

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

# **Géométrie tridimensionnelle des voies de circulation**

Dreidimensionale Geometrie  
der Verkehrswege

Three-dimensional Geometry  
of Roadways

Geometria tridimensionale  
delle vie di circolazione

**Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)  
de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)**

**Prof. A.-G. Dumont  
F. Huguenin, ing. civile dipl. EPF**

**Mandat de recherche VSS 1998/083 (24/98)  
sur demande de l'Association suisse des professionnels  
de la route et des transports (VSS)**

**Août 2004**



## **AVANT-PROPOS**

Née sous l'impulsion de F. Rolland (LAVOC – EPFL, Lausanne), la présente publication est le fruit d'une collaboration avec plusieurs ingénieurs et spécialistes des logiciels routiers de conception assistée par ordinateur, notamment P. Schultz (Softcad, Berne) et Dr M. Tille (LAVOC – EPFL, Lausanne).

## RESUME

---

L'étude des projets routiers se déroule depuis toujours selon un découpage parfaitement défini qui donne lieu à l'étude successive des trois aspects du tracé que sont le plan de situation, le profil en long et le profil en travers. Pris indépendamment, ces trois espaces-plans étroitement liés sont faciles d'accès. Le problème devient plus ardu si on les traite simultanément. Pourtant, une vision globale en trois dimensions est nécessaire pour certains paramètres comme la visibilité, la lisibilité ou l'intégration dans le site, caractéristiques fondamentales dont dépendront la sécurité, la viabilité et la qualité d'une route. La maîtrise de ces questions d'interaction d'espaces-plans est donc indispensable.

L'avènement et le développement des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ont permis de répondre en partie aux besoins de traitement tridimensionnel, notamment au niveau de la visualisation des projets, formidable outil de communication avec les professionnels et le public. Néanmoins des lacunes subsistent.

La présente étude permet la prospection et l'étude théorique de méthodes et principes de base permettant une meilleure maîtrise spatiale du tracé. Sans révolutionner totalement la conception routière, elle apporte un « cahier des charges » pour les logiciels routiers de CAO permettant de mieux appréhender la conception, mais aussi le contrôle des voies de circulation, par exemple lors d'audits de sécurité.

**Mots clés** : projet routier / tridimensionnel / conception / audit de sécurité / visibilité / lisibilité / intégration dans le site / visualisation

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Die Planung von Strassenprojekten erfolgt seit jeher nach einem vorbestimmten Ablauf, welcher das sukzessive Prüfen der drei Hauptelemente der Linienführung vorschreibt : Lageplan, Längs- und Querprofil. Einzel behandelt sind diese drei zusammenhängenden Elemente relativ einfach zugänglich. Ungleich schwieriger ist es, sie gleichzeitig auszuarbeiten. Dennoch ist eine dreidimensionale Gesamtbetrachtung für gewisse Parameter der Strassenführung notwendig, wie z.B. die Sichtverhältnisse, die Lesbarkeit, sowie die Einbettung in die Landschaft. Diese Eigenschaften beeinflussen die Sicherheit, die Befahrbarkeit und die Qualität einer Fahrbahn. Die Beherrschung der Wechselwirkung zwischen den drei Plänen ist also unentbehrlich.

Das Aufkommen und die Entwicklung von Software für computergestütztes Design (CAD) haben dazu beigetragen, die Bedürfnisse der dreidimensionalen Betrachtung teilweise zu befriedigen, besonders auf dem Gebiet der Projektvisualisierung, welche ein wichtiges Informationsmittel zwischen Fachleuten und dem breiten Publikum darstellt. Trotzdem bestehen noch Lücken.

Die vorliegende Arbeit zeigt eine theoretische Analyse von Methoden und Grundprinzipien, welche eine bessere räumliche Beherrschung der Linienführung erlauben. Ohne den Strassenentwurf vollständig umzugestalten, bietet sie ein „Pflichtenheft“ für CAD-Strassenplanungssoftware, welche den Entwurf vereinfachen, aber auch eine bessere Kontrolle über das Verkehrsnetz gewähren, zum Beispiel während einer Sicherheitsprüfung.

**Stichworte** : Strassenprojekt / dreidimensional / Entwurf / Sicherheitsprüfung / Sicht / Lesbarkeit / Einbettung in die Landschaft / Visualisierung

## ABSTRACT

---

Road design has always been done according to a perfectly defined procedure, in which the three main elements of the alignment are considered successively, the horizontal alignment, the longitudinal profile and the cross profile. Taken individually, these three elements depending on each other are easily accessible. The problem becomes more difficult if they are to be handled simultaneously. Nevertheless, a global view in three dimensions is necessary for certain parameters of the alignment like visibility, legibility or its integration into the landscape. These are fundamental characteristics of which depend road safety, viability, as well as the general quality of the road. The control of the interactivity between the different plans is thus essential.

The appearance and the development of computer aided design (CAD) software has allowed to partially meet the needs of three dimensional treatment, particularly on the level of project visualization, being an important communication tool between professionals and the public. However, some lacks still remain.

The present research work allows the prospecting and a theoretical analysis of methods and basic principles allowing a better spatial control of the alignment. Without completely revolutionizing road design, it leads to some specifications for road CAD software allowing not only a better design, but also a better control of the road network, for example during road safety audits.

**Keywords** : road design / three-dimensional / design / road safety audit / visibility / legibility / integration / visualization

## RIASSUNTO

---

Da sempre lo studio di progetti stradali si svolge secondo una scomposizione perfettamente definita che dà luogo allo studio successivo dei tre aspetti del tracciato, ossia la pianta, il profilo longitudinale e il profilo trasversale. Questi tre piani strettamente legati tra loro sono facilmente analizzabili se presi in considerazione indipendentemente l'uno dall'altro. Il problema diventa più arduo se si desidera trattarli simultaneamente. Tuttavia, per lo studio di certi parametri quali la visibilità, la leggibilità o l'integrazione nel sito, caratteristiche fondamentali dalle quali dipenderanno la sicurezza, la viabilità e la qualità di una strada, è necessaria una visione globale in tre dimensioni. Pertanto, è indispensabile comprendere e controllare le questioni di interazione tra piani.

L'avvento e lo sviluppo di software di progettazione assistita dall'elaboratore (PAE) hanno permesso di rispondere parzialmente ai bisogni di trattamento tridimensionale, in modo particolare a livello di visualizzazione dei progetti, formidabile strumento di comunicazione con i professionisti e il pubblico. Tuttavia, sussistono delle lacune.

Il presente studio permette la prospezione e lo studio teorico di metodi e principi basilari che consentono una migliore padronanza spaziale del tracciato. Senza rivoluzionare totalmente la concezione, esso apporta delle specifiche per i software stradali di PAE che permettono un miglior approccio della concezione e del controllo delle vie di circolazione, per esempio quando si realizzano audit della sicurezza.

**Parole chiave** : progetto stradale / tridimensionale / concezione / audit della sicurezza / visibilità / leggibilità / integrazione nel sito / visualizzazione

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>PROBLEMATIQUE .....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCTION .....	1
1.2	TERMINOLOGIE .....	1
1.3	METHODOLOGIE « CLASSIQUE » DE CONCEPTION .....	2
1.3.1	Avènement des outils informatiques.....	2
1.3.2	L'aspect tridimensionnel du projet routier : une potentialité à exploiter .....	3
<b>2</b>	<b>CONCEPTION GEOMETRIQUE « CLASSIQUE » .....</b>	<b>4</b>
2.1	NORMALISATION.....	4
2.1.1	Paramètres déterminants dans la conception .....	6
2.2	TRACE EN SITUATION.....	6
2.2.1	Alignement .....	6
2.2.2	Arc de cercle .....	7
2.2.3	Courbe de raccordement .....	7
2.3	PROFIL EN LONG.....	7
2.3.1	Déclivité constante.....	7
2.3.2	Raccordement vertical .....	7
2.4	PROFIL EN TRAVERS .....	8
2.4.1	Dévers en alignement.....	8
2.4.2	Transition de dévers.....	8
2.5	COMBINAISON DE PLANS.....	9
2.5.1	Plan de situation et profil en long .....	9
2.5.2	Plan de situation et profil en travers .....	9
2.5.3	Profil en long et profil en travers .....	11
2.6	CONCLUSIONS .....	11
<b>3</b>	<b>LOGICIELS ROUTIERS DE CAO.....</b>	<b>13</b>
3.1	“STATE OF THE ART” DES LOGICIELS ROUTIERS DE CAO .....	13
3.1.1	Inventaire des logiciels routiers de CAO.....	13
3.1.2	Fonctionnement des logiciels routiers de CAO .....	16
3.2	CONCLUSIONS .....	18
3.2.1	Vers une nouvelle conception géométrique.....	19
<b>4</b>	<b>GEOMETRIE TRIDIMENSIONNELLE DES ROUTES .....</b>	<b>23</b>
4.1	APPROCHE SYSTEMIQUE .....	23
4.2	REFLEXION CONCERNANT LES PARAMETRES DE CONCEPTION .....	24
4.2.1	Remarques préalables .....	24
4.2.1.1	Le véhicule routier.....	24
4.2.1.2	L'utilisateur.....	25
4.2.2	Analyse thématique.....	25
4.3	BESOINS LIES A L'ETUDE TRIDIMENSIONNELLE.....	27
4.3.1	Potentiels actuels du 3D.....	28
<b>5</b>	<b>ATTENTES LIEES AUX LOGICIELS ROUTIERS DE CAO .....</b>	<b>29</b>
5.1	DEVELOPPEMENT DES POSSIBILITES DE VISUALISATION .....	29
5.2	PARAMETRISATION DES LOGICIELS.....	31
5.3	DEVELOPPEMENT DES PARAMETRES DE SORTIES .....	31
<b>6</b>	<b>SECURITE .....</b>	<b>33</b>
6.1	PRINCIPES DE LA SECURITE DES VOIES DE CIRCULATION .....	33
6.2	VISIBILITE .....	34
6.2.1	Visibilité bidimensionnelle.....	35
6.2.1.1	Distance de visibilité nécessaire .....	35

6.2.1.2	Distance de visibilité disponible.....	36
6.2.2	Calcul bidimensionnel de la visibilité.....	37
6.2.3	Calcul tridimensionnel de la visibilité.....	39
6.2.3.1	Historique de la visibilité 3D.....	39
6.2.3.2	Visibilité dans les logiciels routiers de CAO.....	41
6.2.4	Conclusions concernant la visibilité.....	41
6.2.4.1	Enjeu d'une approche tridimensionnelle pour la visibilité.....	42
6.3	LISIBILITE.....	42
6.3.1	La lisibilité comme notion complémentaire de la visibilité.....	43
6.3.2	Perception de la route par l'utilisateur.....	44
6.3.3	Paysage et lisibilité.....	46
6.3.3.1	Théorie de l'analyse du paysage dans la logique du déplacement.....	47
6.3.4	Marquage visuel pour une meilleure lisibilité.....	47
6.3.4.1	Problématique des entrées de localités.....	48
6.3.4.2	Problématique de la végétation.....	48
6.3.5	Conclusions concernant la lisibilité.....	49
6.3.5.1	Apport d'une géométrie 3D des voies de circulation.....	49
6.4	CONCLUSIONS.....	49
<b>7</b>	<b>VISUALISATION TRIDIMENSIONNELLE.....</b>	<b>51</b>
7.1	CONVAINCRE PAR L'IMAGE 3D.....	51
7.2	LIBERTES OFFERTES PAR LE RENDU 3D.....	52
7.2.1	Focale.....	52
7.2.2	Position de prise de vue.....	52
7.3	CONCLUSIONS.....	53
7.3.1	Ethique de la visualisation tridimensionnelle.....	53
<b>8</b>	<b>SYNTHESE ET CONCLUSIONS.....</b>	<b>55</b>
8.1	EVOLUTION DES OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	55
8.2	RESULTATS DE L'ETUDE.....	56
8.2.1	Récapitulatif des recommandations.....	56
8.2.2	Modifications et ajouts dans la normalisation.....	57
8.2.3	Perspectives d'avenir.....	59
<b>9</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>ANNEXE.....</b>	<b>67</b>
10.1.1	Logiciel CADICS-ROUTE.....	67
10.1.2	Logiciel Cadwork route.....	68
10.1.3	Logiciel CARD/1.....	69
10.1.4	Logiciel CDS-Roads.....	69
10.1.5	Logiciel Civil Designer.....	70
10.1.6	Logiciel COVADIS - AutoPISTE.....	70
10.1.7	Logiciel GeoMacao.....	70
10.1.8	Logiciel HighRoad.....	71
10.1.9	Logiciel INROADS.....	71
10.1.10	Logiciel LISCAD.....	72
10.1.11	Logiciel Mensura.....	72
10.1.12	Logiciel MXROAD.....	73
10.1.13	Logiciel PISTE +.....	73
10.1.14	Logiciel ProVI Strasse.....	74
10.1.15	Logiciel RoadCalc.....	74
10.1.16	Logiciel RoadEng.....	74
10.1.17	Logiciel Strada Polaris.....	75
10.1.18	Logiciel VESTRA CAD.....	75

## FIGURES

Figure 1 :	Conception géométrique classique d'une voie de circulation par espaces-plans successifs .....	4
Figure 2 :	Distance de visibilité dans les raccordements convexes [3] & [79] .....	8
Figure 3 :	Conditions de visibilité dans un raccordement concave [3] & [79].....	8
Figure 4 :	Abaque pour les pertes de tracé [82] .....	9
Figure 5 :	Surlargeur en courbe [3] .....	10
Figure 6 :	Dérasement en courbe [3].....	10
Figure 7 :	Détermination de la largeur de dérasement dans le cas de dépassement interdit [12].....	10
Figure 8 :	Exemple de photoréalisme réalisé avec le logiciel Cadwork route .....	17
Figure 9 :	Conception géométrique classique par processus séquentiel statique .....	20
Figure 10 :	Conception géométrique assistée par ordinateur par processus séquentiel dynamique.....	20
Figure 11 :	Conception géométrique par processus simultané.....	21
Figure 12 :	Méthodologie du projet routier et champ d'application de la géométrie 3D [12] .....	22
Figure 13 :	La route en tant que système .....	23
Figure 14 :	Maquette 3D sans et avec visualisation du site d'implantation .....	29
Figure 15 :	Visualisation de la perception du riverain et de l'usager face à une nouvelle route [47] ..	30
Figure 16 :	Travail de conception sur deux écrans [Source : <a href="http://www.insitusimulation.com">www.insitusimulation.com</a> ].....	30
Figure 17 :	Paramétrisations des logiciels routiers de CAO .....	31
Figure 18 :	Approche systémique dans l'analyse de sécurité des voies de circulation .....	33
Figure 19 :	Exemple d'incohérence des éléments d'une route : route à circulation bidirectionnelle mais présentant un profil autoroutier .....	34
Figure 20 :	Exemple de cohérence le long du tracé de la route par un changement du profil en travers traité correctement [8].....	34
Figure 21 :	Importance de la distance de visibilité dans la structure générale de conception des voies de circulation (selon [27]) .....	35
Figure 22 :	Schématisation de la distance de visibilité de dépassement [3].....	36
Figure 23 :	Comparatif des distances de visibilité d'arrêt recommandées selon les normalisations nationales (selon [3]) .....	38
Figure 24 :	Modélisation d'obstacles latéraux et passages supérieurs par éléments réguliers à quatre nœuds selon la méthode développée par Y. Hassan [27].....	40
Figure 25 :	Visualisation d'obstacles virtuels pour le calcul des distances de visibilité par photogrammétrie [23] .....	41
Figure 26 :	Activités de la tâche de conduite selon différents degrés de conscience (selon [56]) .....	43
Figure 27 :	Effet d'optique par convergence d'alignements d'arbres [3] .....	44
Figure 28 :	Effet d'optique par combinaison de courbes en plan et du profil en long [3] .....	45
Figure 29 :	Exemple d'amélioration de la perception de panneaux de signalisation [3].....	45
Figure 30 :	Indices de perception formels : signalisation au sol ou en bordure de route [57].....	46
Figure 31 :	Indices de perception informels : paysage alentour [57] .....	46
Figure 32 :	Weiteveen (Pays-Bas) : exemple d'une « porte d'entrée de localités » [6] .....	48
Figure 33 :	Effet optique de rapprochement des objets éloignés par un changement de focale [Source : <a href="http://3d.faws.org/tuts/focale/index_fr.php">http://3d.faws.org/tuts/focale/index_fr.php</a> ].....	52
Figure 34 :	Influence optique de la hauteur de prise de vue.....	53

## TABLEAUX

Tableau 1 : Normes suisses relatives à la géométrie routière tridimensionnelle .....	5
Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres déterminants intervenant dans la conception d'une voie de circulation selon les normes suisses.....	6
Tableau 3 : Logiciels routiers de CAO répertoriés lors de l'inventaire de juin 2004.....	15
Tableau 4 : Distribution et prix indicatifs d'une partie des logiciels répertoriés en juin 2004.....	16
Tableau 5 : Prise en compte de l'aspect 3D des voies de circulation dans le mode de fonctionnement des logiciels routiers de CAO.....	18
Tableau 6 : Thématique de la géométrie tridimensionnelle.....	27
Tableau 7 : Comparatif des éléments utilisés pour le calcul de la visibilité disponible (selon [23])....	39
Tableau 8 : Cahier des charges des logiciels routiers de CAO.....	57
Tableau 9 : Prescriptions concernant l'adaptation des normes suisses.....	59



# 1 PROBLÉMATIQUE

## 1.1 INTRODUCTION

La méthodologie de l'étude des projets routiers regroupe l'ensemble des activités développées par le projeteur pour réaliser un tracé qui réponde au mieux aux objectifs fixés tout en respectant les contraintes imposées. Une part importante de ce travail consiste en l'étude de la géométrie du tracé de la route, c'est-à-dire en la détermination des dimensions de celle-ci et de sa position dans le territoire.

Depuis près de trois décennies, les modifications des paradigmes sociétaux, notamment dans le domaine de l'acceptation des infrastructures de transport et de la prise en compte d'aspects de plus en plus éloignés de la technique (environnement, aspects sociaux, concertation, etc...) ont relégué cette activité « géométrique » du projeteur routier à l'arrière plan. Les fantastiques développements informatiques réalisés (logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) et de dessin assisté par ordinateur (DAO)) ont accéléré ce phénomène. La productivité a grandement augmentée, tendant à réduire l'aspect purement mathématique et technique de cette étude routière à une portion congrue des activités du projeteur.

La démarche de l'ingénieur-projeteur étudiant la géométrie routière n'a sur le fond que peu évolué : seule la durée de l'étude a été progressivement réduite, mais sa démarche est restée quasiment identique depuis le début de l'étude des projets routiers.

Le but de la présente étude n'est pas d'adopter une démarche réactive déplorant l'avènement d'une méthodologie actualisée où le projeteur est devenu un chef d'orchestre réglant les musiciens plutôt qu'un soliste. Force est cependant de constater que la démarche d'étude par espaces-plans successifs décrivant l'objet tridimensionnel qu'est la route reste la règle générale de l'étude géométrique routière à l'époque des nouvelles technologies de l'information. Seule la forme a évolué, le fond est quant à lui resté le même.

Ceci a pour conséquence que les aspects qui n'étaient pas ou que peu traités par le passé pour des raisons de volume et de possibilités de calcul sont toujours problématiques et sont peu ou mal résolus. La géométrie tridimensionnelle, c'est-à-dire la prise en compte des aspects 3D de manière intégrale et simultanée (donc non séquentielle) en est un exemple flagrant. Les aspects tridimensionnels apparaissent souvent plus sous forme d'éléments de communication (perspectives) que d'éléments de conception. Certains problèmes de conception ne sont ainsi pas détectés.

A priori, cette situation ne parait guère gênante, la démarche d'étude n'étant qu'un moyen et non un but en soi. Il n'en demeure pas moins que cette manière de faire peut entraîner des résultats insatisfaisants et parfois problématiques, la géométrie de la route influençant notablement sur de nombreux effets liés à son utilisation, par exemple la sécurité.

## 1.2 TERMINOLOGIE

Par « voies de circulation », on entend ici une infrastructure routière destinée en premier lieu à la circulation des véhicules motorisés. Les espaces dédiés à la circulation des bicyclettes et des piétons ne sont pas traités directement dans cette recherche.

La géométrie d'une route se définit par l'enchaînement des éléments spatiaux constitutifs d'une voie de circulation affectée au transport routier, ceci en relation avec le territoire environnant. Elle comporte deux aspects qui sont les dimensions de l'ouvrage « route » et la position de cet ouvrage dans le territoire.

Dans le cadre de cette étude, le terme « tridimensionnel » (ou 3D) signifie que la route, objet en trois dimensions, est considérée globalement plutôt que par espaces-plans bidimensionnels (ou 2D) successifs.

### **1.3 MÉTHODOLOGIE « CLASSIQUE » DE CONCEPTION**

---

L'étude classique des projets routiers, et des voies de circulation en général, se base sur la distinction entre les trois espaces-plans que sont :

- le plan de situation
- le profil en long
- le profil en travers (par extension du profil géométrique type)

La conception spatiale d'un projet est réalisée par la succession de ces trois espaces-plans étudiés isolément. A la fin du processus d'étude, des vérifications menées sur deux espaces-plans simultanés (par exemple la surlargeur qui se base sur le plan de situation combiné avec le profil en travers) sont possibles, mais restent assez sommaires quant à leur étendue. Cette méthode de travail nécessite une approche itérative.

Cette approche a certes fait ses preuves, mais elle se réfère à des méthodes qui ont été élaborées en fonction des problèmes à traiter et des technologies de représentation (perspectives par exemple) fort complexes à utiliser voire inexistantes à l'époque. Or, il est évident qu'au fil des ans, les problèmes ont évolué et que de nouvelles demandes sont apparues. La prise en compte de nouvelles contraintes (environnementales et politico-sociales notamment) a considérablement compliqué l'élaboration et la vérification des projets, montrant les limites des méthodes de conception classique.

#### **1.3.1 Avènement des outils informatiques**

Pour faire face à cette complexité accrue, des outils informatiques (conception assistée par ordinateur notamment) ont été développés. En regard des exigences de productivité toujours plus fortes demandées aux bureaux techniques, ceux-ci sont indispensables pour automatiser et accélérer certains travaux répétitifs. Ils permettent un gain de productivité et une finesse d'analyse que n'autorisaient pas les méthodes traditionnelles manuelles.

Cependant, on constate que quasiment toutes les fonctionnalités des premiers outils de CAO ont été développées sur la base des méthodes traditionnelles. L'instrument voit donc son potentiel limité par une conception qui fait de lui un prolongement des facultés humaines alors qu'il serait à même d'aborder de toute autre manière les travaux qui lui sont confiés, voire même d'en traiter de nature radicalement différente.

L'avènement des outils informatiques n'a pas foncièrement modifié la procédure d'étude de la géométrie routière, mais a plutôt accéléré ses délais d'exécution, quoique cette rapidité d'exécution ne soit pas toujours si évidente.

Le développement et le perfectionnement de ces outils durant les dernières décennies ont permis certains progrès, notamment au niveau des relations dynamiques entre les espaces-plans. Il n'en demeure pas moins que la méthodologie d'étude du projet routier se base essentiellement sur une démarche 2D que l'on peut qualifier de processus séquentiel. La voie de circulation est conçue, dessinée puis vérifiée par espaces-plans successifs totalement indépendants. L'effet de la modification d'un paramètre dans un plan n'est pas vérifié de manière concomitante dans les autres espaces-plans. La modification de la déclivité longitudinale dans le profil en long n'amène par exemple, ni une vérification simultanée de la valeur de la ligne de plus grande pente qui dépend de ce paramètre, ni un contrôle de la déclivité transversale, qui elle est vérifiée dans le profil en travers. De plus, certains problèmes comme la visibilité ou l'intégration dans le site sont très délicats à traiter par l'étude en phases successives.

### 1.3.2 L'aspect tridimensionnel du projet routier : une potentialité à exploiter

A l'heure actuelle, l'ingénieur en tracé routier est appelé à considérer de plus en plus de contraintes s'il entend réaliser un aménagement routier bien intégré à son environnement (au sens large). Les nuisances sonores, les impacts sur la nature et l'environnement construit, la distribution des polluants sont autant d'exemples non exhaustifs dont il se doit de tenir compte. L'appel au savoir-faire d'autres métiers s'avère alors souvent indispensable. La visualisation tridimensionnelle du projet routier constitue par conséquent une réponse pour les demandes diverses faites à l'ingénieur routier, qu'elles émanent des professionnels de la route, des professionnels d'autres branches ou des non professionnels :

- la vision en trois dimensions du projet routier permet, en un seul coup d'œil, d'apprécier de manière performante l'adéquation du projet routier face aux objectifs exprimés lors de la phase de formulation. Elle permet également d'apprécier de manière simple et directe l'interaction existante entre les différents composants qui ont été intégrés dans le processus d'élaboration du projet (impact visuel, dispersion des polluants et bruit par exemple). Elle est surtout un outil interactif qui permet d'apporter, dans des délais très courts, une réponse détaillée et précise à chaque problème soulevé notamment lors des phases de mise à l'enquête publique.
- pour le public, qui n'est que rarement de formation scientifique ou technique, la visualisation 3D permet de fournir des éléments de compréhension aisée. Les problèmes légitimes de compréhension de plans fortement techniques (profil en long par exemple) sont ainsi évincés par la présentation tridimensionnelle du projet routier intégré au territoire. Le public n'est alors plus exclu par l'usage d'un langage réservé aux initiés.

Les potentialités de certains logiciels permettent de procéder à une étape de visualisation tridimensionnelle. Or, cette fonctionnalité s'est vue souvent sous-exploitée. A l'heure des premiers outils de CAO, le traitement 3D n'était utilisé qu'à la fin du processus et non comme partie intégrante de celui-ci. Il n'était que l'aboutissement d'une série de phases d'études diverses, alors qu'il aurait pu être un aspect constamment accessible du projet qui permette à tout moment de modifier ce dernier.

Idéalement, l'exploitation tridimensionnelle ne devrait plus se faire uniquement dans un but de visualisation du projet, mais servir directement à la conception de celui-ci. Le traitement 3D doit permettre non seulement de mieux et de plus rapidement comprendre les projets routiers (meilleure communication de l'information), mais doit également permettre de faciliter les choix techniques du projeteur routier lors de la conception de la géométrie d'une voie de circulation.

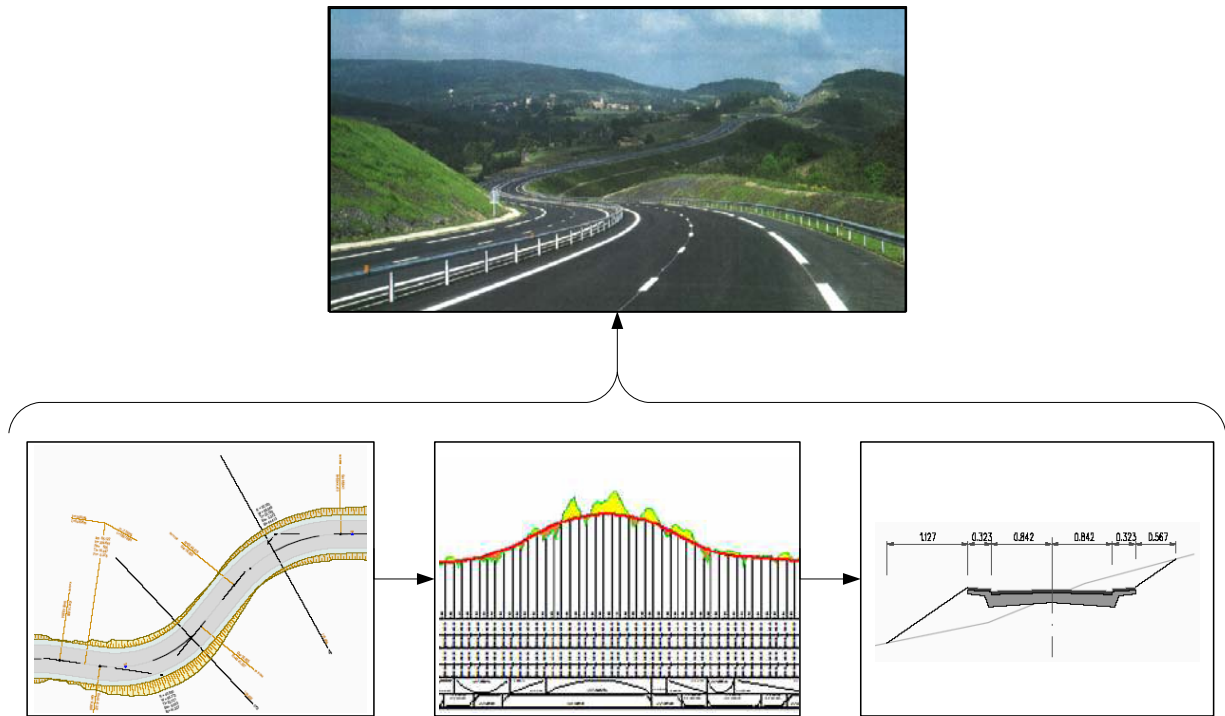
*« The alignment of a highway is a three-dimensional problem ... However, in highway design practice, three-dimensional design computations are cumbersome »*

Mannering F. L et Kilareski W. P., 1990 [36]

Pour obtenir une conception satisfaisante, la nature tridimensionnelle de la route doit être considérée dès le début de la conception. La prise en compte simultanée des trois espaces-plans traditionnels (plan de situation, profils en long et en travers) est incontournable si l'on entend considérer pleinement des notions telles que la visibilité et les pertes de tracé, la lisibilité, ainsi que l'intégration dans le site (impact visuel). Pour de tels paramètres, une approche spatiale directe pourrait être envisagée.

## 2 CONCEPTION GÉOMÉTRIQUE « CLASSIQUE »

La route est un objet tridimensionnel (x,y,z) dont la conception géométrique « classique » est réalisée selon un découpage donnant lieu à une approche par espaces-plans successifs, avec les étapes principales de création de l'axe en plan, de conception du profil en long et finalement l'établissement du profil en travers à partir de profils géométriques types.



**Figure 1 :** Conception géométrique classique d'une voie de circulation par espaces-plans successifs

La conception de la géométrie routière se fait en considérant certains éléments et aspects pour lesquels les normes en vigueur fournissent des valeurs limites, fonction de paramètres déterminants.

### 2.1 NORMALISATION

Au niveau suisse, les normes en vigueur dans la conception des voies de circulation sont édictées par l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS). Les normes contenant des éléments liés à l'aspect tridimensionnel et relatives à la géométrie routière sont les suivantes :

Norme VSS	Titre	Aspects abordés en rapport avec la géométrie tridimensionnelle
SN 640 010	Accidents de la circulation - Analyse des accidents et analyse sommaire des dangers et du risque	<ul style="list-style-type: none"> <li>le tracé spatial à l'origine d'accidents</li> </ul>
SN 640 026 - 031	Elaboration des projets <ul style="list-style-type: none"> <li>- Etapes de projet (SN 640 026)</li> <li>- Etude de planification (SN 640 027)</li> <li>- Avant-projet (SN 640 028)</li> <li>- Projet définitif (SN 640 029)</li> <li>- Appel d'offres (SN 640 030)</li> <li>- Réalisation (SN 640 031)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>procédure d'établissement des projets routiers</li> </ul>

Norme VSS	Titre	Aspects abordés en rapport avec la géométrie tridimensionnelle
SN 640 039	Projets, bases – Introduction aux normes relatives à l'étude de tracé	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ procédure générale pour la conception d'un tracé</li> </ul>
SN 640 080b	Projet, généralités - La vitesse, base de l'étude des projets	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ distance de transition</li> </ul>
SN 640 090b	Projets, bases - Distances de visibilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visibilité</li> <li>▪ distance de visibilité d'arrêt</li> <li>▪ composantes tangentielles et longitudinales du coefficient de frottement</li> <li>▪ déroasement</li> </ul>
SN 640 100a	Tracé - Eléments géométriques du tracé en plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ dynamique et confort en situation</li> <li>▪ valeurs limites en situation</li> </ul>
SN 640 105a	Surlargeur en courbe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ surface balayée par un véhicule en courbe</li> </ul>
SN 640 110	Tracé - Eléments du profil en long	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visibilité et dynamique</li> <li>▪ confort</li> <li>▪ valeurs limites en élévation</li> </ul>
SN 640 120	Tracé - Pentes transversales en alignement et dans les virages, variation du dévers	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ valeurs limites du profil en travers</li> <li>▪ confort optique, dynamique</li> <li>▪ gauchissement</li> </ul>
SN 640 140	Tracé – Critères optiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ perception du tracé</li> </ul>
SN 640 198a	Courbes - Lacets	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ géométrie localisée</li> </ul>
SN 640 210 - 212	Conception de l'espace routier - Démarche pour l'élaboration de concepts d'aménagement et d'exploitation (SN 640 210) - Bases (SN 640 211) - Eléments d'aménagement (SN 640 212)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ environnement routier en zones urbaines</li> </ul>
SN 640 271a	Vérification de la viabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ géométrie localisée</li> </ul>
SN 640 273	Carrefours – Visibilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visibilité localisée</li> </ul>

**Tableau 1** : Normes suisses relatives à la géométrie routière tridimensionnelle

D'autres normalisations sont présentes dans les autres pays. On peut notamment citer pour ce qui est des normes en matière de conception géométrique des routes :

- Pour les Etats-Unis : American Association of State Highway and Transportation Officials  
 - « *AASHTO Green Book – A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* », 2001, [1]
- Pour le Canada : Ministère des Transports du Québec  
 - « *Normes : Tome I – Conception routière* », 1994, [37]
- Pour la France : Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer  
 - « *ICTAAL - Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison* », Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), décembre 2000, [55]  
 - « *ARP - Aménagement des routes principales – Guide technique* », Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), août 1994, [54]  
 - « *ICTAVRU - Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines* », Centre d'études sur les réseaux de transport et l'urbanisme (CERTU), janvier 1990, [9]
- Pour l'Allemagne : Forschungsgesellschaft für Strasse  
 - « *RAS - Richtlinien für die Anlage von Strassen* », 1986, [18]

## 2.1.1 Paramètres déterminants dans la conception

Pour permettre une procédure de conception des voies de circulation la plus simple possible, les normalisations routières font recours à des paramètres pour lesquels des valeurs limites sont indiquées, soit de manière déterministe (valeur déterminée sur une base expérimentale, par exemple en ce qui concerne le dévers minimal permettant un écoulement de l'eau de surface), soit en fonction d'autres critères (relation entre le rayon de courbure en plan et la vitesse par exemple).

Les paramètres déterminants intervenant dans tout projet routier basé sur les normes suisses en vigueur sont les suivants :

	Eléments	Critères	Paramètres déterminants
Plan de situation	Alignement	$L_{\min} / L_{\max}$	vitesse $V$
	Arc de cercle	$R_{\min} / L_{\min}$	vitesse $V$ dévers $p$ coefficient de frottement transversal pneu-chaussée CFT
	Courbe de raccordement	$A_{\min} / A_{\max}$	vitesse $V$
Profil en long	Déclivité constante	$i_{\min} / i_{\max}$	lieu d'implantation (rase campagne, localité) vitesse $V$
	Raccordement vertical	$R_{v,\min}$	géométrie des véhicules vitesse $V$ changement de déclivité $m$
Profil en travers	Dévers en alignement	$p_{\min} / p_{\max}$	type de route (RGD, route hors ou en localité) rayon de la courbe en plan $R$ vitesse $V$
	Transition de dévers	$\Delta i_{\min} / \Delta i_{\max}$	largeur de la chaussée type de route (RGD, route hors ou en localité)

Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres déterminants intervenant dans la conception d'une voie de circulation selon les normes suisses

Ces différents paramètres interviennent lors de la procédure classique durant laquelle sont étudiés successivement les éléments du tracé en situation, du profil en long, puis du profil en travers.

## 2.2 TRACÉ EN SITUATION

La projection verticale du tracé sur un plan horizontal conduit au tracé en situation. Celui-ci se compose des trois éléments constitutifs simples que sont l'alignement, l'arc de cercle et la courbe de raccordement. Chacun d'eux présente, selon [77], des paramètres déterminants pour la conception du tracé en situation. En plus de ces conditions limites, la succession des éléments du tracé en situation doit satisfaire à d'autres exigences particulières qui, énoncées par des valeurs de paramètres minimales et/ou maximales, permettent d'assurer une fluidité du trafic et une homogénéité du tracé.

### 2.2.1 Alignement

Pour des raisons de sécurité, de confort et de perception de l'utilisateur, la longueur de l'alignement est bornée ( $L_{\min}$  et  $L_{\max}$ ) en fonction de la vitesse  $V$  (vitesse de base <sup>1</sup> et vitesse de projet <sup>2</sup>).

<sup>1</sup> Selon [75], la vitesse de base est définie comme la vitesse de projet minimale sur l'ensemble d'un tronçon de route au-dessous de laquelle il ne faut pas descendre pour circuler avec une sécurité et un confort suffisants.

Les règles indicatives de la Norme SN 640 100a [77] sont les suivantes :

- la longueur minimale  $L_{\min}$  correspond à la distance parcourue durant le temps d'adaptation  $t_a$ . Cette longueur dépend de la vitesse de l'utilisateur  $V_A$  selon la relation  $L_{\min} = t_a \cdot V_A$ , avec un temps d'adaptation  $t_a$  qui dépendant lui de la vitesse de projet  $V_p$ .
- la longueur maximale  $L_{\max}$  correspond au chemin parcouru durant une minute à la vitesse de base  $V_A$  du tronçon considéré.

### 2.2.2 Arc de cercle

Pour des raisons de sécurité, de confort et de perception, la géométrie de l'arc de cercle est circonscrite ( $R_{\min}$  et  $L_{\min}$ ). Les paramètres déterminants sont la vitesse  $V$ , la déclivité transversale  $p$  et le coefficient de frottement transversal pneu-chaussée CFT.

Selon la Norme SN 640 100a [77], la longueur minimale  $L_{\min}$  correspond à la distance parcourue durant le temps d'adaptation  $t_a$ . Le rayon minimum de l'arc de cercle  $R_{\min}$ , pour un dévers  $p$  de 7% et un coefficient de frottement transversal pneu-chaussée CFT donné, correspond quant à lui au cas limite du dérapage dû à la force centrifuge, en négligeant l'effet transversal du vent.

### 2.2.3 Courbe de raccordement<sup>3</sup>

Par souci de sécurité, de confort et d'esthétique, la valeur du paramètre de la clothoïde  $A$  suit des règles indicatives, dont le paramètre déterminant est la vitesse  $V$ .

La Norme SN 640 100a [77] indique un paramètre de la clothoïde  $A$  dont la valeur minimale  $A_{\min}$  dépend de la vitesse de projet  $V_p$  (condition de confort) mais aussi du rayon de l'arc de cercle  $R$  (condition optique avec  $A_{\min} = R/3$ ). La valeur maximale  $A_{\max}$  équivaut quant à elle au rayon de l'arc de cercle  $R$ .

## 2.3 PROFIL EN LONG

---

Le profil en long est composé de deux éléments géométriques simples (la ligne droite à déclivité constante et le raccordement vertical) pour lesquels des paramètres déterminants pour la conception du profil en long sont fixés.

### 2.3.1 Déclivité constante

La valeur de la déclivité est bornée. Une valeur minimale  $i_{\min}$  est fixée selon le lieu d'implantation de la route (rase campagne ou localité), de manière à assurer une bonne évacuation de l'eau superficielle. Pour garantir un confort de circulation des véhicules lents, une borne supérieure de la déclivité  $i_{\max}$  est fixée en fonction de la vitesse de base.

### 2.3.2 Raccordement vertical

Le rayon vertical connaît une borne inférieure  $R_{v,\min}$  qui doit satisfaire à quatre conditions :

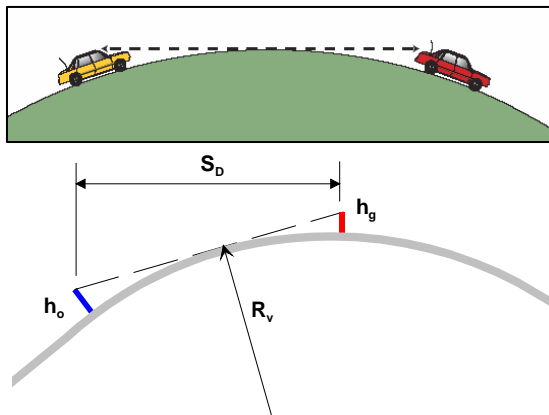
- la garde au sol qui dépend de la géométrie des véhicules
- le confort des usagers lié à l'accélération verticale et donc à la vitesse de projet
- l'esthétique qui n'intervient que pour les raccords concaves et qui dépend du changement de déclivité  $m$

---

<sup>2</sup> Selon [75], la vitesse de projet est la vitesse théorique la plus élevée pouvant être admise en un endroit de la route, avec une sécurité et un confort suffisants.

<sup>3</sup> La courbe de raccordement la plus communément utilisée dans le domaine routier est la spirale clothoïde, couramment appelée clothoïde.

- la visibilité qui dépend de la géométrie des véhicules, à savoir la hauteur de l'œil du conducteur pour les rayons convexes (Figure 2) et la hauteur des phares pour les rayons concaves (Figure 3).



$S_D$  [m] : distance de visibilité disponible  
 $R_v$  [m] : rayon vertical convexe  
 $h_o$  [m] : hauteur de l'œil du conducteur  
 $h_g$  [m] : hauteur de l'obstacle

Figure 2 : Distance de visibilité dans les raccords convexes [3] & [79]



$S$  [m] : distance de visibilité disponible (distance d'éclairage)  
 $R_v$  [m] : rayon vertical concave  
 $h_ε$  [m] : hauteur des phares au-dessus de la chaussée  
 $ε$  [°] : demi-angle du pinceau lumineux  
 $m$  [%] : changement de déclivité ( $m = i_1 - i_2$ )

Figure 3 : Conditions de visibilité dans un raccordement concave [3] & [79]

**Remarque** : la prise en compte de ces conditions de visibilité est simplifiée dans [79] qui indique, en fonction de la vitesse de projet  $V_p$ , des rayons verticaux minimaux  $R_{v,min}$  pour lesquels il est assuré de disposer d'un tracé fluide et de grandes distances de visibilité.

## 2.4 PROFIL EN TRAVERS

Le profil en travers correspond à une coupe transversale de la route effectuée en un point particulier de celle-ci. Il fait intervenir deux éléments principaux qui sont le dévers en alignement et la transition de dévers. Ils ont pour objectifs un écoulement latéral des eaux de surface, une dynamique du véhicule qui soit sécuritaire et confortable pour l'usager, ainsi qu'un guidage optique.

### 2.4.1 Dévers en alignement

Le dévers  $p$  (ou pente transversale) dépend du type de route (routes à grand débit, routes hors ou en localité) et du rayon de la courbe en plan, ceci pour les routes revêtues.

La Norme SN 640 120 [80] indique un dévers minimal  $p_{min}$  et un dévers maximal  $p_{max}$ . Entre ces bornes, le dévers est déterminé selon un abaque faisant intervenir le rayon de la courbe en plan  $R$  et la vitesse de projet  $V_p$ .

### 2.4.2 Transition de dévers

La transition de dévers s'évalue selon la déclivité secondaire, fonction de la largeur de la chaussée et du type de route.

La Norme SN 640 120 [80] indique une déclivité secondaire minimale  $\Delta i_{min} = 0.1 \cdot a$  (avec  $a$  : la distance entre l'axe de rotation et le bord de chaussée concerné) et une déclivité secondaire maximale  $\Delta i_{max}$  fonction du type de route.



Les paramètres déterminants pour la conception du profil en travers sont donc le type de route, le rayon de la courbe en plan et la largeur de la chaussée.

**Remarque** : le profil en travers fait intervenir le profil géométrique type. Celui-ci s'élabore en combinant les éléments constitutifs suivants :

- les dimensions de base des véhicules (hauteur et largeur)
- les marges de mouvement et de sécurité qui dépendent du type de véhicule et de la vitesse
- les suppléments pour circulation bidirectionnelle et pour croisement/dépassement des deux-roues légers ainsi qu'une largeur libre supplémentaire, qui dépendent du type de véhicules et de la présence ou non d'éléments séparateurs centraux ou de bord.

## 2.5 COMBINAISON DE PLANS

L'étude successive des trois espaces-plans (situation, profil en long et profil en travers) permet de définir entièrement la voie de circulation. Reste que, à moins d'une analyse tridimensionnelle directe, une étude des combinaisons simultanées de deux espaces-plans est nécessaire, d'une part pour la prise en compte de certains paramètres et d'autre part pour s'assurer de la bonne coordination des éléments du tracé dans l'espace.

**Remarque** : la combinaison de plans ne suffit pas à vérifier les conditions d'intégration dans le site, la perception de l'environnement routier pour l'utilisateur ou encore le point de vue du riverain. Seul l'établissement de la perspective routière y parvient.

### 2.5.1 Plan de situation et profil en long

La combinaison du plan de situation et du profil en long permet de s'assurer de l'optique du tracé dans l'espace, paramètre déterminant vis-à-vis du comportement du conducteur, de la sécurité du trafic et de l'esthétisme. Une bonne coordination des éléments en plan et en profil en long est importante, notamment pour éviter toute perte de tracé.

La Norme SN 640 140 [82] fournit un abaque pour la détection des pertes de tracé, cela en fonction de la vitesse de projet  $V_p$  et du profil en long :

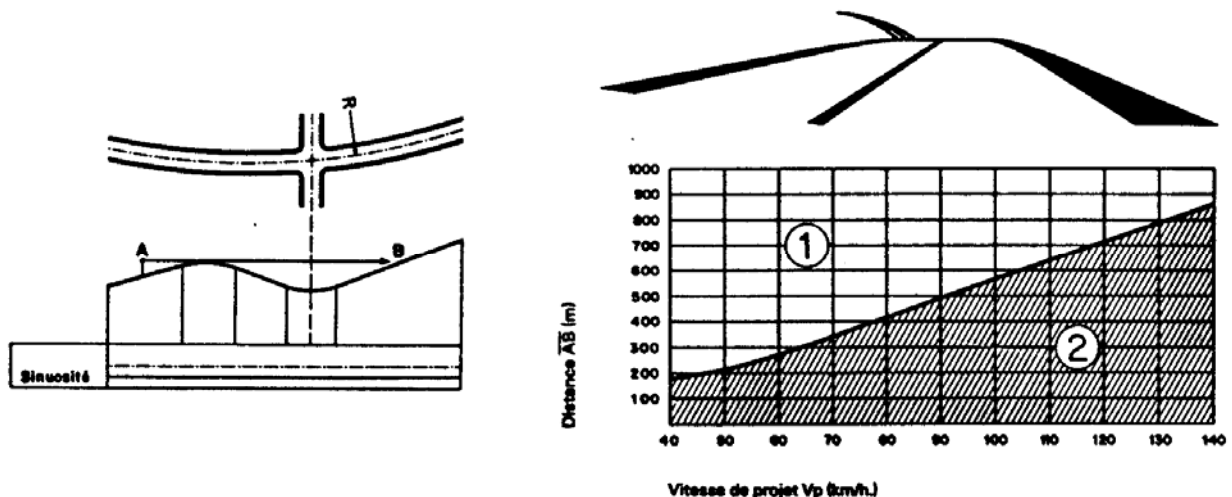


Figure 4 : Abaque pour les pertes de tracé [82]

### 2.5.2 Plan de situation et profil en travers

La combinaison du plan de situation et du profil en travers permet de s'assurer de la nécessité ou non de trois notions :

- *la surlargeur*: largeur en courbe supplémentaire à celle en alignement qui permet d'assurer la viabilité de la circulation dans les virages à faible rayon.

La surlargeur permet aux véhicules circulant dans une courbe à rayon constant de ne pas empiéter sur la voie de circulation opposée, évitant d'éventuels problèmes de sécurité en cas de croisement. Pour les chaussées à voie unique, elle permet d'éviter tout risque de choc avec les obstacles latéraux.

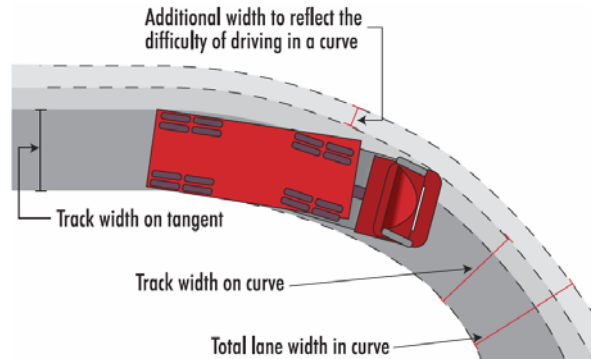


Figure 5 : Surlargeur en courbe [3]

La valeur de la surlargeur dépend des véhicules empruntant la voie de circulation ainsi que du rayon extérieur de la courbe en plan.

- *le dégagement*<sup>4</sup>: espace qui permet d'assurer le passage des éléments extérieurs de la carrosserie ou de la charge.
- *le dérasement*: zone libre de tout obstacle visuel à l'intérieur d'un virage qui permet au conducteur de conserver une visibilité suffisante pour assurer sa sécurité, soit une distance inférieure à sa distance d'arrêt.

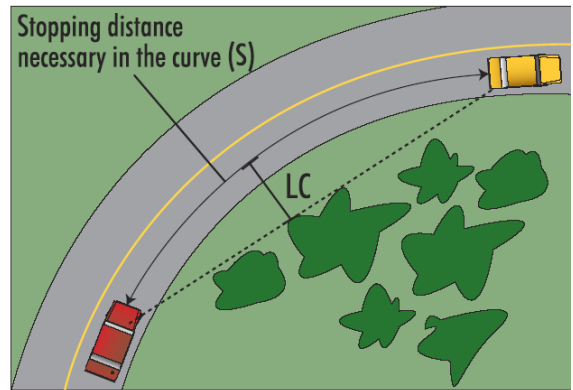


Figure 6 : Dérasement en courbe [3]

La zone de dérasement est délimitée par la projection verticale de la courbe enveloppe des rayons visuels partant de l'œil du conducteur. Sa largeur est fonction du rayon de la courbe en plan et de la dimension latérale de la chaussée.

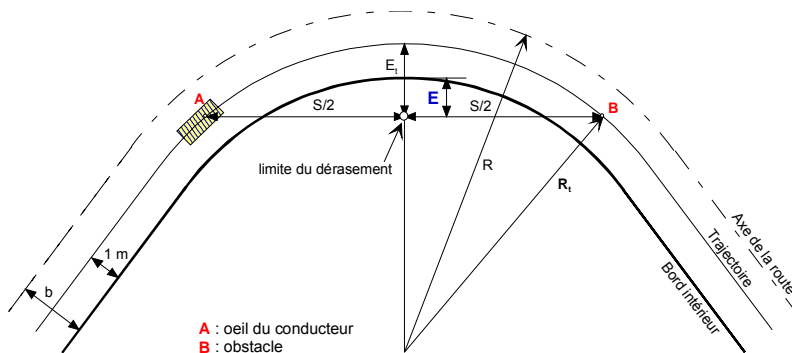


Figure 7 : Détermination de la largeur de dérasement dans le cas de dépassement interdit [12]

<sup>4</sup> Le dégagement concerne surtout le cas des longs bois utilisés pour l'exploitation forestière.

### 2.5.3 Profil en long et profil en travers

La prise en compte simultanée du profil en long et du profil en travers permet de mettre en avant la notion de ligne de plus grande pente, combinaison du dévers et de la déclivité longitudinale.

Selon [80], sa valeur est bornée, avec un minimum permettant d'assurer l'écoulement de l'eau et un maximum s'imposant pour des raisons constructives et pour éviter tout risque de glissement des véhicules lents lors de conditions de circulation hivernales.

## 2.6 CONCLUSIONS

---

Après observations, force est de constater que la conception géométrique classique est lacunaire et ce à plusieurs niveaux :

- la méthodologie par espaces-plans successifs ne permet pas de tenir compte de la véritable dimension tridimensionnelle des voies de circulation. Certains aspects du 3D sont certes pris en compte par une analyse de combinaisons de plans, mais les corrections amenées ne se font que par tâtonnement. Certaines notions (lisibilité, visibilité, etc...) ne sont pas prises en considération lors de la conception, et le sont tout au mieux lors de la phase de contrôle voire de réalisation. Il en résulte des voies de circulation dont la conception n'est pas toujours cohérente globalement, certains paramètres n'étant définis et considérés qu'en 2D et non de manière tridimensionnelle.
- les normes en vigueur, bien qu'elles ne doivent pas être considérées comme « mode d'emploi », constituent la source d'informations concernant les dimensions standard des éléments de la voie de circulation. Une série d'abaques et de valeurs limites déterministes permettent de dimensionner les éléments du projet routier de manière relativement simple et rapide. Reste que l'état des connaissances présente plusieurs défauts :
  - les valeurs limites, formules ou abaques proviennent de références souvent désuètes et non mises à jour, mal connues voire inexistantes.
  - les paramètres utilisés sont souvent et en majorité définis de manière unidirectionnelle voire sans dimension. Au mieux, ils sont indiqués de manière sommaire selon 3 directions, alors que la réalité est tridimensionnelle.
  - les valeurs limites sont de nature déterministes alors qu'elles devraient être davantage « probabilistes » pour pouvoir tenir compte d'un état limite et d'un état de service (à l'identique de ce qui se fait actuellement pour la construction d'ouvrages d'art notamment). L'état limite correspondrait alors au cas limite fixé par des questions de sécurité, l'état de service coïncidant lui au cas limite acceptable vis-à-vis des conditions de confort.

En conclusion, on remarque que la conception des voies de circulation se fait sur la base d'une méthodologie de découpage par espaces-plans successifs et de paramètres qui ne sont pas satisfaisants pour traiter de manière directe et complète l'aspect tridimensionnel. Cela occasionne des tracés routiers dont la qualité géométrique n'est pas toujours maximale. Or, comme l'on montré plusieurs études (notamment [21] et [44]), la qualité géométrique d'une infrastructure routière (*geometric design consistency*) ressort comme une règle importante, étant supposé que seule une conception routière uniforme permet une voie de circulation sûre, économique et confortable.

La procédure de conception classique, traitée manuellement, ne permet pas d'assurer à priori une cohérence dans la conception géométrique des voies de circulation, d'où la motivation de cette recherche en novembre 1998.



Quelques années plus tard (2004), la problématique demeure toujours. Les objectifs ont cependant quelque peu évolués en raison des bénéfices apportés par le développement des outils informatiques de conception assistée par ordinateur.

## 3 LOGICIELS ROUTIERS DE CAO

Le développement de la conception assistée par ordinateur (CAO) a constitué une avancée importante dans l'étude des tracés routiers.

Dans les années septante, on trouvait le développement des perspectives 3D sur ordinateurs bénéfiques pour le projeteur routier. Elles lui permettaient de visualiser son projet et d'évaluer la sécurité du trafic et l'esthétique du projet [40]. Les représentations 3D ont ainsi permis de considérer des notions d'esthétisme et d'implantation dans le site, éléments difficilement accessibles lors du traitement par espaces-plans successifs. Reste que dans les années nonante, et ce même avec les avancées technologiques de l'informatique, les éventuelles corrections pouvant être apportées se faisaient toujours à posteriori, c'est-à-dire une fois l'ensemble du projet défini. La CAO permettait certes de franchir un pas supplémentaire par rapport au traitement manuel, il n'en demeurait pas moins que ses potentialités étaient sous-exploitées, et ce pour de multiples applications, comme le confirme une étude comparative de logiciels de tracé routier réalisée en 1993 :

*« Il y a encore beaucoup de progrès à faire notamment dans l'intégration de fonctionnalités complémentaires telles que les études de bruit parallèlement à l'étude du projet, l'introduction d'images de synthèses ou d'animations ou encore une plus grande interactivité entre les différents éléments du projet (tracé en plan, profils en long, profils en travers, perspectives diverses, ... »*

Union suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)  
mai 1993, page 64 [13]

Plus d'une décennie après, les possibilités informatiques se sont développées. Reste à savoir si les outils de conception assistée par ordinateur ont intégré ces progrès et ont été modifiés de manière à exploiter leurs potentialités au maximum. Dans le cas présent, la question est de savoir dans quelle mesure le caractère tridimensionnel est intégré dans la conception assistée par ordinateur.

### 3.1 "STATE OF THE ART" DES LOGICIELS ROUTIERS DE CAO

A l'heure actuelle, la conception géométrique et l'étude des tracés routiers se réalisent presque exclusivement au moyen d'outils de CAO. Une collection de logiciels est présente sur le marché, avec certains de ces outils dédiés spécialement aux voies de circulation.

#### 3.1.1 Inventaire des logiciels routiers de CAO

Un inventaire des logiciels routiers de conception assistée par ordinateur est réalisé à partir de contacts avec les professionnels des voies de circulation et les professionnels des outils informatiques, ainsi qu'à partir d'une recherche Internet et sur la base des références bibliographiques [13], [39] et [46].

Au total, ce sont 29 produits qui sont recensés, avec un degré d'informations plus ou moins élevé. Il est supposé que les logiciels ne disposant pas d'une version actualisée dans les cinq dernières années sont obsolètes. Ceux-ci ne sont donc pas mentionnés.

Remarque : il est bien entendu impossible de prétendre à une totale exhaustivité dans la liste des produits recensés. Elle reste néanmoins un indicateur des diverses possibilités informatiques offertes pour la conception routière, en Suisse et à l'étranger.

Les logiciels routiers répertoriés dans l'inventaire de juin 2004, avec indication de l'éditeur et de l'éventuel distributeur établi en Suisse, sont les suivants :



LOGICIEL	EDITEUR	DISTRIBUTEUR EN SUISSE
CADICS-ROUTE	ICS Computer Services SA Route de la Chocolatière 21 1026 Echandens (Suisse) www.icsa.ch	ICS Computer Services SA Route de la Chocolatière 21 1026 Echandens (Suisse) www.icsa.ch
Cadwork route	Cadwork Informatique Avenue de Cour 61 1007 Lausanne (Suisse) www.cadwork.com	Cadwork Informatique Avenue de Cour 61 1007 Lausanne (Suisse) www.cadwork.com
CARD/1	IB&T GmbH – Thomas Tornow Haus An'n Slagboom 51 22848 Norderstedt (Danemark) www.card-1.com	IngWare GmbH Bau-Informatik Seestrasse 78 8703 Erlenbach (Suisse)
CARDS	Cedra Corporation West board street Rochester New York, NY 14614 (Etats-Unis)	
CDS-Roads	Foresight Software Pty Ltd P.O. Box 247 Broadmeadow, NSW 2292 (Australie) www.foresoft.com	
CivilCAD	Sivan Design Inc. P.O. Box 641103 San Fransisco, CA 94163 (Etats-Unis) www.sivandesign.com	
Civil Designer	Knowledge Base Sales Pty Ltd Suite D11 Westlake Square Westlake 7967, P. O. Box 610 7848 Constantia (Afrique du Sud) www.civildesigner.com	
COVADIS-AutoPISTE	GEOMEDIA S.A. 20, Quai Malbert – CS 42905 29229 Brest Cedex 2 (France) www.geo-media.com	
C-PLAN	c-plan® GmbH Marktstrasse 42 71711 Steinheim/Murr (Allemagne) www.c-plan.com	c-plan® AG Worbstrasse 223 3073 Gümligen (Suisse)
DIGIMAP	Diginetics Inc. 7500 Jefferson Street NE, Courtyard I Albuquerque, NM 87109 (Etats-Unis)	
GeoMacao	Bentley Systems Europe B.V. Wegalaan 2 2132 JC Hoofddrop (Pays-Bas) www.bentley.com	Softcad Dählhölzliweg 18 3005 Berne (Suisse)
GEOPAK	Bentley Systems Europe B.V. Wegalaan 2 2132 JC Hoofddrop (Pays-Bas) www.bentley.com	Softcad Dählhölzliweg 18 3005 Berne (Suisse)
HighRoad	Creative Engineering 6, Antill Street Wilston Qd 4051 (Australie) www.createng.com.au	
INFRA WinSTAR	Star Informatic S.A. Avenue du Pré Aily 24 4031 Angleur-Liège (Belgique) www.star.be	Cabinet Peitrequin Vuarpillière 35, CP 280 1260 Nyon 1 (Suisse)
INROADS	Bentley Systems Europe B.V. Wegalaan 2 2132 JC Hoofddrop (Pays-Bas) www.bentley.com	Softcad Dählhölzliweg 18 3005 Berne (Suisse)
INTECSA	Intec SA Orense 70 28020 Madrid (Espagne) www.intecsa-inarsa.es	

LOGICIEL	EDITEUR	DISTRIBUTEUR EN SUISSE
LISCAD	Listech Pty Ltd 21, Chandler Road Boronia, VIC 3155 (Australie) www.liscad.com	Leica Geosystems 9435 Heerbrugg (Suisse)
Mensura	Geomensura 100, Rue du Rhône 1204 Genève (Suisse) www.geomensura.com	Geodatanetwork Route de Troinex 31 Case postale 1611 1227 Carouge (Suisse)
MXROAD	Bentley Systems Europe B.V. Wegalaan 2 2132 JC Hoofddrop (Pays-Bas) www.bentley.com	Softcad Dählhölzliweg 18 3005 Berne (Suisse)
PISTE +	Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement SETRA – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes 46, Avenue Aristide Briand, B.P. 100 92225 Bagneux Cedex (France) www.setra.fr/piste/	B + C Ingénieurs SA Avenue du Casino 45 1820 Montreux
ProVI Strasse	Obermeyer Planen + Beraten GmbH Hausastrasse 40 80686 München (Allemagne) www.provi-cad.de	
ROADCAD	Sito Systems Ltd Pohjantie 12A 02100 Espoo (Finlande)	
RoadCalc	Eagle Point 4131 Westmark Drive Dubuque, IA 52002-2627 (Etats-Unis) www.eaglepoint.com/civil/roadcalc/	
RoadEng	Softree Technical System Inc. 8-650, Clyde Avenue West Vancouver B.C., V7T 1E2 (Canada) www.softree.com	
ROADPAC	Keays Software – Keays & Ass. 21/7 Station Road, Indooroopilly Brisbane, Queensland (Australie) www.keays.com	
Strada Polaris	Soft Construct S.A. Rue des Ecoliers 26 4020 Liège (Belgique) www.softstrada.com	Géomatique Ingénierie Chemin des Croisettes 26 1066 Epalinges (Suisse)
STRATIS	RIB Software AG Vaihinger Strasse 151 70567 Stuttgart (Allemagne) www.rib.de	
VANGO	VL Systems Inc. 9, Corporate Park Irvine, CA 92606 – 5172 (Etats-Unis) www.vlsystems.com	
VESTRA CAD	AKG Software Consulting GmbH Franz-Hess-Strasse 6 79282 Ballrechten-Dottingen (Allemagne) www.akgsoftware.de	

**Tableau 3** : Logiciels routiers de CAO répertoriés lors de l'inventaire de juin 2004

Après contact avec les distributeurs et concepteurs, des informations supplémentaires concernant la date de la dernière version, le nombre de licences en Suisse et à l'étranger et le prix de la première version sont recueillies pour certains logiciels. Le résultat est donné dans le tableau ci-après (**Tableau 4**), avec des points d'interrogation en cas d'informations manquantes.

Logiciel	Dernière version	Nombre de licences & Principaux lieux de distribution	Nombre de licences CH	Prix 1 <sup>ère</sup> version
CADICS-ROUTE	Mai 2004	150 (CH, D, GB, Croatie)	100	3'800 CHF
Cadwork route	?	900	800	10'000 CHF
CARD/1	?	5'400	?	?
CDS-Roads	13.06.04	1'800	0	1'000 \$US
Civil Designer	06.2004	7'500	0	1'800 \$US
GeoMacao	07.05.04	450 (Europe, Afrique, Moyen Orient)	80	15'000 CHF
GEOPAK	17.05.04	12'000 (Europe, USA)	30	4'500 CHF
HighRoad	2004	300	2	995 \$AUS
INFRA WinSTAR	24.02.04	> 200	3	11'070 €
INROADS	29.04.04	12'000 (Europe, USA)	200	15'000 CHF
LISCAD	30.12.03	> 1000 (dans plus de 100 pays)	?	7'500 CHF
Mensura	2003	1'700 (pays de l'UE, Nord Afrique, Canada)	5	1'590 €
MXROAD	26.05.04	6'000 (Europe, Commonwealth)	50	3'200 CHF
ProVI Strasse	09.2003	400	0	3'750 €
RoadEng	07.2003	1'500	30	2'300-4'500 \$CAN
ROADPAC	?	100	0	7'000 CHF
Strada Polaris	?	> 100 (CH, F, Belgique, Maroc, Algérie)	?	?
VESTRA CAD	2003	6'000 (Europe)	5	?

**Tableau 4** : Distribution et prix indicatifs d'une partie des logiciels répertoriés en juin 2004

Remarque : les prix indiqués pour la première version sont à prendre en tant qu'ordre de grandeur car ils correspondent à des prestations qui peuvent fortement varier selon le logiciel et la version (version de base uni-poste, version réseau, version complète). De la même manière, le nombre de licences installées est lui aussi à considérer qualitativement.

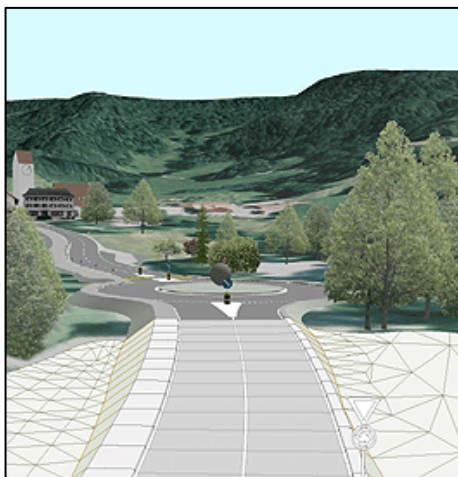
### 3.1.2 Fonctionnement des logiciels routiers de CAO

Une description des logiciels, même sommaire, permet de mieux se rendre compte de la façon dont ces outils abordent la prise en compte de la voie de circulation en tant qu'élément tridimensionnel. Dans le cas présent, cette brève description des logiciels est réalisée sur la base de critères précis qui sont :

- la méthodologie et la convivialité du logiciel : on entend par là le type de procédure de conception (par espaces-plans successifs ou simultanée) et la possibilité ou non d'un multifenêtrage



- l'interactivité multiplan du logiciel : on entend par là la présence ou non d'un lien dynamique reliant les éléments des différents espaces-plans (plan de situation, profil en long, profil en travers et vue 3D) et permettant, en cas de modifications sur un espace-plan, une mise à jour automatique des autres espaces-plans
- les possibilités de visualisation tridimensionnelle à savoir :
  - la perspective 3D (vue axonométrique)
  - le photoréalisme, c'est-à-dire l'intégration du projet 3D dans son environnement (au moyen d'un modèle numérique de terrain avec habillage et/ou d'un photomontage)



**Figure 8** : Exemple de photoréalisme réalisé avec le logiciel Cadwork route

- la séquence vidéo (animation par succession d'images à partir de points d'implantation d'une caméra tout au long du tracé)
- les normes considérées par le logiciel pour le calcul des paramètres fournis automatiquement et la possibilité ou non de les modifier
- les sorties offertes par le logiciel, à savoir les paramètres de sorties du logiciel en rapport avec la problématique tridimensionnelle

Cette description détaillée est réalisée dans la mesure des informations récoltées. Les renseignements faisant défaut sont signalés par une zone grisée. Les logiciels dont aucune information concernant leur mode de fonctionnement n'est disponible ne sont pas mentionnés. Le résultat de cette description succincte est le suivant :

Logiciel	Méthodologie Convivialité	Interactivité multiplan	Visualisation 3D	Normes	Sorties
CADICS-ROUTE	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT	Perspective Photoréalisme Séquence vidéo	Modulable Compatible CH, F, D, GB, Croatie	-
Cadwork route	Espaces succ.	Sit/PL/PT	Perspective Photoréalisme Séquence vidéo	VSS, DIN	Planéité Distances de visibilité Trajectoire des vhcs
CARD/1	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT	Perspective Photoréalisme	?	Distances de visibilité requisés et existantes
CDS-Roads	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT	?	?	-
CivilCAD	Espaces succ.	Sit/PL/PT	?	?	-
Civil Designer	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme Séquence vidéo	TRH 17	Distances de visibilité et pertes de tracé dans chaque sens de circulation

Logiciel	Méthodologie Convivialité	Interactivité multiplan	Visualisation 3D	Normes	Sorties
COVADIS-AutoPISTE	Espaces succ.	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme	?	-
GeoMacao	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme	Compatible CH, UE	Diagrammes de vitesse et de distances d'arrêt et de visibilité Courbes de suivi des vhcs
GEOPAK	Espaces succ. ?	Sit/PL/PT	Perspective	AASHTO	?
HighRoad	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme Séquence vidéo	?	?
INROADS	Espaces succ.	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme	Compatible CH, UE	-
LISCAD	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT	-	?	Distances de visibilité et d'arrêt
Mensura	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme Séquence vidéo	ARP	-
MXROAD	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT/3D	Perspective	Modulable Compatible F	Contrôle dynamique de visibilité le long de l'axe de la route
PISTE +	Espaces succ.	?	Perspective	ARP	Distances de visibilité et pertes de tracé dans chaque sens de circulation
ProVI Strasse	Espace succ. ?	Sit/PL/PT	Perspective Photoréalisme Séquence vidéo	Compatible D, Autriche	Courbes de traction Distances de visibilité Diagramme de vitesse
RoadCalc	Espaces succ.	Sit/PL/PT	Perspective	?	-
RoadEng	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme	AASHTO	-
ROADPAC	Espaces succ. ?	?	Perspective Séquence vidéo	?	Distances de visibilité
Strada Polaris	Espaces succ.	Sit/PL/PT	-	-	-
STRATIS	Espaces succ. ?	Sit/PL/PT/3D	Perspective Photoréalisme	EAE 85, VSS	?
VESTRA CAD	Espaces succ. Multifenêtrage	Sit/PL/PT	-	Modulable Compatible D	Courbes de suivi des vhcs

Tableau 5 : Prise en compte de l'aspect 3D des voies de circulation dans le mode de fonctionnement des logiciels routiers de CAO

Remarque : les logiciels recensés dans l'inventaire de juin 2004 pour lesquels des informations plus précises sont disponibles sont présentés en annexe (Chapitre 10) de manière plus détaillée. Cela permet d'agrémenter la brève description faite au chapitre 3.1.2 (Tableau 5) au sujet des modes de fonctionnement des logiciels routiers de CAO en apportant des précisions techniques complémentaires.

## 3.2 CONCLUSIONS

Idéalement, l'emploi des outils de conception assistée par ordinateur devrait permettre un traitement tridimensionnel direct, avec une possibilité de visualisation 3D, mais aussi et surtout une conception qui se fasse de manière tridimensionnelle dès ses premières étapes. Or, malgré une importante panoplie de logiciels présents sur le marché, tous les logiciels recensés reposent sur une méthodologie de conception par espaces-plans successifs.

Néanmoins et selon certaines spécificités, les logiciels présentent une plus ou moins grande capacité à un « pseudo-traitement tridimensionnel direct », comme le démontre les quelques logiciels pris en exemple ci-après :

- RoadCalc : c'est un spécimen parfait de logiciel n'ayant que peu intégré les avancées informatiques de cette dernière décennie. Il suit « à la lettre » la méthodologie classique de conception des voies de circulation, avec une procédure par espaces-plans successifs stricte et sans multifenêtrage. La visualisation 3D s'obtient à la fin de la procédure et ne prend pas en compte de manière dynamique les changements apportés aux divers espaces-plans. En cas de modifications, un nouveau rendu 3D doit être généré. A moins d'employer un logiciel complémentaire, RoadCalc ne permet pas directement un rendu photoréaliste, seule solution permettant de juger l'impact esthétique et paysager du projet.
- COVADIS – AutoPISTE : le lien dynamique présent entre le plan de situation, les profils en long et en travers ainsi que la perspective 3D permet une conception quasiment tridimensionnelle, malgré une procédure par espaces-plans successifs. Le rendu photoréaliste permet de vérifier l'impact paysager de la variante de projet, tout en constituant un vecteur de communication important dans les négociations commerciales.
- RoadEng : bien que ses fonctionnalités n'aient pas été testées directement mais uniquement observées au travers de la documentation ou des démonstrations relatives, ce logiciel semble apporter une solution de CAO quasiment tridimensionnelle. Il dispose d'un véritable lien dynamique entre le plan de situation, le profil en long et le profil en travers, tous trois visibles simultanément grâce au multifenêtrage. Un changement apporté dans une fenêtre est immédiatement reporté dans les autres fenêtres. Cette associativité entre éléments est totale, permettant ainsi la modification du plan de situation en tout temps. Nul besoin alors de générer à nouveau un profil en travers ou de refaire le profil en long après un changement du plan de situation. Cette interactivité entre les espaces-plans permet un ajustement rapide entre le tracé en situation et le profil en long, et offre donc un pseudo-traitement tridimensionnel.

Malgré les possibilités de pseudo-traitement tridimensionnel de certains logiciels, les outils routiers de CAO demeurent basés sur une méthodologie classique par espaces-plans successifs. Celle-ci intègre des normes dont les notions et paramètres déterminants ne sont qu'unidirectionnels, parfois bidirectionnels mais jamais tridimensionnels.

Lors de la conception, des notions comme la lisibilité (Chapitre 6.3) ou l'intégration dans le site demeurent des étapes de post-traitement, alors que des paramètres comme la distance de visibilité, non considérés tridimensionnellement, sont pris en compte de manière approximative voire erronée.

### 3.2.1 Vers une nouvelle conception géométrique

La conception géométrique « classique » des voies de circulation est inscrite au sein d'une procédure générale itérative (Figure 12). Comme décrit au Chapitre 1.3, elle fait recours à un processus d'étude séquentiel (Figure 9).

Une fois l'opportunité du projet examinée et la problématique posée, les éléments caractéristiques de base de la voie de circulation sont déterminés. Le plan de situation, le profil en long puis le profil en travers sont ensuite conçus l'un après l'autre en respectant les normes en vigueur. Le processus se poursuit avec une phase de vérifications par combinaison d'espaces-plans. Après d'éventuelles corrections, le projet est finalement validé en trois dimensions.

Ce processus de conception géométrique est statique, dans le sens où la modification d'un élément dans un espace-plan (par exemple le tracé en situation) entraîne obligatoirement la redéfinition des éléments dans les autres espaces-plans (profils en long et en travers). Cela ralentit le travail de conception, chacune des variantes de tracé devant être reprise dès le début.

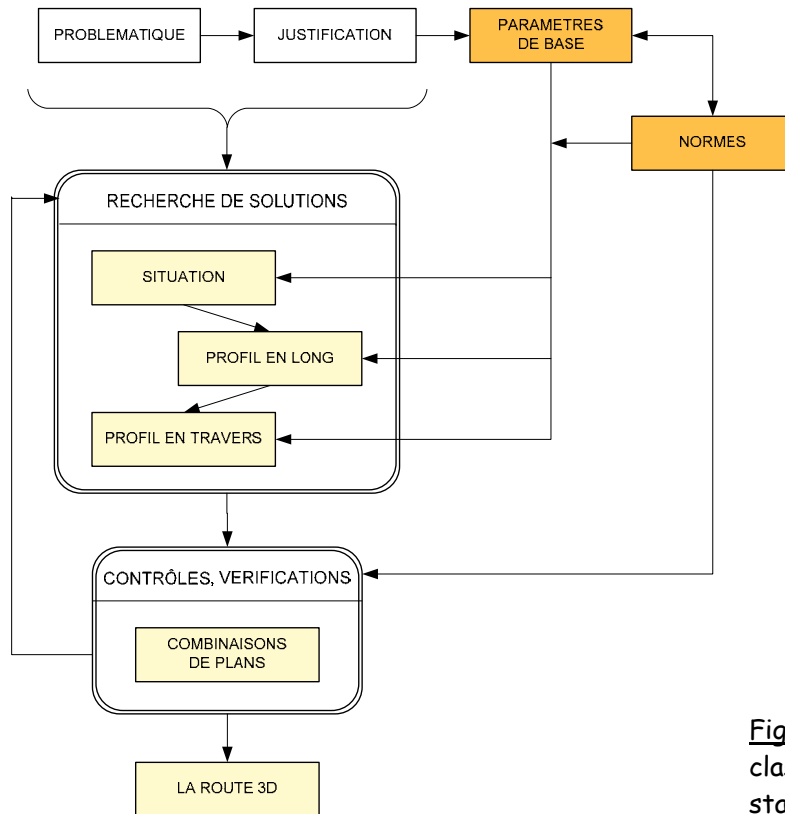


Figure 9 : Conception géométrique classique par processus séquentiel statique

Grâce à une associativité entre les différents espaces-plans, les logiciels routiers de CAO ont permis de rendre dynamique cette procédure séquentielle (Figure 10). Des liens dynamiques permettent une mise à jour immédiate sur tous les espaces-plans dès qu'un changement est apporté, garantissant ainsi une facilité et une rapidité lors de la conception de tracés et d'études de variantes.

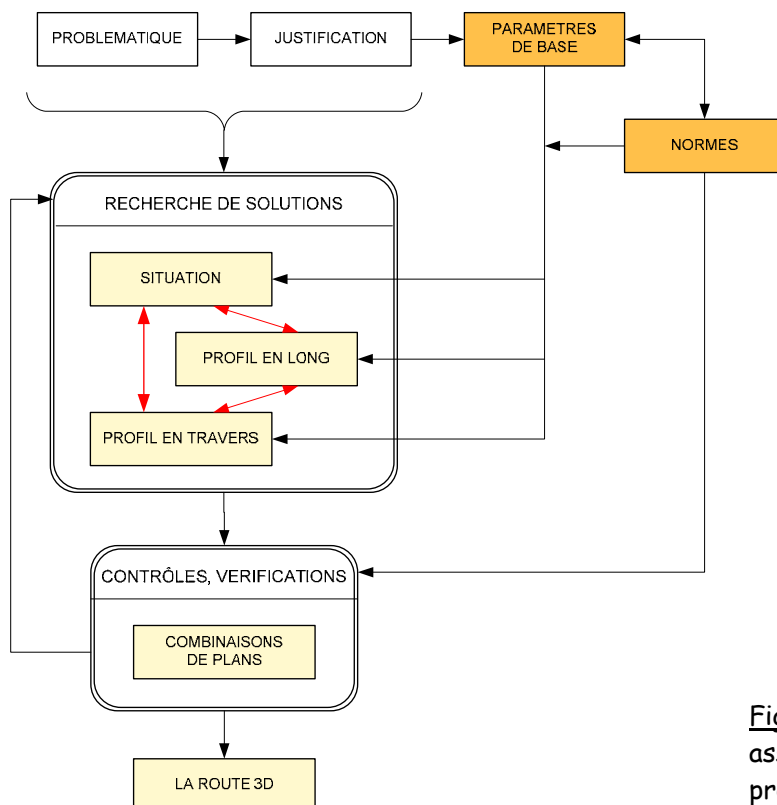


Figure 10 : Conception géométrique assistée par ordinateur par processus séquentiel dynamique

Le processus dynamique facilite la conception, tout en apportant un gain de temps non négligeable. Il reste néanmoins non optimal car séquentiel. Des vérifications par combinaison d'espaces-plans demeurent nécessaires alors que des notions comme la visibilité ou la lisibilité ne peuvent pas être prises en compte de manière complète. Seule une approche tridimensionnelle directe le permettrait.

Le processus séquentiel serait donc théoriquement avantageusement remplacé par une approche simultanée (Figure 11).

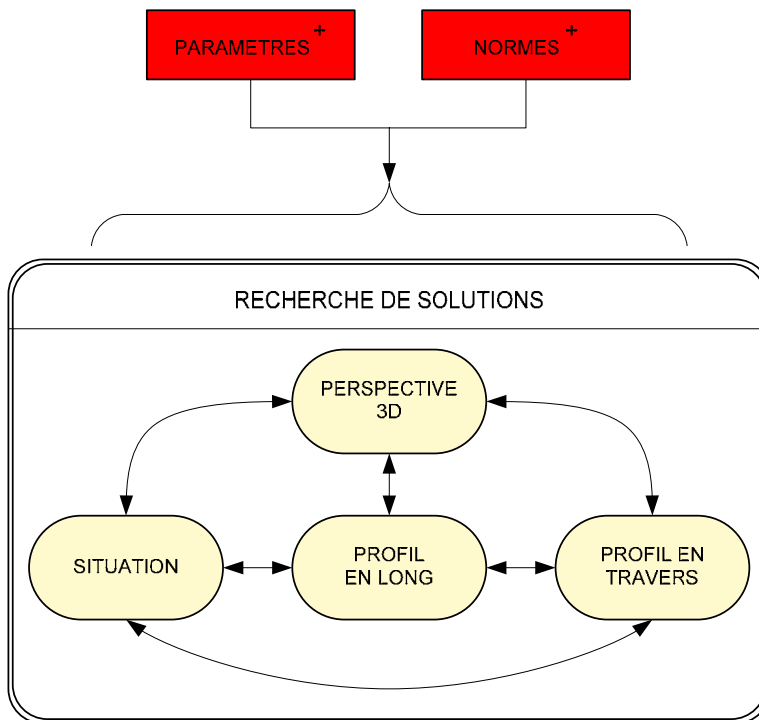


Figure 11 : Conception géométrique par processus simultané

La possibilité d'étudier en même temps les différents espaces-plans dès les premières phases d'étude permettrait d'aller à l'essentiel en relevant immédiatement le(s) problème(s) éventuel(s) au niveau tridimensionnel (visibilité, lisibilité, intégration dans le site, etc...). La détection d'un problème serait alors directe, ne nécessitant plus de s'astreindre à plusieurs étapes de vérification avant d'éventuelles corrections itératives.

**Remarque :** une telle conception géométrique nécessiterait une évolution des normes (normes<sup>+</sup>) et des paramètres de base de la conception (paramètres<sup>+</sup>) (Figure 11). Ces derniers devraient être précisés alors que de nouvelles normes devraient être mises en place pour la prise en compte de notions actuellement laissées de côté voire traitées de manière approximative.

Avec une conception géométrique par processus simultané, le champ d'application d'une géométrie tridimensionnelle des voies de circulation s'étendrait, au-delà de la simple conception, aux étapes d'appréciation des conséquences et de prise de décision concernant un projet (Figure 12).

Exploitant encore davantage les visualisations tridimensionnelles en les intégrant dès les premières phases de conception, ce processus simultané permettrait une véritable analyse tridimensionnelle des voies de circulation.

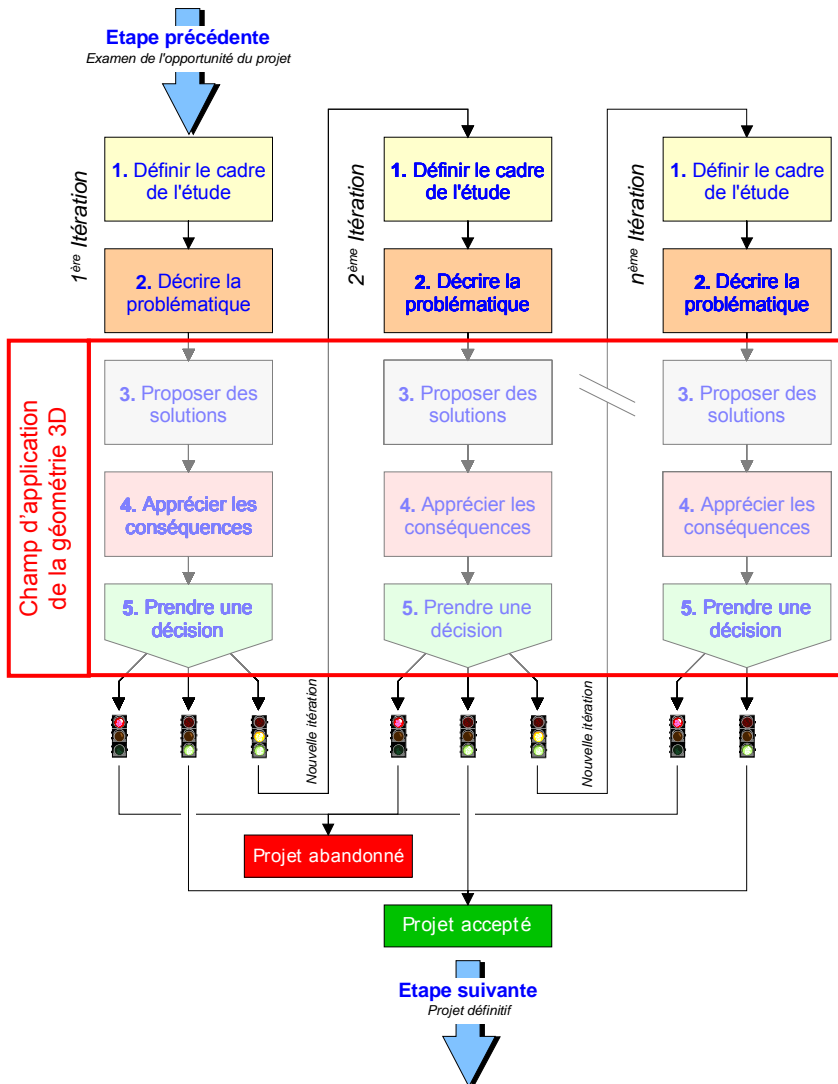


Figure 12 : Méthodologie du projet routier et champ d'application de la géométrie 3D [12]

Cette analyse 3D complète et directe serait alors bénéfique lors de la conception, mais aussi lors de la vérification de l'existant, notamment au moment de la réalisation d'audits de sécurité.

## 4 GÉOMÉTRIE TRIDIMENSIONNELLE DES ROUTES

La mise en place d'un processus simultané de conception géométrique des voies de circulation, outre une refonte des processus des logiciels routiers de conception assistée par ordinateur, nécessiterait un ajustement des normes en vigueur.

Devant le caractère tridimensionnel et complexe des voies de circulation, il apparaît en effet nécessaire d'apporter certaines précisions et/ou corrections aux normes en vigueur s'il l'on veut réellement procéder à un traitement tridimensionnel direct. Les paramètres intervenant dans la conception des voies de circulation ne devraient plus être indiqués dans les normes sous forme uni voire bidirectionnelle, mais en 3D. De plus, des notions comme l'intégration dans le paysage, la lisibilité, etc... devraient elles aussi faire l'objet de normes précises.

La problématique de la géométrie tridimensionnelle ne se borne donc pas uniquement à la méthodologie de conception des voies de circulation mais intègre également toute la partie à l'amont, à savoir les paramètres de base de la conception.

### 4.1 APPROCHE SYSTEMIQUE

L'étude de la géométrie routière est un problème complexe qui fait directement appel à la notion de « route » en tant que système où interagissent trois composantes (Figure 13) :

- *la route* : désigne l'infrastructure routière proprement dite, c'est-à-dire sa géométrie, sa composition et son état de conservation, ainsi que son environnement immédiat (talus, obstacles latéraux).

Remarque : la route est la seule composante du système « route » sur laquelle peut directement agir le concepteur routier.

- *l'utilisateur* : désigne aussi bien le conducteur du véhicule que les passagers transportés.

Remarque : il existe une grande variation dans les comportements et les motivations des conducteurs sur lesquels le projeteur n'a que peu d'emprise.

- *le véhicule* : mobile dont les mouvements sont dirigés par l'utilisateur conducteur.

Remarque : les véhicules circulant sur les routes sont très divers, la loi sur la circulation routière n'imposant que des valeurs limites. En raison de la forte hétérogénéité du parc automobile, le véhicule est difficilement modélisable et le projeteur routier ne peut pas intervenir sur cette composante du système route.

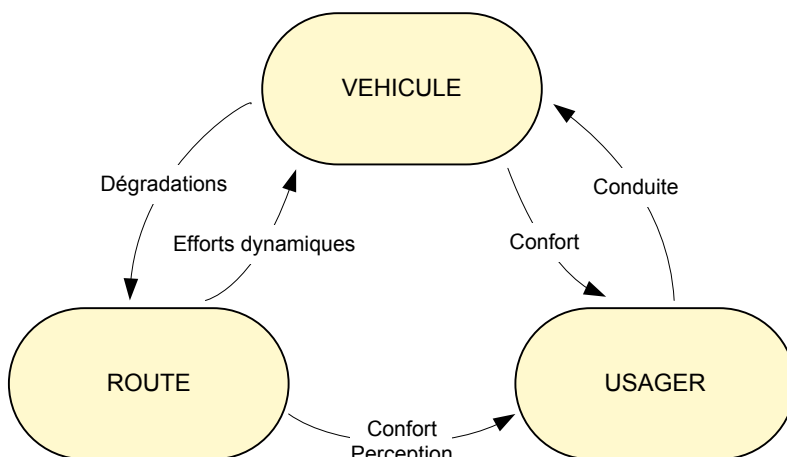


Figure 13 : La route en tant que système

Diverses interactions existent entre ces trois composantes (Figure 13) :

- l'utilisateur adapte son comportement selon sa perception de la route ; il modifie par exemple sa vitesse en fonction de sa perception du tracé et de l'état de la chaussée.
- les efforts dynamiques supportés par le véhicule (la force centrifuge en courbe par exemple) dépendent directement du tracé de la route.
- le comportement et les aptitudes de l'utilisateur (motivation, concentration, fatigue, etc...) influencent directement le déplacement du véhicule, au même titre que la qualité du véhicule et celle de la route.
- les dégradations du revêtement de la route dépendent des véhicules circulant sur celle-ci, principalement les véhicules lourds.
- l'utilisateur bénéficie d'un certain confort dépendant des qualités de son véhicule (amortissement des efforts dynamiques, capacité de freinage, etc...).
- le confort de l'utilisateur est une notion intimement liée à la sécurité, un trajet inconfortable augmentant grandement les risques de déconcentration et de fatigue.

Remarque : les interactions entre ces trois composantes ne peuvent pas toutes (ou difficilement) être déterminées clairement et quantifiées. Cela rend d'autant plus complexe la conception d'une route sûre, confortable et économique. Une action pensée sur une seule composante de ce système, négligeant les effets sur les autres composantes, peut se révéler insuffisante ou inopérante pour le système « route » dans son entier.

## **4.2 RÉFLEXION CONCERNANT LES PARAMÈTRES DE CONCEPTION**

Une réflexion est menée au sujet de la problématique tridimensionnelle des paramètres et notions servant de base à la conception des voies de circulation. L'analyse se veut aussi globale que possible. Elle prend en compte l'ensemble des composantes du système « route » (le véhicule, l'utilisateur, la route et son environnement) ainsi que leurs interactions.

### **4.2.1 Remarques préalables**

Une première réflexion est réalisée au sujet des composantes « véhicule » et « usager » du système « route ». Bien que ces deux paramètres n'aient pas de lien direct avec la problématique tridimensionnelle, ils interviennent dans de nombreuses notions dont dépend la géométrie des voies de circulation (rayon de la courbe en plan, déclivité maximale, etc...). La normalisation relative à la conception géométrique des voies de circulation modélise ces deux composantes par des exemples représentatifs. Ceci permet de réaliser des routes assurant des déplacements sûrs, économiques et confortables pour la majeure partie de la population et du parc automobile. L'inconvénient de cette démarche est qu'elle néglige l'aspect de dispersion de ces caractéristiques (travail sur la moyenne sans considération de l'écart-type).

#### **4.2.1.1 Le véhicule routier**

Problématique : données de base importantes dans la conception des projets d'infrastructures routières, les caractéristiques géométriques et dynamiques des véhicules varient beaucoup selon leur type, leur utilisation et les constructeurs. Or, la normalisation actuelle fixe essentiellement des valeurs limites pour des classes de véhicules normalisées (poids lourds, véhicules légers, trains routiers et cycles, piétons). Cela laisse à l'ingénieur le choix de considérer telle ou telle catégorie selon l'élément du projet observé, selon qu'il s'agisse de prendre en compte le véhicule le plus contraignant ou le véhicule moyen.



Solution proposée : devant la grande dispersion des caractéristiques géométriques et dynamiques des véhicules et l'écart trop important entre les classes de véhicules existantes et le parc automobile, il semblerait opportun d'étudier et de déterminer davantage de classes de véhicule. Les caractéristiques techniques de ces véhicules seraient alors actualisées et précisées, comblant les valeurs actuelles souvent sommaires voire parfois absentes. Cela permettrait de réaliser des ouvrages répondant de plus près aux spécifications du lieu, notamment au niveau du type de véhicules.

#### 4.2.1.2 L'usager

Problématique : les aptitudes de l'usager sont influencées par la qualité du véhicule et de la route, mais aussi par des facteurs psychologiques (fatigue, âge, agressivité, etc...) et par des agents extérieurs (alcool, médicaments, conditions climatiques, monotonie, etc...). Or, ces aptitudes influent directement sur le déplacement du véhicule. Devant la multiplicité des éléments dictant le comportement des usagers, la normalisation prescrit un usager moyen pour l'étude du tracé d'une voie de circulation.

Solution proposée : la notion d'usager représentatif devrait être étendue à plusieurs profils d'usagers représentatifs, de manière à pouvoir travailler sur des scénarii.

#### 4.2.2 Analyse thématique

La problématique de la géométrie tridimensionnelle des voies de circulation est analysée de manière succincte selon quatre thèmes distincts, à savoir la dynamique du véhicule, la perception et la visibilité (point de vue de l'usager), l'intégration dans le site (point de vue du riverain) et la viabilité locale (géométrie parcourue à faible vitesse). Chaque thème est décomposé en thèmes partiels pour lesquels les problèmes découlant de la non considération intégrale d'une géométrie 3D sont identifiés. Des ébauches de solutions sont alors proposées, agrémentées dans certains cas de questions en suspens et interrogations à lever.

La réflexion réalisée, basée sur la normalisation en vigueur principalement en Suisse, conduit au tableau suivant :

Thème	Thème partiel	Problématiques identifiées	Ebauches de solutions
<b>DYNAMIQUE DU VEHICULE</b>	Valeurs limites : généralités	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pas de distinction entre valeurs limites (vis-à-vis de la sécurité) et valeurs limites acceptables (vis-à-vis du confort).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ introduction de valeurs statistiques (calcul à la limite avec acceptation d'un risque).</li> <li>▪ calcul à l'état limite ultime (sécurité) et à l'état limite de service (confort) [analogie au calcul des structures comme les ponts].</li> </ul>
	Vitesse	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ la vitesse de projet est différente de la vitesse effective. Cela est-il bien raisonnable ?</li> <li>▪ la vitesse se base sur un postulat utopique de respect des vitesses légales.</li> <li>▪ les diagrammes de vitesse ne sont que « théoriques » et valables uniquement pour un cas défini.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ établissement d'un diagramme de vitesse réelle, avec une modélisation affinée (accélérations et décélérations différenciées) et la prise en compte de plusieurs cas.</li> <li>▪ introduction d'une vitesse pour l'analyse de risque : l'usager adapte sa conduite en fonction de la géométrie, sans considérer la vitesse légale.</li> </ul>
	Variation de l'accélération (da/dt)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ aggrave l'instabilité (choc) et aggrave l'inconfort.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mise en place de valeurs physiologiques.</li> </ul>
	Limites physiologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ les limites physiologiques sont-elles définies par une limite de survie ou de confort ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ redéfinition des valeurs limites.</li> </ul>

Thème	Thème partiel	Problématiques identifiées	Ebauches de solutions
	Forces s'opposant au mouvement (stabilité du véhicule)	<ul style="list-style-type: none"> <li>les forces s'opposant au mouvement sont tridimensionnelles et simultanées.</li> <li>le véhicule, solide à n composantes, est habituellement simplifié en un seul corps.</li> <li>le véhicule est un mobile avec une certaine inertie de ses composantes (cas des amortisseurs par exemple).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>considération tridimensionnelle des forces (forces dans l'espace et non pas sur des espaces-plans).</li> <li>utilisation d'un ellipsoïde des forces (délestage sur un rayon convexe, freinage en courbe et dévers). <u>Question</u> : comment définir les paramètres de forme de l'ellipsoïde ?</li> <li><u>Question</u> : faut-il intégrer l'ensemble des composantes du véhicule pour l'analyse des forces du système ?</li> </ul>
	Forces de contact pneu-chaussée	<ul style="list-style-type: none"> <li>les coefficients de frottement (longitudinal (CFL) et transversal (CFT)) nécessaires à la détermination des forces de contact ont une forte variabilité selon les axes considérés (rapport de 1 à 3).</li> <li>lorsqu'un le CFT (ou le CFL) est utilisé entièrement, le taux d'utilisation du CFL (du CFT respectivement) n'est pas clairement défini par les normes.</li> <li>l'analyse se base uniquement sur une situation standard de chaussée humide. Les cas extrêmes comme le verglas ne sont pas représentés, alors qu'ils seraient tout aussi pertinents.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>utilisation d'un coefficient de frottement global CF, plutôt que CFT ou CFL.</li> <li>utilisation d'un ellipsoïde des coefficients de frottement (par extension, il s'agit de l'ellipse des forces de frottement).</li> <li>considérer des cas limites (verglas pour une route de montagne par exemple) en sus des cas standard.</li> <li><u>Question</u> : faut-il tenir compte des pneus (forme, déformations) et de la structure de la chaussée (modélisation) pour la détermination des forces de contact pneu-chaussée ?</li> <li><u>Question</u> : les essais de CFT et CFL sont-ils suffisants ou faut-il les modifier pour obtenir un coefficient de frottement global CF ?</li> </ul>
	Dévers (déclivité transversale)	<ul style="list-style-type: none"> <li>le dévers est dimensionné de manière simpliste. Sa valeur ne dépend que du type de route, sans prise en compte de la vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>introduction d'une déclivité transversale adaptée au véhicule (y inclus à sa vitesse) et non pas au type de route.</li> </ul>
PERCEPTION ET VISIBILITE	Distance de visibilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>la distance de visibilité est à séparer clairement de la distance d'arrêt pour éviter toute confusion entre 2 éléments à comparer et non à considérer de manière agrégée.</li> <li>valeurs différentes en situation et en profil en long.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>calcul d'une distance de visibilité 3D.</li> </ul>
	Visibilité locale	<ul style="list-style-type: none"> <li>accès des parkings.</li> <li>visibilité aux carrefours.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>en application d'une extension de la notion de distance de visibilité.</li> </ul>
	Combinaison des éléments géométriques du plan de situation et du profil en long	<ul style="list-style-type: none"> <li>il n'existe que des règles empiriques et exemples descriptifs. Ce manque de formulation rend difficile une délimitation précise entre ce qui est « bon » et ce qui est « mauvais ».</li> <li>la vérification s'effectue à la fin du processus de conception.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>définir des règles de combinaisons limites par des équations à 4 dimensions qui incluent le dévers (x, y, z, p).</li> </ul>
	Perte de tracé	<ul style="list-style-type: none"> <li>règles empiriques.</li> <li>contrôle post-étude.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>définition d'un critère de perte de tracé.</li> </ul>
	Traitement des abords routiers	<ul style="list-style-type: none"> <li>traitement des abords routiers négligé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>définir un bon abord routier.</li> </ul>

Thème	Thème partiel	Problématiques identifiées	Ebauches de solutions
	Perception du tracé	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ la distinction avec la distance de visibilité est peu claire.</li> <li>▪ la perception du tracé dépend de nombreux facteurs humains et atmosphériques.</li> <li>▪ la distance de perception et l'ouverture du champ visuel ne sont fonction que de la vitesse, sans considération des conditions atmosphériques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ distinguer plusieurs types d'usagers.</li> <li>▪ considérer plusieurs conditions atmosphériques (standard, brouillard, nuit).</li> </ul>
	Perception de l'espace routier	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ perte d'identification par la grande variété des profils types.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ définir des profils standard, moins restrictifs que le critère « type de route ».</li> </ul>
<b>INTEGRATION DANS LE SITE</b>	Environnement routier immédiat	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ l'environnement routier immédiat influence fortement le comportement de l'utilisateur.</li> <li>▪ un environnement adapté dispense de mesures coercitives.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ détermination des relations entre les abords et le comportement de l'utilisateur (vitesse, manœuvres, concentration).</li> <li>▪ élaboration de règles constructives.</li> </ul>
	Riverain ↔ usager	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ il existe une dualité dans la perception du paysage par deux utilisateurs opposés.</li> <li>▪ qu'est-ce qui définit un tracé esthétique ?</li> <li>▪ faut-il montrer ou au contraire dissimuler l'aménagement routier ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mettre en place des règles constructives.</li> </ul>
	Outils de communication	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ il n'existe pas d'éthique de la représentation. Une visualisation peut copier ou travestir la réalité (en l'améliorant ou en la dégradant).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ règles d'application des visualisations tridimensionnelles (points de vues, focales, couleurs).</li> </ul>
<b>VIABILITE LOCALE</b>	Carrefours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ la modélisation des véhicules est simplifiée alors que l'analyse des carrefours présente une géométrie fine à forme complexe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ affinage de la modélisation avec prise en compte du mouvement des amortisseurs.</li> </ul>
	Accès aux parkings	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ les accès aux parkings présentent une faible visibilité.</li> <li>▪ il existe un risque potentiel de chocs entre le bas de caisse du véhicule et la chaussée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ établissement des conditions de visibilité en sortie de parkings.</li> <li>▪ établissement des conditions de garde au sol spécifiques aux accès aux parkings.</li> </ul>

Tableau 6 : Thématique de la géométrie tridimensionnelle

Remarque : le développement et la faisabilité de ces solutions ne sont pas étudiés ici. Ce chapitre ne constitue qu'une première approche de dégrossissage des solutions envisageables pour résoudre les différentes problématiques liées au sujet de l'aspect tridimensionnel des voies de circulation.

De manière synthétique, on peut conclure en disant que l'état de connaissance dans la normalisation de la conception des voies de circulation néglige notamment les notions d'intégration (dans le paysage, dans le site) et de lisibilité, alors qu'il ne traite que de manière bidimensionnelle la plupart des paramètres de conception.

### 4.3 BESOINS LIÉS À L'ÉTUDE TRIDIMENSIONNELLE

Idéalement, l'étude géométrique tridimensionnelle des voies de circulation passe par une procédure de conception simultanée et par la prise en compte d'un ensemble complet de notions et paramètres décrits de manière précise, complète et non simplifiée.

Devant la complexité du système « route » et l'importante place laissée dans ce domaine à la simplification, il semble irréaliste de vouloir prétendre à une trop grande rigueur dans la détermination des paramètres de base de la conception. A quoi sert en effet un grand degré de précision concernant un paramètre s'il intervient dans une notion modélisée de manière simplifiée ? Les véritables interrogations ne se posent pas au niveau de la faisabilité des corrections et ajouts dans la normalisation, mais au niveau de la véritable utilité de ces modifications et des bénéfices réels qui pourraient être engrangés. Or, à l'heure actuelle, on peut dire que la mise en place d'une conception et de paramètres de conception parfaitement adaptés nécessiterait des efforts conséquents, pas forcément proportionnels aux réels besoins. Si lors des deux dernières décennies les besoins liés à la problématique tridimensionnelle étaient grands, leur importance a diminué au vu du développement des possibilités des logiciels de conception assistée par ordinateur. La visualisation tridimensionnelle, l'intégration dans le site grâce aux modèles numériques de terrain ainsi que l'interactivité multiplan ont comblés à une part importante des besoins.

Cela ne veut bien sûr pas dire que le développement d'une géométrie tridimensionnelle doit être écarté, mais plutôt qu'il doit être mieux ciblé pour permettre de combler les manquements encore identifiés à l'heure actuelle et qui constituent la véritable raison du traitement 3D.

#### 4.3.1 Potentiels actuels du 3D

A l'heure actuelle, la véritable nécessité d'une géométrie tridimensionnelle peut s'exprimer par trois raisons principales qui sont :

- *la sécurité* (au sens large, avec interaction entre les trois composantes du système « route », à savoir le véhicule, l'utilisateur et la route)
- *l'intégration dans le site* (au niveau des impacts, qu'ils soient visuels, sonores, etc...)
- *la visualisation du projet* comme élément convainquant et comme outil de diffusion

Ainsi, si l'on ne peut prétendre, sans efforts disproportionnés, à une procédure de conception simultanée intégrant des paramètres de conception reflétant de manière exacte la réalité tridimensionnelle des voies de circulation, on peut tout au moins amener des progrès dans les trois domaines cités ci-dessus grâce à une amélioration des fonctionnalités des outils de conception assistée par ordinateur, ainsi que grâce à une prise en compte tridimensionnelle de notions qui étaient soit absentes soit traitées de manière incomplète jusqu'alors.

Grâce à ces améliorations, les nouvelles routes bénéficieraient d'une meilleure qualité de conception, alors que les routes existantes seraient corrigées de manière plus efficace, l'analyse de l'existant au travers d'audits de sécurité étant plus précise.

Remarque : de manière à pouvoir illustrer les chapitres suivants, un exemple d'application est réalisé. Il est conçu à l'aide du logiciel GeoMacao avec l'appui technique de P. Schultz de la société Softcad. Il est évident que d'autres logiciels auraient pu être utilisés de manière similaire, l'exemple ne visant pas à démontrer les potentialités d'un logiciel plutôt qu'un autre, mais bel et bien à fournir une base d'illustrations à partir de la modélisation d'une voie de circulation et de son terrain d'implantation.

## 5 ATTENTES LIÉES AUX LOGICIELS ROUTIERS DE CAO

Plutôt que de développer une nouvelle méthodologie de conception des voies de circulation, il apparaît déjà opportun d'approfondir les potentialités des logiciels de CAO fonctionnant selon une procédure séquentielle dynamique. L'axe de développement préconisé est celui de l'interactivité multiplan avec prise en compte du 3D tout au long du processus de conception. Cette option est choisie notamment en raison du besoin de décomposition par espaces-plans toujours présent dans les projets routiers (notamment pour la transmission de l'information selon des formats standard : plan de situation, profil en long et profil en travers).

### 5.1 DÉVELOPPEMENT DES POSSIBILITÉS DE VISUALISATION

Partant du postulat d'un processus de conception séquentiel dynamique, les possibilités suivantes sont à préconiser pour les outils de conception assistée par ordinateur :

- visualisation tridimensionnelle du projet intégré dans le site dès les premières ébauches de tracé.

La visualisation tridimensionnelle est établie à partir de catalogues des profils types ou de paramètres par défaut (comme la largeur des voies et les pentes de talus) qui seront précisés par le concepteur lorsque celui-ci détaillera son projet. Elle donne un aperçu de l'effet de l'implantation du projet dans le terrain existant.

Le concepteur reconstitue certes mentalement le projet en 3D par recombinaison du plan de situation, du profil en long et du profil en travers. Il ne peut cependant que difficilement se rendre véritablement compte de l'impact du projet sur l'existant sans le recours à une superposition des modélisations du projet et du terrain.

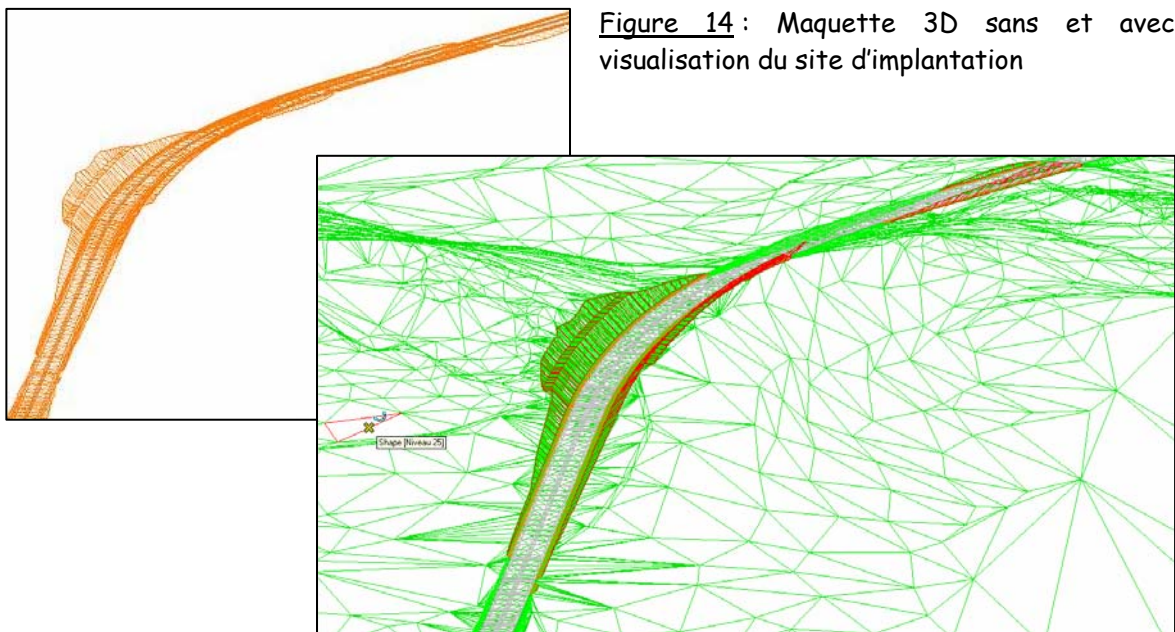


Figure 14 : Maquette 3D sans et avec visualisation du site d'implantation

Dès lors, plus vite la possibilité de visualisation est à disposition du projeteur routier, plus vite celui-ci est à même de faire des choix techniques opportuns vis-à-vis non pas uniquement de la voie de circulation elle-même, mais vis-à-vis de sa bonne implantation dans le terrain existant.

- « habillage » rapide de la maquette 3D, avec un catalogue de possibilités d'ombrages et de textures prédéfinies qui pourront être détaillés et affinés au fil de l'avancement du projet.

Selon le but recherché, le rendu tridimensionnel peut être étoffé au niveau de l'ombrage et des textures utilisés ainsi qu'au niveau de l'implantation de détails (arbres, habitations, etc...). A partir de là, les possibilités d'imagerie de synthèse sont diverses et variées, conduisant jusqu'à un photoréalisme (photomontage), voire à une animation du projet (séquence vidéo suivant une trajectoire définie par le concepteur routier).

L'avantage d'une si grande liberté dans les possibilités de rendu 3D réside dans la capacité à représenter la perception de l'utilisateur de la route mais aussi celle du riverain.



**Figure 15** : Visualisation de la perception du riverain et de l'utilisateur face à une nouvelle route [47]



- lien dynamique entre le plan de situation, le profil en long, le profil en travers et la perspective 3D.

Grâce à cette interactivité, et bien que le concepteur ne travaille pas directement sur la vue en perspective, l'effet d'une modification du projet se voit de manière instantanée en trois dimensions. La vue 3D aide et influence ainsi la conception dès ses premières étapes.

A noter qu'il pourrait s'avérer avantageux de disposer de la vue perspective 3D sur un deuxième écran. Celle-ci pourrait ainsi être consultée en permanence en mode « plein écran », en sus d'un écran dédié à la conception qui serait constitué d'un multi-fenêtrage avec le plan de situation, le profil en long, le profil en travers et une fenêtre de données numériques.



**Figure 16** : Travail de conception sur deux écrans [Source : [www.insitusimulation.com](http://www.insitusimulation.com)]

## 5.2 PARAMÉTRISATION DES LOGICIELS

Les outils de conception assistée par ordinateur doivent faciliter le travail du concepteur et permettre de constituer des projets qui soient conformes aux normes en vigueur. Ces textes et prescriptions ne sont pas homogènes, variant de manière plus ou moins prononcée d'un pays à l'autre. Par conséquent, et pour être totalement efficaces, les logiciels routiers de CAO devraient disposer de plusieurs paramétrisations, avec des paramètres respectant telle ou telle norme qui soient définis par défaut mais aussi modifiables. Le concepteur choisirait alors la norme qu'il désirerait prendre en considération et amènerait d'éventuelles modifications avant de définir son tracé routier. Partant d'un logiciel de base, il choisirait un paramétrage selon la norme x, qu'il pourrait encore paramétrer de manière personnalisée.

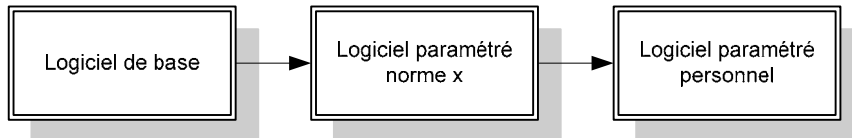


Figure 17 : Paramétrisations des logiciels routiers de CAO

**Remarque :** en vue d'améliorer la compréhension et pour parvenir à une certaine homogénéisation, il serait avantageux d'intégrer dans les logiciels routiers de CAO les couleurs normées des plans, déjà lors de la conception à l'écran.

Comme il n'existe pas d'homogénéisation internationale au niveau des prescriptions de couleurs, les couleurs utilisées par les logiciels devraient donc être, elles aussi, auto-paramétrées différemment d'un pays à l'autre.

En Suisse, la couleur des éléments composant le tracé devrait être compatible avec le cahier de couleurs défini dans la Norme SN 640 033 [73]. Le concepteur n'aurait alors plus qu'à définir au tout début de son travail de conception, avant même l'ouverture d'un quelconque espace-plan, quelle normalisation il désire appliquer. Le logiciel adapterait alors en conséquence les propriétés de base pour la conception et pour le rendu.

## 5.3 DÉVELOPPEMENT DES PARAMÈTRES DE SORTIES

En plus d'offrir une visualisation tridimensionnelle aisée et rapide des projets, les logiciels de CAO, agrémentés de paramètres de sortie suffisamment étoffés, permettraient de localiser plus facilement les zones « problématiques ».

Par conséquent, un diagramme de sortie multiparamètres est à préconiser avec, en plus du schéma itinéraire standard présentant le plan de situation, le profil en long et la géométrie du projet (sinuosités, dévers et déclivités), une indication concernant le diagramme de vitesse <sup>5</sup> et les distances de visibilité nécessaires et disponibles (Chapitre 6.2).

Le diagramme multiparamètres serait alors un outil précieux d'aide à la conception et à la correction routière, alertant le projeteur d'un risque de sécurité insuffisante. Ce schéma itinéraire étoffé permettrait en effet :

- de relever les problèmes de visibilité, à savoir les pertes de visibilité sur chaussée (perte de tracé), les pertes de visibilité en dépassement et les pertes de visibilité par rapport à un obstacle, ceci par comparaison des distances de visibilité disponibles et nécessaires.
- de se rendre compte de l'homogénéité des vitesses le long du tracé, de déceler les variantes de vitesses dangereuses et de donner des éléments pour l'optimisation de l'implantation de la signalisation, ceci au travers du paramètre  $\Delta V$  émanant du diagramme de vitesse.

<sup>5</sup> Le diagramme de vitesse correspond à la représentation graphique de la variation de la vitesse de projet le long du tracé, soit  $V = f(\text{km})$ .

Remarque : la notion de vitesse de projet, sur laquelle les éléments de la voie de circulation sont entre autres dimensionnés, est un concept théorique postulant un usager respectant les limitations de vitesse. Or en pratique, celles-ci sont sujettes à dépassement par une certaine portion des conducteurs, pourcentage dépendant notamment du type de route. Les caractéristiques des véhicules et du tracé permettent en effet l'adoption de vitesses supérieures aux vitesses légales qui, sans être dangereuses, limitent cependant la marge de sécurité de l'usager. Celui-ci choisit sa vitesse de circulation en fonction non pas uniquement des limitations de vitesse, mais également en fonction de plusieurs caractéristiques de l'environnement routier (largeur de la voie, conditions de surface, distance focale, etc...).

Partant de ce constat, l'introduction de la notion de « vitesse pour l'analyse de risque <sup>6</sup> » semble opportune. La vitesse pour l'analyse de risque est la vitesse théorique atteinte par un véhicule dont le conducteur ne respecte pas la législation et circule sur la base d'une appréciation subjective des conditions locales. Cette vitesse est très proche de la vitesse de projet, à la différence près que la vitesse maximale n'est pas la vitesse légale, mais celle « choisie » par l'usager selon la perception qu'il a de la voie de circulation et de son environnement.

Faisant totale abstraction de la législation, la vitesse pour l'analyse de risque permet de montrer l'utilisation réelle de la route, et par conséquent l'inhomogénéité des vitesses du tracé, grande source d'insécurité de la voie de circulation. Le bénéfice lié à son utilisation dans le diagramme de vitesse est évident.

Par conséquent, le diagramme de vitesse pourrait être complété avec cette vitesse qui représente la valeur maximale que l'usager perçoit comme encore sécuritaire d'après les informations qu'il reçoit de l'environnement routier.

Cependant, il faut s'interroger sur la pertinence de la notion de vitesse comme base de la conception des projets routiers. Une approche innovante pourrait remplacer le paramètre vitesse par tous les aspects visuels que sont la visibilité, la lisibilité et l'intégration dans le milieu.

---

<sup>6</sup> La vitesse pour l'analyse de risque est une notion introduite au Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne depuis plusieurs années dans l'enseignement.



## 6 SECURITE

Un des enjeux de la géométrie tridimensionnelle est l'amélioration de la sécurité des voies de circulation, notion loin d'être facile à aborder en raison notamment de la multiplicité des éléments intervenant.

### 6.1 PRINCIPES DE LA SÉCURITÉ DES VOIES DE CIRCULATION

Devant la complexité du système « route », la sécurité routière ne peut s'exprimer sous une forme simple. Elle doit tenir compte de multiples facteurs qui influencent son propre fonctionnement, selon une approche systémique.

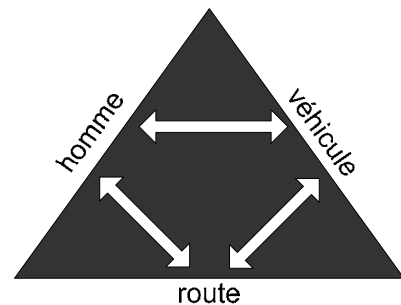


Figure 18 : Approche systémique dans l'analyse de sécurité des voies de circulation

La responsabilité de tout concepteur routier est alors de prendre en compte différents paramètres pour agir au niveau de la composante « route » dans le but d'améliorer la sécurité globale du système. Pour ce faire et selon [3], trois principes majeurs sont à considérer par le projecteur :

- le principe de qualité : réunion des 5 exigences de base que sont :
  - la visibilité
    - « Does visual information reach the user, and reach him in time (in the light of his speed behaviour and the speeds of the others users) to enable him to adapt his behaviour or perform a manoeuvre in response to events ? »
  - la lisibilité
    - « Can the infrastructure and its environment be easily deciphered so that the user can quickly identify where he is and the route he must take, and can easily anticipate the events (traffic and pedestrian movements, infrastructure change) with which he may be confronted, in order to adjust his behaviour accordingly ? »
  - l'adéquation de l'infrastructure aux contraintes dynamiques
    - « Regarding vehicle behaviour, particularly in terms of speed (as a partial consequence of the road and its environment), does the infrastructure enable the disruption of dynamic balance (skidding, overturning, etc...) to be avoided ? »
  - les possibilités d'évitement et de récupération en cas de situations critiques
    - « Can a user in a critical situation expect a collision (by braking, veering off course, etc...) or can he recover control of his out-of-control vehicle ? Does the infrastructure provide him with areas for emergency evasive manoeuvres or recovery ? »
  - la limitation de la gravité des chocs
    - « Are roadside obstacles few enough and far enough from the road (made more fragile where possible or shielded by special devices) so as not to aggravate the consequences of accidents ? Are the slopes (ditches, engineered dykes, etc...) at the roadside slight enough to prevent vehicles from crashing or overturning ? »

- le principe de cohérence dans l'espace : principes qui conduit à 2 notions de cohérence :
  - la cohérence des éléments de la route avec son environnement (*full consistency of all elements of the road with its environment*)

La question à se poser est de savoir s'il ne subsiste pas d'éléments incohérents avec l'itinéraire, le type, la catégorie et le statut de la voie et le niveau des équipements. L'exemple suivant ([Figure 19](#)) illustre parfaitement un cas d'incohérence des éléments de la route avec son environnement, découlant d'une mauvaise utilisation de la voie.

Ce tronçon, initialement prévu comme autoroute (route uni-directionnelle à deux voies de circulation) a changé d'affectation suite à la non réalisation de la deuxième partie de l'autoroute. L'usager circulant sur cette voie retrouve ainsi un marquage au sol et un profil en travers autoroutier alors qu'il roule sur une route bi-directionnelle.



[Figure 19](#) : Exemple d'incohérence des éléments d'une route : route à circulation bidirectionnelle mais présentant un profil autoroutier

- la cohérence le long du tracé de la route (*consistency throughout the route*)
- La question à se poser est de savoir si, dans le cas d'une discontinuité du profil en travers, celui-ci est traité par un aménagement fort, susceptible de modifier considérablement le comportement des usagers.



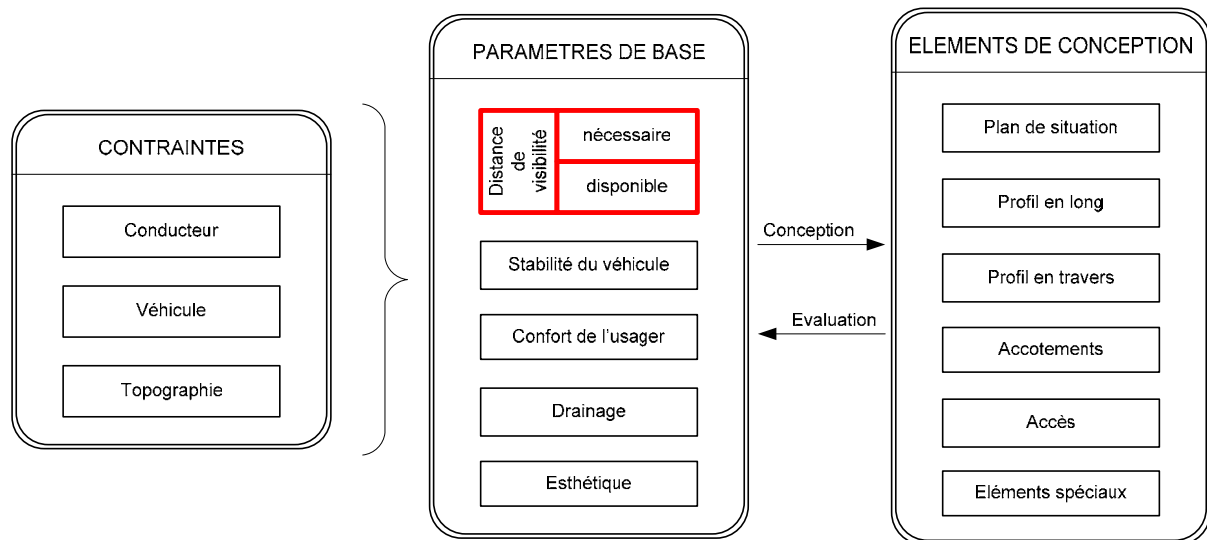
[Figure 20](#) : Exemple de cohérence le long du tracé de la route par un changement du profil en travers traité correctement [8]

- le principe de cohérence dans le temps : il s'agit de s'assurer d'une prise en compte de la sécurité routière tout au long de la procédure de réalisation d'une voie de circulation, à savoir déjà au niveau des études préliminaires et jusqu'au niveau du projet d'exécution.

La prise en compte tridimensionnelle des voies de circulation amène un effet positif pour la sécurité en agissant notamment au niveau de la visibilité (Chapitre 6.2) et de la lisibilité (Chapitre 6.3), notions qui sont plus particulièrement abordées ci-après.

## 6.2 VISIBILITÉ

La distance de visibilité est reconnue comme un des éléments clé de la conception géométrique des voies de circulation ([Figure 21](#)), influençant l'économie mais aussi la sécurité du projet routier. La notion de visibilité intervient en effet au niveau de la sécurité, dans le sens où le risque d'accidents augmente lorsque la distance de visibilité diminue.



**Figure 21** : Importance de la distance de visibilité dans la structure générale de conception des voies de circulation (selon [27])

## 6.2.1 Visibilité bidimensionnelle

Devant l'importance du paramètre de visibilité, des recherches ont été réalisées et des normes édictées, selon le principe théorique que la conception géométrique des voies de circulation doit assurer que tout objet placé sur la chaussée soit visible pour le conducteur avec la distance normale de visibilité de l'œil. Les contraintes topographiques rendant cette conception peu réaliste, les routes sont conçues de manière à fournir à l'usager une distance de visibilité minimale qui assure au moins un trafic sécuritaire et performant.

A l'heure actuelle, il est prescrit, d'une manière générale, la prise en compte d'une distance de visibilité minimale (distance de visibilité nécessaire). Comparée à la distance de visibilité disponible, elle permet de détecter les endroits qui présentent une visibilité insuffisante et de quantifier ces distances de visibilité déficientes.

**Remarque** : les chapitres relatifs au calcul de la visibilité (6.2.2 et 6.2.3) se veulent globaux. Ils se bornent aux principes généraux du calcul de la visibilité en section courante des voies de circulation. Les problèmes de visibilité rencontrés aux intersections, ou encore lors de conditions de visibilité restreintes (vision nocturne, brouillard, pluie, neige, etc...) ne sont pas traités.

### 6.2.1.1 Distance de visibilité nécessaire

La distance de visibilité nécessaire représente la distance de visibilité d'arrêt, dont le principe général est le suivant : en tout point d'une route, la distance de visibilité d'arrêt doit être suffisante pour qu'un conducteur circulant à une vitesse raisonnable ( $V_{85}$ <sup>7</sup>) soit en mesure de stopper son véhicule de manière sécuritaire avant de percuter un objet stationnaire localisé sur sa trajectoire.

Une distance de visibilité plus grande est prescrite pour les situations spéciales. Il peut s'agir de la distance de visibilité de dépassement ou de la distance de visibilité de décision.

#### a) distance de visibilité d'arrêt (*stopping sight distance*)

La distance de visibilité d'arrêt représente la somme de la distance parcourue par le véhicule durant le temps de réaction du conducteur et celle parcourue pendant le freinage mécanique du véhicule.

<sup>7</sup>  $V_{85}$  correspond à la vitesse qui n'est pas dépassée par 85 pourcent de tous les véhicules observés.

Sa détermination se fait au moyen d'un modèle de calcul analytique basé sur les lois de dynamique qui permet la mesure de la distance entre les yeux du conducteur et le point le plus haut d'un petit objet stationnaire placé sur la route.

### b) distance de visibilité de dépassement (*passing sight distance*)

La distance de visibilité de dépassement (Figure 22) représente la somme de la distance parcourue pendant le temps de perception et de réaction (*Distance 1*), celle de dépassement (*Distance 2*), la distance parcourue par le véhicule venant en sens inverse (*Distance 4*) et finalement la distance de sécurité entre ces deux véhicules à la fin de la manœuvre de dépassement (*Distance 3*).

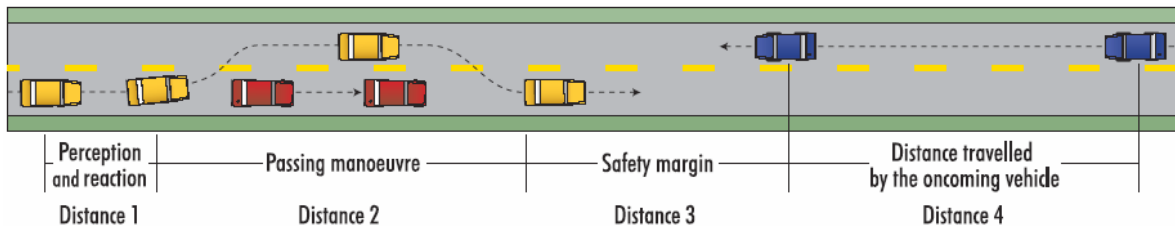


Figure 22 : Schématisation de la distance de visibilité de dépassement [3]

### c) distance de visibilité de décision (*decision sight distance*)

Lors de situations « complexes », la lecture de l'environnement routier peut être difficile et la perception de l'information peu aisée. Des manœuvres non usuelles et inattendues sont donc à prévoir, rendant la distance de visibilité d'arrêt insuffisante à garantir la sécurité du trafic. Une « réserve » dans cette distance est donc nécessaire, d'où la définition de la distance de visibilité de décision.

La distance de visibilité de décision est définie comme la distance nécessaire à un conducteur pour détecter un élément inattendu (ou difficile à percevoir) de l'environnement routier, pour choisir une vitesse et une trajectoire adaptées et amorcer la manœuvre correspondante, cela de manière sûre et efficace.

#### 6.2.1.2 Distance de visibilité disponible

La distance de visibilité disponible correspond à la distance réellement libre de tout obstacle sur le tracé d'une voie de circulation.

Dans les courbes en plan, le champ de vision de l'usager peut être obstrué par des obstacles latéraux (arbres, bâtiments, etc...). Dans les rayons verticaux convexes, le champ de vision peut être obstrué par la courbe elle-même, alors que la distance de visibilité dans les rayons verticaux concaves est limitée par la portée visuelle des phares. En outre, les « éléments supérieurs » (tunnels, ponts, portiques de signalisation, etc...) constituent une obstruction visuelle pour le trafic circulant au-dessous.

La distance de visibilité disponible doit donc être comparée à celle nécessaire (distance de visibilité d'arrêt pour toutes les voies de circulation et distances de visibilité de dépassement et de décision selon les cas particuliers) pour s'assurer d'un niveau de sécurité suffisant.

Dans un calcul bidimensionnel, la distance de visibilité disponible est déterminée en analysant séparément le plan de situation et le profil en long. La distance de visibilité disponible en courbe en plan dépend du dérasement latéral de la voie alors que celle en profil en long est fonction des paramètres de la courbe verticale (convexe ou concave). Pour chacun des espaces-plans, des modèles analytiques ont été développés.

## 6.2.2 Calcul bidimensionnel de la visibilité

D'une manière générale, la distance de visibilité intervient dans la conception des voies de circulation comme paramètre de dimensionnement pour plusieurs éléments comme les courbes en plan, les rayons verticaux convexes et concaves du profil en long, la définition partielle des abords routiers (dérasement), etc...

La notion de visibilité et la distance de visibilité qui en découle sont présentes de manière relativement similaire selon les pays. Les formulations analytiques et les paramètres considérés diffèrent toutefois selon les textes normatifs examinés.

A titre d'exemple, l'expression de la distance de visibilité d'arrêt  $S_A$ , somme du chemin parcouru par le véhicule pendant les temps de réaction physiologique et mécanique et de la distance de freinage, est la suivante :

$$S_A = \frac{V_p \cdot t}{3.6} + \frac{1}{(3.6)^2 \cdot g} \cdot \int_{V_{p1}}^{V_{p2}} \frac{V_p}{\left( f_L(V) + \frac{i}{100} + \frac{W_L}{m} \right)} dV$$

Avec

$S_A$ [m] :	distance de visibilité d'arrêt
$V_p$ [km/h] :	vitesse de projet
$V_{p1,2}$ [km/h] :	vitesse de projet au début et à la fin du freinage
$t$ [s] :	temps de réaction physiologique et mécanique
$g$ [ $m/s^2$ ] :	accélération de la pesanteur
$f_L$ [-] :	composante tangentielle du coefficient de frottement $\mu$
$i$ [%] :	déclivité moyenne de la route
$W_L$ [ $m \cdot kg/s^2$ ] :	résistance de l'air
$m$ [kg] :	masse du véhicule

Selon les pays et les textes normatifs correspondants, cette expression est simplifiée, avec la prise en compte ou non de certains paramètres et l'emploi de valeurs standard pour certains autres.

On trouve notamment dans la littérature :

- selon les normes suisse [12] :  $D_a = V \cdot t_r + \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot \left( f_L \pm \frac{i}{100} \right)}$

Avec

$D_a$ [m] :	distance d'arrêt
$V$ [m/s] :	vitesse du véhicule au début du freinage
$t_r$ [s] :	temps de réaction
$g$ [ $m/s^2$ ] :	accélération terrestre, soit 9.81 [ $m/s^2$ ]
$f_L$ [-] :	coefficient de frottement longitudinal
$i$ [%] :	déclivité (positive pour une rampe, négative pour une pente)

- selon l'AASHTO [2] :  $S_A = (0.278 \cdot t \cdot V) + \frac{V^2}{254 \cdot (f + G)}$

Avec

$S_A$ [m] :	distance de visibilité d'arrêt
$V$ [km/h] :	vitesse initiale du véhicule
$t$ [s] :	temps de perception et de réaction
$f$ [-] :	coefficient de friction entre les pneus et la chaussée
$G$ [%] :	déclivité (positive pour rampe, négative pour une pente)

- selon l'AIPCR [3] et selon que l'on considère le coefficient de frottement longitudinal ou la capacité de freinage :

$$D_a = \frac{V_i \cdot t}{3.6} + \frac{V_i^2}{254 \cdot (f_L \pm i)} \quad \text{ou} \quad D_a = \frac{V_i \cdot t}{3.6} + \frac{V_i^2}{254 \cdot \left(\frac{a}{g} \pm i\right)}$$

Avec

$D_a$  [m] : distance d'arrêt

$V_i$  [m/s] : vitesse du véhicule au début du freinage

$t$  [s] : temps de réaction, variant de 1.0 à 2.5 [s]

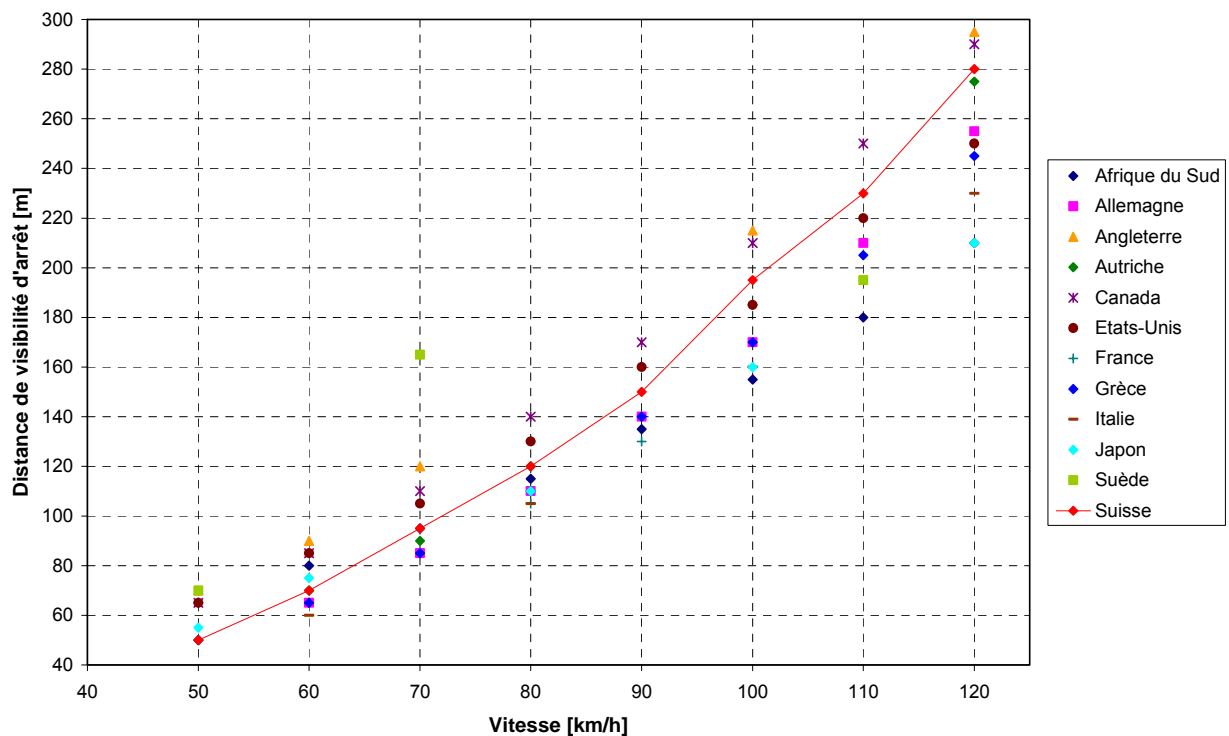
$a$  [ $m/s^2$ ] : capacité de freinage du véhicule, soit 3.4 [ $m/s^2$ ]

$g$  [ $m/s^2$ ] : accélération terrestre, soit 9.81 [ $m/s^2$ ]

$f_L$  [-] : coefficient de frottement longitudinal, variant de 0.15 à 0.5 [-]

$i$  [%] : déclivité (positive pour une rampe, négative pour une pente)

Par conséquent, et comme démontré ci-dessous (Figure 23), le résultat du calcul de la distance de visibilité d'arrêt diffère d'un pays à l'autre. Selon les valeurs des paramètres et les équations simplificatrices admises, des différences entre pays allant jusqu'à 48 [%] dans le cas extrême (avec une vitesse de 70 [km/h]) sont observables :



Distance de visibilité d'arrêt [m]	Temps de réaction [s]	Vitesse [km/h]							
		50	60	70	80	90	100	110	120
Afrique du Sud	2.5	65	80	95	115	135	155	180	210
Allemagne	2.0	-	65	85	110	140	170	210	255
Angleterre	2.0	70	90	120	-	-	215	-	295
Autriche	2.0	50	70	90	120	-	185	-	275
Canada	2.5	65	85	110	140	170	210	250	290
Etats-Unis	2.5	65	85	105	130	160	185	220	250
France	2.0	50	65	85	105	130	160	-	-
Grèce	2.0	50	65	85	110	140	170	205	245
Italie	1.2	-	60	-	105	-	160	-	230
Japon	2.5	55	75	-	110	-	160	-	210
Suède	2.0	70	-	165	-	-	-	195	-
Suisse	2.0	50	70	95	120	150	195	230	280

Figure 23 : Comparatif des distances de visibilité d'arrêt recommandées selon les normalisations nationales (selon [3]) (  = valeur minimale ;  = valeur maximale)

**Remarque** : cette différence entre normalisations ne se borne pas uniquement à la distance de visibilité nécessaire. Elle se retrouve également avec la distance de visibilité disponible, la définition des facteurs intervenant dans son calcul (principalement la hauteur de l'œil du conducteur et celle des obstacles) étant dissemblable selon le pays concerné, comme le montre le tableau suivant :

Pays	Hauteur de l'œil du conducteur [m]	Hauteur des obstacles [m]
Allemagne	1.00	de 0.00 à 0.45
Angleterre	1.05	1.05
Etats-Unis	1.13	0.15
France	1.00	0.15
Suisse	1.00	0.15

**Tableau 7** : Comparatif des éléments utilisés pour le calcul de la visibilité disponible (selon [23])

Lors de la conception, la notion de distance de visibilité est un concept intervenant espace-plan par espace-plan dans la définition des éléments composant les voies de circulation. Elle permet de fixer des valeurs minimales garantissant un trafic sécuritaire et performant. Les formules analytiques employées font recours à un certain nombre de simplifications, au niveau de la formulation de l'équation dynamique mais aussi au niveau de la valeur donnée à certains paramètres. Différentes selon la normalisation consultée, elles impliquent des résultats qui sont approximatifs et dissemblables d'un pays à l'autre.

### 6.2.3 Calcul tridimensionnel de la visibilité

Bien que la nature tridimensionnelle des voies de circulation soit reconnue, les méthodes normalisées actuelles de calcul de la visibilité traitent les alignements horizontaux et les alignements verticaux de manière séparée, dans une projection bidimensionnelle. En complément, des règles générales pour une bonne coordination entre ces éléments sont prescrites, notamment pour limiter les pertes de tracé.

*« Three-dimensional alignment, a very complex component in the highway geometric design process, still represents the weakest link in the overall design of highways »*

Smith and Lamm, 1994, [60]

#### 6.2.3.1 Historique de la visibilité 3D

En 1994, E. Sanchez étudie l'interaction entre la distance de visibilité et la combinaison tridimensionnelle des alignements [51]. Pour ce faire, il utilise une méthodologie résumable en trois points :

- modélisation de l'alignement par un réseau de triangles plans au moyen d'un logiciel.
- création par l'ordinateur d'une vue perspective puis traçage de la ligne de visibilité depuis l'œil du conducteur jusqu'à l'objet.
- détermination par l'opérateur de l'objet obstruant le champ de visibilité à partir de différentes vues générées par l'ordinateur puis calcul de la distance de visibilité au moyen d'une feuille de calcul.

Bien que cette méthode réponde pleinement aux objectifs de détermination de la distance de visibilité, elle implique un temps de traitement considérable en raison du nombre important d'éléments pris en compte pour la modélisation, mais également parce que la détermination de la distance de visibilité disponible se fait graphiquement et non analytiquement. Elle ne peut par conséquent que difficilement être utilisée pour l'établissement de normes et standards pour la conception géométrique tridimensionnelle.

Partant de ce constat, Y. Hassan développe une nouvelle méthode pour la détermination tridimensionnelle de la distance de visibilité disponible, par combinaison du plan de situation et du profil en long. Il s'agit d'une méthode par éléments finis, basée sur des éléments paramétriques courbes plutôt que les éléments planaires d'E. Sanchez. Ces éléments sont utilisés pour représenter les variations des caractéristiques de la surface de la voie de circulation et les obstructions visuelles, inclus les rampes, les courbes en plan et en profil en long, les accotements, les dévers ainsi que les obstacles latéraux et passages supérieurs.

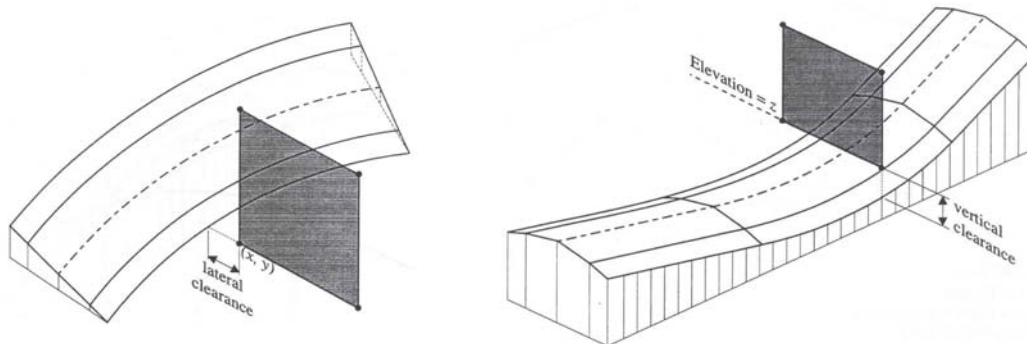


Figure 24 : Modélisation d'obstacles latéraux et passages supérieurs par éléments réguliers à quatre nœuds selon la méthode développée par Y. Hassan [27]

La distance de visibilité disponible est alors trouvée analytiquement par l'examen des intersections entre la ligne de visibilité (ligne droite) et les éléments représentant la surface de la voie de circulation ainsi que les objets obstruant la visibilité, selon la procédure itérative suivante :

- 1) modélisation de la surface de la voie de circulation et des obstacles à la visibilité par un réseau d'éléments finis.
- 2) positionnement de l'œil du conducteur au point où la distance de visibilité disponible est recherchée puis détermination des coordonnées du début de la ligne de vision.
- 3) positionnement de l'objet à une distance  $S$  en avant de l'œil du conducteur et détermination des coordonnées de la fin de la ligne de vision.
- 4) relevé de l'intersection entre la ligne de visibilité et les éléments modélisant la voie de circulation et les obstructions visuelles.
- 5) si la ligne de visibilité intercepte un élément,  $S$  est plus grand que la distance de visibilité disponible. Une itération est donc nécessaire. Il faut réduire  $S$  et répéter les opérations 3) et 4).
- 6) si la ligne de visibilité n'intercepte aucun élément,  $S$  est plus petit que la distance de visibilité disponible. Une itération est donc nécessaire. Il faut augmenter  $S$  et répéter les opérations 3) et 4).
- 7) si la ligne de visibilité est tangente à un élément,  $S$  est égal à la distance de visibilité disponible. La procédure itérative est terminée.

Par deux exemples concrets présentés dans une de ses études [27], Y. Hassan démontre sans généraliser que le modèle 2D de calcul de la visibilité ne parvient pas à prendre en compte l'effet de la pente transversale. Le modèle bidimensionnel peut, selon la géométrie, sous-estimer ou surestimer la distance de visibilité disponible et ainsi avoir d'importantes répercussions sur l'économie et la sécurité de la voie de circulation.

Y. Hassan établit par exemple que la distance de visibilité 3D dans les rayons verticaux concaves est plus faible que la valeur correspondante 2D lorsque le rayon vertical concave est combiné avec une courbe horizontale. Il démontre qu'à l'inverse, le chevauchement d'une courbe en plan avec des courbes de crêtes convexes relève des distances de visibilité 3D plus grandes que celles bidimensionnelles.



### 6.2.3.2 Visibilité dans les logiciels routiers de CAO

Certains logiciels de CAO, à l'exemple de GeoMacao, offrent comme paramètre de sortie les distances de visibilité du tracé. L'algorithme de calcul utilisé est similaire à celui utilisé pour l'analyse de la visibilité par photogrammétrie [23]. Il s'agit d'une méthode basée sur le comptage d'objets virtuels répartis à intervalles réguliers sur la route à étudier.



Figure 25 : Visualisation d'obstacles virtuels pour le calcul des distances de visibilité par photogrammétrie [23]

Les éléments de la route, des talus et de l'environnement naturel (y compris la végétation (arbres, buissons, etc...), les aménagements et les équipements tels que glissières de sécurité, murs anti-bruit, etc...) sont définis par des modèles surfaciques de terrain. Des masques sont ensuite placés tout le long du projet. Leur dimension est laissée au libre choix du concepteur qui fixe également l'intervalle de longueur entre chaque profil en travers recevant un masque. A ce stade, le concepteur n'a plus qu'à définir une hauteur de l'œil et sa trajectoire (par sens de circulation) le long du tracé. Le logiciel peut ainsi calculer les distances de visibilité disponibles en relevant depuis chaque position le nombre de masques visibles.

La méthode de calcul des distances de visibilité disponibles nécessite le respect d'un certain nombre de contraintes. Si l'on veut que les résultats fournis reflètent au mieux la réalité, il est indispensable de disposer d'un profil en travers du projet qui soit défini sur une largeur suffisamment importante pour introduire de manière complète les abords routiers. La seule définition de la voie de circulation et des accotements n'est pas suffisante. Il est également essentiel de disposer d'une modélisation du terrain assez précise et d'une densité de profils en travers recevant les masques satisfaisante. Seule une longueur d'intervalle entre masques assez petite et une grille du modèle numérique de terrain suffisamment affinée permettent de ne pas omettre « d'accidents topographiques » pouvant gêner la visibilité (colline par exemple) lors du calcul des distances de visibilité disponibles. La précision du calcul dépend donc de l'espacement des profils en travers ainsi que de la qualité et de la résolution du relevé de terrain.

### 6.2.4 Conclusions concernant la visibilité

Actuellement, un des créneaux de l'amélioration de la sécurité routière repose sur l'élimination des points noirs. Ces endroits de route dangereux sont détectés à posteriori à partir d'analyses statistiques des accidents. Le prix à payer pour la mise en évidence d'un problème de sécurité dû à une mauvaise géométrie du tracé (notamment une visibilité insuffisante) s'exprime en terme de dégâts matériels, de lésions corporelles voire de vies humaines. De plus, les améliorations aux problèmes de visibilité en section entraînent, en règle générale, la redéfinition du plan de situation et du profil en long. Pour en réduire le coût, de tels problèmes devraient être visualisés avant la mise en œuvre. Il existe certes des mesures de corrections plus douces (signalisation d'avertissement supplémentaire, élimination des obstacles latéraux, aménagements de réduction de vitesse, etc...), mais leur efficacité est moins importante.

Le calcul tridimensionnel permet de disposer d'une mesure plus « juste » des distances de visibilité disponibles. Ces valeurs, fonction de l'usager et de la géométrie de la voie de circulation ainsi que de l'environnement routier, permettent une meilleure conception des voies de circulation. La sécurité s'en voit accrue. L'économie du projet est elle aussi améliorée, car une situation « dangereuse » est plus facilement corrigible (et donc moins exigeante économiquement) à l'étape de conception plutôt qu'après réalisation du projet.

#### 6.2.4.1 Enjeu d'une approche tridimensionnelle pour la visibilité

A l'heure actuelle, des méthodes existent pour le calcul tridimensionnel des distances de visibilité disponibles (méthode des éléments finis). Elles sont cependant basées sur une méthodologie itérative qui nécessite la définition précise de la voie de circulation et de ses abords. Elles ne sont par conséquent utilisées que lors des procédures de contrôle et pas directement lors de la conception.

Certains logiciels routiers de conception assistée par ordinateur répondent à cette problématique en fournissant au concepteur des distances de visibilité disponibles le long du projet routier de manière rapide. Leur précision est cependant limitée, notamment par la définition de l'intervalle entre profils en travers.

Remarque : un des inconvénients de la méthode employée dans certains logiciels routiers de CAO par rapport à celle par éléments finis développée par Y. Hassan réside dans l'impossibilité de prendre en compte des obstacles non reliés au sol. Les logiciels du genre de GeoMacao travaillent en effet sur des modélisations surfaciques qui empêchent la prise en compte d'éléments comme un pont, un portique de signalisation ou un passage supérieur lors du calcul de la distance de visibilité.

Pour disposer d'un calcul exact, il s'agirait d'appliquer la démarche de ces logiciels, non pas à partir des profils en travers, mais directement à partir des surfaces de la route et de l'environnement routier (intégration des profils en travers le long du tracé). Reste que cette augmentation de la densité des modèles surfaciques impliquerait un temps de relevé et une quantité d'informations importante à gérer et à traiter. Or, si l'on veut améliorer la géométrie des voies de circulation déjà lors de la conception, il est primordial de pouvoir déterminer les distances de visibilité disponibles avant la connaissance des plans définitifs (donc lorsque les détails du projet ne sont pas connus en intégralité).

Le véritable enjeu du calcul tridimensionnel des distances de visibilité n'est pas de disposer de mesures précises. A quoi sert en effet de connaître avec précision une distance de visibilité disponible, alors qu'elle est à comparer à une distance de visibilité nécessaire inexacte car calculée de manière simplifiée ? Rappelons que théoriquement, la distance d'arrêt dépend de la vitesse de circulation et n'est valable qu'en un endroit donné, pour un véhicule et un usager type donnés et pour des conditions atmosphériques données. Dans la pratique, un ensemble de simplifications et de valeurs moyennes standard, souvent différentes d'un pays à l'autre, permettent le calcul « approximatif » de cette distance. Celui-ci se fait sans prise en compte explicite des conditions de circulation et de visibilité restreintes (pluie, neige, brouillard, etc...).

L'enjeu véritable de l'approche tridimensionnelle de la visibilité est donc de disposer de mesures correctes et rigoureuses qui prennent en compte l'environnement routier et la combinaison des espaces-plans. Une information quasi imparable serait ainsi disponible sur les pertes de tracé, avec notamment une indication sur les distances de disparition mais aussi les distances de réapparition.

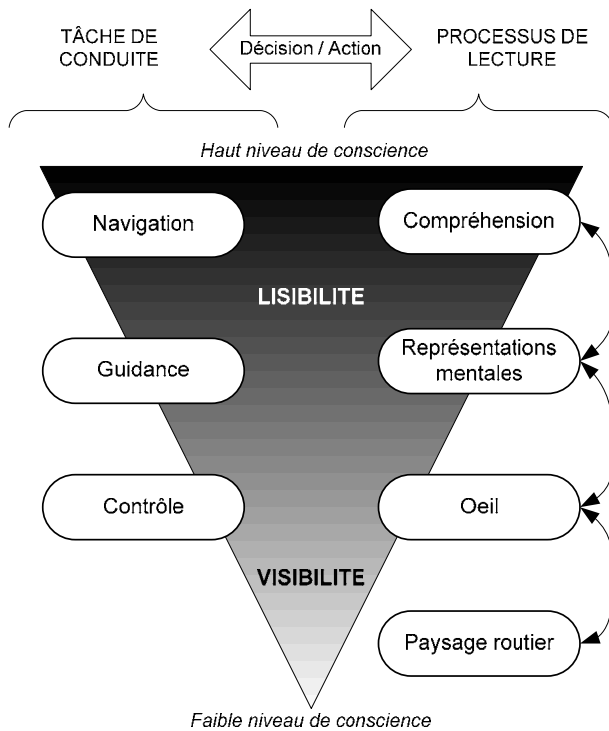
### 6.3 LISIBILITÉ

Il n'y a pas que la notion de visibilité qui influence le comportement de l'usager et par conséquent la sécurité routière, mais également celle de la lisibilité de la route.

### 6.3.1 La lisibilité comme notion complémentaire de la visibilité

Si l'on décompose la tâche de conduite, on distingue trois activités à des degrés de conscience variables (Figure 26), à savoir :

- l'activité de contrôle (niveau opérationnel) : contrôle à très court terme de la trajectoire (vitesse et direction).
- l'activité de guidance (niveau tactique) : régulation de distance et/ou de temps dans l'adaptation de la trajectoire aux contraintes spatiales telles que le tracé ou le trafic, à l'occasion des dépassements, des croisements et des franchissements d'intersections.
- la navigation (niveau stratégique) : planification du parcours, suivi, recherche et choix d'itinéraire.



A titre d'exemple, le changement d'une vitesse ou le déclenchement du clignotant (niveau opérationnel) sont des actes quasi automatiques dont le conducteur peut ne pas avoir conscience lorsqu'il les réalise. Le dépassement (niveau tactique) nécessite davantage de concentration et d'attention. De même, la planification du parcours avant et pendant la conduite ou encore le choix d'un itinéraire alternatif (niveau stratégique) sont des actes réfléchis qui nécessitent un haut degré de conscience.

Figure 26 : Activités de la tâche de conduite selon différents degrés de conscience (selon [56])

Les trois activités de navigation, guidance et contrôle constituent la tâche principale de conduite, soit le minimum nécessaire au contrôle du véhicule et au déplacement d'un point à un autre. A celle-ci vient s'ajouter une activité supplémentaire. Pour pouvoir réaliser sa conduite, l'automobiliste a besoin de prendre et de traiter des informations données par son environnement. L'automobiliste développe donc une stratégie d'exploration visuelle de la route et de son environnement afin d'y trouver les indices qui lui permettront de réaliser sa tâche de conduite de manière sécuritaire.

Cette stratégie dépend de ce que l'utilisateur pense trouver a priori dans son environnement. Il sélectionne ce qu'il a envie de voir en fonction de situations vécues pré-enregistrées. Il recherche les indices (indices formels fournis par la signalisation mais aussi indices informels prélevés sur les abords de la route et le paysage alentour) qu'il est sûr de trouver. Il ne perçoit donc pas ceux non conformes à l'idée préconçue qu'il se fait de la route.

*« Les images de l'environnement sont le résultat d'une opération de va et vient entre l'observateur et son milieu. L'environnement suggère des distinctions et des relations, et l'observateur (avec une grande capacité d'adaptation et à la lumière de ses propres objectifs) organise et charge de sens ce qu'il voit. »*

D. Lynch, 1960 [56]

Cette notion de lecture de la route et de lecture du paysage conduit à la notion de lisibilité, définie selon [56] comme suit :

« La lisibilité est la propriété d'une voie et de son environnement, de donner à tout usager, par l'ensemble de leurs éléments constitutifs, une image juste, facile et rapidement compréhensible de la nature de la voie et de son environnement, de ses utilisations, des mouvements probables ou possibles des autres usagers et du comportement que l'on attend de lui ».

Ainsi, même si la lisibilité ne peut être considérée comme porteuse de sécurité en soi <sup>8</sup>, elle prend néanmoins tout son sens dans la problématique de la sécurité routière. Un bon nombre d'accidents s'expliquent en effet par une détection tardive et une mauvaise compréhension de la situation de conduite rencontrée par l'utilisateur.

La lisibilité est donc un concept qu'il faut considérer parallèlement à la notion de visibilité si l'on veut prétendre à des routes sûres et à un comportement des usagers adapté aux caractéristiques de la voie de circulation. Outre de constituer des éléments géométriques visibles (c'est-à-dire non masqués), il s'agit donc de donner suffisamment de sens et de cohérence à la voie et à son environnement pour que l'utilisateur puisse percevoir, évaluer et anticiper les dangers potentiels inhérents à la route qu'il emprunte.

### 6.3.2 Perception de la route par l'utilisateur

L'environnement routier est un ensemble complexe regorgeant d'une quantité importante d'informations pour l'utilisateur. Celles-ci, trop nombreuses, sont filtrées, sélectionnées et condensées inconsciemment lors du processus de perception. L'utilisateur dispose alors d'une « pseudo-réalité » de la voie de circulation et de ses abords qui lui est propre.

Plusieurs facteurs ont une influence sur la perception de l'environnement routier par l'utilisateur et par conséquent sur la lisibilité. On distingue notamment les éléments suivants :

- *illusions d'optique* : des illusions d'optique peuvent conduire à une mauvaise estimation de certains paramètres géométriques ou dynamiques (la vitesse notamment). Dans de telles situations, la perception de l'utilisateur est alors différente de la « réalité », pouvant conduire à un comportement non adapté et dangereux.

La convergence de certains alignements peut conduire à une estimation incorrecte des distances. L'exemple suivant démontre bien l'impact optique de la convergence d'alignements d'arbres en bordure de route juste avant un virage.

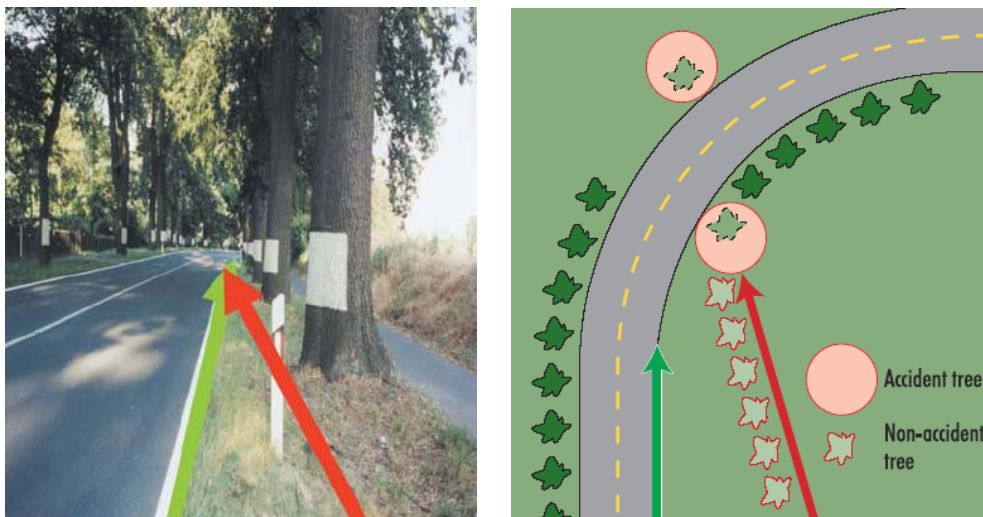


Figure 27 : Effet d'optique par convergence d'alignements d'arbres [3]

<sup>8</sup> Il arrive, par exemple lorsque le guidage visuel est excessivement confortable, que la lisibilité donne lieu à une augmentation des vitesses et du nombre d'accidents. Un confort trop apparent incite en effet à une vitesse et à des prises de risques dans les dépassements inconsidérés.

La distance jusqu'au virage est perçue plus longue qu'elle ne l'est en réalité, alors que la distance latérale jusqu'aux arbres est elle aussi surestimée. L'utilisateur parvient par conséquent plus rapidement que prévu dans le virage, ce qui peut provoquer des manœuvres dangereuses de correction de direction et de vitesse.

La combinaison d'une courbe en plan et d'un rayon vertical concave est un autre exemple d'illusion optique. Elle suggère un rayon horizontal plus grand qu'il ne l'est en réalité. L'utilisateur, qui s'attendait à devoir franchir une courbe plus grande, doit alors freiner et corriger sa trajectoire à l'entrée du virage. Dans le cas contraire (rayon vertical convexe), la situation est plus sécuritaire, le virage étant perçu plus serré qu'il ne l'est en réalité.

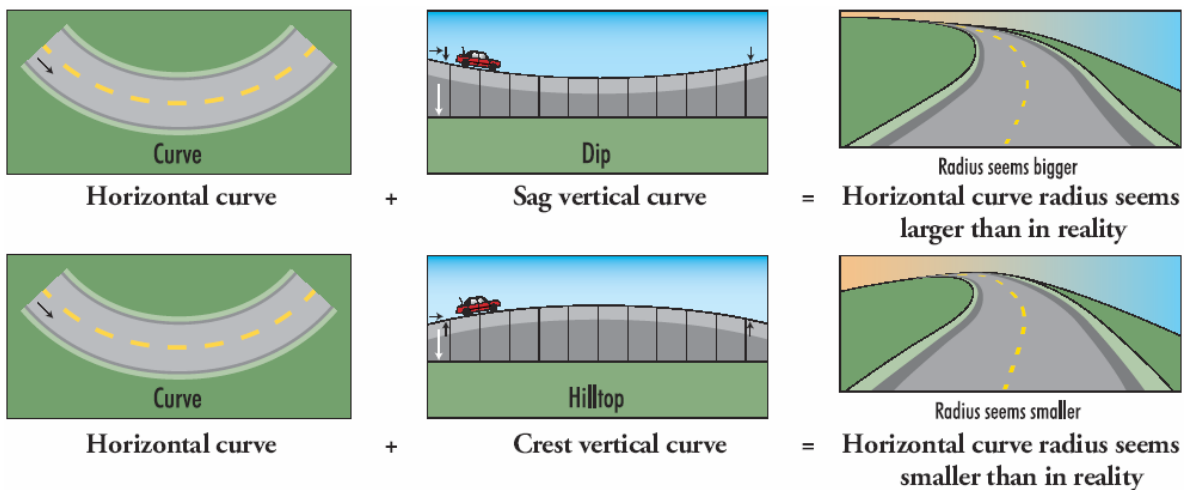


Figure 28 : Effet d'optique par combinaison de courbes en plan et du profil en long [3]

- *conditions de contraste et luminosité* : la possibilité de distinction claire entre premier plan et arrière plan est primordiale pour la bonne détection des éléments de signalisation. Une mauvaise visibilité des panneaux de signalisation réduit fortement leur capacité à diriger l'utilisateur ou prévenir un danger. La sécurité s'en ressent immédiatement.



Figure 29 : Exemple d'amélioration de la perception de panneaux de signalisation [3]

- *signaux sonores et/ou visuels* : le temps de réaction de l'utilisateur dépend de la nature du message reçu, avec un temps de réaction plus court avec les signaux sonores qu'avec les signaux visuels, et encore plus faible avec une combinaison des deux. Ainsi, un marquage au sol (bandes blanches) sonore peut être une solution efficace pour prévenir le conducteur qu'il quitte la voie. La perception du danger est rapide, permettant ainsi de diminuer le nombre d'accidents dus à des sorties de route.
- *besoins spécifiques des conducteurs d'un âge avancé* : les personnes âgées ont des temps de réaction et de décision plus grands que la moyenne. Elles possèdent de plus des capacités visuelles réduites (acuité visuelle, seuil de perception, perception des éléments non stationnaires, vue latérale diminués ; susceptibilité à l'éblouissement élevée).

De tels éléments (illusions d'optique, conditions de contraste et luminosité, signalisation et besoins spécifiques des conducteurs âgés) ont une influence directe sur la lisibilité d'une route. Ils doivent être pris en compte lors de la conception des voies de circulation si l'on veut constituer des voies performantes et sûres pour l'ensemble des usagers.

### 6.3.3 Paysage et lisibilité

La lisibilité est une notion dynamique, car elle intervient lors du déplacement de l'utilisateur. Elle est intimement liée aux caractéristiques de la voie de circulation, mais aussi au paysage (environnement direct ou plus éloigné de la route), dans le sens où les aménagements paysagers clarifient et renforcent la perception de la route dans le site. Pour autant qu'ils soient suffisamment lisibles, ils remplissent des fonctions de sécurité routière comme le signalement d'un événement routier (par exemple un carrefour), le marquage des entrées d'agglomérations ou encore l'estimation de la vitesse par le défilement des objets latéraux.

*« Le paysage joue un rôle essentiel dans la lisibilité d'une route. Il fournit une référence d'échelle, de vitesse, de type d'environnement traversé et d'orientation. Il peut de par ses caractéristiques (topographie, couverture végétale, etc ...) tant révéler un danger potentiel que le dissimuler (virage, carrefour, entrée d'agglomération, etc...) »*

Bertrand Montmollin, 2003 [38]

Selon l'environnement routier, l'utilisateur adapte un comportement différent, le paysage (de l'accotement jusqu'au lointain) participant en partie à la lecture de la route. Il est par conséquent important de pouvoir intervenir au niveau de la route mais aussi au niveau du paysage si l'on veut augmenter la lisibilité et la sécurité des voies de circulation.

La conception de mesures d'aménagement objectives nécessite une « traduction » de ce que voit le conducteur. Pour ce faire, la route doit être différenciée du paysage. Il s'agit de répondre aux deux questions distinctes suivantes : comment l'utilisateur perçoit-il la route ? Et comment l'utilisateur perçoit-il le paysage ?

La première question trouve réponse au travers du relevé des indices de perception de la route. Ceux-ci sont identifiables de manière relativement aisée et renseignent sur la manière dont le conducteur lit la route. Ils sont de type formel (Figure 30) ou informel (Figure 31).



Figure 30 : Indices de perception formels : signalisation au sol ou en bordure de route [57]



Figure 31 : Indices de perception informels : paysage alentour [57]

La réponse à la seconde question est plus complexe au vu de la grande variété de paysages rencontrés lors d'un déplacement sur un itinéraire. Une analyse du paysage dans la logique du déplacement est nécessaire.

### 6.3.3.1 Théorie de l'analyse du paysage dans la logique du déplacement

Devant la diversité des paysages, l'analyse du paysage dans la logique du déplacement ne peut se faire sans recourir à différentes échelles. Selon [19] et pour pouvoir tenir compte des différentes activités du conducteur en déplacement, il est opportun de considérer quatre échelles de lecture de la route. Ces unités de perception, emboîtées en situation de conduite, forment un tout dans lequel le regard de l'utilisateur va se poser. On trouve, de l'échelle la plus locale à l'échelle la plus étendue, l'ordonnement suivant :

- *l'échelle de la conduite*, aussi appelée *Unité de Perception de l'Infrastructure (UPI)* : il s'agit du ruban routier, de ses abords et annexes immédiats (accotements, signalisation verticale, fossés, plantations et équipements divers) dans le cadre de l'anticipation à court terme (de quelques secondes à deux ou trois dizaines de secondes au grand maximum). On y trouve les repères pour le « calage » de la trajectoire, la vitesse pratiquée et le comportement de conduite : accélération, freinage, gestion de la boîte de vitesses. C'est l'échelle de mise en alerte où la relation entre la perception, le paysage et l'attitude de conduite est la plus manifeste.
- *l'échelle hectométrique*, aussi appelée *Unité de Perception Visuelle du Conducteur (UPVC)* : il s'agit des paysages de proximité environnant la route. Ils donnent des informations sur les activités urbaines ou rurales, les intersections, les successions de virages et permettent d'anticiper des séquences de conduite de une à cinq minutes. L'UPVC est une entité spatiale définie, non pas par le paysage, mais par le champ de vision du conducteur à un moment donné. Sorte de « cuvette de visibilité », elle comprend la route et son environnement, les espaces latéraux sur quelques centaines de mètres ainsi que l'horizon frontal, restreint du fait de la situation de conduite. C'est un espace qui rythme le déplacement et qui est perçu comme un ensemble homogène par le conducteur dans la situation de déplacement.
- *l'échelle monumentale* : il s'agit des grands ensembles visuels ponctuels. Points de repères visuels et éléments remarquables sur l'itinéraire, ils structurent la perception en étant capables de capter le regard.
- *l'échelle kilométrique* : il s'agit des grands ensembles du paysage (unités et séquences paysagères) qui structurent l'axe de déplacement et ses lointains. Ils donnent une référence sur la durée prévisible du déplacement en portions d'heures.

L'automobiliste règle son processus de prise d'informations à l'échelle de la conduite (UPI). Il enregistre, sciemment ou non, de nombreux indices informels à l'échelle hectométrique (UPVC), à l'exemple de la probabilité de rencontrer des engins agricoles ou des intersections répétées. Les échelles monumentales et kilométriques renseignent quant à elles au sujet d'éléments pouvant influencer la navigation de l'automobiliste, en lui donnant des points de repères comme les monuments, le relief ou encore le type d'activité agricole.

Les différents aspects du comportement de l'utilisateur peuvent être pris en compte au travers d'allers-retours entre ces quatre échelles de perception. Des propositions d'aménagement, répondant à la fois aux objectifs de sécurité routière et de paysage, peuvent ainsi être amenées en prenant en considération ces unités de perception.

### 6.3.4 Marquage visuel pour une meilleure lisibilité

L'analyse combinée de la route et du paysage permet de relever les configurations où la qualité de la lisibilité de la route fait défaut, provoquant un comportement des usagers non adaptable et accidentogène. Une des problématiques souvent rencontrée est celle du mauvais marquage visuel des événements routiers.

Lors d'un mauvais aménagement, la perception des événements routiers se fait tardivement. L'automobiliste n'a pas le temps de se préparer à la rencontre d'une discontinuité le long de son itinéraire. Son comportement n'est par conséquent pas forcément adapté, d'où un potentiel d'accidents élevé.

#### 6.3.4.1 Problématique des entrées de localités

Un cas particulier de marquage visuel pour une meilleure lisibilité est celui de l'aménagement des entrées de localités. Sa problématique peut s'exposer de la manière suivante : aux entrées de localités, des excès de vitesse sont souvent observés. Ceux-ci sont attribuables à un mauvais comportement des automobilistes qui n'adaptent pas suffisamment tôt leur vitesse à l'entrée du village et ne respectent pas la limitation générale de 50 [km/h] en localité. Ce mauvais comportement est en partie imputable à la déresponsabilisation de l'automobiliste, mais également à un mauvais aménagement de la voie de circulation, notamment l'absence de marquage visuel de l'entrée de la localité. Rien, hormis les panneaux d'entrée de localités et de limitation de vitesse, n'indique à l'automobiliste qu'il quitte le milieu rural pour pénétrer dans une zone habitée où il devra se comporter de façon bien plus attentive vis-à-vis des autres usagers de la route.

Pour palier à ce déficit de lisibilité, une discontinuité ponctuelle, aussi appelée « porte d'entrée de localités », peut être avantageusement introduite dans l'aménagement routier.



Figure 32 : Weiteveen (Pays-Bas) : exemple d'une « porte d'entrée de localités » [6]

La « porte d'entrée de localités » permet à l'utilisateur de mieux percevoir la transition entre les zones à vitesse réduite et le reste du réseau routier, en confirmant les informations écrites fournies par le panneau donnant le nom de la localité et limitant la vitesse de 80 [km/h] à 50 [km/h]. Cette porte d'avertissement et d'accueil invite l'automobiliste à se comporter en invité respectueux des lieux. Ayant reçu suffisamment d'informations de l'environnement routier, il adoptera alors, sciemment ou non, un comportement plus adéquat et réduira sa vitesse à un niveau sécuritaire pour tous les usagers de la route qu'ils soient automobilistes, cyclistes ou piétons.

*« Pour qu'un automobiliste modère sa conduite en entrant dans un village, il faut que son regard abandonne la continuité monotone du ruban routier pour se porter sur les particularités et l'ambiance des lieux traversés. (...) Le rôle des « portes » est de signaler clairement à l'automobiliste qu'il entre dans un secteur où l'on attend de lui une grande tolérance à l'égard des autres usagers de la rue. »*

Service des routes du canton de Vaud, décembre 1999 [53]

#### 6.3.4.2 Problématique de la végétation

La pose de végétation est une solution technique astucieuse pour accentuer la présence d'une discontinuité dans le tracé, tout en limitant les nuisances visuelles par une bonne intégration à l'environnement.

Outre dans les courbes, la plantation judicieuse de haies ou de taillis permet de signaler un danger en soulignant les axes sécants avec un alignement, d'éviter l'éblouissement à l'approche d'une intersection ou encore d'indiquer l'entrée d'une agglomération.



Reste que cette solution comporte deux inconvénients : celui de l'entretien et de l'évolution de la végétation à moyen et long terme et celui du danger potentiel dû à la présence d'obstacles en bordure de route.

Si l'on veut que la végétation amène un surplus dans la lisibilité de la route, il est primordial qu'elle ne constitue aucun obstacle à la visibilité. Un programme d'entretien (débroussaillage et fauchage des abords, taille des buissons et arbustes, etc...) doit être étudié et mis en place de manière à ce que la végétation respecte en tout temps le gabarit d'espace libre. Il s'agit également d'apporter une attention particulière aux conditions diurnes, la végétation pouvant masquer l'éclairage artificiel.

La plantation d'arbres aux abords de la route ne doit pas constituer un élément aggravant la sécurité de la voie de circulation, ce d'autant plus si l'on sait qu'en 2001, près d'un quart des accidents avec tués et blessés graves hors localité sont dus à une collision avec un obstacle fixe en dehors de la chaussée<sup>9</sup>. Or, si le tronc d'un petit arbrisseau possède suffisamment d'élasticité pour ne pas constituer un véritable « mur » en cas de collision, il n'en est pas de même pour un arbre adulte. Le lieu d'implantation des végétaux doit être bien réfléchi et suffisamment éloigné de la bordure directe de la route. Dans ces conditions seulement, la plantation d'arbres peut alors être avantageuse vis-à-vis de la lisibilité, sans déprécier la sécurité et en respectant la notion de « route qui pardonne ».

### 6.3.5 Conclusions concernant la lisibilité

La notion de lisibilité postule que l'utilisateur comprend la route et son environnement, qu'il identifie rapidement la trajectoire qu'il doit suivre et qu'il anticipe aisément les événements. Il adapte ainsi sa conduite en conséquence. La lisibilité de la route est donc un facteur important de la sécurité routière sur lequel le projeteur routier peut intervenir. Il doit pour cela accorder une attention particulière à la géométrie de la voie de circulation mais aussi à son environnement (abords routiers plus ou moins immédiats).

#### 6.3.5.1 Apport d'une géométrie 3D des voies de circulation

La lisibilité de la route, et donc la perception qu'en ont les usagers, est essentielle pour la sécurité du trafic. Or, à l'heure actuelle, celle-ci est souvent considérée comme problématique post-projet. La voie de circulation est déjà réalisée lorsque l'on se soucie de cette notion. Pire encore, les problèmes de mauvaise lisibilité ne sont mis en avant qu'après l'observation d'accidents.

La prise en compte tridimensionnelle des voies de circulation, et plus particulièrement les possibilités de visualisation en découlant, permettent de considérer cette notion de lisibilité déjà au stade de l'avant-projet. Les séquences vidéo permettent une analyse dynamique de la perception de l'utilisateur. Les éventuels défauts de lisibilité peuvent ainsi être mis en avant. Les rendus photoréalistes permettent quant à eux de mettre en images les différentes variantes d'aménagement proposées. Leurs effets peuvent être évalués, ceci avant la mise en œuvre. Plusieurs gains sont réalisés, aussi bien au niveau économique qu'au niveau de la sécurité des usagers de la route (y compris les piétons et les cycles).

## 6.4 CONCLUSIONS

---

Une prise en compte tridimensionnelle des voies de circulation et de ses aspects constitue un apport pour la sécurité routière. Cela améliore, entre autres, le traitement de deux notions : la visibilité et la lisibilité.

D'une part, la visibilité traitée de manière tridimensionnelle assure la prise en compte simultanée du plan de situation et du profil en long, déjà lors de la conception. Les pertes de tracé peuvent ainsi être détectées rapidement et le tracé corrigé en conséquence.

---

<sup>9</sup> Source : Bureau suisse de prévention routière (BPA).

Cet élément est fort appréciable si l'on sait que toute perte de tracé constitue une discontinuité dans le flux d'informations relatives à la visibilité, et si l'on sait que cette discontinuité occasionne des différences de comportement de l'utilisateur importantes. Dans un tel cas, l'habitué de la route ne modifie pas sa vitesse de manière significative, mais se concentre davantage sur sa conduite. La personne qui découvre le tracé a, quant à elle, une réaction beaucoup plus marquée. Surprise, elle a un comportement imprévisible. Devant l'inhomogénéité de comportement des usagers dans une telle situation, l'insécurité de la voie de circulation augmente donc.

Des méthodes de calcul tridimensionnel de la visibilité sont connues (6.2.3). Elles devraient être intégrées dans les logiciels routiers de CAO pour que leur emploi se généralise, que ce soit lors de la conception ou lors d'audits de sécurité.

D'autre part, la prise en compte de la voie de circulation en tant qu'objet tridimensionnel intégré dans un environnement particulier permet une évaluation « pré-réalisation » de la lisibilité de la route. L'adéquation entre les caractéristiques de la voie et la perception qu'en a l'utilisateur peut être vérifiée au moyen d'images de synthèses. Les effets de variantes d'aménagement peuvent être évalués qualitativement. Le concepteur peut alors se soucier d'autres aspects que la seule définition géométrique des éléments de la route. Il peut réfléchir à la façon d'occuper l'environnement du projet pour que l'utilisateur, au travers de la perception qu'il aura de la route, adopte le comportement adéquat.

Une série de recommandations et d'exemples pratiques d'aménagement ayant prouvé leur efficacité suffirait à améliorer la sécurité routière. Des prescriptions pourraient ainsi être données, que ce soit au niveau des aménagements linéaires (le long du tracé) ou ponctuels (à l'exemple des entrées de localités), ainsi qu'au niveau du positionnement des panneaux de signalisation. Pour ce faire, les résultats de la recherche concernant la sécurité routière et la notion de lisibilité en rapport avec le paysage [38] pourraient notamment s'avérer décisifs.

Grâce à la combinaison d'une visibilité tridimensionnelle et d'une prise en compte de la notion de lisibilité, les nouveaux tracés bénéficieraient d'une meilleure qualité géométrique. Les pertes de tracé et les situations rendues dangereuses par un aménagement en bordure de route non approprié seraient éliminées déjà au niveau du projet.

Par la même occasion, cela permettrait de faciliter la vérification de l'existant. La détection de zones potentiellement dangereuses par manque de visibilité pourrait se faire avant même le relevé de points noirs. Les protections actives<sup>10</sup> (géométrie et signalisation notamment) pourraient être optimisées, sans attendre l'observation d'un nombre élevé d'accidents.

---

<sup>10</sup> Les protections actives sont définies, conformément à la Norme SN 640 565 [91], comme les mesures préventives visant à empêcher les sorties de route, éviter les accidents de la chaussée et les collisions.

## 7 VISUALISATION TRIDIMENSIONNELLE

Un des potentiels de la géométrie tridimensionnelle des voies de circulation consiste en la représentation du projet, non pas au moyen des traditionnels plan de situation, profil en long et profils en travers, mais au moyen d'une agrégation de ces trois espaces-plans : le rendu 3D. La visualisation tridimensionnelle est un support fort appréciable, avec plusieurs atouts et potentialités selon le degré de précision et le soin apporté aux détails :

- une maquette 3D (vue axonométrique) permet de retranscrire la démarche mentale par laquelle tout concepteur routier reconstitue une perspective 3D. Le projet n'est alors plus disponible uniquement aux personnes capables d'un tel travail de visualisation mentale.
- un rendu photoréaliste (avec intégration de l'environnement routier) permet de mieux apprécier les différents impacts du projet.
- une séquence vidéo permet la simulation de points de vue différents. Selon le chemin de la caméra prédéfini, le point de vue de l'utilisateur ou du riverain peut être simulé.

Globalement, la visualisation tridimensionnelle permet une meilleure réflexion au niveau du plan de contraintes. Toutes les contraintes, qu'elles soient urbanistiques, géographiques, techniques, fonctionnelles, d'usage ou de protection de l'environnement peuvent être visualisées. Les nuisances sonores et visuelles (intégration dans le site) peuvent alors être intégrées dans la réflexion déjà lors de la génération de variantes. La qualité de celles-ci n'en sera que meilleure.

### 7.1 CONVAINCRE PAR L'IMAGE 3D

La majeure partie, voire l'ensemble des considérations traitées jusqu'à présent, s'adressent à des professionnels de la route ou tout au moins à des individus ayant des connaissances de base au sujet du vocabulaire technique et des standards routiers. La transmission d'informations concernant le projet routier à ces personnes peut se faire en se bornant aux éléments purement techniques (plans d'exécutions par exemple). Lorsqu'il s'agit de présenter le projet à la « population locale »<sup>11</sup>, la problématique est différente. Il devient primordial dans ce cas de présenter, non pas un projet techniquement conforme, mais un projet qui soit avant tout facilement compréhensible, réaliste et actuel. Le riverain doit être à même, à partir de l'information qui lui est fournie, de replacer le projet dans l'environnement qu'il connaît. Ce n'est qu'à cette condition qu'il pourra, par lui-même, se rendre compte et apprécier les conséquences engrangées.

La transparence et le réalisme apportés par le rendu 3D d'un projet permettent de limiter les futures oppositions. Bien plus que n'importe quelle présentation technique, l'image de synthèse constitue le meilleur des dialogues entre professionnels et non professionnels. Elle limite au maximum les interprétations ou incompréhensions multiples générant souvent le refus d'un projet. La visualisation 3D, avec l'ajout de couleurs et textures ainsi que la représentation des abords routiers incluant les aménagements (plantations, signalisation, etc...) prend tout son sens. Elle joue un rôle primordial dans la diffusion d'informations et dans l'acceptation des projets.

*« Visualization not only provides a better understanding of transportation projects, but also represents an important means to effectively communicate the information to management and the public ».*

M. Easa & T. R. Strauss & Y. Hassan & R. R. Souleyrette, 2002 [14]

<sup>11</sup> Le terme de « population locale » est pris au sens large, en incluant l'ensemble des personnes touchées (directement ou indirectement) par le projet et constituant les opposants potentiels à la réalisation.

## 7.2 LIBERTÉS OFFERTES PAR LE RENDU 3D

Plus puissante que la photographie, l'informatique permet une multitude de choix quant à la focale et une liberté quasi illimitée quant à la position de prise de vue lors du rendu tridimensionnel d'un projet<sup>12</sup>. Le projeteur définit librement l'objectif en travaillant sur la focale. Il décide également de la position (position relative et hauteur par rapport à la voie de circulation) de l'œil de la caméra et de celle de la cible. Chacun de ses choix influence la perception du rendu.

### 7.2.1 Focale

Le choix de la focale influence sur la profondeur de champ et la perception de la distance entre des éléments éloignés. Plus la longueur de focale est élevée, plus le champ de vision est restreint et plus l'avant plan, le plan du milieu et l'arrière plan semblent rapprochés. L'exemple suivant (Figure 33) illustre bien cet effet optique, avec pour exactement la même prise de vue, des focales de 28 [mm] (à gauche), de 35 [mm] (au centre) et de 50 [mm] (à droite).

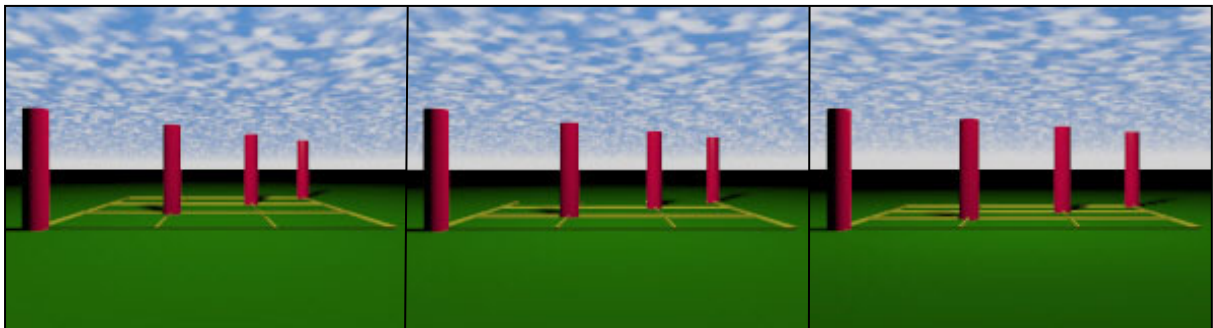


Figure 33 : Effet optique de rapprochement des objets éloignés par un changement de focale  
 [Source : [http://3d.faws.org/tuts/focale/index\\_fr.php](http://3d.faws.org/tuts/focale/index_fr.php)]

Les possibilités de visualisation offertes dans les logiciels routiers de conception assistée par ordinateur laissent le concepteur totalement libre quant au choix de la focale, avec l'avantage que le rendu 3D ne nécessite pas de mise au point. La profondeur de champ, qui correspond à l'espace de la prise de vue qui est nette, n'est pas limitée. Contrairement à la photographie, la zone rapprochée et la zone éloignée du « sujet » ne sont pas floues.

Le concepteur peut « jouer » avec la longueur de focale et ainsi influencer la perception des distances entre objets avec son rendu 3D. En plaçant un bâtiment au premier plan et en employant une petite focale, il peut notamment donner l'impression qu'un carrefour est plus éloigné qu'il ne l'est en réalité. Avec ce grand angle, l'intersection paraît plus petite. Le riverain a l'impression qu'elle est très éloignée et qu'elle ne lui apportera pas de nuisances directes. Le projet routier, faussement représenté, n'en est que plus facilement accepté par la population locale.

### 7.2.2 Position de prise de vue

Le choix de la position de prise de vue n'est soumis à aucune contrainte dans le rendu 3D. L'opérateur peut librement choisir un point de vue à la hauteur du sol ou à l'inverse à une hauteur très importante pour un rendu aérien, cela sans se soucier des moyens physiques permettant de se rendre au lieu de la prise de vue. Le concepteur peut délibérément accentuer ou minimiser l'importance et la taille de certains éléments, selon qu'ils représentent un sujet d'oppositions potentielles.

<sup>12</sup> On entend ici par « visualisation tridimensionnelle » ou « rendu 3D » toute reconstitution d'une situation par le biais d'images numériques virtuelles fixes ou animées, qu'il s'agisse de maquettes avec ou sans texture, de photoréalisme ou encore d'animations.

Le rendu 3D, selon les positions de prise de vue choisies, peut notamment influencer l'appréciation de la qualité de l'intégration d'un projet dans le site, comme le démontre l'exemple suivant (Figure 34) avec, pour une même focale et un même point de visée, des hauteurs de prise de vue de 15 [m] (en haut) et de 250 [m].

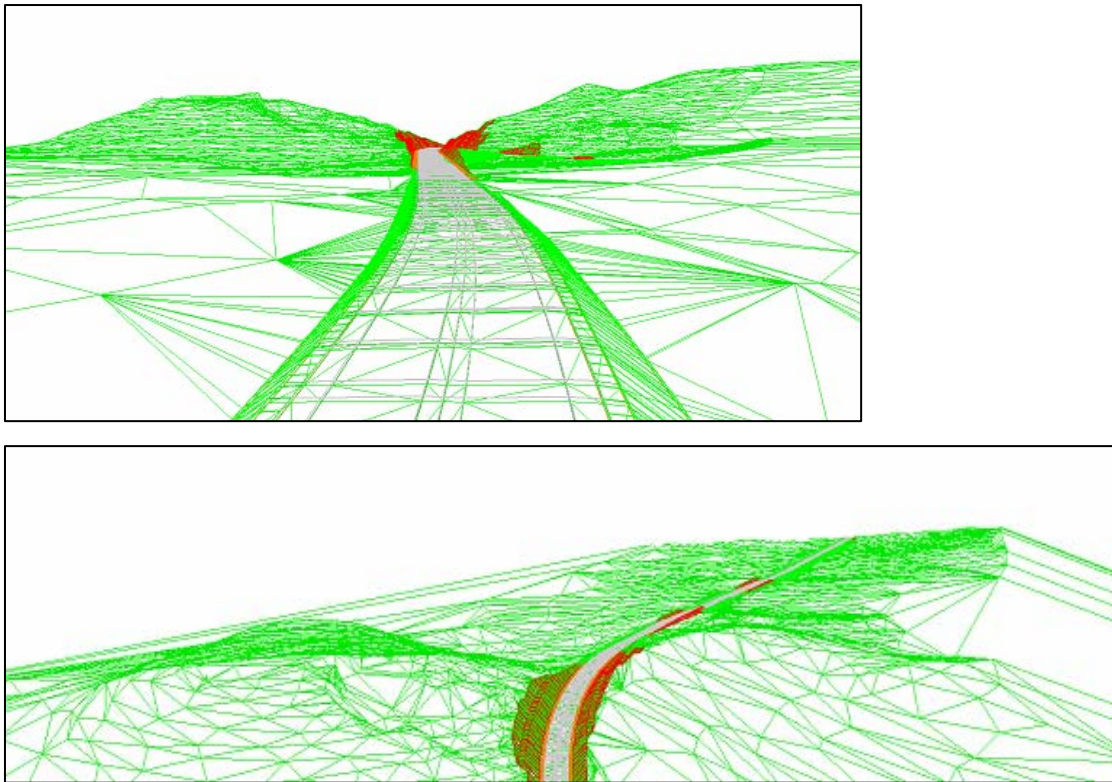


Figure 34 : Influence optique de la hauteur de prise de vue

Alors, qu'une tranchée ouverte peut paraître imposante avec une prise de vue à 15 mètres du sol, elle l'est tout de suite moins avec une hauteur de prise de vue à 250 mètres. A cette distance, l'impact de la route sur le paysage semble relativement faible, le tracé semblant suivre la topographie du terrain.

## 7.3 CONCLUSIONS

La visualisation 3D des aménagements ou projets routiers représente un formidable support à exploiter pour une meilleure réflexion, une meilleure conception, une meilleure décision et une meilleure communication autour du projet. Elle assiste l'opérateur dans ses tâches de conception. Elle lui permet de simuler contraintes et variantes de tracé ainsi que différentes variantes d'aménagement (carrefours, traitement des talus, entrées de localités, etc...). Elle offre de plus une possibilité de consultation du projet par le public et les autres parties intéressées (professionnelles ou non) et facilite ainsi la compréhension et la concertation.

### 7.3.1 Ethique de la visualisation tridimensionnelle

Les outils informatiques offrent de bien plus grandes possibilités que la photographie au niveau du rendu 3D. En plus d'offrir une liberté quasi complète en ce qui concerne le choix de la focale et de la position de prise de vue, les images de synthèse permettent à l'opérateur de retoucher et d'amener aisément de petites corrections et modifications de l'existant, sans que cela soit directement remarqué. Cette grande marge de manœuvre peut être appréciable car elle facilite certaines situations. Plus besoin par exemple de placer un échafaudage au milieu de la voie de circulation pour se rendre compte de la perception de la route à 2 mètres de hauteur.

Cependant, cette grande liberté peut être « dangereuse » de part les biais et trucages pouvant être apportés à la réalité, de manière volontaire ou non. Par conséquent, et bien que les rendus 3D soient rigoureux car basés sur une modélisation précise de la voie de circulation et du terrain, ceux-ci peuvent ne pas être réalistes. Si le concepteur du rendu fait preuve de mauvaise foi, il peut dissimuler ou accentuer à outrance certains aspects du projet, à l'insu des personnes concernées. Son travail n'est alors plus un outil de représentation de la réalité, mais un outil de propagande. Certes, il est évident qu'un des rôles du rendu 3D est de convaincre la population et les groupes d'intérêts divers pour lever les futures oppositions. Il n'est demeuré pas moins que l'image de synthèse se doit de rester une « représentation réelle » d'un futur projet, et qu'une certaine éthique doit être respectée. A l'heure actuelle, aucun texte normatif ne prescrit de règles particulières concernant l'éthique de la visualisation tridimensionnelle. Au niveau suisse, des prescriptions sur la présentation des projets sont données dans la Norme SN 640 033 [73], mais les représentations tridimensionnelles ainsi que les photomontages, les maquettes et les simulations ne sont pas traités spécialement.

Devant le développement rapide des possibilités de visualisation des logiciels routiers, il semble fort avantageux de combler cette lacune grâce à certaines prescriptions définissant les conditions de « rendus 3D standard ». Par conséquent, des rendus 3D avec un angle de vue correspondant à celui de l'œil humain, soit une focale de 50 [mm], sont à recommander. Parallèlement, une hauteur de prise de vue correspondant à la hauteur de l'œil de l'utilisateur est à préconiser lorsqu'il s'agit de présenter le point de vue du conducteur.

Remarque : la hauteur de l'œil de l'utilisateur n'étant pas identique d'un pays à l'autre mais néanmoins relativement proche (Tableau 7), il semble opportun de fixer cette hauteur de prise de vue à une valeur arrondie, soit un mètre au dessus de la voie de circulation.

Il est évident que d'autres rendus 3D « statiques » (images instantanées) ou animés (vidéos suivant une trajectoire définies par le concepteur routier), doivent pouvoir être réalisés, à l'exemple d'une vue depuis le 2<sup>ème</sup> étage des habitations à proximité de la route, d'une vue aérienne, d'une vue globale 360°, ou encore d'une vidéo simulant la trajectoire d'un véhicule en transit ou celle d'un riverain retournant à son domicile. L'important réside alors dans le fait que, parmi le panel des images de synthèse présentées, figurent au moins les « rendus 3D standard ».

## 8 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

### 8.1 EVOLUTION DES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude des projets routiers se déroule depuis toujours selon un découpage parfaitement défini qui donne lieu à l'étude successive des trois aspects du tracé que sont le plan de situation, le profil en long et le profil en travers. Pris indépendamment, ces trois espaces-plans étroitement liés sont faciles d'accès. Le problème devient plus ardu si on les traite simultanément. Pourtant, une vision globale en trois dimensions est nécessaire pour certains paramètres comme la visibilité, la lisibilité ou encore l'intégration dans le site. Ce sont des caractéristiques fondamentales de tout tracé routier dont dépendront la sécurité, la viabilité et la qualité d'une route. La maîtrise de ces questions d'interaction d'espaces-plans est donc indispensable pour une bonne conception, mais aussi pour un bon contrôle de l'état existant, par exemple lors d'audits de sécurité. Partant de ce constat, un projet de recherche au sujet de la géométrie tridimensionnelle des voies de circulation débute en novembre 1998, sous l'impulsion de F. Rolland.

Depuis, les paradigmes sociétaux ont encore évolués, notamment dans le domaine de l'acceptation des infrastructures de transport et dans la prise en compte d'aspects de plus en plus éloignés de la technique. La problématique de la conception des voies de circulation s'est compliquée, avec la nécessité de prendre en compte de nouvelles contraintes environnementales et socio-politiques et la nécessité d'une plus grande rapidité de traitement.

L'avènement et le développement des outils informatiques d'aide à la conception ont permis de répondre en partie à ces besoins. Ils permettent un gain de temps et une productivité accrue, ainsi qu'une visualisation tridimensionnelle des projets, formidable outil de communication avec les professionnels et le public. Néanmoins, des lacunes subsistent, car la démarche sur laquelle sont basés les logiciels est identique à celle précédemment utilisée lors de la conception manuelle. Les délais de traitement sont plus courts, mais la forme est restée la même, à savoir une méthodologie classique de conception par espaces-plans successifs. Les aspects qui n'étaient pas ou mal traités auparavant le sont toujours, avec pour conséquence des tracés conçus de manière non optimale par rapport à certains aspects.

Idéalement, la conception géométrique des voies de circulation devrait se faire directement en trois dimensions, à partir de normes et paramètres de conception tridimensionnels. Ce processus simultané permettrait d'étudier la route en tant qu'élément tridimensionnel et non pas comme une agrégation de trois espaces-plans. Certes idéale, cette méthodologie poserait quelques problèmes à l'emploi. Le travail exclusif en trois dimensions n'est que difficilement accessible, même pour les professionnels. De plus, il ne peut servir de support pour la transmission d'informations lors des étapes de réalisation. Cette solution ne semble donc pas optimale pour répondre aux réels besoins subsistant après les progrès amenés par les logiciels routiers de CAO. Devant la problématique persistante de non traitement tridimensionnel des voies de circulation, des corrections doivent être apportées là où des besoins réels sont présents et où de véritables bénéfices peuvent être amenés.

Ainsi, les objectifs fixés en 1998 sont quelque peu modifiés de manière à s'adapter à l'évolution du contexte. Ce travail de recherche vise alors la prospection et l'étude théorique de méthodes et principes de base permettant une meilleure maîtrise spatiale du tracé. Sans révolutionner totalement la conception routière, il apporte un cahier des charges des logiciels routiers de CAO, qui intégreraient un meilleur traitement tridimensionnel du tracé. Il fixe ainsi les règles d'étude globale permettant une meilleure efficacité du traitement des problèmes spatiaux. Ce travail de recherche apporte également les premiers éléments pour la prise en compte d'aspects jusqu'alors négligés ou mal considérés et fournit les premiers éléments de révision, voire d'ajout, dans la normalisation.

## 8.2 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

---

Malgré les possibilités de pseudo-traitement tridimensionnel apportées par l'interactivité multiplan de certains logiciels, les outils routiers de conception assistée par ordinateur demeurent basés sur une méthodologie classique par espaces-plans successifs. Celle-ci intègre des normes dont les notions et les paramètres déterminants sont le plus souvent unidirectionnels, parfois bidirectionnels mais jamais tridimensionnels. De plus, lors de la conception, des notions comme la lisibilité ou l'intégration dans le site demeurent des étapes de post-traitement, alors que des paramètres comme la distance de visibilité, non considérés tridimensionnellement, sont pris en compte de manière approximative, voire erronée. La situation n'est donc pas satisfaisante pour traiter de manière directe et complète l'aspect tridimensionnel des voies de circulation.

Pour tenter de remédier à ces manquements, une série de prescriptions sont recherchées. Celles-ci sont plus pratiques que théoriques, dans le sens où elles se focalisent sur les progrès pouvant être amenés par une amélioration des fonctionnalités des logiciels routiers de conception assistée par ordinateur, avec une prise en compte tridimensionnelle de notions qui étaient soit absentes, soit traitées de manière incomplète jusqu'alors.

Remarque : la recherche s'est écartée de l'objectif initial d'établissement de règles d'étude globale des secteurs à géométrie sensible (routes de montagnes et lacets, gabarits d'espace libre, transports exceptionnels, accès aux parkings dénivelés, carrefours en déclivité et giratoires non plans). Il semble en effet peu efficace de vouloir établir des règles précises de traitement tridimensionnel pour de tels secteurs, car elles n'auraient qu'un effet limité sur la conception générale.

Certes, une analyse en trois dimensions pourrait être avantageuse par exemple dans la définition des gabarits d'espace libre, mais au vu des simplifications intervenant dans la définition du tracé routier, son efficacité est sujette à caution. Il n'existe pas de modèle mathématique rigoureux pour la modélisation du comportement réel et exact des véhicules (notamment en ce qui concerne les amortissements).

Dès lors, à quoi sert-il de développer des théories précises si la modélisation et les bases sur lesquelles on travaille sont fortement simplifiées ? En ce qui concerne les secteurs à géométrie sensible, les efforts nécessaires à une définition géométrique tridimensionnelle sont donc considérés ici comme disproportionnés par rapport aux bénéfices qui pourraient être engendrés.

### 8.2.1 Récapitulatif des recommandations

L'ensemble des recommandations proposées, une fois regroupées, constituent une sorte de « cahier des charges » pour les logiciels routiers de conception assistée par ordinateur (Tableau 8).

Sans révolutionner totalement la conception routière ou recourir à un processus de conception simultanée, le cahier des charges des logiciels routiers de CAO réalisé au sein de cette étude permet de mieux appréhender la conception, mais aussi le contrôle des voies de circulation. Leur qualité s'en voit globalement améliorée, avec pour bénéfice une sécurité routière accrue.



Cahier des charges des logiciels routiers de CAO	Bénéfices apportés
Auto-paramétrisation des valeurs limites des éléments du tracé selon la norme choisie par le concepteur, avec possibilités de personnalisation	Gain de temps lors de la conception
Auto-paramétrisation des couleurs des plans (y compris la vue axonométrique) selon la norme retenue par le projeteur	Meilleure compréhension et homogénéisation des projets
Visualisation des contraintes dans le plan servant à la conception	Meilleure adéquation des variantes face aux diverses contraintes
Lien dynamique entre le plan de situation, le profil en long, le profil en travers et la vue 3D	Gain de temps lors de la conception Travail de conception en trois dimensions
Catalogue de profils types et de valeurs des éléments par défaut	Visualisation 3D de la route dès les premières étapes de conception
Prévisualisation 3D rapide du projet dans son environnement (avec intégration d'un modèle numérique de terrain suffisamment précis)	Contrôle de l'impact visuel et de l'intégration du projet dans le site dès les premières étapes de conception
Possibilités d'habillages rapides de la maquette 3D pour simulation des points de vue de l'utilisateur et du riverain	Aide à la conception Outil de communication
Ethique de la visualisation 3D, avec au moins un « rendu 3D standard », avec une focale de 50 [mm] et une hauteur de prise de vue de 1 [m]	Réalisme des rendus 3D
Simulation du projet et de son environnement (y inclus les aménagements routiers) le long du tracé pour évaluer la lisibilité de la route	Evaluation de plusieurs variantes d'aménagement avant la réalisation Détection de situations existantes « dangereuses » avant le relevé d'accidents et évaluation des possibilités de correction
Calcul tridimensionnel des distances de visibilité, avec prise en compte des abords routiers et des obstacles visuels (ponts, tunnels, signalisation, etc...)	Détection rigoureuse des pertes de tracé
Schéma itinéraire étoffé comme paramètre de sortie, avec en plus des données standard, un diagramme des vitesses de sécurité et un comparatif entre distances de visibilité nécessaires et distances de visibilité disponibles tridimensionnelles le long du tracé	Contrôle de l'homogénéité des vitesses et optimisation de l'implantation de la signalisation Détection des pertes de tracé, avec indication des distances de disparition et de réapparition lors de la conception ou lors d'audits de sécurité

Tableau 8 : Cahier des charges des logiciels routiers de CAO

### 8.2.2 Modifications et ajouts dans la normalisation

L'efficacité des prescriptions proposées dans ce travail de recherche, principalement un cahier des charges des logiciels routiers de conception assistée par ordinateur (Tableau 8), dépend de l'intégration de celles-ci dans les textes normatifs. Certaines modifications, voire d'éventuels suppléments, sont donc à préconiser.

Au niveau suisse, des corrections et des ajouts sont à recommander, notamment dans la Norme suisse SN 640 033 [73]. Son objet (Article A.2) est à reconsidérer pour que les représentations en trois dimensions ainsi que les photomontages, les maquettes et les simulations informatiques soient traités spécifiquement.

Sans forcément obliger à un quelconque rendu tridimensionnel, il s'agit d'édicter des règles précises dans le cas où ces formes de plans seraient choisies, notamment pour les relations publiques (Article 6). Il s'agit de préciser les couleurs des éléments de la vue axonométrique. Celles-ci devraient être semblables à celles utilisées dans les autres espaces-plans (plan de situation, profils en long et en travers), ceci pour une homogénéisation des rendus et une meilleure compréhension des projets. Il s'agit également d'exiger au moins un « rendu 3D standard » (avec une focale de 50 [mm] et une hauteur de prise de vue de 1.00 [m]) dans le cas de rendus 3D avec intégration dans le site et autres photomontages et simulations.

La notion de **vitesse pour l'analyse de risque**, définie comme la vitesse théorique atteinte par un véhicule dont le conducteur ne respecte pas la législation et circule sur la base d'une appréciation subjective des conditions locales, devrait être introduite dans la Norme SN 640 080b [75]. Très proche de la vitesse de projet, à la différence près que la vitesse maximale n'est pas la vitesse légale mais celle « choisie » par l'utilisateur selon la perception qu'il a de la voie de circulation et de son environnement, cette vitesse pour l'analyse de risque permettrait d'établir un diagramme des vitesses le long du tracé plus réaliste.

Les Normes suisses SN 640 090b [76] et SN 640 110 [79] devraient, quant à elles, être remaniées pour que la **visibilité** ne soit plus une agrégation sur plusieurs espaces-plans (visibilité en plan dans les virages, visibilité dans les raccordements convexes et concaves), mais bien une notion tridimensionnelle.

Des méthodes de calcul tridimensionnel de la visibilité sont connues (6.2.3), mais ne sont pas directement applicables pour la conception, car elles sont itératives et nécessitent la connaissance du tracé. Intégrées aux logiciels routiers de CAO, elles permettent un contrôle de la visibilité tridimensionnelle post-conception. Pour parvenir à une conception intégrant une visibilité qui ne soit plus unidimensionnelle, la mise en place d'abaques pourrait être envisagée, un premier dans le cas de dépassement autorisé, un second dans le cas contraire. Son abscisse représenterait le rayon vertical du profil en long (positif pour un rayon concave, négatif pour un rayon convexe), et son ordonnée la courbe en plan. Des courbes satisfaisant au critère de visibilité sur ces deux espaces-plans seraient alors indiquées, pour plusieurs vitesses de projet. Ces abaques permettraient ainsi une conception des tracés routiers prenant en compte l'interaction entre le plan de situation et le profil en long au niveau de la visibilité. Le contrôle tridimensionnel de la visibilité, effectué au moyen d'un logiciel routier de CAO une fois la première ébauche du tracé imaginée, permettrait finalement de vérifier et d'optimiser le traitement des abords routiers.

La prise en compte de la **lisibilité** est un élément essentiel de la sécurité routière. Par conséquent, cette notion doit être développée pour permettre notamment de fixer des recommandations et pour donner aux ingénieurs routiers une palette de solutions d'aménagements capables d'assurer une meilleure adéquation entre le comportement de l'utilisateur et les caractéristiques de la voie de circulation, de ses abords et du paysage. La conception de nouveaux tracés, voire même la correction de situations problématiques sur le réseau existant, seraient améliorées. De plus, l'analyse de la lisibilité pourrait être avantageusement associée aux possibilités de représentation tridimensionnelle des routes projetées ou existantes pour une simulation des conditions normales, mais aussi des conditions nocturnes, hivernales ou encore pluvieuses. La sécurité routière serait améliorée, y compris lors de conditions « extrêmes ».

Dans l'optique d'une normalisation concernant la lisibilité de la route, les résultats du mandat de recherche VSS 2003/602 [38] seront pertinents. Fournissant notamment une palette de mesures paysagères types capables d'améliorer la lisibilité des routes tout en tenant compte des paramètres de sécurité liés aux obstacles latéraux, ils permettront de satisfaire au principe « win – win » qui veut que l'ensemble des usagers (automobilistes, cyclistes ou piétons) soient bénéficiaires d'un aménagement. A titre d'exemple, l'implantation d'un giratoire sera préférée à celle d'un gendarme couché pour la modération du trafic à l'entrée d'une zone urbaine. On évitera ainsi une augmentation inconsidérée du bruit, tout en assurant une sécurité des piétons et un confort des automobilistes satisfaisants.

Il est important pour une bonne lisibilité qu'une certaine continuité des caractéristiques des routes soit présente sur un tracé. Les prescriptions concernant une géométrie tridimensionnelle des voies de circulation devraient être appliquées sans tenir compte des frontières administratives communales, cantonales, voire nationales. Un travail d'homogénéisation est donc nécessaire, notamment entre les pays européens limitrophes, d'autant plus aujourd'hui avec une Europe considérée comme un pays à part entière et non plus une agrégation de plusieurs pays indépendants.

De manière synthétique, les changements et ajouts à apporter dans la normalisation sont les suivants :

Norme concernée	Modifications
SN 640 033	Règles de présentation des rendus 3D <ul style="list-style-type: none"><li>- couleurs</li><li>- rendu 3D standard avec focale de 50 [mm] et hauteur de prise de vue de 1.00 [m]</li></ul>
SN 640 080b	Introduction de la notion de vitesse pour l'analyse de risque
SN 640 090b	Introduction d'une visibilité tridimensionnelle
Nouvelle norme	Introduction de la notion de lisibilité <ul style="list-style-type: none"><li>- palette de mesures paysagères type</li></ul>

Tableau 9 : Prescriptions concernant l'adaptation des normes suisses

### 8.2.3 Perspectives d'avenir

La prise en compte d'une géométrie tridimensionnelle des voies de circulation, et plus spécialement l'emploi de logiciels routiers de CAO adaptés, apporte un bénéfice au niveau de la qualité des tracés, qu'il s'agisse de nouvelles routes ou d'assainissement de l'existant. Les nouveaux tracés bénéficient d'une meilleure conception et d'une meilleure représentation auprès du public. Quant aux tracés existants, ils peuvent être corrigés et améliorés là où la situation est jugée dangereuse, cela avant même la détection de points noirs, soit au niveau d'une sécurité pro-active. Globalement, les bénéfices apportés s'évaluent en termes financiers, mais aussi de vies humaines, pour une sécurité routière améliorée. La géométrie tridimensionnelle des voies de circulation s'inscrit donc parfaitement dans l'objectif de la Confédération helvétique qui, grâce à une politique active en matière de sécurité routière (rapport « VESIPO » [4]), veut influencer massivement les accidents sur les routes et abaisser fortement le nombre d'automobilistes décédés ou gravement blessés. Dans un tel contexte, les résultats de ce mandat de recherche devraient donc être mis en application et développés plus en détail.

Lausanne, le 18 août 2004

Frédérique Huguenin



## 9 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bon nombre d'ouvrages littéraires ont influencé de près ou de loin ce rapport. Les parties d'ouvrages directement reprises (texte et/ou images intégrées sans modifications) sont référencées dans le texte avec un chiffre entre crochets. Les autres sources citées répondent à un besoin de documentation générale autour du sujet de la géométrie tridimensionnelle des voies de circulation.

- [1] AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, «*AASHTO Green Book - A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*», Second Printing, Washington D. C. 20001, 2001
- [2] AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, «*Design guide*», 1994
- [3] AIPCR - Association mondiale de la route, «*Road Safety Manual*», PIARC Technical Committee on Road Safety (C13), 2003
- [4] BPA – Bureau Suisse de prévention des accidents, «*VESIPO – Elaboration des fondements d'une politique nationale de sécurité routière : Rapport final*», Mandat de recherche ASTRA 2000/447 sur demande de l'OFROU, DETEC – Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, OFROU – Office fédéral des routes, Berne, mai 2002
- [5] BMV - Bundesministerium für Verkehr, «*Roads in Germany*», 1st Edition, Robert-Schuman-Platz 1, D - 53175 Bonn, 1994, pp. 42-43 & 46
- [6] BONAMONI L., «*Le temps des rues : Vers un nouvel aménagement de l'espace rue*», Institut de Recherche sur l'Environnement Construit (IREC) & Groupe-Conseil Romand pour la modération de la circulation (GCR), Lausanne, janvier 1990
- [7] BURKART R. & SOEHNGEN B. & SCHULZ B., «*Computer imaging for Transportation Projects*», Institute of Transportation Engineers Journal, ITE 2998/02, Washington D.C., 1998, pp.46-48
- [8] CERTU - Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, «*Cédérom : Contrôle de sécurité des projets routiers - Audit avant mise en service*», outil interactif illustré, Ministère français de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, Lyon, novembre 2003
- [9] CERTU - Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, «*ICTAVRU – Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines*», Ministère français de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, janvier 1990
- [10] Committee of State Road Authorities, «*TRH 17 : Geometric Design of Rural Roads*», Pretoria (South Africa), 1988
- [11] COQUET J. L. & GUICHARD H. & REMAZEILLES J. & ROUZEAU G., «*Images de synthèse pour la visualisation des projets de constructions publiques et d'aménagement*», CERTU - Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Dossiers 86, septembre 1998
- [12] DUMONT A.-G. & TILLE M., «*Conception des voies de circulation*», LAVOC - Laboratoire des voies de circulation, EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, octobre 2001

- [13] DUMONT A.-G. & EGHTESSAD B. & KOELBL O., «*Etude comparative de logiciels de tracé routier*», VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Mandat de recherche VSS 9/91, Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) - Office fédéral des routes (OFROU), mai 1993
- [14] EASA S. M. & STRAUSS T. R. & HASSAN Y. & SOULEYRETTE R. R., «*Three-Dimensional Transportation Analysis : Planning and Design*», Journal of Transportation Engineering, ASCE - American Society of Civil Engineers, Vol 128 (3), May-June 2002, pp. 250-258
- [15] Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, «*Route et informatique*», Actes du colloque du 13-15 mars 1990, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, pp.26-98
- [16] FITZPATRICK K. & CARLSON P. & BREWER M. & WOOLDRIDGE M. D., «*Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Limit Practices*», TRB – Transportation Research Board, 82<sup>nd</sup> Annual Meeting, Washington D. C., January 2003
- [17] Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen, «*EAE – Empfehlungen für die Anlage von Erschliessungsstrassen*», Köln, 1996
- [18] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, «*RAS – Richtlinien für die Anlage von Strassen*», Köln, 1986
- [19] FOUCHARD B., «*RIPL – Requalification d'itinéraire : Paysage et lisibilité*», Recueil d'expériences d'approches "Paysage et sécurité", DEEA, SETRA – Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, février 2003
- [20] FSV - Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen, «*Umweltverträglichkeitsprüfung in der Strassenplanung*», FGSV 002/42, Kolloquium am 31. Mai - 1. Juni 1990, Mannheim, 1990
- [21] GIBREEL G. M. & EASA S. M. & HASSAN Y. & EL-DIMEERY I. A., «*State of the Art of Highway Geometric Design Consistency*», Journal of Transportation Engineering, ASCE - American Society of Civil Engineers, Vol 125 (4), July-August 1999, pp. 305-313
- [22] GIBREEL G. M. & EL-DIMEERY I. A. & HASSAN Y. & EASA S. M., «*Impact of highway consistency on capacity utilization of two-lane rural highways*», NRC – National Research Council Canada, Can. J. Civ. Eng. 26, 1999, pp. 789-798
- [23] GIGON B., «*Réalité virtuelle et sécurité routière ou Analyse de la visibilité des tracés routiers au moyen de la photogrammétrie*», Travail pratique de diplôme du Génie rural - option mensuration, sous la responsabilité de KOELBL O. & DUMONT A.-G., EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, février 1997
- [24] HARWOOD D. W. & COUNCIL F. M. & HAUER E. & HUGHES W. E. & VOGT A., «*Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways*», U.S. Department of Transportation, Publication n°FHWA-RD-99-207, Federal Highway Administration, December 2000
- [25] HASSAN Y. & EASA S. M., «*Design Considerations of Sight Distance Red Zones on Crest Curves*», ASCE - American Society of Civil Engineers, Journal of Transportation Engineering, Vol 124 (4), July – August 1998, New York, pp. 343-352
- [26] HASSAN Y. & EASA S. M., «*Design of Sag vertical curves in three-dimensional Alignments*», ASCE - American Society of Civil Engineers, Journal of Transportation Engineering 1998/01, New York, 1998, pp. 52-58

- [27] HASSAN Y. & EASA S. M. & ABD-EL-HALIM A. O., «*Analytical Model for Sight Distance Analysis on 3-D Highway Alignments*», TRB - Transportation Research Board, 75th Annual Meeting, Paper n° 960529, Washington D. C., January 1996
- [28] HASSAN Y. & EASA S. M. & ABD-EL-HALIM A. O., «*Design Considerations for Combined Highway Alignments*», Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineering, ASCE Vol 123 (1), January-February 1997, pp. 60-68
- [29] HASSAN Y. & EASA S. M. & ABD-EL-HALIM A. O., «*Highway alignment : Three Dimensional Problem and Three Dimensional Solution*», Transportation Research Record n°1612, Washington D.C., 1998, pp. 17-25
- [30] HASSAN Y. & EASA S. M. & ABD-EL-HALIM A. O., «*Modelling Headlight sight distance on three-dimensional Highway alignments*», Transport Research Record n°1579, Washington D.C., 1997, pp. 79-88
- [31] HASSAN Y. & EASA S. M. & ABD-EL-HALIM A. O., «*State-of-the-art of three-dimensional highway geometric design*», Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 25, National Research Council of Canada, 1998, pp. 500-511
- [32] HUGUENIN F., «*Conception de la traversée de l'agglomération de Peseux (NE)*», Travail pratique de diplôme de Génie Civil, sous la responsabilité de DUMONT A.-G., LAVOC – Laboratoire des voies de circulation, EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, février 2004
- [33] HUGUENIN F., «*Traversée de la localité de Villeret (BE)*», Travail théorique de diplôme de Génie civil, sous la responsabilité de P. H. BOVY, EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, octobre 2003
- [34] LINDENBACH A., «*Strassen und Eisenbahnwesen I : BMEEOUV-N39*», Support de cours, Budapest University of Technology and Economics – Department of Highway and Railway Engineering, Budapest, 2003
- [35] LINDENBACH A., «*Strassen und Eisenbahnwesen II : BMEEOUV-N40*», Support de cours, Budapest University of Technology and Economics – Department of Highway and Railway Engineering, Budapest, 2003
- [36] MANNERING F. L. & KILARESKI W. P., «*Principes of highway engineering and traffic analysis*», John Wiley & Sons Inc., New York, 1990
- [37] Ministère des Transports du Québec, «*Normes : Tome I – Conception routière*», 1994
- [38] MONTMOLLIN B. & SCHNEIDER S. & TRIPET M., «*Sécurité routière - Importance du paysage dans la lisibilité de la route*», Description du projet [Source : [www.aramis-research.ch](http://www.aramis-research.ch)], VSS – Union des professionnels suisses de la route et des transports, projet de recherche VSS 2003/602, DETEC - Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, OFROU - Office fédéral des routes, 2003
- [39] MOUSSALLY N. & PIGOIS M., «*Données de base des projets routiers*», VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Mandat de recherche VSS 19/80, DETEC - Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, OFROU - Office fédéral des routes, avril 1982
- [40] NATO Advanced Study Institute, «*Computer Systems in Highway Design*», 3-9 September 1972, Copenhagen (Denmark), A.K. Turner Editor, March 1973, pp.231-235
- [41] NCHRP - National Cooperative Highway Research Program, «*Recent Geometric Design Research for Improved Safety and Operations*», Synthesis 299, TRB - Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., 2001

- [42] NCHRP - National Cooperative Highway Research Program, «*Review of Truck Characteristics as Factors on Roadway Design*», Report 505, TRB - Transportation Research Board, Washington D.C., 2003
- [43] NEUMAN T. R. & SCHWARTZ M. & CLARK I. & BEDNAR J., «*A Guide to Best Practices for Achieving Context Sensitive Solutions*», NCHRP - National Cooperative Highway Research Program, Report 480, TRB - Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., 2002
- [44] NG J. C. W. & SAYED T., «*Effect of geometric design consistency on road safety*», NRC – National Research Council Canada, Can. J. Civ. Eng. 31, 2004, pp. 218-227
- [45] Organisation de coopération et de développement économiques, «*Symposium sur les méthodes d'élaboration des normes géométriques routières*», Recherche routière - Rapports, Paris, 1976
- [46] PIGOIS M., «*Comparaison de variantes*», VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Mandat de recherche VSS 24/79, DETEC - Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, OFROU - Office fédéral des routes, septembre 1987
- [47] ROLLAND F. & MENGIS M., «*Vidéo – Convaincre par l'image : traversée du village de Belfaux (FR)*», EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999
- [48] Routes du monde, «*CAD gets smart*», mai - juin 1997, Sutton Surrey (United Kingdom), 1997, pp. 57-58
- [49] RTS - Recherche - Transports - Sécurité, «*Effet polarisant du lieu de travail sur le territoire de la vie quotidienne des actifs - Quels accidents de la route en été et en hiver au Québec ? - Chronologie de la vigilance*», n°73, Editions Elsevier, octobre - décembre 2001
- [50] RTS - Recherche - Transports - Sécurité, «*Offre ferroviaire dans le Bassin parisien - Accompagnement des enfants - Emission acoustique de véhicules en déplacement - Simulation microscopique de carrefours - Logiciels d'aide à l'étude de la sécurité routière*», n°59, Editions Elsevier, avril - juin 1998
- [51] SANCHEZ E., «*A 3-Dimensional Analysis of Sight Distance on Interchange Connectors*», Transportation Research Record 1445, National Research Council, Washington D.C., 1994, pp.101-108
- [52] SCHOON J. G., «*Geometric Design Projects for Highways - An Introduction*», ASCE - American Society of Civil Engineers, New York, 1993
- [53] Service des routes du canton de Vaud, «*Espaces publics - Rues de villages : Qualité de vie et réseaux routiers - Conseils pour des projets intégrés*», Département des infrastructures - Service de l'aménagement du territoire, décembre 1999
- [54] SETRA – Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, «*ARP – Aménagement des Routes Principales : Guide Technique*», Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, août 1994
- [55] SETRA – Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, «*ICTAAL – Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison*», Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, décembre 2000
- [56] SETRA – Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, «*Paysage et lisibilité – Recueil d'expériences – Approches "paysage et sécurité routière"*», Collection les rapports, Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, septembre 2003

- [57] SETRA – Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, «*Paysage et lisibilité – Une démarche globale pour améliorer la sécurité routière*», Power Point, Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, septembre 2003
- [58] SETRA - Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, «*Signalisation de repérage - Signalisation d'animation*», Guide méthodologique E0111, Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juin 2001
- [59] SGI Ingénierie S.A. & EPFL-LAVOC, «*Expertise technique de la circulation sur le contournement Ettelbrück - Schieren (B7) : Rapport de synthèse des mesures proposées*», Grand-Duché du Luxembourg - Ministère des travaux publics - Administration des Ponts et Chaussées, janvier 2000
- [60] SMITH B. L. & LAMM R., «*Coordination of horizontal and vertical alignment with regard to highway aesthetics*», Transportation Research Record 1445, National Research Council, Washington D. C., 1994, pp. 73-85
- [61] TAC - Association des Transports du Canada, «*Geometric Design Guide for Canadian Roads*», Ottawa, 1999
- [62] TACQ K., «*Giratoires et autres aménagements routiers - cadre-norme n°20*», Ministère des Communications et de l'Infrastructure - Administration de la circulation routière et de l'infrastructure - Direction Normes et Accessibilité routières, 1040 Bruxelles (Belgique), 2001, pp. 25-47
- [63] TRR - Transportation Research Record, «*Geometric Design and the Effects on Traffic Operations 2002 - Highway and Facility Design*», Journal of the Transportation Research Board n°1796 – National Research Council, Washington D.C., 2002
- [64] TRR - Transportation Research Record, «*Highway Geometric Design and Operational Effects Issues - Highway and Facility Design*», Journal of the Transportation Research Board n°1658 - National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., 1999
- [65] US Department of Transportation, «*MUTCD - Manual of Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*», Federal Highway Administration, 2003
- [66] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 010, «*Accidents de la circulation - Analyse des accidents et analyse sommaire des dangers et du risque*», Zürich, 2001
- [67] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 026, «*Elaboration des projets - Etapes de projet*», Zürich, 1998
- [68] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 027, «*Elaboration des projets - Etudes de planification*», Zürich, 1998
- [69] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 028, «*Elaboration des projets - Avant-projet*», Zürich, 2002
- [70] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 029, «*Elaboration des projets - Projet définitif*», Zürich, 2002
- [71] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 030, «*Elaboration des projets - Appel d'offres*», Zürich, 2002
- [72] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 031, «*Elaboration des projets - Réalisation*», Zürich, 2002
- [73] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 033, «*Présentation des projets – Bases et exigences*», Zürich, 2002



- [74] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 039, «*Projets, bases - Introduction aux normes relatives à l'étude de tracé*», Zürich, 1994
- [75] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 080b, «*Projet, généralités - La vitesse, base de l'étude des projets*», Zürich, 1991
- [76] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 090b, «*Projets, bases - Distances de visibilité*», Zürich, 2001
- [77] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 100a, «*Tracé - Eléments géométriques du tracé en plan*», Zürich, 1996
- [78] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 105a, «*Surlargeur en courbe*», Zürich, 2003
- [79] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 110, «*Tracé - Eléments du profil en long*», Zürich, 1983
- [80] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 120, «*Tracé - Pentes transversales en alignement et dans les virages, variation du dévers*», Zürich, 1995
- [81] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 138a, «*Tracé – Voies additionnelles en rampe*», Zürich, 1986
- [82] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 140, «*Tracé - Critères optiques*», Zürich, 1978
- [83] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 198a, «*Courbes - Lacets*», Zürich, 2000
- [84] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 200, «*Profil géométrique type - Principes généraux, définitions et éléments*», Zürich, 1995
- [85] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 210, «*Conception de l'espace routier - Démarche pour l'élaboration de concepts d'aménagement et d'exploitation*», Zürich, 1999
- [86] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 211, «*Conception de l'espace routier - Bases*», Zürich, 2000
- [87] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 212, «*Conception de l'espace routier - Eléments d'aménagement*», Zürich, 2000
- [88] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 213, «*Conception de l'espace routier - Eléments de modération du trafic*», Zürich, 2000
- [89] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 271a, «*Vérification de la viabilité*», Zürich, 1990
- [90] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 273, «*Carrefours - Visibilité*», Zürich, 1994
- [91] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 565, «*Protection passive de l'espace routier - Bases*», Zürich, 1991
- [92] VSS - Union suisse des professionnels de la route et des transports, Norme Suisse SN 640 660 b, «*Espaces verts - Bases*», Zürich, 1998

- [93] WILCZEK N. «*Präsentieren und Visualisieren*», *Route et Trafic* 11/97, VSS – Union Suisse des professionnels de la route et des transports, novembre 1997, pp. 443-445
- [94] WOOLDRIDGE M. D. & FITZPATRICK K. & HARWOOD D. W. & POTTS I. B. & ELEFTERIADOU L. & TORBIC D. J., «*Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways*», NCHRP - National Cooperative Highway Research Program, Report 502, TRB - Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., 2003

## 10 ANNEXE

Les logiciels recensés dans l'inventaire de juin 2004 pour lesquels des informations plus précises sont disponibles sont présentés ci-après de manière plus détaillée. Cela permet d'agrémenter la brève description faite au chapitre 3.1.2 ([Tableau 5](#)) au sujet des modes de fonctionnement des logiciels routiers de CAO en apportant des précisions techniques complémentaires.

Remarque : les informations apportées dans ce chapitre au sujet des possibilités et des fonctionnalités des logiciels routiers de CAO proviennent de sites Internet, de brochures publicitaires et de rencontres avec les concepteurs et les distributeurs de logiciels. Celles-ci sont retranscrites de manière brute, sans avoir toutes été vérifiées. Une certaine réserve doit donc être observée quant aux réelles possibilités offertes par ces logiciels.

### 10.1.1 Logiciel CADICS-ROUTE

Logiciel de conception assistée par ordinateur pour les branches du génie civil et de la construction, CADICS-ROUTE permet un traitement des projets allant de la simple voie de desserte à la plus compliquée des jonctions autoroutières. Associé aux modules de modélisation de terrain (CANYON) et de mensuration (HOMERE), il forme un outil complet de traitement des projets de génie civil, idéal lors des études de variantes de part sa rapidité à générer des avant-projets dans de brefs délais.

Le logiciel CADICS-ROUTE suit une procédure de conception classique, avec traitement par espaces-plans successifs. La géométrie des axes du plan de situation et du profil en long est définie à partir d'une famille d'éléments géométriques (droites, cercles, clothoïdes, paraboles) pouvant être fixes, pivotants ou flottants. Les profils types, qui définissent tronçon par tronçon la structure de la route, proviennent d'une bibliothèque ou sont créés spécifiquement. Les dévers sont calculés automatiquement par le logiciel ou modifiés manuellement. La description tridimensionnelle complète de la route permet, dans les cas les plus complexes (carrefours, giratoires) d'obtenir des profils sur plusieurs axes, des perspectives ou des métrés.

L'environnement intuitif et le multifenêtrage du logiciel CADICS-ROUTE (deux ou trois fenêtres simultanées) simplifient l'élaboration des projets. Un mode dynamique permet de déplacer ou modifier des objets tels qu'un point imposé, un rayon ou une distance de passage en voyant les changements suivre le déplacement de la souris à l'écran. Les modifications sur le plan de situation (respectivement sur le profil en long) se reportent automatiquement sur le profil en long, le profil en travers et la vue en perspective (respectivement sur le profil en travers et la perspective). La maquette 3D n'est toutefois pas directement modifiable. De plus, elle ne peut être visionnée qu'en mode « fenêtre unique ». Un modèle numérique de terrain peut être utilisé pour assurer l'intégration de la route dans son environnement. Employé de manière cohérente, il permet d'établir les profils en long et en travers ainsi que le modèle tridimensionnel de la route.

Le logiciel CADICS-ROUTE intègre de nombreux standards nationaux et internationaux qui permettent de répondre aux exigences de la plupart des pays européens, notamment la Suisse, la France, l'Allemagne, la Grande-Bretagne et la Croatie. La prise en compte de ces standards est laissée au libre choix de l'utilisateur. Celui-ci peut introduire certains paramètres (vitesse de projet, rayon minimal, etc...), mais le code des normes reste « en dur » (sans formules explicites pouvant être modifiées).

Le logiciel n'offre pas de sorties directes et automatiques au niveau des distances de visibilité. Il permet néanmoins de les évaluer à partir des perspectives « fil de fer », grâce à l'implantation d'objets factices sur la voie, que l'on voit ou non selon sa position.

Le logiciel CADICS-ROUTE permet la génération du projet en 3D. Les vues perspectives, avec ou sans terrain, permettent de contrôler l'aspect et l'impact visuel d'un projet.

Associé à un logiciel parallèle (notamment le logiciel 3D Studio), CADICS-ROUTE permet un rendu photoréaliste avec habillage des surfaces. Des trajectoires de caméras peuvent finalement être définies et servir de base à une animation.

#### Compléments d'information :

Le logiciel CADICS-ROUTE travaille sur sa propre base CAO. Une version compatible avec MicroStation et AutoCAD est en cours de développement, avec un passage en code Java plutôt que Fortran et C++, les deux langages actuellement utilisés.

Le logiciel est présent à quelques 150 exemplaires, essentiellement en Suisse, en Allemagne, en Angleterre et en Croatie, avec près du 2/3 des licences distribuées en Helvétie.

Le coût de la première version varie sensiblement selon les fonctionnalités exigées. Pour une version de base (destinée principalement aux géomètres et permettant uniquement le traitement d'un axe unique en situation, profil en long et profil en travers), il en coûte 3'800 CHF, alors qu'une version incluant la possibilité d'un traitement de carrefour et un rendu tridimensionnel s'élève à 17'800 CHF.

Le logiciel CADICS dispose d'un module Bruit intégrant le calcul des nuisances sonores selon le modèle du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa). La prise en compte de la voie de circulation est tridimensionnelle, avec notamment la considération de la largeur de la route, de ses pentes, de ses dévers et du diagramme de vitesse. Le module Bruit, compatible uniquement en milieu non urbain, permet ainsi la génération rapide des isophones, déjà au stade de l'avant-projet.

### **10.1.2 Logiciel Cadwork route**

Logiciel de CAO pour le génie civil, Cadwork route apporte différentes aides au concepteur routier. Il lui permet notamment une importation de relevés de terrain par point, de données issues de théodolites et de fichiers DXF-DWG, pour une modélisation du terrain par triangulation.

La conception d'une voie de circulation se fait par espaces-plans successifs. Les données de base (largeur de la chaussée, dévers et hauteur de bordures) sont introduites pour chaque variante (ou axe) au moyen d'un masque de saisie. Le tracé horizontal est défini avec des alignements, des rayons et des clothoïdes. Les modifications du plan de situation se font par simple déplacement des points de l'axe. En plus de la méthode conventionnelle définissant les largeurs des pistes au moyen de profils normaux, le logiciel permet de construire librement les bords de chaussée grâce au mode « bords de route libres ». Le tracé en élévation est défini par des sommets verticaux et peut être modifié de façon analogue à la situation. Le plan du profil en long est généré automatiquement selon les courbes de niveau ou d'autres lignes de terrain. Le calcul des profils en travers se fait automatiquement sur la base de la définition des profils normaux (type de profil, largeur et dévers des voies de la chaussée, du trottoir, de la banquette et d'un mur, ainsi que les pentes des talus), et en prenant en considération les normes suisses VSS ou allemandes DIN (Deutsches Institut für Normung). Un lien dynamique entre les profils (en long et en travers) et le plan de situation permet un report automatique des modifications des profils dans la situation.

Le logiciel Cadwork route permet un calcul automatique des talus en remblai et en déblais, ainsi que le calcul de la planéité. Il offre également la possibilité de procéder à une simulation automatique de la trajectoire des véhicules, avec un type de véhicule prédéfini ou librement définissable.

Le logiciel Cadwork route fournit de puissants moyens pour visualiser les projets de manière tridimensionnelle. En plus des perspectives 3D, il permet le plaquage d'orthophotos sur le terrain modélisé par triangulation et le plaquage de photos sur des surfaces 3D, de manière à représenter les maisons, arbres, signaux, etc... cela sans avoir à les modéliser. Il permet également l'intégration des projets dans un environnement réel (photomontage), ainsi que la création de vidéos.

### Compléments d'information :

Le logiciel Cadwork route travaille sur sa propre base CAO (Cadwork 2d). Il a été vendu à quelques 900 exemplaires, dont 800 en Suisse. Sa première version s'élève à 10'000 CHF.

### **10.1.3 Logiciel CARD/1**

Outil de CAO pour le génie civil, CARD/1 est un logiciel qui permet la conception de projet de routes et de chemins de fer, ainsi que le traitement des aspects liés au drainage, à l'aménagement portuaire, aux aéroports, aux barrages ou encore aux voies navigables.

Bien que la procédure de conception de CARD/1 soit de type classique avec décomposition par espaces-plans successifs, le logiciel offre l'avantage d'une construction graphique interactive du plan de situation et du profil en long. Les profils en travers sont quant à eux créés de manière interactive sur la base de règles de construction indiquées par le concepteur. Toute modification apportée sur le plan de situation ou le profil en long est reportée sur le profil en travers grâce au lien dynamique présent entre les divers espaces-plans.

En plus des éléments d'alignement conventionnels du plan de situation, le logiciel CARD/1 permet la prise en compte d'éléments particuliers : conception de zones de modération du trafic, planification des plateformes d'échange modal (Park and Ride), exigences en matière d'espace pour le parking.

Système modulaire, le logiciel CARD/1 permet l'implantation d'un modèle numérique de terrain. L'intégration du projet dans son environnement permet ainsi de compléter la vue perspective 3D par un photoréalisme.

Comme paramètre de sortie, le logiciel CARD/1 offre un calcul automatique de la distance de visibilité existante et de la distance de visibilité requise.

### Compléments d'information :

Le logiciel CARD/1, disponible dans des versions de langues allemande, anglaise, polonaise, russe et chinoise, travaille sur sa propre base CAO. Il est néanmoins compatible avec AutoCAD. Le logiciel est actuellement employé par plus de 5'400 utilisateurs européens, s'étendant d'Allemagne jusqu'en Chine.

### **10.1.4 Logiciel CDS-Roads**

Le logiciel CDS-Roads est un outil dédié à la conception des voies de circulation, mais aussi aux aéroports, aux chemins de fer, aux canaux de drainage et tout autre projet dont la section transversale est régulière. Au niveau routier, il s'applique aussi bien aux routes à plusieurs voies de circulation qu'aux routes à voie unique, en milieu urbain comme rural.

Basé sur une procédure classique séquentielle, le logiciel CDS-Roads offre l'avantage d'un lien dynamique entre le plan de situation, le profil en long et le profil en travers. Cette interactivité multiplan se voit de plus agrémentée par un multifenêtrage. Le logiciel fournit des rayons de courbures minimaux en fonction de la vitesse de projet indiquée par le concepteur. La conception du profil en long est ainsi facilitée, ce d'autant plus que ce dernier peut être modifié par simple déplacement des points d'intersection entre les éléments du profil en long.

Le logiciel CDS-Roads possède un module prenant en charge la modélisation tridimensionnelle de terrain et du projet routier (CDS-COGO).

### Compléments d'information :

Le logiciel CDS-Roads possède sa propre base CAO. Il est actuellement employé par quelques 1'800 utilisateurs, avec un prix de base approximatif de 1'000 US\$.

### 10.1.5 Logiciel Civil Designer

Le logiciel Civil Designer est un module interactif de conception applicable pour les voies de circulation urbaines et rurales, les autoroutes, les aéroports, les chemins de fer et les barrages.

Le logiciel facilite la conception par espaces-plans successifs grâce à un multifenêtrage. Les caractéristiques limites du plan de situation, du profil en long et du profil en travers sont déterminées automatiquement à partir de la vitesse de base et des critères de conception définis en application de la Norme TRH 17 [10]. Un lien dynamique entre les différents espaces-plans assure une mise à jour automatique de tous les plans en cas de modification sur l'un d'eux, y compris sur la maquette 3D. Ainsi, lorsque les profils en travers sont déplacés horizontalement et/ou verticalement, le plan de situation et/ou le profil en long sont corrigés en conséquence de manière automatique et instantanée.

Le logiciel Civil Designer permet une visualisation tridimensionnelle sous forme de perspective, de photoréalisme et de séquence vidéo. Il permet de plus le calcul automatique des distances de visibilité pour les deux sens de circulation, l'opérateur pouvant spécifier la hauteur de l'œil du conducteur et des objets, ainsi que la distance de visibilité minimale. De plus, une simulation effectuée sur la maquette tridimensionnelle du projet permet de détecter les éventuelles pertes de tracé et autres anomalies.

#### Compléments d'information :

Le logiciel Civil Designer possède sa propre base CAO, appelée AllyCAD. Quelques 7'500 licences sont présentes dans le monde, mais aucune en Suisse. Le coût de la première version se monte à environ 1'800 US\$.

### 10.1.6 Logiciel COVADIS - AutoPISTE

Utilisé aussi bien dans les bureaux d'études routiers que dans les entreprises de travaux publics et les administrations, AutoPISTE est un logiciel de conception de projets linéaires (routes, autoroutes, TGV, etc...). Il exploite directement les objets AutoCAD du fichier DWG. Ses fonctionnalités garantissent à l'utilisateur une cohérence et une homogénéité de ses données.

Le logiciel AutoPISTE permet de concevoir, de calculer et de dessiner des projets de routes et de voiries en milieu urbain. Le projeteur commence par tracer l'axe en plan à partir de lignes, d'arcs, de clothoïdes ou de courbes en S. Le profil en long du terrain est ensuite interpolé et dessiné automatiquement. L'opérateur conçoit le projet sur le profil en long, à partir d'alignements droits et de raccordements circulaires ou paraboliques. Il définit les demi profils types multicouches et les implante le long de l'axe du projet. L'associativité entre les différents éléments du projet permet leur mise à jour automatique dès que l'un d'eux est modifié.

Le logiciel permet une modélisation tridimensionnelle du projet par superposition du plan de situation et des profils en long et en travers. La perspective 3D peut alors être intégrée dans le modèle initial du terrain à aménager, et finalement être valorisée par un rendu photoréaliste exploitant la bibliothèque 3D de COVADIS (applicatif d'AutoCAD en topographie, cartographie, terrassement et en infrastructure) et les textures d'AutoCAD.

#### Compléments d'information :

Près de 850 licences du logiciel COVADIS - AutoPISTE sont actuellement exploitées en France, au Benelux, en Suisse, en Europe de l'Est, au Portugal et en Afrique.

### 10.1.7 Logiciel GeoMacao

Le logiciel GeoMacao permet aussi bien le tracé routier, ferroviaire et de canaux que la planification de carrefours par exemple. Il dispose en sus d'un modeleur de terrain.

GeoMacao intègre une conception par espaces-plans successifs et une compatibilité aux normes VSS et européennes. Grâce au multifenêtrage, l'utilisateur peut travailler simultanément en plan, en profils en long et en travers ou dans une vue 3D du projet. Le lien dynamique entre les espaces-plans assure en tout temps un ajustement des éléments sur chaque espace-plan. Le modèle mathématique utilisé par GeoMacao est de type « plate-forme ». L'utilisateur définit la géométrie de la surface de la route par des contraintes (géométrie de l'axe, bords de chaussée, dévers, profil en long) puis affecte des règles de talus (ou de murs de soutènement) au bord de la plate-forme pour rejoindre le terrain naturel. Les possibilités de GeoMacao en matière de visualisation vont de la perspective 3D à l'intégration du projet dans le site (implantation du projet dans le modèle numérique de terrain) et un rendu photoréaliste. Le logiciel GeoMacao dispose d'automatismes permettant la génération de plans selon les normes graphiques suisses, tout en permettant leur adaptation totale par l'utilisateur. Il permet la génération de perspectives conducteur ainsi que l'établissement des diagrammes de vitesse et de distances d'arrêt et de visibilité.

#### Compléments d'information :

Le logiciel GeoMacao utilise la base CAO de MicroStation, élément sur lequel se développent les solutions de Bentley Systems Incorporated dans les domaines de la construction, du génie civil, du transport, des installations pétrochimiques, des usines et sites de fabrication, des administrations, des services publics et des réseaux de télécommunication.

### **10.1.8 Logiciel HighRoad**

Développé par les concepteurs routiers pour les concepteurs routiers, HighRoad est une application graphique interactive pour la conception géométrique des voies de circulation.

Basé sur une procédure de conception par espaces-plans successifs, HighRoad offre un multifenêtrage (situation, profils en long et en travers) qui indique de manière graphique mais aussi numérique les caractéristiques des différents éléments. La conception se fait de manière interactive. Le logiciel offre un lien dynamique entre les différents espaces-plans et maintient la continuité aux carrefours en ajustant automatiquement les profils.

Le logiciel HighRoad permet une visualisation tridimensionnelle et un rendu photoréaliste. De plus, et pour autant que la vitesse de base et la distance de visibilité requise soient précisées, le logiciel peut fournir une simulation du projet (séquence vidéo).

#### Compléments d'information :

Le logiciel HighRoad, utilisant sa propre base CAO, est présent dans plus de 38 pays, notamment en Australie, en Belgique, aux Etats-Unis et en Colombie. Des versions sont disponibles en anglais, en japonais, en italien et en espagnol. Le prix de la première version de base s'élève à 995 \$ australiens. Les prix des versions plus performantes vont de 3'200 \$ australiens (HighRoad Plus) à 5'500 \$ australiens (HighRoad Pro).

### **10.1.9 Logiciel INROADS**

Application verticale fonctionnant avec MicroStation ou AutoCAD comme base CAO, le logiciel INROADS permet la conception d'infrastructures routières.

Fonctionnant selon une conception par espaces-plans successifs, le logiciel INROADS présente un lien dynamique entre le plan de situation, les profils en long et en travers et la vue 3D qui permet une mise à jour des modifications y compris sur la maquette 3D.

INROADS est basé sur la méthode des « profils types ». Très proche de la conception traditionnelle de la planche à dessin, elle consiste à décrire les profils en travers types. La route est modélisée sous la forme d'un tube axé sur la résultante 3D de l'axe en plan et du profil en long. La section est décrite chaque fois qu'une modification (élargissement de bande ou modification de talus) apparaît. S'appuyant sur ces données, le logiciel interpole la section du tube entre sections types.

Le logiciel INROADS intègre les normes suisses et européennes. Disposant d'un modèleur de terrain, il permet la création de perspectives et de photoréalisme. Basé sur une approche monovoie, le logiciel ne peut pas traiter les problèmes d'intersections de voies. Ceux-ci doivent être traités parallèlement « à la main ».

### 10.1.10 Logiciel LISCAD

Le logiciel LISCAD fonctionne selon une procédure de conception classique. Celle-ci est facilitée par un multifenêtrage et par un lien dynamique entre les différents espaces-plans qui permet une mise à jour instantanée de tous les plans en cas de modification sur l'un d'eux. Malgré la possibilité d'intégration d'un modèle numérique de terrain, le logiciel LISCAD ne permet pas directement une visualisation tridimensionnelle du projet, se bornant à un rendu par espaces-plans dissociés.

Le logiciel permet, en fonction des paramètres de conception des rayons verticaux, de calculer les distances de visibilité et les distances d'arrêt.

#### Compléments d'information :

LISCAD exploite sa propre base CAO, tout en restant compatible avec les formats MicroStation et AutoCAD. Le logiciel est distribué dans plus de cent pays dans le monde, avec plusieurs milliers de licences vendues et une version de base s'élevant à 7'500 CHF.

### 10.1.11 Logiciel Mensura

Logiciel de conception assistée par ordinateur dédié aux métiers de l'infrastructure en Europe, Mensura permet de concevoir, calculer et dessiner tout type de projet routier. Il est l'alternative jusqu'à la réalisation des travaux.

Le logiciel Mensura possède son propre noyau graphique spécialement destiné aux métiers de l'infrastructure et reste compatible avec les bases CAO standard (MicroStation et AutoCAD). Il fonctionne selon une méthodologie de conception par espaces-plans successifs. La conception de l'axe en plan et du profil en long est facilitée par un multifenêtrage avec, pour la conception longitudinale (profil en long), un affichage automatique et direct de la ligne de terrain naturel modélisée et interpolée à partir du modèle numérique de terrain. Le profil en travers se définit à partir de profils types placés sur l'axe en plan (au lieu des tabulations). Les profils types se définissent par des points et des lignes comportant un nombre illimité de couches. La gestion des dévers s'effectue manuellement, profil par profil, avec des interpolations linéaires entre les points ou tabulations. Elle peut également se faire automatiquement, en fonction de la table de changement de dévers correspondant aux normes françaises ARP [54].

La création d'un projet d'infrastructure routière génère automatiquement des informations sur la géométrie des axes, des profils en travers et les points d'implantation en XYZ correspondant. La modélisation 3D est accessible à tous les états d'avancement du projet. De là, le projet routier peut facilement être transformé en modèle surfacique tridimensionnel et fournir un rendu photoréaliste. Le rendu 3D permet ainsi un contrôle de la cohérence des différents modèles numériques (terrain et projet), ainsi qu'une maîtrise de l'impact des terrassements et une visualisation de l'intégration paysagère. Le logiciel Mensura offre également différentes méthodes de visualisation tridimensionnelle dynamiques (déplacement piéton, visualisation aérienne et trajet routier).

Au niveau des sorties, le logiciel n'offre pas la possibilité de calculer des distances de visibilité pour ce qui est de la version 2003. Cette fonctionnalité demeure néanmoins dans le cahier des charges des futures mises à jour.

#### Compléments d'information :

Mensura est actuellement distribué dans les pays de l'Union européenne, dans le Nord Afrique et au Canada, avec près de 1'500 sites en France, 200 sites installés en export dont 5 sites en Suisse.



Son public cible est varié, avec une distribution dans les sociétés de construction, mais aussi dans les bureaux d'étude, les collectivités et administrations, ainsi que dans les écoles. Le prix du « pack école » (regroupant tous les modules et offrant une exploitation réseau avec une quinzaine de postes) s'élève à 1'590 €, alors que celui d'une première version professionnelle est dix fois supérieur.

La mise à jour de Mensura se fait de manière annuelle. La dernière version du logiciel date de 2003, avec une nouvelle version 5.0 agendée à septembre 2004.

### 10.1.12 Logiciel MXROAD

Anciennement nommé MOSS, le logiciel MXROAD est un outil dédié au contrôle et à la conception d'infrastructures routières qui se décline en différents modules (MXPISTE : Terrain, MXROAD : Route, MXURBAN : projets urbains, MXRENEW : renouvellement).

MXROAD se base sur une procédure de conception par espaces-plans successifs, en offrant l'avantage d'un multifenêtrage et la création d'une maquette 3D en relation dynamique avec les différents espaces-plans. La conception de l'axe en plan et du profil en long est facilitée par l'intégration dans le logiciel des transitions normalisées les plus complexes.

MXROAD fonctionne selon la méthode dite des « strings ». L'axe de la route, comme tout élément de la chaussée ou du terrain, est représenté par une courbe définie géométriquement dans le plan horizontal et possédant son propre profil en long.

Pour l'implantation des dévers, libre choix est laissé à l'utilisateur de considérer ou non les normes françaises (ICTAVRU [9], ARP [54] et ICTAAL2000 [55]) et internationales d'application des dévers, voire de les adapter aux contextes les plus contraignants au moyen de fichiers de règles personnalisables. L'édition des profils en travers se fait de manière interactive, avec mise à jour automatique de la maquette 3D du projet, de la vue en plan et des profils en long.

Le logiciel permet un contrôle dynamique de la visibilité le long de l'axe du projet, avec un relevé des pertes de visibilité sur carrefours et par rapport à un site existant ou projeté.

#### Compléments d'information :

MXROAD fonctionne sur sa propre base CAO ou comme application verticale fonctionnant avec MicroStation ou AutoCAD. Il dispose de plusieurs utilitaires permettant de concevoir simplement et en trois dimensions des carrefours et des giratoires. Les carrefours sont modifiables en profil en long. Leur conception est facilitée par des raccords 3D et une mise en place des îlots séparateurs automatiques.

### 10.1.13 Logiciel PISTE +

Logiciel d'aide à la conception, PISTE + permet de traiter des projets linéaires de génie civil, depuis le simple chemin de remembrement jusqu'au projet autoroutier, en passant par les projets de renforcement de chaussée existante.

PISTE + possède une architecture respectant la méthode classique de conception. Sans possibilité de multifenêtrage, il permet néanmoins une visualisation du tracé en plan, du profil en long, des profils en travers et des perspectives calculées, cela durant chaque étape de l'étude du projet. Basculer entre toutes ces visualisations facilite ainsi l'évaluation de la coordination du projet, notamment grâce à la maquette 3D qui intègre de manière automatique les modifications ayant été apportées aux autres espaces-plans.

Le logiciel PISTE + intègre des tables correspondant aux normes françaises ARP (anciennement ICTARN) qui peuvent être complétées, modifiées, voire mises de côté par l'utilisateur. Une fois les points de changement de dévers définis, les longueurs de variations correspondantes peuvent être vérifiées et ajustées si nécessaire pour respecter les longueurs minimales requises par la table sélectionnée. Il ne reste alors plus qu'à lancer le calcul automatique des dévers pour chaque profil. Outre leur utilisation dans le calcul des dévers, ces tables peuvent servir à déterminer automatiquement les caractéristiques des clothoïdes.

A partir de différents paramètres à spécifier, PISTE + permet le calcul automatique des distances de visibilité dans chaque sens de circulation, ainsi que la détermination des pertes de tracé éventuelles.

Compléments d'information :

La version 4.10 du logiciel PISTE + est actuellement diffusée en 2'600 exemplaires dans les bureaux d'études du Ministère de l'Équipement français, de collectivités locales, de sociétés privées et d'écoles pour les formations en rapport avec le génie civil.

#### **10.1.14 Logiciel ProVI Strasse**

Le logiciel ProVI Strasse est un programme graphique interactif pour la conception des infrastructures routières et ferroviaires. Utilisant la base CAO d'AutoCAD, ProVI Strasse permet la prise en charge d'un modèle numérique de terrain bi ou tridimensionnel.

Le logiciel se base sur une conception classique par espaces-plans successifs. Il inclut les standards allemands RAS [18] ou autrichiens. La conception du plan de situation et du profil en long, fonction de la vitesse de base et du type de route, prend en compte les valeurs minimales des éléments, selon la Norme RAS-K-1. La validation de l'axe de la voie de circulation se fait en accord avec les spécifications de la Norme RAS-L-95.

Le profil en travers est construit de manière automatique, en intégrant un profil type standard prédéfini par la Norme RAS-Q ou spécifié manuellement par le concepteur. Un lien dynamique entre les divers espaces-plans permet une mise à jour instantanée du projet en cas de modifications.

Les possibilités de visualisation de ProVI Strasse sont multiples. Combiné au logiciel 3D Studio, le logiciel permet un photoréalisme et une séquence vidéo à partir de la perspective. ProVI Strasse permet le calcul des distances de visibilité de dépassement et d'arrêt selon la Norme allemande RAS-L, dont certains paramètres (hauteur de l'œil par exemple) peuvent être modifiés. En plus des obstacles naturels découlant du modèle numérique de terrain, d'autres restrictions à la visibilité peuvent être ajoutées comme la présence de zones boisées, d'ouvrages d'art ou de bâtiments. Le logiciel permet également le calcul de courbes de traction, fonction de catégories de véhicules prédéfinies ou corrigées par l'utilisateur.

#### **10.1.15 Logiciel RoadCalc**

RoadCalc permet une conception par espaces-plans successifs. Les valeurs limites des éléments du tracé sont fixées automatiquement, à partir de tables de vitesses de base interactives. L'introduction des paramètres du plan de situation et du profil en long se fait de manière graphique ou numérique. Les profils en travers sont déterminés automatiquement à partir d'un profil type et en fonction du plan de situation et du profil en long.

Une fois tous les plans déterminés, le logiciel RoadCalc permet de visualiser le projet de manière tridimensionnelle en créant une perspective 3D. La maquette obtenue peut ensuite être complétée par un remplissage de surfaces pour une meilleure qualité de rendu. L'implantation dans le site s'obtient en faisant recours à un logiciel parallèle, RoadCalc n'intégrant pas de modèle numérique de terrain. Il en est de même pour l'obtention d'une simulation du projet, avec par exemple l'utilisation du logiciel Virtual Simulator™.

#### **10.1.16 Logiciel RoadEng**

RoadEng est un logiciel de conception assistée par ordinateur dont le module Civil Engineer est dédié aux voies de circulation et aux chemins de fer.

Basé sur une conception par espaces-plans successifs, il possède un multifenêtrage qui permet une visualisation simultanée du plan de situation, du profil en long, du profil en travers et des données numériques qui s'y rattachent. Grâce à son lien dynamique entre les différents espaces-plans, tout changement sur un espace-plan se répercute de manière instantanée sur les autres.

L'interactivité de la conception permet un ajustement et une optimisation rapide entre les alignements verticaux et horizontaux. La conception du plan de situation et du profil en long est facilitée par le calcul automatique des éléments limites à partir de la vitesse de base et de la pente maximale, cela en respectant les normes AASHTO.

Le logiciel RoadEng permet une implantation du projet dans un modèle numérique de terrain, et ainsi la création d'un rendu photoréaliste.

Compléments d'information :

Le logiciel RoadEng utilise sa propre base CAO tout en restant compatible avec AutoCAD. Il est actuellement utilisé dans plus de 1'000 compagnies à travers le monde (y compris chez les universités, les consultants et les gouvernements), pour un nombre de licences approximatif de 1'500, dont 30 en Suisse. Le prix de la première version varie de 2'300 à 4'500 \$ Canadiens, selon les fonctionnalités exigées.

### 10.1.17 Logiciel Strada Polaris

Le logiciel Strada Polaris fournit une solution complète pour le traitement des données topographiques, avec un éditeur graphique dédié au dessin topographique et aux études d'infrastructures. Son module Projets linéaires permet d'étudier des projets linéaires modestes (voiries locales, voiries de lotissement, canalisations).

Le logiciel, exploitant sa propre base CAO, présente une procédure de conception par espaces-plans successifs sans multifenêtrage et un lien dynamique performant entre le plan de situation, le profil en long et le profil en travers. Toute modification d'un élément d'un certain espace-plan est immédiatement répercutée à tous les niveaux.

L'axe en situation s'appuie sur des droites, des cercles et des clothoïdes. Des méthodes de raccordement peuvent être choisies et appliquées par l'utilisateur pour assurer les transitions entre ces éléments. Le logiciel indique ensuite les niveaux des lignes de projet et de terrain, ainsi que la différence. Le profil en travers se fixe finalement à partir de profils types définis sous forme de dessins paramétrés.

### 10.1.18 Logiciel VESTRA CAD

VESTRA CAD est un logiciel de conception assistée par ordinateur pour les routes urbaines et rurales et les autoroutes.

Il fonctionne selon un traitement par espaces-plans successifs. Il offre un multifenêtrage (situation, profil en long et profil en travers) et une mise à jour automatique de ces espaces-plans. Il intègre la norme allemande RAS-L pour la définition du plan de situation. Une fois le profil en long établi par l'utilisateur, le logiciel génère automatiquement le profil en travers à partir du modèle numérique de terrain. Pour ce faire, il se base sur le profil type défini par le concepteur ou retenu parmi les possibilités de la bibliothèque du logiciel.

VESTRA CAD ne permet pas de visualisation tridimensionnelle du projet. Il permet néanmoins une simulation des itinéraires et des mouvements de véhicules. Les caractéristiques de ceux-ci proviennent de la bibliothèque du logiciel, compatible aux normes allemandes RAS-K-I et EAE [17], ou sont directement définies par le concepteur.

Compléments d'information :

VESTRA CAD est l'actuel logiciel routier de CAO leader en Allemagne. Il est disponible sous quatre formats de systèmes d'exploitation, à savoir sa propre base CAO, AutoCAD, GeoMedia ou Geograf. Plus de 6'000 licences du logiciel sont actuellement installées dans le monde, avec un total de 5 licences en Suisse.