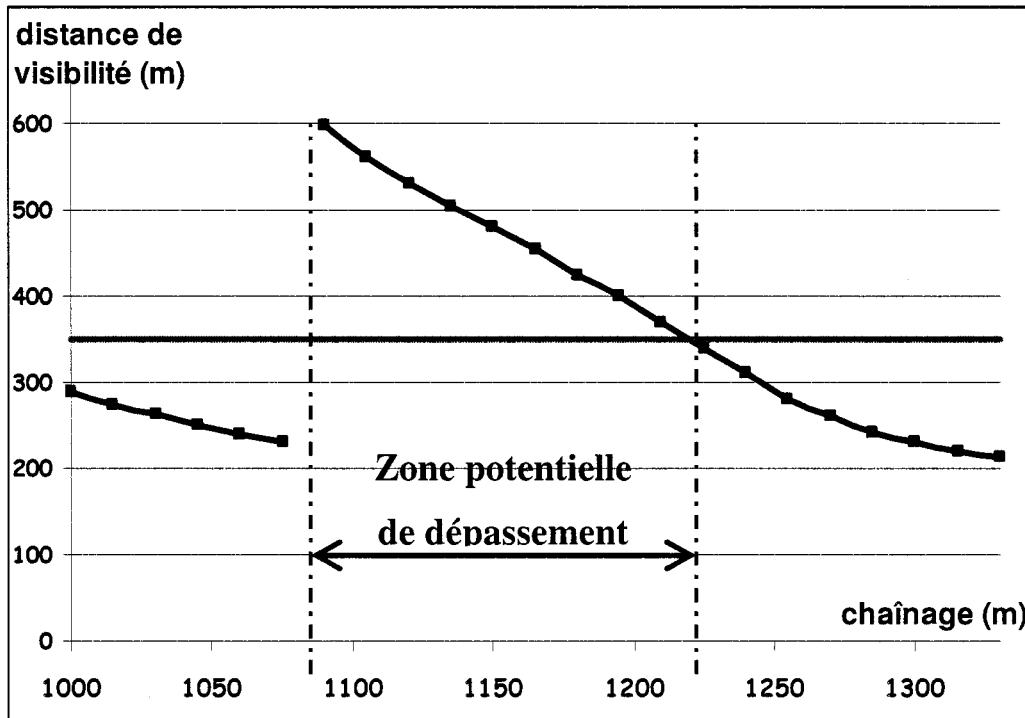


Figure 6-13 Courbe de visibilité utilisée dans l'exemple

(La courbe horizontale représente la distance de visibilité minimale de 350 m)

Tableau 6-1 Tableau de distance de visibilité associé à la Figure 6-13

(La distance de visibilité minimale est supposée être de 350 m ; la visibilité est dite suffisante (« oui ») si elle est supérieure à 350m)

Chaînage	distance de visibilité	visibilité suffisante
1000	290	non
1015	275	non
1030	262	non
1045	251	non
1060	240	non
1075	230	non
1090	598	oui
1105	560	oui
1120	531	oui
1135	505	oui
1150	480	oui
1165	455	oui
1180	425	oui
1195	400	oui
1210	370	oui
1225	340	non
1240	310	non
1255	280	non
1270	260	non
1285	242	non
1300	231	non
1315	220	non
1330	212	non

Dans cet exemple, il existe une zone potentielle de dépassement où la visibilité est suffisante :

- le chaînage de début de zone est le chaînage pour lequel la visibilité devient suffisante, soit : $c_{deb}=1090$ m ;

- la fin de la zone se situe entre les chaînages 1210 et 1225, en appliquant des pondérations en fonction de la distance de visibilité, le chaînage de fin est : $c_{fin}=1220$ m ;
- la longueur de la zone est $L_{zone}=130$ m > $l_{min}=100$ m (Norme du Québec), cette zone est donc une zone de dépassement à envisager.

6.4 Localisation des zones de dépassement et espacement des points GPS

L'algorithme fournit la liste des zones potentielles de dépassement. Cependant, la localisation de ces zones se fait à partir de points GPS répartis de façon à peu près constante le long de la route. Ces points GPS sont donc des données discrètes et non continues.

Pour déterminer la visibilité entre deux points dont la visibilité est connue, l'algorithme calcule par linéarité. Ceci peut causer certains problèmes qui sont illustrés à l'aide de la Figure 6-15. Donc pour déterminer le point où la visibilité passe sous le seuil de la visibilité minimum, ce point est déterminé par linéarité entre le point précédent (dont la visibilité est supérieure au seuil) et le point suivant (dont la visibilité est inférieure au seuil). Le raisonnement par linéarité est alors précis, parce qu'alors la visibilité varie presque linéairement.

Pour déterminer le chaînage de début de zone de dépassement, comme indiqué en 6.3.3, nous avons choisi de prendre le premier point pour lequel la visibilité est supérieure au seuil. L'algorithme ne raisonne alors pas par linéarité. Nous avons fait ce choix pour des raisons de sécurité, car en effet en raisonnant par linéarité, le point qui aurait alors été déterminé comme début de zone ne présente pas une visibilité suffisante du fait que le profil de visibilité à cet endroit est concave. Mais dans les deux cas, le début de la zone n'est pas précis. Il dépend en effet du pas de mesure des points GPS. La précision obtenue est égale au pas du relevé GPS utilisé.

La précision du résultat dépendra donc du nombre de points GPS fournis. Ainsi, plus le pas entre deux points GPS est petit, plus la précision est bonne.

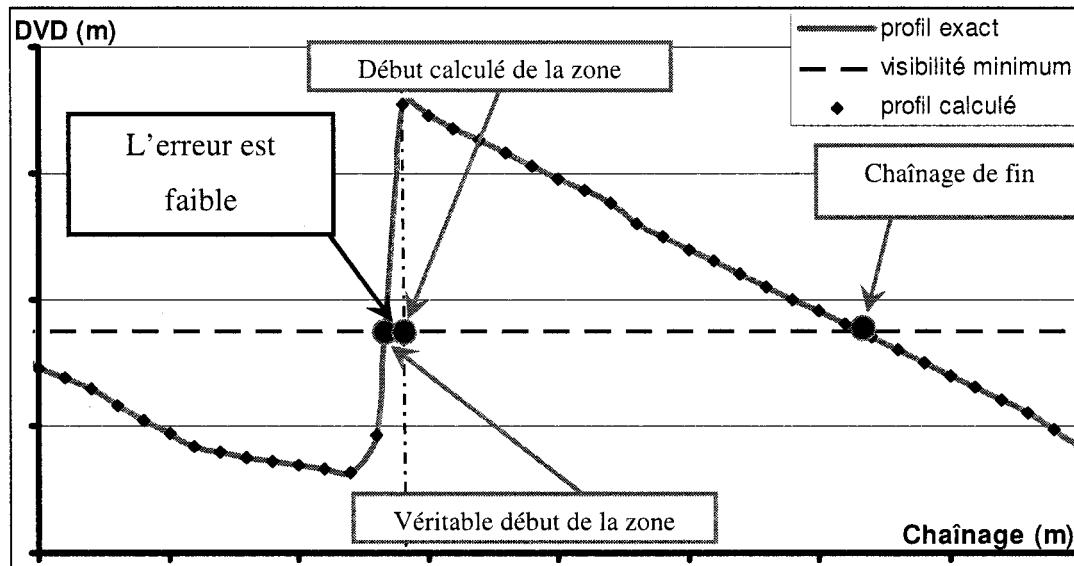


Figure 6-14 Utilisation d'un petit pas de relevé GPS

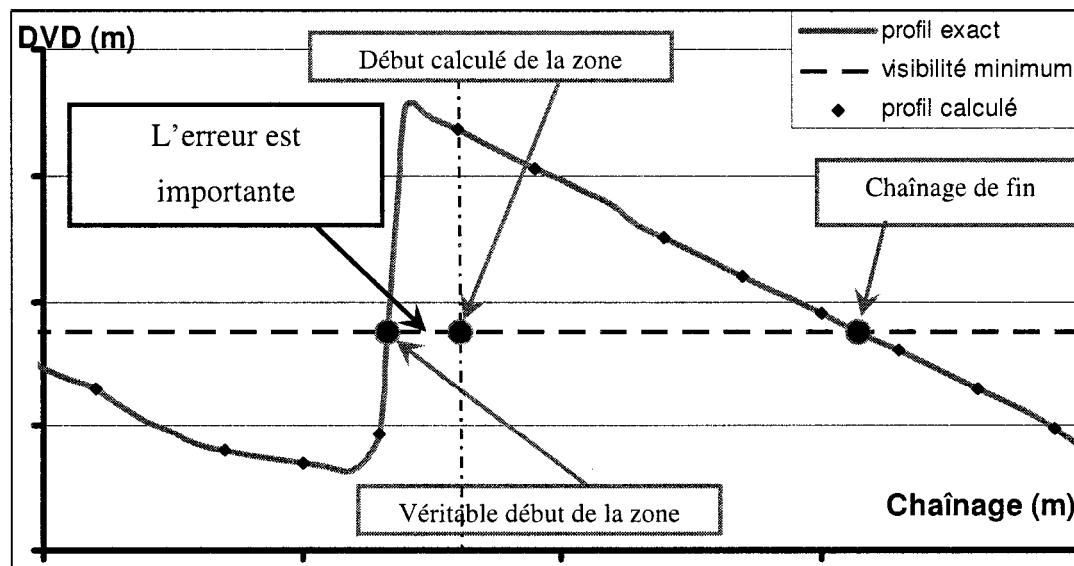


Figure 6-15 Utilisation d'un grand pas GPS

6.5 Code du programme

L'algorithme a été codé sous VBA (*Visual Basic for Application*) à partir du logiciel *Excel*®. Le programme est présenté en annexe B. Les données d'input sont rentrées dans une feuille de calcul Excel pour les listes et dans une boîte de dialogue VBA pour les données constantes. Les résultats (output) sont affichés dans des feuilles de calcul Excel (cf. CHAPITRE 10 Guide d'utilisation de la méthode).

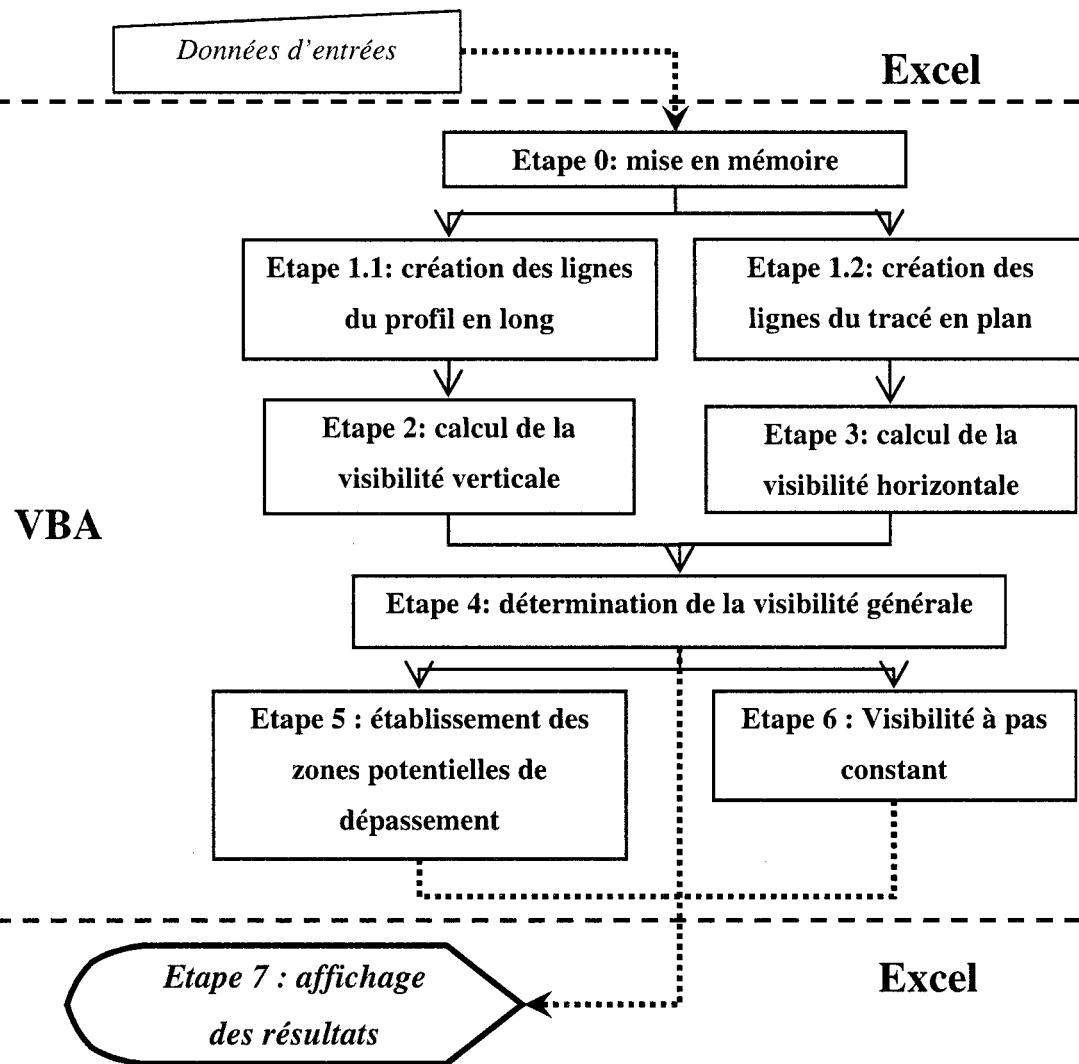


Figure 6-16 Schéma séquentiel des principales tâches du programme

CHAPITRE 7 Méthode de cueillette de données pour fins de validation

Afin de collecter les données nécessaires à la validation de l'algorithme présenté au chapitre précédent, il nous faut choisir une méthode de mesure pratique.

La meilleure méthode serait de relever la visibilité à partir des positions telles que définies dans la norme (cf. 1.5.2 La mesure de la distance de visibilité disponible). Cette méthode est appelée ici méthode idéale ou méthode selon la norme. Or si les positions verticales lors des mesures sont facilement adoptables, les positions horizontales sont plus contraignantes. Ainsi il est possible de conserver une hauteur des yeux proche de 1.05 m et une hauteur de cible proche de 1.15 m. Mais pour que l'observateur se place en milieu de voie de droite, et que la cible soit en milieu de voie de gauche, il serait nécessaire, pour des raisons de sécurité, de fermer la route à la circulation. Or le temps de fermeture de la route serait trop long pour être acceptable, il faut donc adopter une méthode qui permette à la circulation de continuer sans interruption.

La méthode habituellement pratiquée est celle représentée sur la figure suivante :

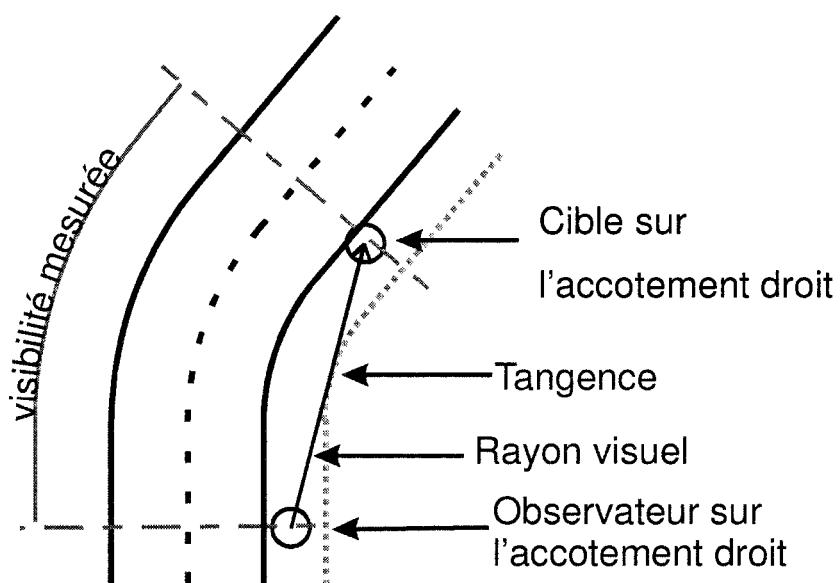


Figure 7-1 Schématisation de la méthode habituellement employée

Il s'agit donc dans cette méthode de placer observateur et cible sur le bord droit de la route. Mais comme nous l'avons montré dans la problématique (cf. CHAPITRE 3) et surtout par la Figure 3-1, cette méthode implique une erreur de mesure importante. Il faut donc établir une nouvelle méthode de mesure qui engendre une erreur moindre.

Comme il est impossible de se placer sur les voies de circulation (pour assurer la sécurité de l'équipe de mesure sans fermer la route à la circulation), nous allons utiliser les deux accotements. Ainsi nous allons relever la visibilité depuis un observateur placé sur bord droit de la route vers une cible située sur le même bord droit de la route, comme dans la méthode habituellement employée. Cette visibilité est appelée visibilité à droite. Mais nous allons également relever la visibilité entre l'observateur placé sur le bord droit de la route et une cible située sur le bord gauche. Cette visibilité est nommée visibilité à gauche.

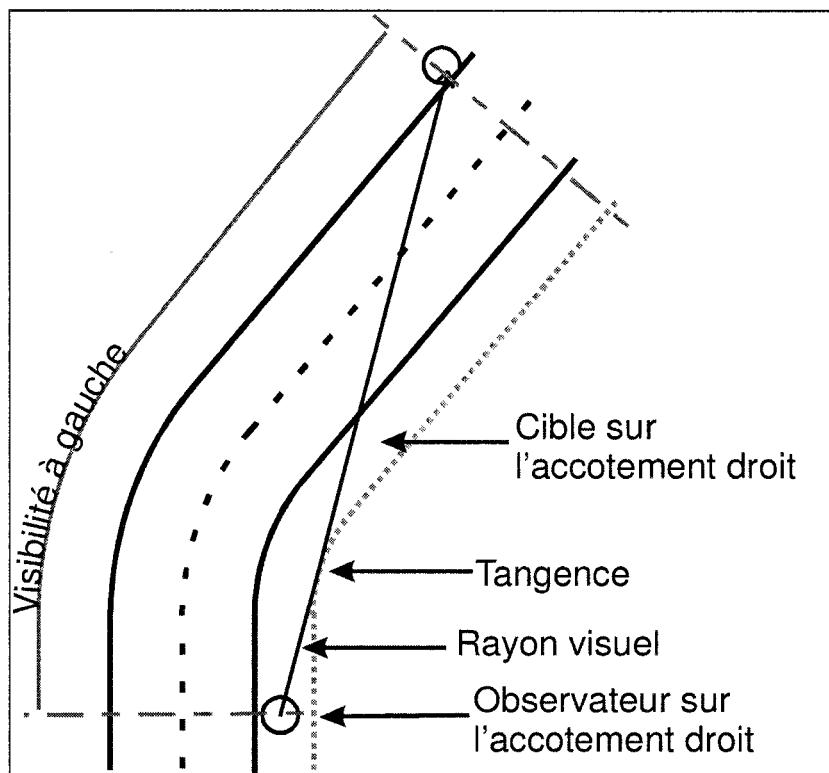


Figure 7-2 Positions horizontales pour le relevé de la visibilité à gauche

Nous allons ensuite combiner les deux visibilités obtenues pour retrouver la visibilité avec une cible placée en milieu de voie.

La méthode de mesure n'étant pas la méthode idéale, elle engendre des erreurs dans le relevé des mesures. Ces erreurs peuvent être d'ordre systématique ou aléatoire et proviennent des positions verticales ou horizontales de l'observateur, des cibles, ou des accotements. Nous allons étudier ces erreurs en nous servant d'exemples pour les caractériser.

7.1 Obtention de la visibilité

La méthode employée nous fournit la visibilité à droite (DVD_d), et la visibilité à gauche (DVD_g). En appliquant le théorème de Thalès à ces deux distances, nous retrouvons une approximation de la visibilité avec une cible en position idéale (en milieu de voie de gauche).

Les deux figures suivantes illustrent l'application du théorème de Thalès en virage à droite et en virage à gauche. Sur ces figures, les anneaux représentent les cibles à gauche ou à droite. L'étoile est la position idéale de la cible.

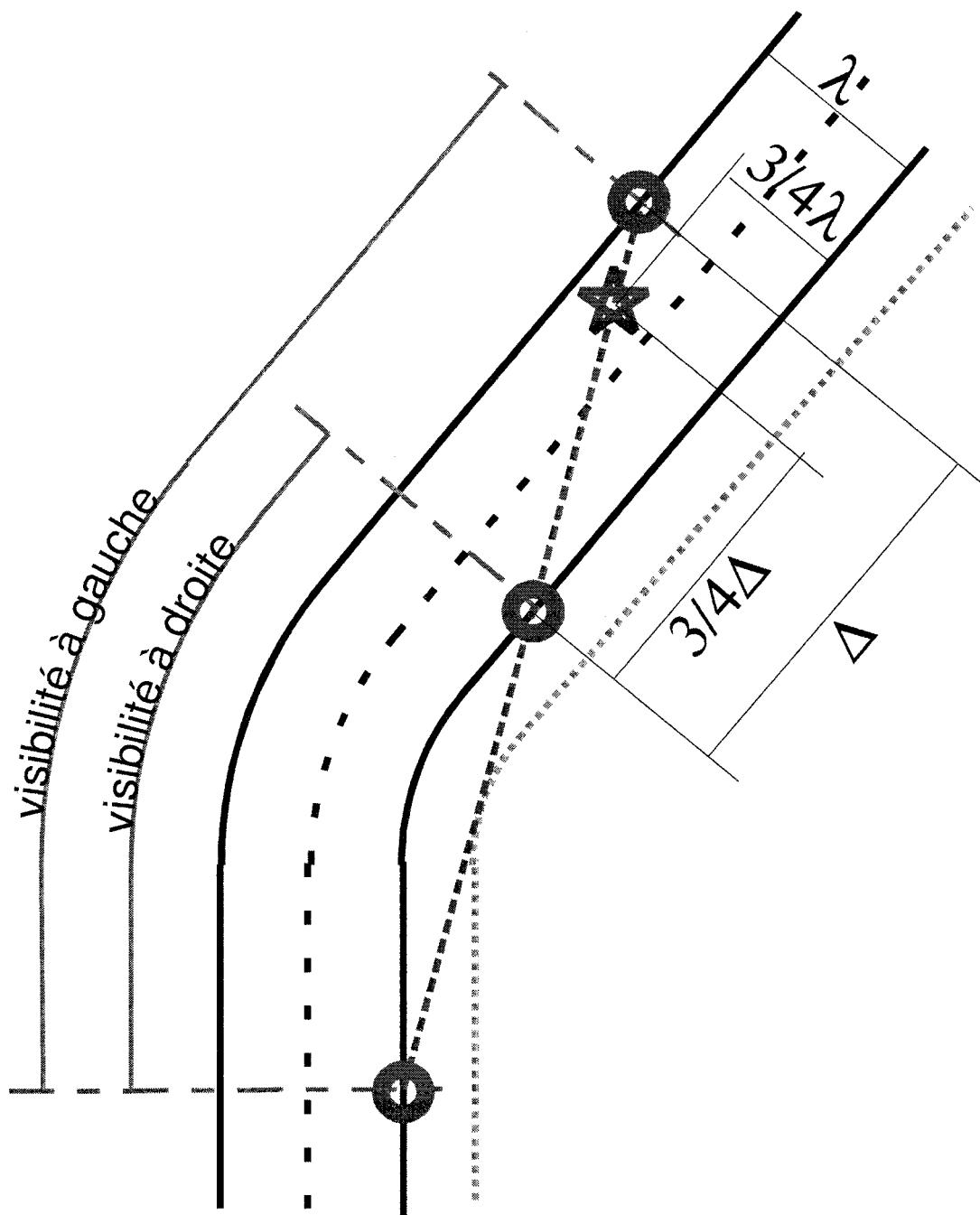


Figure 7-3 Thalès appliqué aux positions des cibles dans un virage à droite

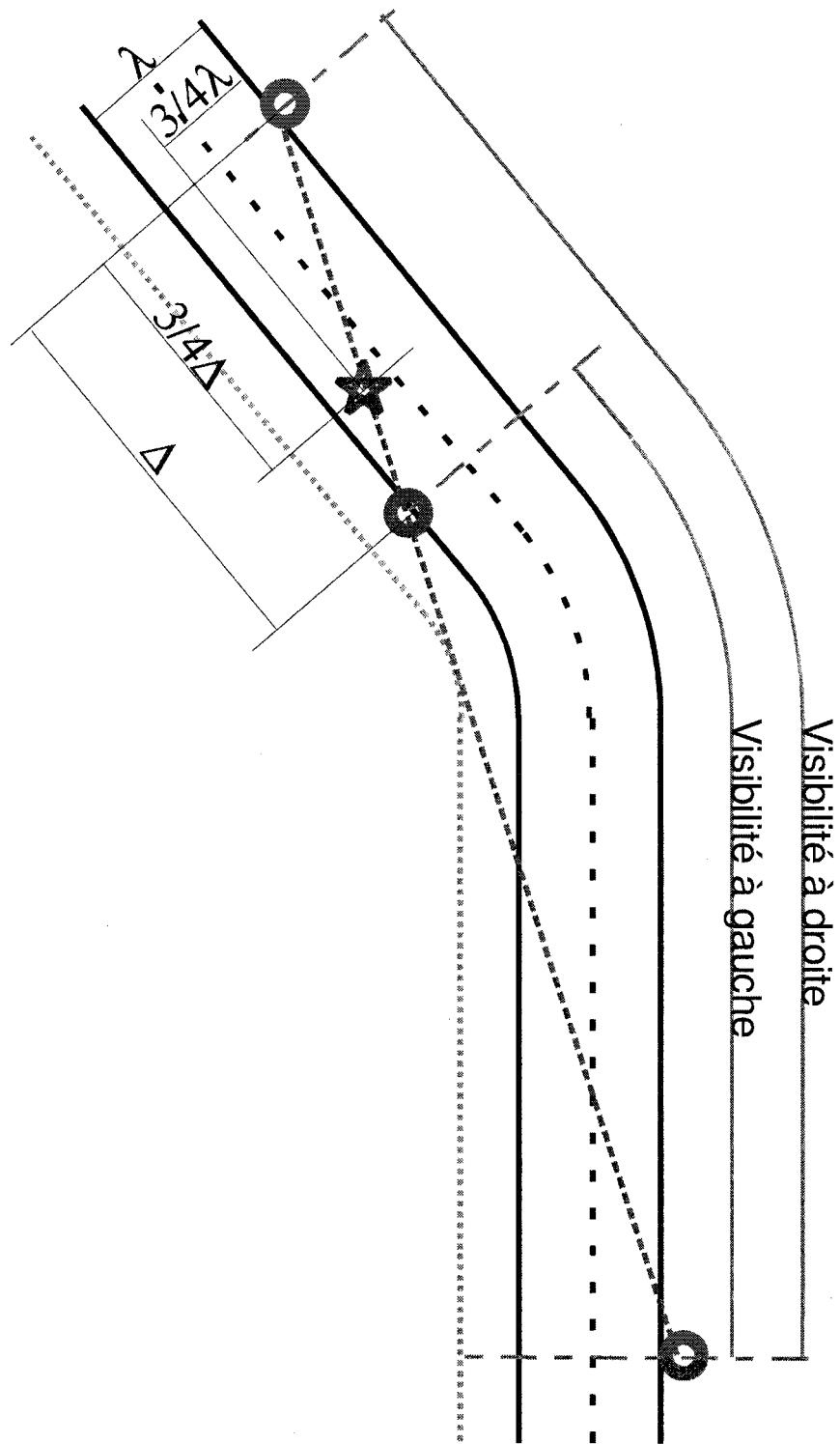


Figure 7-4 Thalès appliqué aux positions des cibles dans un virage à gauche

Ainsi la distance de visibilité est alors obtenue par la formule suivante :

$$DVD_{ci} = \frac{3}{4}DVD_g + \frac{1}{4}DVD_d$$

Remarque :

La combinaison de la visibilité à droite et de la visibilité à gauche par Thalès, fournit une distance linéaire (et non curviligne) entre la cible à droite et la cible à gauche quand une des deux cibles au moins est dans un virage. Ceci est une approximation suffisante de la distance curviligne, car alors la distance qui sépare les deux cibles est faible.

Quand les deux cibles sont sur une ligne droite, la visibilité obtenue est exacte.

7.2 Les erreurs de mesure

7.2.1 Erreur systématique

En comparaison à la méthode dite « idéale » (c'est-à-dire celle issue de la norme), la méthode détaillée plus haut génère un décalage dans les positions : l'observateur est décalé transversalement du milieu de la voie de droite vers l'accotement.

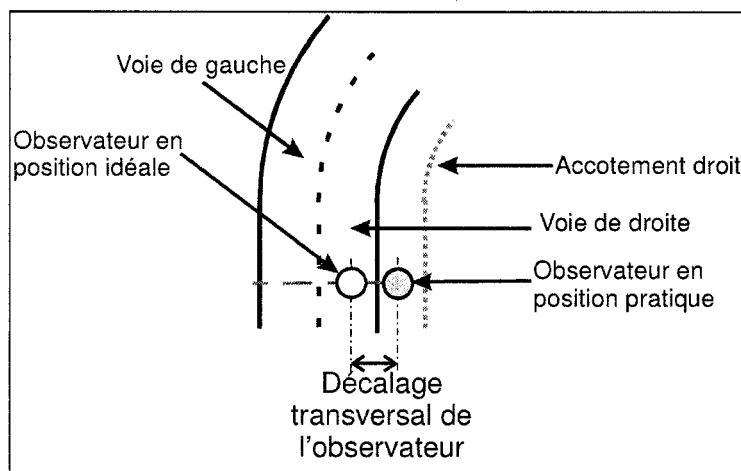


Figure 7-5 Écart de position de l'observateur

Ce décalage génère une erreur dans le relevé de la distance de visibilité de dépassement pour les segments qui comportent une courbure horizontale. Cette erreur dépend alors du sens de courbure de la route : la distance mesurée est inférieure à la distance « idéale » dans le cas des virages à droite, mais est supérieure dans les virages à gauche. Dans le cas des segments rectilignes, aucune différence de mesure entre la méthode pratique et la méthode idéale n'est engendrée. Les trois schémas suivants mettent en relief ces deux cas :

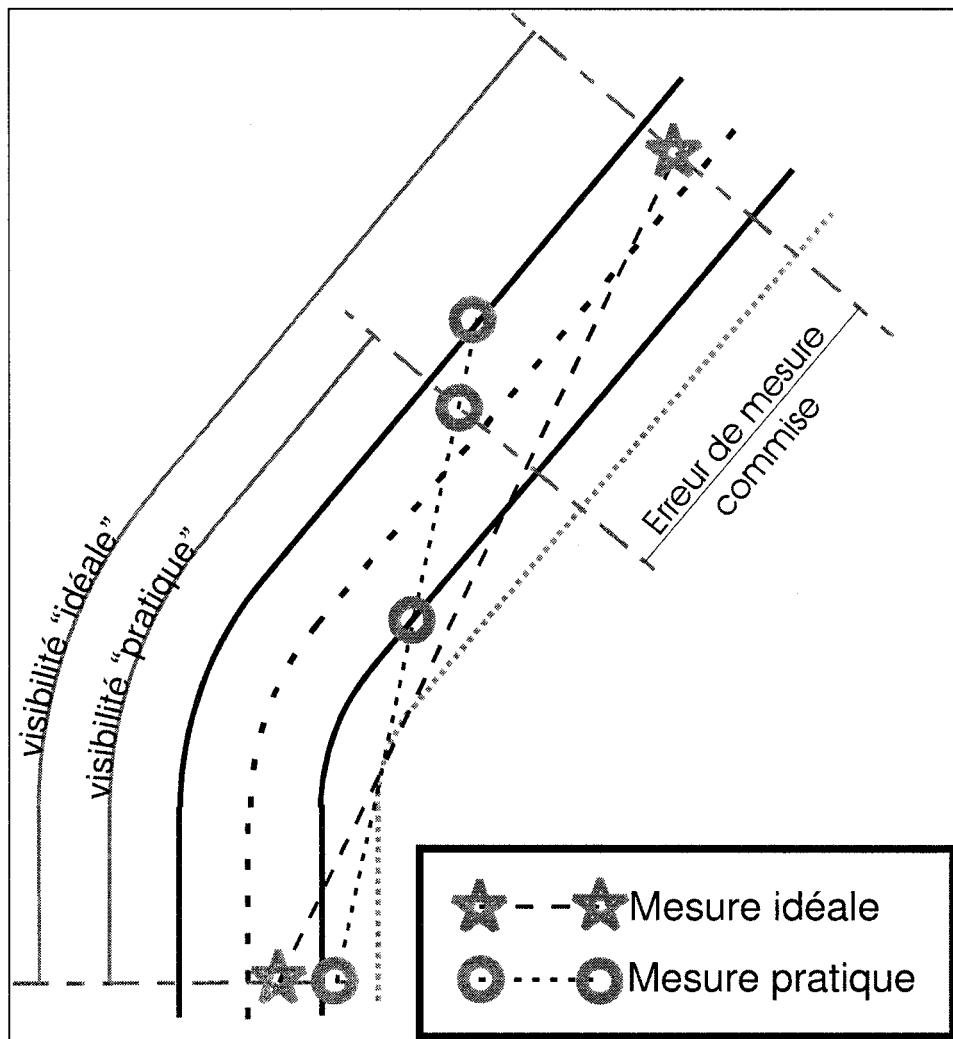


Figure 7-6 Erreurs de mesure impliquées par le protocole dans le cas d'un virage à droite

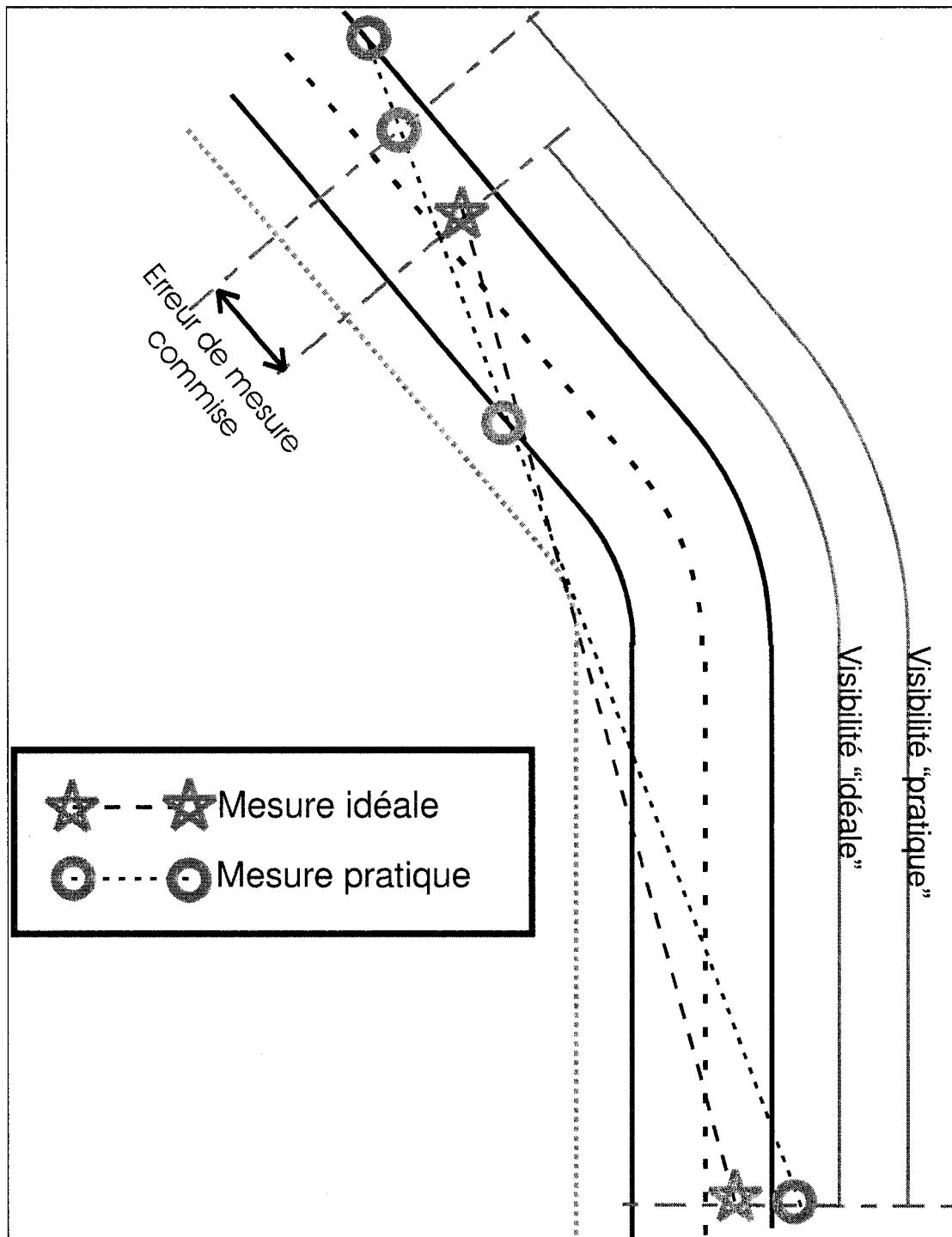


Figure 7-7 Erreurs de mesure impliquées par le protocole dans le cas d'un virage à gauche

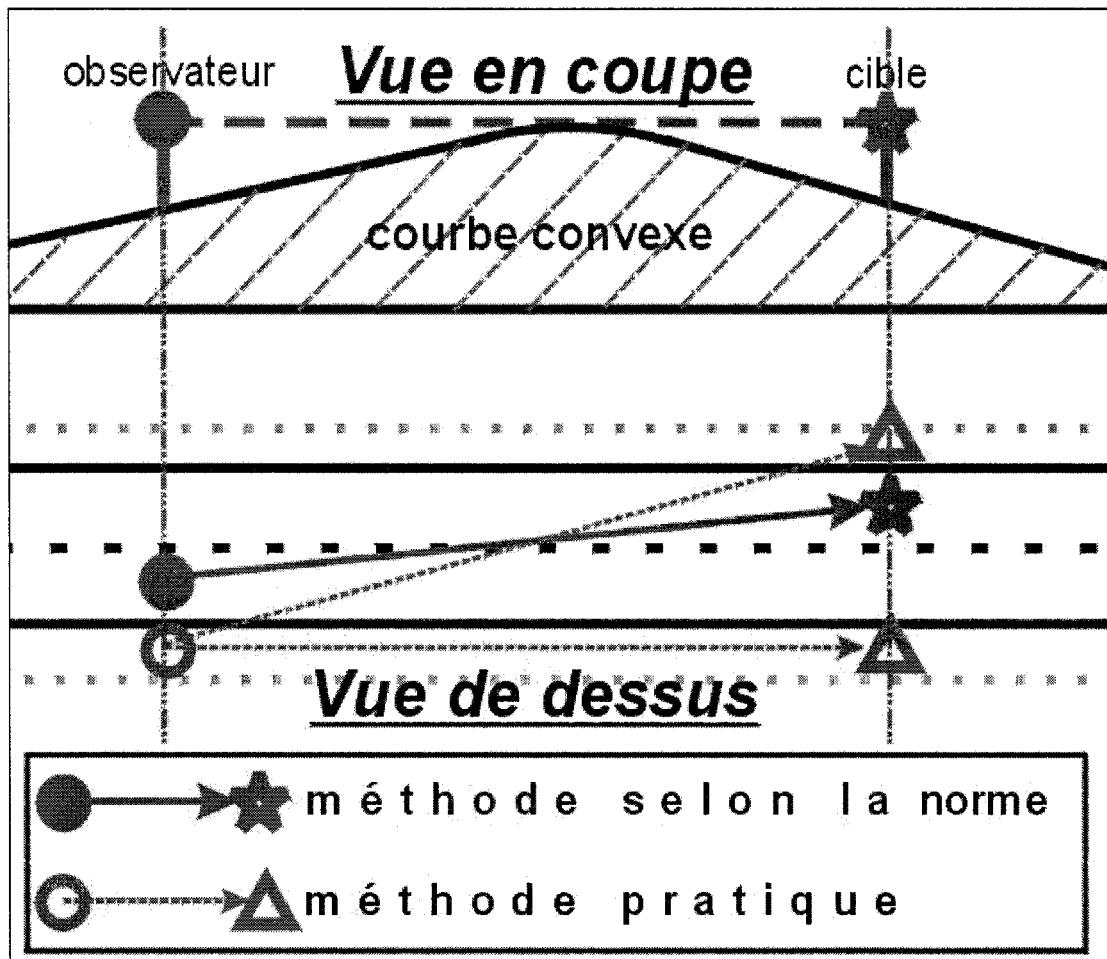


Figure 7-8 Segment rectiligne

7.2.1.1 Caractérisation de l'erreur

Pour caractériser l'erreur, nous allons calculer la distance de visibilité dans différents alignements simplifiés, pour les deux positions de l'observateur (en milieu de voie ou en bord de voie). Ces alignements consistent en la succession d'une ligne droite, d'un arc de cercle de rayon R , suivi d'une seconde ligne droite.

Ceci est donc une simplification de la réalité car nous ne prenons pas en compte les transitions entre arcs de cercle et droites. Nous ne considérons pas non plus la succession de plusieurs virages (courbe en S, ou plusieurs virages qui se suivent mais qui sont

séparés par de courtes tangentes) car il s'agit ici d'obtenir une idée sur l'ordre de grandeur de l'erreur que l'on commet.

Les calculs utilisés sont ceux présentés en annexe A. Les calculs ont été menés pour 11 virages de rayon différent (100, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000 et 5000 mètres), dans les deux sens (virage à droite et virage à gauche). Nous avons considéré des largeurs de voie de 3,5 m, des largeurs d'accotement de 3 m. Le virage commence au chaînage 1+000 et se termine au chaînage 1+600. Il est nécessaire de différencier virage à droite et virage à gauche.

7.2.1.1.1 Virage à droite

Pour chacun des 11 virages à droite, nous avons obtenu la visibilité idéale et la visibilité avec la méthode pratique. Pour ces 11 virages, l'allure des profils de visibilité est identique. La figure suivante propose les profils de visibilité pour R=2000m en virage à droite :

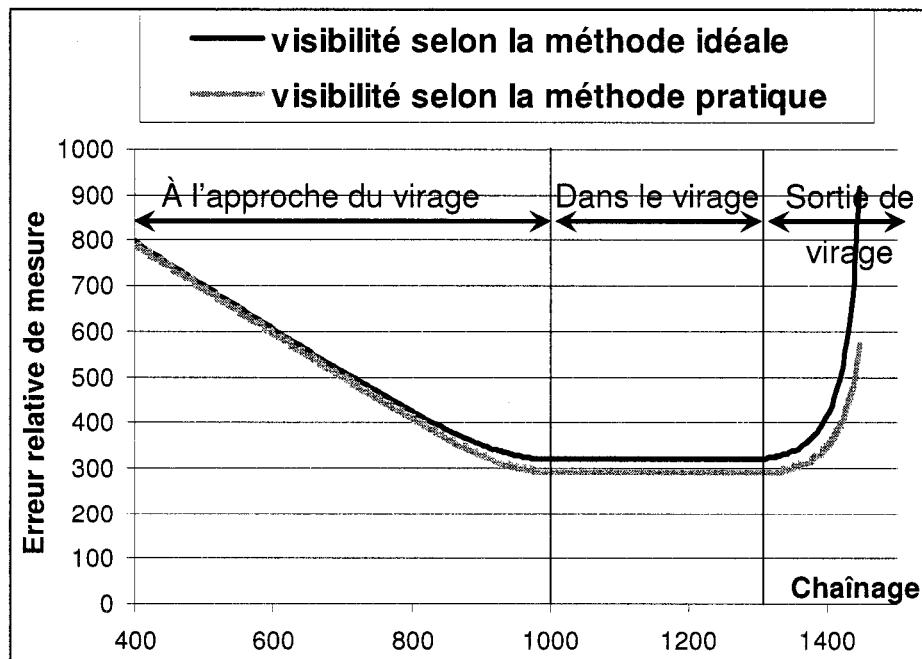


Figure 7-9 Profils de visibilité de la méthode idéale et de la méthode pratique dans un virage à droite de rayon R=2000m

La visibilité mesurée par la méthode idéale est supérieure à la visibilité mesurée par la méthode pratique. Il existe donc une erreur entre ces deux profils. Cette erreur est la différence des deux visibilités pour chaque chaînage. Nous avons calculé l'erreur relative de mesure, c'est-à-dire la part de l'erreur sur la visibilité idéale. Pour les 11 virages étudiés, les courbes de l'erreur suivent la même allure. Sur le graphique suivant, la courbe de l'erreur relative pour le virage de rayon $R=2000$ m est représentée :

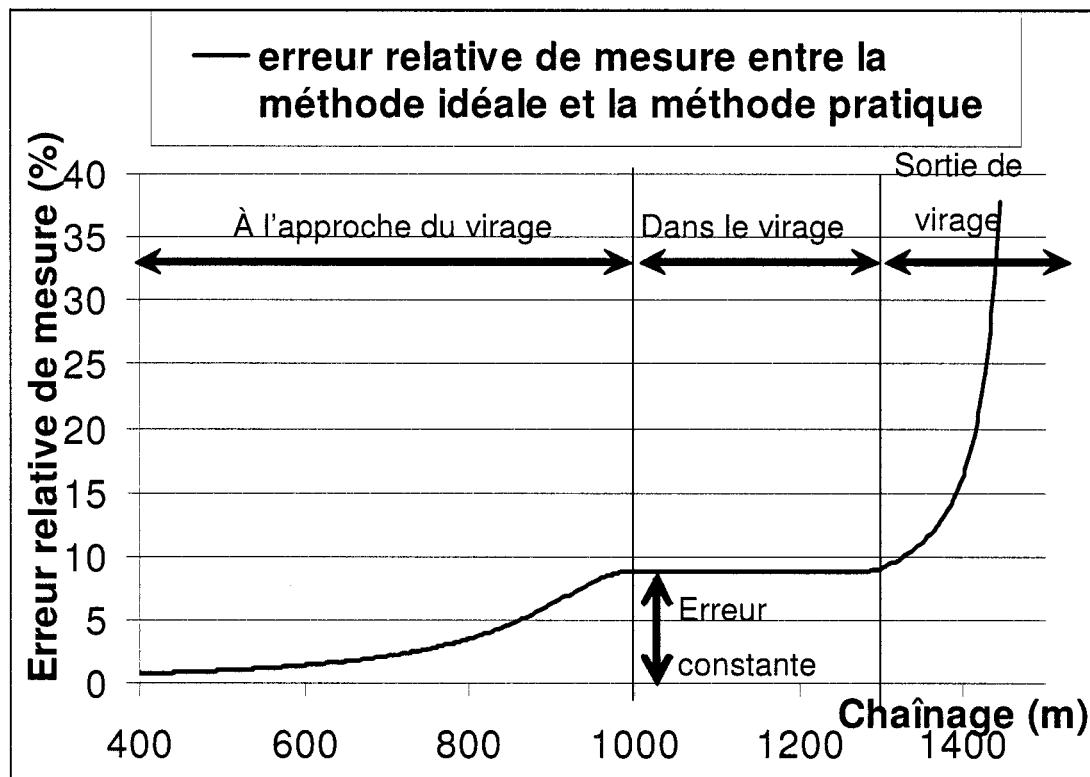


Figure 7-10 Courbe de l'erreur relative entre la méthode idéale et la méthode pratique pour un virage à droite de rayon $R=2000$ m

Sur cette courbe, on peut constater trois phases de progression de l'erreur qui sont présentes quel que soit le rayon de courbure du virage:

1. à l'approche du virage, l'erreur relative augmente lentement mais reste inférieur à 9% ;
2. dans le virage, l'erreur relative est constante et vaut 8.9%, c'est-à-dire que la distance relevé par la méthode pratique est inférieur de 8.9% à la distance relevé par la méthode idéale. Ce qui donne :

$$\text{Distance de visibilité idéale} = 1.096 * \text{Distance de visibilité pratique}$$

3. en sortie de virage : l'erreur relative augmente rapidement jusqu'à ce que les rayons visuels issus des observateurs soient parallèles à l'accotement. Cette portion du virage est courte (inférieur à une centaine de mètres). Les profils de visibilité pour les deux positions de l'observateur y suivent la même tendance, mais avec un écart de chaînage d'une dizaine de mètres.

7.2.1.1.2 Virages à gauche

Pour chacun des 11 virages à gauche, nous avons obtenu la visibilité idéale et la visibilité avec la méthode pratique. Pour ces 11 virages, l'allure des profils de visibilité est identique. La figure suivante propose les profils de visibilité pour R=2000m en virage à gauche :

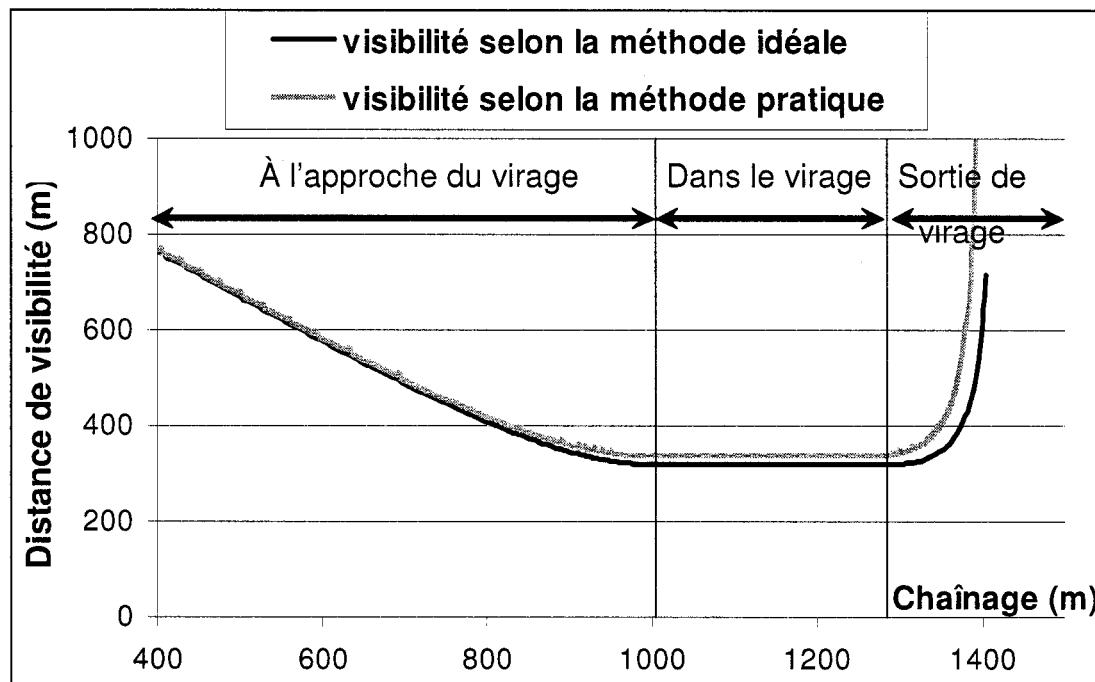


Figure 7-11 Profils de visibilité de la méthode idéale et de la méthode pratique dans un virage à gauche de rayon $R=2000\text{m}$

La visibilité mesurée par la méthode idéale est inférieure à la visibilité mesurée par la méthode pratique. Nous avons calculé l'erreur relative de mesure, c'est-à-dire la part de l'erreur sur la visibilité idéale. Pour les 11 virages étudiés, les courbes de l'erreur suivent la même allure. Sur le graphique suivant, la courbe de l'erreur relative pour le virage de rayon $R=2000\text{ m}$ est représentée :

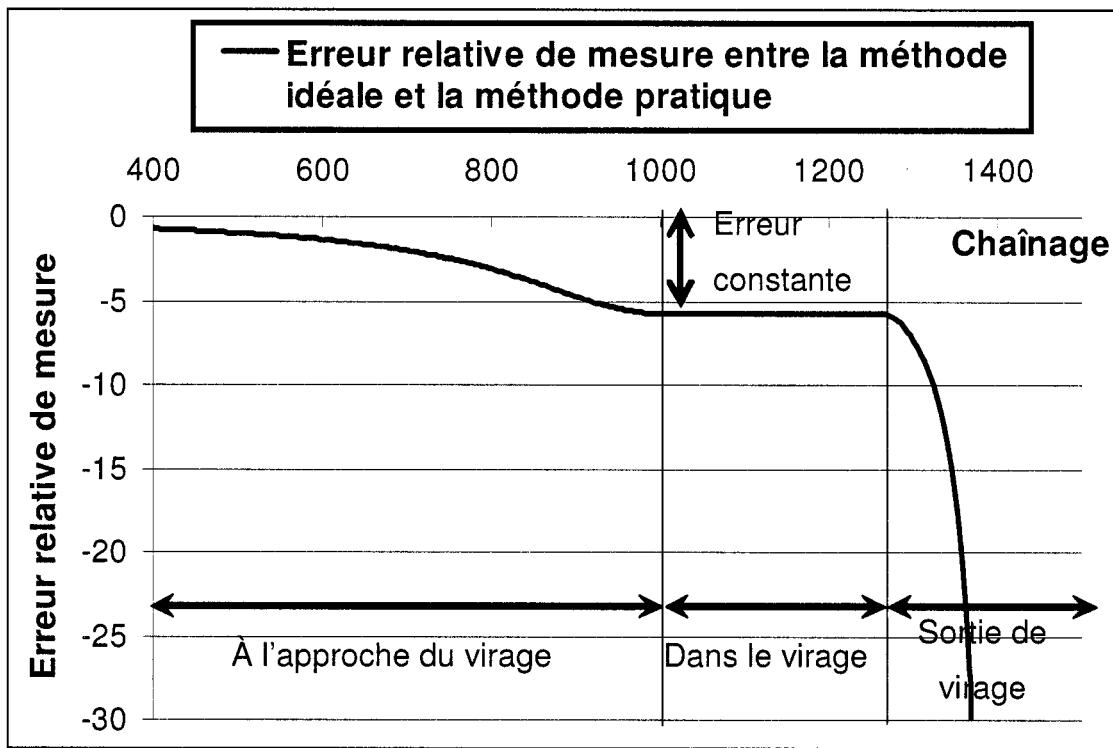


Figure 7-12 Courbe de l'erreur relative entre la méthode idéale et la méthode pratique pour un virage à gauche de rayon $R=2000\text{m}$

Sur cette courbe, comme pour le virage à droite, on peut constater trois phases de progression de l'erreur qui sont présentes quel que soit le rayon de courbure du virage:

1. à l'approche du virage, l'erreur relative augmente lentement mais reste inférieur en valeur absolue à 6% ;
2. dans le virage, l'erreur relative est constante et vaut -5.8% ;
3. en sortie de virage : l'erreur relative augmente rapidement en valeur absolue jusqu'à ce que les rayons visuels issus des observateurs soient parallèles à l'accotement. Cette portion du virage est courte (inférieur à une centaine de mètre). Les deux profils de visibilité y suivent la même tendance, mais avec un écart de chaînage d'une dizaine de mètre.

Bien que l'erreur due à l'écart de position de l'observateur soit systématique, il n'est pas possible de la corriger en pratique. En effet nous ne l'avons calculé que pour un alignement simple, sans prendre en compte d'autres possibles obstacles à la visibilité après le virage.

7.2.2 Les erreurs ponctuelles ou aléatoires de mesure

Ces erreurs ne sont pas systématiques et peu (ou pas) prévisibles. Leur correction n'est donc pas faisable, mais il est possible pour certaines de les caractériser pour obtenir un ordre d'idée de leurs influences sur la valeur de la distance de visibilité relevée.

Il existe deux principales sources d'erreurs aléatoires. Une dans le cas du relevé de la distance de visibilité dans les courbes horizontales, et l'autre dans le cas des courbes verticales. N'apparaissant pas sous les mêmes conditions géométriques, ces deux erreurs ne peuvent pas se cumuler.

7.2.2.1 Courbes horizontales

La première source d'erreurs est le choix du bord extérieur de l'accotement comme ligne d'obstruction. Pour simplifier les mesures, et pour permettre une vérification plus simple des résultats obtenus par les algorithmes, nous avons considéré que les accotements faisaient continuellement 3 mètres de large. Cependant, ce n'était pas toujours le cas sur le terrain, et l'observateur devait considérer une ligne fictive comme bord de l'accotement. Il a donc été difficile de conserver une valeur exacte de 3 mètres pour largeur de l'accotement, mais la largeur de l'accotement utilisée oscillait entre 2,50 mètres et 3,50 mètres.

Nous avons donc étudié l'influence de ces erreurs dans les virages. Pour cela, nous avons utilisé les calculs présentés en annexe A. En prenant comme référence de largeur d'accotement une valeur de 3 mètres, nous avons calculé l'erreur relative commise (erreur absolue / valeur référence de la distance de visibilité) pour 4 valeurs de l'écart de largeur de l'accotement (0.5, 1, -1 et -0.5 mètre; un accotement de largeur de x mètres implique un écart de $(x-3)$ mètres). Les résultats obtenus sont identiques pour les 11

rayons de courbures, et pour les deux sens de courbure (à droite ou à gauche). Le graphique représenté à la Figure 7-13 expose les résultats : pour un écart de largeur inférieur à 0,5 mètre (en valeur supérieur ou inférieur), l'erreur relative de mesure commise est inférieur à 4% en valeur absolue. Pour un écart entre 0,5 et 1 mètre, l'erreur relative est comprise entre 4 et 8%.

Pour le cas qui nous intéresse ici, c'est-à-dire une erreur dans la perception du bord de l'accotement d'au plus 50 centimètres, l'erreur commise reste donc inférieur à 4% de la distance de visibilité pour un accotement de 3 mètres.

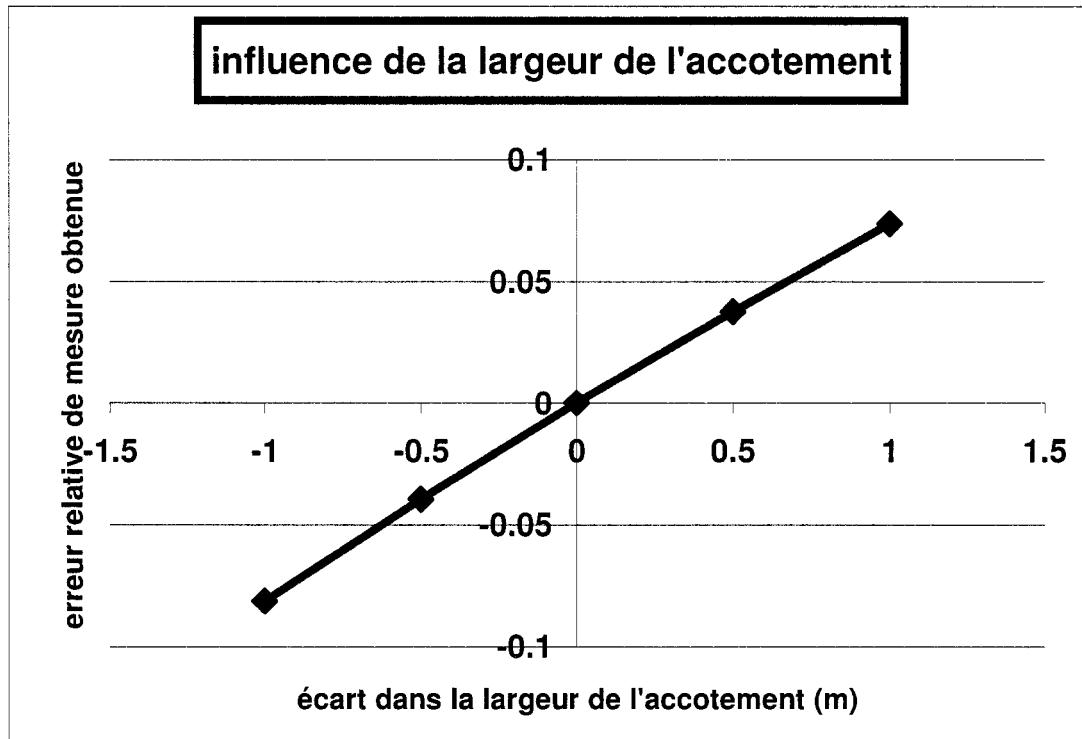


Figure 7-13 Influence de la largeur de l'accotement dans la mesure pratique des distances de visibilité

7.2.2.2 Courbes verticales

Dans les courbes verticales, la hauteur des yeux et des cibles est un paramètre important. S'il est facile d'assurer une hauteur des cibles constantes, il n'en n'est pas de même pour la hauteur des yeux. En effet bien que les différents observateurs aient fourni des efforts pour conserver une hauteur des yeux à 1,05 mètres, cette hauteur n'est pas assurée, ce qui peut entraîner des erreurs.

En utilisant les raisonnements mathématiques de la visibilité dans les courbes verticales convexes du cours CIV4602 de Conception des routes (Baass, 2003), nous avons caractérisé l'allure de l'erreur relative dans la mesure de la distance de visibilité le long d'une courbe verticale convexe. En considérant différentes courbes (c'est-à-dire différentes pentes avant et après le sommet), et en calculant la distance de visibilité pour différentes valeurs de la hauteur des yeux (0,95 m, 1,00 m, 1,05 m, 1,10 m, 1,15 m et 1,20 m), nous avons calculé l'erreur commise entre les distances obtenues à partir d'une hauteur des yeux différente de 1,05 mètres et la distance de référence (pour une hauteur d'yeux de 1,05 mètres). L'allure de la valeur absolue de l'erreur relative commise est identique pour les hauteurs étudiées (0,95 , 1,00 , 1,10 , 1,15 , 1,20) et est représentée sur la figure suivante :

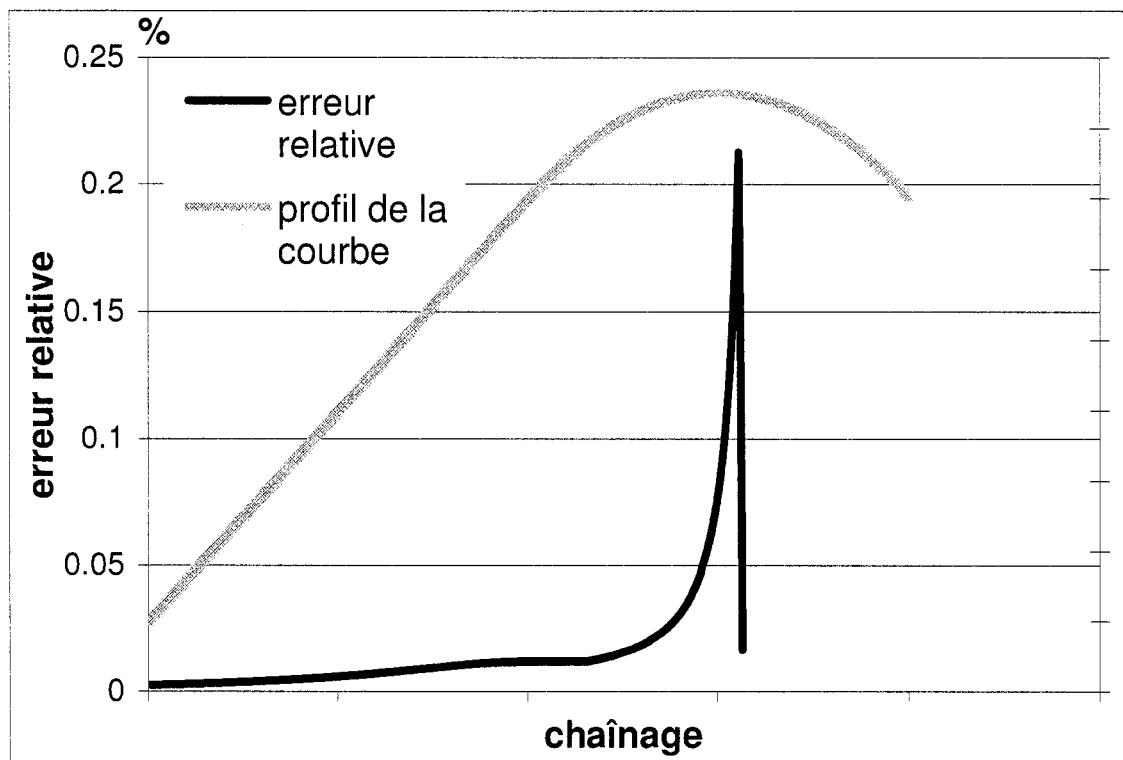


Figure 7-14 Allure de l'erreur relative de mesure pour une hauteur des yeux différente de 1,05 mètres

Sur cette courbe, on peut remarquer que l'erreur relative reste inférieure à 5% sur la montée de la courbe mais grimpe rapidement à plus de 25% au sommet de la courbe. La distance pour laquelle l'erreur est supérieure à 5% est de 20 mètres pour une erreur de 5 cm (hauteur des yeux à 1.00 ou 1.10 mètre), de 40 mètres pour une erreur de 10 cm et de 60 mètres pour une erreur de 15 cm.

Comme il est raisonnable de supposer que la différence de hauteur des yeux reste inférieure à 10 cm, des erreurs relatives de plus de 5% ne devraient se produire que pour au plus deux positions de mesure successives sur le sommet des crêtes (car le pas d'avancement est de plus de 20 mètres), ce qui n'est pas préjudiciable pour les mesures. Une erreur relative possible de moins de 5% est à considérer dans le cas des courbes verticales convexes en dehors des sommets (c'est-à-dire sur les pentes ascendantes).

7.2.3 Autres sources d'erreurs aléatoires

Lors des campagnes de terrain, nous avons pris conscience que d'autres erreurs aléatoires sont susceptibles d'apparaître. Ainsi, si nous avons déjà évoqué la hauteur des yeux de l'observateur, la perception de la hauteur de la cible peut être une source d'erreur. En effet, les cibles que nous avons utilisées étaient de simples panneaux, fixés sur un poteau. Une bande autocollante indiquait la hauteur convenable de 1,15 mètres. Cependant, à partir d'une certaine distance entre cibles et observateur, celui-ci ne pouvait pas distinguer correctement le trait. Il « visait » plutôt une large bande de plusieurs centimètres d'épaisseur. La hauteur prise en compte pouvait alors varier d'une dizaine de centimètre autour de 1.15 mètres, selon les conditions. L'erreur induite peut alors représenter une erreur de mesure de plus de 10 mètres pour des distances de visibilité importante (supérieur à 300 ou 400 mètres selon les conditions).

De plus, la méthode préconise de placer l'observateur et les cibles sur les lignes de bord de la chaussée. Cependant il peut y avoir un décalage de quelques dizaines de centimètres entre la position souhaitée et la position effectivement pratiquée.

Enfin, les conditions météorologiques (mauvaise visibilité), le débit de circulation (problème de sécurité au bord des voies de circulation), la qualité des instruments de mesure (précision), ou la qualité des routes (largeur non constante, présence d'ornières ou de roulières) ont également pu engendrer quelques erreurs, mais de manière plus ponctuelle.

7.3 Remarques sur les données obtenues par la méthode pratique et leurs utilisations ultérieures pour validation de l'algorithme

L'objectif de développer une nouvelle méthode pratique était d'obtenir des sections de route le long desquelles la visibilité exacte est connue. Ces sections « étalons » vont ensuite permettre la validation de l'algorithme présenté au chapitre 6.

Cependant, la méthode pratique proposée ne permet pas d'obtenir les profils exacts de visibilité. Comme nous l'avons vu plus haut, les erreurs dues à la position écartée de

l'observateur et les erreurs aléatoires de mesure entraînent des différences relatives qui peuvent atteindre 15% dans certains cas (position de l'observateur associée à une mauvaise considération de l'accotement dans les virages à droite), mais ne peuvent être corrigées.

La méthode de mesure fournit pourtant l'allure exacte et les bonnes variations des profils de visibilité. Lors de la validation, il faudra tenir compte de ces faits, et considérer selon les cas, que la visibilité exacte dépend des conditions. Ainsi dans un virage à gauche où la visibilité est limitée essentiellement par ce virage, la visibilité exacte est inférieure d'environ 5% à la visibilité mesurée, et dans un virage à droite, la visibilité exacte est supérieure d'environ 10% à celle mesurée (en ne considérant que l'écart de position de l'observateur). Si on tient compte de la position de l'accotement, l'erreur acceptable en virage à droite peut atteindre 15% et 10% en virage à gauche.

Ainsi dans l'exemple du profil de la figure suivante, visibilité exacte et visibilité mesurée sont représentées. L'alignement de la route consiste en deux courbes horizontales :

- La première est un virage à droite de 550 mètres de rayon du chaînage 2+500 au chaînage 3+100;
- La seconde, un virage à gauche de 550 mètres de rayon, du chaînage 3+350 au chaînage 3+950.

En utilisant les calculs théoriques, la visibilité exacte dans les deux virages est identique et vaut environ $7.1\sqrt{R}$ soit 167 mètres. Or, lors des mesures dans un virage à gauche, l'erreur de mesure est de près de 6%, donc la visibilité mesurée est de 157 mètres, et dans le virage à droite la visibilité est supérieure de 9%, soit 183 mètres.

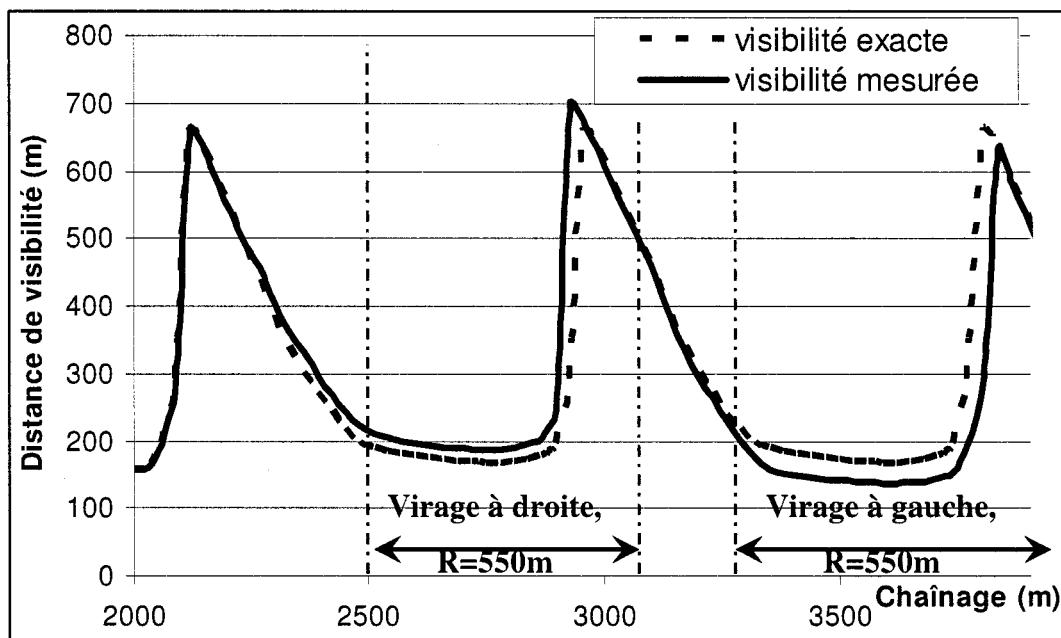


Figure 7-15 Différence entre visibilité mesurée et visibilité exacte

CHAPITRE 8 Choix des sites

Le choix des sites sur lesquels les visibilités sont mesurées s'est fait en collaboration avec les 3 Divisions Territoriales (DT) du Ministère des Transport qui ont collaboré avec nous pour le projet. Ces trois DT appartiennent à la Direction Générale de l'Ouest. Il s'agit de la DT de l' Abitibi-Temiscamingue-Nord-du-Québec (à Rouyn-Noranda), de la DT de Laurentides-Lanaudière (Saint-Jérôme) et de la DT de l'Estrie (à Sherbrooke). La liste et les coordonnées des personnes ressources de chacune des 3 DT sont fournies en annexe C.

Le choix des sites répond à trois impératifs : un impératif de représentativité des routes sélectionnées, un impératif de faisabilité des mesures sur ces sites et un impératif de significativité des routes sélectionnées :

- concernant la représentativité, les sites doivent représenter au mieux la diversité des routes au Québec. C'est-à-dire que ces sites proposent des alignements différents mais distinctifs d'un type de route : en plaine (majorité de courbes horizontales), vallonnée (majorité de courbes verticales) ou montagneuse (combinaison de courbes verticales et horizontales) ;
- Pour ce qui a trait à la faisabilité des mesures sur les sites, les routes devraient répondre à différents critères. Le premier critère est la sécurité des participants aux mesures. Pour cela, nous avons dû choisir des routes avec un débit de circulation peu élevé (excepté aux heures de pointe du matin et du soir). Le second critère est la géométrie transversale de la route. En effet, nous avons choisi des routes à deux voies dont les largeurs des voies et des accotements sont identiques le long d'une même route. Il fallait également que les accotements soient suffisamment larges et solides pour y supporter la circulation des véhicules de mesure ;

- Quant à la significativité des routes sélectionnées, il s'agissait d'obtenir des profils de visibilité qui permettent une comparaison la meilleure possible entre le profil obtenu par l'algorithme et celui obtenu par les mesures. Or ces comparaisons se font essentiellement sur les variations de la visibilité, c'est-à-dire la succession des pics et des creux du profil de visibilité (cf. 1.3.3 La distance de visibilité disponible). Nous avons donc choisi des sites qui offrent d'importantes variations de la visibilité sur de courtes distances.

De ces considérations, nous avons sélectionné 4 routes dont la vitesse affichée est de 90 km/h :

- Route 101 en Abitibi;
- Route 329 dans les Laurentides;
- Route 147 dans les Cantons de l'Est;
- Route 222 dans les Cantons de l'Est.

8.1 Route 101, Abitibi-Témiscamingue

Cette portion est située entre les villes de Rouyn-Noranda et La Sarre dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (DT de l'Abitibi Témiscamingue Nord du Québec basée à Rouyn Noranda) sur 9 km, et correspond à la section 101-04-033-000C en code RTS (c'est-à-dire Route-Tronçon-Section, code utilisé pour l'appellation du réseau routier au Québec. Cf. « Guide de la codification et du mesurage du réseau routier » (Ministère des Transports, 2002)).

Cette route présente de longues courbes horizontales de grand rayon. Son profil est composé d'une succession de courtes courbes verticales. Elle correspond à une route de plaine. Profil et tracé en plan de la route 101 sont représentés sur les figures suivantes :

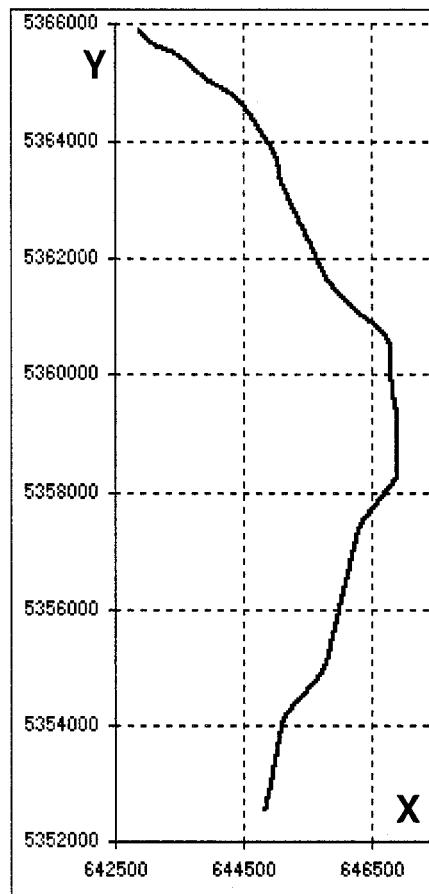


Figure 8-1 Tracé en plan de la route 101

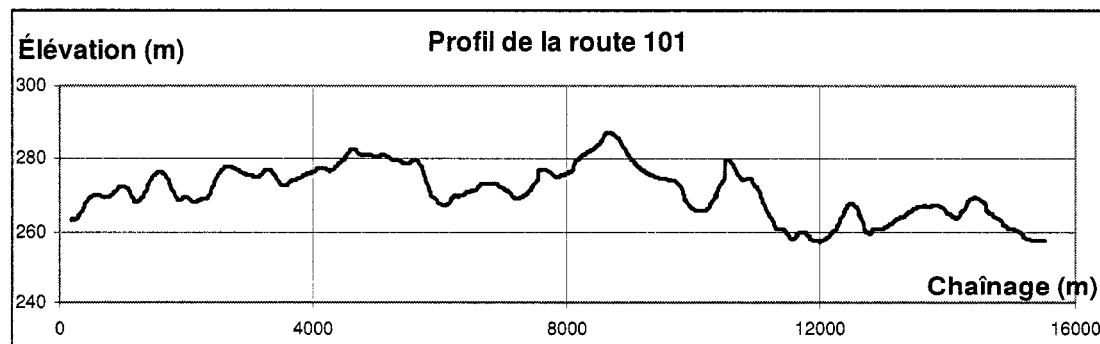


Figure 8-2 Profil en long de la route 101

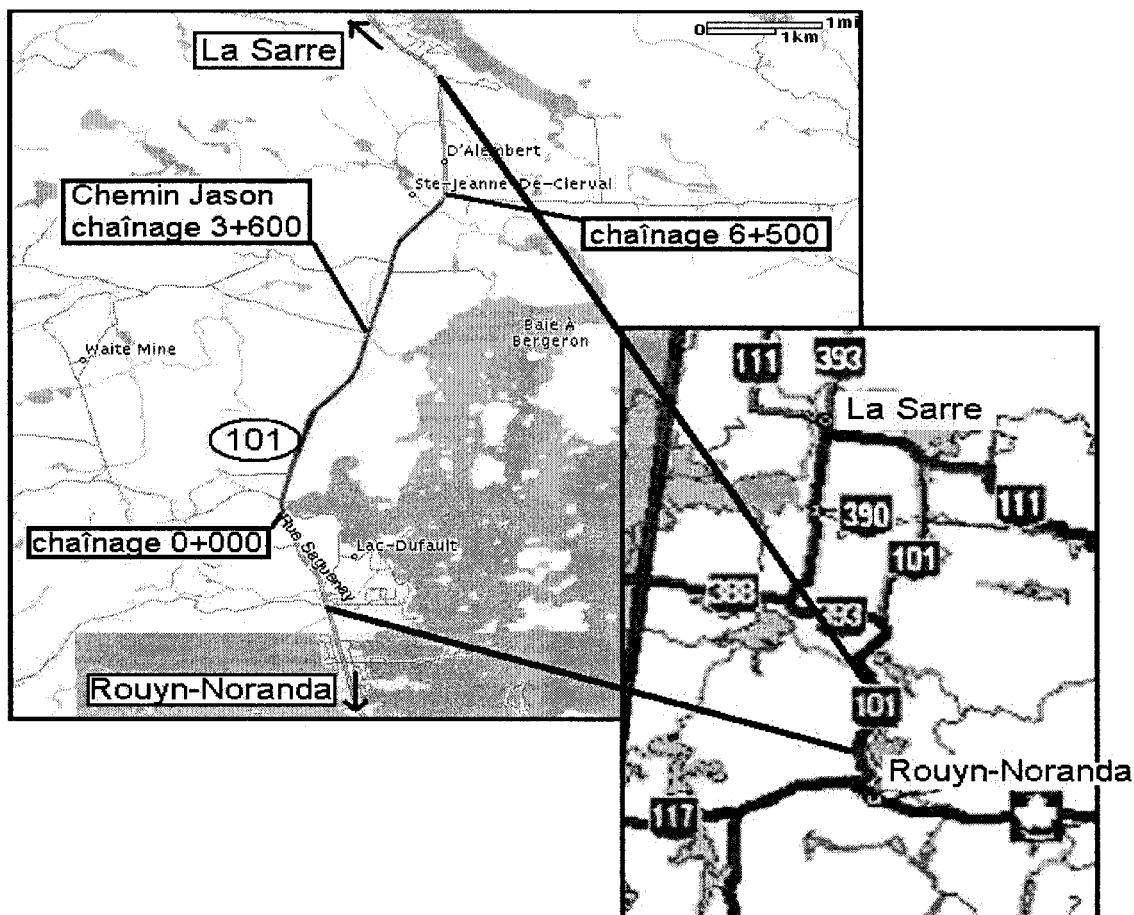


Figure 8-3 Situation de la route 101

8.2 Route 329, Laurentides

La route 329 sur laquelle nous avons effectué les mesures est située dans la région sud des Laurentides entre les municipalités de Gore et de Lachute, et correspond aux sections 329-01-001, 329-01-010 et 329-01-020 en code RTS, et d'une longueur de 16.6 km.

Son alignement est celui d'une route montagneuse, puisqu'elle est composée d'une grande succession de courbes horizontales de faible rayon, combinée à un profil accidenté (de nombreuses courbes verticales).

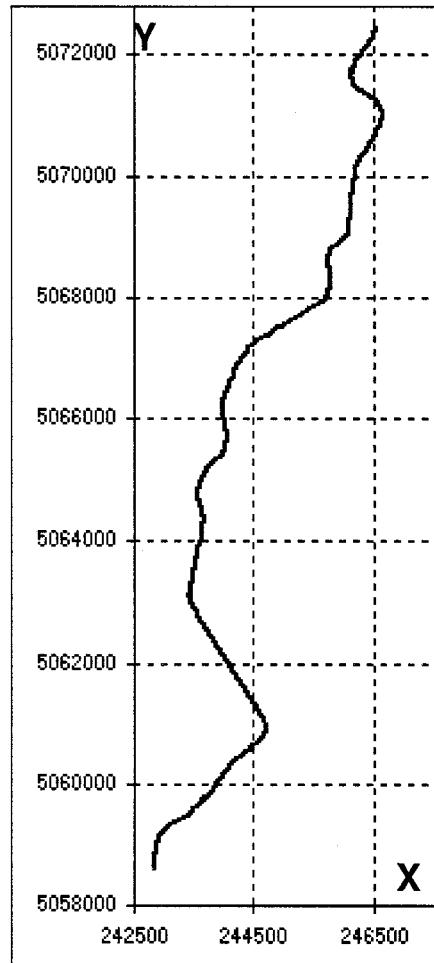


Figure 8-4 Tracé en plan de la route 329

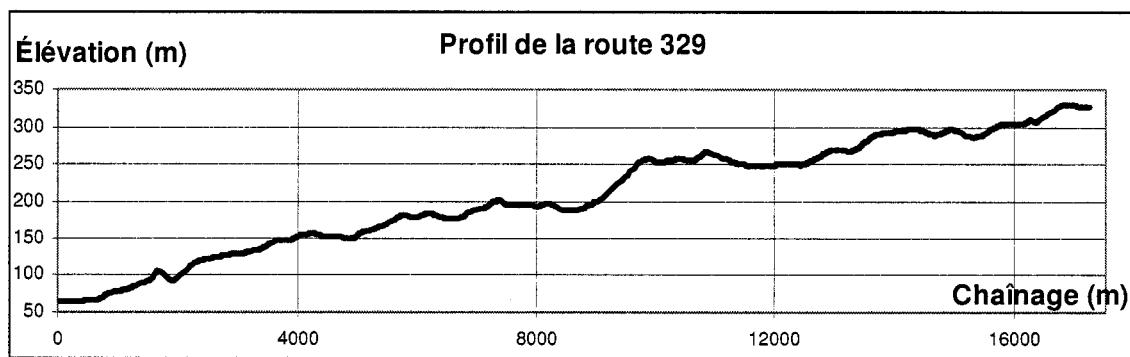


Figure 8-5 Profil en long de la route 329

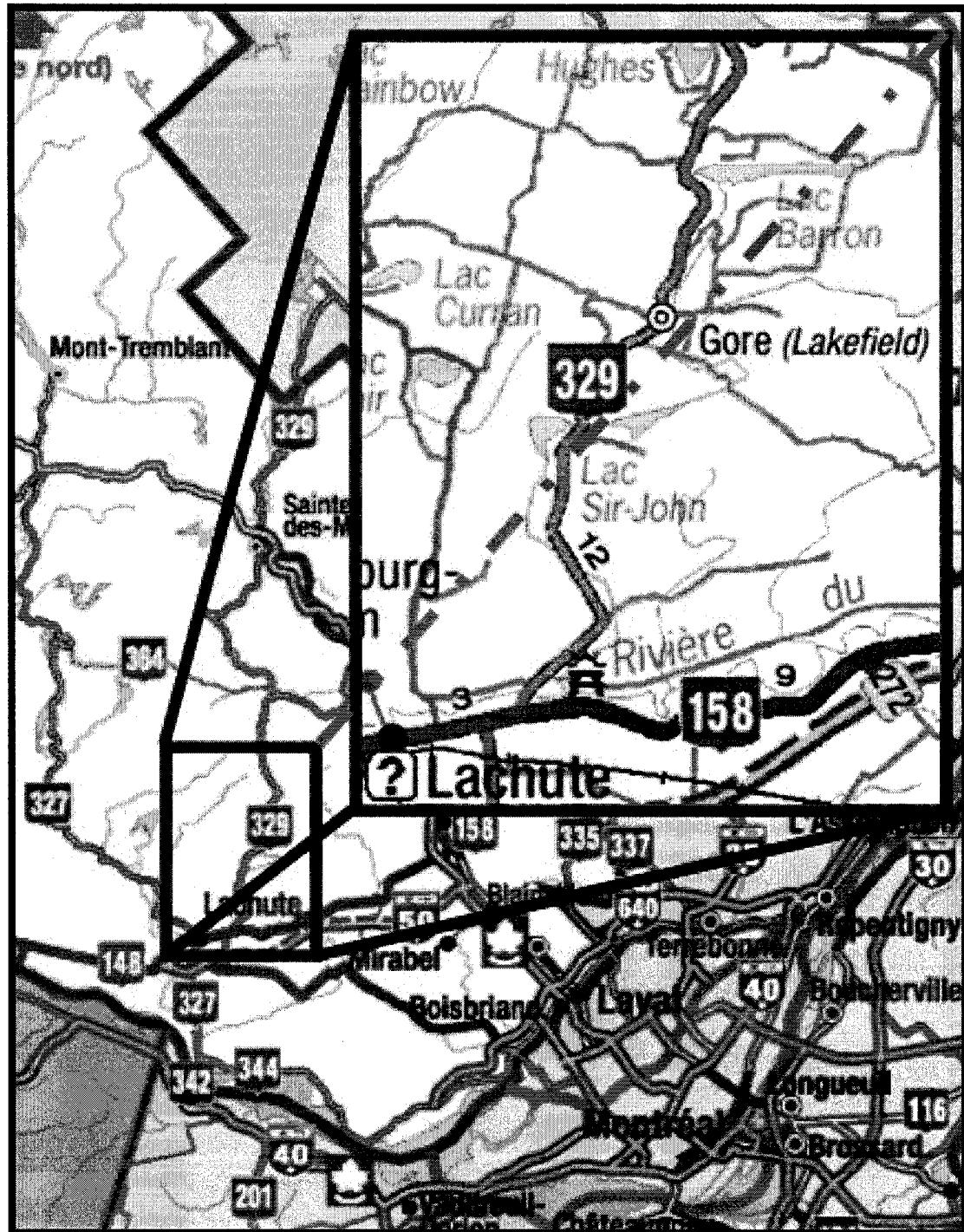


Figure 8-6 Situation de la route 329

8.3 Route 147, Cantons de l'Est

En collaboration avec la Direction Territoriale du MTQ, basée à Sherbrooke, nous avons pu réaliser des mesures sur deux segments de route et ceci pendant quatre journées.

Le premier segment à avoir été étudié, a été un tronçon de la route 147 entre la ville de Coaticook et la frontière avec les Etats-Unis et correspond aux sections 147-01-010-000C dont le début correspond au chaînage 0+000, 147-01-020-000C, 147-01-030-000C et 147-01-040-000C en code RTS, d'une longueur de 12,6 km. Il correspond à une route en site vallonné (quelques courbes horizontales, mais prépondérance des courbes verticales).

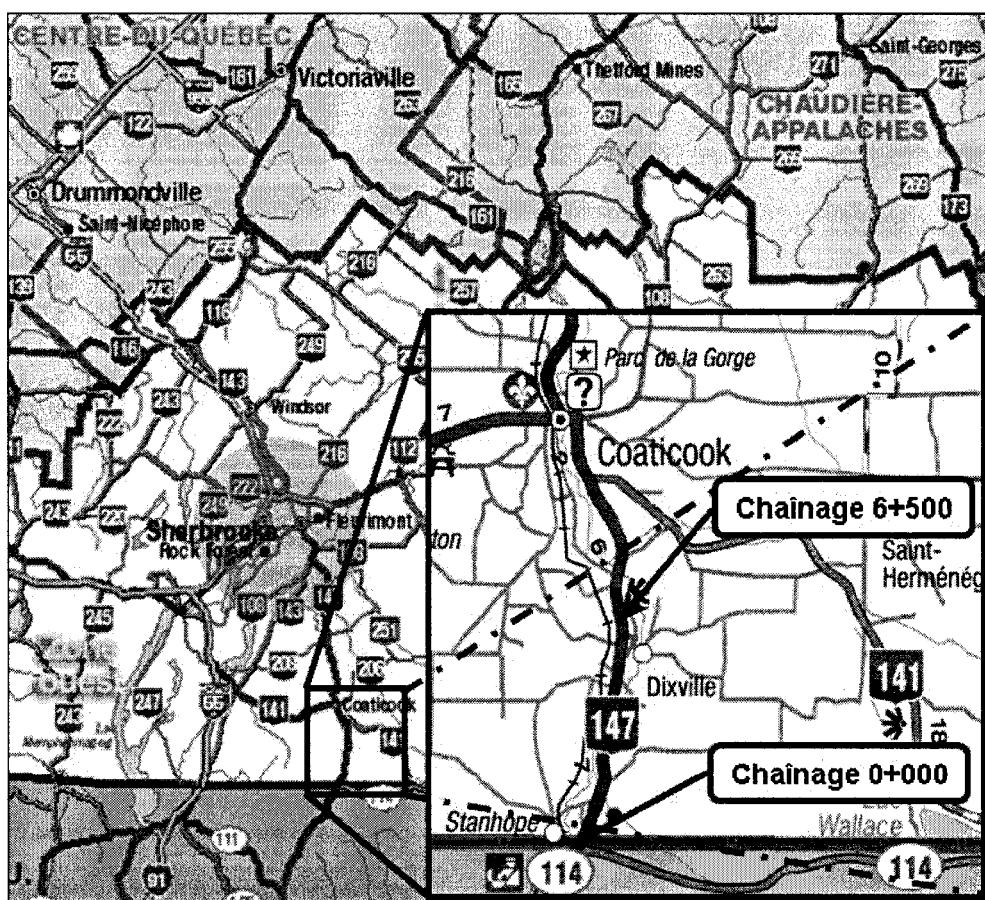


Figure 8-7 Situation de la route 147

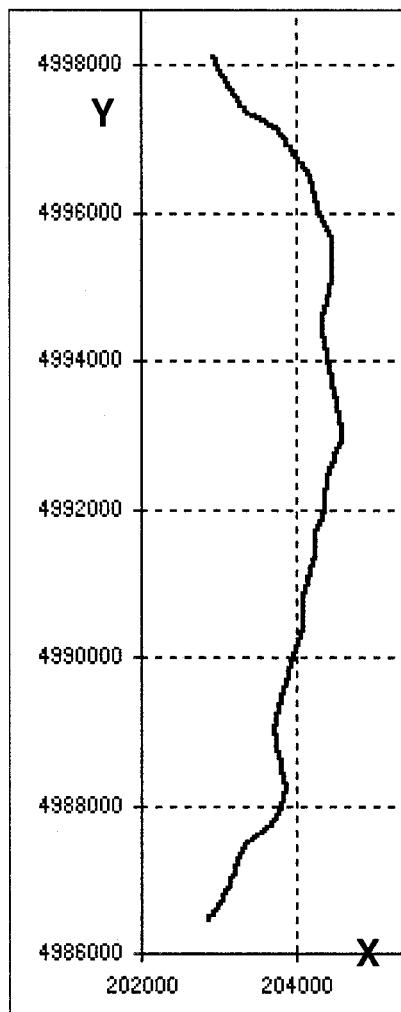


Figure 8-8 Tracé en plan de la route 147

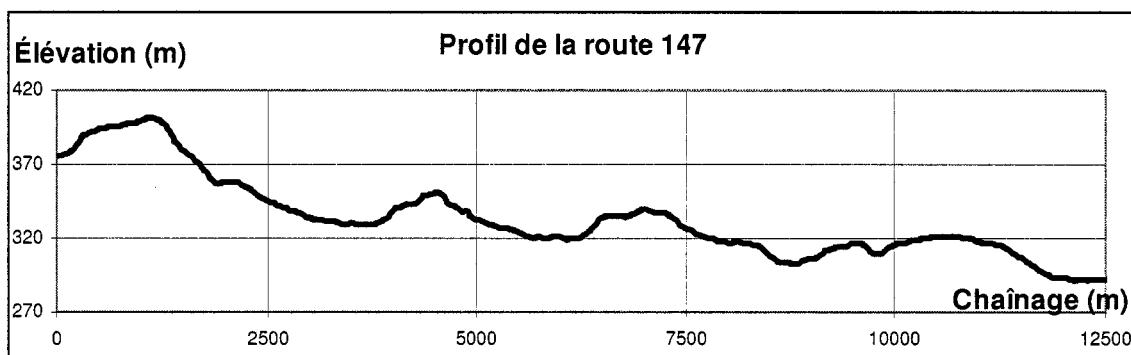


Figure 8-9 Profil en long de la route 147

8.4 Route 222, Cantons de l'Est

La seconde route des Cantons de l'Est, a été un segment de la route 222 entre les municipalités de Racine et de Saint-Denis de Brompton, et correspond aux sections 222-01-095-000C dont le début correspond au chaînage 0+000, 222-01-115-000C et 222-01-125-000C en code RTS, d'une longueur de 15,8 km.

Cette route présente un alignement de type vallonné, puisqu'il associe longues courbes horizontales à des courbes verticales longues et nombreuses.

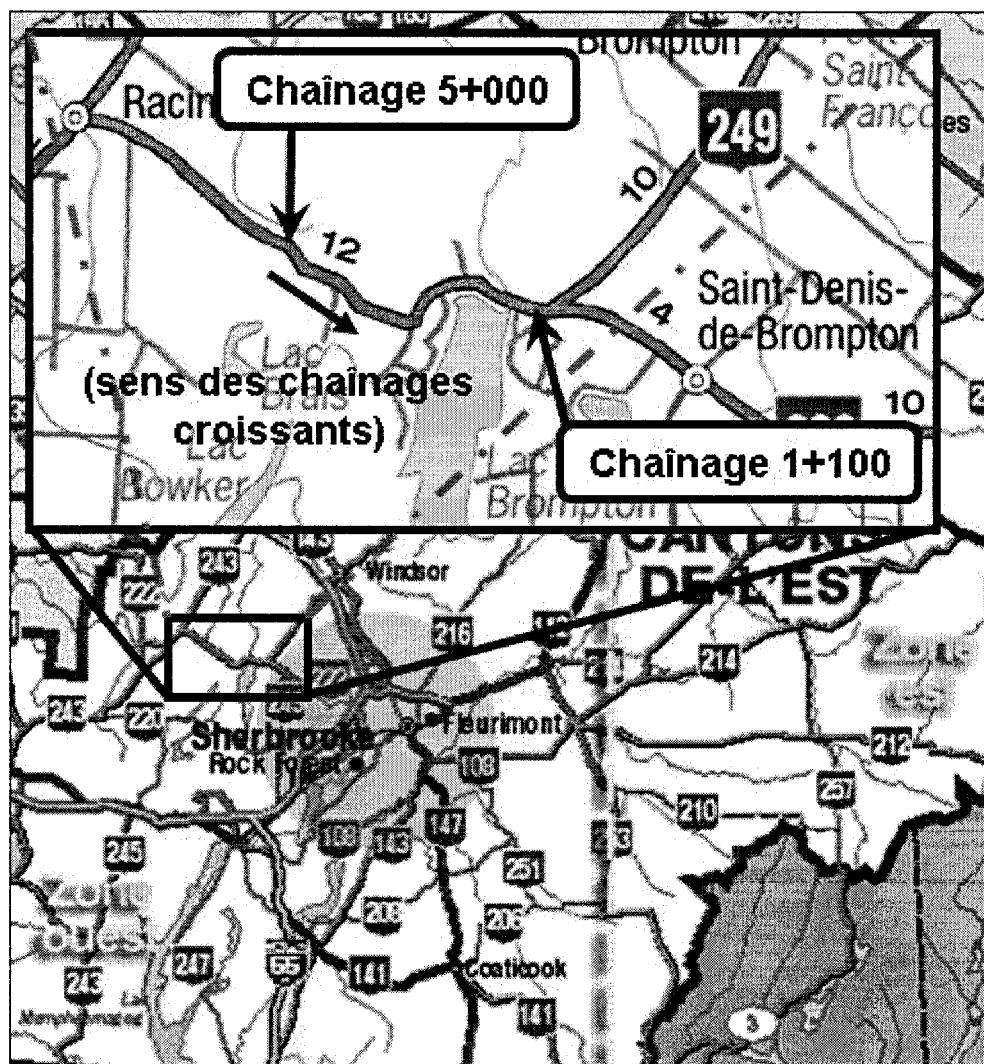


Figure 8-10 Situation de la route 222

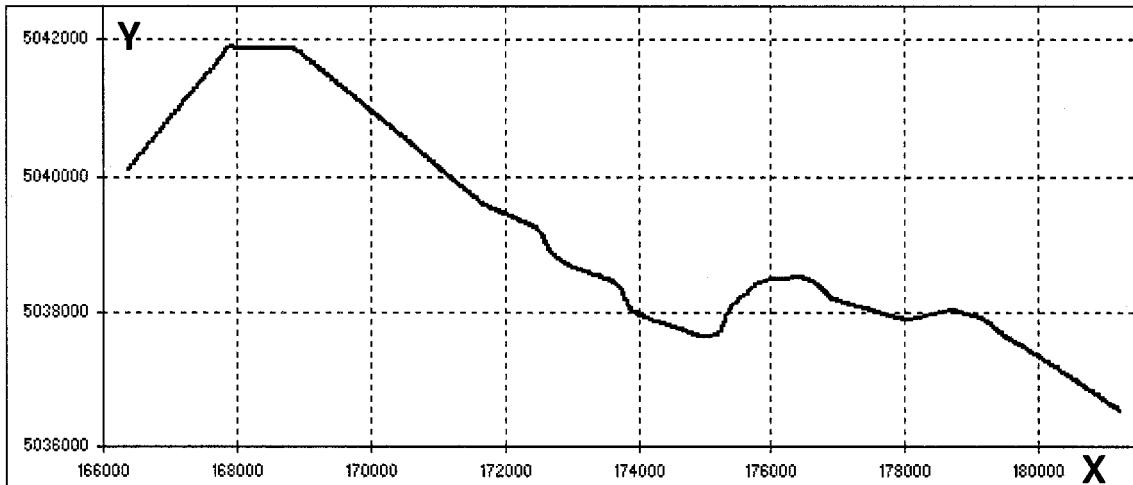


Figure 8-11 Tracé en plan de la route 222

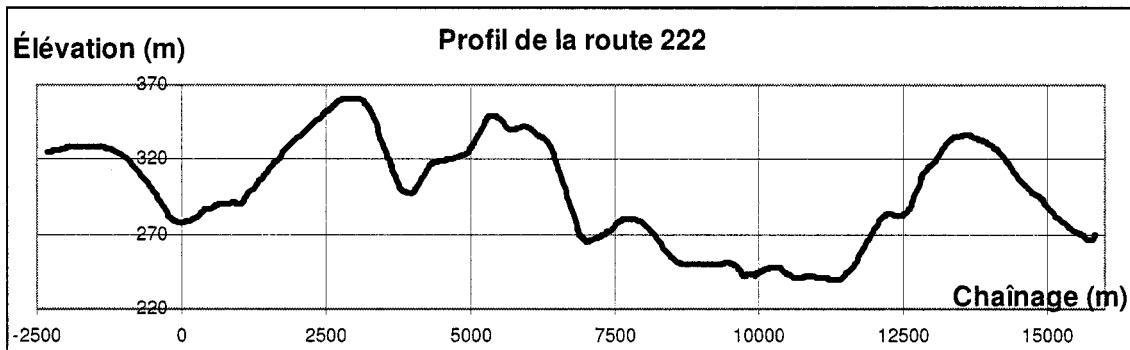


Figure 8-12 Profil en long de la route 222

8.5 Obtention des caractéristiques géométriques des routes

Pour l'étude ultérieure, la connaissance de l'alignement des 4 routes est nécessaire. Il nous faut connaître les caractéristiques géométriques de ces routes, c'est-à-dire la succession des éléments droits (tangentes) et des virages (courbes) pour le tracé en plan, et les pentes, les VPI (Point d'Intersection Verticaux) et leur élévation pour le profil en long.

Pour cela, nous disposions des traces GPS et de certains plans et profils fournis par les différentes DT participantes à l'étude. En traçant sur AutoCAD® les traces des routes à étudier, nous avons obtenu les profils en long et les plans de l'axe central de chacune de ces routes.

Nous avons ensuite pu relever les caractéristiques des routes « à la main » à partir des dessins sur papier (envoyés par les DT ou imprimés à partir de AutoCAD), ou directement dans l'environnement AutoCAD. Ceci nous a permis de déterminer les coordonnées (x, y) de début et de fin des différents éléments, les valeurs et sens des rayons de courbure en ce qui concerne l'alignement horizontal, et les coordonnées des VPI (chaînage, z), les longueurs des tangentes pour l'alignement vertical. En rentrant ces informations sous Excel, nous avons pu calculer les données manquantes (chaînage de début et fin en alignement horizontal et les pentes verticales). Ce travail a été relativement long et n'est pourtant pas très précis car les outils dont nous disposions, ou certaines hypothèses que nous avons faites ne permettent pas une grande précision.

Les données ainsi obtenues sont présentées en annexe D et sont sous la forme de tableaux comme le montrent les deux exemples suivants :

Tableau 8-1 Exemple de tableau de caractéristiques verticales

Sherbrooke route 147, alignement vertical					
C(VPI)	Z(VPI)	longueur avant	longueur après	pente avant (%)	pente après (%)
0.00	376.04	0	0	0.00	1.26
167.05	378.14	92	77	1.26	7.93
301.50	388.80	38	28	7.93	2.53
508.90	394.04	13	15	2.53	1.05
601.40	395.01	13	11	1.05	2.65
647.40	396.23	22	11	2.65	-0.86
698.30	395.79	9	13	-0.86	0.65
804.40	396.48	15	10	0.65	2.67
859.80	397.96	13	25	2.67	0.85

Tableau 8-2 Exemple de tableau de caractéristiques horizontales

Sherbrooke route 147, alignement horizontal					
	chainage de début	Chainage de fin	R	sens	
tangente	0	246.9024			gisement=37
courbe	246.9024	442.5543	657	left	
tangente	442.5543	1017.785			
courbe	1017.785	1191.535	409	right	
tangente	1191.535	1413.266			
courbe	1413.266	1966.067	798	left	

CHAPITRE 9 Application, validation et analyse de la méthode

9.1 Application de l'algorithme aux sites choisis

Il s'agit de déterminer les profils de visibilité et les zones potentielles de dépassement des 4 routes choisies. Pour cela, il a fallu obtenir la trace GPS de l'axe de la route, comme donnée d'entrée à l'algorithme.

9.1.1 Obtention de la trace GPS des routes

Pour chacune des 4 routes étudiées (101, 329, 202 et 147), la DT y étant affectée nous a fourni sa trace GPS. Il s'agit d'un relevé de position MTM (en coordonnées x, y, z) de l'axe de la route. Pour obtenir cette trace, il faut circuler à faible vitesse sur la route, et enregistrer à intervalle constant la position (x, y, z) de l'axe de la route. Le protocole précis de la méthode est disponible dans le document « Guide des relevés numériques du réseau routier » (SAI Géomatique, 2002). Il y est recommandé de circuler à une vitesse inférieure à 70 km/h et d'enregistrer 1 position par seconde, ce qui aboutit à un intervalle maximum de 20 mètres.

Les 4 traces que nous avons pu obtenir ont été effectuées avec un pas d'une vingtaine de mètres, mais on constate à certains endroits des manques d'information sur plusieurs dizaines de mètres. Selon l'instrument GPS utilisé, la précision est différente, mais reste de l'ordre de 3 mètres pour les coordonnées x et y. L'enregistrement de l'altitude (z) ne fournit pas une précision très bonne en valeur absolue mais fournit une précision relative suffisante dans la grande majorité des cas.

Grâce au logiciel GOFT utilisé dans les DT, chaque point a pu être recollé à son chaînage correspondant sur la route. Nous avions donc à notre disposition les quadruplets nécessaires (chaînage, x, y, z).

9.1.2 Obtention des résultats pour chaque route

Pour chaque route (c'est-à-dire pour chaque trace GPS), nous avons entré les mêmes caractéristiques géométriques et positions de mesure. C'est-à-dire que nous avons considéré des voies de 3,5 m de large et des accotements de 3 m. Pour ce qui a trait aux positions de mesure, nous avons utilisé les données de la norme, c'est-à-dire une hauteur des yeux à 1.05 m, une hauteur de l'obstacle de 1.15 m, et des positions en milieu de voie (décalage de 1.75 m par rapport à l'axe de la route).

La distance de visibilité minimum est de 350 m et la longueur minimum d'une zone de dépassement est de 100 m.

L'algorithme nous a fourni pour chaque route, le profil de visibilité dans les deux sens, la distance de visibilité pour chaque point GPS et sa limite de visibilité associée (horizontal ou vertical), ainsi que la liste des zones de dépassement potentielle.

Les zones de dépassement sont présentées en annexe F.

Remarque : le temps de calcul pour chaque route a été de l'ordre d'une vingtaine de secondes.

9.2 Cueillette des données pour fins de validation

9.2.1 Présentation du protocole de la méthode pratique

9.2.1.1 Principe

Comme expliqué au chapitre 7, il s'agit d'observer à partir du bord droit de la chaussée à un chaînage C_o (chaînage de l'observateur), deux cibles circulant sur le bord droit et le bord gauche de la route, de déterminer leur position critique de visibilité, c'est-à-dire le chaînage limite auquel il est encore possible de les voir selon les indications de la norme. Ces deux positions sont appelées C_d (pour chaînage de la cible à droite) et C_g (chaînage de la cible à gauche). La visibilité à droite ($DVD_d = C_d - C_o$) et la visibilité à gauche ($DVD_g = C_g - C_o$) sont alors disponibles.

9.2.1.2 Notations et positionnements

Pour alléger la présentation du protocole, les notations suivantes sont utilisées :

- i : numéro de la mesure ;
- Véhicule O (associé au conducteur O) : véhicule associé à l'observateur et d'où la distance de visibilité est mesurée ;
- Véhicule C (associé au conducteur C) : véhicule en avant sur l'accotement droit qui peut servir de cible ;
- Véhicule S : véhicule signaleur qui assure la sécurité en arrière de l'observateur ;
- Observateur O : observateur de la distance de visibilité, placé devant le véhicule O et dont les yeux sont à une hauteur de 1,05 m ;
- Cible D (G) : cible à 1,15 m du sol, porté par le porteur D (G), sur l'accotement droit (gauche) de la route, en bord de chaussée ;
- Cible C : cible à 1,15 m du sol, fixée sur le véhicule C ;
- C_{oi} (C_{ci}) : position (chaînage) du véhicule O (véhicule C) ;
- dO (dC) : distance parcourue par le véhicule O (C) depuis le début des mesures ;
- DC_i : distance rectiligne entre les cibles D et C pour la mesure i ;
- GC_i : distance entre les cibles G et C pour la mesure i ;
- DG_i : distance rectiligne entre les cibles C et G pour la mesure i ;
- DVD_{di} : distance de visibilité à droite entre l'observateur et la cible à droite pour la mesure i ;
- DVD_{gi} : distance de visibilité à gauche entre l'observateur et la cible à gauche pour la mesure i ;

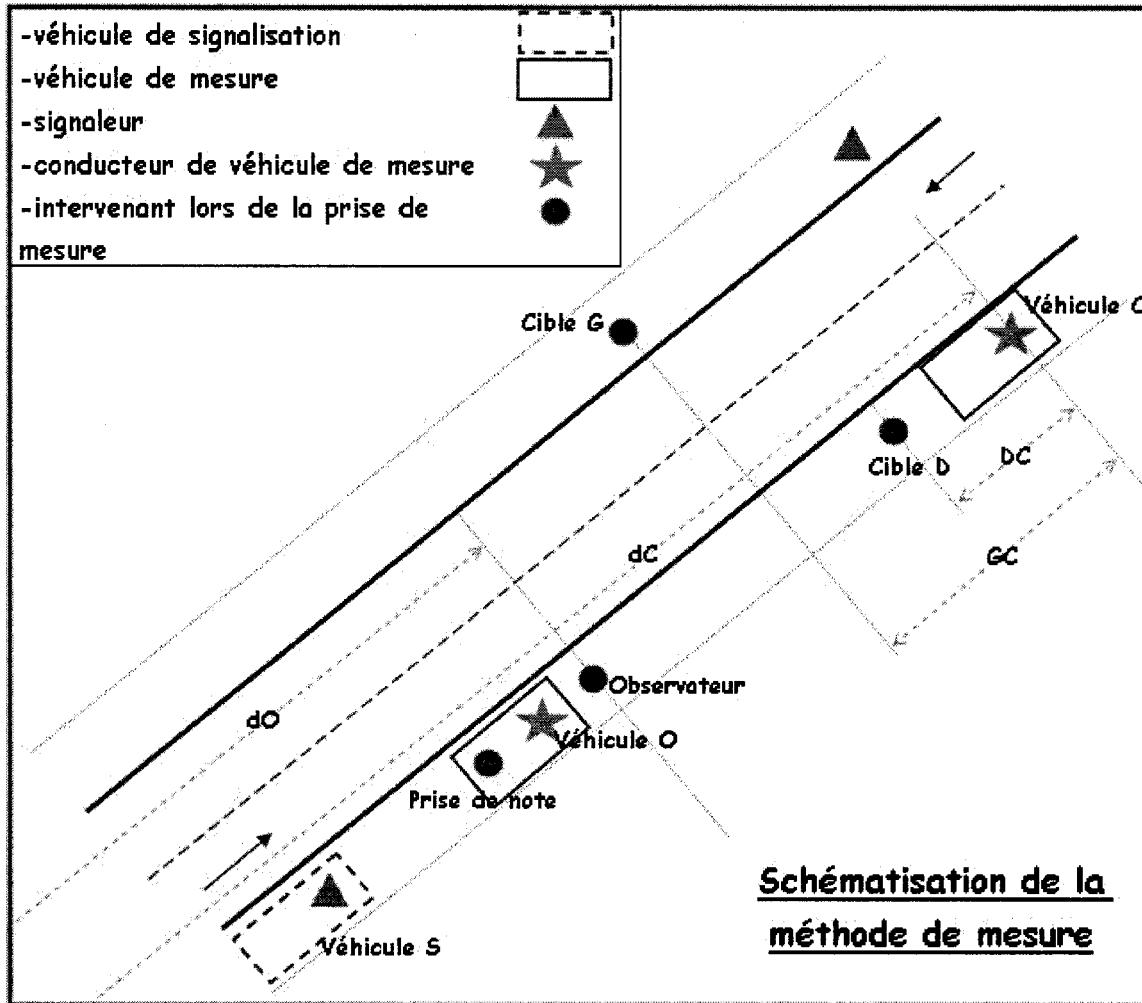


Figure 9-1 Schématisation de la méthode de mesure du protocole étalon : positions et notations

9.2.1.3 Protocole utilisé lors des campagnes de mesure

1/ L'observateur O se place au chaînage C_{oi} au bord de la chaussée et se positionne de manière à avoir les yeux à une hauteur de 1,05 m.

2/ Le véhicule O se place 2 mètres derrière l'observateur O.

3/ L'observateur O transmet ses indications aux porteurs D et G pour amener les cibles D et G à la position critique (c'est-à-dire que le rayon visuel de l'observateur O vers D et G soit tangent au bord extérieur de l'accotement pour les courbes horizontales ou à la crête de la route pour les courbes verticales convexes). Les porteurs doivent tenir leur cible de telle sorte qu'elle soit 1,15 m au dessus du bord de la chaussée.

4/Lorsque les deux cibles sont bien placées, il est possible de relever les distances. Les distances DC_i et GC_i sont déterminées à l'aide d'un télémètre. Les deux conducteurs C et O relèvent leur position (chaînage). Les différentes positions et distances sont transmises au preneur de note en O. Celui-ci prend note de dO, dC, GC_i, DG_i et i. Les distances de visibilités mesurées sont alors :

- pour la visibilité à gauche : $DVD_{gi} = dC - dO - GC_i$ et ;
- pour la visibilité à droite : $DVD_{di} = dC - dO - DC_i$.

5/ L'observateur O avance du pas de mesure souhaité.

6/ Reprendre les étapes 1, 2, 3, 4, 5 jusqu'à la fin du segment de route à étudier, $i=i+1$;

Remarque :

- Quand la visibilité disponible est importante (1000 mètres ou plus), nous n'avons pas relevé la visibilité exacte car cela aurait pris trop de temps (puisque les cibles auraient eu à parcourir une grande distance), mais nous avons repris la visibilité sans faire bouger les cibles par rapport à leur position précédente;
- un exemple de feuille de route utilisée pour relever les distances est fourni en annexe C;
- la méthode adoptée pour le relevé des distances de visibilité le long des quatre routes choisies a généralement été celle expliquée plus haut. Mais pour des

raisons de disponibilité du matériel ou du nombre de personnes présentes, la méthode a parfois été modifiée;

- les mesures sur les 4 sites nous ont fourni près de 35 km linéaires de segments de route dont la visibilité est connue.
- nous avons utilisé un télémètre Yardage Pro 800 de la compagnie Bushnell, qui offre une précision de 1 m pour 100 m.

9.2.2 Route 101, Abitibi-Temiscamingue

L'expérience s'est déroulée les 2 et 3 octobre 2003 sur la route 101, tronçon 04, section 033.

Lors des 4 demi-journées de mesure, nous avons pu relever la distance de visibilité du chaînage 0+200 au chaînage 6+500 dans les deux sens (chaînage croissant et chaînage décroissant). Les mesures du 03 Octobre au matin (du chaînage 6+500 au chaînage 3+600) n'ont pas été retenues pour utilisation car des problèmes de matériel (principalement d'un des deux odomètres utilisés) ont empêché d'obtenir des valeurs de distance de visibilité correctes.

Nous avons donc obtenu environ 10 kilomètres linéaires de distance de visibilité (6,3 km dans le sens des chaînages croissants, et 3,6 km dans le sens des chaînages décroissants).

9.2.3 Route 329, Laurentides

Le relevé a été fait le jeudi 20 mai 2004 en collaboration avec une équipe de la Direction territoriale de Saint Jérôme (Laurentides). Le matériel dont nous disposions ne nous a pas permis d'employer la méthode présentée au chapitre 7, mais le principe retenu a été le même. Pour mesurer la distance entre l'observateur et les cibles nous n'avons pas utilisé d'odomètres et un télémètre, mais simplement un télémètre. Nous avons mesuré les distances entre observateur et cibles grâce à un télémètre. Les valeurs de distance

ainsi obtenues sont alors linéaires (et non curvilignes selon le chaînage), et sont donc inférieures aux valeurs réelles. La différence de longueur entre une corde et un arc sur un cercle de grand rayon, n'étant pas importante (quelques mètres), ceci n'influe pas grandement sur les résultats, mais nous aurons à en tenir compte lors de l'analyse des résultats.

Lors de la journée de mesure nous n'avons pu relever les distances de visibilité que sur un peu plus de 2 km dans un seul sens.

9.2.4 Route 147, Cantons de l'Est

Les mesures ont été faites entre les chaînages 0+500 et 6+500 dans les deux sens de circulation. Nous avons donc obtenu 12 kilomètres linéaires de distance de visibilité (6 dans le sens des chaînages croissants et 6 km dans le sens des chaînages décroissants). Ces mesures se sont déroulées sur 2 journées, les 25 et 26 Mai 2004 (une journée par sens).

La méthode de relevé de la distance de visibilité a été celle exposée au CHAPITRE 7 chapitre 7, mais nous avons également utilisé des GPS pour déterminer la position de la cible à gauche et de l'observateur pour chaque position de mesure. Mais l'essai avec les GPS n'a pas été concluant car bien que leur utilisation soit simple, nous n'avons pas réussi à systématiser la méthode de mesure, cependant les données obtenues ont permis de vérifier certaines positions.

De plus, à chaque position de relevé, nous avons noté si la limite à la visibilité était d'ordre vertical ou horizontal.

9.2.5 Route 222, Cantons de l'Est

Nous avons relevé la distance de visibilité du chaînage 5+000 de la RTS 222-01-095-000C (d'une longueur de 11,92 km) au chaînage 1+100 de la RTS suivante 222-01-115-000C, soit sur plus de 7 kilomètres. Le relevé a été fait dans les deux sens de circulation,

nous disposons pour la route 222 de plus de 14 kilomètres linéaires. Les mesures se sont déroulées sur 2 journées, les 8 et 9 Juin 2004.

Comme pour les mesures sur la route 147, nous avons utilisé des GPS comme seconde détermination de la position des cibles à droite et à gauche et de l'observateur. L'utilisation des GPS s'est faite presque sans problèmes (c'est-à-dire que nous avons pu relever la plupart des positions), mais pour des raisons d'alimentation des appareils et de perte du signal, nous n'avons pas obtenu les positions à chaque mesure.

Nous avons aussi noté les limites à la visibilité (horizontal ou vertical).

9.2.6 Traitement des données

Pour chacune des routes nous avons traité les données relevées. Il s'agissait d'obtenir les distances de visibilité en chaque point à partir des différentes longueurs, distances et positions relevées (cf. paragraphes 9.2.1.3 et 7.1).

Ce traitement nous a fourni une approximation de la distance de visibilité selon la méthode idéale pour chaque point. Ce qui a abouti à l'établissement des profils de visibilité pour chaque route dans les deux sens.

À partir de ces profils, les zones de dépassement potentielles ont été établies. Pour cela nous avons considéré que le début d'une zone est le premier point pour lequel la visibilité est supérieure au seuil de 350 m. La fin de la zone est obtenue par linéarité entre le dernier point connu dont la visibilité est supérieure au seuil et le point suivant. Les tableaux présentant les listes de ces zones sont présentés en annexe F.

9.3 Analyses et validation

L'analyse est faite en deux temps, les visibilités obtenues par l'algorithme vont être comparées à celles mesurées pendant les campagnes de terrain. L'analyse des zones potentielles de dépassement sera ensuite traitée.

9.3.1 Comparaison des profils de visibilité

La comparaison visuelle des profils de visibilité obtenus par l'algorithme et par les mesures a été la première étape de l'étude. Sur les graphiques présentés en annexe E, les deux profils de visibilité suivent les mêmes variations pour les 4 routes. Globalement, les valeurs obtenues par les deux méthodes sont identiques, mais il existe quelques cas pour lesquels des différences majeures apparaissent. Une comparaison numérique est donc nécessaire pour analyser ces différences.

L'algorithme a fourni les distances de visibilité en chaque point GPS, mais ces points sont différents des chaînages pour lesquels nous avons déterminé la visibilité sur le terrain. Or pour pouvoir comparer numériquement les résultats, il a fallu déterminer les visibilités en ces points par l'algorithme. Pour cela, nous avons raisonné par linéarité.

La différence de visibilité obtenue à chaque chaînage a été calculée, ce qui nous a fourni l'erreur absolue. Pour l'analyse, nous avons ensuite calculé l'erreur relative, soit le quotient de la différence de visibilité sur la visibilité mesurée.

Pour l'étude, nous avons considéré que des erreurs relatives de moins de 5%, sont acceptables. En effet, en considérant l'ensemble des erreurs aléatoires qui peuvent survenir lors des campagnes de terrain, une erreur relative de 5% ou moins est négligeable. Les erreurs supérieures à 5% (erreurs majeures) seront étudiées pour en connaître les causes (erreurs de relevé sur le terrain, erreur de l'algorithme, ou autres). Pour l'analyse, nous utiliserons les données géométriques de la route (profil en long et tracé en plan) et les calculs théoriques (annexe A).

Remarques :

- pour simplifier l'analyse, et permettre un rapprochement entre les profils de visibilité et les courbes d'erreur relative, les erreurs majeures sont numérotées sous la forme nroute.sens.n, où « nroute » correspond au numéro de la route (101, 329, 147 ou 222), « sens » au sens d'avancement selon les chaînages (1 pour sens 1, chaînage croissant, et 2 pour sens 2, chaînage décroissant) et n est le numéro de cette erreur pour le sens de cette route;
- les courbes de l'erreur relative sont représentées en valeur absolue en annexe G pour les quatre étudiées;
- les profils de visibilité issus de l'algorithme ou des mesures sont présentés en annexe E, et les erreurs majeures y sont encerclées et identifiées par le code nroute.sens.n;
- la Figure 9-2 et la Figure 9-3 présentent un exemple des comparaisons des profils de visibilité et de l'analyse numérique.

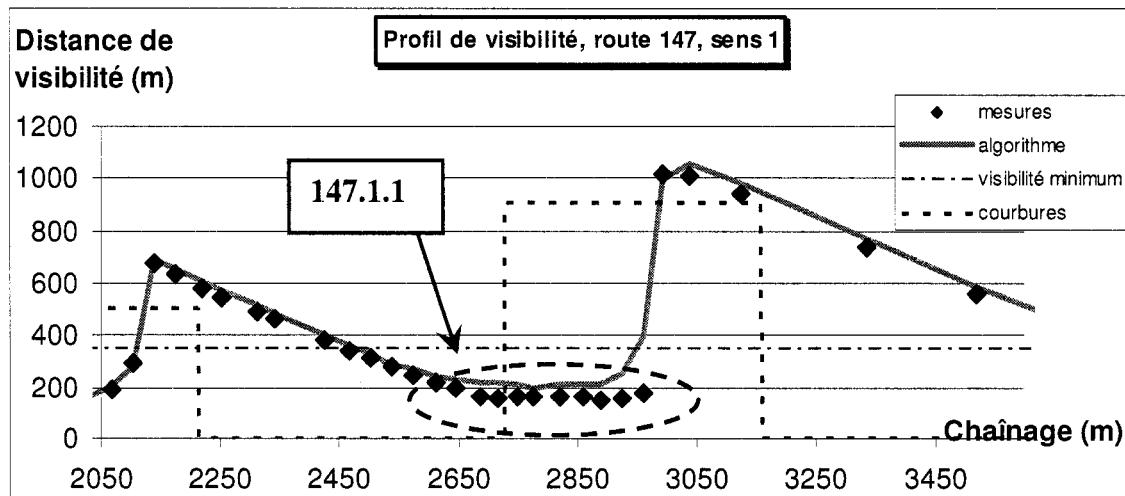


Figure 9-2 Profils de visibilité, route 147, sens 1, chaînages 2+050 à 3+600

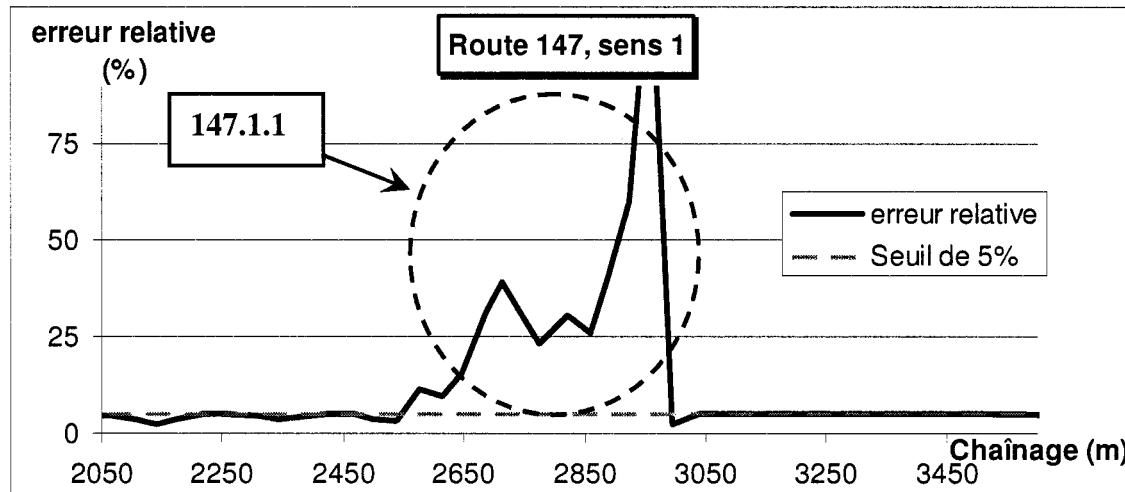


Figure 9-3 Courbe d'erreur relative associée aux profils de la Figure 9-2

9.3.1.1 Études des erreurs majeures

Sur les 13 graphiques précédents, nous constatons l'existence de 34 erreurs majeures pour les 4 routes étudiées. L'algorithme a fourni la nature des limites à la visibilité (horizontale ou verticale) pour les routes 101 et 329, et les notes prises lors des mesures

ont fourni cette indication pour les routes 222 et 147. Nous connaissons donc les conditions sous lesquelles, les erreurs sont apparues. Selon ces conditions, ces erreurs peuvent être classées en trois catégories : les erreurs dues aux courbes horizontales, celles dues au profil en long et les autres (qui ne sont pas liées aux conditions géométriques).

9.3.1.1.1 Erreurs issues du tracé en plan

Parmi les 34 erreurs recensées, 19 sont dues aux conditions de mesure dans les courbes horizontales. Aux paragraphes 7.2.1, nous avons mis en évidence la distance de visibilité théorique et la différence entre visibilité exacte et visibilité mesurée due à la position décalée de l'observateur et aux autres erreurs en tracé en plan (position de l'accotement). Nous avions montré que des erreurs relatives dans le virage de 15% en virage à droite et de 10% en virage à gauche étaient acceptables.

Une première comparaison visuelle a été faite sur les profils. Nous avons vérifié que les profils étaient en accord avec la théorie présenté au paragraphe 7.3 et sur la Figure 7-15, c'est-à-dire que dans un virage à gauche, la visibilité obtenue par les mesures est supérieure à la visibilité calculée par l'algorithme, et inversement dans un virage à droite. De plus, la phase finale de rapide croissance (portion « sortie de virage », cf. 5.2.1) doit apparaître en premier pour l'algorithme dans les virages à droite, et en premier pour les mesures dans un virage à gauche.

Pour chacun des 19 cas dénombrés, les allures des profils correspondent à la théorie.

L'exemple suivant met en évidence le travail de comparaison visuelle. Il s'agit du cas **222.1.3.** Le virage à droite de 350 mètres de rayon débute au chaînage 6+910. On constate que les profils correspondent à la théorie, c'est-à-dire que l'évolution se fait en trois phases. Il y a tout d'abord décroissance régulière de la visibilité pour les deux profils. Le point minimum atteint par le profil obtenu par mesure est inférieur au

minimum du profil issu de l'algorithme. Un palier où la visibilité est quasi constante vient ensuite. La visibilité mesurée est inférieure de 9% à la visibilité calculée par l'algorithme. Enfin, la phase de rapide croissance en sortie de virage. La croissance du profil issu de l'algorithme précède de quelques dizaines de mètre celle du profil mesuré.

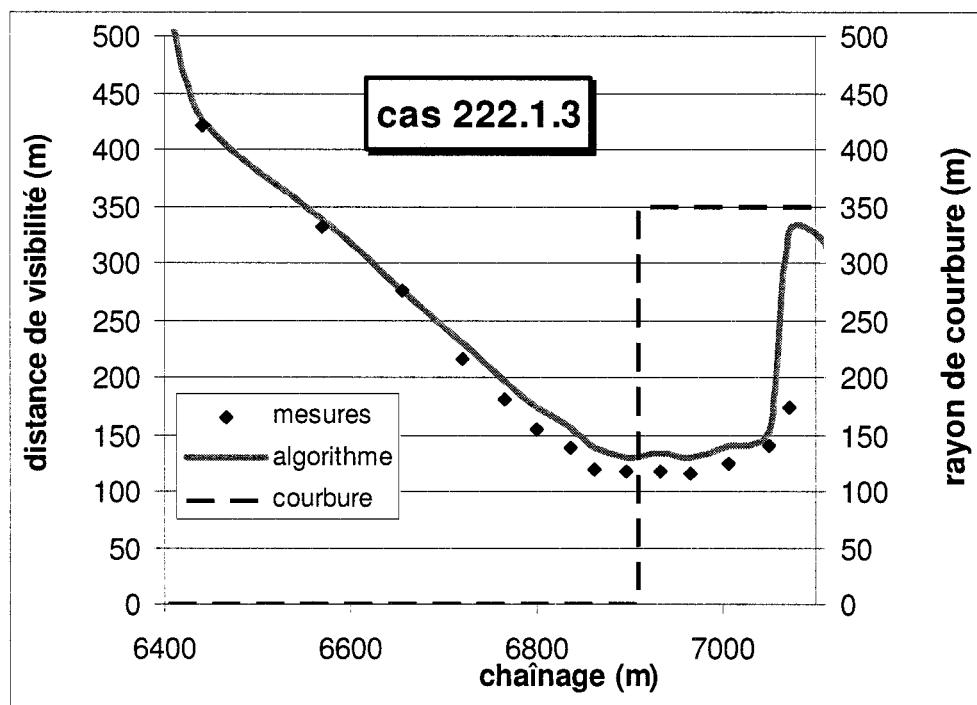


Figure 9-4 Cas 222.1.3, positions des deux profils de visibilité

Nous avons ensuite comparé numériquement les visibilités obtenues par l'algorithme (DV_a) et par les mesures (DV_m) à la visibilité théorique (DV_t). Cette comparaison a été faite dans les portions « dans le virage » (cf. 5.2.1), c'est-à-dire pour le palier où la visibilité est constante.

Nous avons ensuite calculé l'erreur relative entre algorithme et théorie (E_{at}), et l'erreur relative entre mesures et théorie (E_{mt}).

Le tableau suivant présente les différentes données :

Tableau 9-1 Étude des cas issus des conditions horizontales

cas	R (m)	sens	DVt(m)	DVa(m)	Eat (%)	DVm(m)	Emt(%)
101.1.3	675	D	184	180	2,2	168	8,7
101.2.1	870	D	209	210	0,5	180	13,9
101.2.2	535	G	164	166	1,2	182	11,0
329.1.1	380	D	138	140	1,4	126	8,7
329.1.2	380	D	138	140	1,4	128	7,3
329.1.3	340	D	131	127	3,1	117	10,1
147.1.1	905	D	214	209	2,3	167	21,9
147.1.3	974	D	222	211	5,0	190	14,4
147.2.3	798	D	188	189	0,5	157	16,5
147.2.4	409	D	144	141	2,1	129	11,2
222.1.1	505	D	160	160	0	134	16,2
222.1.3	350	D	133	129	3	116	12,8
222.1.5	293	G	122	118	3,3	137	12,3
222.2.2	280	G	119	116	2,5	120	0,9
222.2.3	293	D	122	121	0,8	109	10,7
222.2.5	355	D	134	139	3,7	123	8,2
222.2.6	350	G	133	130	2,3	149	12,0
222.2.8	1090	G	234	238	1,7	256	9,4

Pour ce qui est de l'algorithme, les résultats obtenus sont en accord avec la théorie : les distances de visibilité obtenues par l'algorithme sont proches des valeurs théoriques (moins de 5% d'erreur). L'algorithme fournit donc un bon profil de visibilité horizontale.

Quant aux distances mesurées, si elles restent proches de l'intervalle d'erreurs acceptables (15% pour un virage à droite et 10% pour un virage à gauche), elles sont souvent supérieures au seuil. Ceci confirme le fait que de nombreuses erreurs peuvent survenir lors des mesures, et donc que les mesures sur le terrain ne sont pas un bon moyen d'obtenir les profils exacts de visibilité, si, dans les virages, la méthode n'est pas conforme à la norme.

Dans le tableau précédent, ne sont exposés que 18 cas sur les 19 recensés. Le cas restant est le **222.2.1**. Il s'agit de la visibilité dans un virage à droite de rayon $R=241\text{m}$. Cependant comme le virage est court (124 mètres), il n'y a pas de phase « dans le virage » et le minimum atteint par les deux profils est conforme à la théorie (109 mètres pour l'algorithme et 90 pour les mesures). De plus la croissance suivant le point minimum, correspond à l'allure d'une « sortie de virage ».

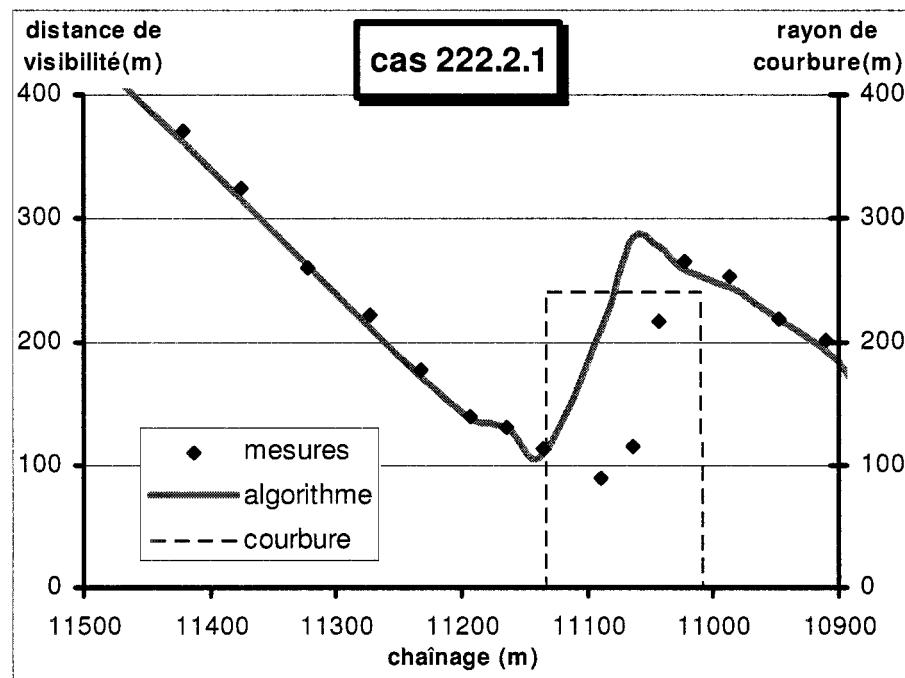


Figure 9-5 Cas 222.2.1

9.3.1.2 Erreurs issues du profil en long

Parmi les 35 cas d'erreur recensés, il existe 11 cas qui sont directement issus des courbes verticales.

La hauteur de l'œil est la première source d'erreurs possible dans le cas du profil en long. En effet selon la hauteur effectivement appliquée, la distance de visibilité peut être considérablement modifiée sur une courte distance. Cette erreur peut apparaître en haut d'une crête, comme expliqué au paragraphe 7.2.2.2. La différence de hauteur d'œil implique alors une erreur croissante qui aboutit à un pic près du sommet de la crête. Dans ces cas, l'allure des profils de visibilité (mesuré et calculé) est identique, mais il existe un décalage selon l'axe du chaînage entre le profil exact et celui mesuré. Les cas **101.1.1, 101.2.4, 147.1.2, 147.2.2, 222.1.4, 222.1.2** et **222.2.4** sont issus de ces conditions.

De plus, nous avons constaté en certains points sur le tracé en plan issu de la trace GPS, la présence de petites « bosses ». Ces petites bosses peuvent avoir deux sources différentes :

- il peut s'agir d'une bosse réelle, c'est-à-dire une surélévation localisée sur la chaussée. Lors des mesures, nous avons par exemple constaté que la route 101 a une surface de chaussée irrégulière et présente plusieurs bombements. Cependant selon le pas utilisé et la hauteur de l'œil effectivement pratiquée, cette « bosse » peut avoir des répercussions sur les résultats. En effet, une hauteur d'œil trop élevée peut supprimer l'effet de cette bosse lors des mesures. Une hauteur d'œil trop faible peut impliquer la prise en compte d'une de ces bosses. De même pour le pas ;
- la bosse peut provenir d'une erreur du relevé GPS. En effet, les appareils utilisés pour relever les traces, avaient une précision de quelques dizaines de centimètres en vertical. Cette précision peut donc

engendrer des erreurs localisées et la création de bosses ou de creux virtuels sur le profil en long. L'algorithme prend alors en compte ces bosses « virtuelles » dans le calcul des visibilités.

Les erreurs issues de ces « bosses » peuvent être importantes. Il peut s'agir d'un pic de visibilité plus bas ou d'un creux de visibilité plus haut (cas **222.2.7**), d'un décalage vertical du profil de visibilité (cas **147.2.1**, **147.2.5** et **222.2.7**). Cependant il est possible de constater que ces erreurs n'affectent pas l'allure générale des profils de visibilité. Cela n'engendre pas d'absence ou de présence non prévues de pics ou de creux de visibilité.

Remarques :

- si dans le cas des contraintes horizontales, nous avons pu appliquer la théorie, dans le cas des contraintes verticales, cela n'a pas été possible, car les calculs théoriques que nous avons utilisés plus haut (cf. 5.2.2 Allure des courbes de visibilité en courbes verticales), ne permettent pas d'intégrer de petites bosses dans l'alignement. Nous n'avons donc pas confronté l'algorithme à la théorie dans les cas d'erreurs majeures.
- les causes indiquées pour ces erreurs majeures ne sont donc que des hypothèses que nous avons faites à partir d'observations lors des expériences ou sur les données d'entrée. Ces observations peuvent concerner les conditions de mesures (météorologiques, débit, fatigues des équipes), la qualité de la chaussée des routes ou les traces GPS ;
- ces erreurs mettent l'accent sur la nécessité de disposer de traces GPS précises en vertical, pour éviter la présence de bosses virtuelles.

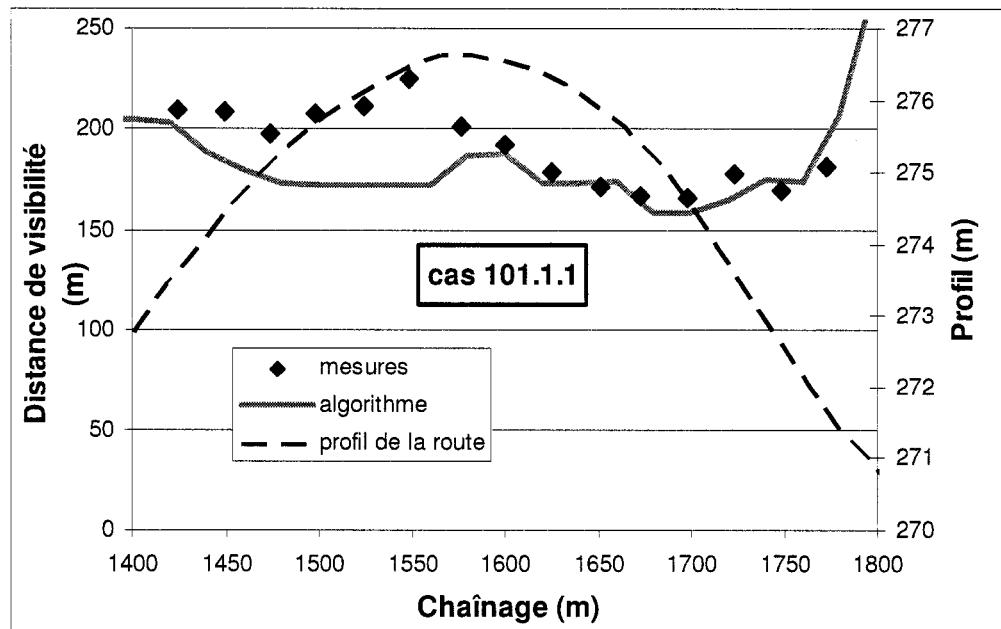


Figure 9-6 Cas 101.1.1, hauteur d'œil pratiquée trop grande

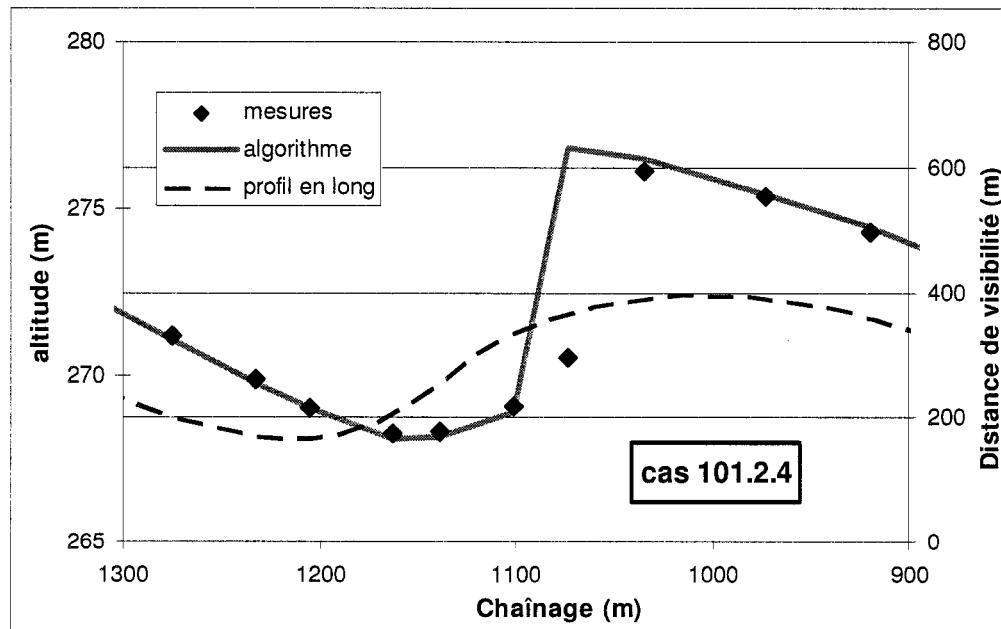


Figure 9-7 Cas 101.2.4, hauteur d'œil pratiquée trop faible

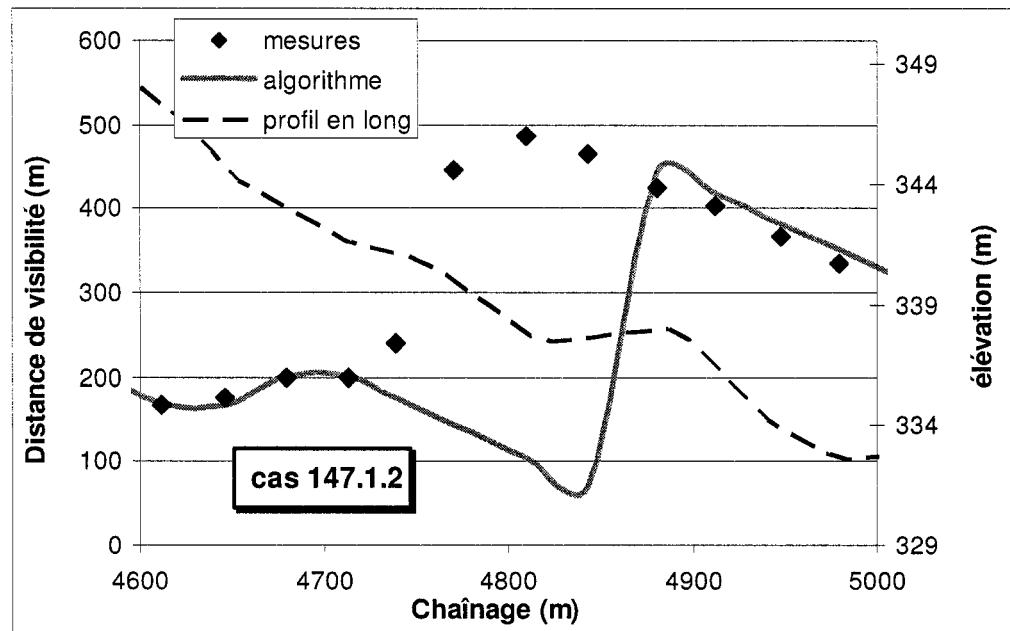


Figure 9-8 cas 147.1.2, hauteur d'œil pratiquée trop grande

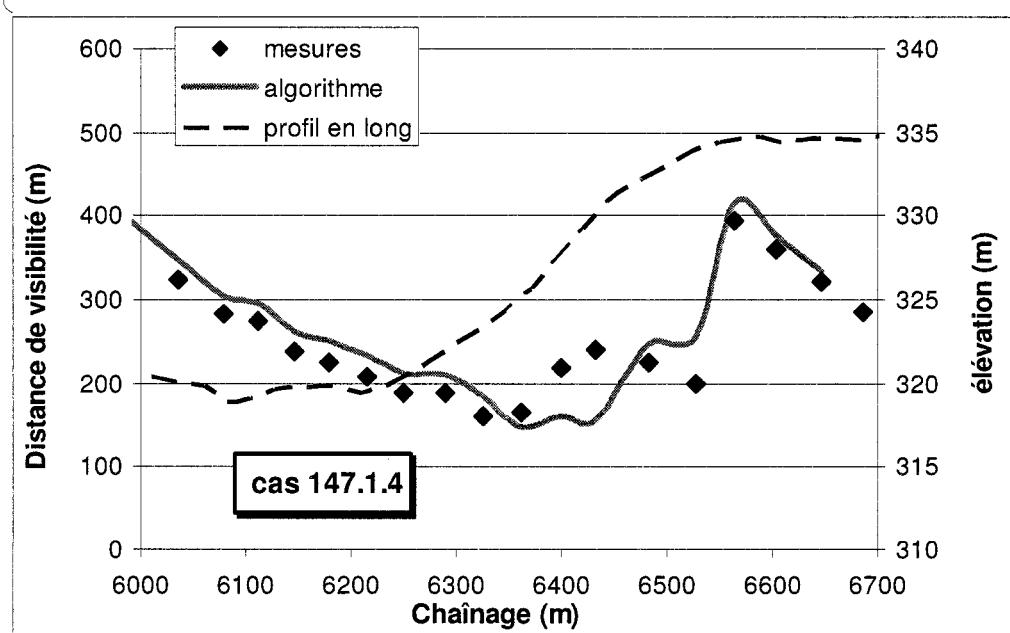


Figure 9-9 Cas 147.1.4, hauteur d'œil pratiquée trop grande

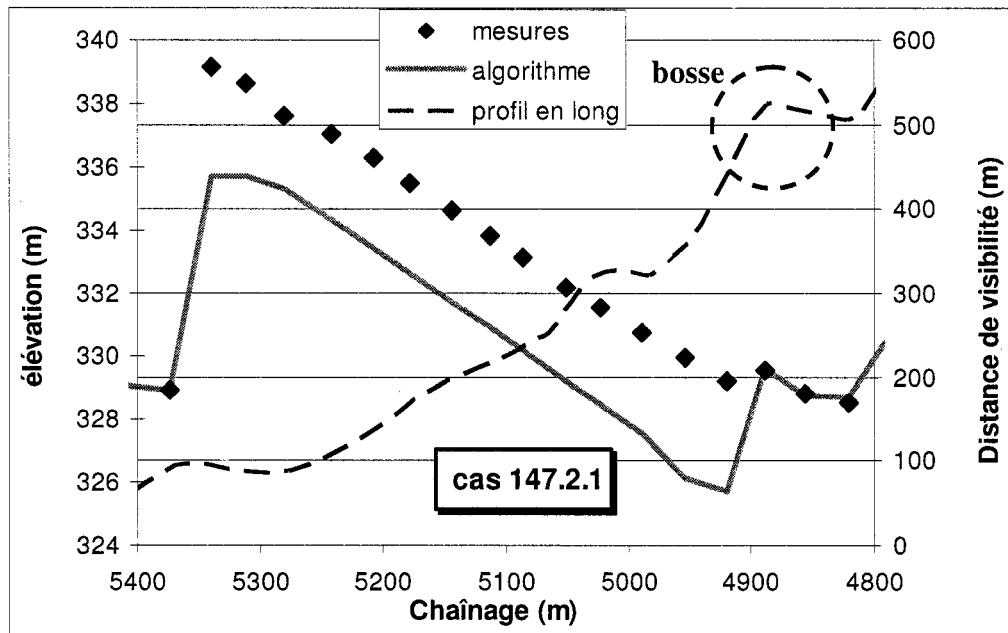


Figure 9-10 Cas 147.2.1, une bosse engendre un décalage vertical du profil

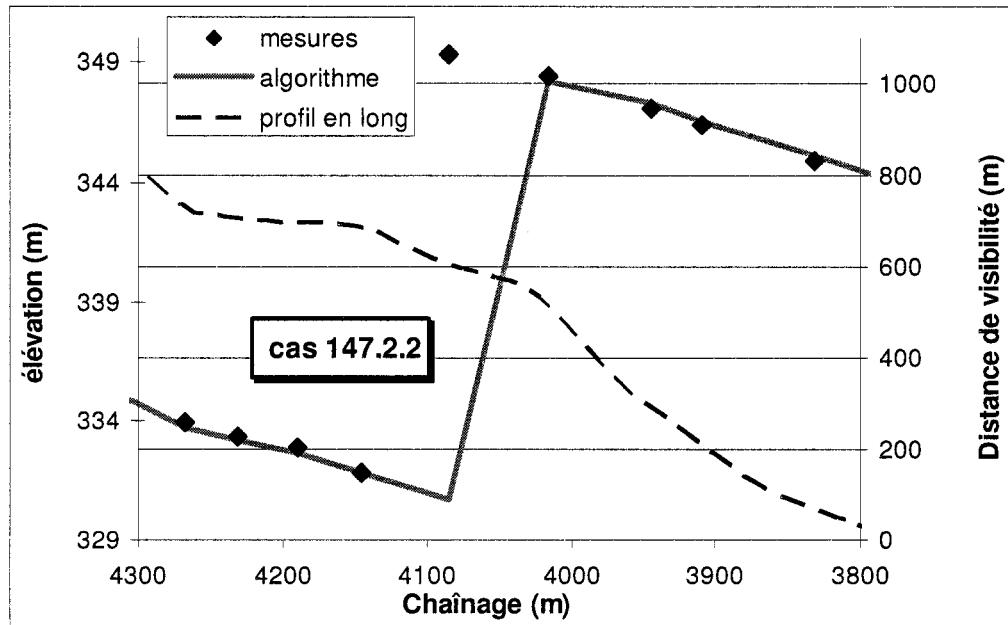


Figure 9-11 Cas 147.2.2, hauteur d'œil pratiquée trop grande

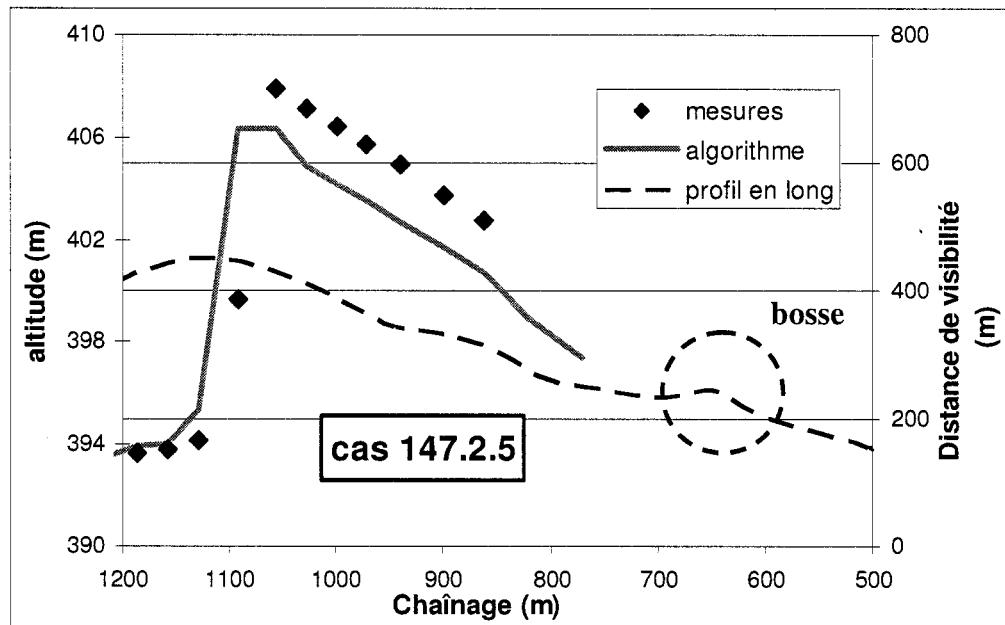


Figure 9-12 Cas 147.2.5, une bosse engendre un décalage vertical du profil

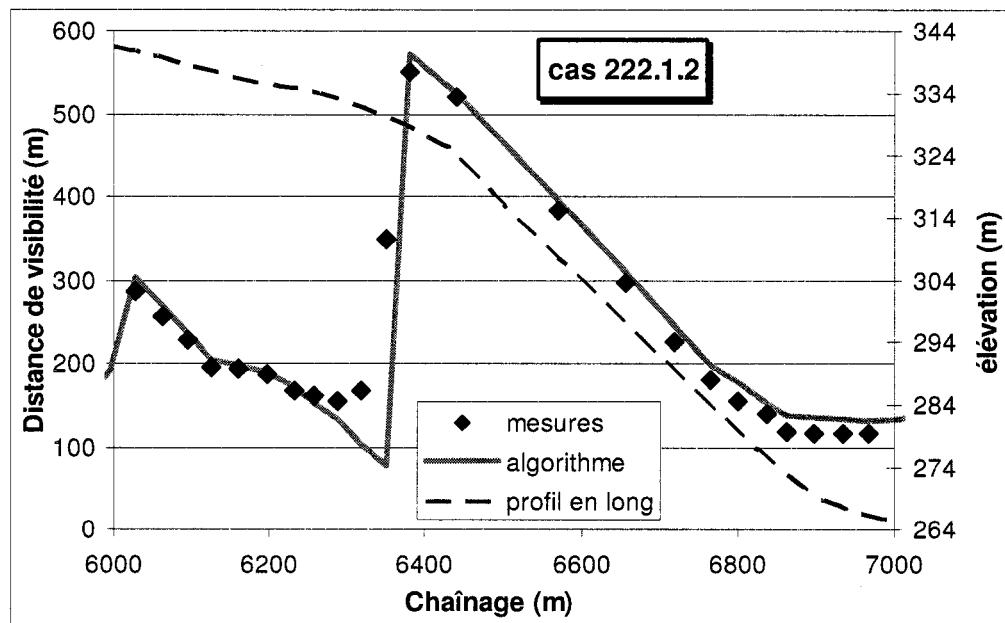


Figure 9-13 Cas 222.1.2, hauteur d'œil pratiquée trop grande

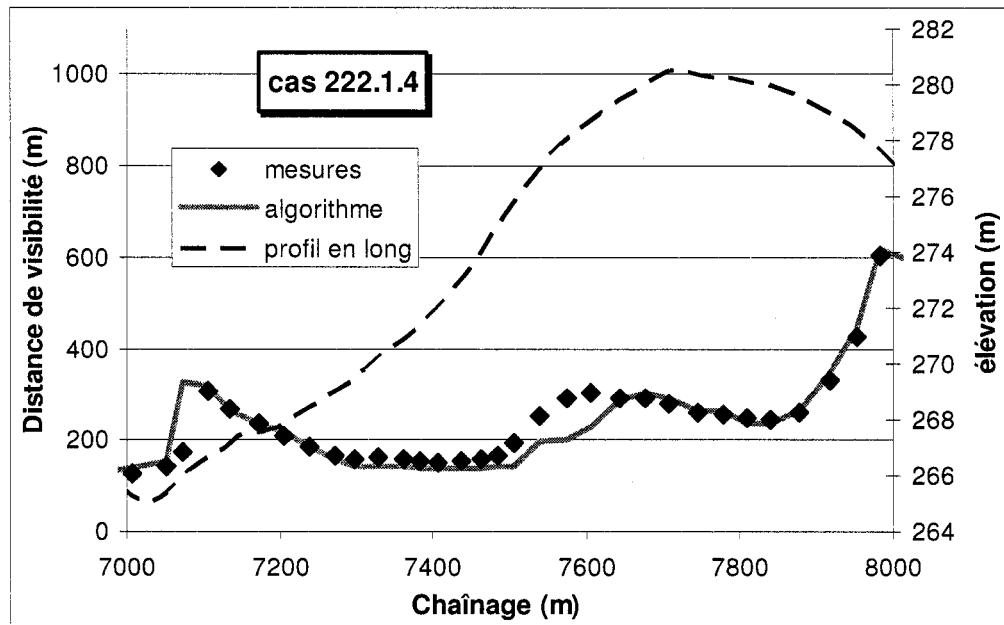


Figure 9-14 Cas 222.1.4, hauteur d'œil pratiquée trop grande

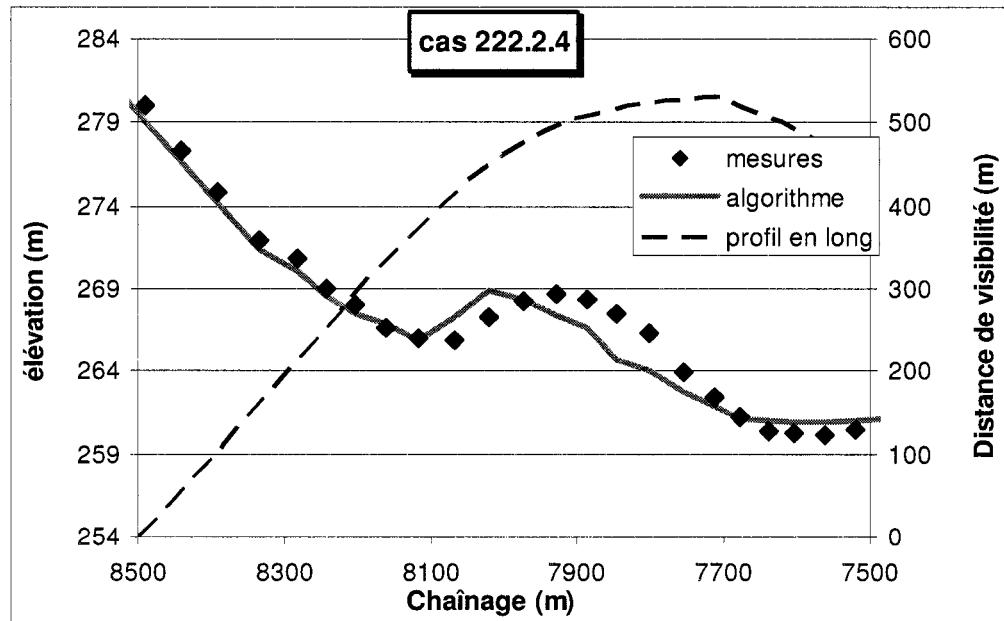


Figure 9-15 Cas 222.2.4, hauteur d'œil pratiquée trop faible

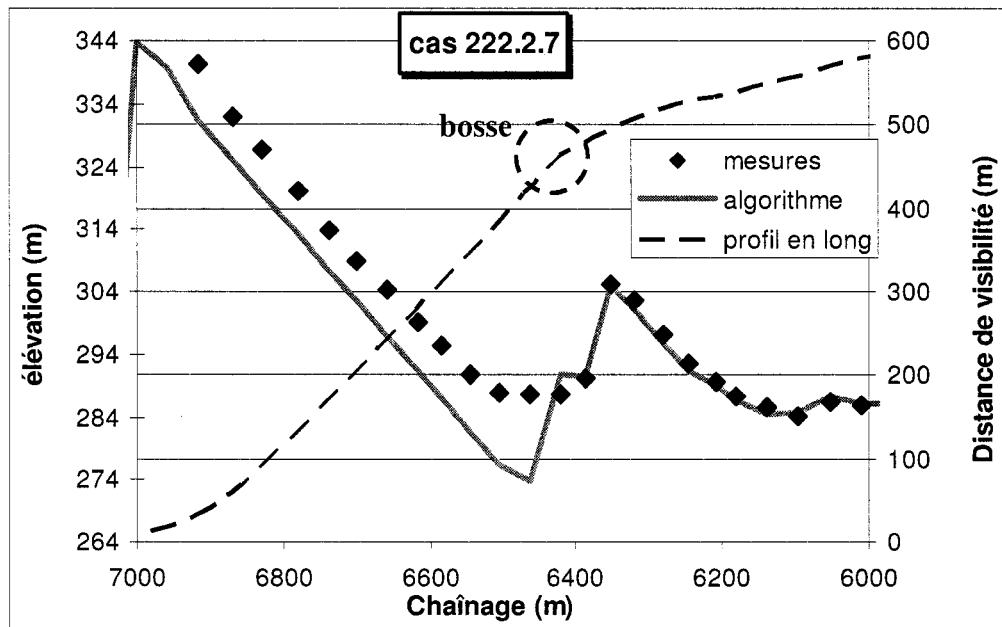


Figure 9-16 Cas 222.2.7, une bosse engendre un décalage vertical du profil

9.3.1.2.1 Erreurs non issues des contraintes de l'alignement

Il reste quatre erreurs qui n'ont pas été abordées dans les deux paragraphes précédents :

- Cas 101.1.3 : au chaînage 3+347, on constate une différence de plusieurs centaines de mètres entre la mesure et l'algorithme. Or il s'agit d'un point où la distance de visibilité est très grande (1000 mètres ou plus). Dans ces cas là, lors des mesures, il nous était impossible de relever la visibilité exacte (voir la remarque du paragraphe 9.2.1.3);
- Cas 101.2.3 : ce cas est identique au cas 101.1.3. Il s'agit donc d'un problème de visibilité à grande distance lors des mesures;
- Cas 101.2.5 : l'algorithme n'a pas déterminé la visibilité entre les chaînages 0+520 et 0+000 et a renvoyé la valeur 0. Or l'algorithme

renvoie « 0 » quand il n'a pas pu déterminer la visibilité car il ne dispose pas d'assez de points GPS. Ainsi dans ce cas, le rayon visuel n'est pas limité entre les chaînages 0+520 et le dernier point GPS disponible qui se trouve au chaînage 0+176. L'algorithme n'a donc pas pu déterminer la visibilité dans cette zone;

- Cas 329.1.4 : la trace GPS de la route 329 qui nous a été fournie présente une absence de point (x, y, z) sur une longueur d'environ 300 mètres à partir du chaînage 8+500, la visibilité calculée à cet endroit est donc supérieure à 300 mètres, bien que les mesures ont conduit à de faibles visibilités;

9.3.2 Comparaison des zones potentielles de dépassement obtenues

Nous avons constaté que l'algorithme proposé a permis de fournir au mieux les profils de visibilité des routes étudiées (à l'exception de certains cas particuliers liés à la qualité des traces GPS fournies). Or par le biais de la distance de visibilité minimum, les profils de visibilité fournissent directement les zones potentielles de dépassement. Nous allons ici comparer les zones potentielles de dépassement déterminées par l'algorithme à celles déterminées par les mesures.

Les tableaux disponibles en annexe F présentent les différentes zones potentielles de dépassement obtenues lors des mesures ou par l'algorithme. Pour ce faire, nous avons considéré une distance de visibilité minimum de 350 mètres (qui est la valeur prescrite par la norme pour des routes à 90 km/h), et une longueur minimum de zone de dépassement de 100 mètres.

L'algorithme a indiqué 24 zones potentielles tandis que les mesures en fournissent 25. Les 24 zones de l'algorithme se retrouvent parmi les 25 des mesures (c'est-à-dire que

dans les deux cas, il existe une zone située au même endroit), mais il existe des différences de position entre les débuts et fins de zones. Nous avons calculé pour chaque début et fin de zone l'écart (en mètres) entre les données de l'algorithme et des mesures. La Figure 9-17 présente la distribution de ces écarts. (Nous avons choisi des classes de 10 mètres pour la représentation). Pour le début des zones, la moyenne des écarts est de 15 mètres pour un écart type de 12 mètres. Pour la fin des zones, la moyenne est de 10 mètres et l'écart type de 6 mètres.

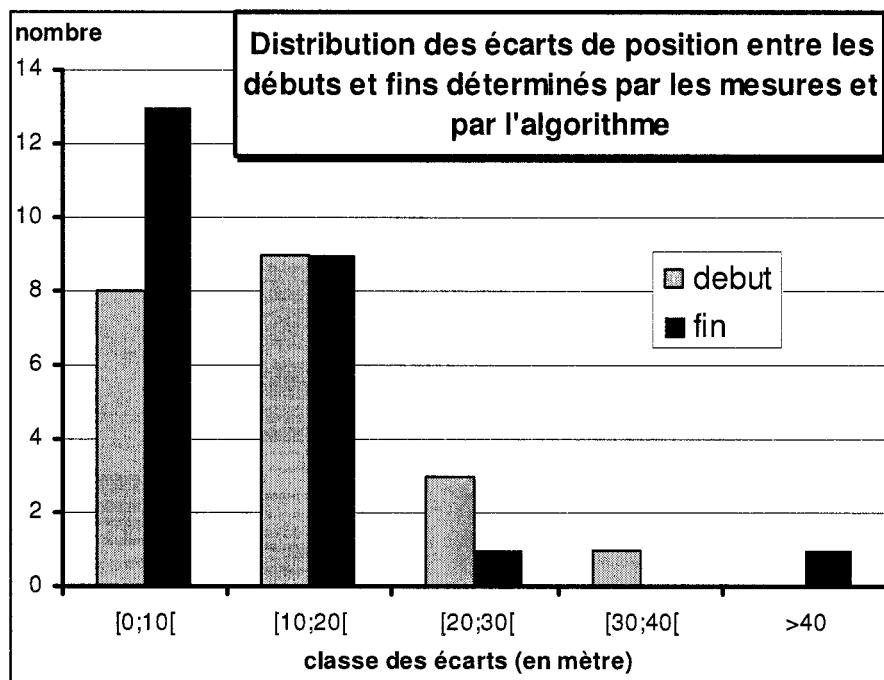


Figure 9-17 Distribution des écarts de position entre les débuts et fins des zones déterminées par les mesures et par l'algorithme

En considérant les pas de mesure pratiqués (entre 20 et 40 mètres), la précision des mesures, et le pas des relevés GPS (une vingtaine de mètres en moyenne), nous considérons que des écarts inférieurs à 40 mètres pour le début des zones et inférieurs à 20 mètres pour la fin des zones sont acceptables. Des 24 zones répertoriées, une seule ne répond pas à ces conditions. Il s'agit de la zone 2 de la route 147, sens 2. L'écart entre

mesures et algorithme de 111 mètres pour la fin de la zone potentielle est directement liée à l'erreur 247.2.1 (cf. Figure 9-10 Cas 147.2.1). Dans ce cas, il y avait un décalage transversale entre les deux profils, décalage due à une bosse verticale, qui n'avait pas été prise en compte lors des mesures.

La zone supplémentaire issue des mesures est située sur la route 147 dans le sens 2 et à partir du chaînage 4+770. À ce niveau de la route, nous avions constaté une différence des profils. Cette différence était due à une hauteur pratiquée trop élevée (cf. Figure 9-8 Cas 147.1.2). À cet endroit, l'algorithme a localisé une zone potentielle de dépassement de 94 mètres entre les chaînages 4+886 et 4+980. La différence est directement liée au cas 147.1.2.

Remarques : en considérant la précision de la localisation des zones qui dépend du pas du relevé GPS fourni, il est possible que des zones potentielles dont la longueur est légèrement supérieure à la limite de la norme (100 m dans notre cas), ne soit pas affichée par l'algorithme. Il est donc souhaitable de demander à l'algorithme d'afficher toutes les zones potentielles dont la longueur est supérieure à $LZ_{min}-\Delta$, où LZ_{min} est la longueur minimum d'une zone de dépassement selon la norme et Δ le pas de la trace GPS.

9.4 Conclusions de l'analyse

La comparaison entre données mesurées, données issues de l'algorithme et théorie, permet de tirer certaines conclusions quant à l'efficacité de l'algorithme :

- l'algorithme fournit une allure des profils de visibilité proche de la réalité, c'est-à-dire que l'ensemble des variations de la distance de visibilité qui ont été constatées lors des mesures, est reproduit par l'algorithme;

- concernant les visibilités dans les segments où les limites sont les contraintes horizontales, l'algorithme fournit d'excellents résultats. En effet dans les portions où la méthode pratique détermine les distances de visibilité exactes (à l'approche des virages), les distances calculées par l'algorithme sont identiques aux distances mesurées (avec un intervalle de confiance de 5%). Dans les portions où les mesures fournissent l'allure des profils mais des valeurs non exactes du fait des décalages de position (dans le virage et en sortie de virage), les résultats de l'algorithme sont similaires aux visibilités théoriques. Dans ces portions, l'algorithme fournit donc un meilleur profil que la méthode pratique;
- dans les zones où la visibilité est limitée par les courbes verticales, l'algorithme fournit globalement des valeurs qui respectent une erreur de 5% par rapport aux mesures. Cependant, il existe certains cas, pour lesquels les visibilités calculées et mesurées diffèrent largement. Si dans ces cas, nous avons émis certaines hypothèses (présence de bosses, hauteur des yeux, trace GPS peu précises en vertical), nous n'avons pas pu conclure sur les causes réelles de ces erreurs;
- les zones potentielles de dépassement déterminées par l'algorithme et par les mesures, sont en grande majorité identique. Les cas pour lesquels, nous avons constaté des différences importantes, sont issus des problèmes rencontrés dans la production des visibilités verticales;
- la précision des profils de visibilités établis par l'algorithme est directement liée à la précision des données GPS fournies, et également au pas de ce relevé GPS. Ainsi la marge d'erreur de la localisation des débuts et des fins de zones potentielles est identique à ce pas de relevé;

- les résultats produits par l'algorithme semblent être sécuritaires. En effet, nous n'avons pas constaté de cas pour lesquels l'algorithme propose une zone de dépassement qui n'ait pas été déterminée par les mesures.

Il est également possible de tirer quelques conclusions concernant les méthodes pratiques:

- la méthode pratique utilisée a été élaborée pour se conformer au mieux aux conditions de la norme tout en respectant certains impératifs; elle fournit donc une bonne estimation de la visibilité réelle. Cependant, le décalage de l'observateur, les imprécisions des hauteurs des yeux ou des cibles, et les conditions dans lesquelles les expériences ont été menées, n'ont pas permis d'obtenir des profils exacts. Si les erreurs dues au décalage de l'observateur peuvent être quantifiées et si l'on sait quand elles sont générées, les autres erreurs apparaissent aléatoirement et ne sont donc pas prévisibles;
- bien que nous n'ayons pas testé les autres méthodes pratiques, il nous est permis de penser que le même type d'erreurs intervient. Or dans ces méthodes, il existe en plus une erreur due à la position erronée de la cible, ce qui augmente le niveau d'imprécision;

Finalement, l'algorithme fournit des résultats satisfaisants concernant les distances de visibilité ou la localisation des zones de dépassement. Cependant, pour que les résultats soient optimaux, il est nécessaire de s'assurer de la qualité de la trace GPS, tant au niveau de la précision des points, qu'au niveau du pas de mesure.

L'algorithme représente un outil d'aide décisionnel intéressant et rapide pour la localisation des zones de dépassement et pour la connaissance des distances de visibilité le long des routes.

CHAPITRE 10 Guide d'utilisation de la méthode

L'analyse des résultats des expériences visant à confronter l'algorithme à des mesures réelles, a mis en évidence le potentiel de l'algorithme. Il est donc envisageable d'établir une méthode complète de détermination de la visibilité et de localisation des zones potentielles de dépassement basée sur l'utilisation de l'algorithme.

Le présent chapitre vise à expliciter cette méthode et à fournir les recommandations nécessaires à une utilisation optimale.

10.1 Obtention des données d'entrée

La trace GPS doit être relevé selon la méthode exposée dans le document « Guide des relevés numériques du réseau routier » (SAI Géomatique, 2002). Le pas de mesure doit être assez petit pour permettre une bonne précision de détermination des zones de dépassement. Dans le document de la SAI, il est recommandé d'enregistrer 1 point par seconde en roulant au maximum à 70 km/h, ce qui donne un pas de 19,5 mètres, ce qui permet d'associer précision des résultats et rapidité du relevé. De plus, il recommande l'utilisation « d'équipement ayant au minimum la capacité d'un positionnement à ± 1 mètre. Diminuer la vitesse de circulation à 40 km/h, permettrait d'avoir un pas d'une dizaine de mètres, ce qui serait la meilleure solution.

Les résultats obtenus sous forme de triplet (x_i, y_i, z_i) doivent être recollés au chaînage le long de la route pour obtenir les quadruplets nécessaire au programme (c_i, x_i, y_i, z_i) . Pour cela, il est possible d'utiliser les logiciels GOFT ou MapInfo, ou de déterminer les chaînages par linéarité entre deux points successifs à partir du chaînage de début c_0 :

chaînage initial = c_0

puis : $c_{i+1} = c_i + \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$

Si le pas de mesure est trop grand cette méthode n'est pas recommandée.

Les données constantes sont issues des valeurs de la norme (hauteur de l'œil et de la cible, position de l'observateur et de la cible, visibilité minimum, longueur minimum) ou de relevé sur la route (largeur des voies et accotements).

10.2 Présentation du programme dans l'environnement Excel

L'algorithme est programmé en langage VBA et est utilisable à partir de l'environnement Excel®.

Ce fichier est composé de 5 feuilles.

La première « Données d'entrées » sert à rentrer les données sous forme de liste. Elle est composée de 7 colonnes : chaînage, x, y, z, largeur de voie, largeur d'accotement droit et largeur d'accotement gauche. Le bouton à cliquer (« Calculer ») pour démarrer le programme se trouve également sur cette feuille.

La deuxième « DV sens 1 », et la quatrième feuille « DV sens 2 », servent à afficher les résultats obtenus par l'algorithme. La première pour le sens 1 (sens des chaînages croissants) et la seconde pour le sens 2 (sens des chaînages décroissants). Ces deux feuilles sont construites de manière identique et comportent 11 colonnes.

La troisième « Profil de visibilité sens 1 », et la cinquième « profil de visibilité sens 2 », sont des graphiques qui présentent les profils de visibilité dans les deux sens de circulation.

10.3 Entrées des données nécessaires et lancement du calcul

Pour pouvoir calculer les distances de visibilité et les débuts et fins de zones de dépassement, l'algorithme prend en compte deux types d'entrées : des listes et des données constantes (cf. Figure 6-1).

Les listes sont rentrées par l'utilisateur depuis la feuille « Données d'entrées ». Il s'agit d'entrer la trace GPS et les données affiliées (largeurs de voie et d'accotements). La liste des chaînages dont les coordonnées sont connues est rentrée dans la colonne 2, de manière croissante (c'est-à-dire en respectant le sens 1 : du chaînage le plus petit au

chaînage le plus grand). Dans les colonnes 3, 4 et 5, il faut rentrer les coordonnées GPS des chaînages (la coordonnées x dans la colonne 3, y en 4 et z en 5). Dans les colonnes 6, 7 et 8, il faut rentrer respectivement la largeur de la voie, la largeur de l'accotement droit, et la largeur de l'accotement gauche (Voir la figure suivante pour un exemple).

chaînage	x	y	z	largeur de la voie	largeur de l'accotement droit	largeur de l'accotement gauche
176.30	644845.9388	5352550.644	263.180664	3.50	3.00	3.00
190.40	644848.6854	5352564.473	263.446869	3.50	3.00	3.00
204.69	644851.5752	5352578.473	263.522552	3.50	3.00	3.00
219.31	644854.5814	5352592.773	263.317871	3.50	3.00	3.00
234.27	644857.6784	5352607.414	263.268646	3.50	3.00	3.00
249.52	644860.783	5352622.339	263.290649	3.50	3.00	3.00
265.00	644864.0725	5352637.465	263.395172	3.50	3.00	3.00
280.65	644867.4597	5352652.744	263.55896	3.50	3.00	3.00
296.40	644870.7877	5352668.14	263.83847	3.50	3.00	3.00
312.17	644874.0213	5352683.574	264.337067	3.50	3.00	3.00
327.91	644877.2746	5352698.982	264.884064	3.50	3.00	3.00
343.69	644880.5584	5352714.409	265.389069	3.50	3.00	3.00
359.48	644883.9205	5352729.837	265.913269	3.50	3.00	3.00
375.30	644887.2045	5352745.321	266.424957	3.50	3.00	3.00
391.15	644890.5226	5352760.819	266.980865	3.50	3.00	3.00
407.04	644893.8676	5352776.344	267.475372	3.50	3.00	3.00
422.97	644897.1881	5352791.93	267.957458	3.50	3.00	3.00
438.95	644900.563	5352807.548	268.470367	3.50	3.00	3.00
454.95	644903.9236	5352823.195	268.876556	3.50	3.00	3.00
471.02	644907.259	5352838.912	269.177856	3.50	3.00	3.00

Figure 10-1 Les 7 colonnes de la feuille « Données d'entrées »

Les données à entrer dans ces listes doivent être sous forme numérique.

Les données constantes sont à rentrer par l'utilisateur à partir d'une boîte de dialogue VBA (cf. Figure 10-2). Cette boîte apparaît quand l'utilisateur clique sur le bouton « calculer » qui se trouve dans le coin en haut à gauche de la feuille « Données d'entrées ». Dans cette boîte, il y a 6 champs à remplir par l'utilisateur et 1 choix à faire (Sur la figure suivante les 6 champs sont numérotées de 1 à 6, et le choix porte le numéro 7) :

1. hauteur de l'œil de l'observateur: cette hauteur est comptée en mètres à partir du sol. Dans la norme actuelle, il s'agit de 1,05 m ;
2. hauteur de la cible: cette hauteur est comptée en mètres à partir du sol. Dans la norme actuelle, il s'agit de 1,15 m ;
3. écartement de l'observateur: il s'agit de la distance transversale en mètres entre la position de l'observateur et l'axe de la route. Cette distance est positive quand l'observateur est à droite de l'axe central. Dans la norme actuelle l'observateur est placé en milieu de voie de droite (donc pour une voie de 3,5 m de large, l'écartement est de 1,75 m) ;
4. écartement de la cible : il s'agit de la distance transversale en mètres entre la position de la cible et l'axe de la route. Cette distance est positive quand la cible est à gauche de l'axe central. Dans la norme actuelle, la cible est placée en milieu de voie de gauche (donc pour une voie de 3,5 m de large, l'écartement est de 1,75 m) ;
5. distance de visibilité minimale : il s'agit de la distance de visibilité minimale en mètres pour pouvoir mettre en place une zone de dépassement. À 90 km/h, cette distance est de 350 mètres ;
6. longueur minimum d'une zone de dépassement: cette valeur est exprimée en m et selon la norme actuelle vaut 100 mètres ; du fait de la précision de la localisation des zones, il est préférable de rentrer une valeur inférieure à cette longueur minimum, pour que le programme affiche tous les cas limites (par exemple il est préférable de rentrer 90 plutôt que 100 m) ;

7. pas de détermination de la visibilité : le programme calcule la visibilité tous les X mètres selon le choix de l'utilisateur. C'est ici que celui-ci choisit la valeur de X parmi 4 valeurs (10 m, 15 m, 20 m ou 30 m).

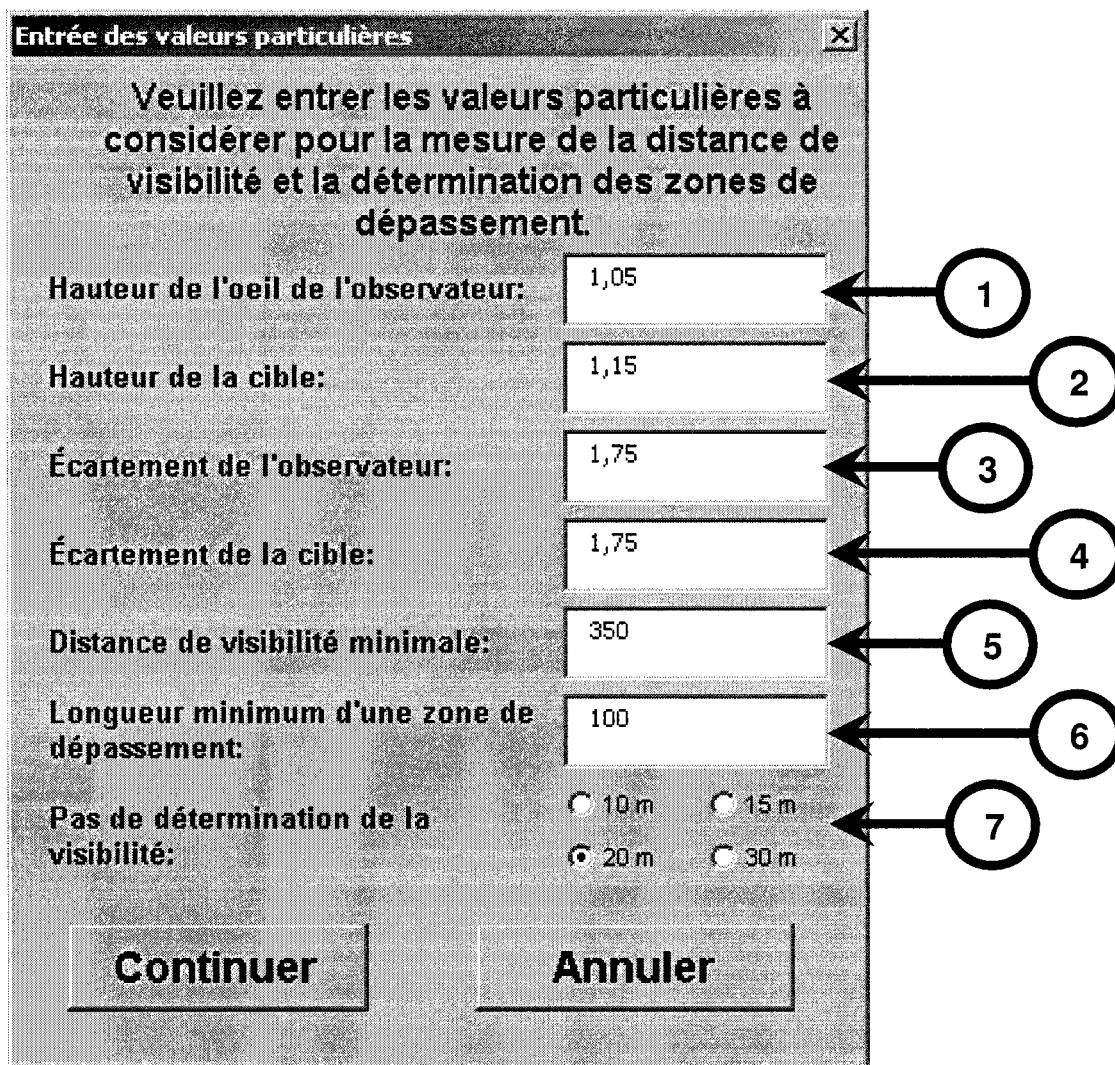


Figure 10-2 Boîte de dialogue d'entrée des données constantes du programme (les valeurs par défaut sont celles indiquées sur la figure)

Une fois les données entrées dans la boîte de dialogue, l'utilisateur peut choisir d'annuler le calcul (bouton « annuler »). Cette action ne modifie pas les données entrées dans la boîte de dialogue.

Pour avancer dans le programme, l'utilisateur doit cliquer sur « Continuer ». Cette action lance le test des données rentrées, ferme la boîte de dialogue et en ouvre une seconde (voir Figure 10-4). Le test des données vise à vérifier si chacune des données rentrées par l'utilisateur dans les 6 champs est sous le bon format (c'est-à-dire format numérique), si tel n'est pas le cas, un message d'erreur est affiché. Sinon, la boîte de dialogue est fermée et une seconde est ouverte : "choix des résultats optionnels à afficher".

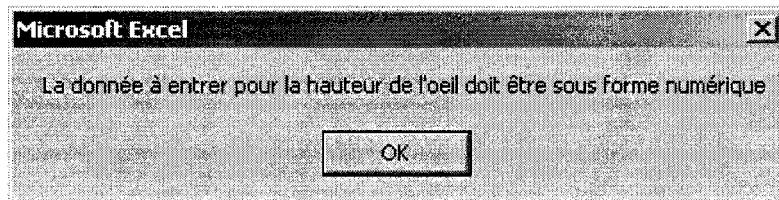


Figure 10-3 Exemple de message d'erreur pour la première boîte de dialogue

À partir de la seconde boîte de dialogue, l'utilisateur choisit les résultats optionnels que le programme doit afficher.

Quel que soit le choix de l'utilisateur, le programme va afficher la liste des visibilités à pas constant, le profil de visibilité, et les zones potentielles de dépassement (chaînage de début, chaînage de fin et longueur) dans les deux sens. Mais l'utilisateur peut choisir d'afficher la liste des visibilités en chaque point GPS et les limites à la visibilité correspondante (verticale ou horizontale), la liste des visibilités verticales, et la liste des visibilités horizontales pour les deux sens. Pour faire son choix, il suffit de cocher ou non, les trois options proposées (plusieurs options peuvent être sélectionnées).

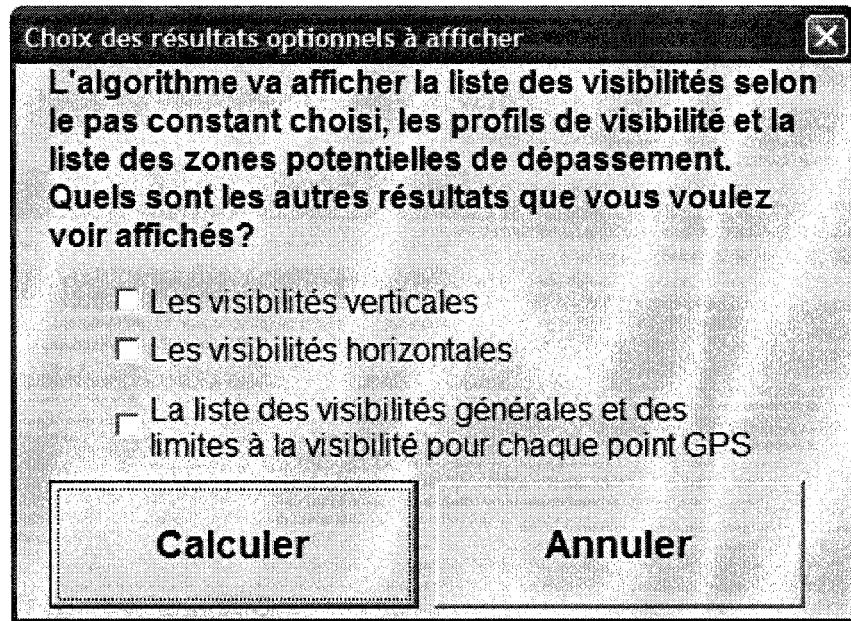


Figure 10-4 Boîte de dialogue "choix des résultats optionnels à afficher"

L'utilisateur peut alors choisir de quitter le programme (bouton « Annuler ») ou de lancer le programme proprement dit, en cliquant sur le bouton « calculer ». Le programme va alors commencer à tester le format de chacune des données rentrées par l'utilisateur dans la feuille « Données d'entrée ». Ces données doivent être sous format numérique, si tel n'est pas le cas, un message d'erreur sera affiché à l'écran, indiquant la donnée non conforme par le biais du nom de la colonne et le numéro de la ligne. De plus la cellule active deviendra celle qui contient une erreur.

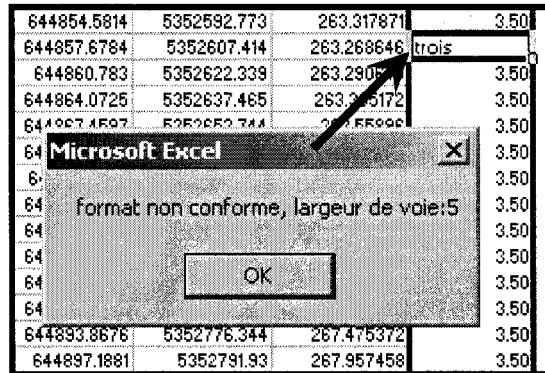


Figure 10-5 Exemple de message d'erreur affiché par le programme

Si aucun message d'erreur n'apparaît, le programme procède au calcul. Une fois le calcul terminé, les résultats sont affichés dans les 4 feuilles Excel correspondantes et un message est affiché à l'écran. Ce message indique le temps qui a été nécessaire au calcul, et à l'affichage des résultats.

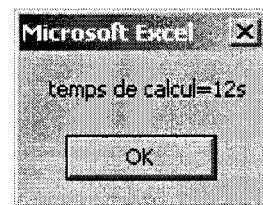


Figure 10-6 Message indiquant la fin du calcul

Après avoir cliqué sur le bouton « OK », la feuille ouverte est « DV sens 1 » où les résultats numériques dans le sens 1, sont affichés.

10.4 Présentation des résultats

Comme il est mentionné précédemment, l'affichage des résultats se fait dans 4 feuilles du fichier Excel, soit 2 feuilles par sens de circulation. Pour les deux sens, la présentation des résultats est similaire.

Dans la feuille « DV sens i » (avec $i=1$ ou 2), les résultats sous forme numérique ou texte sont affichés. Les valeurs numériques sont en mètres. Cette feuille est composée de 5 tableaux :

1. Liste des visibilités à pas constant : ce tableau formée de deux colonnes (« Chaînage » dans la colonne de gauche et « Distance de visibilité » dans la colonne de droite), présente la liste des visibilités selon le pas choisi par l'utilisateur. Ainsi pour chaque chaînage, on connaît la visibilité correspondante :

Liste des visibilités à pas constant	
Chaînage	Distance de visibilité
180	105
190	401
200	391
210	375
220	355
230	334

Figure 10-7 Tableau « Liste des visibilités à pas constant » affiché par le programme

2. Marquage des zones de dépassement potentielles : ce tableau (de deux colonnes) présente les caractéristiques des zones de dépassement potentielles déterminées par l'algorithme. Dans la colonne de gauche (« Début et fin de zone ») sont indiqués les chaînages entre lesquels, la visibilité est suffisante pour mettre en place une zone de dépassement. Dans la colonne de droite (« Longueur de la zone »), la longueur de la zone est indiquée :

Marquage des zones de dépassement potentielles	
Début et fin de zone	Longueur de la zone
439	280
719	
1014	
1230	216

Figure 10-8 Tableau « Marquage des zones de dépassement potentielles » affiché par le programme

3. Visibilité aux points GPS : ce tableau présente la liste des distances de visibilité pour chaque chaînage dont les coordonnées GPS ont été entrées dans la feuille « Données d'entrée ». Ce tableau comporte trois colonnes. La première correspond aux chaînages, la seconde indique la distance de visibilité pour chaque chaînage, et la troisième indique si la visibilité est limitée par le tracé en plan (« h » est alors inscrit pour horizontal), ou le profil en long (« v » pour vertical). La Figure 10-9 présente un exemple de tableau de « Visibilité aux points GPS ». Par exemple, dans ce tableau, au chaînage 1+864, la distance de visibilité au dépassement est de 225 m et le profil en long est le facteur limitant à la visibilité (« v ») :

Visibilité aux points GPS		
Chaînage	Distance de visibilité	limite de visibilité
1780	174	h
1797	207	h
1813	275	h
1830	627	h
1847	259	v
1864	225	v
1880	209	v

Figure 10-9 Tableau « Visibilité aux points GPS » affiché par le programme

4. Visibilités horizontales : ce tableau présente les distances de visibilité aux points GPS pour le tracé en plan. Ces distances de visibilité sont celles calculées par l'algorithme en ne considérant que les obstacles visuels horizontaux:

Visibilités horizontales	
Chaînage	Distance de visibilité horizontale
312	1179
328	1213
344	1394
359	1379
375	1363

Figure 10-10 Tableau « Visibilités horizontales » affiché par le programme

5. Visibilités verticales : ce tableau présente les distances de visibilité aux points GPS pour le profil en long. Ces distances de visibilité sont celles calculées par l'algorithme en ne considérant que les obstacles visuels verticaux :

Visibilités verticales	
Chaînage	Distance de visibilité verticale
344	216
359	200
375	200
391	216
407	216
423	232

Figure 10-11 Tableau « Visibilités verticales » affiché par le programme

La feuille « Profil de visibilité sens i » ($i=1$ ou 2) présente le profil de visibilité le long de la route sur un graphique Excel. Ce profil est construit à partir du tableau « Liste des visibilités à pas constant ». Sur ce graphique, une droite horizontale représente la visibilité minimum pour installer une zone de dépassement.

10.5 Implantation des résultats sur la route

L'algorithme a fourni pour la route étudiée la localisation des zones potentielles de dépassement en indiquant les chaînages de début et de fin. Il ne s'agit que de zones potentielles car la détermination n'a tenu compte que de la visibilité disponible. Or d'autres facteurs entrent en compte dans l'implantation de zones de dépassement (présence de croisement de route ou de passages à niveau,...). Il est donc nécessaire de récolter plus d'informations sur la route pour implanter les zones.

De plus, si la précision de la détermination de la fin de la zone est bonne, celle de la détermination du début dépend de la précision et du pas de la trace GPS utilisée (cf. 6.4 Localisation des zones de dépassement et espacement des points GPS). Ainsi bien que l'algorithme fournisse une bonne idée de la localisation, et des chaînages de début et de fin proches de la réalité, il est nécessaire de s'assurer de la précision par une vérification sur le terrain.

Pour se faire, il est possible d'utiliser la méthode « en marchant » (cf. 2.1.1 La méthode en marchant) entre les chaînages ($c_{deb} - \Delta$) et c_{deb} pour déterminer le début exact de la zone (où c_{deb} est le chaînage de début fourni par l'algorithme et Δ est le pas de relevé GPS). Cependant la vérification doit être faite en adoptant les données de position et de hauteurs indiquées dans la norme :

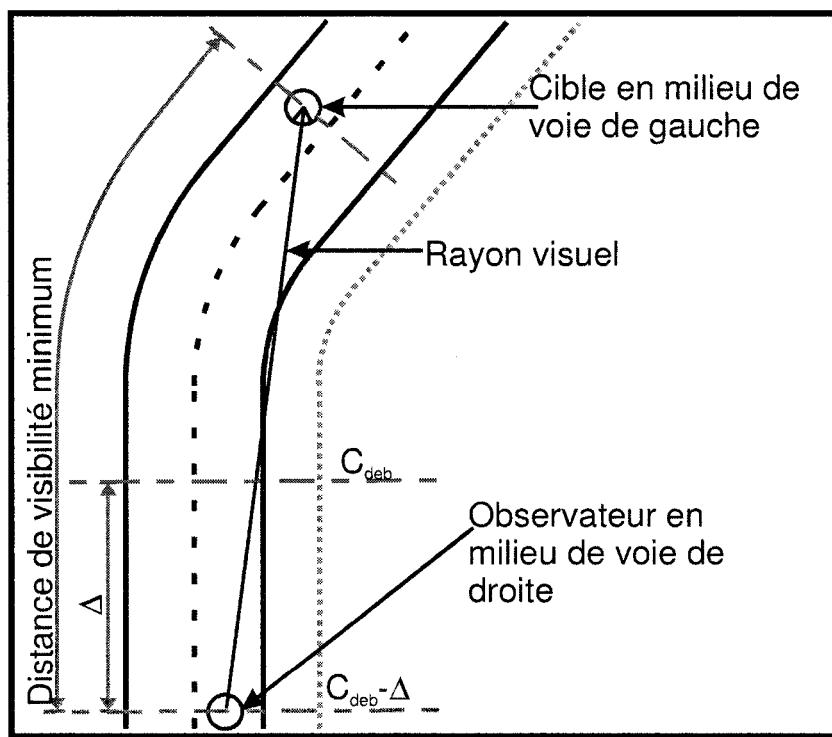


Figure 10-12 Méthode de vérification de l'implantation des zones

Ainsi il s'agit de parcourir la courte distance entre ($c_{deb} - \Delta$) et c_{deb} en milieu de voie de droite, et de déterminer en quel endroit la visibilité minimum devient disponible en observant une cible positionnée en milieu de voie de gauche, et en tenant une distance constante entre observateur et cible (cette distance à maintenir est la distance de visibilité minimum). Cette détermination étant rapide (quelques minutes), il est envisageable de fermer la route pendant le temps de vérification.

Conclusions, recommandations et perspectives

Conclusions et recommandations

À travers une revue de la littérature, les carences des méthodes habituelles ou référencées de détermination des zones de dépassement ont été mises en évidence, et de ce fait une problématique a été dégagée.

Ainsi, les méthodes, à détermination directe, ne répondent pas aux conditions de la norme quant aux positions des différents acteurs de la mesure de la visibilité. Elles ne permettent pas de remises à jour, et n'offrent pas non plus de l'information concernant la visibilité disponible. De plus, les résultats sont tributaires des conditions dans lesquelles les mesures se déroulent.

Les méthodes calculatoires proposent des résultats intéressants mais sont peu pratiques, puisque les données nécessaires pour les utiliser ne sont pas disponibles aisément.

Le but du travail de recherche présenté dans ce mémoire a donc été de développer une nouvelle méthode de localisation des zones de dépassement qui réponde aux attentes de la problématique et aux besoins des gestionnaires de la route.

Ainsi, à partir de réflexions sur différents principes de calculs potentiels, d'études théoriques sur les distances de visibilité disponibles sous certaines conditions, de comparaisons pratiques issues d'une campagne de cueillette de données, nous proposons ici une méthode calculatoire qui fournit l'emplacement des zones de dépassement en utilisant les profils de visibilité. L'objectif a alors été atteint, puisqu'en effet :

- la méthode est calculatoire et utilise un algorithme codé en VBA à partir d'une plateforme Excel, ce qui lui confère rapidité et simplicité d'utilisation;
- les données à entrer sont simples à obtenir, puisqu'il s'agit de traces GPS de la route (ces traces sont déjà disponibles dans la plupart des DT du Québec), et des valeurs particulières dictées par la norme;

- les vérifications qui ont été conduites pour valider l'algorithme ont mis en évidence l'efficacité de la méthode puisque les résultats sont en accord tant avec les données issues d'expérience sur les routes du Québec, qu'avec les études théoriques préalablement conduites;
- la mise à jour est simple puisqu'il suffit d'exécuter le programme avec les nouvelles conditions;
- les résultats qui sont produits par la méthode, fournissent un ensemble d'informations relatives aux zones de dépassement et à la visibilité disponible. Ainsi, l'algorithme donne non seulement les zones potentielles de dépassement sur la route étudiée, mais il établit également le profil de visibilité le long de cette route et indique quelle est la nature des obstructions visuelles (c'est-à-dire s'il s'agit d'une limitation de visibilité provenant des courbes verticales ou horizontales).

Cependant, les expériences menées ont également permis de poser certaines limites à la méthode. Ces limites ne concernent pas directement l'algorithme mais plutôt ses données d'entrée. En effet, le potentiel de l'algorithme est étroitement lié à la qualité des traces GPS utilisées. Pour obtenir de bons résultats (précision de la localisation des zones et exactitude des profils de visibilité), il est nécessaire d'utiliser des traces GPS qui répondent à certains critères : elles doivent être précises (précision relative de l'ordre du mètre pour le tracé en plan (coordonnées terrestres x, y) et d'une dizaine de centimètres pour le profil en long (coordonnée z)) et leur pas de relevé doit être relativement constant et de l'ordre d'une vingtaine de mètres au maximum.

En outre, si le programme fournit la localisation des zones potentielles de dépassement, leur implantation doit être associée à des vérifications visuelles sur le terrain. En effet, l'algorithme ne prend en compte que la distance de visibilité minimum comme seul critère de détermination et ne fournit une précision que de l'ordre du pas de la trace GPS

pour le début des zones. Il faut donc également prendre en compte les autres critères comme la présence de jonctions de route (ce critère pourra d'ailleurs être ajouté à l'algorithme ultérieurement), et vérifier visuellement les débuts exacts des zones avant l'implantation.

Dans ces conditions, la méthode proposée est un bon outil décisionnel à l'attention des gestionnaires de la route. Il leur permet une localisation rapide des zones potentielles de dépassement et leur offre une bonne connaissance des conditions de visibilité.

Perspectives

Dans ce document, nous avons centré l'étude sur la localisation des zones potentielles de dépassement et la détermination des distances de visibilité de dépassement sur les routes à deux voies contiguës et l'algorithme a été construit en conséquence.

Cependant, son utilisation à d'autres fins peut être envisagée. Ainsi, il serait possible de l'utiliser pour déterminer les distances de visibilité d'arrêt ou d'anticipation en modifiant la position et la hauteur de la cible, d'autres modifications n'étant pas nécessaires. Il est également envisageable d'étendre son utilisation aux routes à plus de deux voies, en écartant les positions transversales, ou à des cas particuliers, comme la visibilité des poids lourds.

Bibliographie

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). 1940. *A Policy on Criteria for Marking and Signing No-Passing Zones on Two and Three Lane Roads*. AASHTO, Washington, D.C., 9 pages.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). 1940. *A Policy on Sight Distance for Highways*. AASHTO, Washington, D.C., 26 pages.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). 1974. *Highway Design and Operational Practices Related to Highway Safety*. AASHTO, Washington, D.C. 92 pages.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). 1990 “Decision sight distance”. AASHTO, Washington, D.C., *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, pp 125-127.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). 1994. *A policy on geometric design of highways and streets*. AASHTO, Washington, D.C.

BAASS, K. 1993. *Précis sur la signalisation routière au Québec*. Association québécoise du transport et des routes. 699 pages.

BAASS, K. Février 1996. *Étude comparative des normes de visibilité d'arrêt, d'anticipation, de dépassement et aux carrefours*. Centre de Développement Technologique (C.D.T.), École Polytechnique de Montréal, Projet C.D.T. P1958.

BAASS, K. Automne 2003. *Éléments de base de la conception des routes*, notes du cours CIV 4602, École Polytechnique de Montréal.

BOTHA, J.L., ZENG, X., et SULLIVAN, E.C. 1993. "Comparison of performance of TWOPAS and TRARR models when simulating traffic on two-lane highways with low design speeds". *Transportation Research Record 1398*. pp. 7-16.

BROWN R.L, HUMMER J.E. 1995. "Determining the Best Method for Measuring No-Passing Zones". *Transportation Research Record 1701*. Pages 61-67.

BROWN, R.L. 1996. *Procedure for Establishing No Passing Zones*. Research project 23241-95-4 Center of Transportation Engineering Studies. Department of Civil Engineering North Carolina State University, Raleigh, NC, 49 pages.

EASA, S.M., ABD EL HALIM, A.O. and HASSAN, Y. 1996. "Sight distance evaluation on complex highway vertical alignments". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.23, pp. 577-586.

EL AMRI, H. Mai 2004. *Étude du marquage axial et analyse des accidents de dépassement sur les routes à deux voies contiguës*. 213 pages. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). 1991. *Manual on Uniform Traffic Control Devices*. Federal Highway Administration, Washington D.C.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Mars 2003. *IHSMD user's Manual*. IHSMD Version 2.05b, Public 2003 Release . Federal Highway Administration, Washington D.C.

FITZPATRICK, K et al. Janvier 1998. "Driver eye and vehicle heights for use in geometric design". *Transportation Research Record 1612*, pp. 1-9.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC.2003. *Code de la sécurité routière*. Québec : Éditeur officiel du Québec.

http://publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/C_24_2/C24_2.html (page consultée le 13 Novembre 2003).

HARMIGNIES C. Avril 2002. *Distance de visibilité sur le profil en long*. Projet de fin d'études. École Polytechnique de Montréal. 22 pages + annexes.

HASSAN, Y. et al. 1998. "Highway alignment: Three-dimensional problem and three-dimensional Solution". *Transportation research record 1612*. pp. 17-25.

HASSAN, Y. et al. 1997. "Automation of determining passing and no-passing zones on two-lane highways". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol.24, 1997, pp. 263-275.

HASSAN, Y. et al. 1997. "Application for automated determination of passing and no-passing zones: a case study". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.24, pp. 276-287.

HASSAN, Y., EASA, Said M. et ABD EL HALIM A.O. 1996. "Passing sight distance on two-lane highways: review and revision"

HASSAN, Y. et al. 1996. "Analytical model for sight distance analysis on 3-D highway alignments". *Transportation Research Record 1523*, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-10.

HASSAN, Y. et al. 1995. "Design considerations for passing sight distance and passing zones". International symposium on highway geometric design practices, Boston, 1995. 13 pages.

JACQUOT, M. Mai 2004. *Détermination microscopique de l'offre et de la demande de dépassement pour la détermination du ratio dépassements désirés/dépassements effectués sur route rurale*. 310 pages. Mémoire de maîtrise en Génie Civil. École Polytechnique de Montréal.

LEIMAN, L., ARCHILLA, A.R. et MAY, A. Juillet 1998. "TWOPAS Model Improvements". *NCHRP PROJECT 3-55: Capacity and quality of service of two-lane highways*. 91 pages + annexes.

LEROUX, D. et BEAUDOIN, M.. Avril 2003. *Développement d'un outil de marquage des zones de dépassement*. [Trois-Rivières, Québec] : Géotran : Ministère des Transports du Québec : Université du Québec à Trois-Rivières. 56 pages.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. *Guide de la codification et du mesurage du réseau routier*. Gouvernement du Québec, Ministère des Transports. Mai 2002.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. «Normes Ouvrages routiers, tome V, Signalisation Routière Volume 2, Chapitre 6, pages 15 et 16 ». avril 2001. et « Normes-Ouvrages routiers, tome V, Signalisation Routière Volume 2, Chapitre 6, numéros 63 et 64 ». Juin 2002.

RUSTOM, M. Mai 2004. *L'analyse du dépassement sur les routes à deux voies contigües à l'aide d'un logiciel de simulation*. Rapport de projet de maîtrise. École Polytechnique de Montréal. 100 pages.

SAI GÉOMATIQUE (Solution Administrative et Informatique). *Guide des relevés numériques du réseau routier*. PROJET 2- Phase 2. Mai 2002.

ST JOHN, A.D. et KOBETT, D.R. 1978. "Grade effects on traffic flow stability and capacity". *Transportation Research Board. NCHRP Report 185*. 110 pages.

TREMBLAY, M. 1979. *Inventaire de la visibilité aux dépassements et des caractéristiques géométriques des routes : procédures des relevés*. Québec : Gouvernement du Québec, Ministère des transports, Direction Générale du Génie, Services des relevés techniques. 51 pages.

WEBER, W.G. Septembre 1978. "Passing sight distance and no-passing zones: present practice in the light of needs for revision". *ITE Journal*, Septembre 1978, pp. 14-18.

Annexes

Annexe A:Détails des calculs utilisés pour la détermination théorique des distances de visibilité disponible dans une courbe horizontale

Les 3 configurations utilisées

Un virage est découpé en trois portions :

- « à l'approche du virage » : l'observateur est sur la ligne droite précédent le virage et la cible est dans le virage;
- « dans le virage » : observateur et cible sont dans le virage;
- « sortie de virage » : l'observateur est dans le virage et la cible est sur la ligne droite suivant le virage.

Notations utilisées pour le calcul des visibilités

Nous avons schématisé une route à deux voies par 6 courbes parallèles :

$-\Delta \cup \Gamma$ est la courbe représentant la ligne médiane;

$-\Delta_1 \cup \Gamma_1$ est la courbe qui supporte la position de l'observateur;

$-\Delta_2 \cup \Gamma_2$ est la courbe qui supporte la cible de gauche;

$-\Delta_2 \cup \Gamma_2$ est la courbe qui supporte la cible de droite;

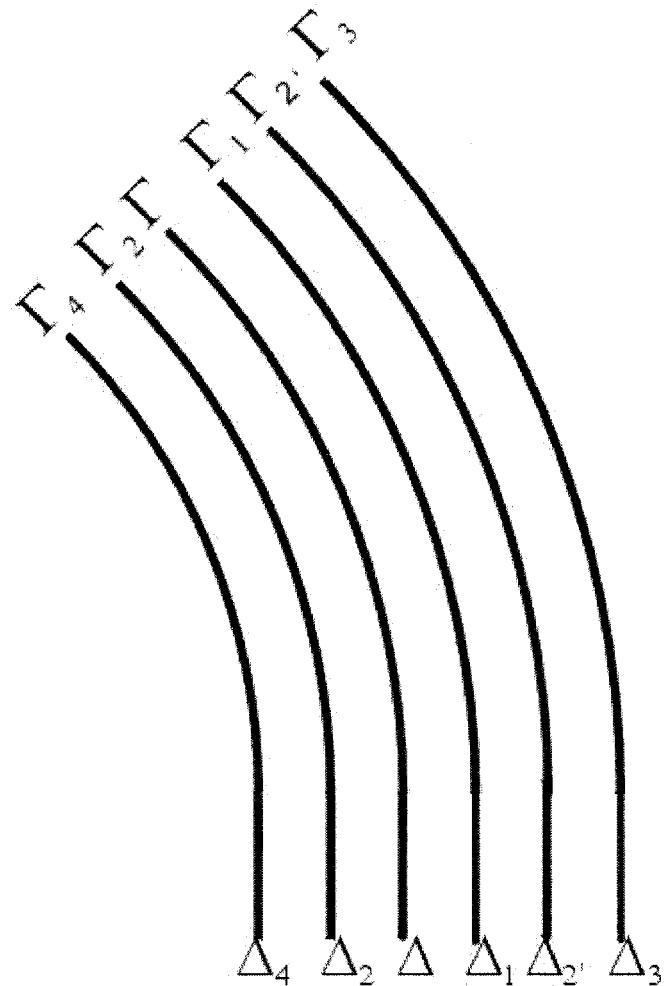
$-\Delta_3 \cup \Gamma_3$ est la courbe qui représente la limite de visibilité à droite (généralement l'accotement);

$-\Delta_4 \cup \Gamma_4$ est la courbe qui représente la limite de visibilité à gauche (généralement l'accotement);

$-\Gamma_i$ est un arc de cercle de rayon R_i ;

$-\Delta_i$ est une droite tangente à Γ_i au point de jonction.

Ces 6 courbes sont représentées sur la figure de la page suivante.



Schématisation d'une route à 2 voies par 6 courbes

Les points utilisés sont :

-($x_1; y_1$) sont les coordonnées de l'observateur dans la portion « à l'approche du virage »;

-($x'_1; y'_1$) sont les coordonnées de l'observateur dans la configuration « dans le virage »;

-($x''_1; y''_1$) sont les coordonnées de l'observateur dans la configuration « sortie de virage »;

$-(x_2; y_2), (x'_2; y'_2)$ et $(x''_2; y''_2)$ sont les coordonnées des points de tangence entre le rayon visuel issue de l'observateur, et la courbe représentant la limite de visibilité, pour les différentes positions de l'observateur;

$-(x_3; y_3), (x'_3; y'_3)$ et $(x''_3; y''_3)$ sont les coordonnées des points représentant la position de la cible à gauche de la route, pour les différentes positions de l'observateur;

$-(x_4; y_4), (x'_4; y'_4)$ et $(x''_4; y''_4)$ sont les coordonnées des points représentant la position de la cible à droite de la route, pour les différentes positions de l'observateur;

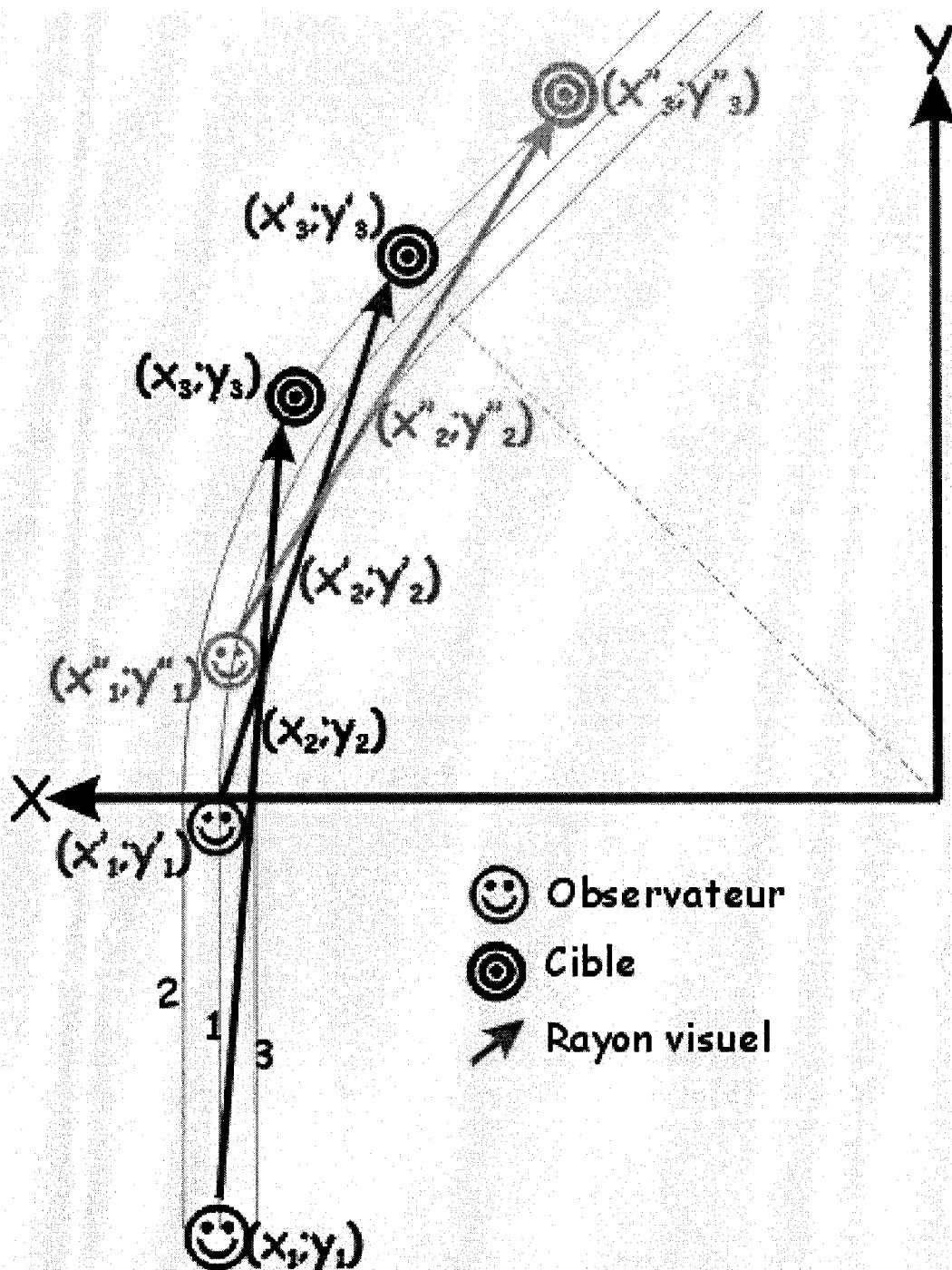
Les rayons visuels issus de l'observateur portent les noms RV, RV' et RV'' selon les cas.

Remarque sur les calculs :

Nous avons utilisé deux hypothèses pour les calculs :

- Entre une courbe et une ligne droite, il n'y a pas de transition comme une clothoïde;
- Le virage est assez long pour que les 3 configurations soient possibles.

Virage à droite



Visibilité virage à droite

À l'approche du virage

Coordonnées de $(x_1; y_1)$:

$$(x_1; y_1) \in \Delta_1$$

$$x_1 = R_1$$

$$y_1 = y$$

Équation du rayon visuel RV issu de $(x_1; y_1)$ tangent à Γ_3 en $(x_2; y_2)$

$$RV : y = a * x + b$$

Comme cette droite est tangente à Γ_3 en $(x_2; y_2)$, elle est perpendiculaire au rayon de Γ_3 passant par

$$(x_2; y_2), \text{ on a alors : } a = -\frac{x_2}{y_2}$$

et RV passe par $(x_1; y_1)$, donc :

$$b = y_1 + x_1 * \frac{x_2}{y_2}$$

ce qui nous donne pour équation de RV :

$$RV : y = -\frac{x_2}{y_2} x + \left(y_1 + x_1 * \frac{x_2}{y_2} \right)$$

Coordonnées de $(x_2; y_2)$

$$(x_2; y_2) \in \Gamma_3$$

$$(x_2; y_2) \in RV$$

$$(x_2; y_2) \text{ est solution du système : } \begin{cases} y_2^2 + x_2^2 = R_3^2 \\ y_2 = -\frac{x_2}{y_2} + y_1 + x_1 \frac{x_2}{y_2} \end{cases}$$

$$\text{Système qui a pour solution : } \begin{cases} x_2 = \frac{-R_3 * (y_1 * \sqrt{R_1^2 - R_3^2} - R_3 R_1)}{R_1^2} \\ y_2 = \sqrt{R_3^2 - x_2^2} \end{cases}$$

Coordonnées de $(x_3; y_3)$:

$$(x_3, y_3) = RV \cap \Gamma_2$$

$$(x_3, y_3) \text{ est donc solution du système : } \begin{cases} y_3 = ax_3 + b \\ y_3^2 + x_3^2 = R_2^2 \end{cases}$$

qui a pour solution :

$$\begin{aligned} x_3 &= -\frac{\left(\sqrt{(a^2+1)*R_2^2 - b^2}\right) + a * b}{a^2 + 1} \\ y_3 &= \sqrt{R_2^2 - x_3^2} \end{aligned}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV_3 = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}$$

Coordonnées de (x₄; y₄) :

$$(x_4, y_4) = RV \cap \Gamma_2$$

$$(x_4, y_4) \text{ est donc solution du système : } \begin{cases} y_4 = ax_4 + b \\ y_4^2 + x_4^2 = R_2^2 \end{cases}$$

qui a pour solution :

$$\begin{aligned} x_4 &= -\frac{\left(\sqrt{(a^2+1)*R_2^2 - b^2}\right) + a * b}{a^2 + 1} \\ y_4 &= \sqrt{R_2^2 - x_4^2} \end{aligned}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV_4 = \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}$$

Différence de distance de visibilité linéaire :

$$diffDV = DV_3 - DV_4$$

Dans le virage

Coordonnées de (x'₁; y'₁) :

$$x'_1 = R_1$$

$y'_1=0$

Équation du rayon visuel RV' issu de $(x'_1; y'_1)$ tangent à Γ_3 en $(x'_2; y'_2)$

$$RV': y = a'x + b'$$

Comme cette droite est tangente à Γ_3 en $(x'_2; y'_2)$, elle est perpendiculaire au rayon de Γ_3 passant par

$$(x'_2; y'_2), \text{ on a alors : } a' = -\frac{x'_2}{y'_2}$$

et RV' passe par $(x'_1; y'_1)$, donc :

$$b = R_1 * \frac{x_2}{y_2}$$

ce qui nous donne pour équation de RV' :

$$RV': y = -\frac{x'_2}{y'_2} * (x - R_1)$$

Coordonnées de $(x'_2; y'_2)$

$$(x'_2; y'_2) \in \Gamma_3$$

$$(x'_2; y'_2) \in RV'$$

$$(x'_2; y'_2) \text{ est solution du système : } \begin{cases} y'^2_2 + x'^2_2 = R_3^2 \\ y'_2 = -\frac{x'^2_2}{y'_2} + R_1 \frac{x'_2}{y'_2} \end{cases}$$

$$\text{Système qui a pour solution : } \begin{cases} x'_2 = \frac{R_3}{R_1} \\ y'_2 = R_3 \sqrt{1 - \frac{R_3^2}{R_1^2}} \end{cases}$$

Coordonnées de $(x'_3; y'_3)$:

$$(x'_3, y'_3) = RV' \cap \Gamma_2$$

$$(x'_3, y'_3) \text{ est donc solution du système : } \begin{cases} y'_3 = a'x'_3 + b' \\ y'^2_3 + x'^2_3 = R_2^2 \end{cases}$$

qui a pour solution :

$$\boxed{x'_3 = \frac{1}{R_1} * (R_3^2 - \sqrt{R_1^2 - R_3^2} \sqrt{R_2^2 - R_3^2})}$$

$$y'_3 = \sqrt{R_2^2 - x'^2_3}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$\boxed{DV'_3 = \sqrt{(x'_3 - x'_1)^2 + (y'_3 - y'_1)^2} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_3^2 + 2\sqrt{R_1^2 - R_3^2} \sqrt{R_2^2 - R_3^2}}}$$

Coordonnées de $(x'_4; y'_4)$:

$$(x'_4, y'_4) = RV' \cap \Gamma_2$$

(x'_4, y'_4) est donc solution du système :
$$\begin{cases} y'_4 = a' x'_4 + b' \\ y'^2_4 + x'^2_4 = R_2'^2 \end{cases}$$

qui a pour solution :

$$\boxed{x'_4 = \frac{1}{R_1} * (R_3^2 - \sqrt{R_1^2 - R_3^2} \sqrt{R_2^2 - R_3^2})}$$

$$y'_4 = \sqrt{R_2'^2 - x'^2_4}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$\boxed{DV'_4 = \sqrt{(x'_4 - x'_1)^2 + (y'_4 - y'_1)^2} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_3^2 + 2\sqrt{R_1^2 - R_3^2} \sqrt{R_2^2 - R_3^2}}}$$

Différence de distance de visibilité linéaire :

$$\boxed{diffDV' = DV'_3 - DV'_4 = \sqrt{R_2^2 - R_3^2} - \sqrt{R_2'^2 - R_3^2}}$$

En sortie de virage

$$(x''_1; y''_1) \in \Gamma_1$$

Droite Δ_2 issu de $(x'_3; y'_3)$: $y = a_2 * x + b_2$

Δ_2 est tangent à Γ_2 en $(x'_3; y'_3)$, donc $a_2 = -\frac{x'_3}{y'_3}$

$$\text{et } b_2 = y'_3 + \frac{x'_3}{y'_3} \cdot x'_3$$

ce qui donne :

$$\boxed{\Delta_2 : y = -\frac{x'_3}{y'_3} x + \left(y'_3 + \frac{x'_3}{y'_3} \cdot x'_3 \right)}$$

Équation du rayon visuel RV'' issu de $(x''_1; y''_1)$ tangent à Γ_3 en $(x''_2; y''_2)$

$$RV'': y = a''x + b''$$

Comme cette droite est tangente à Γ_3 en $(x''_2; y''_2)$, elle est perpendiculaire au rayon de Γ_3 passant par

$$(x''_2; y''_2), \text{ on a alors : } a'' = -\frac{x''_2}{y''_2}$$

et RV'' passe par $(x''_1; y''_1)$, donc :

$$b'' = y''_1 + x''_1 \cdot \frac{x''_2}{y''_2}$$

ce qui nous donne pour équation de RV'' :

$$\boxed{RV'': y = -\frac{x''_2}{y''_2} x + \left(y''_1 + \frac{x''_2}{y''_2} x''_1 \right)}$$

Conditions sur RV'' et Δ_2 :

$\exists RV''$ issu de $(x''_1; y''_1)$ et tangent à Γ_3 en $(x''_2; y''_2)$ ssi $a'' \leq a_2$

Coordonnées de $(x''_2; y''_2)$

$$(x''_2; y''_2) \in \Gamma_3$$

$$(x''_2; y''_2) \in RV''$$

$$(x''_2; y''_2) \text{ est solution du système : } \begin{cases} y''_2^2 + x''_2^2 = R_3^2 \\ y''_2 = -\frac{x''_2^2}{y''_2} + (y''_1 + \frac{x''_2}{y''_2} * x''_1) \end{cases}$$

$$\text{Système qui a pour solution : } \begin{cases} x''_2 = \frac{R_3}{R_1^2} \left(R_3 x''_1 - y''_1 \sqrt{R_1^2 - R_3^2} \right) \\ y''_2 = \sqrt{R_3^2 - x''_2^2} \end{cases}$$

Coordonnées de $(x''_3; y''_3)$:

$$(x''_3, y''_3) = RV'' \cap \Delta_2$$

$$(x''_3, y''_3) \text{ est donc solution du système : } \begin{cases} y''_3 = a'' x''_3 + b'' \\ y''_3 = a_2 x''_3 + b_2 \end{cases}$$

qui a pour solution :

$$\boxed{\begin{aligned} x''_3 &= \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2} \\ y''_3 &= a'' \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2} + b'' \end{aligned}}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$\boxed{DV''_3 = \sqrt{(x''_3 - x''_1)^2 + (y''_3 - y''_1)^2}}$$

Coordonnées de $(x''_4; y''_4)$:

$$(x''_4, y''_4) = RV'' \cap \Delta_2$$

$$(x''_4, y''_4) \text{ est donc solution du système : } \begin{cases} y''_4 = a'' x''_4 + b'' \\ y''_4 = a_2 x''_4 + b_2 \end{cases} \text{ où } b_2 = \frac{R_2}{R_1} (y'_3 - a_2 x'_3)$$

qui a pour solution :

$$\boxed{\begin{aligned} x''_4 &= \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2} \\ y''_4 &= a'' \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2} + b'' \end{aligned}}$$

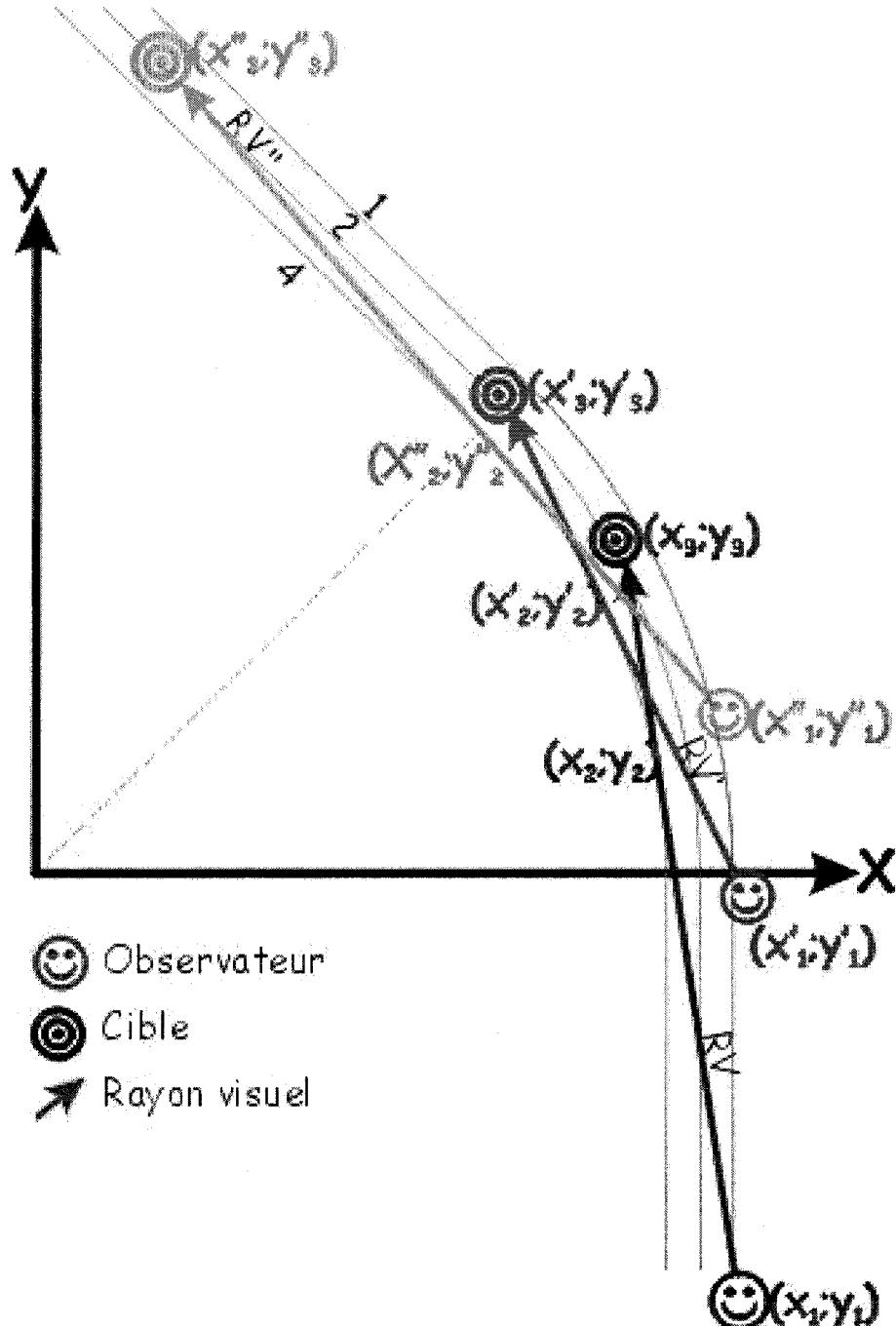
Distance de visibilité linéaire :

$$DV''_4 = \sqrt{(x''_4 - x''_1)^2 + (y''_4 - y''_1)^2}$$

Différence de distance de visibilité linéaire :

$$diffDV'' = DV''_3 - DV''_4$$

Virage à gauche



Visibilité virage à gauche

La démarche est identique, les principaux résultats sont présentés ci-dessous :

À l'approche du virage

Coordonnées de (x₁; y₁) :

$$x_1 = R_1$$

$$y_1 = y$$

RV :

$$RV : y = -\frac{x_2}{y_2}x + (y_1 + x_1 * \frac{x_2}{y_2})$$

Coordonnées de (x₂; y₂)

$$(x_2; y_2) \in \Gamma_4$$

$$(x_2; y_2) \in RV$$

$$x_2 = \frac{-R_4 * (y_1 * \sqrt{R_1^2 - R_4^2} - R_4 R_1)}{R_1^2}$$

$$y_2 = \sqrt{R_4^2 - x_2^2}$$

Coordonnées de (x₃; y₃) :

$$x_3 = -\left(\frac{\left(\sqrt{(a^2 + 1) * R_2^2 - b^2} \right) + a * b}{a^2 + 1} \right)$$

$$y_3 = \sqrt{R_2^2 - x_3^2}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV_3 = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}$$

Coordonnées de (x₄; y₄) :

$$x_4 = - \left(\frac{\left(\sqrt{(a^2 + 1) * R_2^2 - b^2} \right) + a * b}{a^2 + 1} \right)$$

$$y_4 = \sqrt{R_2^2 - x_4^2}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV_4 = \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}$$

Déférence de distance de visibilité linéaire :

$$diffDV = DV_3 - DV_4$$

Dans le virage

Coordonnées de (x'_1; y'_1) :

$$x'_1 = R_1$$

$$y'_1 = 0$$

RV' :

$$RV': y = -\frac{x'_2}{y'_2} * (x - R_1)$$

Coordonnées de (x'_2; y'_2) :

$$(x'_2; y'_2) \in \Gamma_4$$

$$(x'_2; y'_2) \in RV'$$

$$x'_2 = \frac{R_3}{R_1^2}$$

$$y'_2 = R_3 \sqrt{1 - \frac{R_3^2}{R_1^2}}$$

Coordonnées de (x'_3; y'_3) :

$$x'_3 = \frac{1}{R_1} * (R_4^2 - \sqrt{R_1^2 - R_4^2} \sqrt{R_2^2 - R_4^2})$$

$$y'_3 = \sqrt{R_2^2 - x'_3^2}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV'_3 = \sqrt{(x'_3 - x'_1)^2 + (y'_3 - y'_1)^2} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_4^2 + 2\sqrt{R_1^2 - R_4^2} \sqrt{R_2^2 - R_4^2}}$$

Coordonnées de $(x'_4; y'_4)$:

$$\begin{aligned} x'_4 &= \frac{1}{R_1} * (R_4^2 - \sqrt{R_1^2 - R_4^2} \sqrt{R_2^2 - R_4^2}) \\ y'_4 &= \sqrt{R_2^2 - x'_4^2} \end{aligned}$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV'_4 = \sqrt{(x'_4 - x'_1)^2 + (y'_4 - y'_1)^2} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_4^2 + 2\sqrt{R_1^2 - R_4^2} \sqrt{R_2^2 - R_4^2}}$$

Différence de distance de visibilité linéaire :

$$diffDV' = DV'_3 - DV'_4 = \sqrt{R_2^2 - R_4^2} - \sqrt{R_2^2 - R_4^2}$$

En sortie de virage

$$(x''_1; y''_1) \in \Gamma_1$$

Droite Δ_2 issu de $(x'_3; y'_3)$: $y = a_2 * x + b_2$

$$a_2 = -\frac{x'_3}{y'_3}$$

$$b_2 = y'_3 + \frac{x'_3^2}{y'_3}$$

RV''

$$RV'': y = -\frac{x''_2}{y''_2} x + \left(y''_1 + \frac{x''_2}{y''_2} x''_1 \right)$$

Conditions sur RV'' et Δ_2 :

$\exists RV''$ issu de $(x''_1; y''_1)$ et tangent à Γ_4 en $(x''_2; y''_2)$ ssi $a'' \leq a_2$

Coordonnées de $(x''_2; y''_2)$

$$(x''_2; y''_2) \in \Gamma_4$$

$$(x''_2; y''_2) \in RV''$$

$$x''_2 = \frac{R_4}{R_1^2} \left(R_4 x''_1 - y''_1 \sqrt{R_1^2 - R_4^2} \right)$$

$$y''_2 = \sqrt{R_4^2 - x''_2^2}$$

Coordonnées de (x''_3; y''_3) :

$$x''_3 = \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2}$$

$$y''_3 = a'' \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2} + b''$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV''_3 = \sqrt{(x''_3 - x''_1)^2 + (y''_3 - y''_1)^2}$$

Coordonnées de (x''_4; y''_4) :

$$x''_4 = \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2}$$

$$y''_4 = a'' \frac{b_2 - b''}{a'' - a_2} + b''$$

Distance de visibilité linéaire :

$$DV''_4 = \sqrt{(x''_4 - x''_1)^2 + (y''_4 - y''_1)^2}$$

Différence de distance de visibilité linéaire :

$$diffDV'' = DV''_3 - DV''_4$$

Annexe B : Code de l'algorithme

'-----
' Déclaration des variables en liste
'-----

' sens 1 (chaînage croissant)

```
Dim c(), x(), y(), z(), largeur_voie(), largeur_accotement_d() As Double
Dim largeur_accotement_g(), largeur_accotement_d() As Double
Dim x_obs(), y_obs(), z_obs() As Double
Dim x_droit(), y_droit(), x_gauche(), y_gauche() As Double
Dim x_cible(), y_cible(), z_cible() As Double
Dim pente(), mediatrice() As Double
Dim visibilite_verticale(), visibilite_horizontale(), visibilite() As Double
Dim dep() As Integer
Dim deb(), longueur(), df_zone(), longueur_zone() As Variant
Dim limite() As String
Dim cv(), dv2() As Double
```

' sens 2 (chaînage décroissant)

```
Dim c2(), x2(), y2(), z2(), largeur_voie2(), largeur_accotement_d2() As Double
Dim largeur_accotement_g2(), largeur_accotement_d2() As Double
Dim x_obs2(), y_obs2(), z_obs2() As Double
Dim x_droit2(), y_droit2(), x_gauche2(), y_gauche2() As Double
Dim x_cible2(), y_cible2(), z_cible2() As Double
Dim pente2(), mediatrice2() As Double
Dim visibilite_verticale2(), visibilite_horizontale2(), visibilite2() As Variant
Dim dep2() As Integer
Dim deb2(), longueur2(), df_zone2(), longueur_zone2() As Variant
Dim limite2() As String
```

```

Dim cv2(), dv2() As Double
Dim ecart(), somme() As Double
Dim nb() As Integer

```

' déclaration des valeurs fixes

```

Dim h_obs, h_cible As Double
Dim ecartement_cible, ecartement_observateur As Double
Dim nb_mesure As Integer
Dim visibilite_minimum As Integer
Dim compteur_de_zone, compteur_de_zone2 As Integer
Dim longueur_minimale As Integer
Dim nb_cv As Double
Dim pas As Double
Dim moyenne As Double
'-----

```

```
Public Sub afficher_boite1()
```

```
boite1.Show
```

```
End Sub
'-----

```

```
Public Sub calcul_distance_visibilite()
```

' marqueur de temps 1

```
time1 = Time
```

' effaçons les vieux résultats

```

Sheets("DV sens 1").Select
Columns("B:P").Select
Selection.ClearContents
Range("A1").Select

```

```

Sheets("DV sens 2").Select
Columns("B:P").Select
Selection.ClearContents
Range("A1").Select

' calculons le nombre de points GPS pour dimensionner les listes
Sheets("Données d'entrées").Select
w = 0
For i = 1 To 1000000
If Cells(i, 2) <> "" Then
    w = w + 1
Else: GoTo 7
End If
Next i
7
nb_mesure = w - 1

if nb_mesure<2 then
    goto 666
end if

'-----
' ETAPE 0: mise en mémoire des données
'-----
'-----
' relevé des valeurs particulières
h_obs = boite1.hauteur_obs.Value
h_cible = boite1.hauteur_cible.Value
ecartement_cible = boite1.ecart_cible.Value

```

```

ecartement_observateur = boite1.ecart_obs.Value
visibilite_minimum = boite1.distance_minimale.Value
longueur_minimale = boite1.longueur_minimale.Value

If boite1.OptionButton4 = True Then
    pas = 10
End If

If boite1.OptionButton1 = True Then
    pas = 15
End If

If boite1.OptionButton2 = True Then
    pas = 20
End If

If boite1.OptionButton3 = True Then
    pas = 30
End If

```

' dimensionnement des listes

```

ReDim c(nb_mesure), x(nb_mesure), y(nb_mesure), z(nb_mesure)
ReDim largeur_voie(nb_mesure), largeur_accotement_d(nb_mesure),
largeur_accotement_g(nb_mesure)
ReDim x_obs(nb_mesure), y_obs(nb_mesure), x_cible(nb_mesure), y_cible(nb_mesure)
ReDim x_droit(nb_mesure), y_droit(nb_mesure), x_gauche(nb_mesure),
y_gauche(nb_mesure)
ReDim z_obs(nb_mesure), z_cible(nb_mesure)
ReDim pente(nb_mesure), mediatrice(nb_mesure)
ReDim visibilite_verticale(nb_mesure), visibilite_horizontale(nb_mesure),
visibilite(nb_mesure)
ReDim dep(nb_mesure), longueur(nb_mesure)
ReDim chainage_calculé(nb_mesure)

```

```

ReDim c2(nb_mesure), x2(nb_mesure), y2(nb_mesure), z2(nb_mesure)
ReDim largeur_voie2(nb_mesure), largeur_accotement_d2(nb_mesure),
largeur_accotement_g2(nb_mesure)
ReDim x_obs2(nb_mesure), y_obs2(nb_mesure), x_cible2(nb_mesure),
y_cible2(nb_mesure)
ReDim x_droit2(nb_mesure), y_droit2(nb_mesure), x_gauche2(nb_mesure),
y_gauche2(nb_mesure)
ReDim z_obs2(nb_mesure), z_cible2(nb_mesure)
ReDim pente2(nb_mesure), mediatrice2(nb_mesure)
ReDim visibilite_verticale2(nb_mesure), visibilite_horizontale2(nb_mesure),
visibilite2(nb_mesure)
ReDim dep2(nb_mesure), longueur2(nb_mesure), df_zone2(nb_mesure),
longueur_zone2(nb_mesure)
ReDim limite(nb_mesure), limite2(nb_mesure)
ReDim ecart(nb_mesure), somme(nb_mesure)

```

' variables entrées par l'utilisateur

```

For j = 0 To nb_mesure - 1
c(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 2)
x(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 3)
y(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 4)
z(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 5)
largeur_voie(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 6)
largeur_accotement_d(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 7)
largeur_accotement_g(j) = Sheets("Données d'entrées").Cells(j + 2, 8)
Next j

```

' vérifions le format des données entrées

```

For j = 0 To nb_mesure - 1

```

```
If Not IsNumeric(c(j)) Then
    MsgBox "format non conforme, chaînage:" & j + 1
    Cells(j + 2, 2).Select
    Exit Sub
End If
Next j

For j = 0 To nb_mesure - 1
If Not IsNumeric(x(j)) Then
    MsgBox "format non conforme, x:" & j + 1
    Cells(j + 2, 3).Select
    Exit Sub
End If
Next j

For j = 0 To nb_mesure - 1
If Not IsNumeric(y(j)) Then
    MsgBox "format non conforme, y:" & j + 1
    Cells(j + 2, 4).Select
    Exit Sub
End If
Next j

For j = 0 To nb_mesure - 1
If Not IsNumeric(z(j)) Then
    MsgBox "format non conforme, z:" & j + 1
    Cells(j + 2, 5).Select
    Exit Sub
End If
```

Next j

For j = 0 To nb_mesure - 1

If Not IsNumeric(largeur_voie(j)) Then

 MsgBox "format non conforme, largeur de voie:" & j + 1

 Cells(j + 2, 6).Select

 Exit Sub

End If

Next j

For j = 0 To nb_mesure - 1

If Not IsNumeric(largeur_accotement_d(j)) Then

 MsgBox "format non conforme, largeur d'accotement droit:" & j + 1

 Cells(j + 2, 7).Select

 Exit Sub

End If

Next j

For j = 0 To nb_mesure - 1

If Not IsNumeric(largeur_accotement_g(j)) Then

 MsgBox "format non conforme, largeur d'accotement gauche:" & j + 1

 Cells(j + 2, 7).Select

 Exit Sub

End If

Next j

'-----

' *ETAPE 1: détermination des lignes nécessaires au calcul sens 1*

'-----

' ETAPE 1.1:profil en long

For j = 0 To nb_mesure - 1

z_obs(j) = z(j) + h_obs

z_cible(j) = z(j) + h_cible

Next j

'-----

' ETAPE 1.2:tracé en plan

For j = 1 To nb_mesure - 1

' pente de la tangente à i

pente(j) = (y(j - 1) - y(j + 1)) / (x(j - 1) - x(j + 1))

' pente de la médiatrice en i

mediatrice(j) = -1 / pente(j)

' coordonnée de la cible

If y(j - 1) > y(j) Then

x_cible(j) = x(j) + ecartement_cible / ((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))

Else: x_cible(j) = x(j) - ecartement_cible /
((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))

End If

y_cible(j) = mediatrice(j) * (x_cible(j) - x(j)) + y(j)

' coordonnée de l'observateur

If y(j - 1) > y(j) Then

x_obs(j) = x(j) - ecartement_observateur / ((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))

Else: x_obs(j) = x(j) + ecartement_observateur /
((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))

End If

$y_{obs}(j) = mediatrice(j) * (x_{obs}(j) - x(j)) + y(j)$

' coordonnée de l'accotement droit

If $y(j - 1) > y(j)$ Then

$x_{droit}(j) = x(j) - (largeur_accotement_d(j) + largeur_voie(j)) /$
 $((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))$
 Else: $x_{droit}(j) = x(j) + (largeur_accotement_d(j) + largeur_voie(j)) /$
 $((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))$

End If

$y_{droit}(j) = mediatrice(j) * (x_{droit}(j) - x(j)) + y(j)$

' coordonnée de l'accotement gauche

If $y(j - 1) > y(j)$ Then

$x_{gauche}(j) = x(j) + (largeur_accotement_g(j) + largeur_voie(j)) /$
 $((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))$
 Else: $x_{gauche}(j) = x(j) - (largeur_accotement_g(j) + largeur_voie(j)) /$
 $((1 + mediatrice(j) ^ 2) ^ (1 / 2))$

End If

$y_{gauche}(j) = mediatrice(j) * (x_{gauche}(j) - x(j)) + y(j)$

Next j

'chainage sens inverse

For $i = 0$ To $nb_mesure - 1$

$c2(i) = c(nb_mesure - 1 - i)$

$x2(i) = x(nb_mesure - 1 - i)$

$y2(i) = y(nb_mesure - 1 - i)$

$z2(i) = z(nb_mesure - 1 - i)$

```

largeur_voie2(i) = largeur_voie(nb_mesure - 1 - i)
largeur_accotement_d2(i) = largeur_accotement_g(nb_mesure - 1 - i)
largeur_accotement_g2(i) = largeur_accotement_d(nb_mesure - 1 - i)
x_droit2(i) = x_gauche(nb_mesure - 1 - i)
y_droit2(i) = y_gauche(nb_mesure - 1 - i)
x_gauche2(i) = x_droit(nb_mesure - 1 - i)
y_gauche2(i) = y_droit(nb_mesure - 1 - i)
z_obs2(i) = z_obs(nb_mesure - 1 - i)
z_cible2(i) = z_cible(nb_mesure - 1 - i)
Next i

```

'-----
'ETAPE Ibis: détermination des lignes nécessaires au calcul sens 2
'-----

For j = 1 To nb_mesure - 1
' pente de la tangente à i
pente2(j) = (y2(j - 1) - y2(j + 1)) / (x2(j - 1) - x2(j + 1))

' pente de la médiatrice en i
mediatrice2(j) = -1 / pente2(j)

' coordonnée de la cible
If y2(j - 1) > y2(j) Then
x_cible2(j) = x2(j) + ecartement_cible / ((1 + mediatrice2(j) ^ 2) ^ (1 / 2))
Else: x_cible2(j) = x2(j) - ecartement_cible / _
((1 + mediatrice2(j) ^ 2) ^ (1 / 2))
End If

y_cible2(j) = mediatrice2(j) * (x_cible2(j) - x2(j)) + y2(j)

' coordonnée de l'observateur

If $y2(j - 1) > y2(j)$ Then

$x_obs2(j) = x2(j) - \text{ecartement_observateur} / ((1 + \text{mediatrice2}(j)^2)^{1/2})$

Else: $x_obs2(j) = x2(j) + \text{ecartement_observateur} / ((1 + \text{mediatrice2}(j)^2)^{1/2})$

End If

$y_obs2(j) = \text{mediatrice2}(j) * (x_obs2(j) - x2(j)) + y2(j)$

Next j

'-----

' ETAPPE 2: calcul de la visibilité verticale pour le sens 1

'-----

Dim try As Boolean

try = True

For i = 1 To nb_mesure - 2

j = i + 1

Do While try = True

' caractéristique du rayon visuel qui passe par observateur et cible

$a = ((z_cible(j) - z_obs(i)) / (c(j) - c(i)))$

$b = (z_obs(i) - a * c(i))$

' on vérifie tous les points (k) entre l'observateur et la cible,

' sont ils au dessus du rayon visuel?

For k = i To j

' condition de pseudo tangence

```

z_test = (a * c(k) + b)
If z_test > z(k) Then
    try = True
Else
    Exit Do
End If
Next k
' pour ne pas que j aille jusqu'on ne sait où
If j > nb_mesure - 2 Then Exit Do
    j = j + 1
Loop
' la visibilité verticale est la distance curviligne qui sépare l'observateur
' de à peu près la cible
' (ie le milieu de la cible et du point précédent cb)
If j = nb_mesure - 1 Then
    visibilite_verticale(i) = 10000
Else:
    visibilite_verticale(i) = ((c(j) + c(j - 1)) / 2 - c(i))
End If
Next i

```

'-----

' *ETAPE 3:distance de visibilité horizontale*

'-----

```

try = True
For i = 1 To nb_mesure - 2
    ' j est la cible que l'on éloigne de l'observateur jusqu'à la perdre de vue
    j = i + 1

```

```

Do While try = True
  ' caractéristique du rayon visuel qui passe par observateur et cible
  a = ((y_cible(j) - y_obs(i)) / (x_cible(j) - x_obs(i)))
  b = (y_obs(i) - a * x_obs(i))

  ' on vérifie tous les points (k) de l'accotement gauche et droit entre l'observateur et la
  cible,
  ' sont ils du bon côté du rayon visuel?

  For k = i To j

    yg_test = (a * x_gauche(k) + b)

    yd_test = (a * x_droit(k) + b)

    If x_obs(i) < x_cible(j) Then
      If yd_test > y_droit(k) And yg_test < y_gauche(k) Then
        try = True
      Else
        Exit Do
      End If
    Else
      If yd_test < y_droit(k) And yg_test > y_gauche(k) Then
        try = True
      Else
        Exit Do
      End If
    End If

    Next k

  ' pour ne pas que j aille jusqu'on ne sait où
  If j > nb_mesure - 2 Then Exit Do

```

```

j = j + 1
Loop
' la visibilité verticale est la distance curviligne qui sépare l'observateur
' de à peu près la cible
'(ie le milieu de la cible et du point précédent cb)
If j = nb_mesure - 1 Then
  visibilite_horizontale(i) = 10000
Else:
  visibilite_horizontale(i) = ((c(j) + c(j - 1)) / 2 - c(i))
End If
Next i

'-----
'ETAPE 4: obtention de la visibilité générale
'-----
' distance de visibilité=minimum des distances verticales et horizontales
For i = 1 To nb_mesure - 1
  If visibilite_verticale(i) = 10000 And visibilite_horizontale(i) = 10000 Then
    visibilite(i) = 0
    ElseIf visibilite_verticale(i) < visibilite_horizontale(i) Then
      visibilite(i) = visibilite_verticale(i): limite(i) = "v"
    Else:
      visibilite(i) = visibilite_horizontale(i): limite(i) = "h"
  End If
  Next i

'-----
'ETAPE 5: etablissemement des zones potentielles de dépassement
'-----

```

' comparons visibilite() à la valeur de la visibilité minimum

For i = 1 To nb_mesure - 1

If visibilite(i) < visibilite_minimum Then

 dep(i) = 0

 Else: dep(i) = 1

End If

Next i

For i = 1 To nb_mesure - 1

If dep(i) <> dep(i - 1) Then

 compteur_de_zone = compteur_de_zone + 1

End If

Next i

ReDim deb(compteur_de_zone), df_zone(nb_mesure), longueur_zone(nb_mesure)

' établissement de la liste des zones avec le chaînage de début

' et de fin de zone, et la longueur de la zone

k = 0

For i = 1 To nb_mesure - 1

If dep(i) = 1 And dep(i) <> dep(i - 1) Then

 deb(k) = c(i): longueur(k) = "": k = k + 1

ElseIf dep(i) = 0 And dep(i - 1) = 1 Then

 deb(k) = (visibilite_minimum - visibilite(i)) * c(i - 1) / _

 (visibilite(i - 1) - visibilite(i)) - _

 (visibilite_minimum - visibilite(i - 1)) * c(i) / _

 (visibilite(i - 1) - visibilite(i)) _

 : longueur(k) = deb(k) - deb(k - 1): k = k + 1

End If

Next i

For i = 2 To compteur_de_zone
 If longueur(i) < longueur_minimale And longueur(i) <> "" Then
 deb(i - 1) = "": deb(i) = "": longueur(i) = ""
 End If

Next i

j = 1

For i = 0 To compteur_de_zone
 If deb(i) <> "" And longueur(i) = "" Then
 df_zone(j) = deb(i): longueur_zone(j) = longueur(i): j = j + 1
 ElseIf deb(i) <> "" And longueur(i) <> "" Then
 df_zone(j) = deb(i): longueur_zone(j) = longueur(i): j = j + 2
 End If

Next i

For i = 1 To nb_mesure - 1

ecart(i) = c(i) - c(i - 1)

Next i

somme(0) = 0

For i = 1 To nb_mesure - 1

somme(i) = ecart(i) + somme(i - 1)

Next i

moyenne = somme(nb_mesure - 1) / (nb_mesure - 1)

'-----

' la même chose pour le chainage en sens inverse

```

' ETAPE 2 bis calcul de la visibilite_verticale
Dim try2 As Boolean

try2 = True
For i = 1 To nb_mesure - 2
    j = i + 1
    Do While try2 = True
        ' caractéristique du rayon visuel qui passe par observateur et cible
        a2 = ((z_cible2(j) - z_obs2(i)) / (c2(j) - c2(i)))
        b2 = (z_obs2(i) - a2 * c2(i))

        ' on vérifie tous les points (k) entre l'observateur et la cible,
        ' sont ils au dessus du rayon visuel?
        For k = i To j
            ' condition de pseudo tangence
            z_test2 = (a2 * c2(k) + b2)
            If z_test2 > z2(k) Then
                try2 = True
            Else
                Exit Do
            End If
            Next k
        ' pour ne pas que j aille jusqu'on ne sait où
        If j > nb_mesure - 2 Then Exit Do
        j = j + 1
    Loop

```

' la visibilité verticale est la distance curviligne qui sépare l'observateur

' de à peu près la cible

' (ie le milieu de la cible et du point précédent cb)

If j = nb_mesure - 1 Then

visibilite_verticale2(i) = 10000

Else:

visibilite_verticale2(i) = -((c2(j) + c2(j - 1)) / 2 - c2(i))

End If

Next i

' ETAPE 3 bis: distance de visibilité horizontale

try2 = True

For i = 1 To nb_mesure - 2

' j est la cible que l'on éloigne de l'observateur jusqu'à la perdre de vue

j = i + 1

Do While try2 = True

' caractéristique du rayon visuel qui passe par observateur et cible

a2 = ((y_cible2(j) - y_obs2(i)) / (x_cible2(j) - x_obs2(i)))

b2 = (y_obs2(i) - a2 * x_obs2(i))

' on vérifie tous les points (k) de l'accotement gauche et droit entre l'observateur et la cible,

' sont-ils du bon côté du rayon visuel?

For k = i To j

yg_test2 = (a2 * x_gauche2(k) + b2)

yd_test2 = (a2 * x_droit2(k) + b2)

```

If x_obs2(i) < x_cible2(j) Then
    If yd_test2 > y_droit2(k) And yg_test2 < y_gauche2(k) Then
        try2 = True
    Else
        Exit Do
    End If
Else
    If yd_test2 < y_droit2(k) And yg_test2 > y_gauche2(k) Then
        try2 = True
    Else
        Exit Do
    End If
End If

Next k
' pour ne pas que j aille jusqu'on ne sait où
If j > nb_mesure - 2 Then Exit Do
j = j + 1
Loop
' la visibilité verticale est la distance curviligne qui sépare l'observateur
' de à peu près la cible
' (ie le milieu de la cible et du point précédent cb)
If j = nb_mesure - 1 Then
    visibilite_horizontale2(i) = 10000
Else:
    visibilite_horizontale2(i) = -((c2(j) + c2(j - 1)) / 2 - c2(i))
End If
Next i

```

' ETAP 4 bis: distance de visibilité = minimum des distances verticales et horizontales

```

For i = 1 To nb_mesure - 1
If visibilite_verticale2(i) = 10000 And visibilite_horizontale2(i) = 10000 Then
    visibilite2(i) = 0
ElseIf visibilite_verticale2(i) < visibilite_horizontale2(i) Then
    visibilite2(i) = visibilite_verticale2(i): limite2(i) = "v"
Else:
    visibilite2(i) = visibilite_horizontale2(i): limite2(i) = "h"
End If
Next i

```

' ETAPE 5 bis: zones potentielles de dépassement

' comparons à la valeur de la visibilité minimum

```

For i = 1 To nb_mesure - 1
If visibilite2(i) < visibilite_minimum Then
    dep2(i) = 0
Else: dep2(i) = 1
End If
Next i

```

For i = 1 To nb_mesure - 1

```

If dep2(i) <> dep2(i - 1) Then
    compteur_de_zone2 = compteur_de_zone2 + 1
End If

```

Next i

ReDim deb2(compteur_de_zone2)

*' établissement de la liste des zones avec le chaînage de début
' et de fin de zone, et la longueur de la zone*

k = 0

For i = 1 To nb_mesure - 1

If dep2(i) = 1 And dep2(i) <> dep2(i - 1) Then

deb2(k) = c2(i): longueur2(k) = "": k = k + 1

ElseIf dep2(i) = 0 And dep2(i - 1) = 1 Then

deb2(k) = (visibilite_minimum - visibilite2(i)) * c2(i - 1) / _

(visibilite2(i - 1) - visibilite2(i)) - _

(visibilite_minimum - visibilite2(i - 1)) * c2(i) / _

(visibilite2(i - 1) - visibilite2(i)) - _

: longueur2(k) = -deb2(k) + deb2(k - 1): k = k + 1

End If

Next i

For i = 2 To compteur_de_zone2

If longueur2(i) < longueur_minimale And longueur2(i) <> "" Then

deb2(i - 1) = "": deb2(i) = "": longueur2(i) = ""

End If

Next i

j = 1

For i = 0 To compteur_de_zone2

If deb2(i) <> "" And longueur2(i) = "" Then

df_zone2(j) = deb2(i): longueur_zone2(j) = longueur2(i): j = j + 1

ElseIf deb2(i) <> "" And longueur2(i) <> "" Then

df_zone2(j) = deb2(i): longueur_zone2(j) = longueur2(i): j = j + 2

End If

Next i

'-----

' ETAP 6: visibilité à pas constant

' établir la liste des distances de visibilité pour un pas donné

Application.Run "liste_visibilite"

Application.Run "liste_visibilite2"

' ETAPE 7:affichage des résultats

' maintenant on écrit tout ça sur excel

Sheets("DV sens 1").Select

Cells(1, 2) = "Liste des visibilités à pas constant"

Cells(1, 5) = "Marquage des zones de dépassement potentielle"

Cells(2, 2) = "Chaînage"

Cells(2, 3) = "Distance de visibilité"

Cells(2, 5) = "Début et fin de zone"

Cells(2, 6) = "Longueur de la zone"

For i = 1 To compteur_de_zone

Cells(i + 3, 5) = df_zone(i)

Cells(i + 3, 6) = longueur_zone(i)

Next i

For i = 0 To nb_cv - 1

Cells(i + 3, 2) = cv(i)

Cells(i + 3, 3) = dv²(i)

Cells(i + 3, 4) = visibilite_minimum

Next i

Sheets("DV sens 2").Select

Cells(1, 2) = "Liste des visibilités à pas constant"

Cells(1, 5) = "Marquage des zones de dépassement potentiel"

Cells(2, 2) = "Chaînage"

Cells(2, 3) = "Distance de visibilité"

Cells(2, 5) = "Début et fin de zone"

Cells(2, 6) = "Longueur de la zone"

For i = 0 To nb_cv - 1

Cells(i + 3, 2) = cv2(i)

Cells(i + 3, 3) = dv²2(i)

Cells(i + 3, 4) = visibilite_minimum

Next i

For i = 1 To compteur_de_zone2

Cells(i + 3, 5) = df_zone2(i)

Cells(i + 3, 6) = longueur_zone2(i)

Next i

If boite2.visi_gene = True Then

Sheets("DV sens 1").Select

Cells(1, 8) = "Visibilités aux points GPS"

Cells(2, 8) = "Chaînage"

Cells(2, 9) = "Distance de visibilité"

Cells(2, 10) = "limite de visibilité"

For i = 1 To nb_mesure - 1

Cells(i + 3, 8) = c(i)

Cells(i + 3, 9) = visibilite(i)

Cells(i + 3, 10) = limite(i)

Next i

```

Sheets("DV sens 2").Select
Cells(1, 8) = "Visibilités aux points GPS"
Cells(2, 8) = "Chaînage"
Cells(2, 9) = "Distance de visibilité"
Cells(2, 10) = "limite de visibilité"
For i = 1 To nb_mesure - 1
Cells(i + 3, 8) = c2(i)
Cells(i + 3, 9) = visibilite2(i)
Cells(i + 3, 10) = limite2(i)
Next i
End If

If boite2.visi_hori = True Then
Sheets("DV sens 1").Select
Cells(1, 12) = "Visibilités horizontales"
Cells(2, 12) = "Chaînage"
Cells(2, 13) = "Distance de visibilité horizontale"
For i = 1 To nb_mesure - 1
Cells(i + 3, 12) = c(i)
Cells(i + 3, 13) = visibilite_horizontale(i)
Next i
Sheets("DV sens 2").Select
Cells(1, 12) = "Visibilités horizontales"
Cells(2, 12) = "Chaînage"
Cells(2, 13) = "Distance de visibilité horizontale"
For i = 1 To nb_mesure - 1
Cells(i + 3, 12) = c2(i)
Cells(i + 3, 13) = visibilite_horizontale2(i)
Next i

```

End If

```

If boite2.visi_vert = True Then
Sheets("DV sens 1").Select
Cells(1, 15) = "Visibilités verticales"
Cells(2, 15) = "Chaînage"
Cells(2, 16) = "Distance de visibilité verticale"
For i = 1 To nb_mesure - 1
Cells(i + 3, 15) = c(i)
Cells(i + 3, 16) = visibilite_verticale(i)
Next i
Sheets("DV sens 2").Select
Cells(1, 15) = "Visibilités verticales"
Cells(2, 15) = "Chaînage"
Cells(2, 16) = "Distance de visibilité verticale"
For i = 1 To nb_mesure - 1
Cells(i + 3, 15) = c2(i)
Cells(i + 3, 16) = visibilite_verticale2(i)
Next i
End If

```

666

' fin du calcul, compteur de temps

```

Sheets("DV sens 1").Select
' marqueur de temps 2
time2 = Time

```

```

' compteur du temps d'exécution du programme
MsgBox "temps de calcul=" & DateDiff("s", time1, time2) & "s"

End Sub

'-----
'-----  

'sous ETAPE 6 : procédure utilisé par la procédure mère  

'-----  

' cette procédure permet de définir la visibilité d'un chaînage donné  

Sub liste_visibilite()  

  Dim visibilitek() As Integer  

  If boite1.OptionButton4 = True Then  

    pas = 10  

  End If  

  If boite1.OptionButton1 = True Then  

    pas = 15  

  End If  

  If boite1.OptionButton2 = True Then  

    pas = 20  

  End If  

  If boite1.OptionButton3 = True Then  

    pas = 30  

  End If  

  nb_cv = Int((c(nb_mesure - 1) - c(0)) / pas) + 1  

  ReDim cv(nb_cv)  

  ReDim dv2(nb_cv)  

  ReDim visibilitek(nb_mesure)

```

For i = 0 To nb_mesure - 2

visibilitek(i) = visibilite(i)

Next i

cv(0) = (Int(c(0) / pas) + 1) * pas

'chainage à pas constant

For i = 0 To nb_cv - 2

cv(i) = (Int(c(0) / pas) + 1) * pas + i * pas

Next i

'visibilite de cv(0)

For k = 0 To nb_mesure - 1

If c(k) < cv(0) And c(k + 1) > cv(0) Then

dv²(0) = (visibilitek(k) - visibilitek(k + 1)) * (cv(0) - c(k)) /
(c(k) - c(k + 1)) + visibilitek(k): GoTo 1

End If

Next k

1

'visibilite de cv(i>0)

For i = 1 To nb_cv - 2

For k = 0 To nb_mesure - 1

If c(k) < cv(i) And c(k + 1) > cv(i) Then

If visibilitek(k) > (visibilitek(k + 1) - pas) Then

dv²(i) = (visibilitek(k) - visibilitek(k + 1)) * (cv(i) - c(k)) /
(c(k) - c(k + 1)) + visibilitek(k): GoTo 0

Else

If pas > moyenne Then

dv²(i) = visibilitek(k + 1): GoTo 0

```

Else
  If cv(i) - c(k) < c(k + 1) - cv(i) Or visibilitek(k + 1) < _
    visibilitek(k + 2) Then
      dv2(i) = (visibilitek(k - 1) - visibilitek(k)) * (cv(i) - c(k - 1)) _ 
      / (c(k - 1) - c(k)) + visibilitek(k - 1): GoTo 0
    Else: dv2(i) = (visibilitek(k + 1) - visibilitek(k + 2)) * _
      (cv(i) - c(k + 1)) / (c(k + 1) - c(k + 2)) + visibilitek(k + 1): GoTo 0
    End If
  End If
End If
Next k
0
If dv2(i) < 0 Then
  dv2(i) = visibilite(k + 1)
End If
Next i
End Sub
'-----
Sub liste_visibilite2()
  Dim visibilitek2() As Integer

  If boite1.OptionButton4 = True Then
    pas = 10
  End If
  If boite1.OptionButton1 = True Then
    pas = 15
  End If
  If boite1.OptionButton2 = True Then

```

```

pas = 20
End If
If boite1.OptionButton3 = True Then
pas = 30
End If
nb_cv2 = Int((c(nb_mesure - 1) - c(0)) / pas) + 1
ReDim cv2(nb_cv)
ReDim dv2(nb_cv)
ReDim visibilitek2(nb_mesure)

```

```

For i = 0 To nb_mesure - 2
visibilitek2(i) = visibilite2(i)
Next i

```

' chainage à pas constant

```

For i = 0 To nb_cv2 - 2
cv2(i) = (Int(c2(0) / pas) - 1) * pas - i * pas
Next i

```

' visibilité de cv(0)

```

For k = 0 To nb_mesure - 1
If c2(k) > cv2(0) And c2(k + 1) < cv2(0) Then
    dv2(0) = (visibilitek2(k) - visibilitek2(k + 1)) * (cv2(0) - c2(k)) / _
    (c2(k) - c2(k + 1)) + visibilitek2(k): GoTo 1
End If
Next k
1
' visibilité de cv(i>0)
For i = 1 To nb_cv - 2

```

```

For k = 0 To nb_mesure - 1
  If c2(k) > cv2(i) And c2(k + 1) < cv2(i) Then
    If visibilitek2(k) > (visibilitek2(k + 1) - pas) Then
      dv22(i) = (visibilitek2(k) - visibilitek2(k + 1)) * (cv2(i) - c2(k)) / _
      (c2(k) - c2(k + 1)) + visibilitek2(k): GoTo 0
    Else
      If pas > moyenne Then
        dv22(i) = visibilitek2(k + 1): GoTo 0
      Else
        If cv2(i) - c2(k) < c2(k + 1) - cv2(i) Or visibilitek2(k + 1) > _
          visibilitek2(k + 2) Then
          dv22(i) = (visibilitek2(k - 1) - visibilitek2(k)) * (cv2(i) - c2(k - 1)) / _
          (c2(k - 1) - c2(k)) + visibilitek2(k - 1): GoTo 0
        Else: dv22(i) = (visibilitek2(k) - visibilitek2(k + 1)) * (cv2(i) - c2(k)) / _
          (c2(k) - c2(k + 1)) + visibilitek2(k): GoTo 0
        End If
      End If
    End If
  End If
  Next k
0
  If dv22(i) < 0 Then
    dv22(i) = visibilite2(k + 1)
  End If
  Next i
End Sub

```

Annexe C: Les mesures terrains**Les personnes ressources****Direction territoriale de Rouyn Noranda**

M. Gaétan Lessard

Ministère des Transports

Direction de l'Abitibi-Témiscamingue-Nord-du-Québec

Service des inventaires et du plan

80, av. Québec

Rouyn-Noranda (Québec) J9X 6R1

Téléphone : (819) 763-3237 poste 400

Télécopieur : (819) 763-3493

Courriel : glessard@mtq.gouv.qc.ca

Direction territoriale de Saint-Jérôme

M. Michel Charbonneau

Ministère des Transports

Direction des Laurentides-Lanaudières

Service des inventaires et du plan

222 rue Saint-Georges, 2^{ème} étage

Saint-Jérôme (Québec) J7Z 4Z9

Téléphone : (450).569-3057

Télécopieur : (450).569-3072

Courriel : micharbonneau@mtq.gouv.qc.ca

Direction territoriale de Sherbrooke

M. Marc Robert

Ministère des Transports

200, rue Belvédère Nord, bureau 2.02
Sherbrooke (Québec) J1H 4A9
Téléphone (819) 820-3280
Télécopieur : (819) 820-3118
Courriel : mrobert@mtq.gouv.qc.ca

La feuille de relevé terrain

Annexe D: Alignement des routes étudiées

Route 101

Tracé en plan

Abitibi route 101, alignement horizontal					
	chaînage de début	Chaînage de fin	R	sens	
tangente	176	476			gisement=12
courbe	476	696	5044	right	
tangente	696	1642			
courbe	1642	1911	536	left	
tangente	1911	2614			
courbe	2614	3008	869	right	
tangente	3008	5231			
courbe	5231	5511	675	left	
tangente	5511	6229			
courbe	6229	6525	451	left	
tangente	6525	7454			
courbe	7454	7649	1093	right	
tangente	7649	7791			
courbe	7791	7933	805	left	
tangente	7933	8518			
courbe	8518	9031	587	right	

Profil en long

Abitibi, route 101, alignement vertical					
C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
0	307	0	0	0	0.5
201	308	30	30	0.5	2.1
403	312	50	50	2.1	0.4
660	313	80	80	0.4	9.2
922	337	180	180	9.2	-3.3
1225	327	85	85	-3.3	-0.2
1514	327	93.5	93	-0.2	-8.3
1876	296	62.5	62	-8.3	-0.2
2195	296	57.5	57	-0.2	3.2
2409	303	82.5	82	3.2	-0.3
2708	302	37.5	37	-0.3	1.5
2955	306	102.5	102	1.5	-3.8
3141	299	82.5	82	-3.8	3.5
3498	311	125	125	3.5	-3.7
3817	300	35	35	-3.7	0.9
3940	302	26	26	0.9	-2.6
4019	300	40	40	-2.6	0.6
4275	301	46	46	0.6	4.5
4485	311	126	126	4.5	-0.8
5051	306	60	60	-0.8	2.0
5228	310	95	95	2.0	-2.8
5438	304	45	45	-2.8	0.8
6107	310	48	48	0.8	-2.0
6201	308	45	45	-2.0	-1.9
6560	315	33.5	33	1.9	-1.5
6703	312	25	25	-1.5	0.6
6830	313	95	95	0.6	-1.1
6934	312	9	9	-1.1	1.1
7032	313	55	55	1.1	-1.1
7184	311	10	10	-1.1	-0.01
7256	311	7	3	-0.01	-1.4
7358	310	95	95	-1.4	0.8
7613	312	80	80	0.8	-6.0
7787	302	46	46	-6.0	-0.9
7873	301	10	10	-0.9	-3.0

Abitibi, route 101, alignement vertical (Suite)

C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
7917	299	20	20	-3.0	-0.9
8019	299	25	25	-0.9	1.2
8084	299	5	5	1.2	2.8
8170	302	22	22	2.8	-1.1
8224	301	27	27	-1.1	1.6
8269	302	17	17	1.6	-0.2
8312	302	26	26	-0.2	2.0
8368	303	16	16	2.0	0
8496	303	25	25	0	1.8
8719	307	137	137	1.8	-0.9
8962	305	0	0	-0.9	0

Route 147**Tracé en plan**

Cantons de l'Est route 147, alignement horizontal					
	chaînage de début	Chaînage de fin	R	sens	
tangente	0	247			gisement=37
courbe	247	443	657	left	
tangente	443	1018			
courbe	1018	1192	409	right	
tangente	1192	1413			
courbe	1413	1966	698	left	
courbe	1966	2213	504	left	
tangente	2213	2728			
courbe	2728	3158	905	right	
tangente	3158	4172			
courbe	4172	4553	1116	left	
tangente	4553	4673			
courbe	4673	4815	507	right	
tangente	4815	5196			
courbe	5196	5375	707	left	
tangente	5375	5503			
courbe	5503	5693	494	right	
tangente	5693	5824			
courbe	5824	5971	514	left	
tangente	5971	6264			
courbe	6264	6485	974	right	
tangente	6485	6907			
courbe	6907	7098	370	left	
tangente	7098	7406			
tangente	7406	8392			
courbe	8392	8670	596	right	
tangente	8670	8922			
courbe	8922	9141	953	left	
tangente	9141	9576			
courbe	9576	9794	440	left	
tangente	9794	9941			
courbe	9941	10165	791	right	

Cantons de l'Est route 147, alignement horizontal (Suite)

	chaînage de début	Chaînage de fin	R	sens	
tangente	10165	10483			
courbe	10483	10712	671	left	
tangente	10712	11216			
courbe	11216	11404	399	left	
tangente	11404	11676			
courbe	11676	11900	441	right	
tangente	11900	12429			
courbe	12429	12532	744	right	
tangente	12532	12532			

Profil en long
Cantons de l'Est, route 147, alignement vertical

C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
0	376	0	0	0.0	1.3
167	378	92	77	1.3	7.9
302	389	38	28	7.9	2.5
509	394	13	15	2.5	1.0
601	395	13	11	1.0	2.7
647	396	22	11	2.7	-0.9
698	396	9	13	-0.9	0.7
804	396	15	10	0.7	2.7
860	398	13	25	2.7	0.9
955	399	5	4	0.9	2.2
1124	402	112	59	2.2	-2.5
1243	399	16	11	-2.5	-8.3
1447	382	43	55	-8.3	-4.5
1681	372	58	42	-4.5	-8.5
1876	355	78	42	-8.5	2.7
1938	357	9	17	2.7	0.7
2127	358	56	47	0.7	-3.6
2253	354	9	8	-3.6	-2.2
2307	353	13	13	-2.2	-4.9

Cantons de l'Est, route 147, alignement vertical (Suite)

C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
2433	347	39	41	-4.9	-2.0
2553	344	10	5	-2.0	-4.1
2610	342	21	26	-4.1	-1.3
2701	341	7	6	-1.3	-3.7
2763	338	17	25	-3.7	-1.1
2868	337	19	14	-1.1	-3.1
3009	333	11	10	-3.1	-0.5
3104	332	4	4	-0.5	-1.5
3170	331	23	21	-1.5	-0.3
3277	331	27	29	-0.3	-1.8
3399	329	42	44	-1.8	1.1
3497	330	17	16	1.1	-0.9
3562	329	17	17	-0.9	0.3
3611	329	6	6	0.3	-1.3
3656	329	6	5	-1.3	0.7
3701	329	6	4	0.7	-0.3
3815	329	53	58	-0.3	4.5
3978	336	14	10	4.5	7.4
4026	340	12	16	7.4	1.4
4085	341	5	6	1.4	2.8
4143	342	5	7	2.8	0.3
4260	343	26	13	0.3	5.4
4350	347	6	4	5.4	1.8
4437	349	6	4	1.8	2.7
4544	352	64	51	2.7	-6.5
4629	346	6	3	-6.5	-8.6
4673	342	20	39	-8.6	-1.9
4750	341	5	5	-1.9	-5.3
4815	338	4	7	-5.3	0.7
4893	338	6	16	0.7	-8.3
4946	334	7	18	-8.3	-2.9
4985	333	4	4	-2.9	0.3
5028	333	11	8	0.3	-5.3
5068	331	5	3	-5.3	-1.8
5167	329	6	4	-1.8	-2.7
5268	326	42	31	-2.7	0.7
5368	327	24	15	0.7	-2.8
5429	325	5	5	-2.8	-1.9

Cantons de l'Est, route 147, alignement vertical (Suite 2)

C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
5532	323	5	5	-1.9	-3.4
5633	320	75	32	-3.4	0.7
5753	321	5	5	0.7	-2.2
5818	319	26	20	-2.2	1.6
5918	321	8	6	1.6	0.0
6000	321	5	5	0.0	-1.9
6094	319	7	5	-1.9	1.3
6191	320	45	-13	1.3	-2.8
6225	319	14	26	-2.8	4.1
6366	325	10	9	4.1	7.4
6482	334	36	52	7.4	1.0
6718	336	86	30	1.0	-2.9
6796	334	10	30	-2.9	3.1
7114	343	177	176	3.1	-4.5
7662	319	197	276	-4.5	-0.7
8047	316	12	9	-0.7	2.5
8134	318	20	128	2.5	-1.7
8398	314	30	38	-1.7	-5.1
8721	297	162	137	-5.1	3.8
8966	306	19	14	3.8	-1.9
9038	305	27	11	-1.9	4.8
9180	312	17	25	4.8	0.8
9257	312	5	5	0.8	4.1
9296	314	9	12	4.1	-1.0
9374	313	21	21	-1.0	2.6
9573	318	91	56	2.6	-5.9
9774	307	59	72	-5.9	4.3
9973	315	45	67	4.3	1.0
10134	317	6	5	1.0	2.3
10187	318	5	5	2.3	0.2
10273	318	5	5	0.2	3.0
10324	320	6	5	3.0	-0.9
10389	319	26	33	-0.9	2.3
10491	321	5	5	2.3	-0.6
10627	321	6	4	-0.6	1.0
10728	322	26	36	1.0	-1.9
10850	319	10	10	-1.9	0.0
10910	319	6	5	0.0	-2.4

Cantons de l'Est, route 147, alignement vertical (Suite 3)

C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
11041	316	37	30	-2.4	-0.1
11246	316	84	38	-0.1	-4.1
11774	294	362	73	-4.1	-0.8
12303	290	133	178	-0.8	0.9
12610	293	33	27	0.9	4.8
12657	295				

ROUTE 222**Tracé en plan**

Cantons de l'Est route 222, alignement horizontal					
	chaînage de début	Chaînage de fin	R	sens	
tangente	28	885			gisement=90
courbe	885	1121	343	right	
tangente	1121	2756			
tangente	2756	4485			
courbe	4485	4796	1090	left	
tangente	4796	5367			
courbe	5367	5745	505	right	
courbe	5745	6312	703	left	
tangente	6312	6910			
courbe	6910	7194	350	right	
tangente	7194	7374			
courbe	7374	7661	355	left	
tangente	7661	8568			
courbe	8568	9050	293	left	
tangente	9050	9214			
courbe	9214	9362	280	right	
tangente	9362	9831			
courbe	9831	9983	250	right	
tangente	9983	10407			
courbe	10407	10815	455	right	
tangente	10815	11008			
courbe	11008	11133	241	left	
tangente	11133	12086			
courbe	12086	12364	538	left	
tangente	12364	12754			
courbe	12754	13000	565	right	
tangente	13000	13279			
courbe	13279	13550	562	right	
tangente	13550	13621			
courbe	13621	13790	897	left	
tangente	13790	15857			

Profil en long

Cantons de l'Est, route 222, alignement vertical					
C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
0	275	0	0	0.0	0.2
276	281	12	23	1.7	0.5
398	287	61	47	4.9	0.0
562	288	17	36	0.1	0.3
668	291	15	22	3.3	-0.1
791	290	18	46	-0.6	0.1
902	291	30	18	0.8	-0.1
1016	290	30	81	-1.4	0.5
1929	333	139	384	4.7	0.3
2809	362	102	159	3.3	0.0
3210	360	148	180	-0.4	-1.0
3901	288	146	201	-10.4	0.7
4287	317	103	157	7.5	0.1
4964	324	151	58	1.0	0.8
5358	355	191	182	7.9	-0.5
5698	338	79	76	-4.9	0.2
5943	343	53	80	2.2	-0.3
6392	329	75	30	-3.1	-1.2
6940	263	113	115	-12.1	0.2
7413	272	33	30	1.9	0.4
7559	278	37	62	4.1	0.2
7901	284	196	257	1.8	-0.5
8594	249	160	172	-5.0	0.0
9587	251	77	76	0.2	-0.6
9736	242	33	19	-6.0	0.0
9950	242	16	25	0.1	0.3
10244	252	334	191	3.4	-0.4
10483	244	14	43	-3.6	-0.2
10681	240	26	50	-1.9	0.1
10875	242	25	85	1.2	-0.1
11381	238	160	69	-0.8	0.4
11647	248	47	23	3.7	0.7
12141	285	301	145	7.4	-0.1
12563	281	156	107	-0.9	1.7
12857	331	47	60	17.2	-0.7
13050	317	53	30	-7.3	0.7
13301	334	113	110	6.8	0.1
13723	337	105	197	0.6	-0.2

Cantons de l'Est, route 222, alignement vertical (Suite)					
C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
14169	326	94	111	-2.5	-0.6
14370	314	37	47	-5.7	-0.4
14751	297	30	42	-4.4	-0.2
14894	294	18	22	-2.1	-0.6
15021	287	46	40	-6.3	-0.3
15486	271	28	26	-3.2	-0.1
15592	270	12	33	-1.2	-0.4
15738	264	53	42	-4.0	0.5
15839	269	6	17	5.0	0.3
15857	270				

Route 329**Tracé en plan**

Laurentides route 329, alignement horizontal					
	chaînage de début	Chaînage de fin	R	sens	
tangente	0	322			gisement=5
courbe	322	916	550	right	
tangente	916	1053			
courbe	1053	1199	340	left	
tangente	1199	1337			
courbe	1337	1475	1200	right	
tangente	1475	1587			
courbe	1587	1781	1200	left	
tangente	1781	2169			
courbe	2169	2419	1200	right	
tangente	2419	2948			
courbe	2948	3275	220	left	
tangente	3275	5167			
courbe	5167	5295	4000	right	
tangente	5295	5539			
courbe	5539	5757	300	right	
tangente	5757	6888			
courbe	6888	7129	460	left	
tangente	7129	7260			
courbe	7260	7551	380	right	
tangente	7551	7825			
courbe	7825	8105	380	right	
tangente	8105	8133			
courbe	8133	8214	100	left	
tangente	8214	8406			
courbe	8406	8523	340	left	
tangente	8523	8803			
courbe	8803	9015	300	right	
tangente	9015	9502			
courbe	9502	9753	1200	right	
tangente	9753	10041			

Laurentides route 329, alignement horizontal (Suite)

	chaînage de début	Chaînage de fin	R	sens	
courbe	10041	10332	550	right	
tangente	10332	10384			
courbe	10384	10526	760	left	
tangente	10526	10606			
courbe	10606	10704	500	right	
tangente	10704	10742			
courbe	10742	10842	760	left	
tangente	10842	11245			
courbe	11245	11294	760	left	
courbe	11294	11462	950	right	
tangente	11462	11492			
courbe	11492	11713	260	left	
tangente	11713	11844			
courbe	11844	11958	300	left	
tangente	11958	12252			
courbe	12252	12574	300	right	
tangente	12574	12694			
courbe	12694	12974	300	left	
tangente	12974	13233			
courbe	13233	13500	1700	right	
tangente	13500	13939			
courbe	13939	14132	340	right	
tangente	14132	14220			
courbe	14220	14337	600	left	
tangente	14337	14746			
courbe	14746	15259	340	left	
tangente	15259	15510			
courbe	15510	15986	300	right	
tangente	15986	16470			
courbe	16470	16702	380	left	
tangente	16702	16977			
courbe	16977	17249	380	right	
tangente	17249	18368			

Profil en long

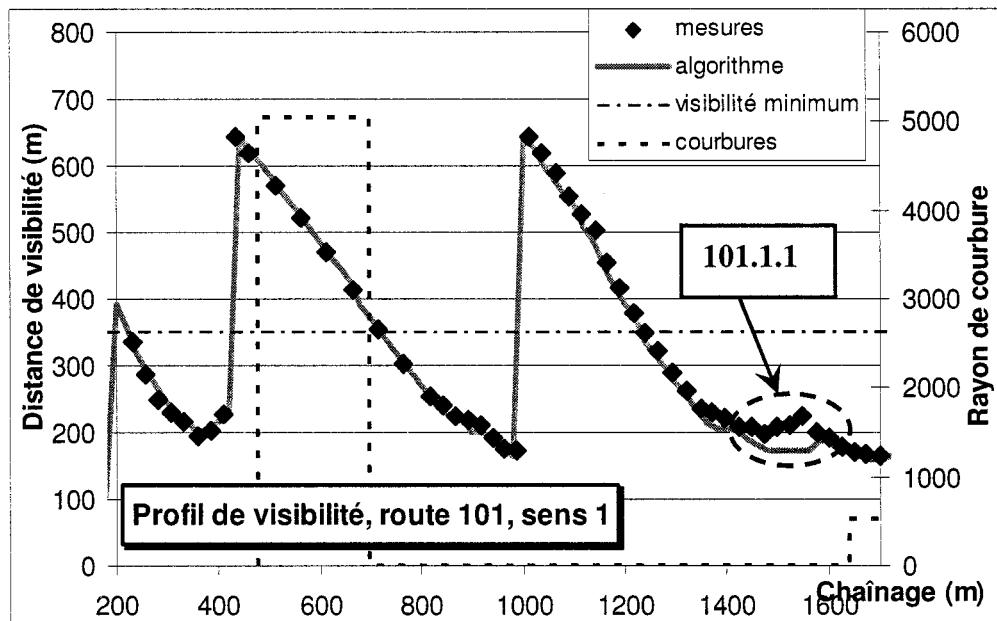
Laurentides, route 329, alignement vertical						
C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)	
0	0	0	8	0.0	-1.5	
33	167	8	8	-1.5	0.1	
210	302	8	8	0.1	-1.1	
301	509	24	20	-1.1	2.1	
444	601	56	56	2.1	0.2	
671	647	52	44	0.2	3.7	
1003	698	71	79	3.7	0.8	
1189	804	40	87	0.8	3.6	
1448	860	12	12	3.6	2.7	
1592	955	44	32	2.7	8.3	
1804	1124	24	32	8.3	4.2	
1972	1243	16	63	4.2	1.3	
2131	1447	8	8	1.3	0.8	
2293	1681	20	20	0.8	1.4	
2485	1876	79	119	1.4	0.2	
2719	1938	51	51	0.2	1.6	
2960	2127	135	135	1.6	4.3	
3183	2253	48	48	4.3	1.6	
3322	2307	24	24	1.6	0.4	
3510	2433	91	75	0.4	4.7	
3686	2553	30	60	4.7	0.3	
3896	2610	60	83	0.3	-3.2	
4054	2701	52	52	-3.2	1.3	
4206	2763	24	12	1.3	-0.4	
4364	2868	52	28	-0.4	-3.3	
4506	3009	71	63	-3.3	7.0	
4663	3104	38	52	7.0	1.2	
4793	3170	32	20	1.2	3.2	
5089	3277	99	87	3.2	5.9	
5328	3399	71	91	5.9	-2.1	
5560	3497	71	67	-2.1	3.3	
5821	3562	99	75	3.3	-3.8	
5970	3611	44	48	-3.8	-0.6	
6069	3656	4	4	-0.6	-1.9	
6152	3701	16	16	-1.9	0.4	
6193	3815	8	8	0.4	-0.9	
6246	3978	12	8	-0.9	4.1	

Laurentides, route 329, alignement vertical (Suite)					
C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)
6494	4026	20	24	4.1	1.9
6592	4085	12	8	1.9	-0.6
6679	4143	52	79	-0.6	7.5
6939	4260	95	91	7.5	-4.8
7116	4350	40	40	-4.8	-0.2
7357	4437	12	12	-0.2	0.7
7497	4544	36	20	0.7	-1.6
7631	4629	44	44	-1.6	4.1
7850	4673	95	87	4.1	-5.2
8025	4750	40	48	-5.2	-0.4
8352	4815	67	32	-0.4	5.7
8441	4893	16	32	5.7	2.6
8630	4946	71	60	2.6	9.7
8889	4985	52	71	9.7	1.2
8995	5028	12	12	1.2	8.5
9140	5068	56	56	8.5	6.9
9399	5167	115	95	6.9	-3.0
9599	5268	79	56	-3.0	0.3
9683	5368	4	4	0.3	3.2
9749	5429	4	4	3.2	1.7
10042	5532	32	32	1.7	-0.5
10221	5633	4	4	-0.5	1.9
10336	5753	36	20	1.9	7.8
10395	5818	16	12	7.8	5.2
10474	5918	36	28	5.2	-1.9
10577	6000	16	12	-1.9	-8.4
10637	6094	24	79	-8.4	-1.1
10808	6191	28	24	-1.1	-5.1
10875	6225	8	8	-5.1	-3.9
11036	6366	48	40	-3.9	-0.8
11413	6482	79	71	-0.8	1.2
11546	6718	16	8	1.2	-2.0
11610	6796	32	63	-2.0	1.2
11835	7114	75	71	1.2	-1.1
12092	7662	111	183	-1.1	5.1
12567	8047	127	159	5.1	-1.1
12931	8134	63	71	-1.1	5.9
13311	8398	83	111	5.9	1.0

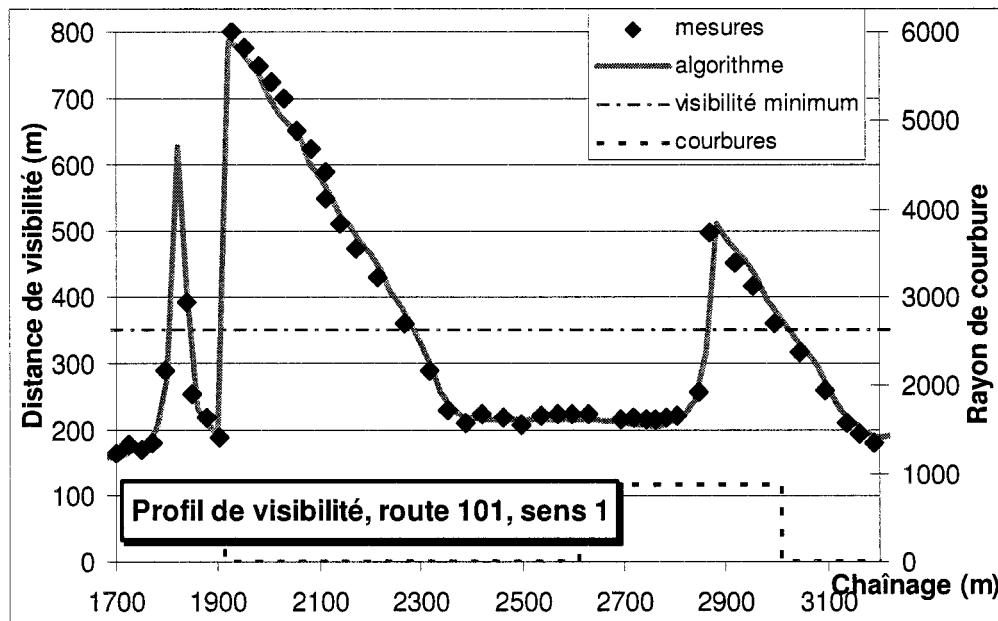
Laurentides, route 329, alignement vertical (Suite 2)						
C(VPI) (m)	Z(VPI) (m)	longueur avant (m)	longueur après (m)	pente avant (%)	pente après (%)	
13614	8721	40	24	1.0	2.0	
13765	8966	28	71	2.0	1.5	
13991	9038	87	111	1.5	-3.2	
14324	9180	99	95	-3.2	4.7	
14577	9257	119	135	4.7	-5.2	
14826	9296	67	87	-5.2	-0.1	
15050	9374	63	71	-0.1	5.1	
15425	9573	127	127	5.1	-1.2	
15752	9774	95	127	-1.2	6.4	
16171	9973	95	63	6.4	2.6	
16380	10134	95	115	2.6	-3.5	
16632	10187	95	95	-3.5	4.8	
16875	10273	79	71	4.8	0.1	
17035	10324	56	56	0.1	-3.2	
17264	10389	71	87	-3.2	-0.2	
17487	10491	83	230	-0.2	3.1	
18638	10627	151	135	3.1	-3.0	

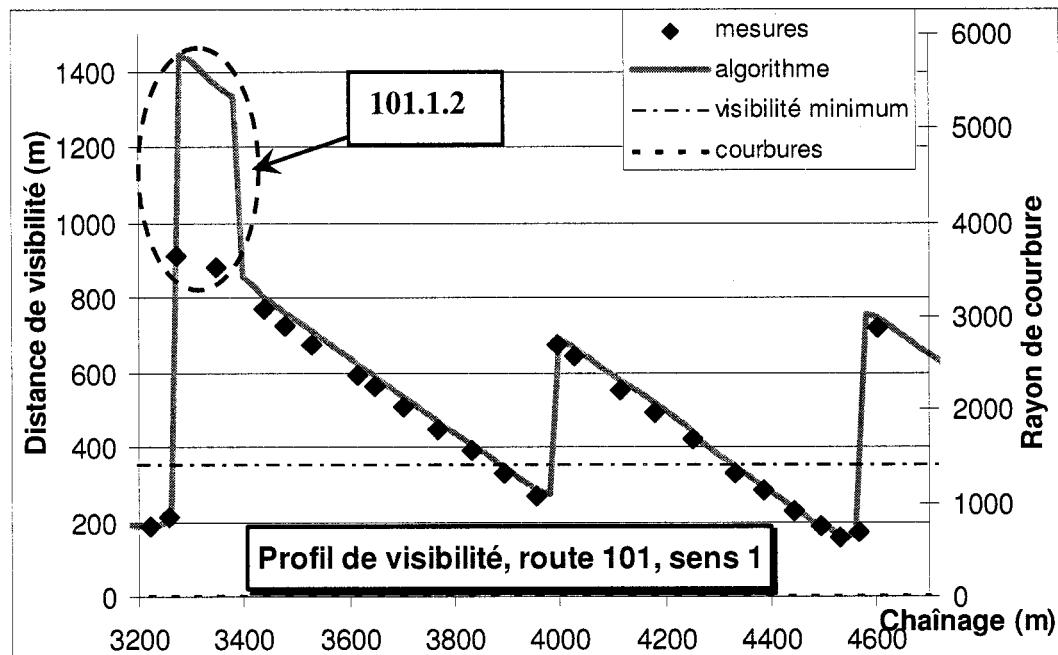
Annexe E: Profils de visibilité (les différences majeures y sont indiquées)

Route 101

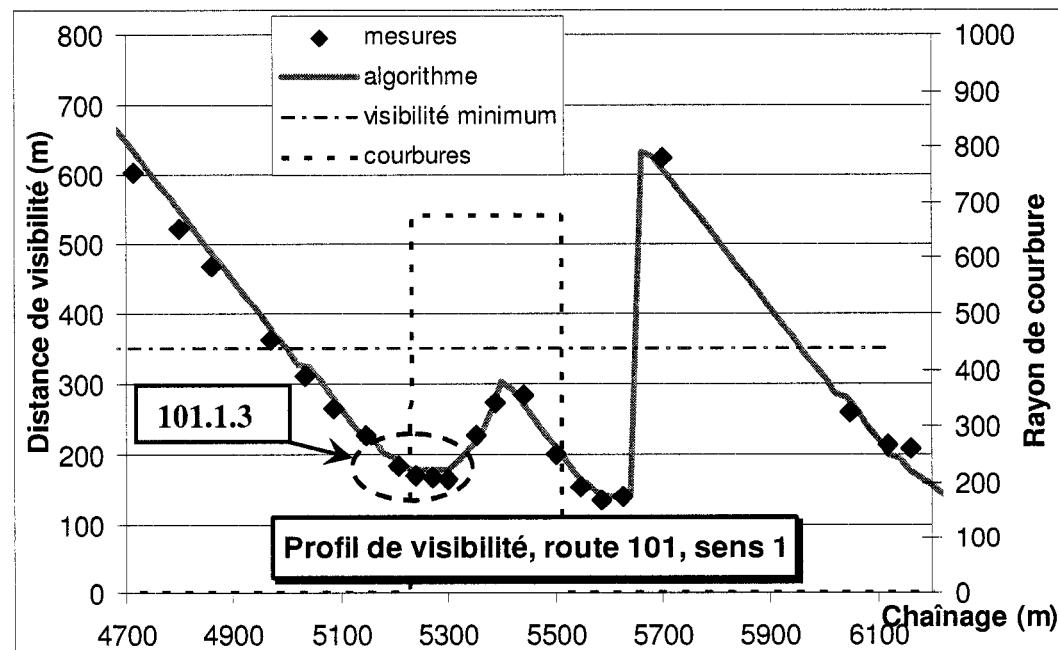


Profil de visibilité, route 101, sens 1, chaînages 0+200 à 1+700

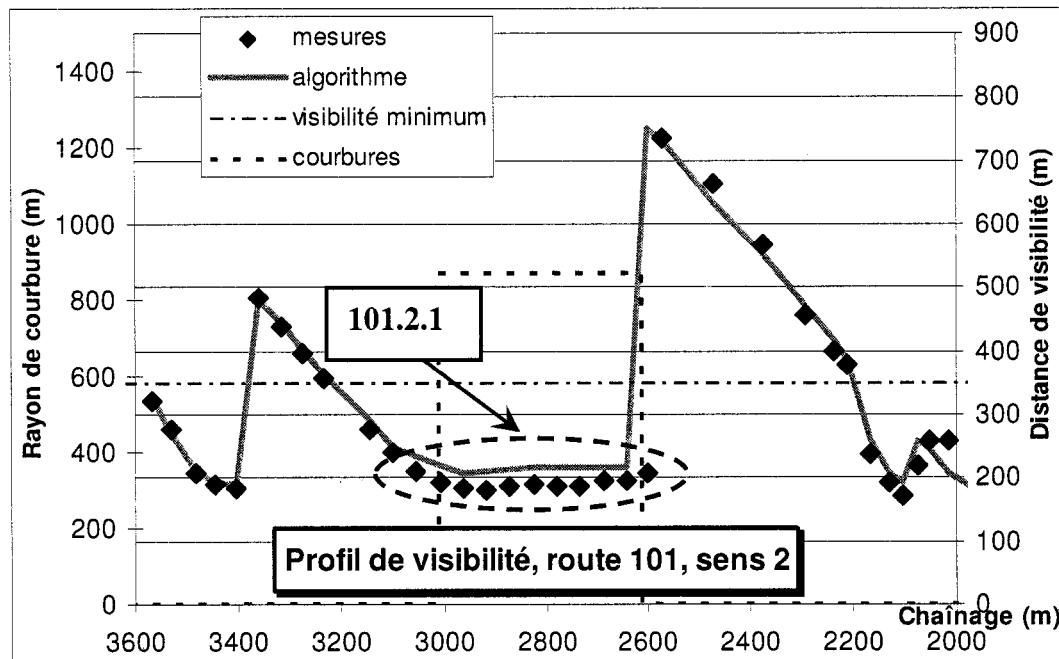




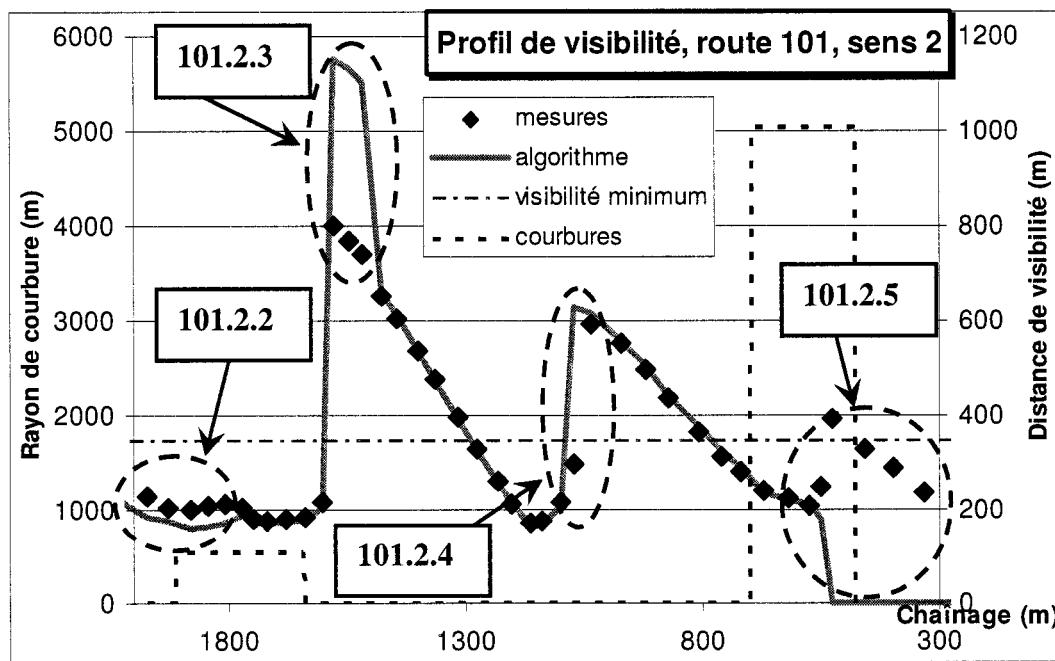
Profil de visibilité, route 101, sens 1, chaînages 3+200 à 4+700



Profil de visibilité, route 101, sens 1, chaînages 4+700 à 6+200

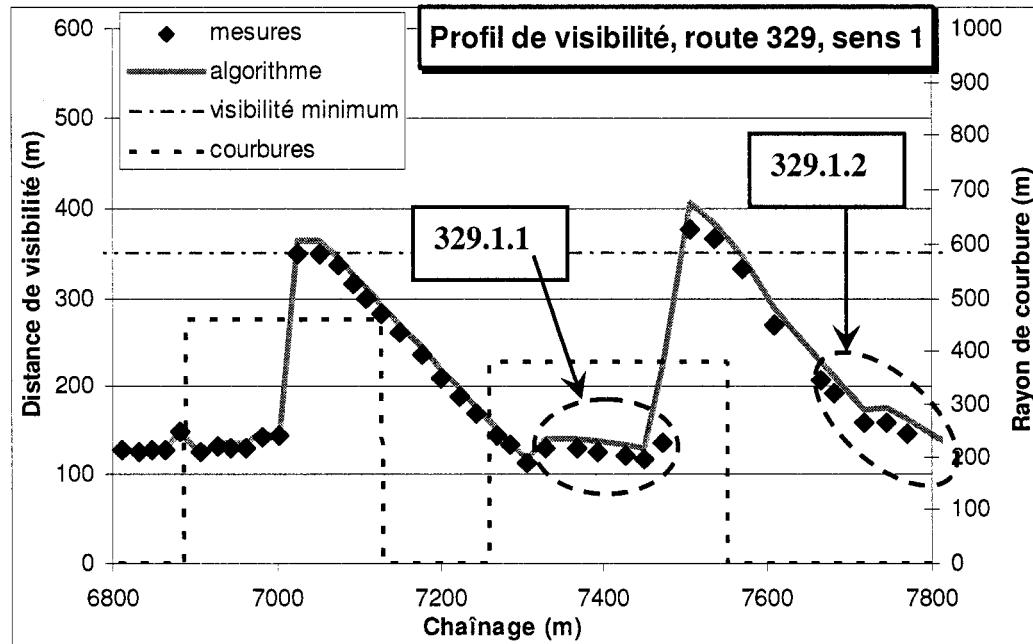


Profil de visibilité, route 101, sens 2, chaînages 3+600 à 2+000

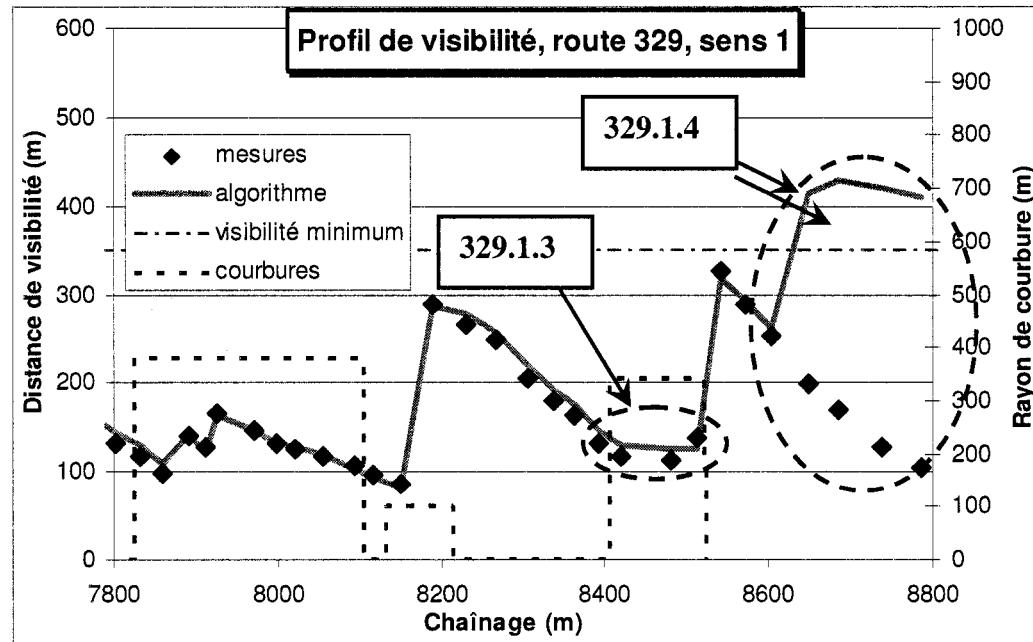


Profil de visibilité, route 101, sens 2, chaînages 2+000 à 0+300

Route 329

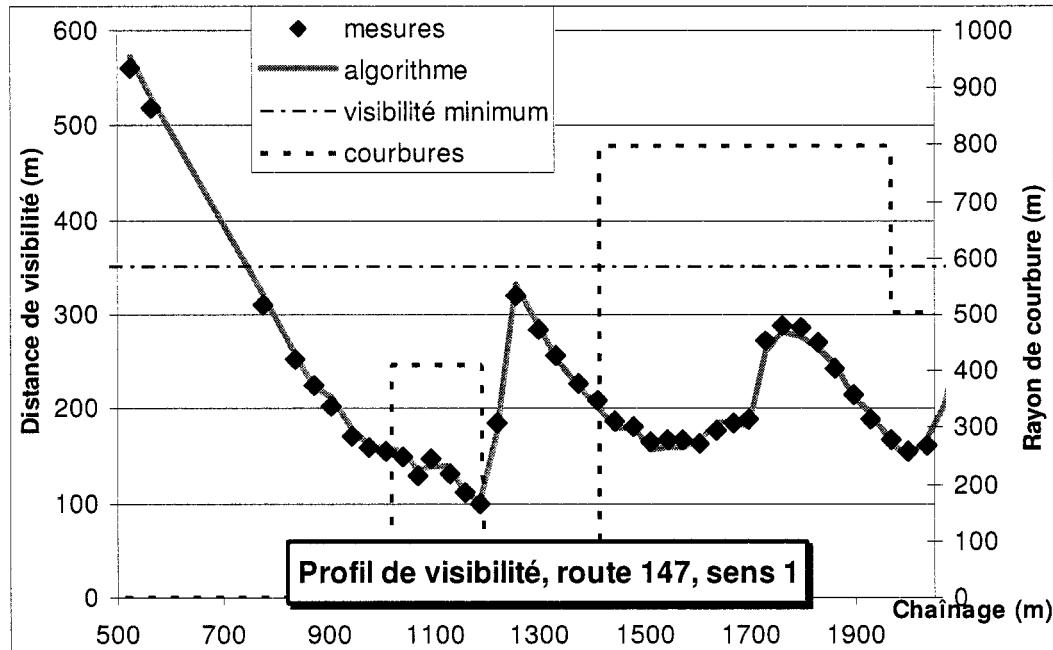


Profil de visibilité, route 329, sens 1, chaînages 6+800 à 7+800

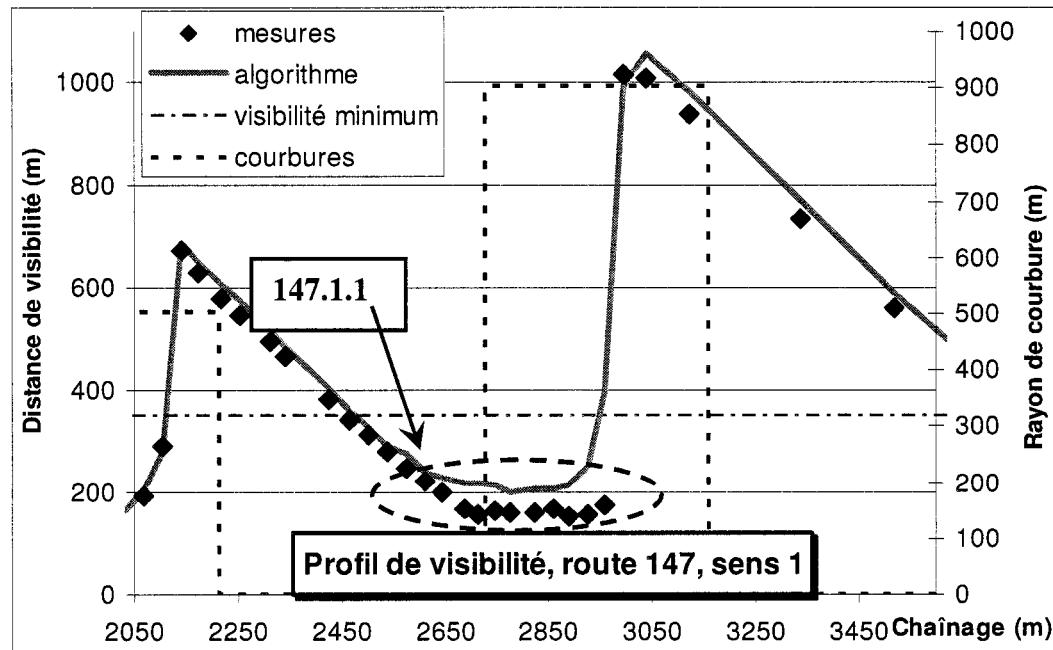


Profil de visibilité, route 329, sens 1, chaînages 7+800 à 8+800

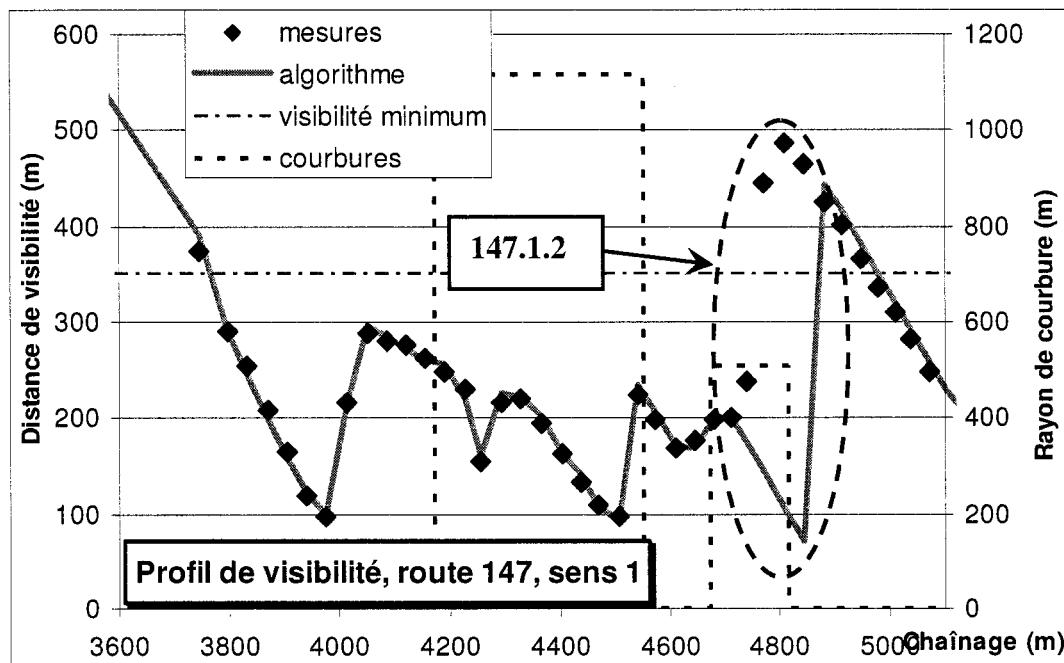
Route 147



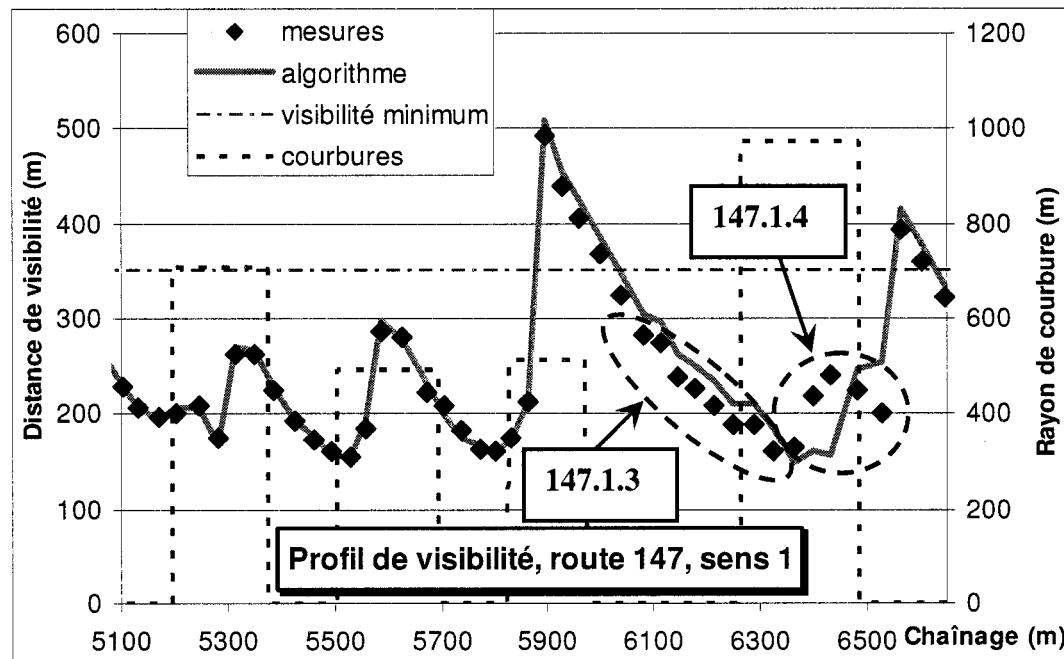
Profil de visibilité, route 147, sens 1, chaînages 0+500 à 2+050



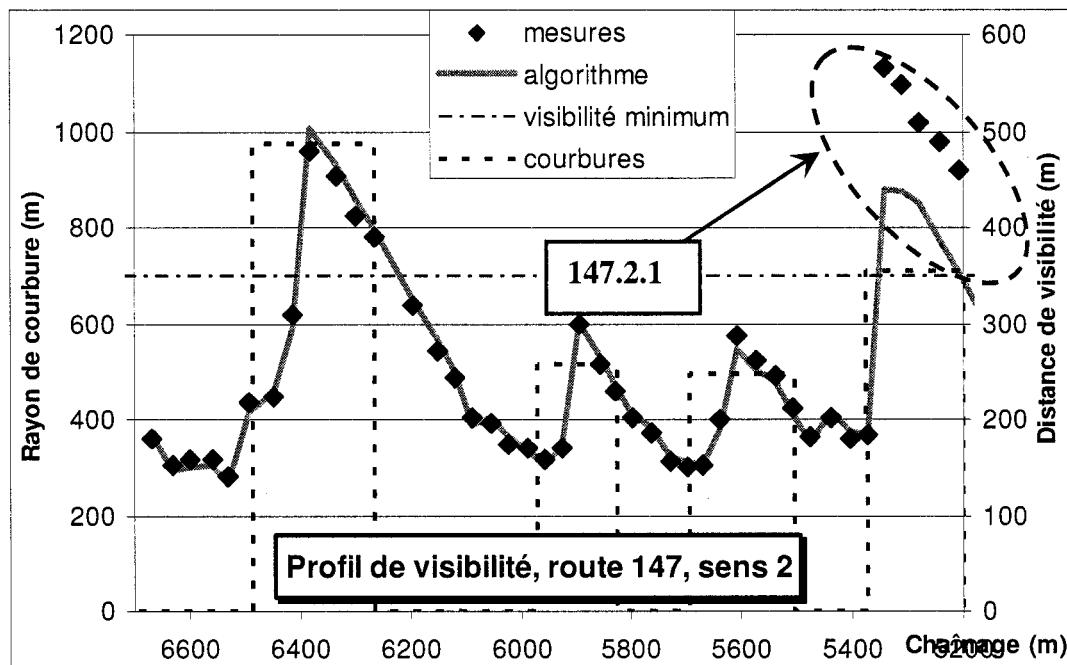
Profil de visibilité, route 147, sens 1, chaînages 2+050 à 3+600



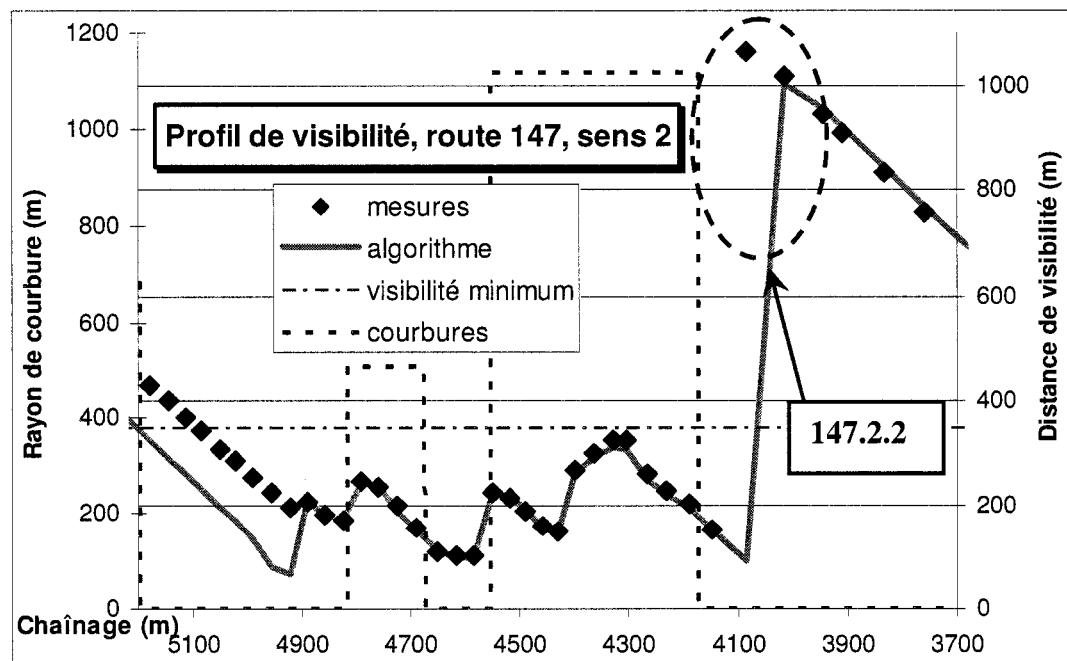
Profil de visibilité, route 147, sens 1, chaînages 3+600 à 5+100



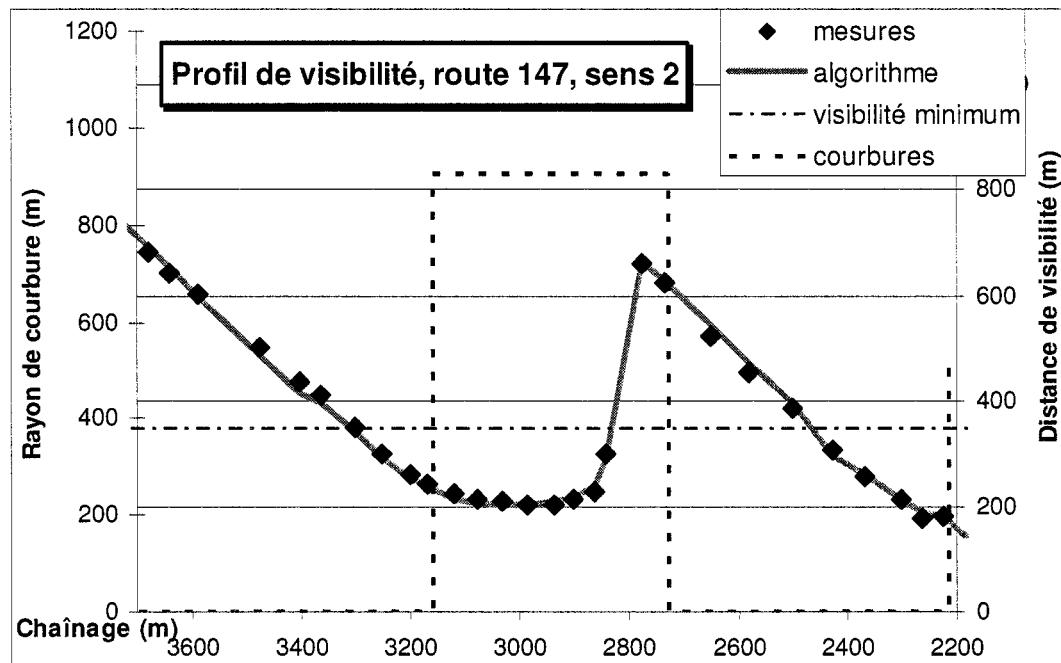
Profil de visibilité, route 147, sens 1, chaînages 5+100 à 6+700



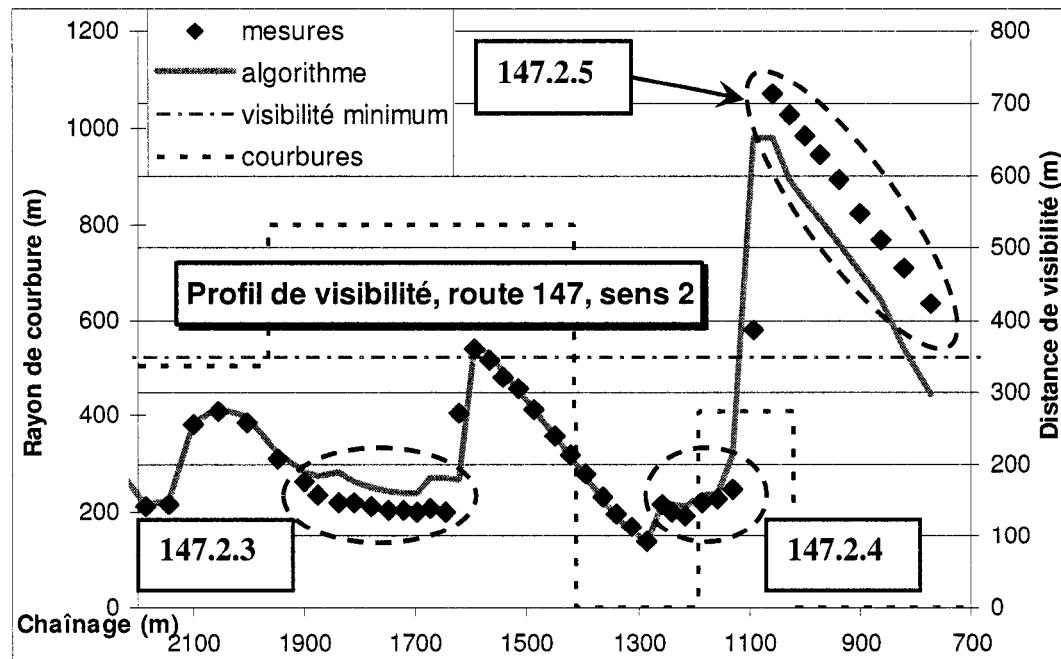
Profil de visibilité, route 147, sens 2, chaînages 6+700 à 5+200



Profil de visibilité, route 147, sens 2, chaînages 5+200 à 3+700

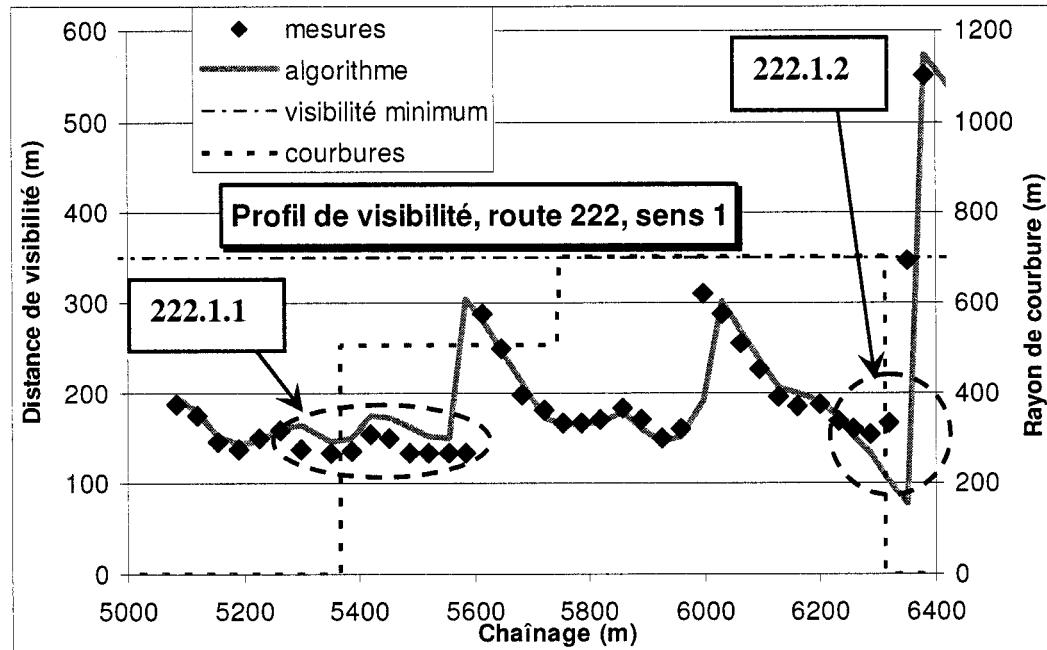


Profil de visibilité, route 147, sens 2, chaînages 3+700 à 2+200

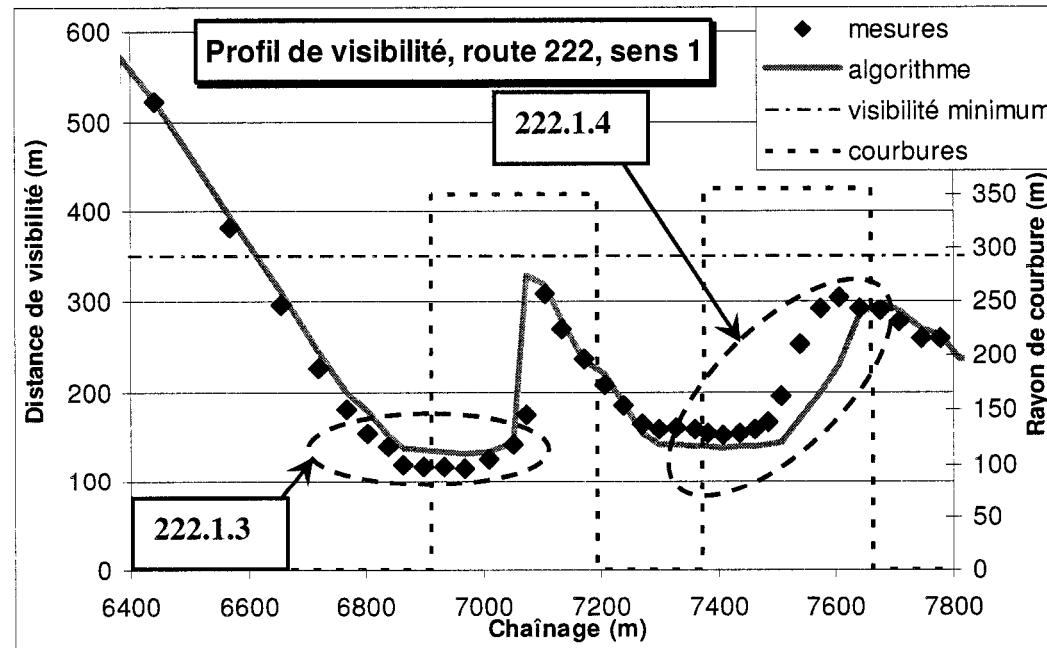


Profil de visibilité, route 147, sens 2, chaînages 2+200 à 0+700

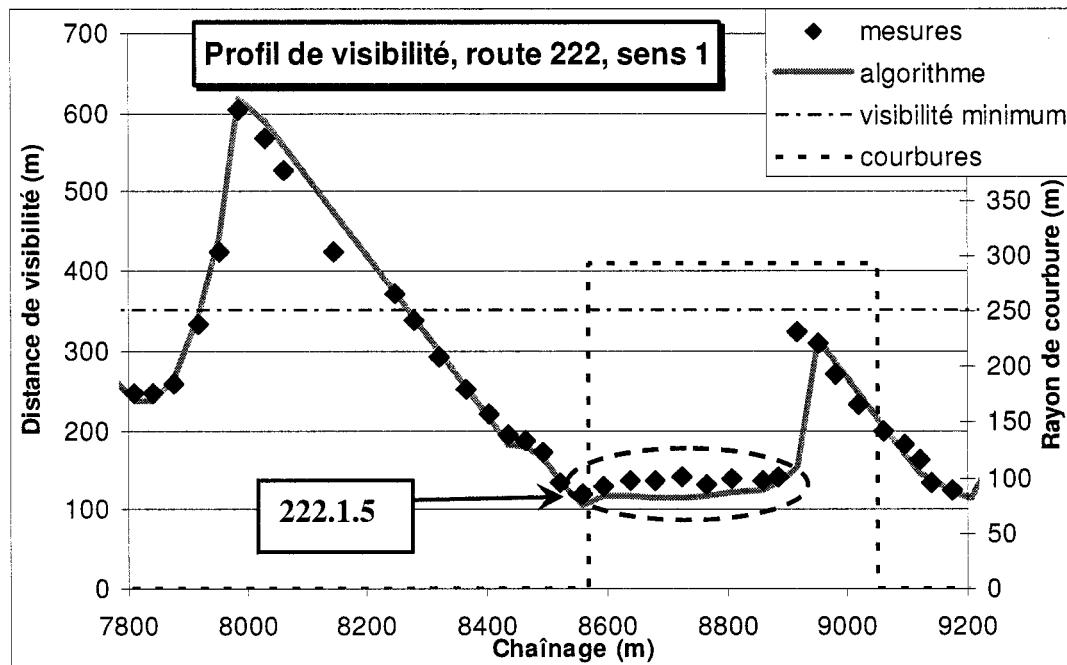
Route 222



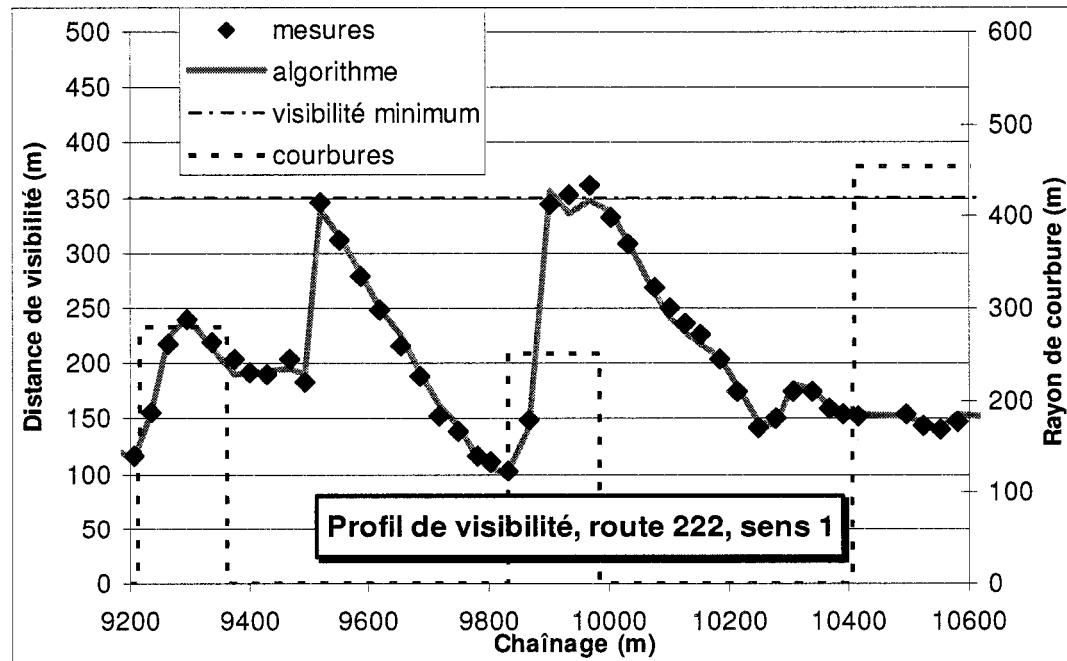
Profil de visibilité, route 222, sens 1, chaînages 5+000 à 6+400



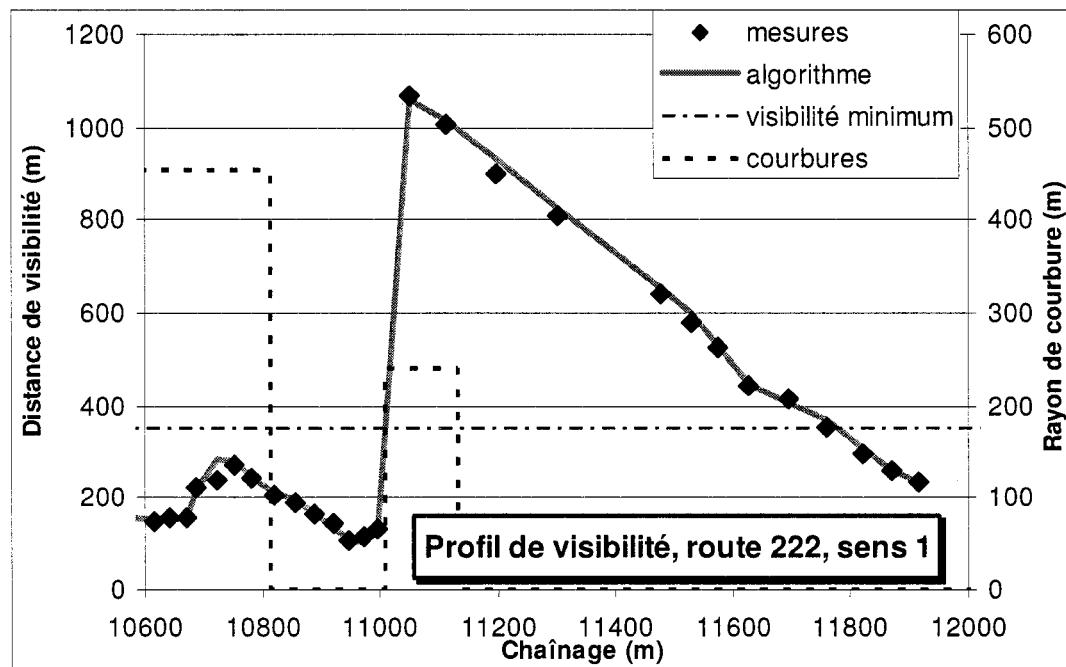
Profil de visibilité, route 222, sens 1, chaînages 6+400 à 7+800



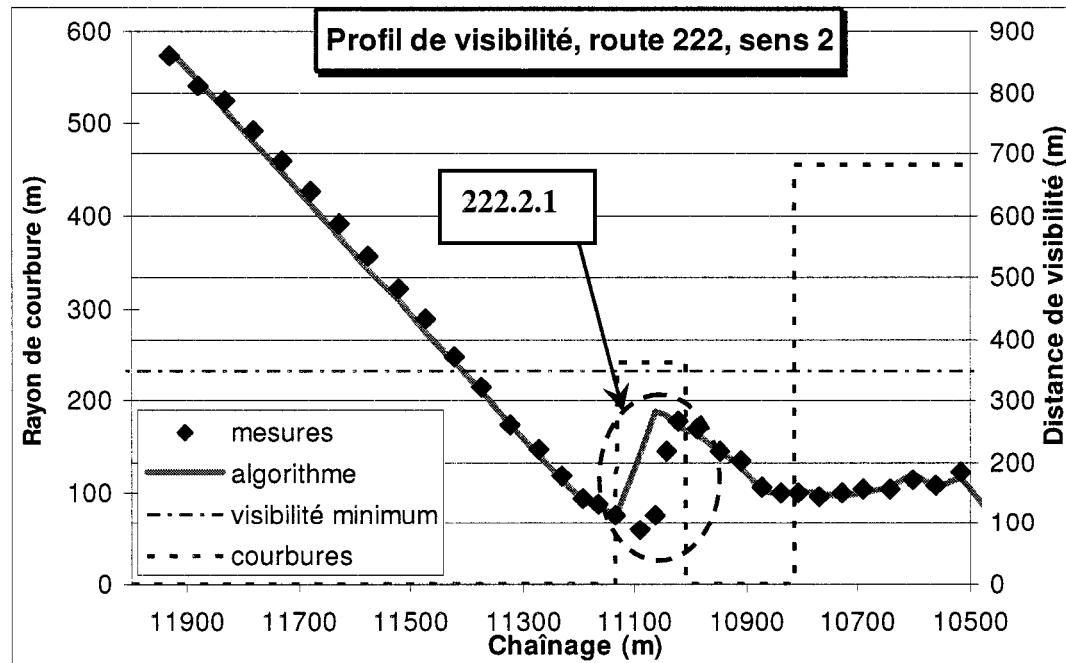
Profil de visibilité, route 222, sens 1, chaînages 7+800 à 9+200



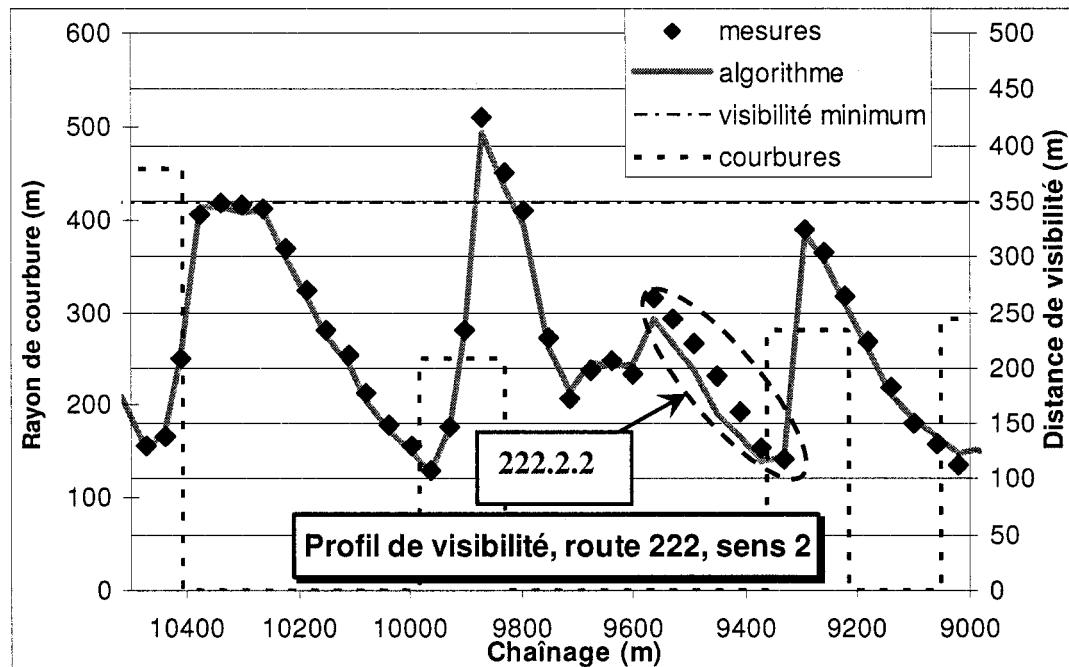
Profil de visibilité, route 222, sens 1, chaînages 9+200 à 10+600



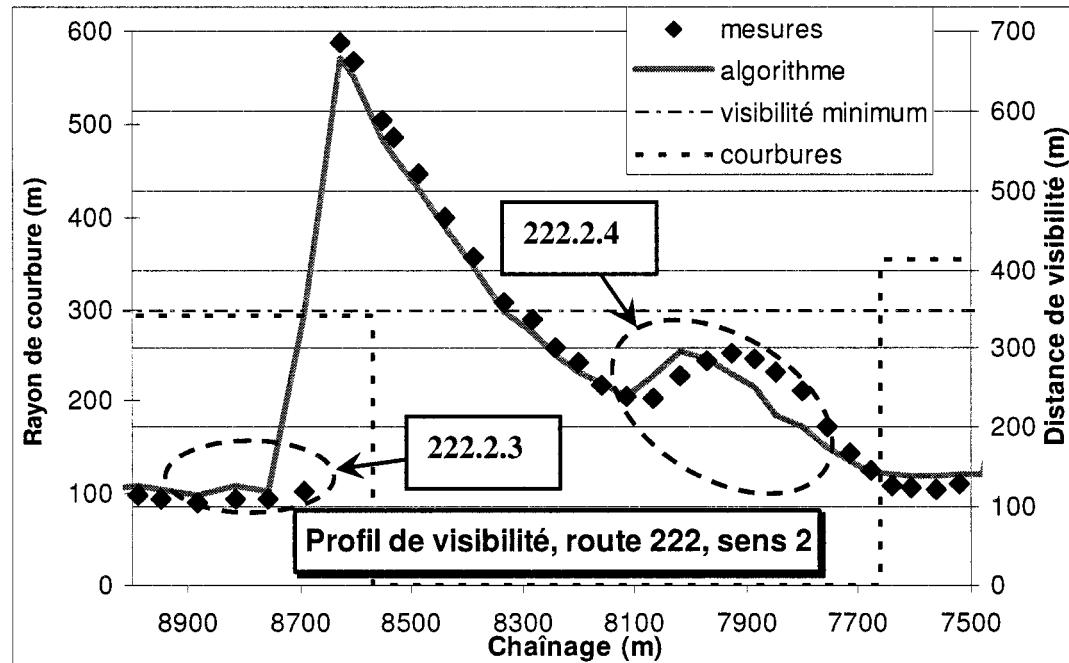
Profil de visibilité, route 222, sens 1, chaînages 10+600 à 12+000



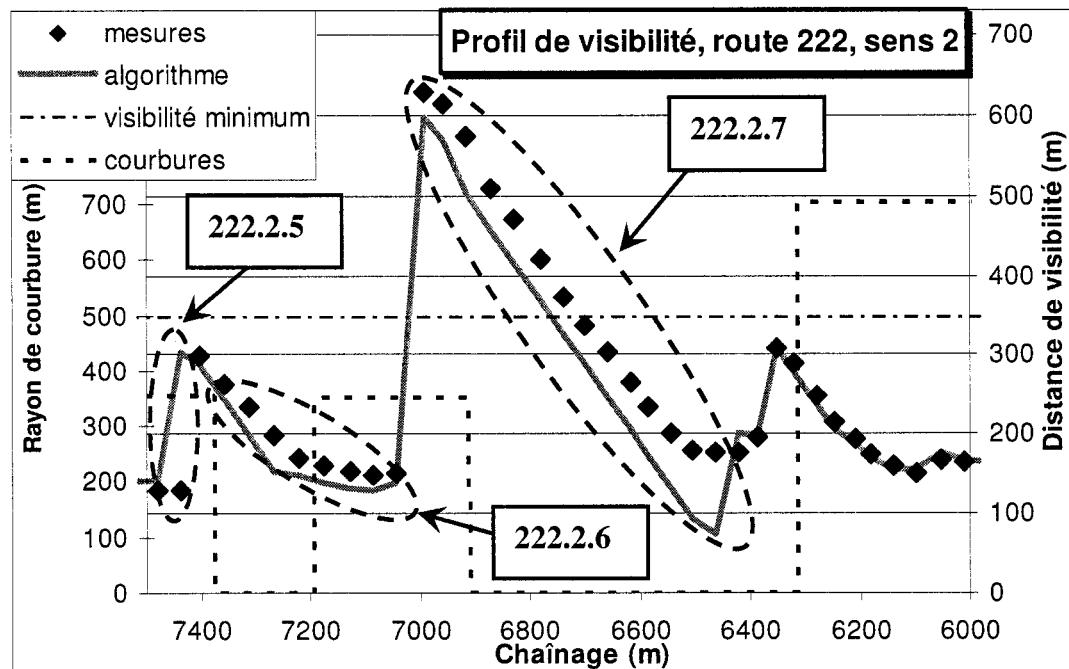
Profil de visibilité, route 222, sens 2, chaînages 12+000 à 10+500



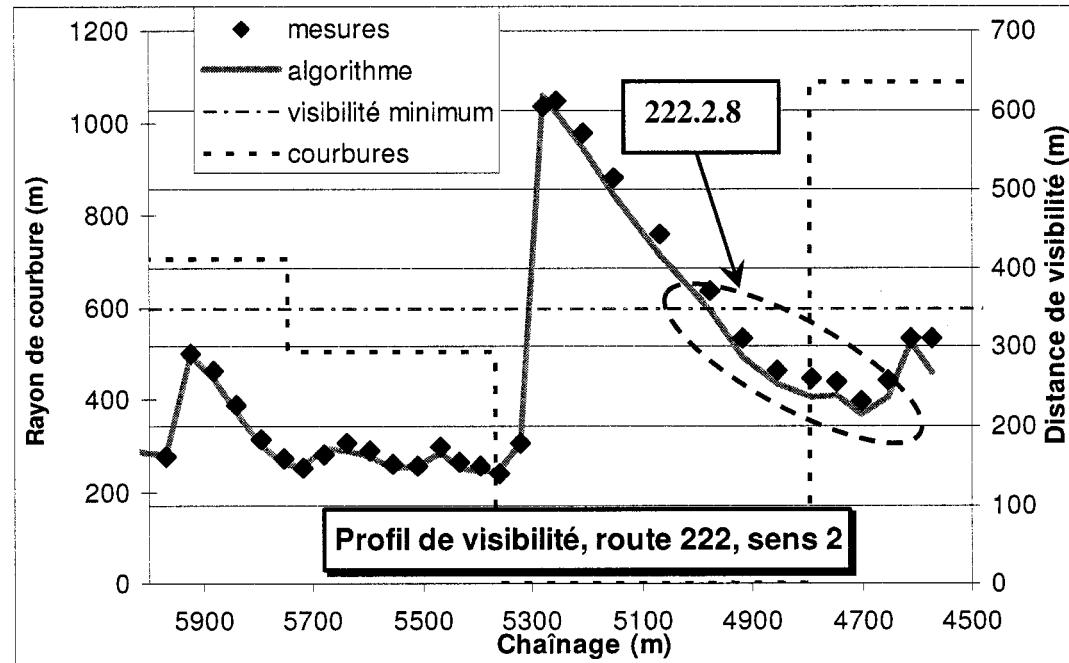
Profil de visibilité, route 222, sens 2, chainages 10+500 à 9+000



Profil de visibilité, route 222, sens 2, chainages 9+000 à 7+500



Profil de visibilité, route 222, sens 2, chaînages 7+500 à 6+000



Profil de visibilité, route 222, sens 2, chaînages 6+000 à 4+500

Annexe F: Zones potentielles de dépassement

Route 329

Sur le segment de la route 329 que nous avons étudié, il n'existe pas de zones potentielles de dépassement.

Route 101

Sens 1

Zones potentielles de dépassement de la route 101, sens 1				
Numéro de la zone	Algorithm		Mesures	
	Début et fin de zone	Longueur de la zone	Début et fin de zone	Longueur de la zone
1	439 719	280	434 719	284
2	1014 1230	216	1011 1240	229
3	1929 2283	354	1927 2275	348
4	2878 3024	146	2868 3006	138
5	3282 3888	606	3271 3872	601
6	4004 4329	325	3996 4314	318
7	4595 4998	403	4604 4983	379

Sens 2

Zones potentielles de dépassement de la route 101, sens 2				
Numéro de la zone	Algorithme		Mesures	
	Début et fin de zone	Longueur de la zone	Début et fin de zone	Longueur de la zone
1	3349	129	3360	134
	3220		3226	
2	2588	395	2572	371
	2193		2201	
3	1566	278	1577	289
	1288		1288	
4	1061	280	1035	242
	781		793	

Route 147**Sens 1**

Zones potentielles de dépassement de la route 147, sens 1				
Numéro de la zone	Algorithme		Mesures	
	Début et fin de zone	Longueur de la zone	Début et fin de zone	Longueur de la zone
1	2129	348	2140	321
	2477		2461	
2	2975	786	2994	766
	3761		3760	
3	(4886)	(94) ¹	4770	194
	(4980)		4964	
4	5899	135	5894	119
	6034		6013	

¹ Cette zone n'a pas une longueur suffisante, mais est indiquée pour comparaison

Sens 2

Zones potentielles de dépassement de la route 147, sens 2				
Numéro de la zone	Algorithme		Mesures	
	Début et fin de zone	Longueur de la zone	Début et fin de zone	Longueur de la zone
1	6372 6218	153	6382 6225	157
2	5316 5205	111	5340 5094	246
3	4053 3311	742	4085 3304	781
4	2814 2460	354	2776 2468	308

Route 222**Sens 1**

Zones potentielles de dépassement de la route 222, sens 1				
Numéro de la zone	Algorithme		Mesures	
	Début et fin de zone	Longueur de la zone	Début et fin de zone	Longueur de la zone
1	6392 6615	223	6381 6597	216
2	7971 8268	297	7953 8268	315
3	11042 11778	736	11050 11762	712

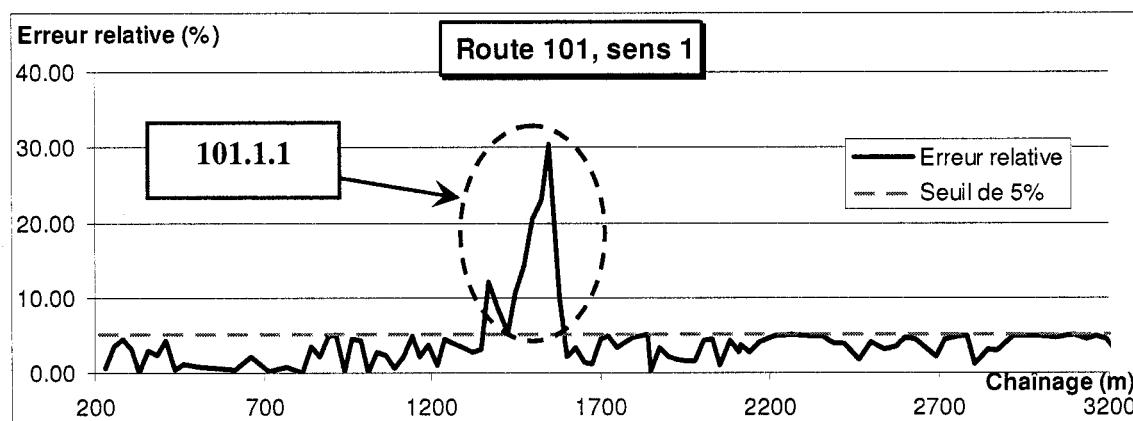
Sens 2

Zones potentielles de dépassement de la route 222, sens 2				
Numéro de la zone	Algorithme		Mesures	
	Début et fin de zone	Longueur de la zone	Début et fin de zone	Longueur de la zone
1	8605 8307	298	8626 8315	311
2	6955 6732	223	6991 6714	277
3	5244 4951	293	5280 4957	323

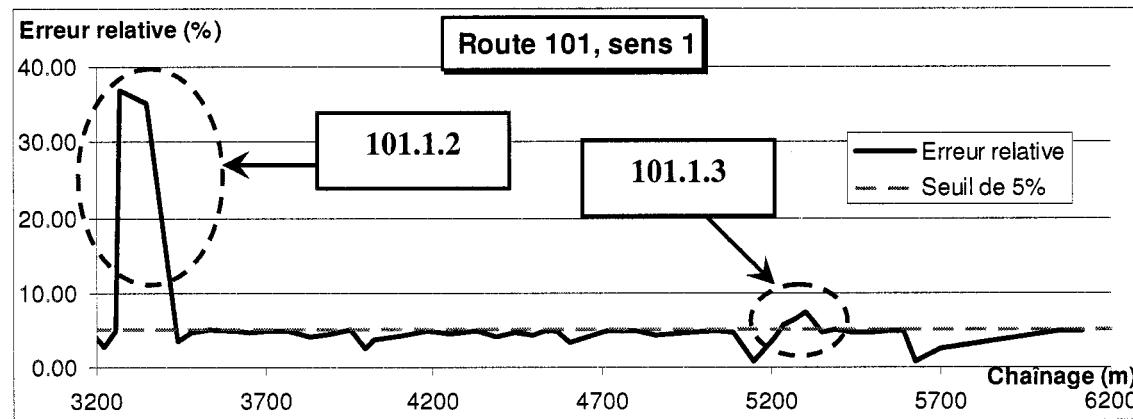
Annexe G: Courbes de l'erreur relative entre résultats de l'algorithme et des mesures

Route 101

Sens 1

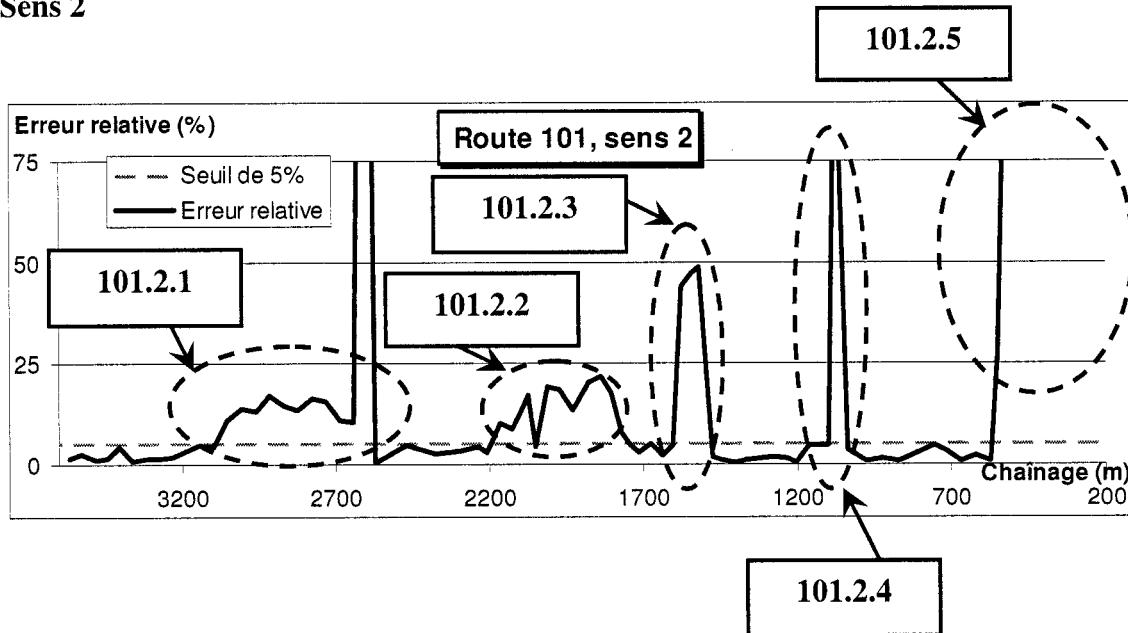


Courbe d'erreur relative, route 101, sens 1, chaînages 0+200 à 3+200

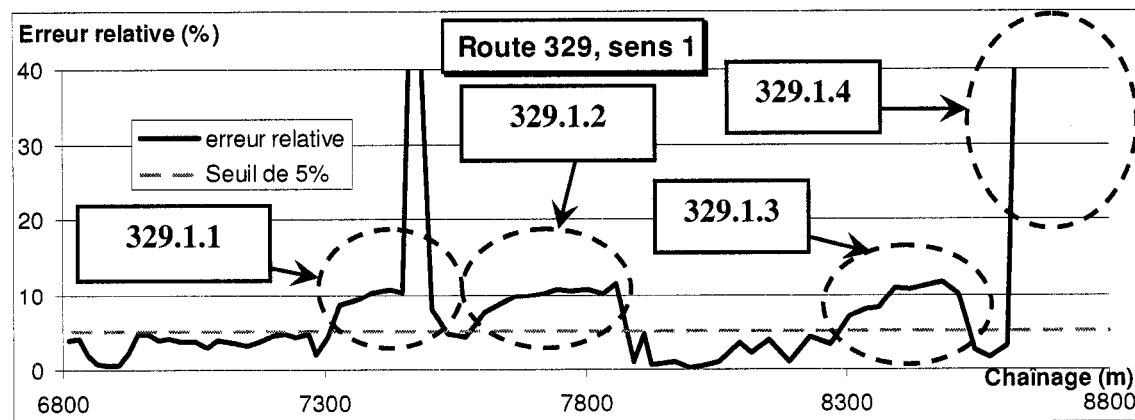


Courbe d'erreur relative, route 101, sens 1, chaînages 3+200 à 6+200

Sens 2



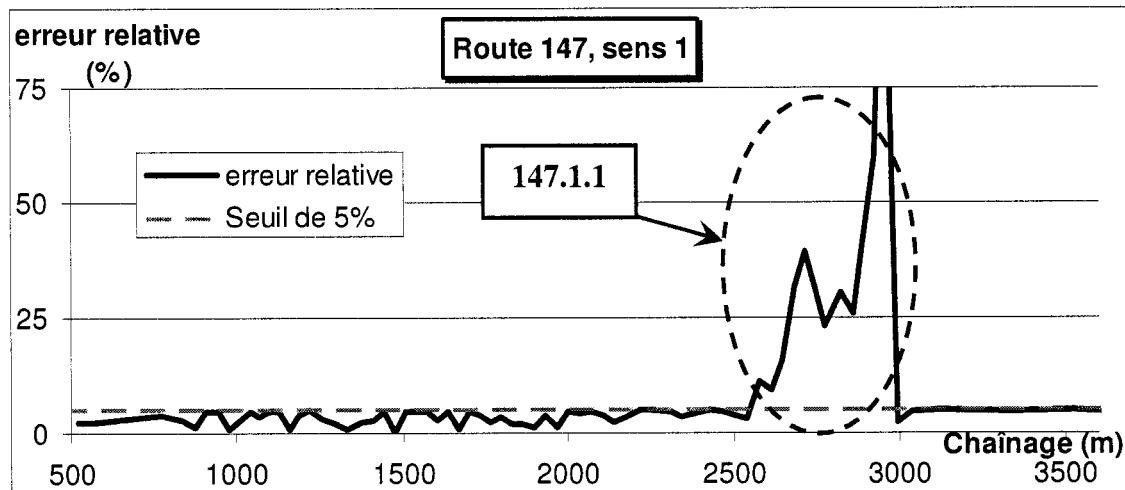
Courbe d'erreur relative, route 101, sens 2, chaînages 3+600 à 0+200

Route 329

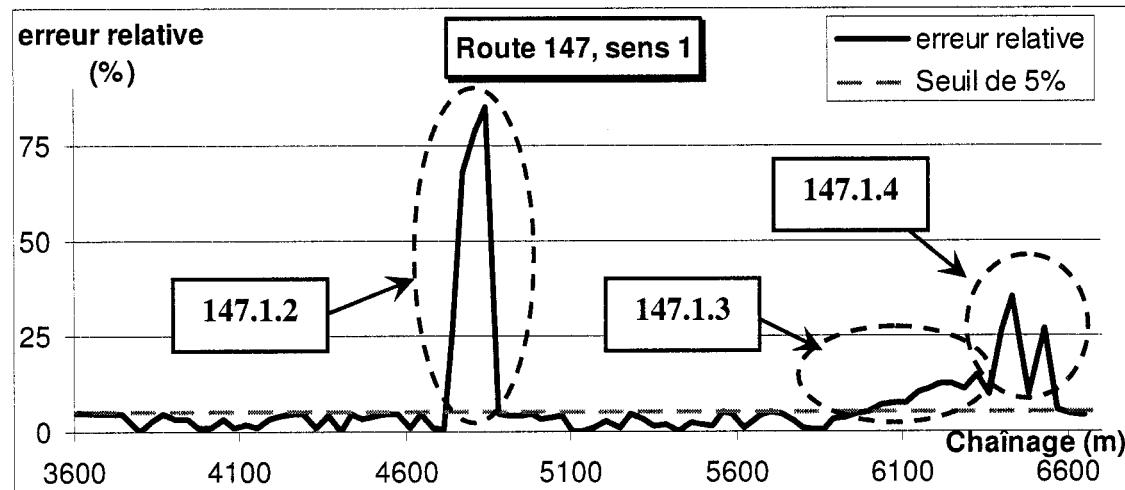
Courbe d'erreur relative, route 329, sens 1, chaînages 6+800 à 8+800

Route 147

Sens 1

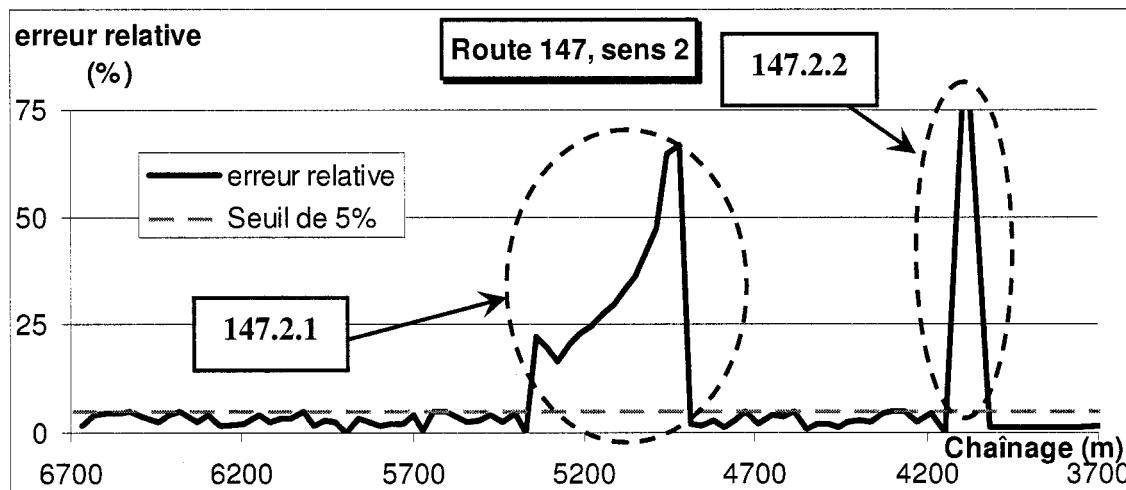


Courbe d'erreur relative, route 147, sens 1, chaînages 0+500 à 3+600

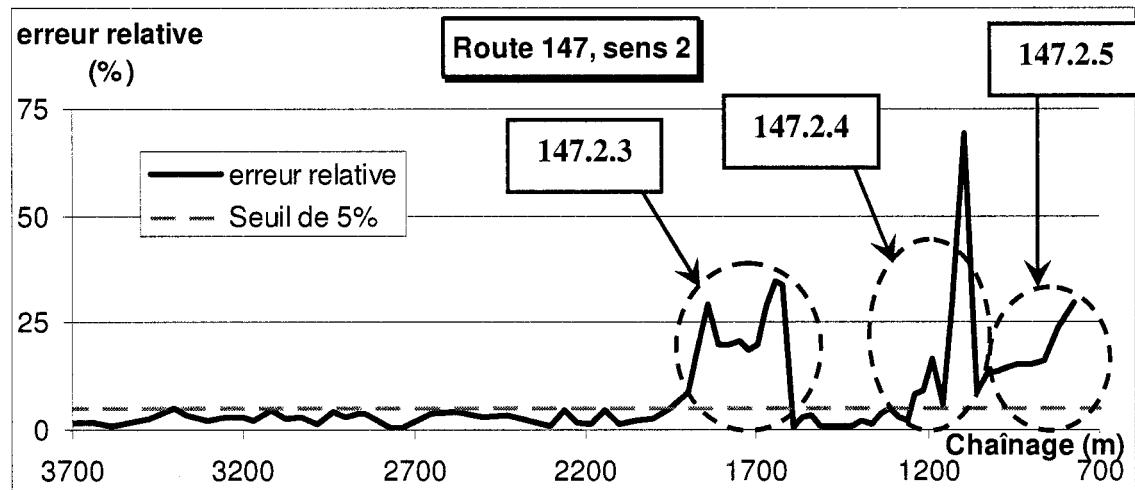


Courbe d'erreur relative, route 147, sens 1, chaînages 3+600 à 6+700

Sens 2



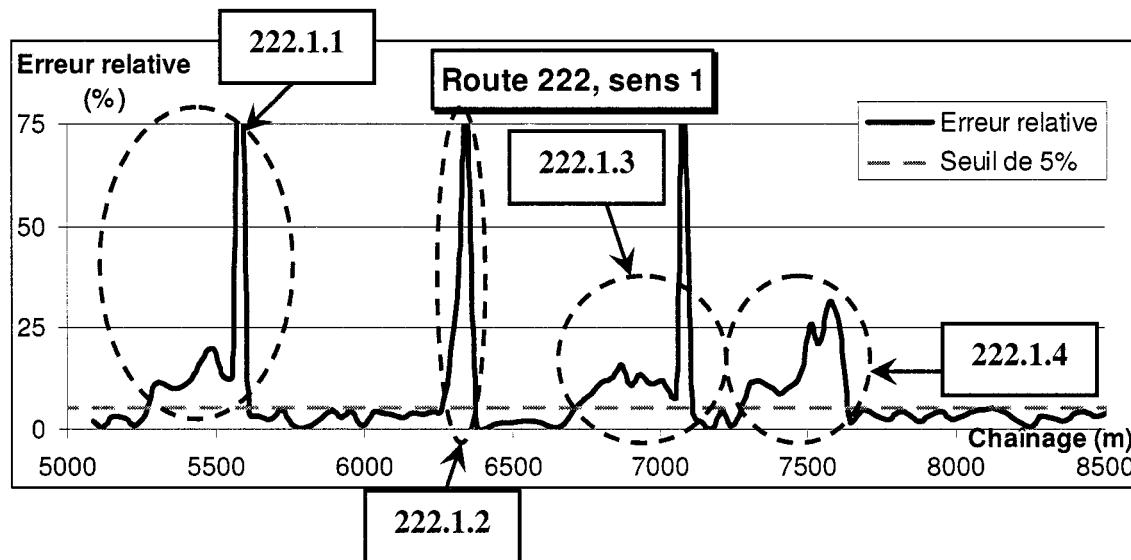
Courbe d'erreur relative, route 147, sens 2, chaînages 6+700 à 3+700



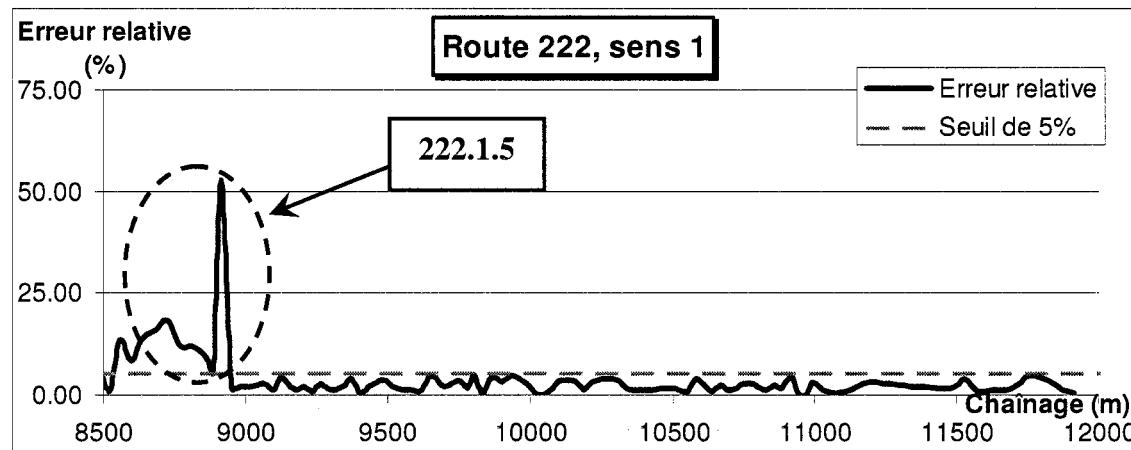
Courbe d'erreur relative, route 147, sens 2, chaînages 3+700 à 0+700

Route 222

Sens 1

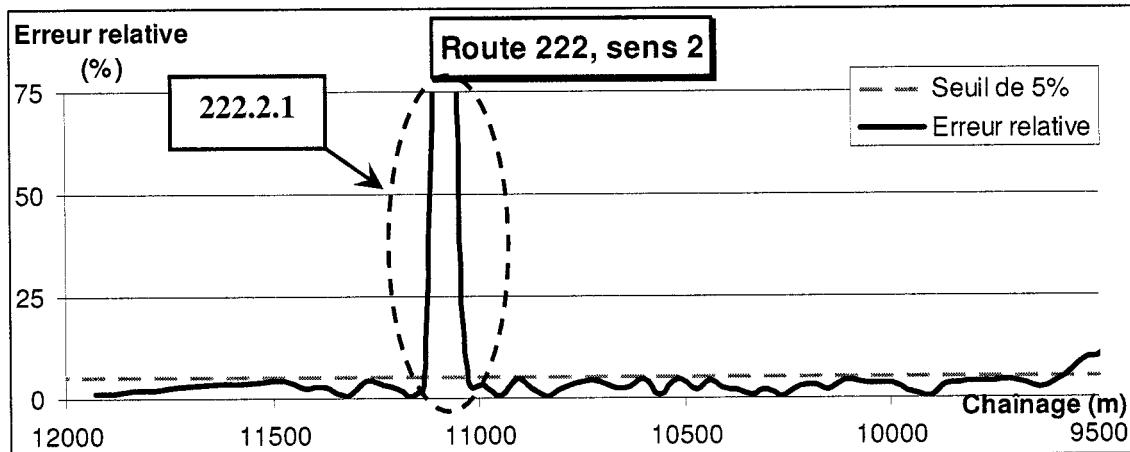


Courbe d'erreur relative, route 222, sens 1, chaînages 5+000 à 8+500

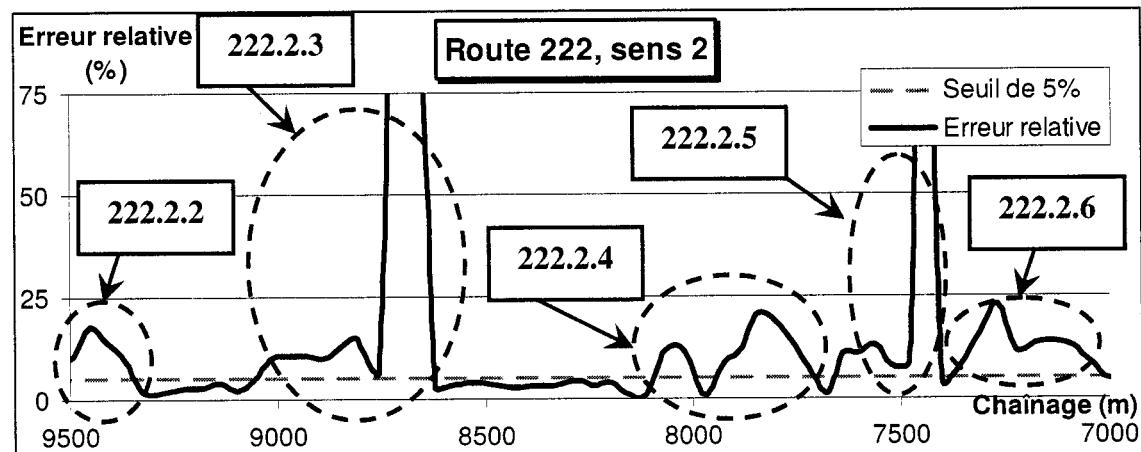


Courbe d'erreur relative, route 222, sens 1, chaînages 8+500 à 12+000

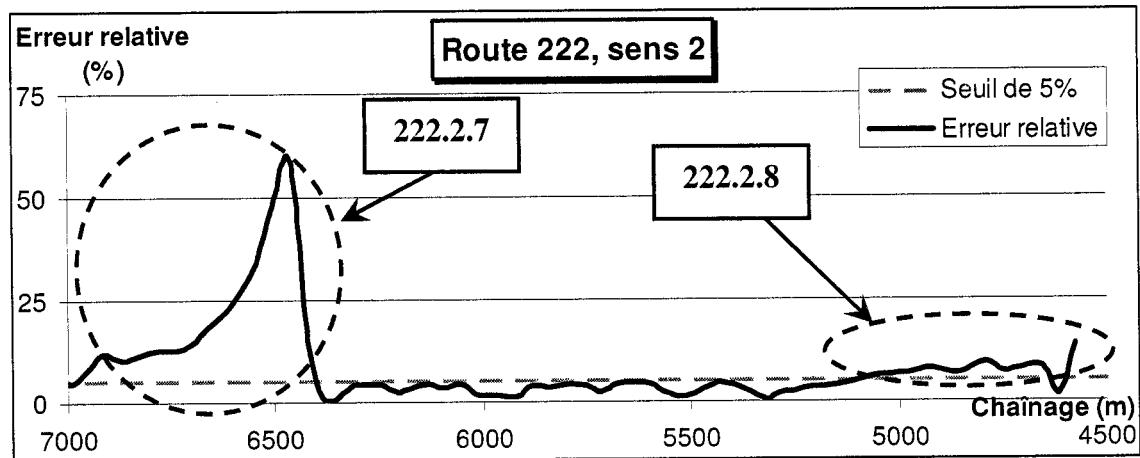
Sens 2



Courbe d'erreur relative, route 222, sens 2, chaînages 12+000 à 9+500



Courbe d'erreur relative, route 222, sens 2, chaînages 9+500 à 7+000



Courbe d'erreur relative, route 222, sens 2, chaînages 7+000 à 4+500