



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Simulations de trafic intégrant la détermination d'indices de performance structurale Partie 1 : Trafic

**Verkehrssimulationen mit Berechnung der strukturellen
Auswertungsindexe
Teil 1 : Verkehr**

**Traffic simulations with structural evaluation indexes
computation
Part 1 : Traffic**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
Marc-Antoine Féart
André-Gilles Dumont, Professeur EPFL**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de la construction métallique (ICOM)
Luca D'Angelo
Alain Nussbaumer, Professeur EPFL**

**Projet de recherche AGB 2010/003 sur demande du groupe de travail
recherche en matière de ponts (AGB)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Simulations de trafic intégrant la détermination d'indices de performance structurale Partie 1 : Trafic

**Verkehrssimulationen mit Berechnung der strukturellen
Auswertungsindexe
Teil 1 : Verkehr**

**Traffic simulations with structural evaluation indexes
computation
Part 1 : Traffic**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
Marc-Antoine Fénart
André-Gilles Dumont, Professeur EPFL**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de la construction métallique (ICOM)
Luca D'Angelo
Alain Nussbaumer, Professeur EPFL**

**Projet de recherche AGB 2010/003 sur demande du groupe de travail
recherche en matière de ponts (AGB)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Alain Nussbaumer, Professeur EPFL (ICOM)

Membres

Luca D'Angelo (ICOM)

Marc-Antoine Fénart (LAVOC)

André-Gilles Dumont, Professeur EPFL (LAVOC)

Commission d'accompagnement

Président

Jean-Christophe Putallaz

Membres

Manuel Alvarez

Stéphane Cuennet

Hans Rudolf Ganz

Auteur de la demande

Groupe de travail recherche en matière de ponts (AGB)

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1 Introduction générale	13
1.1 Problématique	13
1.2 Objectifs du projet de recherche	13
1.3 Démarche globale	14
1.4 Cas d'étude : méthodologie	15
2 Introduction	17
2.1 Situation de la normalisation	17
2.2 Etat de l'art	18
3 Méthodologie spécifique partie Trafic	23
3.1 Données routières	26
3.2 Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)	26
3.2.1 Installations de comptage	26
3.2.2 Format de données	27
3.2.3 Classes de véhicules	27
3.3 Weigh in Motion (WIM)	28
3.4 Catégories de véhicules poids lourds	30
3.5 Catégories de véhicules sélectionnées pour les études de cas	31
3.5.1 Cas d'étude avec évaluation à la fatigue	31
3.5.2 Influence d'une limitation à un poids de 100kN sur le dimensionnement des chaussées	32
3.5.3 Cas d'étude sans limitation inférieure de poids à 100kN	33
4 Passerelles entre outils	35
4.1 Préparation des données routières	35
4.1.1 Données WIM	35
4.1.2 Données CSACR	36
4.2 Automatisation des traitements statistiques	36
4.3 Intégration au logiciel de simulation de trafic	37
4.4 Exportation du logiciel de simulation de trafic	38
4.5 Intégration dans les logiciels partie « structure »	39
5 Analyse de données routières	41
5.1 Répartitions horaires	41
5.2 Longueur totale des véhicules	41
5.3 Vitesse des véhicules	43
5.4 Analyses spécifiques aux véhicules poids lourds	46
5.4.1 Vitesse	46
5.4.2 Masse des véhicules, répartition par axe	50
5.4.3 Relations entre caractéristiques	52
5.5 Mise en application de la RPLP et introduction aux 40 tonnes	54
6 Comportement des usagers	59
6.1 Comportement global des usagers de la route	59
6.1.1 Longueur du véhicule	60
6.1.2 Largeur du véhicule	60
6.1.3 Vitesse	60

6.1.4	Acceptation de la vitesse	60
6.1.5	Accélération	62
6.1.6	Décélération	63
6.1.7	Distance intervéhiculaire à l'arrêt.....	64
6.1.8	Temps intervéhiculaire	65
6.1.9	Temps maximum d'attente.....	67
6.1.10	Acceptation de guidage	67
6.1.11	Dépassement par la droite	67
6.1.12	Changement de voie imprudent.....	68
6.1.13	Circulation en voie rapide après dépassement	68
6.1.14	Temps de réaction (en conduite, à l'arrêt)	68
6.2	Positionnement latéral et comportement spécifique	69
6.2.1	Comportement sur le tronçon d'entrée d'autoroute (Morges-Est)	72
6.2.2	Comportement sur le tronçon de sortie d'autoroute (Morges-Est)	77
6.2.3	Risques de conflit dans les zones de changements de voies	79
6.2.4	Positionnement latéral	81
6.3	Modèle de circulation des poids lourds.....	92
7	Cas d'étude.....	95
7.1	Denges.....	95
7.2	Mex – Maladière – Ecublens – Morges – Genève Aéroport.....	105
7.3	Monte Ceneri	106
7.4	Aarwangen	117
8	Performance des chaussées	131
8.1	Dimensionnement et renforcement des chaussées	131
8.2	Coefficients d'équivalence	133
8.3	Orniérage	134
8.4	Chaussées sur ouvrage d'art.....	135
8.5	Indice de performance relatif aux chaussées	136
9	Etudes complémentaires	139
9.1	Taux de poids lourds.....	139
9.2	Répartition entre voies	139
9.3	Limite de longueur des véhicules poids lourds	140
10	Conclusions partie 1.....	143
10.1	Implications pour la pratique	143
10.2	Effets potentiels sur la normalisation et la législation	143
10.3	Proposition de recherches ultérieures	144
11	Conclusions générales.....	147
	Glossaire.....	149
	Bibliographie	151
	Clôture du projet	153
	Index des rapports de recherche en matière de route	157

Résumé

L'objectif de cette recherche est de combiner les deux domaines que sont la simulation du trafic et la détermination de la performance structurale afin de mieux appréhender l'effet du trafic lourd sur les chaussées et les ouvrages d'art routiers, neufs ou existants, ceci en recourant à des simulations de trafic adaptées. Les résultats de la recherche ont été séparés en deux parties qui se rejoignent dans une méthodologie complète permettant l'évaluation structurale des ouvrages d'art et des chaussées. Le présent rapport, Partie 1, concerne le trafic et l'effet de celui-ci sur les chaussées. Le second rapport, Partie 2, présente les résultats de la recherche concernant l'évaluation structurale des ponts routiers sous l'effet du trafic, en particulier vis-à-vis de la fatigue. Afin d'en faciliter la lecture, une introduction et des conclusions générales communes aux deux rapports sont incluses dans chacun de ceux-ci.

La suite de ce résumé concerne la partie 1. Sur la base d'investigations statistiques basées sur les comptages routiers et les stations de pesage en marche, d'études vidéo et d'accidentologie, il a été possible de déterminer un modèle de comportement des poids lourds. Grâce à ce modèle adapté à chaque situation spécifique, à chaque cas d'étude, il est alors possible d'évaluer de manière précise les effets du trafic passé, actuel et futur.

La démarche proposée dans cette recherche pourra non seulement être utilisée afin de définir le trafic sollicitant les infrastructures routières mais pourra servir de base à d'autres études requérant des simulations de trafic.

L'étude a mis en évidence la nécessité de mener des recherches locales plutôt que de se baser sur un modèle appliqué à l'échelle nationale en termes de charges de trafic. D'une région à l'autre, d'un axe routier à l'autre, les variations de trafic que ce soit du point de vue du débit (nombre de véhicules), des caractéristiques des véhicules, des modèles de charges (poids, répartition des poids) sont telles qu'il est recommandé d'étudier chaque cas de manière spécifique. Les résultats établis et les démarches proposées dans ce document permettent d'atteindre, en fonction du détail souhaité, adapté à chaque cas étudié, un modèle de trafic routier.

Il avait été constaté dans de précédents mandats que des réserves importantes en matière d'évaluation structurale étaient dues aux modèles de charges proposés dans les normes SIA. Les simulations de trafic telles qu'établies dans ce mandat permettent de définir le trafic sollicitant réellement l'ouvrage et d'estimer les sollicitations futures de manière plus précises.

Les développements en termes d'analyses de trafic, d'estimations, de simulations et les différentes études menées dans ce projet permettront également de servir de bases aux recherches concernant la révision des normes de dimensionnement et de renforcement des chaussées.

Le but ultime de cette recherche est de combiner de manière efficace l'utilisation de simulations de trafic basées sur des données réalistes avec l'évaluation de la performance structurale des infrastructures routières.

Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist der Bereich der Verkehrssimulation mit dem Bereich der strukturellen Leistungsbestimmung zu kombinieren, um anhand angemessenen Verkehrssimulationen die Auswirkung des Schwerverkehrs auf Fahrbahnen und neue oder bestehende Straßenbrücken besser angehen zu können. Die Resultate dieses Forschungsprojekts sind in zwei Teilen aufgeteilt und begegnen sich in einer umfassenden Methodik, die die strukturelle Bewertung der Kunstbauten und Fahrbahnen ermöglicht. Der vorliegende Bericht, Teil 1, bezieht sich auf den Verkehr und dessen Auswirkung auf die Fahrbahnen. Der zweite Bericht, Teil 2, stellt die Resultate der strukturellen Bewertung von Straßenbrücken unter Verkehrsbelastung in Bezug auf Ermüdung dar. Für eine gute Lesbarkeit sind allgemeine gemeinsame Einführung und Schlussfolgerungen in jedem Bericht enthalten.

Diese Zusammenfassung betrifft jetzt Teil 1. Auf Basis der statistischen Untersuchungen basierend auf den Strassenzählungen und den Wiegeanlagen in Betrieb, von Videoanalysen und der Unfallursachenforschung, war es möglich ein Verhaltensmodell der Lastkraftwagen zu ermitteln. Dank diesem Modell, das auf jede spezifische Situation angepasst ist, bei jedem Forschungsfall, ist es also möglich die vergangene, jetzige und die zukünftige Auswirkung des Strassenverkehrs genau einzuschätzen.

Die in dieser Untersuchung vorgeschlagene Vorgehensweise wird nicht nur den Verkehr bestimmen können der das Verkehrsnetz beansprucht, sondern ebenfalls anderen Untersuchungen, die eine Verkehrssimulationen erfordern als Basis dienen.

Die Studie hat deutlich gemacht, dass lokale Untersuchungen der Verkehrslasten wesentlich notwendiger sind als sich auf angewandte Grundlagen auf nationaler Ebene zu stützen. Von einer Region zur Anderen, von einer Strasse zur Anderen, sei es von Sicht der Menge (Anzahl Autos), von Sicht der Autocharakteristiken, der Lastmuster (Gewicht, Gewichtsverteilung), sind die Unterschiede so gross dass geraten wird jeden Fall einzeln zu untersuchen. Die in diesem Bericht erstellten Ergebnisse und die vorgeschlagenen Vorgehensweisen erlauben es, gemäss dem gewünschten Detail und an jeden untersuchten Fall angepasst, ein Verkehrsmuster zu erstellen.

Es wurde bereits in vorherigen Mandaten festgestellt dass erhebliche Reserven in Sachen struktureller Auswertung dem von der SIA vorgeschlagenen Lastmodell zuzuschreiben sind. Die Verkehrssimulationen wie sie in diesem Mandat erstellt wurden ermöglichen es den Verkehr zu bestimmen der das Bauwerk wirklich beansprucht und die zukünftigen Beanspruchungen präziser einzuschätzen.

Die Entwicklungen in den Bereichen der Verkehrsanalyse, der Einschätzungen, der Simulationen und der verschiedenen, in diesem Forschungsprojekts durchgeführten Studien werden ebenfalls als Grundlage für Untersuchungen im Bereich der Neuverfassung der Normen bezüglich Dimensionierung und der Verstärkung der Fahrbahnen dienen.

Ziel dieser Untersuchungen ist es hauptsächlich die Anwendung der auf realistischen Daten basierenden Verkehrssimulationen effizient mit der Auswertung der strukturellen Leistungen der Strasseninfrastrukturen zu verbinden.

Summary

The objective of this research project is to combine the two domains of traffic simulation and structural performance determination in order to better understand heavy traffic effect on pavement and road bridges, both new and existing ones, by using adapted traffic simulations. The results of the research have been divided in two parts, which join in a complete methodology allowing for the structural assessment of road bridges and pavements. This report, Part 1, deals with traffic and the effect of it on pavement. The other report, Part 2, presents the results of the research regarding the structural assessment of road bridges under traffic load, in particular against fatigue. In order to facilitate the reading, common general introduction and conclusions to both reports are included in each one of them.

This summary deals now with Part 1. Thanks to statistical investigations based on traffic counts and weigh-in-motion stations, video studies and accidentology, it has been possible to determine a behaviour model for heavy goods vehicles. Based on this model adapted to each specific situation and each case study, it is then possible to precisely evaluate the effects of past, present and future traffic.

The procedure proposed in this research can be used not only to define the traffic that induces stresses on road infrastructures but also for any study base requiring traffic simulations.

This study has highlighted the necessity of conducting local research and not depending on a model applied on the national scale in terms of traffic loads. From one region to another, from one main road to another, traffic variations - whether from the point of view of flow (number of vehicles), vehicle characteristics, or load models (weight, weight distribution) - are such that it is recommended to study each case specifically. The results established and procedures proposed in this document enable - according to the detail required, adapted to each case study - a road traffic model to be obtained.

It had been observed in previous mandates that significant reservations with regard to structural evaluation were the result of the load models proposed in SIA standards. Traffic simulations as established in this mandate allow the definition of the traffic that actually induces stresses on engineering structures and estimation of future stresses in a more precise manner.

The developments in terms of traffic analyses, estimations, simulations and the different studies conducted in this project will also serve as bases for research concerning the revision of road dimensioning and reinforcement standards.

The ultimate aim of this research is to effectively combine the use of traffic simulations based on realistic data with the evaluation of the structural performance of road infrastructures.

1 Introduction générale

1.1 Problématique

Les chaussées routières et les ouvrages d'art routiers sont des infrastructures publiques de grande valeur patrimoniale et financière. En cas de défaillance d'un réseau d'infrastructures, la société subit des désagréments en termes économiques (attractivité, compétitivité, emplois, perte de patrimoine) mais également en termes sociétaux (liberté de déplacement, accessibilité, bien-être, qualité de vie).

Les décisions politiques, les développements urbains, régionaux ou nationaux entraînent des aménagements ou des modifications des réseaux et infrastructures de transports et plus globalement une re-planification du système des transports dans son ensemble.

Ces différentes raisons impliquent une réévaluation continue du trafic, des infrastructures routières ainsi que des ouvrages d'art autant du point de vue fonctionnel que de la sécurité. Afin d'y parvenir, il est nécessaire de disposer de meilleures estimations tant en matière de simulations de trafic que d'évaluation structurale des éléments des infrastructures routières.

Les outils de simulations de trafic actuels permettent d'obtenir une vision réaliste du trafic routier à des échelles de temps (prévisions futures, trafic passé ou actuel) et d'espace (tronçon routier, quartier, ville, région) différentes. Dans ces modèles de trafic, les poids lourds, ne serait-ce mise à part la place qu'ils prennent sur la route, sont généralement peu considérés.

En matière d'évaluation structurale des ouvrages d'art, que l'on parle d'ouvrages neufs ou existants, plusieurs projets de recherche précédents [1], [2], [3] ont démontré la nécessité d'évaluer le trafic poids lourds de manière réaliste. Du point de vue du dimensionnement et des dégradations des chaussées, le trafic poids lourds occupe également un rôle prédominant. Les analyses et modélisations de trafic menées dans le cadre de ce projet visent donc à évaluer spécifiquement le trafic poids lourds et ses effets.

Lorsque l'on étudie la vérification et l'évaluation de la durée de vie d'ouvrages d'art, ce sont les calculs en fatigue qui sont les moins précis, de par le nombre d'hypothèses faites. Il a été démontré de nombreuses fois que le résultat dépend principalement des hypothèses faites d'une part sur la modélisation du trafic poids lourds (notons que le modèle de charge équivalent en fatigue est très conservateur) et d'autre part sur la fonction d'endommagement (CAFL de la courbe de fatigue, cumul de dommage). Les analyses et modèles développés dans le cadre de ce projet visent donc à proposer une méthodologie plus performante pour l'évaluation de la durée de vie en fatigue d'ouvrages individuels (en matière de géométrie et de chargement).

1.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche est de combiner les deux domaines que sont la simulation du trafic et la détermination de la performance structurale. Ceci est réalisé par la **création de passerelles entre les différents outils** à disposition des ingénieurs en matière d'analyses de trafic routier (outils statistiques, logiciels de simulations de trafic) et les modules d'évaluation d'indices de performance structurale des ouvrages d'art (états-limites ultimes et fatigue) et des chaussées (endommagement, orniérage), similairement aux degrés de conformité de la SIA 269. Le comportement et les caractéristiques spécifiques du trafic poids lourds ont été intégrés sous forme de bases de données et de modèles de comportement afin **d'établir une procédure pour des simulations de trafic réalistes**. Pour plusieurs exemples d'ouvrages, les historiques de chargement sur ceux-ci ont été déterminés et validés.

De plus, ce projet de recherche vise à **améliorer la méthodologie d'évaluation de la sécurité structurale des ouvrages d'art existants, de leur durée de vie restante ainsi que des dégradations des chaussées soumis au trafic routier**. Il propose une nouvelle approche probabiliste, permettant de redéfinir à la fois les courbes de fatigue et la valeur critique du cumul de dommage, en réanalysant les résultats expérimentaux sous amplitude constante (CA) et variable (VA). Pour les spectres de différences de contrainte ayant une faible à très faible proportion de cycles au-dessus de la limite de fatigue (CAFL), des améliorations sont proposées pour l'évaluation de l'évolution de l'endommagement. Les outils développés ont une validité générale, mais n'ont été utilisés ici qu'avec des assemblages soudés.

Les différentes passerelles et méthodologies développées dans ce projet de recherche permettent ainsi d'offrir de **nouveaux outils pour l'estimation de l'évolution de dégradations** et ainsi contribuent à l'aide à la décision dans le domaine de la gestion des infrastructures liées au trafic routier.

1.3 Démarche globale

L'approche globale est résumée à la Fig. 1. Les données routières nécessaires à la connaissance du trafic sur les tronçons considérés sont issues de deux types de dispositifs de comptage différents. D'une part les données issues du CSACR (Comptage suisse automatique de la circulation routière) qui répertorient les passages de tous les véhicules et d'autre part les données du réseau de comptages WIM (Weigh in Motion, pesage en marche) qui relèvent des informations relatives aux passages des poids lourds. Les fichiers de données brutes contiennent des informations relatives à la station de comptage, de réinitialisation du compteur ou des erreurs de mesures qui doivent être « nettoyées » avant l'analyse de ces données. De plus, les types de données brutes diffèrent d'une station de comptage à une autre. Pour ces raisons, des scripts de nettoyage et de formatage des jeux de données ont été créés sous le système d'exploitation MS-DOS (*.bat).

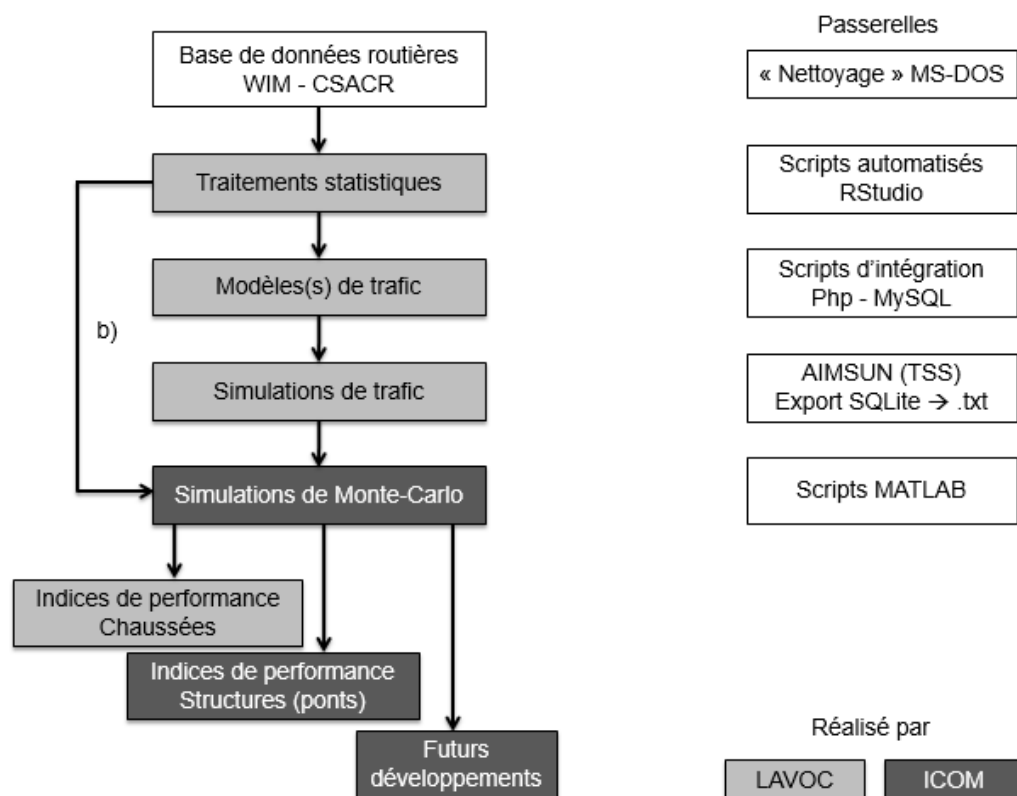


Fig. 1 Démarche globale de l'étude.

Les traitements statistiques (répartition horaire du trafic, caractéristiques des véhicules) sont effectués à l'aide de scripts automatisés développés dans le logiciel de traitement statistique RStudio (langage de programmation R).

Les matrices de trafic origine-destination ou les états de trafic localisés accompagnés des mouvements tournants issus des traitements statistiques et les caractéristiques de comportement et des véhicules sont intégrés dans le logiciel de simulations de trafic AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) développé par la société TSS (Transport Simulation Systems). Cette étape s'effectue par le biais de scripts de formatage développés dans le langage de programmation PHP (langage impératif orienté objet) liés à des bases de données MySQL. Différents modèles et simulations de trafic sont réalisés à l'aide d'AIMSUN.

Les informations générées en des points du réseau modélisé lors des simulations de trafic sont exportées via l'outil SQLite (intégré à AIMSUN), outil qui effectue automatiquement la génération de bases de données compatibles dans le langage SQL (manipulation de bases de données relationnelles). Les différentes informations récoltées finalisent la partie de l'analyse relative au trafic routier et sont ensuite transformées au format texte (*.txt) pour procéder à la partie de l'évaluation structurale. Remarquons que, pour des cas simples de trafic, il est également possible de court-circuiter la partie simulation de trafic (voir Fig. 1, plan (b)) et d'effectuer une utilisation directe des données de trafic routier traitées statistiquement (répartition horaire du trafic, caractéristiques des véhicules) afin de générer une suite de véhicules circulant à vitesse constante sur un pont ou une section de chaussée.

Certaines données statistiques caractéristiques des véhicules poids lourds ne peuvent être intégrées de manière correcte dans le logiciel de simulation de trafic (i.e. charges par axes, masse totale) en raison de leur type spécifique de lois statistiques (lois non-normales). Afin de compléter par ces valeurs les caractéristiques de chaque véhicule ayant passé, et déterminer les effets d'actions, des simulations de Monte Carlo sont menées à l'aide de scripts MATLAB.

De ces simulations de Monte Carlo on évalue d'une part l'endommagement des chaussées (orniérage, durée de vie résiduelle, renforcement éventuel) (Rapport, Partie 1) et d'autre part la sécurité structurale et à la fatigue des ouvrages d'art (Rapport, Partie 2).

1.4 Cas d'étude : méthodologie

L'étude d'un cas concret se déroule selon une méthodologie qui suit la démarche globale explicitée ci-dessus, avec les précisions suivantes. Dans la phase globale de définition du projet, on étudie tout d'abord la localisation et la situation des sections de route/ouvrages sélectionnés. Du point de vue structural, la typologie générale de l'ouvrage est définie (type de matériaux utilisés, type de chaussée, dimensions, composition). Du point de vue routier, le type de trafic sollicitant l'ouvrage est déterminé de même que la géométrie routière en plan et en profils en long et en travers.

On aborde ensuite les phases plus détaillées. Premièrement, le périmètre d'étude est défini de sorte que les différents éléments influant sur le trafic soient pris en compte dans l'analyse routière (influence des systèmes de signalisation, feux, priorités, ronds-points, générateurs de trafic tels industries, commerces, zones industrielles, quartiers d'habitations, villages environnants, ...). Deuxièmement, on détermine également le catalogue des diverses classes de véhicules qui seront considérées ainsi que les hypothèses nécessaires pour les modèles routiers et de comportement. Pour ceci, on définit une période d'analyse relative au traitement statistique des données routières. Troisièmement, l'ouvrage/la route à vérifier est modélisé de manière à obtenir les sections et détails à vérifier et, pour les ponts, les fonctions de transfert correspondantes (i.e. lignes d'influence, relations charge-contrainte, ou fonctions d'état limite pour l'analyse de fiabilité). Pour la chaussée, plusieurs exemples sont traités dans ce rapport (Partie 1 : Trafic). Quant à la modélisation d'un ouvrage, elle est présentée pour un cas d'étude (Pont sur la Venoge, A1) mais est considérée comme faisant partie du domaine

d'expertise de l'ingénieur en charge du projet, elle ne fait donc pas l'objet de cette recherche.

Finalement, les simulations de trafic et Monte-Carlo peuvent démarrer. L'accent est mis sur l'état limite de fatigue, les courbes S-N, qui expriment la résistance en fatigue du détail à vérifier, et la fonction d'état limite pour l'analyse de fiabilité, étant redéfinies. Elles utilisent une nouvelle approche probabiliste, présentée dans le second rapport (Partie 2 : Fatigue).

2 Introduction

La première partie de cette recherche est orientée sur l'étude et l'analyse du trafic routier. Élément déterminant de l'évaluation structurale des ouvrages d'art et du dimensionnement, renforcement et de la caractérisation de l'endommagement des chaussées, la précision de l'évaluation de celui-ci détermine la véracité du résultat final souhaité.

Des analyses statistiques détaillées et localisées, des simulations de trafic proches de la réalité en intégrant au possible les paramètres influents, la détermination des limites des modèles de trafic intégrés et des propositions de solutions sur ces limites ont permis d'obtenir des résultats concordants.

Généralement, le trafic poids lourds n'est que peu considéré, excepté pour la place prise géométriquement, dans les simulations de trafic. Or en matière d'effets mécaniques sur les infrastructures routières, on peut considérer que seul celui-ci a une influence. Pour cette raison, un accent particulier sur le trafic poids lourds sera appliqué dans cette recherche.

2.1 Situation de la normalisation

Ce chapitre est consacré à la normalisation en vigueur touchée par les différents sujets de cette étude. Des remarques, objectifs et propositions de recherche sont également développés pour chaque thématique.

En matière de traitements statistiques des données routières de même que pour l'utilisation de simulations de trafic, il n'existe pas d'exigence normative.

Données de trafic, recensement

En matière de catalogues de données de trafic et de banques de données, les normes SN 640 940 de novembre 1993, SN 640 940-1 de juin 2001, SN 640 948 de juin 2001, SN 640 948-1 de juin 2001, SN 640 948-2 de juin 2001 et SN 640 909 d'août 1990 s'appliquent. Les courbes caractéristiques de variation et trafic journalier moyen se réfèrent à la norme SN 640 005b d'août 2010. En matière de recensement du trafic, les principes de base sont donnés dans la norme SN 640 000 de mai 1988.

Ces normes servent de base à la récolte, à l'utilisation et au traitement, notamment dans le cadre de la télématique routière, de banques de données routières.

Les banques de données utilisées, les échantillons sélectionnés, les différentes lois statistiques évaluées, les classes et classifications proposées respectent les prérogatives normatives.

Poids lourds, trafic pondéral

En matière de dimensionnement de superstructure routière pour la détermination du trafic pondéral équivalent dans le cadre de projets de construction, d'élargissement ou de renforcement de chaussées, la norme SN 640 320 d'août 2011 s'applique.

Dans le cas offrant le niveau de détail le plus important, le trafic pondéral est considéré sous la forme de la somme des charges d'essieux des véhicules déterminants parcourant la section à dimensionner ou renforcer pour une durée d'utilisation prévue. Toutefois, dans le cadre de matériaux viscoélastiques tels que les enrobés bitumineux, la succession, la durée d'application des charges, les temps de repos, caractéristiques d'un comportement dynamique, ont un effet important [4].

Est considéré comme poids lourds au sens de la norme tout véhicule dont le poids maximal autorisé dépasse 3.5 tonnes. Afin d'estimer le nombre de poids lourds, la norme propose le recensement du nombre de véhicules d'une longueur totale de plus de 6 mètres. Une vérification de cette hypothèse est détaillée au chap. 9.3.

Le trafic pondéral pour la durée d'utilisation prévue est estimé à partir d'un taux annuel fixe de croissance.

A l'aide des simulations de trafic réalisées, il est possible de déterminer un histogramme de chargement de l'infrastructure routière et ainsi de pouvoir considérer l'effet dynamique des charges de trafic. De même, des scénarios d'évaluation à long terme du trafic permettent d'intégrer facilement des taux de croissance variables.

Dimensionnement et renforcement des chaussées

Le dimensionnement des chaussées est régi par la norme SN 640 324 d'août 2011. En fonction de caractéristiques du sol (portance) et du trafic sollicitant l'infrastructure, la norme propose un catalogue des structures de chaussées. Un dimensionnement au gel de la structure doit également être évalué.

Le renforcement des chaussées bitumineuses (SN 640 733b d'octobre 1997 pour le renforcement avec revêtement bitumineux et SN 640 735b d'août 2010) est effectué à l'aide de mesures de déflexion réalisées sur l'infrastructure routière. En fonction du relevé d'état de la chaussée, des mesures de déflexions, du trafic et de conditions locales, le renforcement nécessaire peut être déterminé à l'aide d'abaques (revêtements bitumineux) ou de mesures préconisées (revêtements béton).

Ces normes feront l'objet d'une réflexion dans le cadre du projet de recherche REDIRE (VSS 2008/505).

Dégradations des chaussées, gestion de l'entretien routier

Les normes qui relèvent de la gestion de l'entretien routier sont les normes SN 640 900a de décembre 2003, SN 640 904 de juin 2003, SN 640 925b de juin 2003 et SN 640 926 d'avril 2005, SN 641 820 de juillet 2006.

Des processus globaux ou de planification, des objectifs, mesures, coûts de gestion de l'entretien des infrastructures routières de même que l'appréciation de l'état sont proposés pour différents systèmes partiels (chaussées et chemins, ouvrages d'art, installations électromécaniques, réseaux enterrés, installations annexes et objets particuliers). Les dégradations des chaussées, appréciées par relevé, y sont transcrites sous forme d'indices d'état (valeurs numériques).

L'estimation des dégradations susceptibles d'apparaître en tenant compte du trafic routier parcourant la chaussée n'est pas définie dans la normalisation.

2.2 Etat de l'art

Evaluation d'ouvrages d'art à partir du trafic

L'évaluation d'ouvrages d'art à partir de modèle de charge de trafic a fait l'objet de plusieurs mandats de recherche [1], [2], [3]. Ceux-ci ont notamment permis d'actualiser les modèles de charges proposés dans les normes SIA (structures porteuses).

Selon [1], des disparités significatives entre les différents axes routiers en fonction de leur typologie de trafic ont été mises en évidence. Ce qui conforte l'opinion que chaque projet doit être traité en fonction des données de trafic y relatives et non en fonction d'un modèle global proposé à l'échelle nationale. Ce projet de recherche a également permis de définir différentes classes de poids lourds et d'analyser statistiquement certaines

propriétés de ces classes (poids total, relations poids total – poids par essieux, géométrie ...) qui seront également reprises dans cette recherche.

Dans le cadre de [1], un logiciel de simulation de trafic flexible a été développé et a permis de définir les efforts maximaux et les effets dynamiques du trafic (simulations type Monte Carlo). Toutefois certaines hypothèses effectuées limitent les possibilités de simulation de trafic :

- Chaque voie de trafic est générée séparément, la définition du trafic simulé pour chaque voie devant être fixée au départ (volume de trafic, types de véhicules et proportion des types de véhicules).
- Modélisation de la circulation très simplifiée : deux conditions possibles, une situation de congestion (colonne de véhicules circulant au pas) et une situation de trafic fluide (colonne de véhicules circulant à 80 km/h).

Pour ces différentes raisons, l'utilisation d'un logiciel de simulation de trafic spécialisé est donc recommandée.

Modèles de circulation

Les théories de flux de trafic, du point de vue des modèles de circulation, font l'objet d'études depuis le début des années '50 [5], [6].

De façon similaire à l'écoulement des fluides et des gaz, les modèles de circulation de trafic sont répartis en trois échelles :

- Echelle macroscopique (comportement collectif)
- Echelle mésoscopique (échelle intermédiaire, milieu continu définit localement et temporellement)
- Echelle microscopique (comportement individuel, interactions)

La physique du trafic, l'explication de phénomènes de congestion, ont fait l'objet de plusieurs études et recherches se basant sur les domaines de la physique et des mathématiques. On citera notamment pour exemple [7], [8], [9] et [10]. Un état de l'art spécifique aux différents modèles de circulation existants est décrit dans [11].

Du point de vue des modèles relatifs aux poids lourds, une étude récente met en évidence les incidences des systèmes coopératifs des poids lourds basées sur des simulations de trafic [12]. Toutefois, ces considérations ne tiennent pas compte de l'influence du point de vue des charges de ce type de « convoi » sur les infrastructures routières.

Quelques études prennent en compte l'interaction entre les véhicules légers et les poids lourds sans toutefois proposer un modèle de circulation spécifique à ce type d'utilisateur ([13], [14] et [15]).

En matière de modèles de circulation et de comportement des poids lourds les références relatives aux modèles de circulation des poids lourds sont donc lacunaires, c'est pourquoi un modèle de circulation des poids lourds est proposé dans la présente étude.

Simulations de trafic

Les analyses de trafic par simulation étant de plus en plus utilisées dans le cadre de recherches routières, nombre de documents et d'articles ont été publiés sur ce sujet. L'expérience de l'équipe de recherche dans le domaine de simulations de trafic a déjà été prouvée dans plusieurs mandats de recherche ([16], [17], [18] et [19]).

Un guide proposé par la Federal Highway Administration (U.S.) propose une démarche pour l'application de simulation de trafic dans des logiciels spécialisés [20] (Fig. 2). C'est sur cette base qu'est abordée la méthodologie du chapitre 3. (Fig. 4).

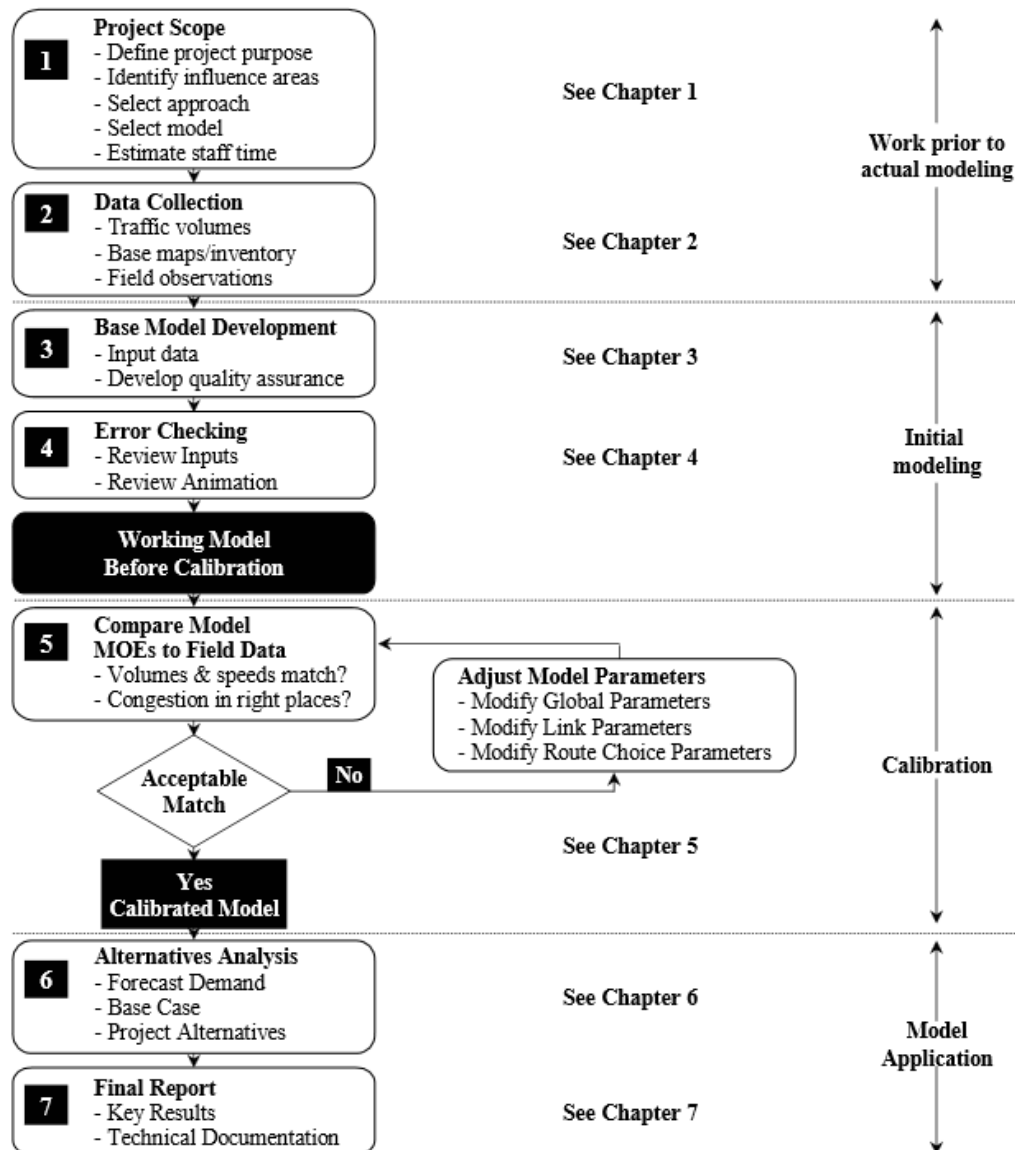


Fig. 2 Méthodologie de simulation de trafic selon [20].

Dégradations des chaussées en fonction du trafic

Une des dégradations spécifiques liée au trafic de poids lourds est l'orniérage des chaussées. Un mandat de recherche [21] a eu pour but de décrire une méthode de prédiction de la profondeur moyenne d'ornière d'une chaussée à partir des caractéristiques du revêtement bitumineux, de la charge de trafic, de la vitesse moyenne des poids lourds et des conditions climatiques du site étudié. Cette étude, basée sur des planches d'essai, a démontré qu'il n'existe pas de corrélation directe entre la charge de trafic exprimée sous forme d'essieux équivalents et la profondeur d'ornière. La corrélation directe entre la vitesse des poids lourds et la profondeur d'ornière n'est également pas démontrée, toutefois, il semblerait que plus la vitesse est faible, plus la profondeur d'ornière est importante (durée d'application de la charge plus importante). Les situations de congestion (circulation au pas) sont donc néfastes en termes d'orniérage des chaussées.

La méthode prédictive de la profondeur d'ornièrerie T propose la formule suivante :

$$T = C_{\theta} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{C_w \cdot W}{1000 \cdot C_v} \right)^{\beta} + \delta$$

où C_{θ} est un coefficient de calage dépendant de la température maximale de retour pour une période de 20 ans, α et β sont des coefficients expérimentaux déterminés sur la base d'un essai d'ornièrerie à l'ornièrerieur LPC. α représente la profondeur d'ornières à 1000 cycles et β la pente de la droite d'ornièrerie dans un système d'axes en coordonnées logarithmiques. C_w est une constante de calage, W est la charge de trafic équivalent total exprimée en essieux équivalents [ESAL] pour la durée de service considérée, C_v est une variable dépendante de la vitesse moyenne des véhicules lourds V et δ un coefficient de calage constant.

Sur la base des simulations de trafic effectuées, il est possible d'estimer le trafic pondéral équivalent total W ainsi que la vitesse moyenne des véhicules poids lourds V . Plusieurs scénarios pourront être envisagés afin d'évaluer l'influence de chacun d'eux sur l'évolution de l'ornièrerie de la chaussée.

En matière de dimensionnement des chaussées en Suisse, la méthode actuelle est entièrement empirique. La recherche menée sur les modélisations des charges d'essieux [22] a mis en évidence que ces méthodes de dimensionnement devront être remplacées progressivement par des approches analytiques.

Le calcul du trafic équivalent étant relativement simple, il est couramment utilisé pour le dimensionnement et le renforcement des chaussées. Le trafic équivalent total W est calculé selon la norme SN 640 320 de la manière suivante :

$$W = \sum_i n_i \cdot k_i$$

où n_i est le nombre d'essieux de charge i durant la durée d'utilisation prévue et k_i le facteur d'équivalence de la charge d'essieu i .

Les facteurs d'équivalence peuvent être déterminés (de la manière la plus détaillée) à l'aide du tableau 2 de la norme SN 640 320. Ceux-ci sont dépendants de la charge d'essieu, du type d'essieu (essieu simple, tandem, tridem) et du type de chaussée (souple – semi-rigide ou rigide – combinée).

Une récente étude menée par des membres du groupe de recherche [23] a mis en évidence les différences entre les méthodes d'estimation des coefficients d'équivalence. Dans le cadre de cette étude, les hypothèses de conditions géométriques permettant la détermination du type d'essieu ont été définies sur la base de [22], [24] et [25] :

- Sont considérés comme essieux tandem les essieux composés de deux axes successifs avec un entraxe inférieur ou égal à 1.90 m.
- Sont considérés comme essieux tridem les essieux composés de trois axes successifs avec des entraxes inférieurs ou égaux à 1.90 m.

Plus de 60 silhouettes de poids lourds détectés aux comptages WIM ont été analysées. Des études de concordance et de fiabilité de ces silhouettes devraient être effectuées. Sur ces bases, les trafics simulés sont retranscrits en trafic pondéral équivalent total.

L'évolution de l'état des chaussées suit une loi sigmoïdale composée de trois phases de dégradation (Fig. 3) :

- Phase d'initiation relativement plate (durée d'environ 0 à 3 ans)
- Phase de propagation (de 3 à 20 ans)
- Phase de stabilisation (généralement non atteinte, état trop dégradé, insécurité)

La phase principale est celle de propagation de la dégradation. En admettant que cette phase peut être approchée par une loi linéaire, celle-ci deviendra ainsi indépendante de la charge de trafic ou de l'âge de la chaussée, un incrément annuel de dégradation pouvant être établi.

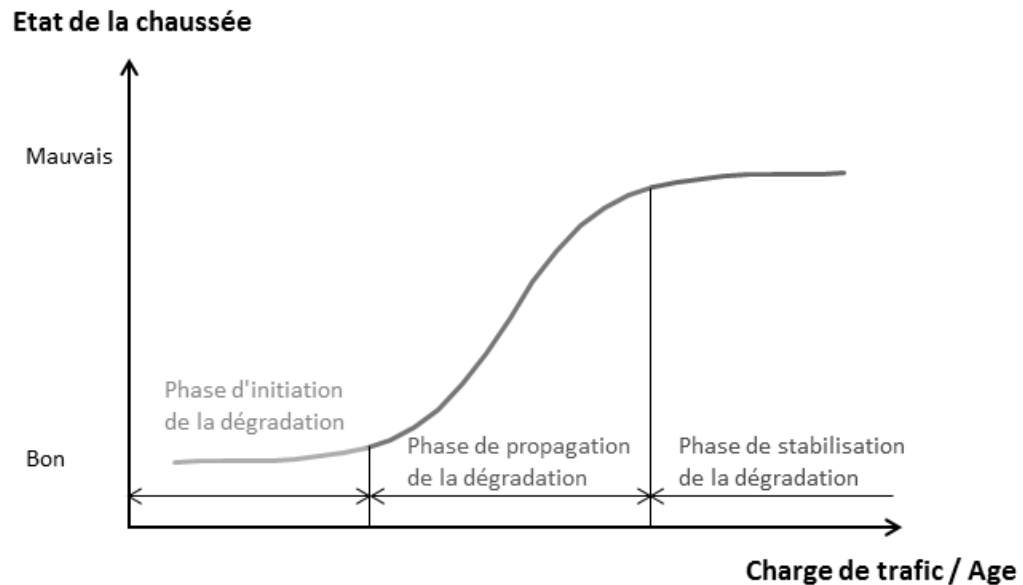


Fig. 3 Loi d'évolution sigmoïdale de l'état de la chaussée. (Echelle horizontale non-réelle).

De nombreuses lois d'évolution proposées sont dépendantes de l'âge de la chaussée ou de la charge de trafic [26], [27]. En matière de dimensionnement, la chaussée doit pouvoir répondre aux sollicitations du trafic, aux sollicitations d'origine climatique et aux phénomènes d'altération chimique pour une durée de service sélectionnée (20 ans selon la norme SN 640 324). On peut donc admettre que le seuil atteint sur la loi d'évolution de la structure de la chaussée sera celui correspondant à sa durée de service et donc au trafic pour lequel elle a été dimensionnée.

Si l'évolution du trafic n'est pas cohérente avec celle planifiée, la durée de service de la chaussée sera modifiée. Sur la base des simulations de trafic proposées et des historiques de chargement obtenus, il est alors possible de déterminer la durée de vie résiduelle de la chaussée.

Dans le cadre du renforcement des chaussées, on pourra également se baser sur les historiques de chargement et les résultats des simulations de trafic afin de définir la mesure de renforcement à adopter pour la nouvelle durée de service sélectionnée.

Bien que l'infrastructure routière doive répondre aux sollicitations pour une durée de service prévue, chaque couche de la superstructure (couche de roulement, couche de liaison, couche de base, couche de fondation en grave) a une durée de vie spécifique. Sur la base d'approches analytiques de dimensionnement des chaussées et des historiques de chargement issus des simulations de trafic, il semble alors possible d'estimer, pour chaque couche, sa durée de vie résiduelle.

3 Méthodologie spécifique partie Trafic

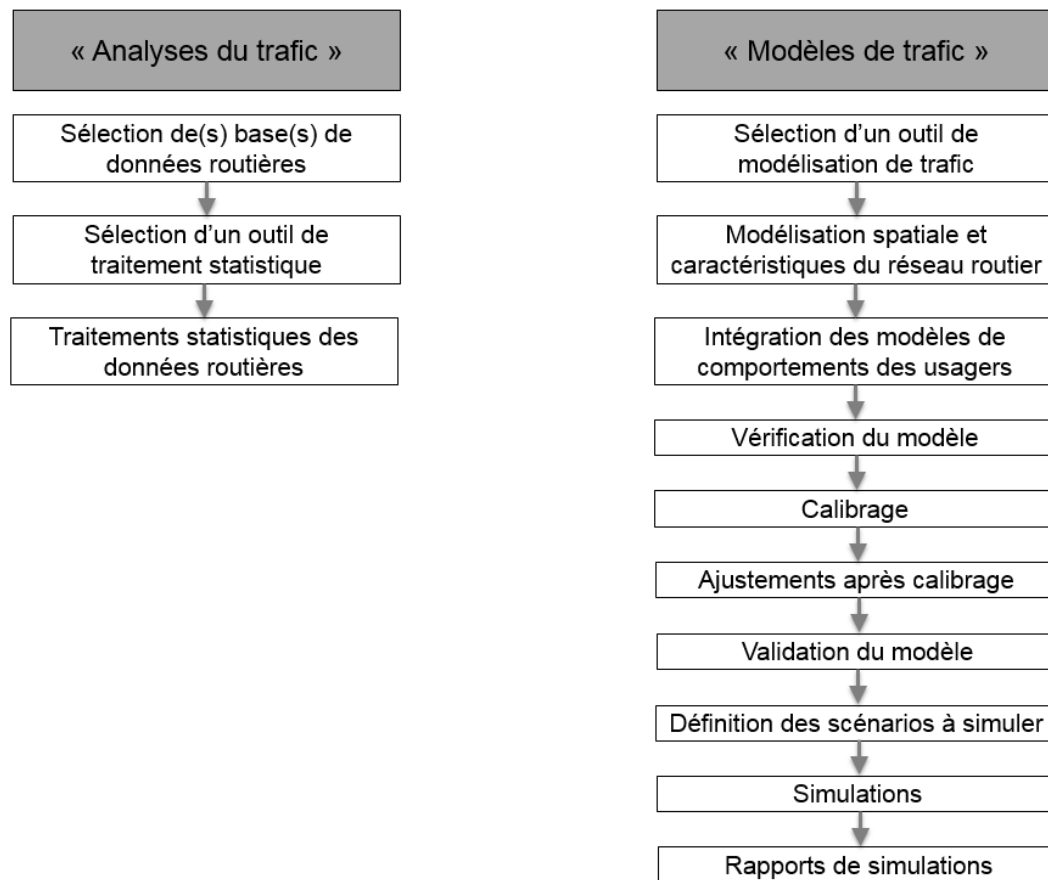


Fig. 4 Démarches « Analyses du trafic et modèles de trafic ».

Le schéma ci-dessus (Fig. 4) traite de la partie spécifique liée au trafic routier dans le cadre d'un cas d'étude.

En fonction des données à disposition dans le périmètre d'étude ou à proximité, on sélectionne les bases de données routières qui serviront aux traitements statistiques. Il peut s'agir par exemple de relevés de station de comptage (CSACR), de comptages routiers temporaires automatisés, de pesage en marche (WIM), de comptages manuels ou d'enregistrements vidéos.

Les fichiers de données routières contiennent parfois des informations sur le compteur, des valeurs de réinitialisation ou des lignes de données vides. Un pré-traitement de ces données par des scripts développés en exécutables de commandes MS-DOS (fichier batch, *.bat) permet de « nettoyer » ces informations superflues. Les types de banques de données routières différant d'une station de comptage à une autre, d'autres scripts développés sous la même forme permettent de compiler les données et de les rendre compatibles avec les scripts de traitements statistiques créés.

Afin d'effectuer le traitement statistique des données routières, le logiciel d'analyse de base de données open source RStudio, développé pour le langage de programmation R, a été sélectionné. Sur la base d'enquêtes menées par Rexer Analytics, R serait utilisé par plus de 50% des personnes qui effectuent de l'exploitation et de l'exploration de données dans le monde académique [28].

Des scripts de traitements statistiques automatiques sont développés pour analyser les données routières. Les résultats suivants sont obtenus :

- Répartitions horaires par classes de trafic déterminées sur la période d'analyse sélectionnée
- Histogrammes des longueurs de véhicules
- Histogrammes de vitesses
- Histogrammes de masses de véhicules, répartition par axes
- Relations masse totale – longueur, masse par axe – masse totale
- Espaces intervéhiculaires (distance de l'avant d'un véhicule à l'arrière de celui le précédant)

Certains de ces résultats de traitements statistiques seront directement intégrés dans les données de base du modèle de trafic, d'autres dans les modèles de comportement et dans les données nécessaires aux simulations de Monte Carlo.

Afin de procéder à la modélisation du réseau routier et des simulations des scénarios déterminés, le logiciel expert de modélisation de demande de trafic statique et dynamique et de simulation micro et mésoscopique AIMSUN développé par TSS a été sélectionné. Le choix s'est porté sur ce logiciel car il est largement utilisé dans le monde et a fait ses preuves dans le cadre de différents projets menés au sein du Lavoc ([16], [17], [18], et [19]).

La modélisation géométrique du réseau routier dans le périmètre d'étude sous les hypothèses de base déterminées est effectuée (Fig. 5). Les versions les plus récentes du logiciel AIMSUN (version 8) permettent entre autres l'importation de cartes issues de bases de données géographiques telles que OpenStreetMap (OSM) ou de fichiers issus de systèmes d'informations géographiques (SIG). Cela simplifie grandement l'opération de modélisation du réseau routier, notamment dans le cas d'utilisation de OSM, où les infrastructures routières sont automatiquement répertoriées et modélisées. Il est toutefois nécessaire de procéder à une vérification et à une correction des informations importées (nombre de voies, largeur des voies, géométrie de l'axe routier, géométrie et disposition des nœuds particuliers, vitesses légales, ...).



Fig. 5 Modélisation de l'échangeur d'Ecublens (Autoroute A1).

Les modèles relatifs au comportement des usagers de la route, issus des connaissances en la matière, des données résultant des traitements statistiques et d'autres projets réalisés sont intégrés. Les caractéristiques relatives à ces modèles de comportement sont détaillées dans les chapitres 5 et 6.

La demande de trafic peut soit être introduite sous forme de matrices origine-destination O-D, d'états de trafic (débit en un point donné, mouvements tournants) ou sous forme de bases de données en temps réel dans le logiciel AIMSUN. Dans le cadre de ce projet, on utilisera pour certains cas d'étude des matrices O-D et pour d'autres, plus complexes et où les matrices O-D sont plus difficiles à obtenir et à déterminer, des états de trafic. Des scripts permettant l'implantation des matrices O-D et des états de trafic ont été développés dans le langage de programmation libre PHP (Hypertext Preprocessor) accompagnés du système de gestion de bases de données MySQL (Structured Query Language).

Une première simulation de trafic sur la base d'un flux de trafic réaliste est engagée afin de procéder à la vérification du modèle. L'évaluation de l'écoulement des flux, l'analyse globale du comportement des usagers simulés et l'apparition d'évènements particuliers permettent de vérifier le modèle de trafic. Exemples : oubli de jonction entre deux tronçons successifs de l'axe routier et disparition du flux de véhicules, flux de véhicules important passant volontairement au feu rouge (défaut de conception du logiciel corrigé), analyse des véhicules perdus (véhicules qui pour une raison donnée, par exemple dans le cas de congestion, n'atteignent pas la destination finale prévue) [29], ...

Après cette vérification du modèle, on procède au calibrage du modèle de trafic. Cette étape permet, sur la base d'un jeu de données sélectionné, d'examiner la cohérence entre les données relevées (statistiques) et les données simulées (logiciel) et de procéder, si nécessaire, à des ajustements. Dans le cadre de ce projet, on évaluera généralement les débits des différentes classes de véhicules en certains points spécifiques du réseau et leurs vitesses respectives (moyenne, écart-type). La cohérence entre les données relevées et simulées peut être évaluée à l'aide de tests statistiques. Dans le cadre de ce projet, on a choisi le test de Kolmogorov-Smirnov, KS-Test, qui détermine si deux échantillons de données suivent bien la même loi statistique. De plus, on évalue la conformité des caractéristiques techniques (dimensions géométriques, consommation, émission, ...) et comportementales (vitesse, acceptation de vitesse, accélération, décélération, dépassement, coopération avec les autres véhicules, sensibilité,...) des différentes classes de véhicules intégrées.

Une fois les ajustements nécessaires effectués, on procède à la validation du modèle. Cela consiste à nouveau à comparer, sur la base d'un second jeu de données indépendant (ex : états de trafic d'un autre jour que celui utilisé pour le calibrage ou d'une autre heure de la journée), que le modèle simule bel et bien une réalité perçue (données statistiques enregistrées).

Les différents scénarios dont on peut mentionner : estimations futures, estimations du trafic passé, modifications des attributions de l'espace de la chaussée (interdiction de dépasser pour les poids lourds), modifications des flux de trafic (nouveau centre logistique, création d'une zone commerciale, nouveaux quartiers d'habitations ou d'activités), modifications géométriques du réseau ou des conditions de circulation (diminution du nombre de voies, bande d'arrêt d'urgence active, abaissement de la vitesse légale) peuvent alors être simulés. Dans le cadre de ce projet, seules les estimations futures et passées du trafic ont été sélectionnées.

Les résultats des scénarios de simulations, dont la pertinence se doit d'être contrôlée, sont transcrits sous forme de rapport (écrit) et de fichiers de résultats rendus compatibles pour l'étape suivante à savoir les simulations de Monte Carlo. AIMSUN propose l'enregistrement des données simulées dans une base de données relationnelle intégrée, SQLite, dont les résultats peuvent être facilement exportés au format texte (*.txt), Excel (*.xls, *.csv) ou traités à l'aide de codes SQL.

Des différentes études de cas menées, on a pu constater que les répartitions des longueurs des véhicules de même que les répartitions des masses ne suivent pas des lois statistiques normales. Le logiciel de simulation AIMSUN ne permet d'intégrer comme caractéristiques des classes de véhicules uniquement des informations sous forme de lois normales et les véhicules y sont considérés comme un point unique (pas de modélisation directe des axes, ni de positionnement transversal). Afin d'obtenir un jeu de

données réalistes pour l'analyse structurale, il a donc été nécessaire de procéder à des simulations de Monte Carlo qui ont permis de décrire, pour chaque véhicule simulé, des caractéristiques géométriques (longueur, écartements des axes) et de masse (masse totale et masse par axes). Cette étape a été effectuée par le biais de scripts développés dans le langage de programmation mathématique MATLAB (Rapport partie 2).

Des informations issues de la combinaison de la définition du projet, des analyses statistiques, des rapports de simulations et des simulations de Monte Carlo, on obtient un jeu de données réalistes dont l'historique des charges, selon les scénarios simulés.

Sur la base de ce jeu de données, l'évaluation de la performance des chaussées (évaluation de l'orniérage, évaluation de la durée de vie résiduelle, dimensionnement et renforcement des chaussées) ainsi que l'analyse des ouvrages d'arts, ponts (évaluation de l'évolution de l'endommagement, durée de vie résiduelle, efforts maximaux, évaluation du degré de conformité en termes de résistance en section et à la fatigue) sont effectuées. De ces analyses, on déterminera alors la conformité des infrastructures (ponts, chaussées) et leurs indices de performance respectifs.

3.1 Données routières

Dans le cadre de ce projet, on s'intéresse plus particulièrement aux véhicules poids lourds car ce sont eux qui sollicitent de manière déterminante les chaussées et les ouvrages d'arts des réseaux routiers.

Dans le domaine de la télématique, notamment lors de modélisations de trafic, il est néanmoins nécessaire de connaître la composition complète du trafic afin d'établir des modèles qui représentent au mieux la réalité.

Les bases de données qui sont utilisées sont d'une part celles du comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR) qui permettent de connaître la composition du trafic et d'autre part des données de pesage en marche (WIM) qui, elles, décrivent les passages de charges sur une chaussée.

3.2 Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)

3.2.1 Installations de comptage

Les installations du comptage suisse automatique se répartissent sur l'ensemble du territoire. En mars 2015, l'Office fédéral des routes (OFROU) en répertoriait 538 dont 370 sur le réseau de base des routes nationales (Fig. 6).

Ces postes de comptage permanents sont composés de capteurs intégrés dans la chaussée qui permettent de détecter les véhicules passants. Les informations récoltées sont disponibles via une interface sécurisée sur internet dans les deux minutes qui suivent leur enregistrement.

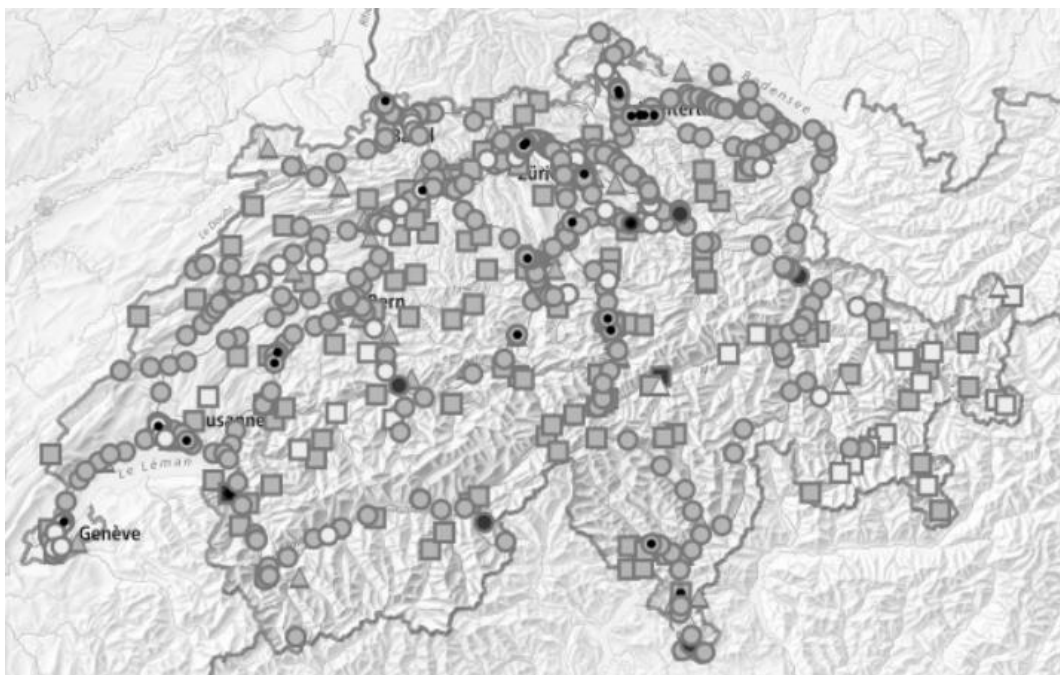


Fig. 6 Carte du comptage routier suisse, geo.admin.ch.

3.2.2 Format de données

Les données issues du comptage automatique décrivent le passage de tous les véhicules sur les voies de circulation instrumentées. Le format et la composition des données brutes du CSACR sont décrits dans l'exemple ci-après (Fig. 7).

012490	120812	0000	00	87	000000	4	1	6.6	6.3	83	483	3	L
012491	120812	0000	03	28	000000	4	1	2.4	2.2	84	440	3	L
012492	120812	0000	05	14	000000	1	1	15.0	14.8	83	379	3	L
012493	120812	0000	07	49	000000	1	1	2.3	2.1	82	498	3	M
012494	120812	0000	08	14	000000	3	1	22.0	21.8	88	433	3	VL
012495	120812	0000	09	20	000000	4	1	5.9	5.7	83	504	3	L
012496	120812	0000	09	77	000000	3	1	1.6	1.4	83	428	3	M
012497	120812	0000	10	89	000000	1	1	3.4	3.1	93	649	5	M
012498	120812	0000	13	83	000000	4	1	4.6	4.4	82	447	3	L
012499	120812	0000	17	40	000000	4	1	3.5	3.3	79	401	3	L
012500	120812	0000	22	88	000000	4	1	5.4	5.2	85	419	3	H

N° ID du comptage	Date (JJMMAA)	Temps (HHMM SS 1/100)	Champ libre	N° de voie	Temps inter-véhiculaire	Direction	« Headway »	Vitesse [km/h]	Longueur véhicule [cm]	Classe de véhicule
-------------------	---------------	-----------------------	-------------	------------	-------------------------	-----------	-------------	----------------	------------------------	--------------------

Fig. 7 Exemple de données brutes CSACR.

Le format informatique dans lequel sont conservées quotidiennement ces informations est de type journal d'enregistrements (*.log).

3.2.3 Classes de véhicules

Une analyse automatique des classes de véhicules est directement effectuée lors de la détection du véhicule passant. La répartition des classes est la suivante :

Saisie des classes selon le schéma « Swiss 10 »	Saisie pour le comptage suisse de la circulation routière (CSCR)	Saisie pour la gestion du trafic
2 : Motocycle	2 : Motocycle	1 : Véhicules assimilables à des VT (véhicules < 3.5 t)
3 : Voiture de tourisme	3 : Voiture de tourisme	
4 : Voitures de tourisme avec remorque		
5 : Voiture de livraison	4 : Voiture de livraison	
6 : Voiture de livraison avec remorque		
7 : Voiture de livraison avec galerie		2 : Véhicules assimilables à des camions (véhicules > 3.5 t)
1 : Bus, car	1 : Bus, car	
8 : Camion	5 : Camion	
9 : Train routier	6 : Train articulé + véhicule articulé	
10 : Véhicule articulé		

Fig. 8 Directives postes de comptage de trafic, ASTRA 13012.

Les différents enregistrements des postes de comptage qui sont utilisés dans la présente étude ont un niveau de détail des classes de véhicules de type « Swiss 10 ».

3.3 Weigh in Motion (WIM)

Le réseau de pesage en marche en main de l'Office fédéral des routes (OFROU) est composé de 8 stations dont 7 sont en état de marche (Etat 2011, Fig. 9).

Les stations de comptages sont équipées de capteurs intégrés dans la chaussée qui détectent le passage et les charges des différents véhicules. En général, seules les voies accueillant potentiellement le plus de poids lourds (voie de droite et év. voie centrale) sont équipées. A l'exception d'une station (Oberbuchsiten, propriété de l'administration fédérale des douanes), les informations des véhicules dont la charge totale est inférieure à 3 ou 3.5 tonnes ne sont pas conservées.

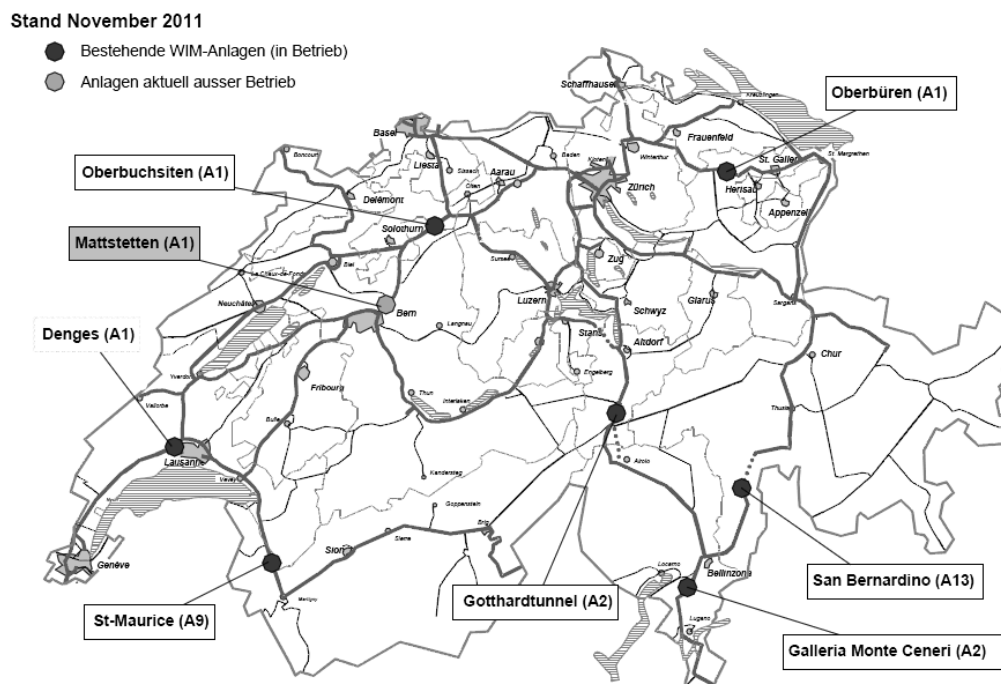


Fig. 9 Réseau de pesage en marche suisse (WIM).

Les données WIM brutes se présentent globalement de la manière qui suit.

Colonnes :

ZST;JJJJMMTT;T;ST;HHMMSS;FZG-NR;FS;SPEED;LENGTH;CS;CSF;GW-TOT;AX;AWT01;AWT02;AWT03;AWT04;AWT05;AWT06;AWT07;AWT08;AWT09;AWT10;W.1-2;W.2-3;W.3-4;W.4-5;W.5-6;W.6-7;W.7-8;W.8-9;W9-10;

Exemple d'enregistrement :

00000408;20080101;7;01;002324;013437;04;08700;01850;49;436;028742;05;06869;0824;05861;03716;04072;00000;00000;00000;00000;00000;00606;00132;00660;00134;00000;00000;00000;00000;00000;

Tab. 1 Définition des données brutes WIM

Intitulé de la colonne	Détail, contenu
ZST	Direction de circulation
JJJJMMTT	Année, mois, jour
T	Jours (1 = Lundi, 2 = Mardi, 3 = Mercredi, 4 = Jeudi, 5 = Vendredi, 6 = Samedi, 7 = Dimanche et jours fériés)
ST	Jours fériés, fêtes religieuses, jours spéciaux
HHMMSS	Détection (Heures, minutes, secondes)
FZG-NR	Numéro de poids lourds (Identification)
FS	Numéro de voie de circulation
SPEED	Vitesse [dam/h]
LENGTH	Longueur totale du véhicule [cm]
CS	Classe de véhicules (Annexe)
CSF	Code de véhicules (Annexe)
GW-TOT	Masse totale du véhicule [kg]
AX	Nombre d'axes
AWTi	Masse à l'axe i [kg]
W.i-i+1	Distance d'entraxe entre l'axe i et l'axe i+1 [cm]

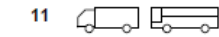
Le contenu des données diffère d'un capteur à l'autre. Certains postes WIM relèvent des informations complémentaires telles que le headway et le temps intervéhiculaire. De même, les unités ne sont pas identiques d'un compteur à l'autre, les masses peuvent également être enregistrées en décakilogrammes et les vitesses en km/h.

Le format de fichier diffère également d'un capteur à l'autre. On dénombre trois types de fichiers pour les sept stations WIM disponibles :

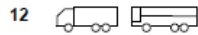
- Format *.csv journalier (comma-separated values, données tabulaires)
- Format *.txt annuel (fichier texte)
- Format *.V00 journalier (compatible excel ou fichier texte)

3.4 Catégories de véhicules poids lourds

Les catégories de poids lourds ont été déterminées sur la base des critères établis dans le mandat de recherche AGB 2002/005 (Fig. 10). Le terme « essieux » a été utilisé pour décrire le nombre d'axes.



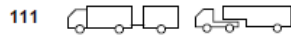
Nombre d'essieux	N = 2
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60 < L1-2 < 7.20
Poids total [kN]	60 < Ptot < 300



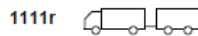
Nombre d'essieux	N = 3
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60 < L1-2 < 7.20
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60 < L2-3 < 2.40
Poids total [kN]	70 < Ptot < 450



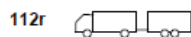
Nombre d'essieux	N = 4
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	0.60 < L1-2 < 2.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	2.00 < L2-3 < 6.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60 < L3-4 < 2.40
Poids total [kN]	80 < Ptot < 600



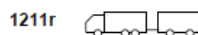
Nombre d'essieux	N = 3
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.20 < L1-2 < 4.50
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60 < L2-3 < 8.60
Poids total [kN]	70 < Ptot < 450



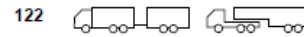
Nombre d'essieux	N = 4
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60 < L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60 < L2-3 < 7.20
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60 < L3-4 < 6.40
Poids total [kN]	80 < Ptot < 600



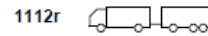
Nombre d'essieux	N = 4
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	4.50 < L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60 < L2-3 < 8.60
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60 < L3-4 < 2.40
Poids total [kN]	80 < Ptot < 600



Nombre d'essieux	N = 5
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60 < L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60 < L2-3 < 2.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60 < L3-4 < 6.40
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	3.60 < L4-5 < 6.40
Poids total [kN]	90 < Ptot < 750



Nombre d'essieux	N = 5
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60 < L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60 < L2-3 < 2.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60 < L3-4 < 8.60
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60 < L4-5 < 2.40
Poids total [kN]	90 < Ptot < 750



Nombre d'essieux	N = 5
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60 < L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60 < L2-3 < 6.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60 < L3-4 < 6.40
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60 < L4-5 < 2.40
Poids total [kN]	90 < Ptot < 750



Nombre d'essieux	N = 4
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.20 < L1-2 < 4.50
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60 < L2-3 < 8.60
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60 < L3-4 < 2.40
Poids total [kN]	80 < Ptot < 600



Nombre d'essieux	N = 5
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.20 < L1-2 < 4.50
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60 < L2-3 < 8.60
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60 < L3-4 < 2.40
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60 < L4-5 < 2.40
Poids total [kN]	90 < Ptot < 750



Nombre d'essieux	N = 6
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	2.40 < L1-2 < 3.60
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60 < L2-3 < 2.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60 < L3-4 < 8.60
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60 < L4-5 < 2.40
Distance entre essieux 5 et 6 [m]	0.60 < L5-6 < 2.40
Poids total [kN]	100 < Ptot < 900

Fig. 10 Classes de véhicules poids lourds selon mandat de recherche AGB 2002/005.

A ces classes de véhicules poids lourds, il a été décidé, comme également discuté dans le projet de recherche AGB 2002/005, d'insérer la catégorie 23 représentant les camions de chantier.



Fig. 11 Camions de chantier, catégorie de poids lourds n° 23.

Tab. 2 Définition de la catégorie n°23

Caractéristique	Valeurs, bornes
Nombre d'axes	N = 5
Distance entre axes 1 et 2 [m]	$0.60 < L_{1-2} < 2.40$
Distance entre axes 2 et 3 [m]	$1.20 < L_{2-3} < 5.00$
Distance entre axes 3 et 4 [m]	$0.60 < L_{3-4} < 2.40$
Distance entre axes 4 et 5 [m]	$0.60 < L_{4-5} < 2.40$
Longueur totale [m]	$L_{tot} < 13.00$
Poids total [kN]	$90 < P_{tot} < 750$

Les catégories proposées dans le mandat de recherche AGB 2002/005 ne permettent pas de catégoriser l'ensemble des poids lourds détectés aux comptages WIM. Une récente étude menée sur la méthode suisse de dimensionnement [23] a démontré que sur la base des données des comptages WIM suisses il est possible d'établir une liste de plus de 60 silhouettes poids lourds (analyse jusqu'à 6 axes). Il convient toutefois de noter que certaines de ces silhouettes détectées ont une occurrence faible ou une probabilité potentielle d'erreur de mesure élevée.

3.5 Catégories de véhicules sélectionnées pour les études de cas

3.5.1 Cas d'étude avec évaluation à la fatigue

Dans le cadre de l'évaluation structurale des ouvrages d'art à la fatigue, il est admis ([2], [30]) que les véhicules lourds d'un poids total inférieur à 100kN ont une influence négligeable. Dans les cas d'études de Denges et de Aarwangen, les différentes classes de poids lourds suivront donc cette hypothèse.

Pour les simulations de trafic, les véhicules légers (< 3.5 to) sont déterminés en fonction de la catégorisation « Swiss 10 » (Chap. 3.2.3). Les catégories 2 à 7 sont sélectionnées. Les poids lourds sont répartis selon la classification de la Fig. 10 à laquelle est ajoutée la catégorie n° 23 (camions de chantier, Fig. 11). Le poids minimum est fixé, selon l'hypothèse précédente, à 100kN (10 tonnes) et la limite de poids maximale a été abrogée.

Les données du CSACR représentent l'ensemble des véhicules ayant emprunté l'infrastructure. L'ensemble des catégories « Swiss 10 » 2 à 7 ainsi que les poids lourds classifiés comme décrit ci-dessus ne représentent pas l'ensemble du trafic routier. Afin d'obtenir des simulations de trafic réalistes comprenant l'ensemble du trafic routier, il est donc nécessaire de compléter ces différentes catégories. En effet, certains véhicules ont un poids inférieur à 100kN et d'autres n'entrent pas dans la classification proposée.

Trois catégories complémentaires de véhicules sont proposées. Celles-ci n'entreront pas en compte dans l'évaluation structurale.

La première catégorie est considérée comme l'ensemble des bus et camions (2 et 3 axes) résiduels. Par simplification, on considère la répartition suivante :

$$\text{Bus}_{\text{suppl}} = [1] - ([11_{10t}] + [12_{10t}])$$

Si l'équation obtient un résultat positif, cela signifie que le nombre de bus, cars détectés est plus important que le nombre de véhicules détectés dans les classes 11 et 12. Dans ce cas, la catégorie $\text{Bus}_{\text{suppl}}$ est implémentée.

Si l'équation obtient un résultat négatif, ce qui est généralement le cas puisque les classes 11 et 12 ne comprennent pas uniquement des bus et cars mais également des camions à 2 ou 3 axes, on passe à l'évaluation de la seconde catégorie.

Les classes « Swiss 10 » 1 et 8 sont globalement représentées par les classes WIM 11, 12 et 22. (Véhicules n'étant pas des trains routiers, non-articulés). La seconde catégorie est donc représentée par la différence entre les classes 1,8 et les classes 11,12 et 22 en prenant en compte le résultat obtenu par la première catégorie.

On définit la seconde catégorie de la manière suivante :

$$\text{SI } ((\text{Bus}_{\text{suppl}} < 0) ; \text{Camions}_{\text{suppl}} = ([8] - [22_{10t}] + \text{Bus}_{\text{suppl}}))$$

$$\text{SI } ((\text{Bus}_{\text{suppl}} \geq 0) ; \text{Camions}_{\text{suppl}} = ([8] - [22_{10t}]))$$

La troisième catégorie correspond aux trains routiers, véhicules articulés résiduels. Les catégories « Swiss 10 » 1, 8, 9 et 10 représentent par hypothèse (véhicules de plus de 3.5 tonnes) l'ensemble des poids lourds qui sont détectés. Dans le cas présent, les classes 1 et 8 ont été traitées par les deux premières catégories complémentaires. La troisième catégorie est donc décrite de la manière suivante :

$$\text{Trains}_{\text{suppl}} = [9] + [10] - ([\text{WIM total}_{10t}] - [11_{10t}] - [12_{10t}] - [22_{10t}])$$

De cette manière, on obtient donc une représentation concrète de l'ensemble du trafic routier.

3.5.2 Influence d'une limitation à un poids de 100kN sur le dimensionnement des chaussées

Si dans le cadre de l'évaluation à la fatigue des ouvrages d'art il peut être considéré que les véhicules poids lourds d'un poids total inférieur à 100kN ont un effet négligeable ([2], [30]), ce n'est pas le cas dans le cadre du dimensionnement, renforcement et estimation de l'endommagement des chaussées.

Le tableau 2 de la norme SN 640 320 fournit les facteurs d'équivalence k en fonction de la charge par essieu pour la détermination du trafic pondéral équivalent.

Tab. 3 Etude de cas (véhicules lourds)

Cas	Poids total (t)	Essieu 1 (t)	Essieu 2 (t)	Essieu 3 (t)	Essieu 4 (t)	Facteur d'équivalence global k
1	3.5	2.5	1	-	-	0.005
2	10	6.5	1.5	2	-	0.147
3	10	3	3	2	2	0.017
4	6	4.5	1.5	-	-	0.056

En menant une étude de cas spécifiques (Tab. 3), basés sur des données issues des enregistrements WIM, en considérant des essieux simples, il est possible de constater que l'influence du cas 4, pour un véhicule avec un poids total de 6 tonnes est 3 fois plus importante que celle du cas 3 (poids lourds de 10 tonnes) et n'est pas négligeable.

Sur la base de ces considérations, dans le cadre de l'étude des chaussées, il n'est donc à priori pas judicieux d'effectuer un tri sur les données par le poids total du véhicule, les charges d'essieux individuelles étant déterminantes.

3.5.3 Cas d'étude sans limitation inférieure de poids à 100kN

Dans le cas d'étude où l'on considère l'ensemble des poids lourds détectés au WIM sans limitation inférieure de poids à 100kN, il faut veiller, contrairement au cas précédent, à ne pas surestimer le trafic total. En effet, de façon générale, la somme des véhicules détectés au comptage WIM (avec limite inférieure à 3.5 to) est supérieure à la somme des catégories « Swiss 10 » 1, 8, 9 et 10.

Tab. 4 Comparatifs comptages juin 2008 à Denges

Type de comptage	Direction Lausanne	Direction Morges
Nombre de détections WIM (>3.5 to)	57'767	52'444
Nombre de détections CSACR Classes 1, 8, 9, 10 (PL)	49'520	48'484
Nombre de détections CSACR voie lente Classes 1, 8, 9, 10 (PL)	45'566	44'135
Nombre de détections CSACR voie rapide Classes 1, 8, 9, 10 (PL)	3'954	4'349
Nombre total de détections CSACR	1'280'786	1'284'559

L'installation WIM de Denges était en juin 2008, avant la mise en place du système de bande d'arrêt d'urgence active (BAU Active), uniquement équipée sur la voie de droite (voie lente). Les installations de comptages WIM et CSACR se situant à quelques mètres d'écart à cet endroit, on peut faire l'hypothèse qu'aucun véhicule lourd ne procède à un changement de voie entre ces deux comptages.

En comparant le nombre de détections WIM et le nombre de détections CSACR sur la voie extérieure pour les classes relatives aux poids lourds 1, 8, 9, 10, on constate une différence de détections de 27% pour la direction de Lausanne et de 19% pour la direction de Morges (Tab. 4).

On peut émettre l'hypothèse que certains véhicules classifiés par « Swiss 10 » dans les classes 5, 6 ou 7 soit les véhicules de livraison ont un poids supérieur à 3.5 tonnes. La vérification de cette hypothèse pourrait être effectuée sur la base d'une synchronisation des détecteurs WIM et CSACR combinés à une analyse vidéo (Chap. 10.3). Ces résultats sont également utiles dans le cadre de la détermination du taux de poids lourds ainsi que de la répartition entre voies. (Chap. 9.1, 9.2).

Afin d'obtenir une modélisation réaliste du trafic, on diminue de manière proportionnelle les classes 5, 6 et 7.

$$i_{\text{corr}} = i^* (1 - ([\text{WIM total}_{3.5\text{to}}] - ([1] + [8] + [9] + [10])) / ([1] + [8] + [9] + [10])) , i = \text{cat. 5, 6, 7.}$$

De manière simplifiée cette équation peut également se présenter sous la forme suivante :

$$i_{\text{corr}} = i^* (2 - ([\text{WIM total}_{3.5\text{to}}] / ([1] + [8] + [9] + [10]))), i = \text{cat. 5, 6, 7.}$$

4 Passerelles entre outils

La création de passerelles entre les outils de simulations de trafic et de performance structurale est un des buts principal de ce projet. Ces passerelles permettent de partager de manière rapide et efficace des informations sous forme de fichiers d'échange relatifs au déplacement des charges du trafic poids lourds sur un réseau.

Les fichiers d'échange nécessitent d'être traités ou formatés afin d'être intégrés dans les différents logiciels utilisés lors des études de cas. Afin de simplifier les actions de l'utilisateur, celles-ci ont été automatisées.

4.1 Préparation des données routières

Les fichiers de données brutes journaliers que ce soit du comptage automatique de la circulation routière (CSACR) ou des comptages Weigh in Motion (WIM) nécessitent un pré-traitement avant d'être intégrées dans le logiciel de traitement statistique.

4.1.1 Données WIM

Les données brutes WIM récoltées contiennent des informations relatives au compteur (Fig. 12), des informations concernant le format du fichier (Fig. 13) ou des informations d'intitulés des colonnes de données (Fig. 14) qui sont supprimées afin d'obtenir un fichier ne contenant que les données relatives aux informations relevées sur les poids lourds potentiels. Ce traitement de préparation des données est effectué à l'aide d'un script développé en exécutable de commandes MS-DOS (fichier batch, *.bat).

```
* INSTRUMENT M660 Serial = 402445 Release = 2.3.7
* FILENAME =
* SITE = 42220004
* LOCATION = ST-MAURICE (A9) VS
* GRIDREF =
* HEADINGS =
* STARTREC = 00:00 02/01/12
* STOPREC = 00:00 03/01/12
* BATTERY = 7.00 7.00
* SENSORS = L2wL2w L2wL2w L2wL2w L2wL2w L2wL2w L2wL2w L2wL2w L2wL2w
* DATEFORM = DD/MM/YY
* UNITS = Metric
* PRUNITS = KPH-CM-10KG
* CLASS = SWISS10
* VBVFILTER = GWT>2998
* WTCAL = 445 477 481 477 515 539 476 488 500 500 500 500 500 500 500
* WTAUTCAL OFF 9 4082
```

Fig. 12 Exemple d'informations relatives au compteur.

```
* BEGIN
* FORMAT = VBV-1
* FORMATTER = GRFORMAT Release = 2.9
* END 843 FFFF
```

Fig. 13 Exemple d'informations relatives au format du fichier.

```
* SITE    HEAD    DDMMYY HHMM SS HH RESCOD  L D HEAD  GAP SPD LENTH AX CS WBTOT W1-2 W2-3 W3-4 W4-5
```

Fig. 14 Exemple partiel d'intitulé des colonnes.

4.1.2 Données CSACR

Les données CSACR récoltées contiennent des enregistrements qui répertorient les remises à zéro du système (appel des données depuis la centrale de collecte des données, OFROU). Dans de rares cas, certaines lignes de données sont incomplètes.

Dans le cas des valeurs de réinitialisation de la station de comptage, un script de nettoyage automatique a été mis en place. Pour le cas des données incomplètes, celles-ci doivent être nettoyées au cas par cas mais sont détectées dès leur insertion dans le logiciel de traitement statistique RStudio (nombre d'attributs renseignés divergeant).

De même que pour les données WIM, les scripts de préparation des fichiers de données CSACR sont développés en exécutable de commandes MS-DOS (fichier batch, *.bat).

4.2 Automatisation des traitements statistiques

Certaines caractéristiques des informations collectées sur les véhicules (légers et lourds) sont nécessaires aux modèles de trafic intégrés dans les simulateurs de trafic ou aux logiciels de l'analyse structurale.

Afin d'établir de manière systématique des fichiers de données et des analyses de ces caractéristiques (Chap. 0), des scripts de traitements automatiques ont été créés dans le logiciel de traitement statistique RStudio.

Les différents traitements effectués et leur destination d'utilisation sont récapitulés dans le tableau ci-après (Tab. 5).

Tab. 5 Traitements statistiques		
Type de traitement	Base de données	Utilisation
Regroupements des enregistrements par direction	CSACR / WIM	Toutes autres étapes
Classement des véhicules par catégories y compris élimination des erreurs potentielles de mesures	CSACR / WIM	Toutes autres étapes
Répartitions horaires par jours - mois	CSACR / WIM	Modèles de trafic
Longueur totale	CSACR / WIM	Modèles de trafic / Monte-Carlo
Longueurs d'entraxes	WIM	Monte-Carlo
Vitesse	CSACR / WIM	Modèles de trafic
Masse totale	WIM	Monte-Carlo
Masse de l'axe	WIM	(Uniquement analyses statistiques)
Relation masse – longueur totale	WIM	(Uniquement analyses statistiques)
Relation longueur totale – longueurs d'entraxes	WIM	Monte-Carlo
Relation masse totale – masses axe	WIM	Monte-Carlo

Dans le cadre de l'analyse des silhouettes ([23]) et des comportements des usagers (Chap. 6), des scripts de traitements complémentaires ont été créés. Ceux-ci n'étant pas directement nécessaires aux cas d'étude, ils ne sont pas explicités.

4.3 Intégration au logiciel de simulation de trafic

Dans le logiciel de simulation de trafic utilisé, AIMSUN, il est possible d'intégrer les demandes de trafic soit sous forme d'états de trafic (débit de véhicules en points donnés du réseau et pourcentages de mouvements tournants entre diverses sections routières) soit sous forme de matrices origine-destination (Matrices O-D).

Le logiciel contient, de base, deux scripts intégrés permettant l'importation de fichiers de données sous les deux formes de demandes de trafic évoquées : « Import Matrices » et « Import Traffic state ». Dans le cadre de chaque étude de cas, une partie du script et le fichier de données (format texte, *.txt) doivent être renseignés selon un format donné. Afin de réaliser cette étape de génération de texte et de fichier texte, un script Php (programmation web) combiné à une base de données MySQL dans laquelle les données relatives aux demandes de trafic ont été intégrées a été développé.

Les attributs nécessaires composant le fichier de données des matrices O-D (Fig. 15) sont répertoriés ci-après (Tab. 6).

Tab. 6 Intégration de matrices O-D

Attributs	Typologie
Identifiant de la cellule matricielle	Numérique (unique)
Intitulé de la cellule matricielle	Texte
Identifiant du type de véhicule	Numérique
Intitulé du type de véhicule	Texte
Temps initial de la cellule matricielle	HH : MM : SS
Durée de la cellule matricielle	HH : MM : SS
Centroïde d'origine	Numérique
Centroïde de destination	Numérique
Valeur matricielle (nombre de véhicules)	Numérique (décimal)

```
70022 Camion suppl 11:00
22746 Classecamionssuppl
11:00:00
01:00:00
292 290 6.700
```

Fig. 15 Format d'informations d'une cellule matricielle.

Concernant l'introduction d'états de trafic, le traitement des informations a été séparé en deux scripts distincts, l'un pour les débits (Tab. 7, Fig. 16), l'autre pour les mouvements tournants (Tab. 8, Fig. 17).

Tab. 7 Intégration de débits (états de trafic)

Attributs	Typologie
Temps initial du débit (Nom que prendra le fichier individuel)	Numérique (HHMM ou HHMMSS)
Identifiant du détecteur	Numérique
Débit (nombre de véhicules)	Numérique (décimal)

```

34005,0
128541,44
128547,16
128565,0
128571,0
128577,0

```

Fig. 16 Format d'informations des débits pour le fichier 0742.txt (débits à 07 : 42).

Tab. 8 Intégration de mouvements tournants (états de trafic)	
Attributs	Typologie
Temps initial du mouvement tournant (Nom que prendra le fichier individuel)	Numérique (HHMM ou HHMMSS)
Identifiant de la section d'origine	Numérique
Identifiant de la section de destination	Numérique
Mouvement tournant (% de véhicules)	Numérique (décimal)

```

26985,33989,0
26985,127736,100
125884,125897,47
125884,125913,53
125987,125992,0
125987,125995,100
125987,125999,0

```

Fig. 17 Format d'informations des mouvements tournants pour le fichier 0600.txt (mouvements tournants à 06 : 00).

En parallèle, les scripts intégrés dans le logiciel de simulation doivent être modifiés dans le cas de l'intégration de la demande de trafic sous forme d'états de trafic. Afin de générer automatiquement ces scripts modifiés, un script Php a également été développé.

Les caractéristiques des véhicules sont elles aussi intégrées au logiciel de simulation de trafic. Dans le cadre de cet étude, elles ont été introduites manuellement pour chaque classe de véhicules. Toutefois, des scripts automatiques pourraient également être créés.

4.4 Exportation du logiciel de simulation de trafic

Une fois la simulation de trafic générée, plusieurs types d'informations peuvent être récoltés (débits, vitesses, émissions, itinéraires sélectionnés, ...) et enregistrés dans un fichier SQLite (type base de données). Cette opération est déjà implémentée dans le logiciel AIMSUN. Dans le cadre des études de cas, les informations suivantes sont récoltées (Tab. 9, Fig. 18).

Tab. 9 Informations récoltées après simulation de trafic	
Attributs	Définition
did	Identifiant de la réplique (simulation)
oid	Identifiant du détecteur
timedet	Temps de détection [s]
id veh	Identifiant du véhicule
vehetype	Identifiant de la classe du véhicule
speed	Vitesse [m/s]
headway	Différence entre temps de détection avec le véhicule précédent [s]

	did	oid	timedet	idveh	vehetype	idptline	speed	headway
78	7739	8734	27107.9	1447	7	0	15.9557	402.107
79	7739	8734	27124.2	1450	14	0	13.8889	16.3049
80	7739	8733	27267.6	1462	7	0	14.3024	273.247
81	7739	8734	27267.7	1484	7	0	15.6301	143.51
82	7739	8733	27381	1487	14	0	13.8889	113.363
83	7739	8734	27397.6	1513	7	0	16.7457	129.838
84	7739	8734	27458.5	1525	10	0	13.8889	60.9374
85	7739	8733	27479.4	1510	11	0	13.8889	98.3906

Fig. 18 Exemple d'informations récoltées après une simulation.

Il est à noter que les classes des véhicules identifiés ne représentent pas les intitulés des classes des véhicules intégrées dans le logiciel de simulations de trafic (Chap. 3). Une identification manuelle par suivi des véhicules dans le logiciel de simulation est nécessaire.

Les tables contenues dans la base de données récoltées SQLite peuvent être exportées dans des fichiers de format texte (*.txt). Cette opération a été effectuée à l'aide du logiciel SQLite Studio, un logiciel gratuit permettant la création et la modification de bases de données.

4.5 Intégration dans les logiciels partie « structure »

Les données de trafic simulées sont alors intégrées dans une simulation de Monte Carlo qui permet d'attribuer aux données de trafic les propriétés relatives aux charges par axes, aux longueurs des véhicules et aux écartements des axes. Les simulations de Monte Carlo ont été effectuées par l'ICOM à l'aide de scripts développés dans Matlab, un langage de calcul scientifique.

En fonction de la classe du véhicule récolté par simulation, un poids total lui est attribué de par la distribution récoltée des données WIM (Chap. 5.4.2). Les poids par axes sont ensuite attribués en fonction des régressions linéaires établies entre les poids totaux des véhicules et les poids respectifs de leurs axes (Chap.5.4.3) ou lorsque celles-ci ne sont pas suffisamment corrélées, en fonction de la distribution par axes (Chap. 5.4.2).

La même opération est effectuée pour l'attribution des longueurs des véhicules et les longueurs d'entraxes. La corrélation entre la longueur totale du véhicule et les longueurs d'entraxes étant généralement insuffisante, la distribution individuelle des longueurs d'entraxes a été utilisée. (Chap. 5.2, 5.4.3).

Le fichier de données final issu de ces simulations de Monte Carlo est exporté sous format texte compatible avec Excel (*.csv). Ce fichier est utilisé dans les logiciels professionnels relatifs à l'étude des structures.

Les démarches concernant les simulations de Monte Carlo sont décrites plus amplement dans le rapport Partie 2.

5 Analyse de données routières

Les analyses statistiques sont effectuées à l'aide de scripts de traitements automatiques créés dans le logiciel de traitement statistique RStudio (Chap. 4.2).

5.1 Répartitions horaires

Après regroupement des enregistrements par direction, sur la période d'analyse sélectionnée, on établit les répartitions horaires des différentes classes de véhicules. De manière générale, les flux de véhicules [véhicules par heure, vhc/h] ont été moyennés sur l'ensemble des jours sélectionnés (jours types) pour des intervalles de temps de 15 minutes ou d'une heure en fonction du détail d'analyse qui était souhaité. Ces répartitions horaires sont intégrées au logiciel de simulation de trafic (Chap. 4.3) (Fig. 19).

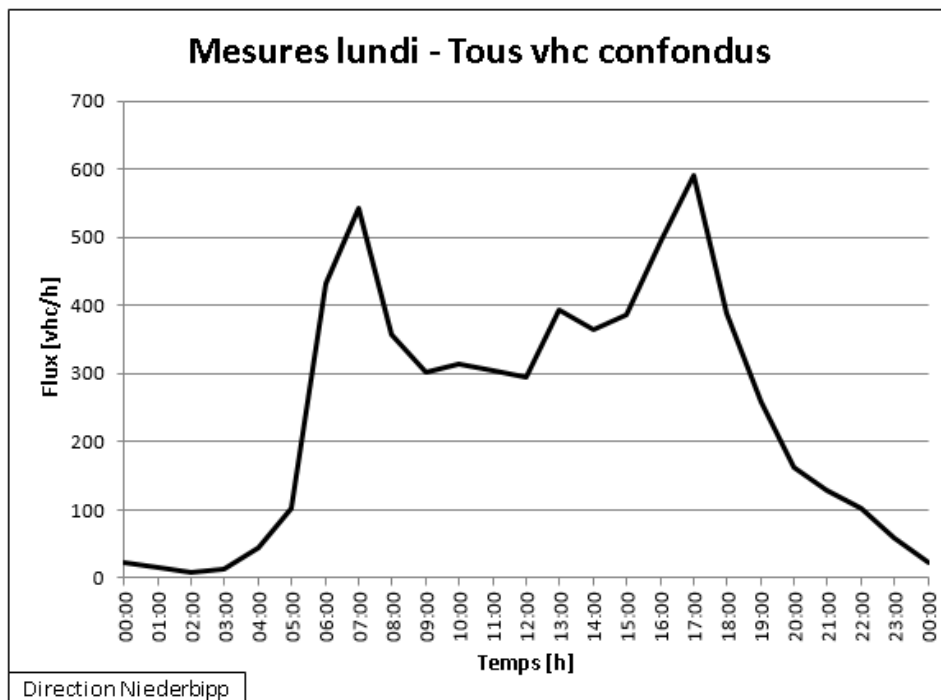


Fig. 19 Répartition horaire du lundi type 2013 en direction de Niederbipp (Jurastrasse, direction Nord-Ouest, Aarwangen), agrégation sur une heure. (CSACR, tous véhicules confondus).

Ces analyses sont menées tant sur le jeu de données issu du CSACR (toutes classes de véhicules) que sur le jeu de données issu de comptages WIM (véhicules poids lourds).

5.2 Longueur totale des véhicules

Des histogrammes de longueurs totales des véhicules sont établis par classes de véhicules (CSACR, toutes classes de véhicules) et par classes poids lourds (WIM) par direction (Fig. 20).

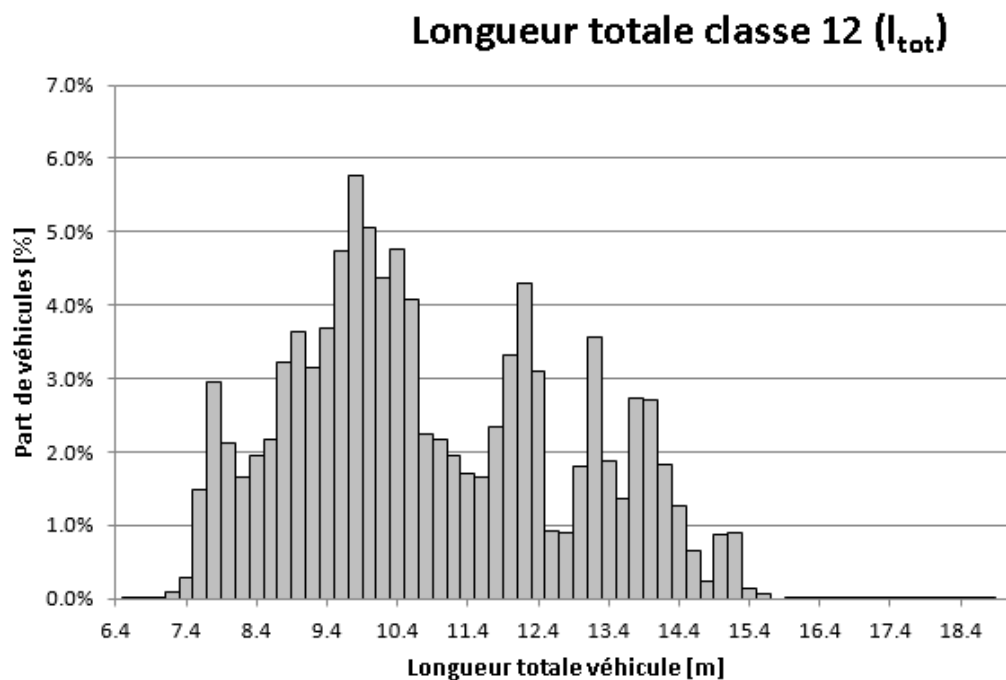


Fig. 20 Exemple d'histogramme des longueurs totales des véhicules, classe 12, Denges 2008, direction Lausanne.

Dans tous les cas étudiés, les différences des répartitions des longueurs totales entre les deux directions de circulation sont faibles (Fig. 21). Caractéristique géométrique des véhicules, la longueur totale des véhicules est indépendante des conditions de circulation et de la direction de circulation. Elle a été intégrée de manière unique par classe de véhicule dans le logiciel de simulation de trafic (moyenne, écart-type, minimum et maximum).

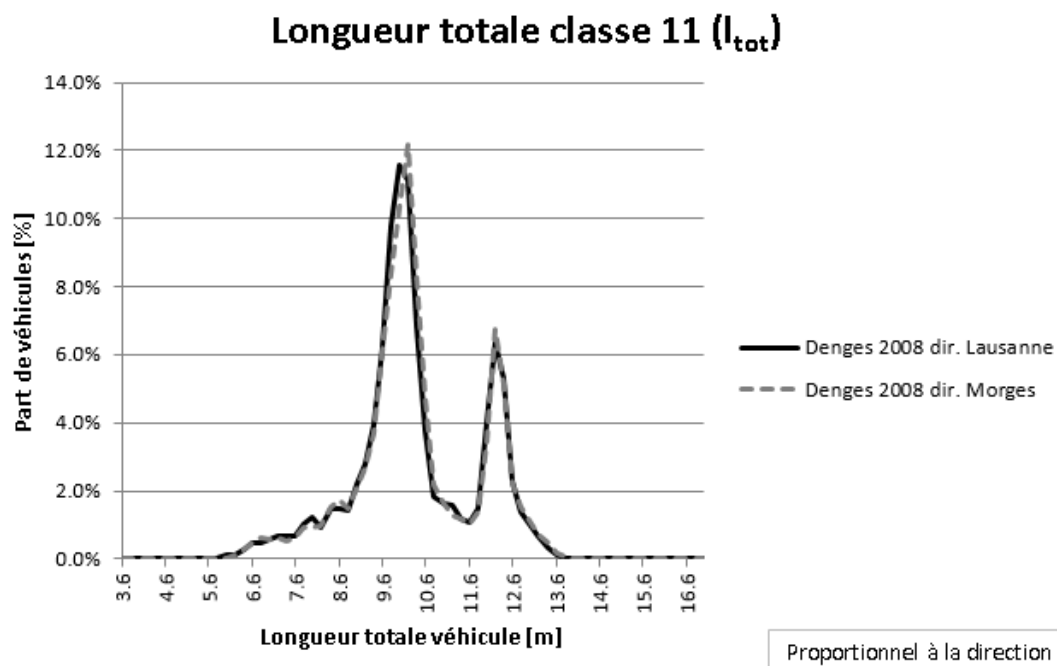


Fig. 21 Exemple d'histogramme des longueurs totales des véhicules, classe 11, Denges 2008

Comme on peut le remarquer dans les histogrammes établis (Fig. 20, Fig. 21), la distribution statistique des longueurs totales des véhicules n'est pas de forme normale. Le logiciel sélectionné ne permet actuellement que l'intégration de lois de forme normale. La longueur issue des simulations de trafic n'est pas directement utilisée comme résultat en raison des différences entre les données statistiques et simulées ayant pour cause ces distributions statistiques différentes. La longueur totale du véhicule est informée à l'aide de la simulation de Monte Carlo (Rapport Partie 2).

5.3 Vitesse des véhicules

Les histogrammes des répartitions des vitesses sont établis par classe de véhicule et par direction (Fig. 22, Fig. 23).

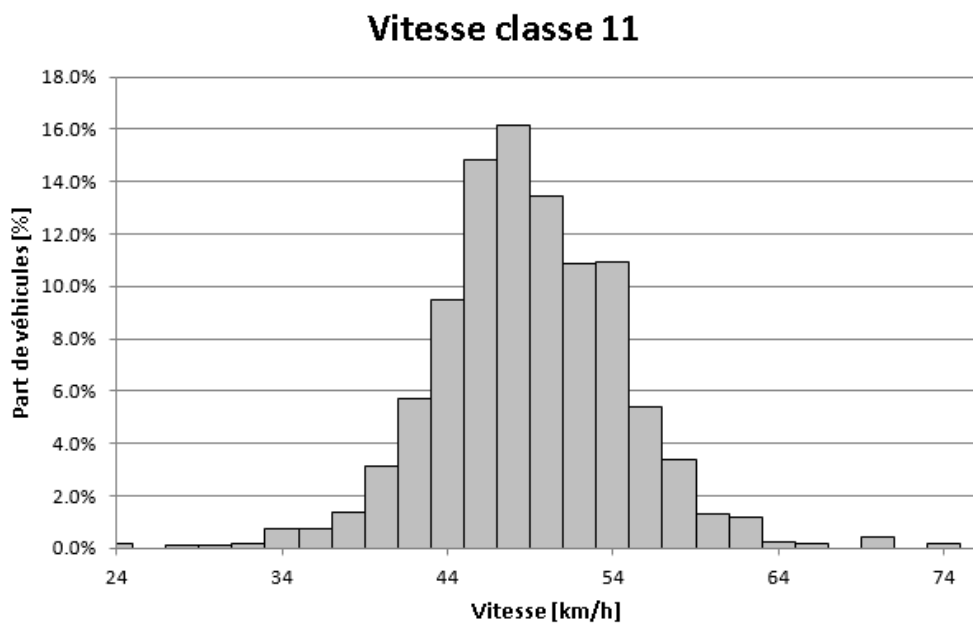


Fig. 22 Exemple d'histogramme des vitesses des véhicules, classe 11, Aarwangen 1998, Direction Niederbipp (Jurastrasse, direction Nord-Ouest).

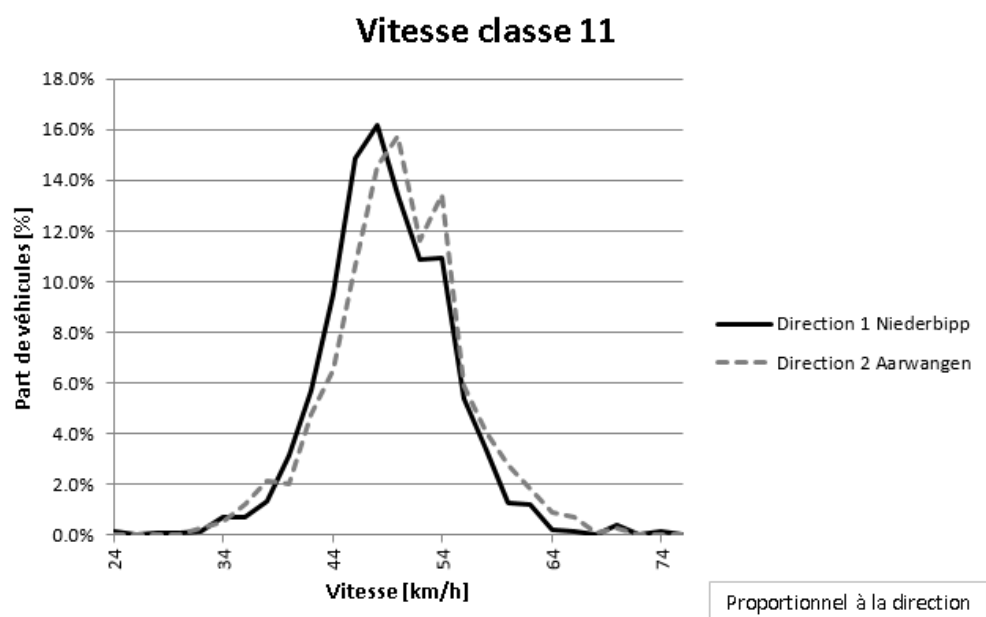


Fig. 23 Exemple d'histogramme des vitesses des véhicules, classe 11, Aarwangen 1998.

La vitesse des véhicules est une caractéristique dépendante des conditions de trafic qui peuvent varier selon la direction et la répartition horaire. Lorsque le débit de circulation augmente, la vitesse des usagers de la route diminue (gêne jusqu'à congestion, saturation). Les informations introduites dans le logiciel de simulation de trafic (loi normale : moyenne, écart-type, minimum, maximum) sont représentatives de la classe de véhicule et doivent être indépendantes des conditions de circulation, le logiciel simulant les vitesses en fonction des conditions de trafic. Les caractéristiques de base doivent être mesurées pour des conditions de circulation fluides.

En Suisse, selon la norme SN 640 018a (2006), le degré du niveau de service est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$X = \frac{Q}{L}$$

où Q est le débit de circulation et L la capacité du tronçon routier (Tab. 10).

Tab. 10 Capacité L [vhc/h] d'une autoroute à deux voies de circulation (Tab. 4 SN 640 018a)

Pourcentage de poids lourds SVA	Vitesse maximale autorisée								
	120 km/h			100 km/h			80 km/h		
	Rampe								
	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%
≤ 5 %	4000	3800	3550	4000	3800	3600	4000	3800	3650
> 5 ... 15%	3800	3500	3150	3800	3600	3350	3800	3700	3450
> 15 ... 25%	3600	3200	2800	3600	3400	3000	3600	3500	3200

Tab. 11 Degrés du niveau de service pour des autoroutes en sections courantes (SN 640 018a)

Degré du niveau de service	Niveau de service	Courant de circulation	Caractéristiques	Degré d'utilisation
A	Très bon	Libre	Trafic totalement fluide, degré d'utilisation très faible	$X \leq 0.4$
B	Bon	A peu près libre	Trafic légèrement gêné, degré d'utilisation faible	$X \leq 0.6$
C	Satisfaisant	Partiellement dépendante à synchrone	Trafic encombré, degré d'utilisation moyen	$X \leq 0.8$
D	Suffisant	Dépendante jusqu'au ralenti, mais stable en grande partie	Trafic très encombré, situations de conflit et entraves réciproques, degré d'utilisation élevé	$X \leq 0.9$
E	Insuffisant	Au ralenti à bloquée	Trafic très ralenti, changement constant entre l'écoulement de la circulation stable et instable, de petites modifications p. ex. peuvent déjà bloquer le trafic (bouchon et à l'arrêt), degré d'utilisation très élevé	$X \leq 1.0$
F	Totalement insuffisant	Bloquée	Trafic interrompu (inévitables), saturation (le débit est plus élevé que la capacité)	$X > 1.0$

Dans le premier cas étudié (Denges, autoroute à deux voies de circulation en 2008, A1 Lausanne-Genève, SVA < 5% et pente < 2%), la capacité est d'environ 4000 [vhc/h]. Afin de définir les caractéristiques de vitesses des véhicules en circulation fluide ($X \leq 0.4$, Tab. 11), sur la base du diagramme de débit établi (Fig. 24), on considère, pour l'analyse, les tranches horaires 00:00 – 06:15 et 20:15 – 24:00.

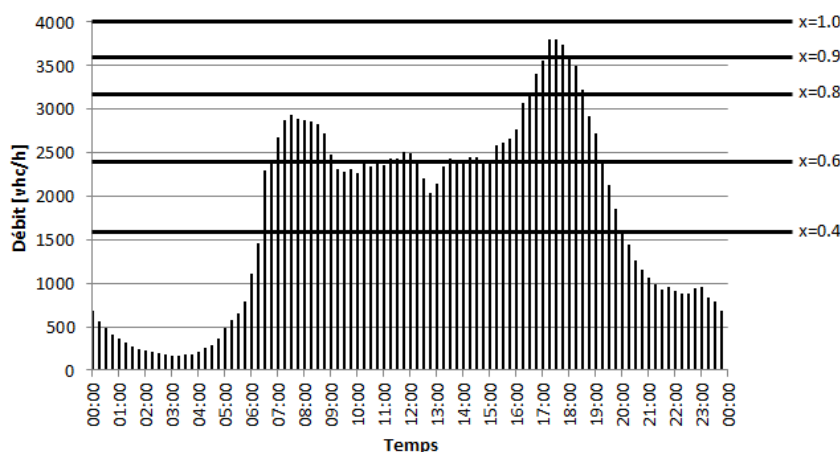


Fig. 24 Débit moyen [vhc/h], Denges direction Morges, juin 2008 et degrés du niveau de service.

Tab. 12 Vitesses par classes de véhicules CSACR, Denges, direction Morges, juin 2008

Classe	Tranche horaire	Valeur min.	25 ^{ème} centile	50 ^{ème} centile	75 ^{ème} centile	Valeur max.	Ecart-type
1 : Bus, car	Toutes	1	91	99	101	225	9
1 : Bus, car	Sélection	60	95	100	102	111	6
2 : Motocycle	Toutes	6	105	114	122	217	15
2 : Motocycle	Sélection	71	109	116	126	217	15
3 : Voiture de tourisme	Toutes	5	104	112	119	235	12
3 : Voiture de tourisme	Sélection	36	108	115	121	231	11
4 : Voiture de tourisme avec remorque	Toutes	32	87	93	100	142	10
4 : Voiture de tourisme avec remorque	Sélection	55	88	94	102	136	10
5 : Voiture de livraison	Toutes	7	103	112	119	254	12
5 : Voiture de livraison	Sélection	65	109	117	122	239	12
6 : Voiture de livraison avec remorque	Toutes	4	87	92	98	140	9
6 : Voiture de livraison avec remorque	Sélection	57	88	94	100	122	9
7 : Voiture de livraison avec galerie	Toutes	44	86	88	90	117	5
7 : Voiture de livraison avec galerie	Sélection	75	86	88	90	117	6
8 : Camion	Toutes	9	88	89	101	254	13
8 : Camion	Sélection	51	88	90	110	210	15
9 : Train routier	Toutes	24	86	88	89	241	6
9 : Train routier	Sélection	67	84	88	89	240	8
10 : Véhicule articulé	Toutes	2	86	88	90	248	8
10 : Véhicule articulé	Sélection	69	86	88	90	228	7

Comme on peut le constater (Tab. 12), la médiane (50^{ème} centile), proche de la moyenne pour le cas de la distribution des vitesses (proche d'une loi normale), de même que l'écart-type varie peu que les conditions soient fluides (tranche horaire : « Sélection ») ou que l'on prenne l'ensemble des données (tranche horaire : « Toutes »).

Lors de l'analyse de vitesses sur les jeux de données issus des comptages WIM, le nombre de véhicules poids lourds détectés dans la tranche horaire sélectionnée (conditions fluides) est faible, d'autant plus pour des cas d'études sur des réseaux hors autoroutes (ex : Aarwangen).

Sous ces stipulations, on émettra l'hypothèse que les caractéristiques de vitesses seront sélectionnées sur l'ensemble des données et non uniquement en conditions fluides. De cas en cas, il faut analyser l'état de congestion global (heures de congestion par année) afin de déterminer si cette hypothèse peut être appliquée.

Les valeurs (minimum et maximum) doivent être adaptées au cas par cas. Pour la vitesse maximale, exception faite de certaines vitesses extrêmes (excès de vitesse ou erreurs de mesures), on propose de prendre la valeur au 99^{ème} centile (130 à 150 km/h pour les véhicules légers, 90 à 105 km/h pour les poids lourds).

En vertu de l'article 35 de l'Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR, Suisse, état au 7 mai 2017), exceptions faites des véhicules d'entretien, des véhicules spéciaux et des transports exceptionnels, seuls les véhicules automobiles avec lesquels il est possible et permis de rouler à 80 km/h peuvent emprunter les autoroutes et semi-autoroutes. Cette vitesse correspond donc à vitesse minimale que doit atteindre le véhicule.

Dans le cas des simulations de trafic, afin d'élargir l'intervalle de vitesses indépendamment des conditions de circulation, la proportion de véhicules lourds circulant à moins de 80km/h étant relativement importante (30-55%), on propose de prendre la valeur au 5^{ème} centile soit environ 70 km/h pour vitesse minimale.

De manière générale, lors des simulations de trafic, la vitesse des véhicules sera adaptée aux conditions de circulation, aux conditions géométriques (en plan et en profil) et aux limites de vitesse. La vitesse de croisière choisie d'un véhicule dans la simulation pourra donc sortir de l'intervalle des valeurs sélectionnées.

5.4 Analyses spécifiques aux véhicules poids lourds

5.4.1 Vitesse

Selon l'OCR, article 5, la vitesse maximale est limitée à 80 km/h pour les voitures automobiles lourdes (exception faite des voitures de tourisme lourdes), les trains routiers, les véhicules articulés et les véhicules équipés de pneus à clous. La vitesse maximale sur les autoroutes et semi-autoroutes est limitée à 100 km/h pour les autocars (exception faite des bus à plate-forme pivotante ainsi que des bus publics en trafic de ligne concessionnaires avec places debout autorisées) et les voitures d'habitation lourdes.

Comme on peut le constater dans le tableau des vitesses par classes de véhicules (Tab. 12), les véhicules de type bus, car (classe 1) respectent (médiane) la limitation de vitesse imposée (100 km/h) par contre, pour les camions, trains routiers et véhicules articulés (classes 8, 9, 10), la limitation à 80 km/h n'est pas respectée (médiane à 88 km/h).

Une étude plus approfondie des vitesses a été menée sur les données 2008 de Denges (Fig. 25).

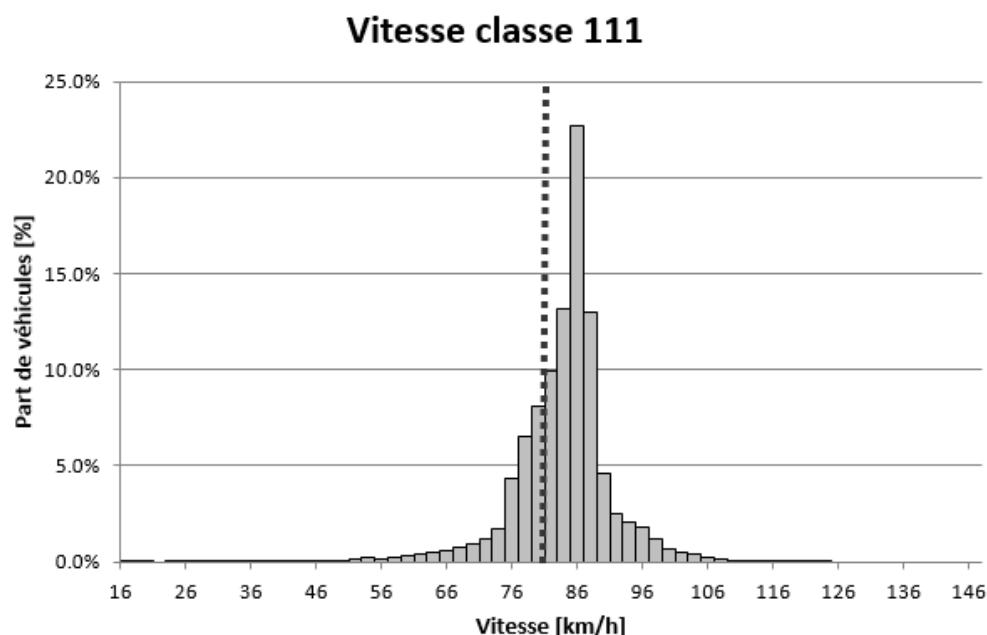


Fig. 25 Histogramme des vitesses, classe 111, Denges 2008, direction Lausanne. Limite légale (trait-tillé).

Les catégories de véhicules poids lourds 11 et 12 ont été considérées comme comprenant potentiellement des autocars et leur limite légale fixée à 100 km/h. Pour toutes les autres classes de véhicules, la limite légale (hors marges légales et déviation de la mesure) a été fixée à 80 km/h. Sur les 985'805 enregistrements poids lourds récoltés après catégorisation, 484'150 véhicules (49%) ont dépassé leur limite légale de vitesse.

Le même type d'analyse a été mené pour le cas d'étude de Monte Ceneri. Sur 1'259'910 enregistrements catégorisés, 936'235 véhicules (74%) ont dépassé leur limite légale de vitesse.

A partir des observations fournies par les stations WIM, il n'est pas possible d'obtenir le débit de trafic. Dans ce cas, on utilise la même approche sur les tranches horaires sélectionnées que celle proposée dans l'étude des données CSACR (Fig. 24).

Selon la loi fédérale sur la circulation routière (LCR, art. 2 al. 2), la circulation des poids lourds est interdite la nuit entre 22h00 et 5h00. On considère néanmoins pour l'analyse les tranches horaires suivantes : 00:00 – 06:15 et 20:30 – 24:00 (Sélection) que l'on compare avec l'ensemble de la journée (Toutes) (Tab. 13).

Tab. 13 Vitesses par classes de véhicules WIM, Denges, direction Morges, 2008

Classe	Tranche horaire	Valeur min.	25 ^{ème} centile	50 ^{ème} centile	75 ^{ème} centile	Valeur max.	Ecart-type
11	Toutes	10	87	89	90	127	7
11	Sélection	27	87	89	90	123	6
12	Toutes	10	87	89	91	139	8
12	Sélection	42	88	89	100	113	7
22	Toutes	5	86	88	89	142	6
22	Sélection	35	86	88	89	141	4
111	Toutes	16	84	87	89	113	6
111	Sélection	42	81	84	88	107	4
1111r	Toutes	11	86	88	89	102	5
1111r	Sélection	43	85	88	89	94	3

112r	Toutes	17	87	89	90	112	5
112r	Sélection	68	88	89	90	106	3
1211r	Toutes	16	84	88	89	98	5
1211r	Sélection	65	81	85	88	94	4
122	Toutes	23	86	89	90	105	6
122	Sélection	71	86	90	95	105	6
1112r	Toutes	19	85	88	89	95	6
1112r	Sélection	77	83	87	89	93	4
112a	Toutes	10	86	88	89	118	6
112a	Sélection	30	86	88	89	110	4
113a	Toutes	11	86	88	89	105	5
113a	Sélection	61	87	88	89	104	3
123a	Toutes	35	86	88	89	97	5
123a	Sélection	73	86	88	90	92	5
23	Toutes	6	88	89	89	119	8
23	Sélection	83	89	89	89	90	2

On constate que pour toutes les classes de poids lourds à l'exception des classes 11, respectivement 12 qui peuvent contenir les autocars (limitation à 100 km/h), les valeurs médianes de même que les valeurs au 25^{ème} centile dépassent les limites légales.

Afin d'estimer l'ampleur du non-respect des limitations légales imposées aux véhicules poids lourds, une analyse par tranches de dépassement de vitesse de 5 km/h est effectuée (Tab. 14). En fonction des amendes d'ordre en vigueur pour dépassement de la vitesse maximale par genre de véhicules (Ordonnance sur les amendes d'ordre, OAO, 741.031, état au 1^{er} janvier 2014, art. 303.3), sans prise en compte des dénonciations possibles (+ 25 km/h, 134 occurrences), le montant total des amendes potentielles pour l'année 2008 à Denges en direction de Morges représenterait près de 13.6 millions de francs suisses (CHF) (erreurs de mesure et déductions non considérées).

Tab. 14 Respect des vitesses légales. WIM Denges, direction Morges, 2008

Classe	Observ.	V _{légale} [km/h]	≤ V _{légale}	+ 1-5	+ 6-10	+ 11-15	+ 16-20	+ 21-25	+ 25-...
11	147'917	80/100	138'382	8'827	566	104	31	5	2
12	29'938	80/100	26'807	2'958	169	2	1	0	1
22	27'426	80	1'679	4'478	19'909	1'295	21	9	35
111	15'375	80	1'685	3'823	8'281	1'271	236	64	15
1111r	46'017	80	2'735	8'128	31'917	3'231	5	1	0
112r	12'631	80	698	1'664	8'883	1'319	48	16	3
1211r	14'920	80	1'056	4'025	8'721	1'106	12	0	0
122	3'329	80	184	573	1'964	388	157	63	0
1112r	1'450	80	124	258	906	162	0	0	0
112a	55'791	80	4'229	8'708	36'662	5'115	760	241	76
113a	64'298	80	3'895	10'349	44'403	5'616	31	4	0
123a	972	80	84	136	692	59	1	0	0
23	953	80	41	57	837	16	0	0	2
Total	421'017	-	43.1%	12.8%	38.9%	4.7%	0.3%	0.1%	0.0%

Cette analyse ouvre une question sur la limitation de vitesse des poids lourds. Il y a tout d'abord une ambiguïté entre le fait que l'on admette pour règle générale que seuls les véhicules pouvant rouler à 80 km/h peuvent emprunter les autoroutes et semi-autoroutes et que dans le cas des poids lourds (exceptions décrites précédemment), la limite légale de vitesse maximale est de 80 km/h. Il y a donc ambiguïté entre le fait que leur vitesse minimale et maximale est identique.

D'autre part, la différence de vitesses entre véhicules est un facteur important de la sécurité routière. La différence moyenne entre les véhicules légers et lourds est d'environ 24 à 27 km/h (~16 miles par heure, mph). Sachant de plus que certains poids lourds ont des vitesses plus faibles que la médiane et que les véhicules légers utilisant la voie de dépassement des vitesses plus élevées que la médiane de leur classe de véhicule, cette différence est encore plus élevée.

Une étude menée par D. Salomon en 1964 pour le gouvernement des Etats-Unis d'Amérique [31] a démontré que plus la vitesse d'un véhicule est éloignée de la moyenne de vitesse de l'ensemble des véhicules, plus son risque d'accident est élevé (Fig. 26). Cette étude a également mis en avant le fait qu'il n'existe que peu de différences entre le taux d'accident d'un véhicule léger et celui d'un véhicule lourd. Le ratio d'implication dans un accident (involvement rate) représente le ratio d'implication pour 100 millions de miles parcourus.

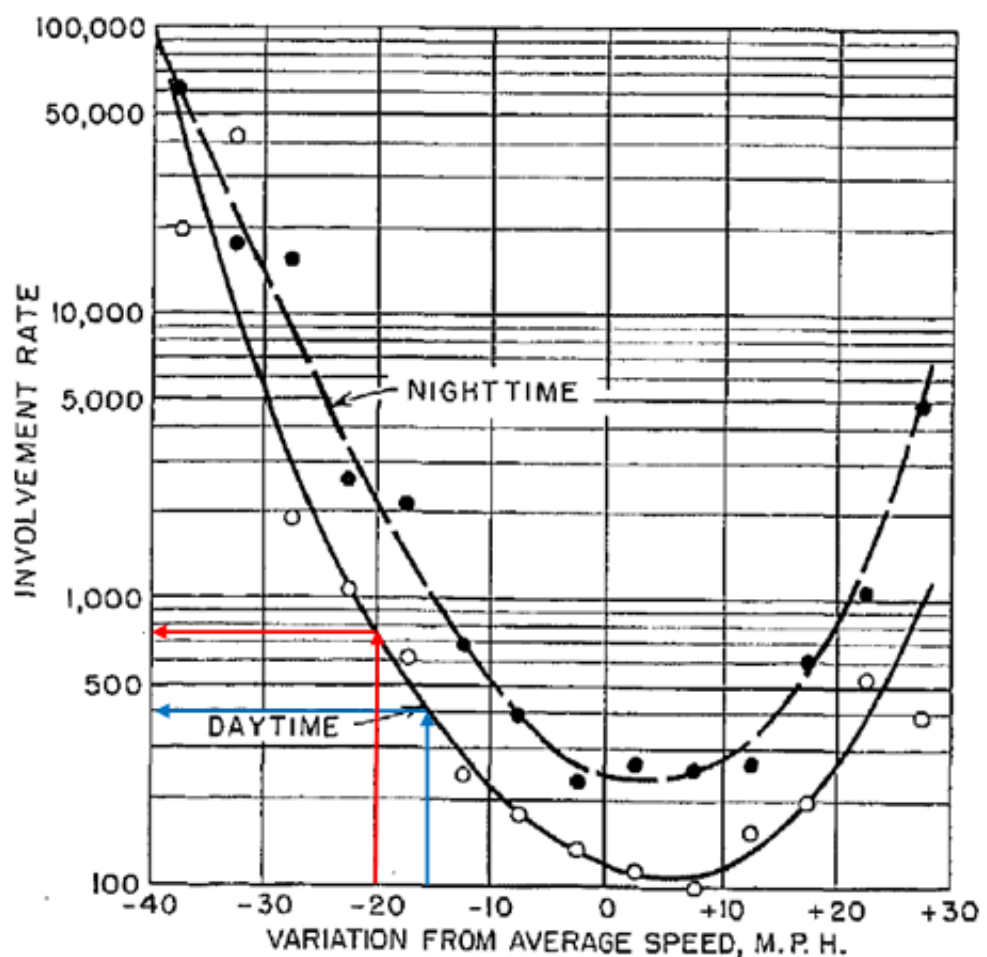


Fig. 26 Relation entre le risque de collision et la variation de vitesse par rapport à la vitesse moyenne [31].

Dans le cas de l'étude de réseaux autoroutiers, on peut admettre que la vitesse moyenne de l'ensemble du flux (tous véhicules confondus) est approximativement égale à celle des véhicules légers (~95% du flux, en nombre de véhicules). On obtient donc une variation de 16 mph, pour laquelle on remarque que le ratio d'implication dans un accident augmente d'un facteur 4 (en bleu). Avec des véhicules poids lourds qui respecteraient la vitesse légale de 80 km/h, la différence de vitesse serait alors d'environ 32 km/h (~20 mph, en rouge) et le ratio d'implication dans un accident augmenterait alors d'un facteur 7.5, soit près du double que précédemment. Un flux de véhicules à vitesse homogène serait donc le plus conseillé.

Selon le rapport SINUS 2014 du Bureau de prévention des accidents (bpa, Suisse), les accidents qui impliquent un véhicule poids lourds sont rares mais d'une gravité importante. Lors de collisions graves (années 2011-2013), le chauffeur poids lourds est responsable principal de l'accident dans environ 50% des cas avec participation d'un usager antagoniste vulnérable (cycliste, piéton, motocycliste). Avec des voitures automobiles, ce pourcentage descend environ de moitié (26%).

Sur autoroute, le risque de collision frontale entre deux véhicules devrait être faible. Toutefois, dans les accidents impliquant un camion avec tués entre 2012 et 2014 (20 occurrences hors accidents d'autocars), on répertorie tout de même 5 cas (25%) dont le type d'accident est une collision frontale (à priori contresens). Dans 4 autres cas répertoriés, la vitesse est la cause de l'accident dont un seul sur chaussée sèche.

Lors d'un choc, la quantité d'énergie cinétique dissipée dépend de la masse des véhicules et de leur vitesse relative initiale. En considérant le cas d'une collision frontale à 70 km/h entre une voiture de tourisme (~1.5 tonnes) et un poids lourd (20 tonnes), la quantité d'énergie cinétique dissipée est 3.7 fois plus importante que si la voiture de tourisme fonçait seule dans un mur en béton. La vitesse est donc un facteur important dans l'accidentologie et la gravité de celle-ci.

5.4.2 Masse des véhicules, répartition par axe

Les histogrammes de masse totale ainsi que de répartition des masses par axes sont établis par classes poids lourds (WIM) (Fig. 27).

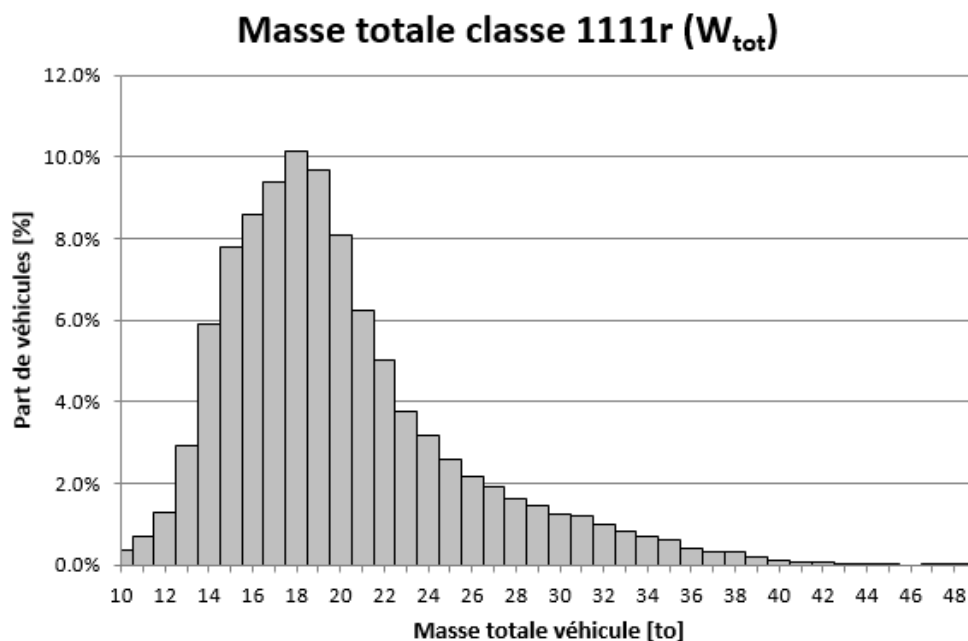


Fig. 27 Exemple d'histogramme de masse totale, classe 1111r, Denges 2008, direction Lausanne.

Comme énoncé précédemment (Chap. 3.5.2), l'importance de la masse dans l'analyse structurale se rapporte aux charges par axes et non à la masse totale du véhicule. C'est pourquoi des histogrammes ont été également établis pour les différents axes de chaque classe de véhicule poids lourds (Fig. 28).

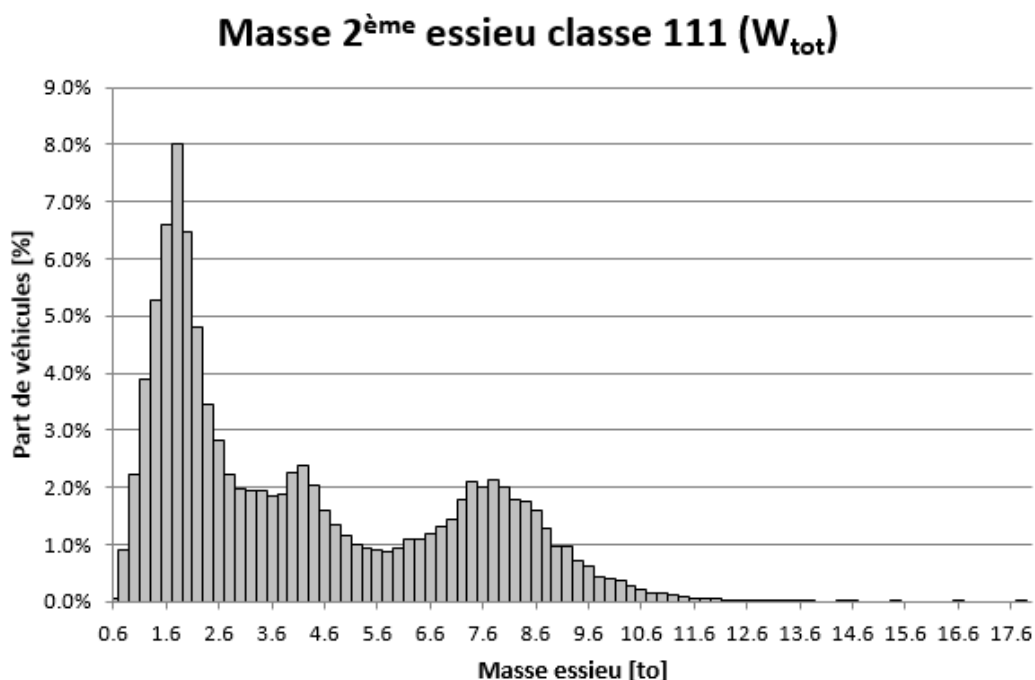


Fig. 28 Exemple d'histogramme de masse par axe, classe 111, 2^{ème} axe, Denges 2008, direction Morges.

Contrairement aux caractéristiques géométriques des véhicules qui sont globalement indépendantes des sens de circulation, les répartitions des charges des véhicules diffèrent à l'intérieur d'une même classe en fonction du sens de circulation (Fig. 29).

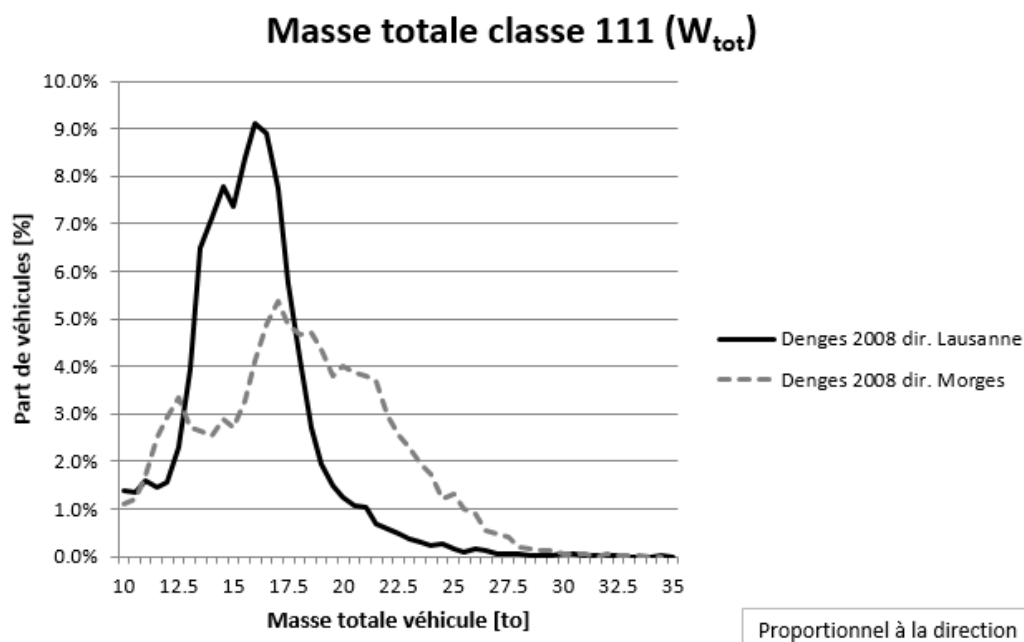


Fig. 29 Exemple d'histogramme de masse totale par direction, classe 111, Denges 2008.

5.4.3 Relations entre caractéristiques

Plusieurs relations entre différentes caractéristiques des véhicules poids lourds sont établies :

- Relation masse totale – masse par axes
- Relation masse totale – longueur totale
- Relation longueur totale – longueurs d'entraxe

Les équations liant les caractéristiques de même que le coefficient de corrélation (R^2) ont été déterminés (Fig. 30).

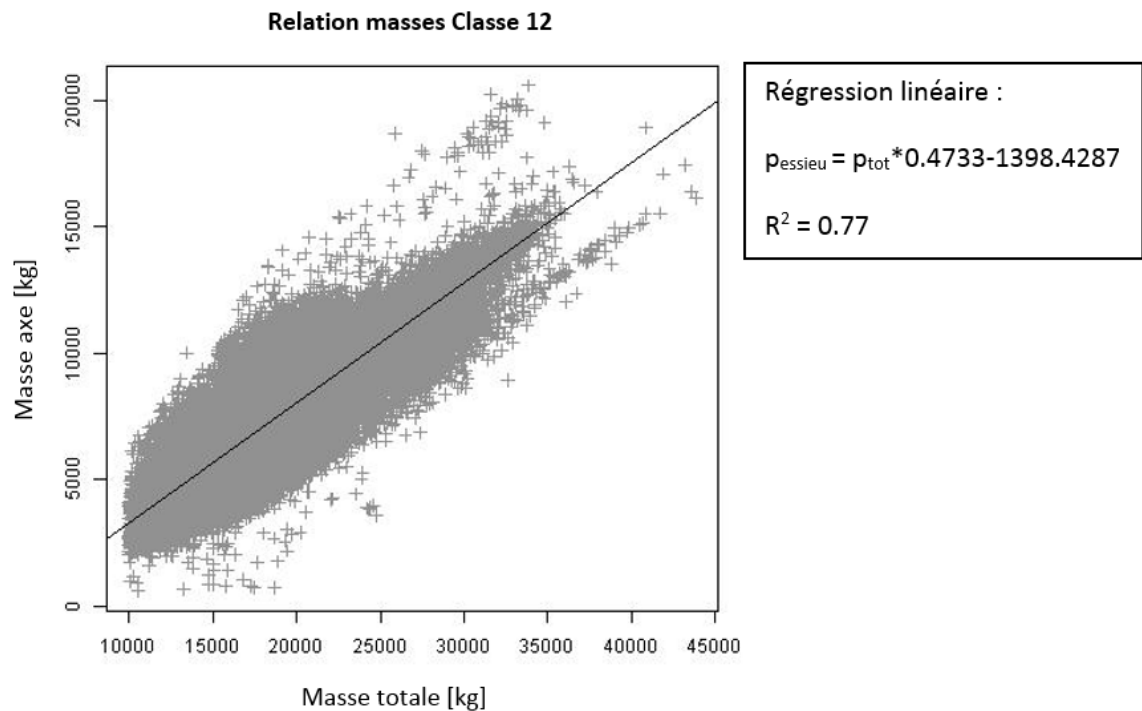


Fig. 30 Exemple de relation entre la masse totale et la masse par axe, classe 12, 2^{ème} axe, Denges 2008.

En règle générale, il en ressort que la masse du premier axe du véhicule (axe avant) n'est pas corrélée à la masse totale du véhicule.

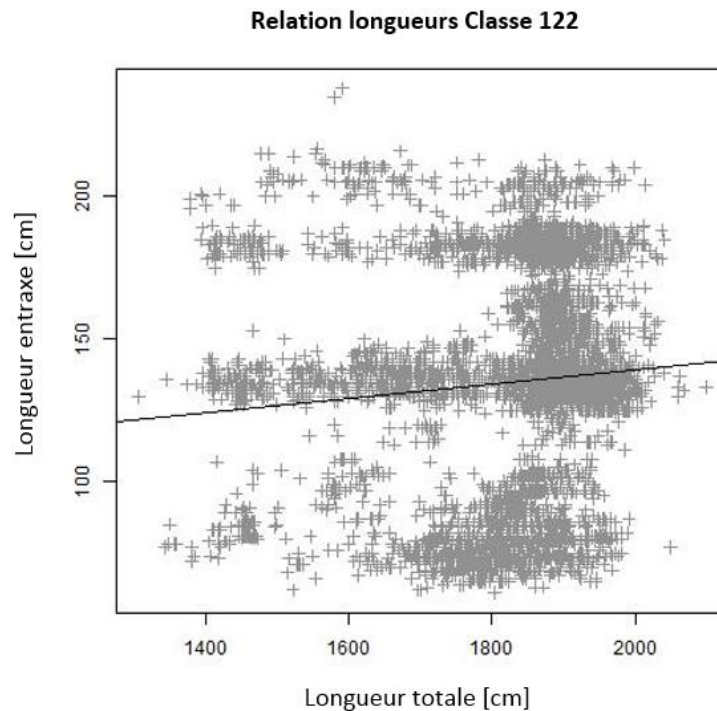


Fig. 31 Exemple de relation entre la longueur totale et longueur d'entraxe, classe 122, 4^{ème} entraxe, Denges 2008.

Il est ressorti de cette analyse sur la relation entre la longueur totale et l'entraxe que la corrélation entre ces deux valeurs géométriques est dans tous les cas très faible voire nulle (Fig. 31). C'est pourquoi ont été établis pour les véhicules poids lourds des histogrammes de longueurs d'entraxes. On constate, sur cette base, que certaines classes de véhicules pourraient être séparées en plusieurs classes de véhicules.

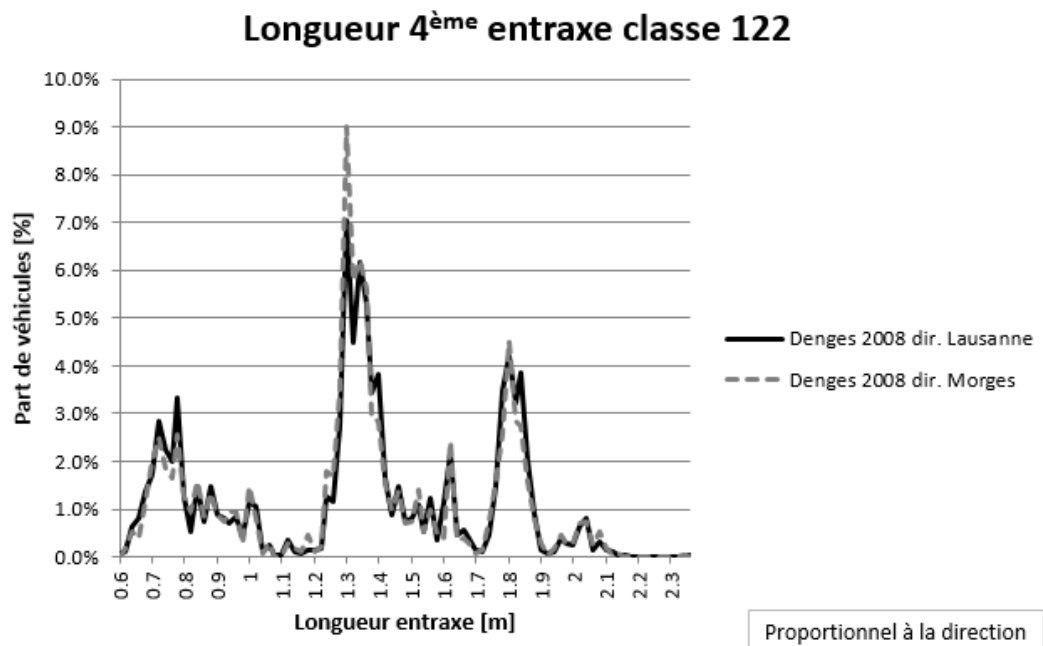


Fig. 32 Exemple d'histogramme d'entraxe par direction, classe 122, 4^{ème} entraxe, Denges 2008.

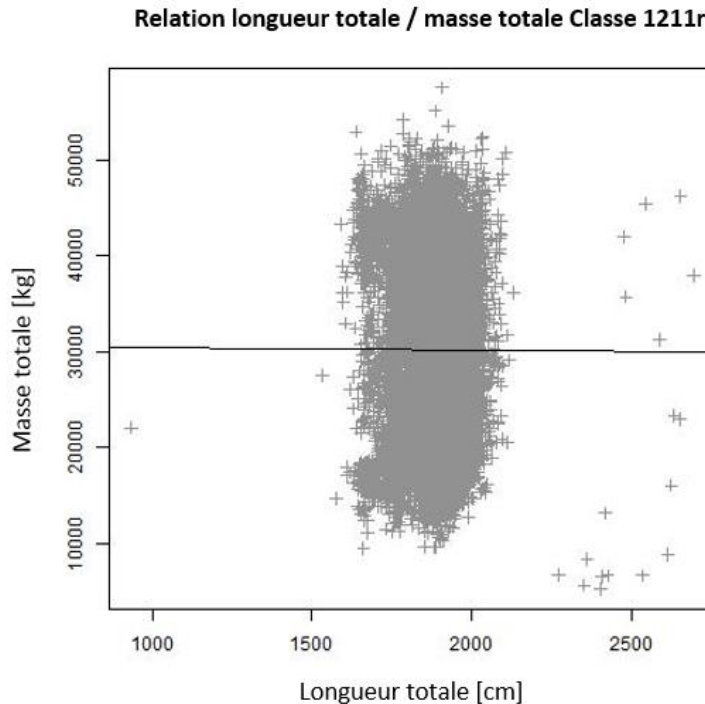


Fig. 33 Exemple de relation entre la longueur totale et masse totale, classe 1211r, Denges 2008.

Pour toutes les classes de véhicules poids lourds, la longueur totale du véhicule n'est pas corrélée à sa masse totale (Fig. 33).

De ces différentes relations étudiées, seule la relation entre la masse totale et la masse par axe a été utilisée (Fig. 30). Pour les autres caractéristiques, les distributions (histogrammes) ont été considérées.

5.5 Mise en application de la RPLP et introduction aux 40 tonnes

La redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP) a été mise en place afin d'appliquer l'initiative des Alpes et de satisfaire aux exigences européennes en matière de trafic poids lourds.

En 1992, afin de faire transiter les poids lourds qui contournaient alors la Suisse en raison de la limitation à 28 tonnes, le peuple s'est prononcé pour la création de deux axes ferroviaires (Gothard, Lötschberg). La construction de la nouvelle ligne ferroviaire à travers les Alpes (NFLA) qui comprend ces deux projets principaux est entre autres financée par la RPLP. En décembre 2016, le tunnel de base du Saint-Gothard devrait être mis en exploitation, le tunnel de base du Lötschberg, lui, l'est depuis 2007. Le tunnel de base du Monte Ceneri complètera cette offre avec une mise en exploitation prévue en 2019.

En 1994, l'initiative populaire « Pour la protection des régions alpines contre le trafic de transit » dite initiative des Alpes a été approuvée par le peuple et les cantons. Le but visé de cette initiative est de transférer le trafic des marchandises de la route au rail. Dans la loi d'application de l'initiative, il est prévu un seuil à l'horizon 2018 qui limite à 650'000 poids lourds la traversée des Alpes par les routes de transit, alors qu'actuellement (2014), on parle d'un chiffre de 1.033 millions ([32]).

Un instrument de la politique des transports suisse, entre autres dans le but de limiter le transit des poids lourds par la route notamment suite à la nouvelle limite à 40 tonnes et de faire participer financièrement l'utilisateur de l'infrastructure, était alors de mettre en place une redevance de passage sur l'ensemble du territoire, la RPLP.

Suite à une votation populaire (1984), une taxe forfaitaire pour les poids lourds était introduite en 1985 pour une durée de 10 ans (Redevance forfaitaire sur le trafic des poids lourds, RTPL). S'en est directement suivi une initiative populaire fédérale « contre une taxe fédérale inappropriée sur les poids lourds » qui échoua au stade de la récolte des signatures. En 1986, une initiative populaire fédérale « pour la suppression de la taxe sur les poids lourds » était lancée puis finalement retirée en 1990. En 1991, le Conseil Fédéral lance une procédure de consultation afin de redéfinir la taxe poids lourds et de la lier au nombre de kilomètres parcourus. En 1994, le peuple suisse acceptait deux textes en plus de l'initiative des Alpes. Le premier concernait l'extension pour 10 ans de la taxe poids lourds forfaitaire avec une augmentation du forfait. Le second texte concernait la mise en place d'une redevance poids lourds liée aux prestations. En 1995, un premier projet de loi voyait le jour mais celui-ci ne fit pas consensus. En 1996, un nouveau projet du gouvernement était proposé. Suite à ce nouveau projet, le parlement adopta en 1997 un projet de loi. L'Association suisse des transports routiers (ASTAG) lança en 1997 un référendum contre cette loi. En 1998, le peuple suisse était donc appelé à se prononcer sur la RPLP. Elle fut acceptée, en remplacement de la taxe forfaitaire, avec application au 1^{er} janvier 2001. En 2005 puis en 2008, les tarifs de la taxe ont été augmentés. En 2009, le Tribunal administratif fédéral approuve le recours de l'ASTAG et d'entreprises de transport sur l'augmentation de 2008. La Direction générale des douanes a alors engagé une procédure au Tribunal fédéral contre l'arrêt du Tribunal administratif fédéral. Le Tribunal fédéral a donné raison à ce recours en 2010. En 2012, les tarifs de la RPLP ont été adaptés en fonction du renchérissement. Des discussions et procédures sont encore d'actualité concernant l'augmentation de 2008 et le déclassement de certaines catégories de véhicules.

Cette redevance visant uniquement la charge transportée et le nombre de kilomètres parcourus par cette charge et non la charge fixe (poids à vide du véhicule), il y a peu de chances qu'elle influence le remplissage des poids lourds et leur poids total.

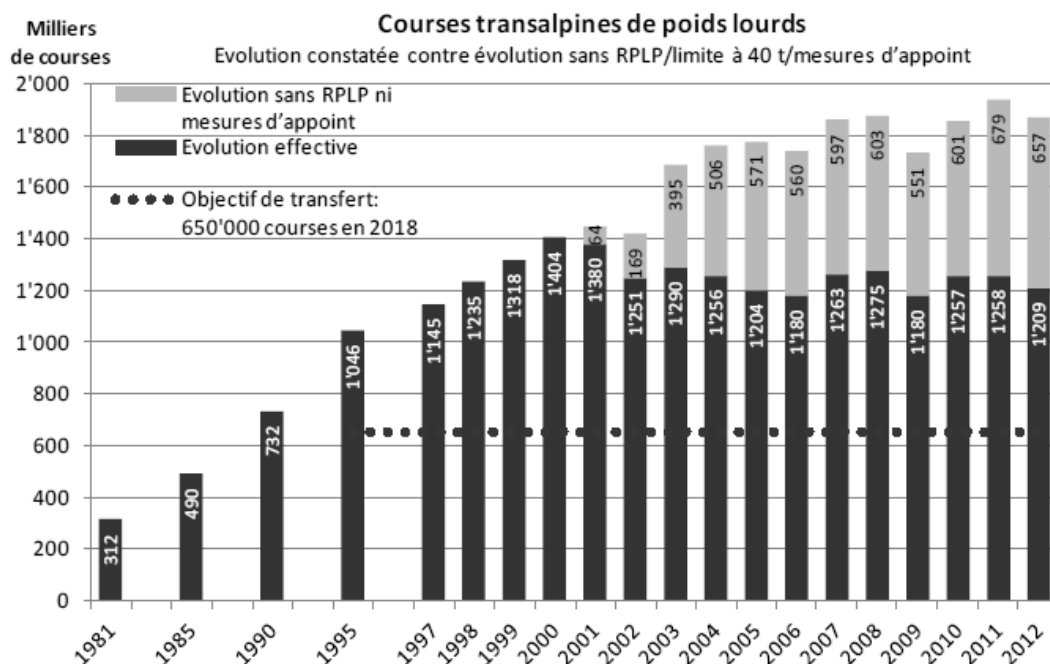


Fig. 34 Effet de la RPLP et des mesures d'appoint sur l'évolution des courses poids lourds, uvek.admin.ch.

Dans le cadre des accords bilatéraux avec l'Union Européenne, le relèvement de la limite de poids total de 28 à 40 tonnes est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2005. Toutefois, il était prévu dans ces accords un contingentement des poids lourds de plus de 34 tonnes dès le 1^{er} janvier 2001.

L'effet de ce relèvement de la limite de poids total est analysée sur les stations WIM de Denges, Monte Ceneri et du Gothard. Le mois de comparaison sélectionné est celui d'avril en raison de la disponibilité des données. Il est important de noter que suite à l'accident meurtrier d'octobre 2001 (11 morts), des travaux ont eu lieu de nuit durant le mois d'avril 2002 (Fermeture de 22h à 5h) et que la circulation des poids lourds s'est faite de manière unidirectionnelle (décembre 2001 – septembre 2002). Cela explique le faible nombre de poids lourds relevé durant le mois d'avril 2002 (Fig. 39).

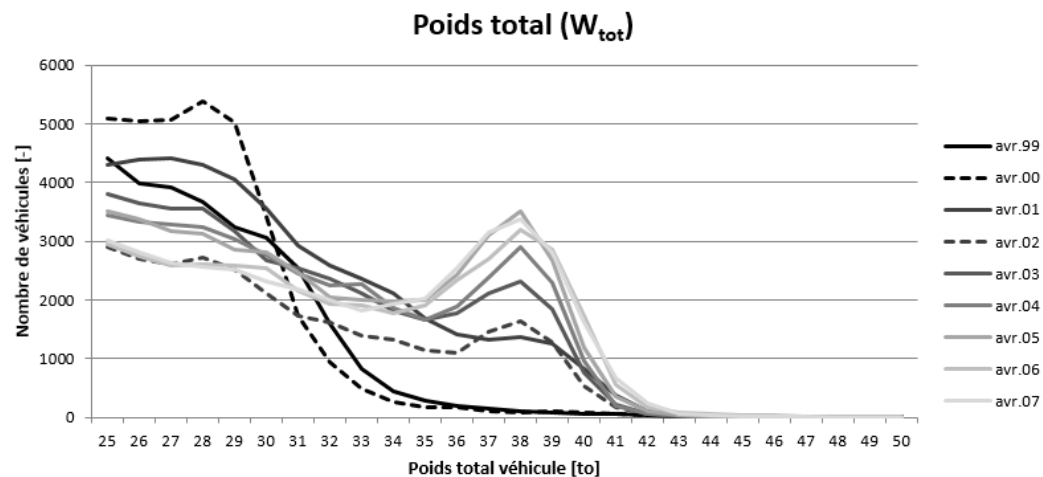


Fig. 35 Distribution des poids totaux des véhicules, WIM Gothard (2 sens de circulation).

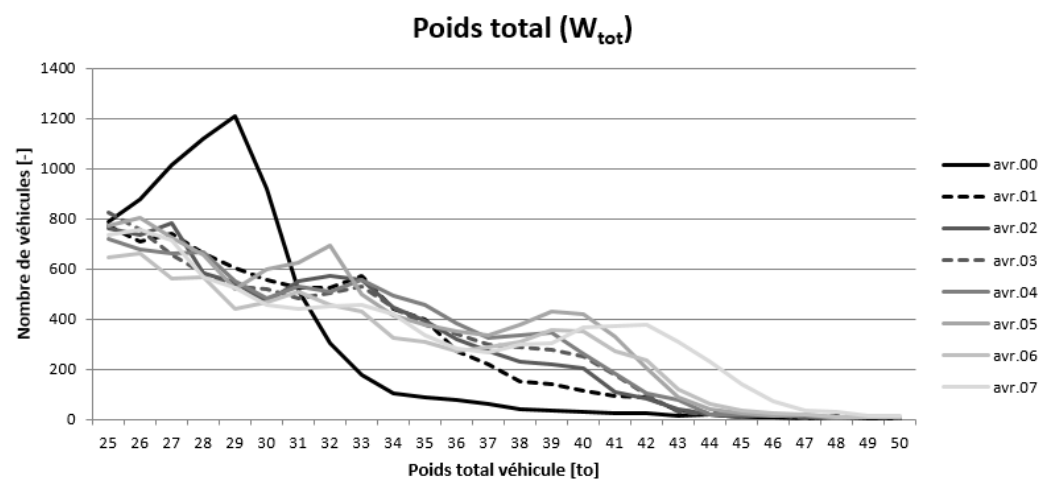


Fig. 36 Distribution des poids totaux des véhicules, WIM Denges, direction Morges (2 voies de circulation).

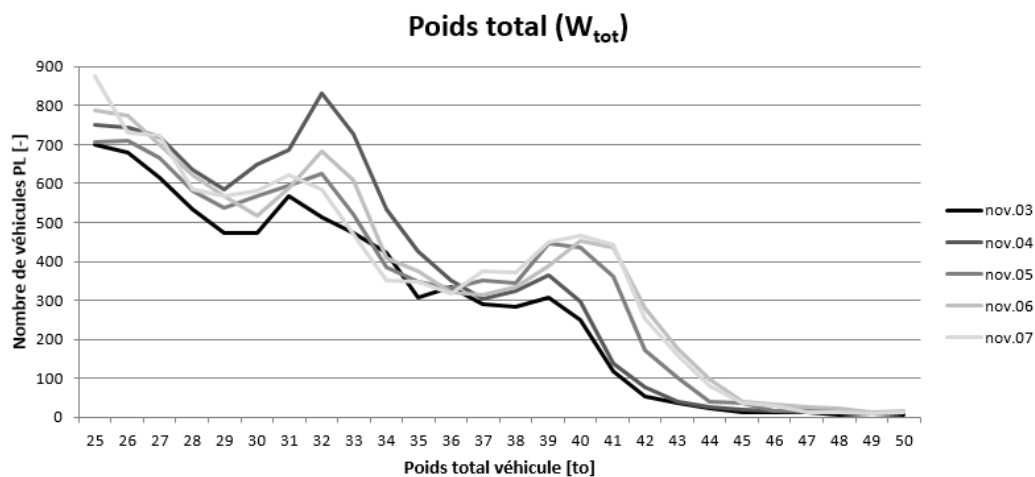


Fig. 37 Distribution des poids totaux des véhicules, WIM Denges, direction Morges (2 voies de circulation).

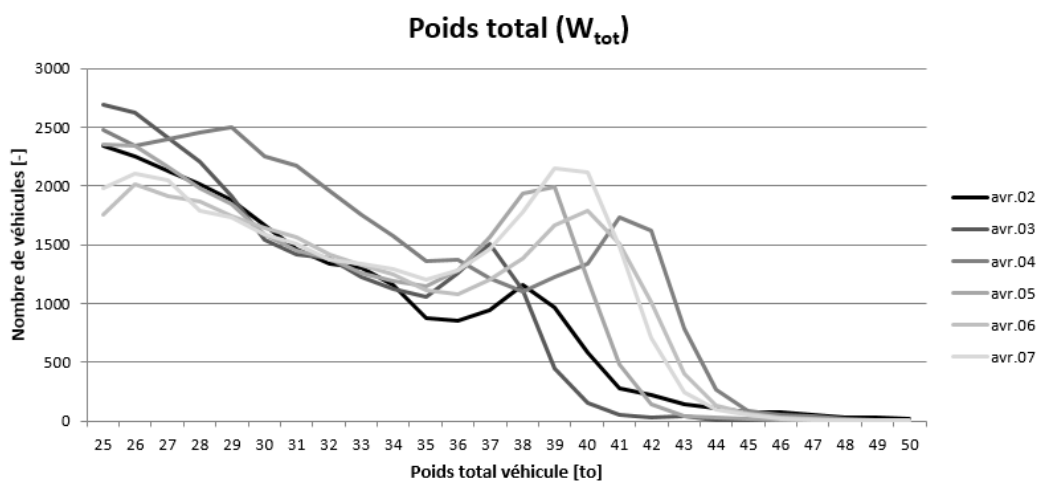


Fig. 38 Distribution des poids totaux des véhicules, WIM Monte Ceneri, direction Bellinzona (2 voies de circulation).

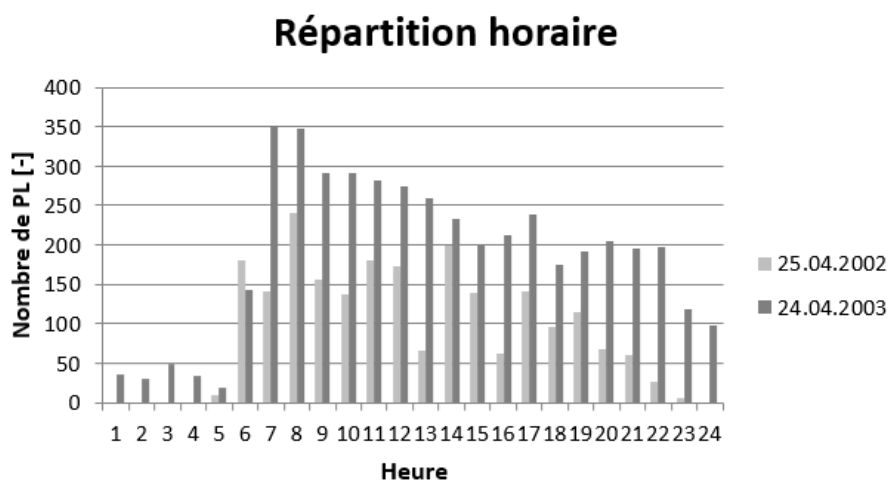


Fig. 39 Comparaison journalière, WIM Gothard (2 sens de circulation).

On remarque globalement un aplatissement de la pointe aux environs de 30 tonnes au fil des années de même qu'une élévation de la courbe aux environs de 40 tonnes. Un déplacement de la courbe aux alentours des 40 tonnes vers la droite (véhicules en surcharge de poids total ou véhicules sous autorisations spéciales) tel que l'on peut le constater au niveau de la station WIM de Denges (Fig. 36) est à considérer avec précautions. En effet, en comparant les résultats de cette station sur un autre mois, cette tendance n'est pas confirmée (Fig. 37).

Les distributions des poids totaux, le nombre de poids lourds détectés par mois diffèrent d'une station WIM à une autre. Les résultats de cette analyse confirment donc l'hypothèse qui est faite qu'un « modèle suisse » de charges de trafic n'est pas envisageable (Résumé, chap. 2.2).

Les effets des décisions prises en matière de réglementation du trafic routier sont directement visibles sur les statistiques routières. Des relèvements des poids totaux des véhicules impliquent de procéder à l'évaluation structurale des ouvrages d'art (ce qui a été fait lors de l'introduction aux 40 tonnes). Les méga-camions (60 tonnes) sont déjà introduits partiellement à l'échelle européenne. Une éventuelle modification de la réglementation afin d'introduire ce type de véhicules sur le réseau suisse nécessite une étude spécialisée sur les différents ouvrages d'art afin d'en estimer la sécurité structurale (statique par combinaison des cas de charges déterminants, fatigue par évaluation à l'aide d'histogrammes de chargements, ...). En matière d'évaluation structurale des chaussées, comme vu précédemment (chap. 3.5.2), le poids total du véhicule n'est pas déterminant, il sera donc nécessaire d'évaluer l'agressivité des poids lourds en considérant leurs charges par essieux (proposition : utilisation de bases de données étrangères). Il faudra également prendre en compte l'évaluation des tracés routiers : ce genre de véhicules pouvant atteindre plus de 25 mètres de longueur, il sera nécessaire d'évaluer leur influence en particulier sur la géométrie, leur introduction dans le trafic, les difficultés liées au dépassement par d'autres poids lourds.

6 Comportement des usagers

Lorsque la discussion s'oriente sur le comportement des usagers de la route, il est généralement fait allusion au comportement responsable et donc aux notions de sécurité et d'interaction entre usagers. Dans ce domaine, la prévention et la formation des usagers est développée et appliquée en Suisse par la Confédération ou plusieurs organisations.

Dans le cadre de simulations de trafic, tout comme dans la réalité du terrain, le comportement des usagers intervient sur de nombreux paramètres ayant une influence directe sur les résultats obtenus (capacité, diagrammes de vitesse, accidentologie, ...).

Les recherches menées par une étudiante en génie civil ayant effectué son travail de master au sein du Lavoc [33] servent également de base à ce chapitre.

6.1 Comportement global des usagers de la route

On s'intéressera ici principalement aux paramètres modifiables et influents dans notre cas dans le logiciel sélectionné pour la simulation du trafic (AIMSUN) (Tab. 15).

Tab. 15 Paramètres modifiables et comportement relatif des usagers

Paramètre	Comportement des usagers
Longueur du véhicule	Caractéristiques du véhicule
Largeur du véhicule	Caractéristiques du véhicule
Vitesse	Caractéristiques du véhicule Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)
Acceptation de la vitesse	Comportement du conducteur
Accélération / décélération	Caractéristiques du véhicule Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)
Distance intervéhiculaire à l'arrêt	Comportement du conducteur
Temps intervéhiculaire	Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)
Temps maximum d'attente	Comportement du conducteur
Acceptation de guidage	Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)
Dépassement par la droite	Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)
Changement de voie imprudent	Comportement du conducteur
Circulation en voie rapide après dépassement	Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)
Temps de réaction (en conduite, à l'arrêt)	Comportement du conducteur Comportement dépendant des conditions (lieu, trafic)

Les caractéristiques du véhicule dépendent du comportement d'achat (choix du véhicule) effectué par l'utilisateur. En effet, il est probable de trouver, dans certaines régions ou pays, principalement certains types de véhicules (véhicules tous terrains, marques locales). De même, certains transporteurs de marchandises ont tendance à privilégier certains types de véhicules.

Des paramètres modifiables et intégrés au logiciel tels que les émissions polluantes produites par les différents véhicules ne sont pas considérés ici bien qu'étant dépendants du comportement des usagers (caractéristiques du véhicule, comportement de conduite et dépendant des conditions de circulation). En effet, dans le cas de l'évaluation de la performance structurale, de telles considérations n'ont pas d'influence directe.

Dans les sous-chapitres qui vont suivre, les différents paramètres sont développés du point de vue de chaque type de véhicule ou dans la mesure du possible de chaque classe de véhicule poids lourds.

6.1.1 Longueur du véhicule

Les longueurs des différentes classes de véhicules sont déterminées par traitements statistiques et ont été détaillées aux chapitres 5.2 et 5.4.3.

6.1.2 Largeur du véhicule

Les largeurs des véhicules n'ayant pas d'influence sur le comportement en circulation lors des simulations de trafic, aucune analyse spécifique n'a été menée. Cette caractéristique n'a qu'une influence visuelle lors des simulations.

En termes de comportement réel de circulation, la largeur a une influence qui sera détaillée dans le chapitre 6.2 concernant la position latérale des véhicules.

6.1.3 Vitesse

Les vitesses relatives aux différentes classes de véhicules sont déterminées par traitements statistiques et ont été détaillées aux chapitres 5.3 et 5.4.1.

6.1.4 Acceptation de la vitesse

On remarque selon les analyses précédentes (Tab. 13 et Tab. 14) que la valeur maximale légale est dépassée pour un certain nombre de catégorie de véhicules (Tab. 16).

Tab. 16 Dépassement de vitesse par classes de véhicules
CSACR, Denges, direction Morges, juin 2008

Classe	Tranche horaire	Observations	Dépassement de la limite à 120 km/h [%]
1 : Bus, car	Toutes	4'233	0.2
1 : Bus, car	Sélection	561	0.0
2 : Motocycle	Toutes	23'812	30.3
2 : Motocycle	Sélection	3'604	40.0
3 : Voiture de tourisme	Toutes	1'071'418	18.2
3 : Voiture de tourisme	Sélection	149'404	26.5
4 : Voiture de tourisme avec remorque	Toutes	4'643	0.8
4 : Voiture de tourisme avec remorque	Sélection	502	1.0
5 : Voiture de livraison	Toutes	130'289	20.1
5 : Voiture de livraison	Sélection	13'948	32.5
6 : Voiture de livraison avec remorque	Toutes	3'904	0.3
6 : Voiture de livraison avec remorque	Sélection	366	0.3
7 : Voiture de livraison avec galerie	Toutes	2'009	0.0
7 : Voiture de livraison avec galerie	Sélection	194	0.0
8 : Camion	Toutes	23'744	4.6
8 : Camion	Sélection	2'567	12.0
9 : Train routier	Toutes	8'258	0.2
9 : Train routier	Sélection	1'203	0.3

10 : Véhicule articulé	Toutes	12'249	0.4
10 : Véhicule articulé	Sélection	1'509	0.3

Dans le logiciel de simulation de trafic, une seule vitesse légale peut être imposée de base par tronçon de route. Des scénarios de limitations de vitesse peuvent néanmoins être intégrés par tronçon et par catégories de véhicules. Dans le cas des véhicules poids lourds, on ne s'intéresse pas particulièrement à leur dépassement de vitesse légale, mais plus à refléter dans la simulation leur vitesse réelle, celle-ci étant inférieure à la vitesse de base du tronçon de route (120 km/h dans le cas des autoroutes). Dans les cas d'études hors autoroutes ou lors de limitations de vitesses à 80km/h, un éventuel dépassement de vitesse des poids lourds (non-acceptation de la vitesse) doit être analysé de cas en cas.

Le facteur d'acceptation de vitesse est un paramètre stochastique fixe attribué à chaque véhicule. Si le facteur est supérieur à 1, le véhicule aura tendance à dépasser la limitation légale de vitesse. S'il est inférieur à 1, à avoir une vitesse maximale inférieure à la limitation légale. Des valeurs limites fixées à deux écarts-types (s) définissent un espace comprenant 95% de l'ensemble des valeurs.

Afin d'évaluer la sensibilité du facteur d'acceptation de vitesse du logiciel de simulation de trafic, un tronçon d'autoroute constitué de deux voies de trois kilomètres sur laquelle circulent uniquement des voitures automobiles de tourisme légères (véhicule type, Tab. 17) est modélisé. La vitesse légale maximale autorisée est fixée à 120 km/h.

Dans le but d'éviter une quelconque congestion, le débit est fixé à 1500 véhicules/heure sur trois heures d'étude (Fig. 24). Un détecteur de récolte des données simulées est situé à 100 mètres de la sortie du tronçon étudié.

Le véhicule type Cartest2 a pour caractéristiques d'acceptation de vitesse les données de base d'AIMSUN.

Tab. 17 Caractéristiques du véhicule type

Type	Vitesse maximale désirée [km/h]				Acceptation de vitesse [-]			
	Moy.	s	Min.	Max.	Moy.	s	Min.	Max.
Cartest1	115	11	70	235	1.0	0	1.0	1.0
Cartest2	115	11	70	235	1.1	0.1	0.9	1.3
Cartest3	115	11	70	235	1.0	0.1	0.8	1.2
Cartest4	115	11	70	235	1.2	0.1	1.0	1.4
Cartest5	115	11	70	235	1.3	0.1	1.1	1.5
Cartest6	115	11	70	235	1.0	0.2	0.6	1.4
Cartest7	115	11	70	235	1.1	0.2	0.7	1.5
Cartest8	115	11	70	235	1.2	0.2	0.8	1.6
Cartest9	115	11	70	235	1.3	0.2	0.9	1.7

Tab. 18 Résultats des simulations d'acceptation de vitesse

Type	v_{moy} [km/h]	Nb observations illégales [%]	Min. [km/h]	Max. [km/h]
Données statistiques (Toutes)	112	18.2	5	235
Données statistiques (Sélection)	115	26.5	36	231
Cartest1	110	0.0	77	120
Cartest2	111	17.4	77	143
Cartest3	108	8.2	77	141
Cartest4	112	20.0	77	143

Cartest5	112	19.8	77	143
Cartest6	104	6.3	72	148
Cartest7	108	12.4	77	141
Cartest8	110	16.9	77	143
Cartest9	111	18.7	77	143

Les vitesses minimum ne peuvent être atteintes en raison des conditions de circulation fluides qui sont générées et les vitesses maximales sont des cas extrêmes (Tab. 18). Les vitesses maximales obtenues par simulation (~143 km/h) sont représentatives du 99^{ème} centile des données statistiques (Chap. 5.3). En s'intéressant principalement aux observations dépassant la limite légale, sous les caractéristiques de base d'AIMSUN (Cartest2) les résultats obtenus sont suffisamment proches des données statistiques issues des comptages routiers. C'est pourquoi on retiendra ce cas.

Pour les véhicules poids lourds, on retiendra également les valeurs de base d'AIMSUN (Tab. 19).

Tab. 19 Caractéristiques du véhicule type poids lourds

Type	Acceptation de vitesse [-]			
	Moy.	s	Min.	Max.
Truck1	1.05	0.1	1.0	1.10

6.1.5 Accélération

L'accélération respectivement la décélération d'un véhicule automobile dépend de plusieurs paramètres :

- Etat et type de freins
- Structure et type de pneus
- Amortisseurs
- Texture de la surface de la route
- Etat météorologique de la surface de la route (mouillée, glace, ...)
- Répartition des masses

L'accélération maximale que l'on considère est l'accélération moyenne obtenue pour le passage de 0-100 km/h. On pourrait considérer une accélération encore plus haute sur un intervalle de vitesse plus faible (0-50 km/h) car de manière générale, l'accélération a tendance à diminuer avec la vitesse (Fig. 40). Cependant, cette accélération peut être considérée comme représentative car elle est obtenue dans des conditions spécifiques idéales (chauffeur professionnel, voiture non-chargée, contenu du réservoir optimisé, bonnes conditions de surface de chaussée, pneus neufs). Un conducteur lambda peut donc vraisemblablement atteindre cette valeur dans les premiers instants de son accélération.

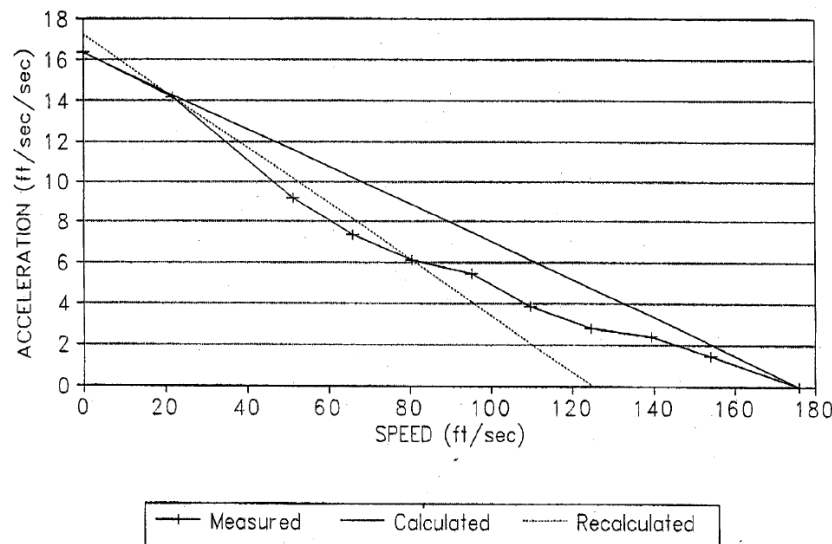


Fig. 40 Relation vitesse / accélération [34].

Tab. 20 Potentiel d'accélération de 0-100 km/h

Type de voiture automobile	$v_{\max}$ [km/h]	0-100 km/h [s]	Accél. 0-100 [m/s ²]
Alfa Romeo Giulietta Quadrifoglio Verde	242	6.8	4.1
Audi A1 2.0 TDI 140	217	8.2	3.4
Fiat Panda 4x4 1.3 Mjet 16V	150	18.0	1.5
Peugeot 206 1.4	173	12.2	2.3
Mercedes Classe E 250 Cdi BlueEfficiency	240	7.7	3.6

A partir de quelques types de voiture automobile analysés (Tab. 20), une valeur moyenne d'accélération de 3 m/s² est envisageable. Cette valeur est également celle proposée dans le catalogue de base d'AIMSUN.

En termes de poids lourds, certains véhicules de compétition (show truck) parviennent à des accélérations de plus de 5 m/s². Toutefois, ce type de véhicule n'est pas représentatif des véhicules poids lourds qui sillonnent les routes étudiées. Sans recherche complémentaire à ce sujet, on considérera la valeur proposée dans le catalogue de base d'AIMSUN à savoir 1 m/s².

6.1.6 Décélération

En termes de décélération, l'efficacité des systèmes de freinage fait l'objet d'une législation. L'ordonnance concernant les exigences techniques requises pour les véhicules routiers / Annexe 7 Freins, mode d'expertise et prescriptions relatives à l'efficacité (OETV, état au 1^{er} janvier 2014) définit la décélération minimum qui doit être atteinte par les différents systèmes de freinage par type de véhicule (Tab. 21, Tab. 22). De manière générale, est entendu par le terme « frein de service » le système de freinage actionné par la pédale de frein et par le terme « frein auxiliaire » le frein actionné en cas de défaillance du système de freinage soit le frein à main. Ce dernier pouvant également être combiné au frein de stationnement.

Tab. 21 *Décélération minimum frein de service*

Type	Décélération [m/s ²]
M1 : Voiture de tourisme	5.8
M2 : Minibus, autocars jusqu'à 5 tonnes	5.0
M3 : Autocars de plus de 5 tonnes	5.0
N1, N2, N3 : Véhicules affectés au transport de choses (poids lourds)	5.0

Tab. 22 *Décélération minimum frein auxiliaire*

Type	Décélération [m/s ²]
M1 : Voiture de tourisme	2.9
M2 : Minibus, autocars jusqu'à 5 tonnes	2.5
M3 : Autocars de plus de 5 tonnes	2.5
N1, N2, N3 : Véhicules affectés au transport de choses (poids lourds)	2.2

Les valeurs proposées dans le catalogue de base d'AIMSUN sont les suivantes :

Tab. 23 *Valeurs de base AIMSUN*

Caractéristique	Valeur [m/s ²]
Voiture de tourisme – Décélération normale	4.0
Voiture de tourisme – Ecart-type décélération normale	0.25
Voiture de tourisme – Décélération maximale	6.0
Voiture de tourisme – Ecart-type décélération maximale	0.50
Poids lourds – Décélération normale	3.5
Poids lourds – Ecart-type décélération normale	1.00
Poids lourds – Décélération maximale	5.0
Poids lourds – Ecart-type décélération maximale	0.50

Une étude sur un projet afférent (Projet de recherche AGB 2011/003, Actualisation des forces de freinage pour l'évaluation des ponts routiers) répertorie les situations de freinage sur les ouvrages d'art afin d'estimer les charges liées à celles-ci. Il est proposé pour hypothèse que la différence entre une situation entraînant une influence sur la structure et une situation « normale » de freinage se situe aux environs de 4 m/s², avec dans cette situation, au moins un des véhicules considérés atteignant cette décélération. De par l'analyse de plus de 1100 situations de freinage sur différents types des routes (poids lourds individuels avec décélération d'au moins 4 m/s²), il en ressort que la décélération moyenne est située à environ 4.6 m/s² avec des cas extrêmes sur autoroutes à 7 m/s² et sur routes locales à 9 m/s².

Les intervalles des valeurs de base d'AIMSUN comprenant globalement les limites légales de même que les cas mentionnés ci-avant, on propose de conserver ces valeurs dans le cadre des simulations de trafic.

6.1.7 Distance intervéhiculaire à l'arrêt

Il est relativement peu fréquent de trouver des situations d'arrêt obligatoire (feux de signalisation, intersection, ...) au niveau des ouvrages d'art et notamment dans le cadre des réseaux autoroutiers. Les cas d'arrêt sur ouvrages d'art représentent généralement des situations de congestion et dans ces cas, les vitesses sont faibles de sorte qu'au niveau des efforts, les forces liées à la masse du véhicule sont statiques et moins fréquentes (débit momentané moins important). En termes de dimensionnement des ouvrages d'art, on peut se retrouver face à un cas statique extrême (chaîne de poids

lourds à l'arrêt). En termes de dimensionnement des chaussées, la durée d'application des charges est plus importante et donc l'effet sur les déformations (orniérage) est plus marqué. D'autre part, l'influence sur la fatigue des ouvrages et le dimensionnement des chaussées du point de vue du trafic pondéral équivalent total (répétition des charges, historique des charges), sont moindres. Sans investigations complémentaires, on choisira les valeurs de base d'AIMSUN à savoir une distance intervéhiculaire à l'arrêt de 1.0 m pour les véhicules légers et de 1.5 m pour les véhicules poids lourds.

6.1.8 Temps intervéhiculaire

Le temps intervéhiculaire peut être défini dans le logiciel de simulation de trafic par différents paramètres. Les lois de poursuite (interactions entre véhicules en file) du logiciel AIMSUN font appel au modèle de Gipps ([35], [36]). Celui-ci propose que la vitesse du véhicule (n) soit choisie soit :

- En considérant une vitesse (V_1) dépendant d'une accélération (a) (durant un temps de réaction (τ)) en vue d'atteindre une vitesse désirée (V_{des}) :

$$V_{1(n,t+\tau)} = V_{(n,t)} + 2.5a_{(n)}\tau \left(1 - \frac{V_{(n,t)}}{V_{des(n)}}\right) \left(0.025 + \frac{V_{(n,t)}}{V_{des(n)}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

- En considérant une vitesse dépendant du véhicule précédant (n-1) afin de permettre l'arrêt du véhicule de manière sécuritaire, sans collision (vitesse dépendante du temps de réaction (τ)) :

$$V_{2(n,t+\tau)} = d_{(n)}\tau + \left(d_{(n)}^2\tau^2 - d_{(n)} \left[2(x_{(n-1,t)} - s_{(n-1)} - x_{(n,t)}) - V_{(n,t)}\tau - \frac{V_{(n-1,t)}^2}{d_{est(n-1)}}\right]\right)^{\frac{1}{2}}$$

où $s_{(n-1)}$ est la longueur du véhicule précédent et d_{est} sa décélération estimée.

La position du véhicule suivant est finalement donnée en fonction de sa vitesse choisie :

$$x_{(n,t+\tau)} = x_{(n,t)} + \min(V_{1(n,t+\tau)}; V_{2(n,t+\tau)})\tau = x_{(n,t)} + V_{(n,t+\tau)}\tau$$

De plus, la distance entre les deux véhicules doit toujours respecter la distance intervéhiculaire minimale fixée :

$$x_{(n-1,t+\tau)} - x_{(n,t+\tau)} \geq V_{(n,t+\tau)} \cdot \text{Temps intervéhiculaire min}_{(n)}$$

Une analyse du temps intervéhiculaire a été effectuée sur les données du capteur CSACR CH043 (Préverenges, Autoroute A1, Lausanne-Genève) du mois de juin 2013. Il a été considéré pour hypothèse que les véhicules se suivent lorsque le temps intervéhiculaire est inférieur à 5 secondes (165m à 120 km/h ; 140m à 100 km/h, 110m à 80 km/h).

Pour chaque classe de véhicule (CSACR, Swiss 10, Fig. 8), une courbe de tendance polynomiale de degré 6 de la distribution des temps intervéhiculaires a été calculée (Fig. 41). Les maximums des courbes de tendance, dans les cas où la courbe a pu être établie (entre parenthèses) et les médianes des distributions par intervalles de 0.1 secondes sont décrits ci-après (Tab. 24).

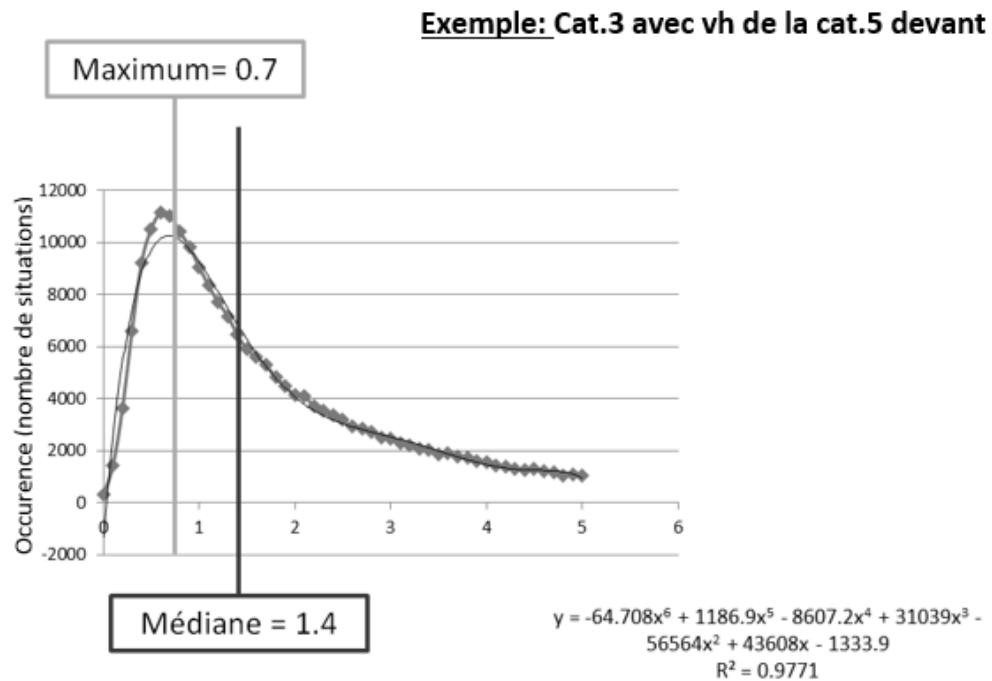


Fig. 41 Exemple de courbe polynomiale des temps intervéhiculaires [33].

Le maximum de la courbe de tendance peut être décalé d'environ deux intervalles (0.2 secondes) en raison de la forme de l'échantillon et de sa taille, raison pour laquelle il est indiqué à titre indicatif.

Tab. 24 Temps intervéhiculaires en secondes par classes Swiss 10. Exemple Fig. 41 en gras.

		Véhicule étudié (véhicule suivant) – Swiss 10									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Véhicule précédent (véhicule de tête) – Swiss 10	1	2.0 (1.2)	1.7 (0.5)	1.7 (0.9)	2.2 (1.3)	1.7 (1.0)	1.8 (-)	1.9 (-)	2.0 (0.9)	2.2 (-)	2.3 (-)
	2	1.7 (0.7)	0.8 (0.1)	1.4 (0.6)	1.7 (0.7)	1.4 (0.6)	1.5 (0.6)	2.0 (-)	1.7 (0.7)	2.0 (0.7)	1.8 (0.8)
	3	2.0 (1.2)	1.2 (0.5)	1.4 (0.7)	2.1 (1.3)	1.4 (0.7)	2.1 (1.2)	2.4 (1.8)	1.9 (0.8)	2.4 (1.6)	2.3 (1.4)
	4	1.8 (-)	1.7 (0.5)	1.6 (0.8)	2.0 (-)	1.5 (0.8)	1.8 (-)	1.8 (-)	2.0 (0.5)	2.2 (-)	1.9 (1.4)
	5	2.1 (1.4)	1.3 (0.5)	1.4 (0.7)	2.0 (1.3)	1.4 (0.7)	2.1 (1.0)	2.4 (-)	1.9 (1.1)	2.3 (1.4)	2.3 (1.4)
	6	2.0 (1.4)	1.3 (-)	1.6 (0.8)	1.6 (0.8)	1.5 (0.7)	1.6 (0.8)	2.1 (-)	2.0 (1.0)	2.2 (-)	1.9 (1.2)
	7	2.2 (-)	1.3 (0.7)	1.6 (0.8)	2.3 (-)	1.6 (0.8)	1.7 (1.2)	2.2 (-)	2.2 (1.2)	2.1 (1.1)	2.1 (1.3)
	8	2.1 (0.9)	1.5 (0.5)	1.6 (0.8)	1.8 (0.8)	1.5 (0.9)	1.9 (1.0)	2.0 (1.2)	1.9 (1.1)	2.2 (1.6)	2.2 (1.5)
	9	2.1 (-)	1.6 (0.7)	1.7 (0.9)	1.7 (0.9)	1.7 (0.8)	1.9 (0.8)	2.0 (1.2)	1.9 (1.2)	2.2 (1.4)	2.1 (1.5)
	10	1.7 (1.1)	1.6 (0.5)	1.7 (0.9)	2.0 (-)	1.7 (0.9)	1.9 (-)	1.8 (1.3)	1.8 (1.1)	2.1 (1.3)	2.1 (1.3)

Il est généralement admis que le temps de réaction standard est de 2 secondes ([37]). Avec un temps intervéhiculaire de moins de 2 secondes, on se retrouve dans une situation de risque potentiel d'accident en cas de décélération. Toutes les valeurs de la pointe maximale des courbes de tendance dépassent cette limite de 2 secondes et s'approchent plutôt de la seconde.

Les véhicules poids lourds (Classes Swiss 10 ; 8 ; 9 et 10) sont ceux qui respectent au mieux une distance équivalente à 2 secondes. Entre poids lourds, les temps intervéhiculaires sont plus importants qu'avec les autres usagers.

Il est inquiétant de constater que les usagers les plus vulnérables (motocyclistes) sont ceux qui respectent le moins cette distance de sécurité et pour lesquels les autres usagers les suivent à une distance insuffisante.

Comme indiqué dans un mandat de recherche précédant mené par le Lavoc ([16]), les modèles de comportement utilisés dans les logiciels de simulation de trafic ne peuvent générer des accidents entre véhicules. De plus, le temps de réaction d'un usager varie (distraction, fatigue, ...) alors que dans le logiciel de simulation AIMSUN, une seule valeur déterministe du temps de réaction peut être attribuée à chaque classe de véhicules.

Le but de ce projet n'est pas de déterminer les situations potentielles d'accidents mais d'évaluer le trafic poids lourds et ses charges associées. Pour cette raison, on s'intéressera uniquement à simuler les temps intervéhiculaires tels que mesurés statistiquement.

6.1.9 Temps maximum d'attente

Lorsqu'un véhicule est dans une situation de cédez-le-passage (y compris priorités en cas de changement de voie), la simulation de trafic prend en compte soit un modèle de changement de voie soit un calcul de l'espace libre à disposition pour effectuer le mouvement souhaité. Dans le cas où le véhicule attend plus qu'un certain temps (temps maximum d'attente), il deviendra plus « agressif » et les marges de sécurité seront réduites.

Ce paramètre n'étant pas pertinent dans le cadre de ce projet, il n'est pas étudié.

6.1.10 Acceptation de guidage

Lorsque l'infrastructure routière est complétée par un système de gestion dynamique du trafic, des messages ou indications peuvent être transmises à l'usager de la route. Le facteur stochastique d'acceptation de guidage représente la probabilité qu'un véhicule suive les indications qui lui sont données.

Ce paramètre n'étant pas pertinent dans le cadre de ce projet, il n'est pas étudié.

6.1.11 Dépassement par la droite

Des dépassements par la droite, généralement interdits (exceptions faites de la circulation en file, présélections, voies d'accélération et de décélération, motocycles et cycles) sont tout de même constatés notamment sur autoroute.

Ce phénomène est intégré dans AIMSUN sous la forme d'un pourcentage de véhicules susceptibles d'effectuer un dépassement par la droite sur l'ensemble des véhicules simulés.

Ce paramètre n'étant pas pertinent dans le cadre de ce projet, il n'est pas étudié.

6.1.12 Changement de voie imprudent

Un modèle de comportement de changement de voie identifie si un véhicule, en fonction des différences de vitesses avec le véhicule précédant et la disponibilité de la voie sur laquelle il souhaite se rendre, peut effectuer une manœuvre de changement de voie dans un espace sécuritaire.

Certains véhicules ne respectent pas les espaces sécuritaires afin d'effectuer des dépassements. Ceux-ci peuvent être représentés dans AIMSUN sous la forme d'un pourcentage de véhicules qui souhaitent effectuer une manœuvre de changement de voie.

Ce paramètre n'étant pas pertinent dans le cadre de ce projet, il n'est pas étudié.

6.1.13 Circulation en voie rapide après dépassement

La circulation en voie rapide après dépassement représente les véhicules qui, après un dépassement, au lieu de regagner la voie lente, restent dans la voie rapide. Ce type de manœuvre est interdit par la loi (LCR art. 35, OCR art. 8, 36, 42). Ce phénomène est introduit dans AIMSUN sous la forme d'un pourcentage sur les véhicules engageant une manœuvre de dépassement.

Ce phénomène n'est pas prépondérant dans l'analyse des poids lourds, la majorité des poids lourds circulant dans la voie lente, c'est pourquoi il n'est pas étudié.

6.1.14 Temps de réaction (en conduite, à l'arrêt)

Les temps de réaction ont une influence sur les décisions que prennent les usagers de la route. Dans AIMSUN, ce délai est introduit sous la forme d'une valeur fixe pouvant être déterminée pour chaque classe de véhicules. Les changements de vitesses, de voies, l'engagement dans une intersection, les distances intervéhiculaires, entre autres, sont dépendants de ce paramètre. Dans le cadre de cette étude, l'influence de ce paramètre sur les distances intervéhiculaires (Chap. 6.1.8) et donc sur les capacités a été étudié.

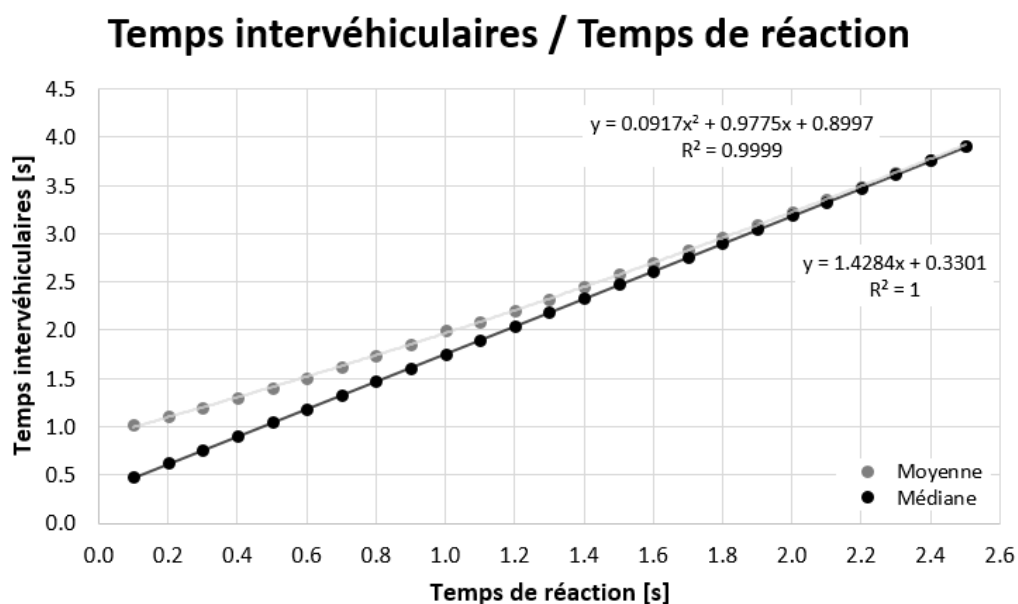


Fig. 42 Moyenne et médiane des temps intervéhiculaires en fonction des temps de réaction, flux : 840 vhc/h.

Le modèle du cas étudié consiste en une voie unique d'autoroute d'une longueur de 3 kilomètres (capacité de 2100 vhc/heure, vitesse légale 120 km/h) sur laquelle circulent des véhicules de classe 3 (Voiture de tourisme) durant un temps de simulation de 3 heures. Le débit de base imposé est de 840 vhc/h représentant ainsi le 40% de la capacité théorique de la voie (limite du degré de service A, conditions de circulation libres. Chap. 5.3).

En faisant varier le temps de réaction, on mesure les moyennes et médianes des distributions des temps intervéhiculaires (inférieurs à 5 secondes, selon hypothèse chap. 6.1.8) mesurés ponctuellement à 100m, respectivement 500m de la fin du tronçon. On s'intéressera tout particulièrement aux médianes suite à l'étude sur les temps intervéhiculaires. La relation entre la médiane des temps intervéhiculaires et le temps de réaction suit une loi linéaire telle que décrite dans la Fig. 42. De cette loi, on propose les temps de réaction des différentes classes de véhicules.

Tab. 25 Temps de réaction [s] des classes de véhicules

Classes de véhicules Swiss 10									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.17	0.61	0.75	1.24	0.75	1.24	1.45	1.10	1.45	1.38

6.2 Positionnement latéral et comportement spécifique

Le positionnement latéral des véhicules et notamment des véhicules lourds dans les voies de circulation n'a à priori pas d'influence importante dans les effets de fatigue des ouvrages d'art, par contre, en termes de dégradations des infrastructures routières (usure mécanique, orniérage, affaissements, ...), le positionnement des poids lourds est prépondérant.

Dans le cadre des simulations de trafic effectuées à l'aide du logiciel AIMSUN, il n'est actuellement pas possible d'intégrer la position latérale des véhicules, chaque véhicule étant modélisé par un point unique se déplaçant à l'intérieur d'une voie de circulation sur un seul axe.

Une étude sur l'analyse et le positionnement des poids lourds dans le trafic sur la zone d'étude de la BAU Active entre Crissier et Morges (Autoroute A1, Lausanne – Genève) [33], projet de master lié à ce projet, a permis de déterminer des modèles de comportement en termes de positionnement latéral des véhicules.

Trois situations de typologie de trafic ont été analysées :

- Tronçon de libre circulation avec BAU Active
- Tronçon d'entrée d'autoroute avec BAU Active (Morges-Est)
- Sortie d'autoroute avec BAU Active (Morges-Est)

Afin d'effectuer ces analyses, des enregistrements vidéos du jeudi 18 mars 2014 mis à disposition par la Police cantonale vaudoise ainsi que des enregistrements réalisés à l'aide de caméras numériques installées par le Lavoc sur le pont « Route de la Gracieuse » (Medium Zoom et High Zoom) ont été utilisés. Le même jour, l'utilisation d'un drone (Geodetic Engineering Laboratory, TOPO, EPFL) pour l'enregistrement vidéo a été testée.

Les emplacements des caméras ainsi que leurs champs de vision sont présentés ci-dessous (Fig. 43, Fig. 44).

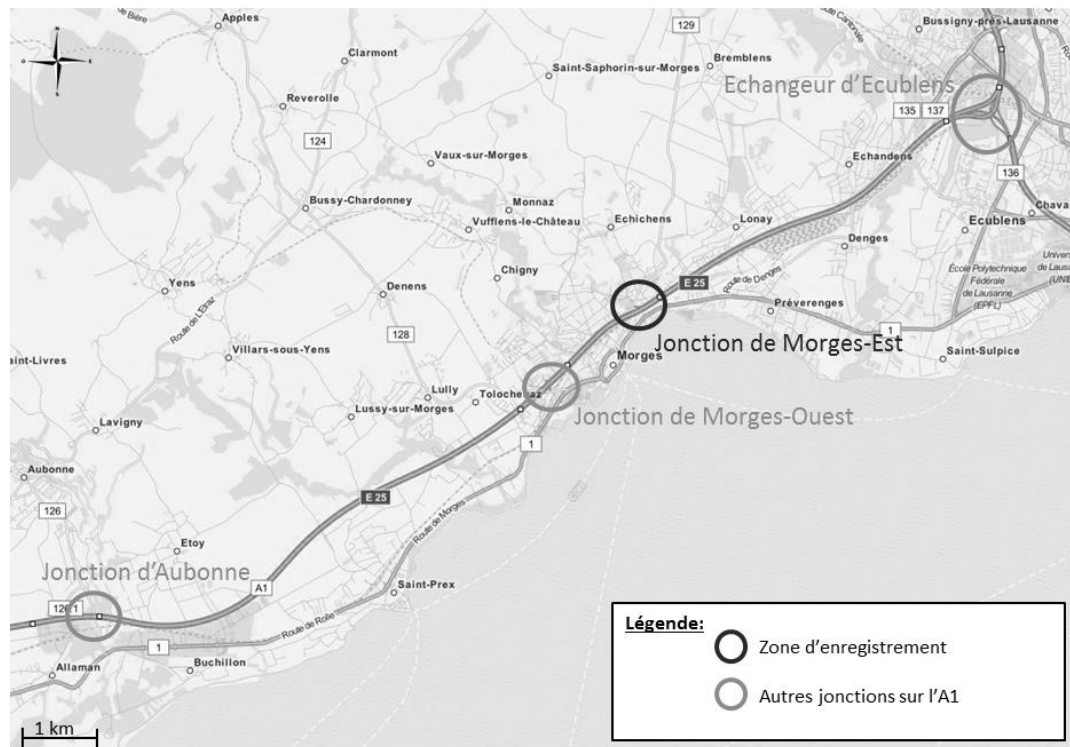


Fig. 43 Emplacement de la zone d'enregistrement.

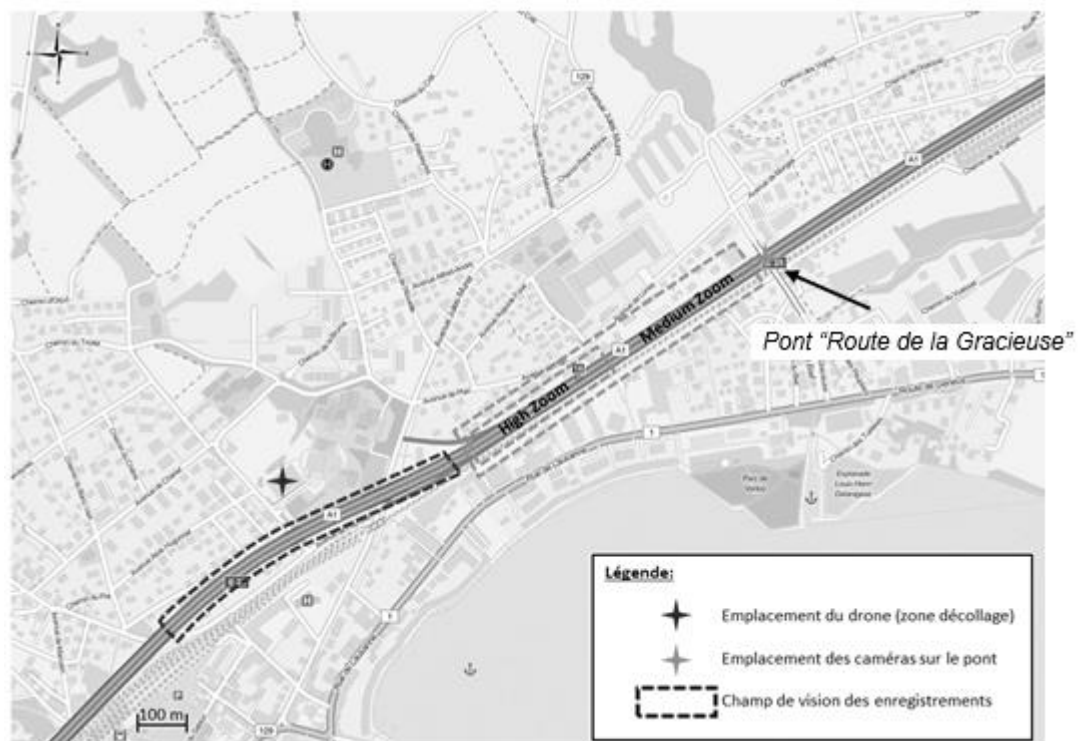


Fig. 44 Champs de vision des caméras (drone + caméras Lavoc).

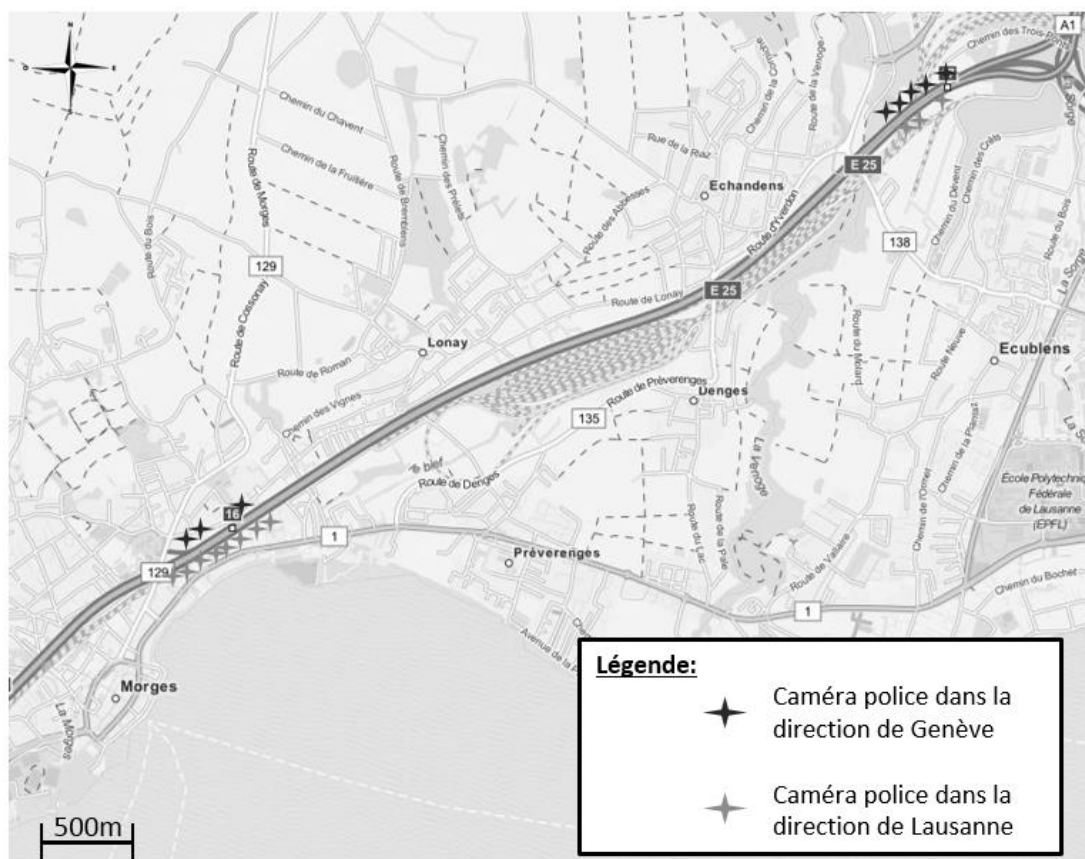


Fig. 45 Emplacements des caméras sélectionnées de la Police cantonale vaudoise.

Depuis l'entrée de Morges-Est en direction de Lausanne, une zone d'environ 775m est couverte par les différents systèmes d'acquisition vidéos. (Fig. 46). De gauche à droite, les systèmes d'acquisition sont les suivants :

- Caméra n° 101 de la Police cantonale vaudoise (zone A)
- Caméra n° 101 de la Police cantonale vaudoise (zone B)
- Caméra High Zoom
- Caméra Medium Zoom

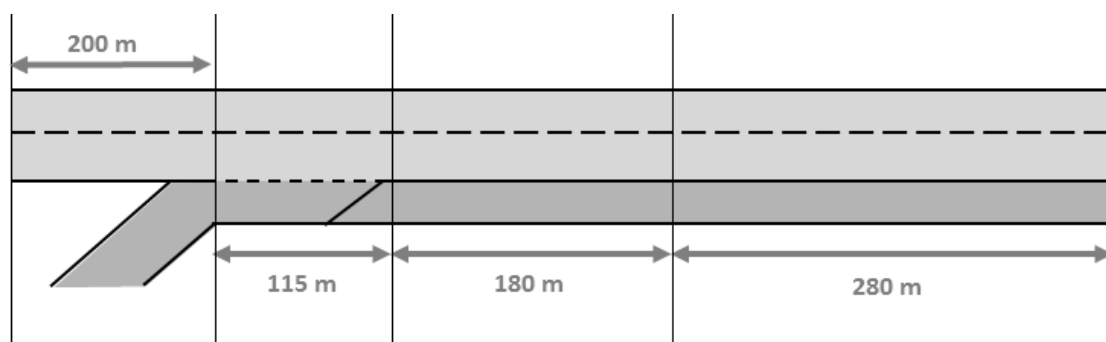


Fig. 46 Entrée de Morges-Est direction Lausanne.

En direction de Genève, une zone d'environ 805 mètres comprenant la sortie de Morges-Est est couverte (Fig. 47). De gauche à droite, les systèmes d'acquisition sont les suivants :

- Caméra n° 175 de la Police cantonale vaudoise (zone B)
- Caméra n° 175 de la Police cantonale vaudoise (zone A)
- Caméra n° 173 de la Police cantonale vaudoise
- Caméra High Zoom
- Caméra Medium Zoom

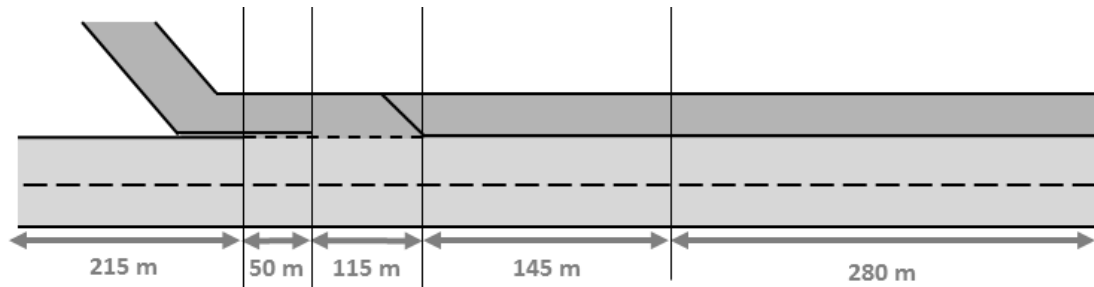


Fig. 47 Sortie de Morges-Est direction Genève.

Les différents systèmes d'acquisition vidéos ayant des champs de vision se recoupant, il a été possible de synchroniser le timing de ces enregistrements à l'aide de véhicules spécifiques (notamment poids lourds). Les poids lourds sont identifiés visuellement.

6.2.1 Comportement sur le tronçon d'entrée d'autoroute (Morges-Est)

Ce tronçon d'entrée d'autoroute représente le début de la zone de BAU Active en direction de Lausanne. Ce nœud présente donc la particularité d'un passage de deux à trois voies de circulation lorsque la BAU est ouverte au trafic. Dans ce cas, les véhicules entrants sur l'autoroute peuvent continuer librement dans la voie et les véhicules souhaitant emprunter la voie lente (BAU) doivent procéder à un rabattement. Dans le cas où la BAU est fermée à la circulation, les véhicules déjà présents sur l'autoroute sont prioritaires et les véhicules entrants doivent leur céder la priorité afin d'intégrer l'autoroute à 2 voies de circulation (entrée standard).

Deux périodes d'une heure et demie, durant lesquelles la BAU est ouverte à la circulation, ont été analysées :

- Matin : 7h30 – 9h00
- Soir : 16h00 – 17h30

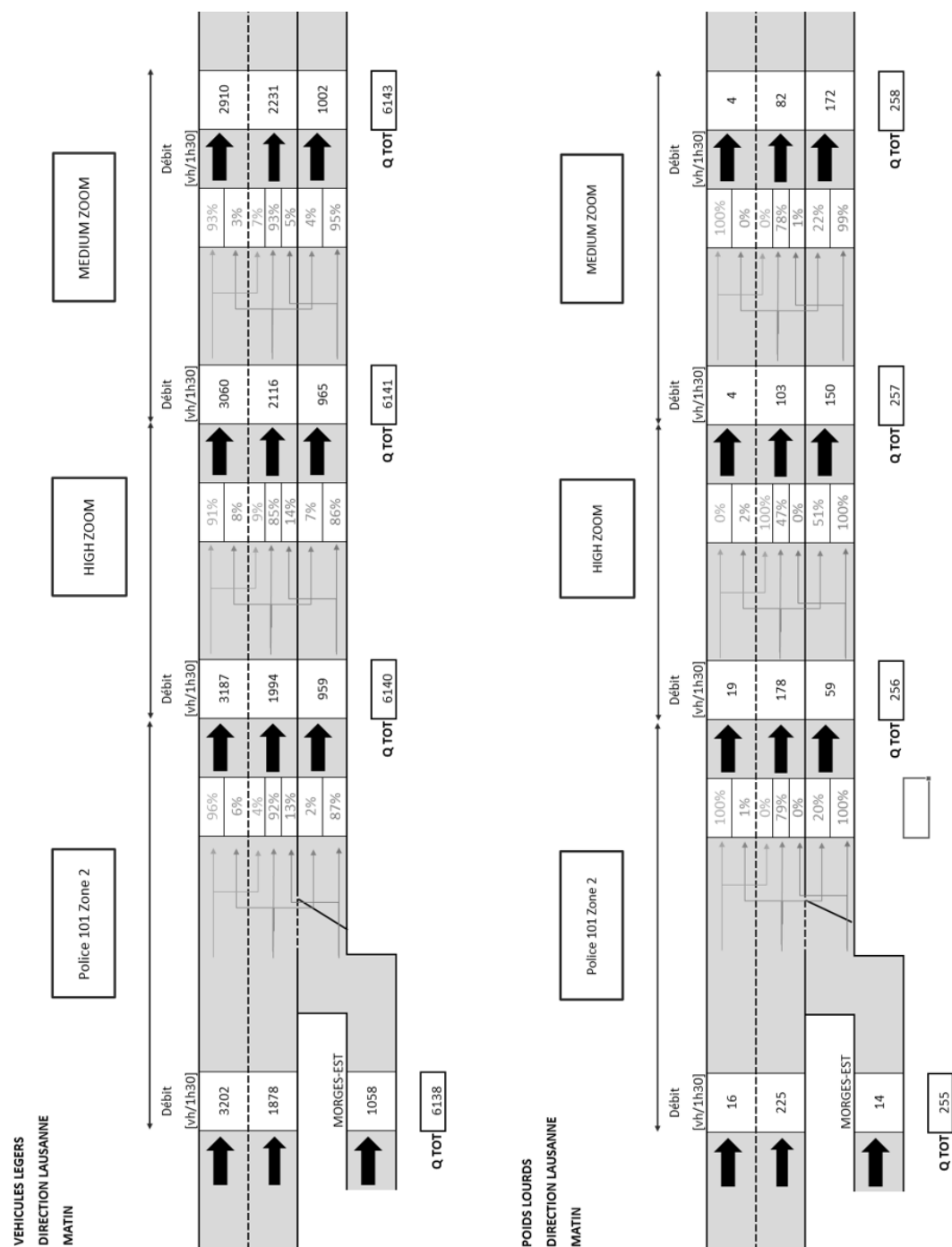


Fig. 48 Changements de voies. Entrée de Morges-Est, direction Lausanne. Matin.

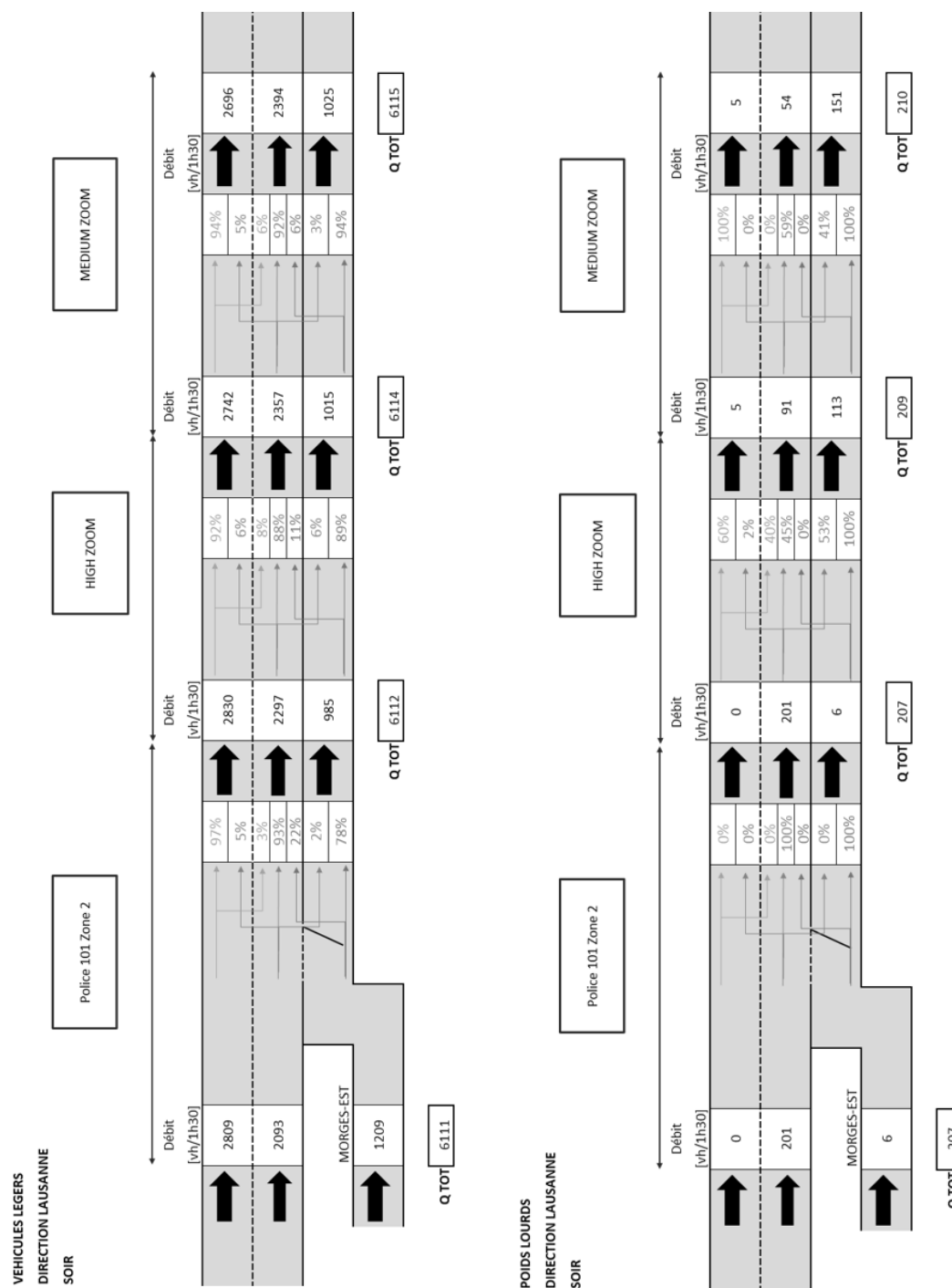


Fig. 49 Changements de voies. Entrée de Morges-Est, direction Lausanne. Soir.

Les résultats (Fig. 48, Fig. 49) présentent des différences de débits, certes faibles, qui s'expliquent par le fait que les analyses (comptage visuel sur chaque vidéo) ont été effectuées avant la synchronisation des enregistrements vidéos. Toutefois, les pourcentages de changements exprimés sont représentatifs.

Les résultats du matin et du soir ne différant que peu, les conclusions sur le comportement à l'entrée de Morges-Est peuvent être considérées pour les deux périodes.

Les véhicules légers adoptent le comportement suivant :

- Maintien à plus de 90% dans leur voie avant l'entrée.
- Débit plus important sur la voie rapide que la voie centrale (voie lente avant l'entrée).
- 13% (matin), 22% (soir) des véhicules provenant de l'entrée changent directement de voie et n'empruntent pas la BAU Active.
- Entre le début de la zone high zoom et la fin de la zone medium zoom, la proportion de véhicules empruntant la BAU Active augmente de manière relativement faible (+ 0.7%).
- A la fin de la zone d'étude (medium zoom), les flux sont globalement stabilisés.

Les véhicules poids lourds adoptent le comportement suivant :

- Tous les véhicules entrant sur l'autoroute utilisent la BAU Active et y restent jusqu'à la fin de la zone d'étude.
- Dans la première zone, 20% des véhicules présents sur la voie centrale changent vers la BAU Active. Cette tendance est uniquement visible le matin.
- Dans les zones de high et medium zoom, les changements vers les voies les plus lentes sont plus nombreux.
- L'utilisation de la BAU Active est très bonne.

Tab. 26 Distribution des débits entre voies. Morges-Est, direction Lausanne. Matin

Catégorie de véhicules	Voie	Avant l'entrée	Au niveau de l'entrée	A la fin de la zone d'étude (Medium zoom)
Légers	Gauche	63%	52%	47%
Légers	Centrale (Droite avant l'entrée)	37%	31%	36%
Légers	Entrée – BAU (Droite)	-	17%	17%
Lourds	Gauche	7%	6%	2%
Lourds	Centrale (Droite avant l'entrée)	93%	88%	32%
Lourds	Entrée – BAU (Droite)	-	5%	67%

Tab. 27 Distribution des débits entre voies. Morges-Est, direction Lausanne. Soir

Catégorie de véhicules	Voie	Avant l'entrée	Au niveau de l'entrée	A la fin de la zone d'étude (Medium zoom)
Légers	Gauche	57%	46%	44%
Légers	Centrale (Droite avant l'entrée)	43%	38%	39%
Légers	Entrée – BAU (Droite)	-	16%	17%
Lourds	Gauche	0%	0%	2%
Lourds	Centrale (Droite avant l'entrée)	100%	97%	26%
Lourds	Entrée – BAU (Droite)	-	3%	72%

Les tendances des distributions (Tab. 26, Tab. 27) sont similaires entre la période du matin et celle du soir excepté pour les poids lourds avant l'entrée où l'ensemble des véhicules se situe sur la voie centrale.

La répartition des véhicules avant l'entrée (majorité des véhicules légers à gauche) n'est pas un comportement lié spécifiquement au déplacement des véhicules en prévision de l'arrivée de nouveaux véhicules sur la voie de droite mais un comportement général dépendant du débit total. En effet, de par les observations réalisées grâce aux vidéos du drone, aucun changement de voie que ce soit des poids lourds ou des véhicules légers n'a à priori lieu dans les 400 mètres précédant la zone d'entrée de la jonction autoroutière afin d'anticiper l'arrivée de nouveaux véhicules. Aux alentours d'un débit total de 2300 vhc/h pour un tronçon d'autoroute à 2 voies (vitesse limite légale à 120 km/h), une inversion de la répartition voie de gauche (rapide) - voie de droite (lente) se produit. Une analyse menée sur les données du comptage CSACR CH043 en direction de Genève pour le mois de juin 2008 décrit ce phénomène (Fig. 50). Les données sont agrégées par intervalles de temps de 3 minutes.

Cette analyse est également vérifiée par les analyses vidéos. En effet, en période du matin en direction de Lausanne (Tab. 26) et en période du soir en direction de Genève (Tab. 29) les débits sont les plus élevés et donc la différence entre la répartition des véhicules sur la voie rapide et la voie lente est plus importante.

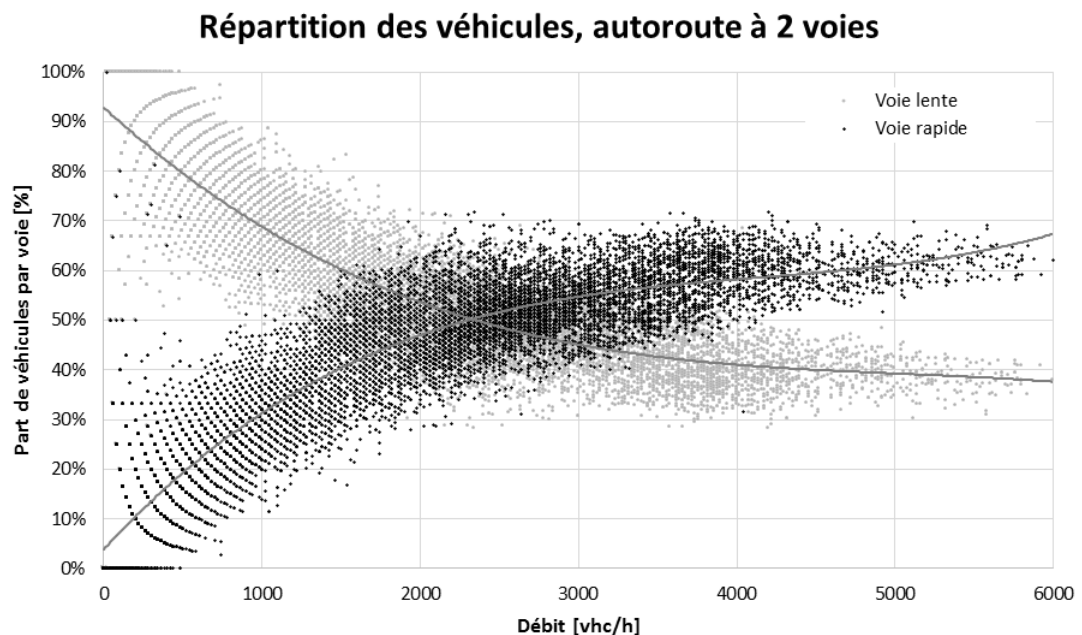


Fig. 50 Répartition des véhicules par voie. Autoroute à 2 voies, vitesse limite légale 120 km/h. Autoroute A1, capteur CH043, direction Genève.

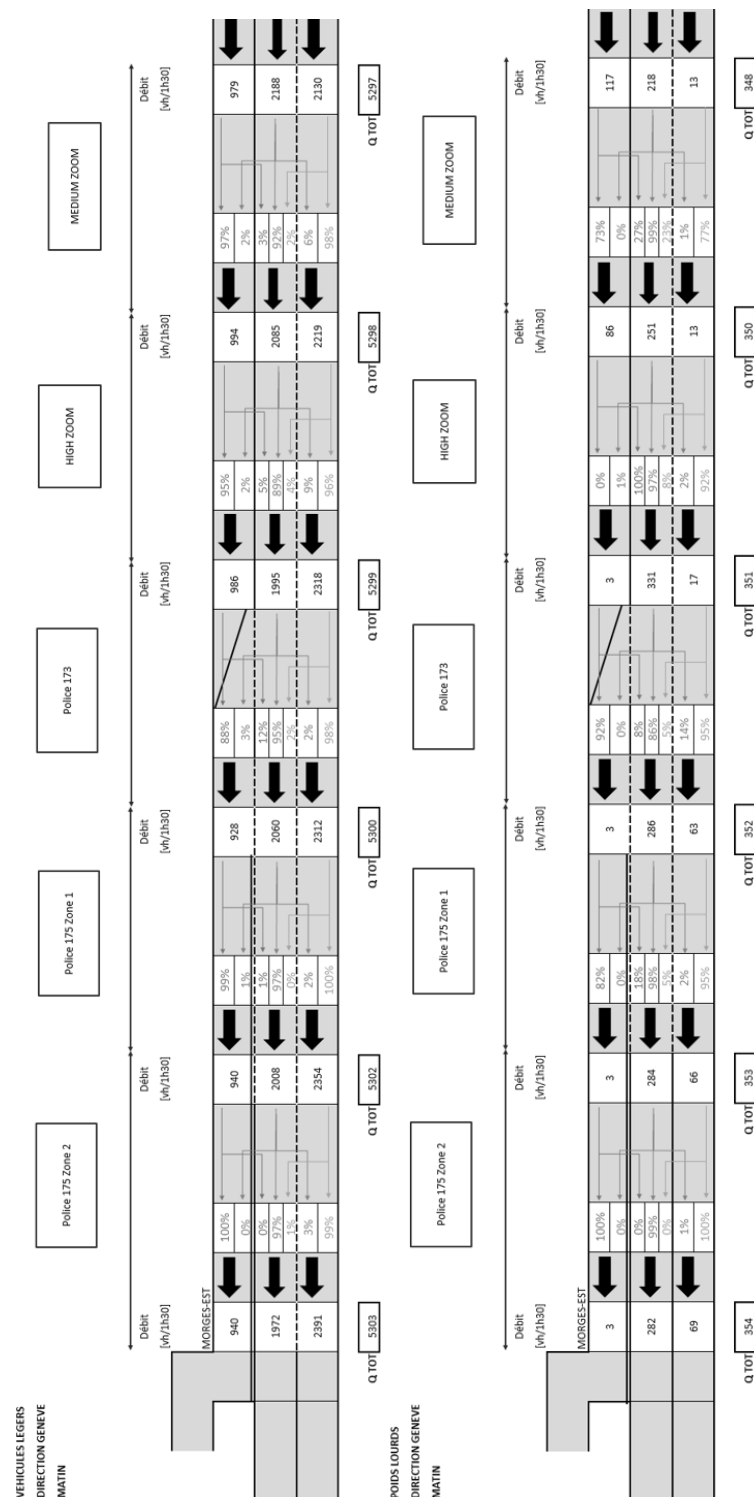
Dans le cas des véhicules poids lourds, aucune tendance d'utilisation des voies ne se dégage en fonction du débit total de véhicules. Les proportions des répartitions pour la même période d'analyse (sans agrégation des données) sont les suivantes, en considérant les classes Swiss10 1, 8, 9 et 10 :

- 91% des véhicules PL sur la voie lente
- 9% des véhicules PL sur la voie rapide

Il n'a pas été possible de réaliser une analyse de la répartition des poids lourds sur les voies en fonction de leur charge totale respective, les installations WIM n'étant généralement présentes que sur la voie la plus lente.

6.2.2 Comportement sur le tronçon de sortie d'autoroute (Morges-Est)

Les panneaux de signalisation avancée indiquant la sortie d'autoroute (Morges-Est) sont situés au-delà de la zone d'analyse (Fig. 47), soit plus de 600 mètres avant la sortie. De cette manière, les usagers peuvent anticiper leur sortie et se placer dans la voie de BAU Active. Après cette sortie d'autoroute, la BAU Active se termine, les véhicules souhaitant continuer sur l'autoroute doivent donc sortir de cette voie (autoroute à 2 voies traditionnelle).



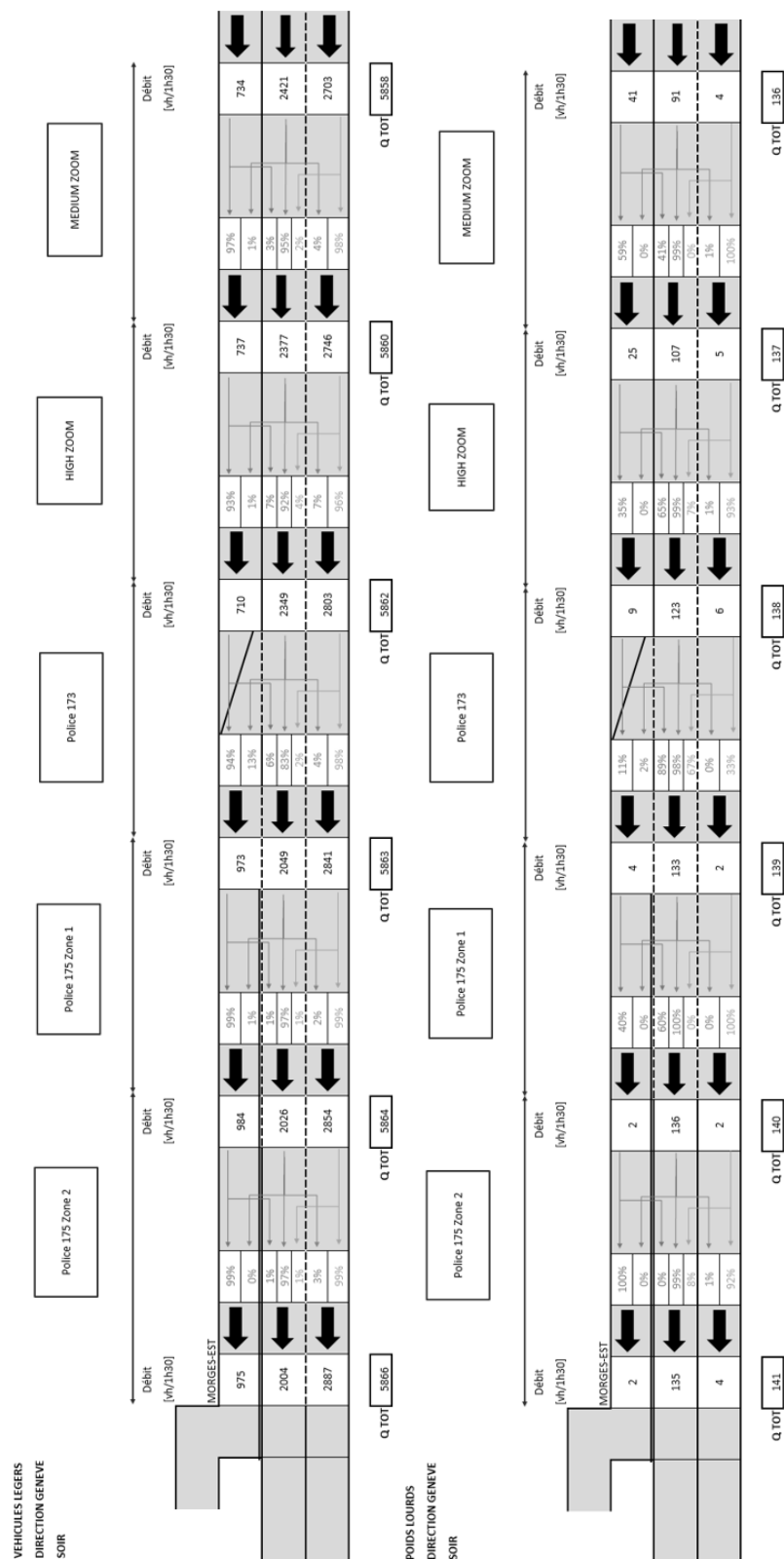


Fig. 52 Changements de voies. Sortie de Morges-Est, direction Genève. Soir.

Une grande majorité des véhicules légers anticipe la sortie plus de 600 mètres avant la sortie, hors de la zone d'étude. Le tronçon étudié qui répertorie le plus de changement est celui de « Police 173 », soit entre 50 et 165 mètres avant la rampe de sortie. Le matin, les changements dans cette zone se font majoritairement de la BAU Active vers la voie centrale et le soir de manière inverse (Fig. 51, Fig. 52).

Tab. 28 Distribution des débits entre voies. Morges-Est, direction Genève. Matin

Catégorie de véhicules	Voie	Après la sortie	Au niveau de la sortie	Au début de la zone d'étude (Medium zoom)
Légers	Gauche	55%	45%	40%
Légers	Centrale (Droite après la sortie)	45 %	37%	41%
Légers	Sortie – BAU (Droite)	-	18%	19%
Lourds	Gauche	20%	19%	4%
Lourds	Centrale (Droite avant l'entrée)	80%	80%	63%
Lourds	Sortie – BAU (Droite)	-	1%	33%

Tab. 29 Distribution des débits entre voies. Morges-Est, direction Genève. Soir

Catégorie de véhicules	Voie	Après la sortie	Au niveau de la sortie	Au début de la zone d'étude (Medium zoom)
Légers	Gauche	59%	49%	46%
Légers	Centrale (Droite après la sortie)	41 %	34%	41%
Légers	Sortie – BAU (Droite)	-	17%	13%
Lourds	Gauche	3%	3%	3%
Lourds	Centrale (Droite avant l'entrée)	97%	96%	67%
Lourds	Sortie – BAU (Droite)	-	1%	30%

Les distributions des véhicules entre la période du matin et la période du soir sont similaires excepté les poids lourds où l'on constate, le matin, un taux plus élevé sur la voie gauche au niveau de la sortie et après celle-ci (Tab. 28, Tab. 29).

Cela peut s'expliquer par le débit de poids lourds (2.5 fois plus important le matin que le soir pour la période d'analyse) lié à la diminution de la capacité après la sortie d'autoroute. En effet, plus le nombre de poids lourds est important, plus il y a la possibilité de dépassements entre eux.

Les différences entre les résultats du matin et du soir étant explicitées précédemment, les conclusions sur le comportement à la sortie de Morges-Est peuvent être considérées pour les deux périodes.

Les véhicules légers adoptent le comportement suivant :

- Faible nombre de changements de voies dans les 600 mètres précédant la sortie.
- Majorité des véhicules positionnés dans leur voie sélectionnée.
- Les changements dans la zone d'étude ont majoritairement lieu entre 50 et 165 mètres précédant la sortie.

Les véhicules poids lourds adoptent le comportement suivant :

- Plus le débit de véhicules poids lourds est important plus ils ont tendance à se dépasser.
- La sortie de Morges-Est est relativement peu utilisée par les poids lourds (1%).
- Les changements dans la zone d'étude ont majoritairement lieu entre 165 et 300 mètres précédant la sortie.

6.2.3 Risques de conflit dans les zones de changements de voies

Les zones de changements de voies sont des endroits où potentiellement le risque de conflit est plus important, notamment les cas de collision latérale ou de tamponnement

suite au ralentissement de véhicules afin de faciliter l'insertion d'un autre véhicule dans la voie.

Une étude sur la sécurité routière du bassin lémanique ([38]), un autre projet de master lié à ce projet, a permis de combiner l'accidentologie aux différentes typologies de trafic analysées.

A l'entrée de Morges-Est, la zone recueillant le plus de changements de voies se situe entre 115 et 300 mètres après l'entrée. Une zone critique entre 2010 et 2013 a été mise en évidence à cet endroit (Fig. 53).

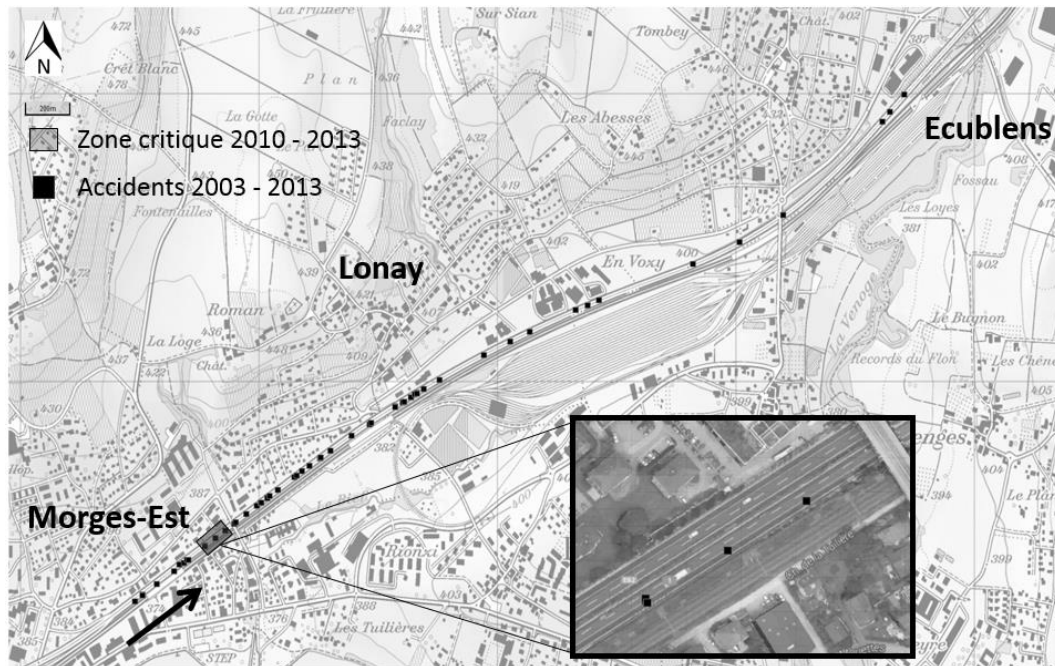


Fig. 53 Accidentologie à l'entrée de Morges-Est, direction Lausanne.

Dans le sens inverse, une zone critique est également mise en évidence environ 400 mètres avant la sortie de Morges-Est direction Genève (Fig. 54). Comme décrit au chap. 6.2.2, il ne s'agit pas de la zone qui enregistre globalement le plus de changements de voies, mais par contre celle où l'on enregistre le plus de changements de voies de poids lourds. Toutefois, l'analyse d'accidentologie menée ne fait pas de distinction entre les différentes catégories de véhicules impliquées.

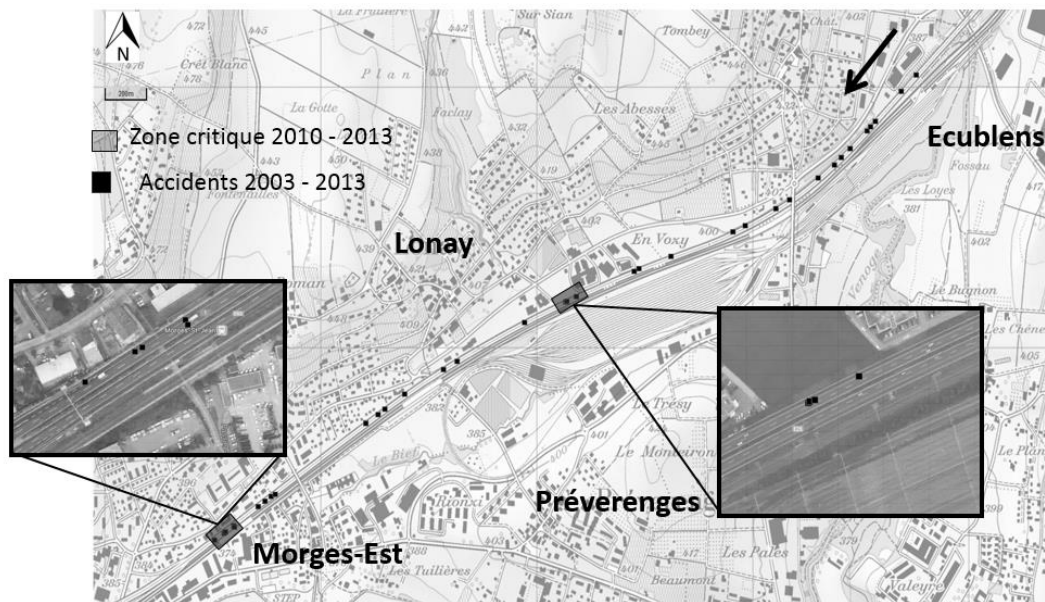


Fig. 54 Accidentologie à la sortie de Morges-Est, direction Genève.

Tel que la sécurité routière le propose, lorsque des zones critiques d'accidents apparaissent, il est important d'établir un diagnostic de la situation et si y a la possibilité et la nécessité, de réaliser des mesures d'interventions sur les aménagements routiers. Cette recherche n'a pas pour but de résoudre des problèmes liés à l'accidentologie, raison pour laquelle ce sujet n'est pas d'avantage développé ici.

6.2.4 Positionnement latéral

Comme décrit en introduction, la position latérale des véhicules et notamment des véhicules poids lourds dans une voie n'a que peu d'influence sur la structure des ouvrages d'art sollicités. Cependant, en termes d'infrastructures routières, l'influence de la position latérale est un facteur déterminant de leur dégradation et donc des performances souhaitées (chap. 8).

En courbe, au niveau d'ouvrages d'art (ponts, tunnels, tranchées, ...), dans des zones spécifiques (entrées et sorties d'autoroute, feux, voies réservées, ...) ou lors de présences d'obstacles latéraux, le positionnement des véhicules n'est pas nécessairement libre. Afin de définir sur le tronçon d'autoroute étudié (Autoroute A1 – Lausanne – Genève, zone de BAU Active), un comportement libre en matière de positionnement latéral, une sélection de lieu a dû être effectuée de même que le support d'analyse à disposition.

Certains capteurs (piézométriques, ultrasons, infrarouges, ...) permettent de déterminer le positionnement latéral des véhicules. Toutefois, de telles installations n'étant pas disponibles, il a été choisi de se baser, tel que précédemment, sur des enregistrements vidéo.

La méthodologie de mesure sélectionnée est inspirée d'une étude réalisée à l'aide d'une échelle horizontale superposée à une image vidéo enregistrée depuis une passerelle piétonne [39] (Fig. 55).



Fig. 55 Echelle de mesure superposée à un enregistrement vidéo selon [39].

Sélection du type d'enregistrements vidéo

Les enregistrements à disposition effectués à partir du drone ne permettent pas une telle analyse, en effet, l'objectif grand-angle de la caméra utilisée (type GoPro) a pour conséquence un effet fish-eye (distorsion de l'image, courbure des lignes droites) (Fig. 56). Même si une correction d'image peut-être apportée à l'aide de logiciels spécialisés, lors de l'agrandissement de l'image, la pixelisation de celle-ci ne permet plus une qualité suffisante pour mesurer le positionnement des véhicules. De plus, l'autonomie du drone (8 minutes d'images exploitables par séance de vol) complique la saisie de données.



Fig. 56 Image de l'enregistrement vidéo réalisé par le drone.

Les enregistrements effectués depuis le pont « Route de la Gracieuse » offrent deux types de zooms. Le « High zoom » filme principalement l'entrée (direction Lausanne) et la sortie (direction Genève) de Morges-Est (Fig. 57). Une zone spécifique dans laquelle, comme mentionné précédemment, une telle analyse n'est pas souhaitée afin de définir un comportement global.



Fig. 57 Image de l'enregistrement vidéo « High zoom ».

L'enregistrement « Medium zoom » serait le plus à même d'être sélectionné pour cette analyse (Fig. 58). Toutefois, les manipulations techniques des appareils (caméras non fixes, changement du zoom, enlèvement des appareils entre l'enregistrement du matin et du soir) et sa position (centrée sur le terre-plein central) entraîneraient plusieurs ajustements qui, potentiellement, réduiraient la précision des résultats.



Fig. 58 Image de l'enregistrement vidéo « Medium zoom ».

Les enregistrements mis à disposition par la Police cantonale vaudoises présentent l'avantage d'être réalisés par des caméras fixées sur des mâts situés au bord de la chaussée, garantissant ainsi une prise de vue identique quel que soit le moment de la journée. La durée des enregistrements mis à disposition est également plus importante (5 heures pour chaque caméra).

L'analyse du positionnement latéral des véhicules dans les voies se fera donc à l'aide de ce type d'enregistrements.

Sélection du tronçon à analyser

La prochaine étape consiste à sélectionner la caméra qui offre les meilleures conditions pour cette analyse (sélection d'un tronçon rectiligne de libre circulation au possible, non-spécifique et sans influences extérieures) (Fig. 45).



Fig. 59 Miniatures des caméras direction Genève. (Nos 138, 139, 141, 143, 144, 171, 173, 175).

Les enregistrements caméras en direction de Genève (Fig. 59) présentent les spécificités suivantes :

- 138 ; 139 : Sortie de l'échangeur d'Ecublens.
- 141 ; 143 ; 144 : Début du système de la BAU Active avec franchissement de la ligne blanche continue diagonale.
- 171 : A proximité d'un ouvrage d'art (Pont « Route de la Gracieuse »).
- 173 ; 175 : Fin du système de la BAU Active, sortie d'autoroute Morges-Est.

Tous les enregistrements vidéo en direction de Genève sont dans des zones de comportement spécifique. Aucun de ceux-ci n'est donc retenu pour l'analyse.



Fig. 60 Miniatures des caméras direction Lausanne. (Nos 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 134, 135, 137).

Les enregistrements caméras en direction de Lausanne (Fig. 60) présentent les spécificités suivantes :

- 100 ; 101 ; 102 ; 103 : Entrée de Morges-Est, début du système BAU Active.
- 104 ; 105 : A proximité d'un ouvrage d'art (Pont « Route de la Gracieuse »).
- 106 ; 107 : Après le Pont « Route de la Gracieuse », sélection possible.
- 134 ; 135 : Fin du système BAU Active.
- 171 : Présélections pour l'échangeur d'Ecublens.

Le choix s'effectue entre les caméras 106 et 107. La vision de la caméra 107 étant plus courbe (difficulté du positionnement de l'échelle de mesure) de même que la proximité avec un refuge et donc d'une discontinuité de l'obstacle latéral, induisent que la sélection finale se porte sur les enregistrements de la caméra 106. La distance sur terrain de l'image enregistrée représente environ 115 mètres (Fig. 61).

La durée d'enregistrements disponibles pour cette caméra en date du jeudi 18 mars 2014 est d'environ 2 heures pour la période du matin (6h59'53" à 9h00'18") et d'environ 3 heures pour la période du soir (15h59'46" à 19h00'13").

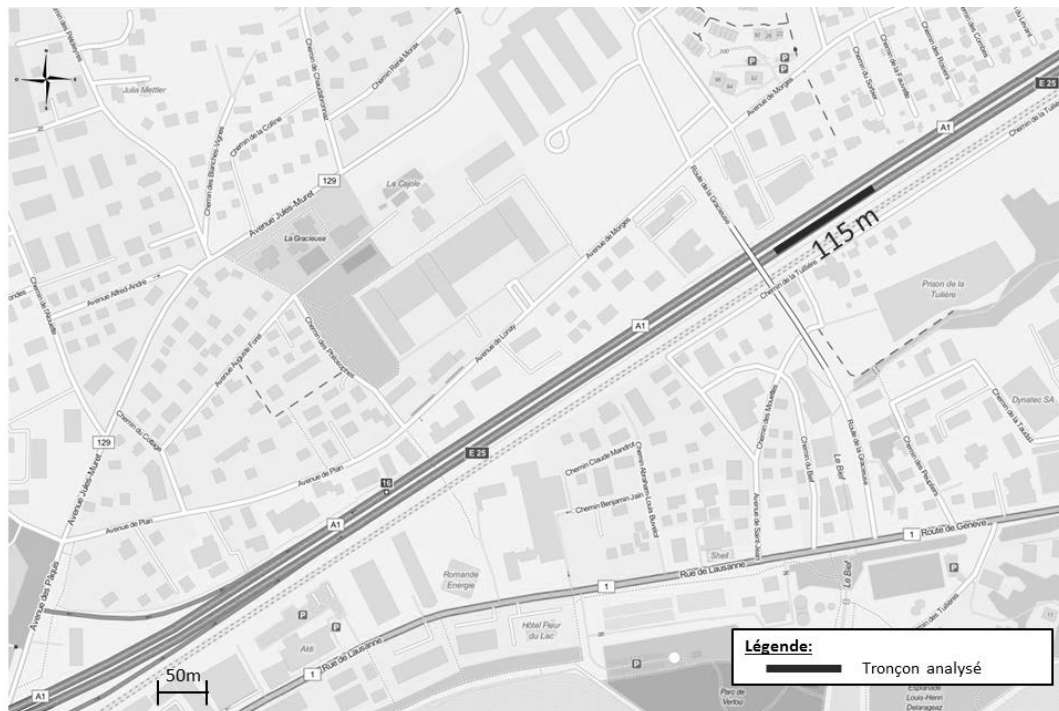


Fig. 61 Tronçon filmé par la caméra 106, direction Lausanne.

Construction d'une échelle de mesure

Tel que proposé dans [39], l'échelle de mesure sera superposée à l'enregistrement vidéo. Le positionnement de l'échelle horizontale est défini au niveau d'une balise droite. La graduation de l'échelle s'effectue par convergence des lignes (point de fuite) (Fig. 62). La largeur des voies étant de 3.50 mètres et le découpage étant décidé en 8 zones, chaque intervalle de mesure a une largeur de 43.75 centimètres (Fig. 63).

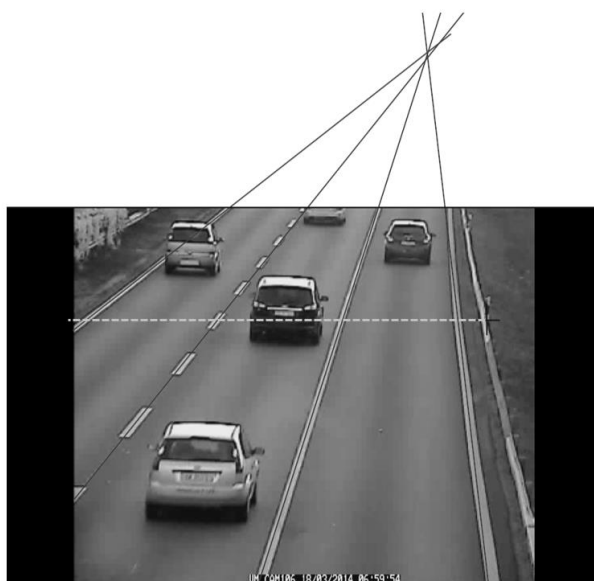


Fig. 62 Traitement par point de fuite.



Fig. 63 Graduation de l'échelle de mesure.

Deux cas extrêmes de traitements de l'image sont considérés :

- Par horizontale sur image (trait-tillé, Fig. 62).
- Par distorsion de l'image (effet fish-eye, distorsion non-connue) avec pour cas extrême une ligne droite déformée en arc de cercle (distorsion en barillet).

La solution de traitement de l'image se situant entre ces deux cas extrêmes.

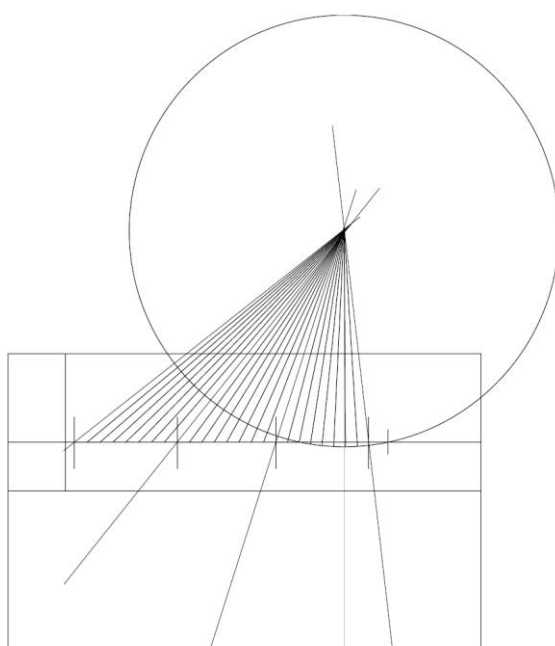


Fig. 64 Types de traitements de l'image (cas extrêmes, horizontale et déformation en cercle).

Des comparaisons de mesures sur une série de 10 poids lourds sont effectuées entre les échelles obtenues pour les deux cas extrêmes de traitement d'images (Fig. 65). Sur les dix poids lourds présents dans la BAU Active, seule une position d'une roue diffère d'intervalle de mesure (Tab. 30). Dû à la position de la caméra (quasiment dans l'axe de la BAU), les échelles dans la BAU Active sont relativement proches. Par contre, dans la voie centrale et la voie de gauche, celles-ci diffèrent.

Par une nouvelle analyse de 10 poids lourds présents dans la voie centrale ou la voie de gauche, on ne relève que 3 cas où une des roues n'est pas dans le même intervalle de mesure. Il est également possible que cela soit réellement le cas, la distance entre les deux lignes de mesure étant plus grande, une déviation du véhicule est possible.



Fig. 65 Traitements de l'image et mesure par deux cas extrêmes.

L'approximation finale de la distorsion qui est choisie est construite en considérant les lignes horizontales sur les véhicules circulant dans les différentes voies (plaques d'immatriculation, vitre arrière) (Fig. 66).

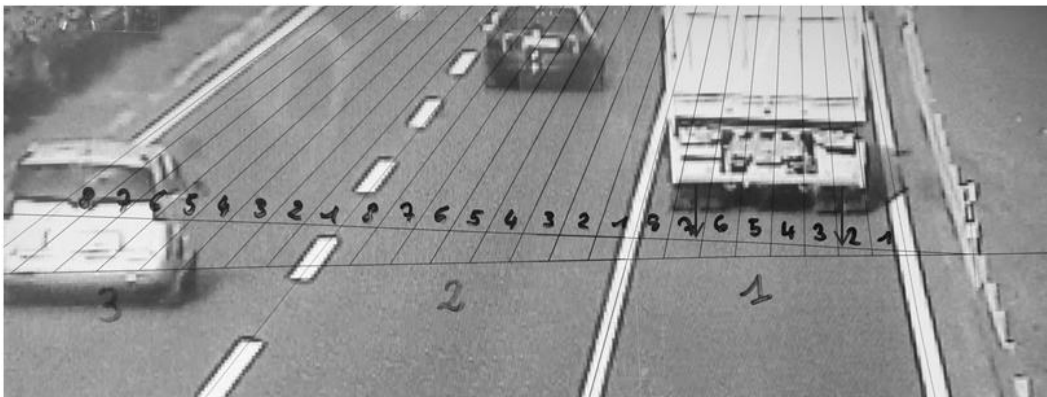


Fig. 66 Echelle de mesure sélectionnée.

Méthodologie de mesure

Sachant que la largeur d'un pneu d'une voiture légère varie de 12 à 34 centimètres et celle d'un pneu d'un poids lourds de 21 à 46 centimètres, le pneu (ou le pneu jumelé dans le cas de poids lourds) peut se situer à cheval sur deux intervalles. De plus, lors d'un mouvement latéral les pneus avant ne sont pas positionnés nécessairement dans le même intervalle que les pneus arrière. De ces observations, on effectue les considérations suivantes :

- Le point 0 (cm) est le centre de la ligne blanche à droite de la voie étudiée.
- La mesure est effectuée sur l'axe arrière de chaque véhicule.
- Dans le cas d'un pneu unique (roue simple), le centre de la roue détermine le point de mesure (Fig. 67, gauche).
- Dans le cas d'une roue jumelée (deux pneus côte-à-côte), c'est le point équidistant entre les deux roues qui détermine le point de mesure (Fig. 67, droite).

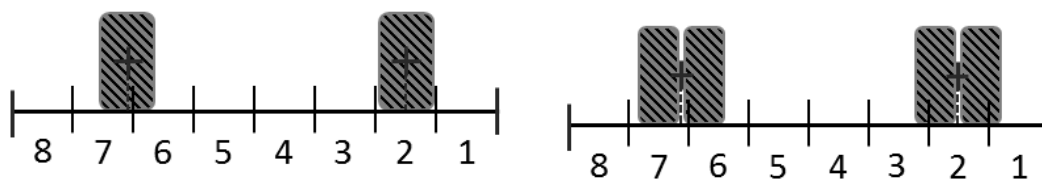


Fig. 67 Méthodologie de mesure (roue simple à gauche et jumelée à droite).

Tab. 30 Distance des intervalles

Intervalle	Début [cm]	Fin [cm]
1	0.00	43.75
2	43.75	87.50
3	87.50	131.25
4	131.25	175.00
5	175.00	218.75
6	218.75	262.50
7	262.50	306.25
8	306.25	350.00

Echantillon de données

La mesure de la position n'a pu être effectuée dans certains cas pour les raisons suivantes :

- Luminosité insuffisante pour la mesure à partir de 18h40.
- Visibilité des roues non-garanties en raison de la proximité du véhicule suivant.
- Les véhicules effectuant une manœuvre de changement de voie ne sont pas considérés.

Le nombre de poids lourds ayant été analysés est de 610 véhicules. Pour comparaisons, on sélectionne également un échantillon de taille équivalente de véhicules légers (hors motocycles). Pour les véhicules légers, on choisit d'effectuer l'analyse entre 15h59'46" et 16h12'20" car la qualité des images en raison de l'ensoleillement est favorable (Tab. 31).

Tab. 31 Composition de l'échantillon de données

Catégorie de véhicules	Voie	Nombre de véhicules
Légers	Gauche	261 (42%)
Légers	Centrale	263 (42%)
Légers	BAU (Droite)	103 (16%)
Lourds	Gauche	16 (3%)
Lourds	Centrale	119 (19%)
Lourds	BAU (Droite)	475 (78%)

Résultats de l'analyse

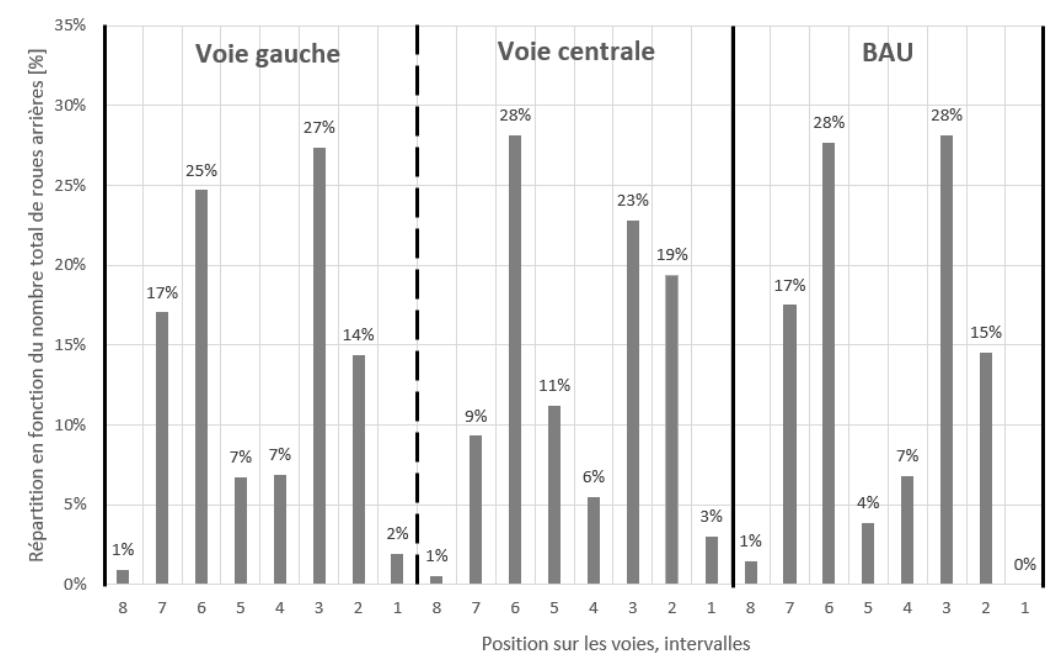


Fig. 68 Distribution des roues arrières des véhicules légers.

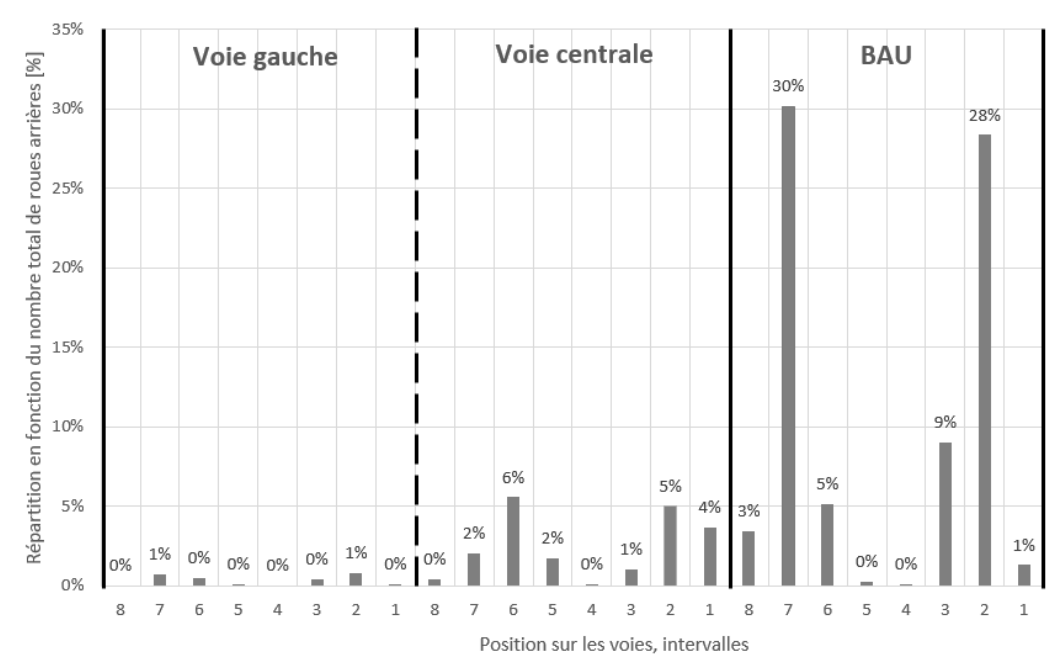


Fig. 69 Distribution des roues arrières des poids lourds.

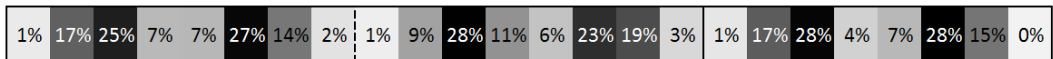


Fig. 70 Répartition des roues arrières par voie, véhicules légers.

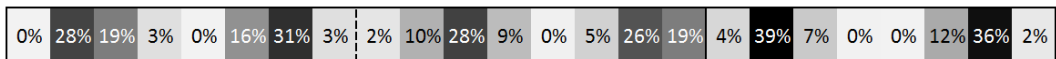


Fig. 71 Répartition des roues arrières par voie, véhicules poids lourds.

Les constatations suivantes peuvent être effectuées :

- Lorsque le système est actif (BAU autorisée à la circulation), cette voie est la plus sollicitée mécaniquement parlant (les sollicitations proviennent des poids lourds et non des véhicules légers).
- La position dans la voie de BAU est moins variable que dans les autres voies (hypothèses : présence d'un obstacle latéral, deux lignes continues de part et d'autre de la voie).
- Dans le cas de véhicules poids lourds, les zones principalement sollicitées de la BAU et celles de la voie centrale ont un intervalle de différence (5 pour la BAU et 4 pour la voie centrale). (Voir analyse ci-après).
- La position des véhicules légers dans les voies est moins homogène que celle des poids lourds.
- Les véhicules légers ont tendance, lorsqu'ils sont dans la voie centrale, à se positionner plus à droite. (Voir analyse ci-après).

Comme il a pu être constaté, il existe une différence entre les intervalles sollicités par les véhicules poids lourds dans la voie de la BAU et dans la voie centrale (Fig. 69). On effectue une analyse du positionnement des véhicules en répartissant ceux-ci en deux catégories (Fig. 72) :

- Véhicules présentant 4 intervalles entre les deux points de mesures (Cat. A).
- Véhicules présentant 5 intervalles entre les deux points de mesures (Cat. B).

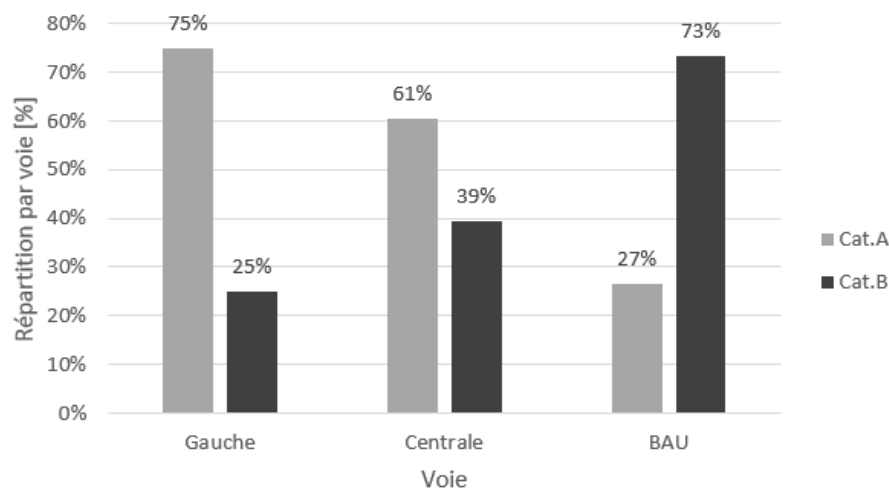


Fig. 72 Répartition des véhicules poids lourds par catégorie et par voies.

Les résultats précédents (Fig. 69) sont donc expliqués par ces répartitions. Les poids lourds les moins larges circulent principalement sur les voies les plus rapides et inversement pour les poids lourds les plus larges. Comme décrit au chapitre 6.2.1, une analyse de la répartition des poids lourds dans les voies en fonction du poids total des véhicules n'est pas possible en raison de la non-instrumentation des voies de dépassement. Cependant, on peut émettre l'hypothèse (à vérifier, chap. 10.3) que les véhicules les moins larges sont également les moins chargés (charge totale). Toutefois, pour rappel, les véhicules les plus lourds ne sont pas nécessairement les plus agressifs mécaniquement pour les chaussées routières (Chap. 3.5.2).

Selon [39], la position des véhicules légers est influencée par le type de véhicule circulant à ses côtés. La modification de la position latérale de véhicules légers à l'approche d'un véhicule poids lourds est plus importante que dans le cas de l'approche d'un autre véhicule léger. L'espace latéral laissé entre le véhicule léger et le véhicule poids lourd étant plus important que dans le cas de deux véhicules légers côte-à-côte.

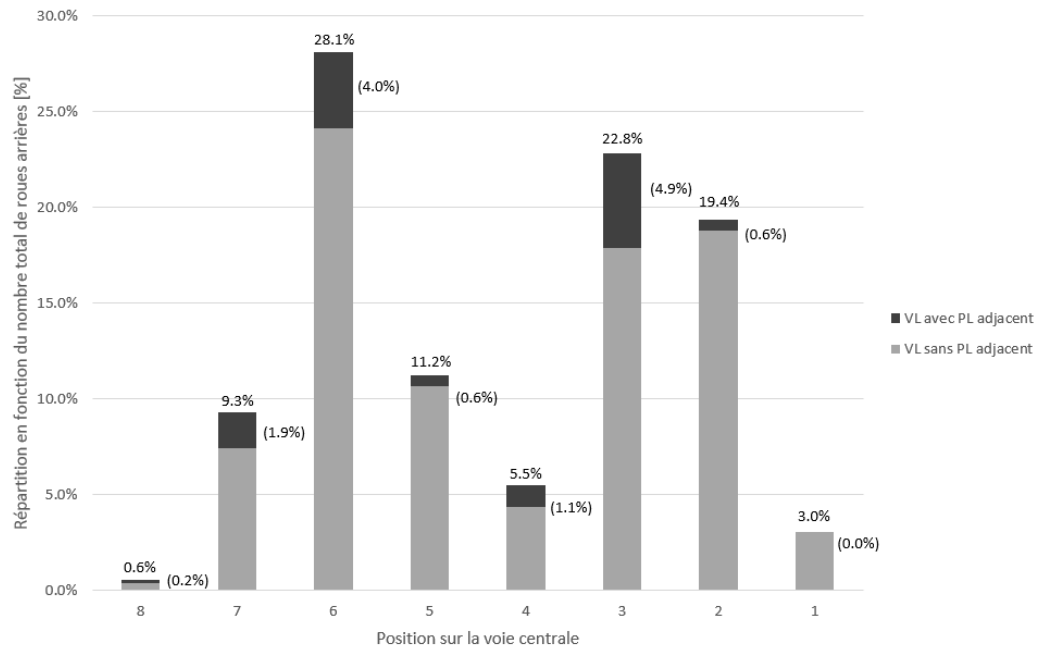


Fig. 73 Répartition des véhicules légers dans la voie centrale avec ou sans poids lourds adjacent.

Ce phénomène est également remarqué dans le cas présent étudié (Fig. 73). En effet, les véhicules légers situés dans la voie centrale qui ont un poids lourd à leur côté sur la BAU ont tendance à rouler plus à gauche que les autres véhicules légers présents dans cette voie. De plus, les véhicules légers circulant sur la voie centrale ont plus de probabilité de se trouver à côté d'un véhicule les dépassant sur la voie de gauche et donc ont tendance à rouler plus à droite (lorsqu'ils n'ont pas de véhicule adjacent à droite).

6.3 Modèle de circulation des poids lourds

Sur la base des analyses menées (Chap. 3, 5, 6), il est possible d'établir un modèle de circulation des poids lourds.

Répartition horaire des poids lourds

Sur autoroutes sans contraintes spécifiques temporelles de circulation, en jours ouvrés (excepté l'interdiction légale de circuler de 22h à 5h), les histogrammes de répartition horaire liés aux poids lourds présentent deux pointes, aux environs de 10-11 heures et de 14-15 heures, qui sont décalées par rapport aux pointes des débits cumulés pour tous types de véhicules (Fig. 74). Ce phénomène est également présent sur les réseaux routiers communaux et cantonaux, bien que plus étendu.

Les débits maximaux de véhicules poids lourds sont dépendants de chaque site étudié.

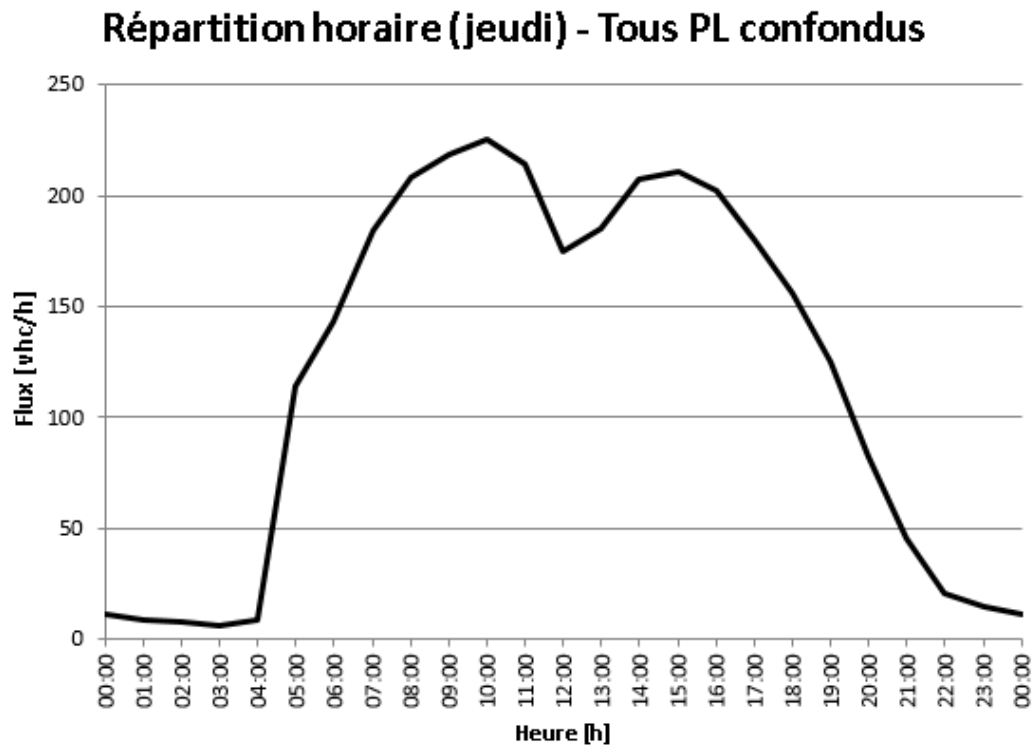


Fig. 74 Répartition horaire du jeudi type 2008 en direction de direction Bellinzona (Monte Ceneri), agrégation sur une heure. (WIM, tous véhicules PL confondus).

Caractéristiques géométriques

Les longueurs des véhicules poids lourds dépendent de chaque type de silhouettes. Aucune corrélation entre les entraxes et la longueur totale du véhicule ne peut être établie.

En termes de largeur de véhicules, les véhicules poids lourds effectuant une manœuvre de dépassement sur un autre véhicule poids lourds sont généralement moins larges.

Temps intervéhiculaires – Distances intervéhiculaires

Les poids lourds respectent généralement les distances intervéhiculaires avec les autres véhicules (temps intervéhiculaire de 2 secondes).

Vitesse

Sur autoroute, la vitesse moyenne des poids lourds peut être considérée égale à 88 km/h (24.4 m/s) avec un écart-type de 5 m/s.

Accélération – Décélération

On peut considérer une accélération moyenne des véhicules poids lourds de 1 m/s² et une décélération moyenne de 3.5 m/s².

Distribution par voies – Positionnement latéral

La distribution des poids lourds sur une autoroute à 2 voies de circulation par direction peut être considérée dans les proportions 95%-5% à 90%-10% (voie lente – voie de dépassement, conditions de circulation libres).

Les changements de voies nécessaires lors d'intersections ou de points singuliers (raboutement lors de l'ajout d'une voie supplémentaire à droite, sortie d'autoroute avec présélection, échangeurs) sont anticipés suffisamment à l'avance par les conducteurs poids lourds.

Le positionnement latéral des poids lourds dans la voie lente peut être considéré comme centré, même en présence d'un obstacle latéral à droite proche de la voie (Seul cas étudié).

Agressivité mécanique des poids lourds - Masses

En termes d'influence mécanique sur l'évaluation structurale des ouvrages d'art et des chaussées, des combinaisons statiques (véhicules à l'arrêt : flexion, efforts normaux, efforts tranchants, orniérage ...), des histogrammes de charges (fatigue, dimensionnement et renforcement des chaussées, orniérage) peuvent être définis sur la base d'analyses statistiques et de simulations de trafic.

Il est conseillé d'établir un modèle de charge propre à chaque site : le nombre de poids lourds, leurs charges totales, leurs répartitions de charges par axes, leur typologie, ... varient d'un site à un autre de façon significative.

Les masses par axes peuvent généralement être corrélées à la masse totale du véhicule excepté pour l'axe avant (1^{er} axe).

En termes d'analyse du comportement mécanique sur les chaussées, une analyse essieu par essieu est recommandée.

7 Cas d'étude

Dans le cadre de cette recherche, trois cas d'études ont été effectués selon la méthodologie proposée au chapitre 1.4. Le cas d'étude de Denges a permis le développement du réseau complet Mex – Maladière – Ecublens – Morges – Genève Aéroport qui est brièvement détaillé ici.

7.1 Denges

Ouvrage étudié

- Pont sur la Venoge : Autoroute A1 Lausanne – Genève.

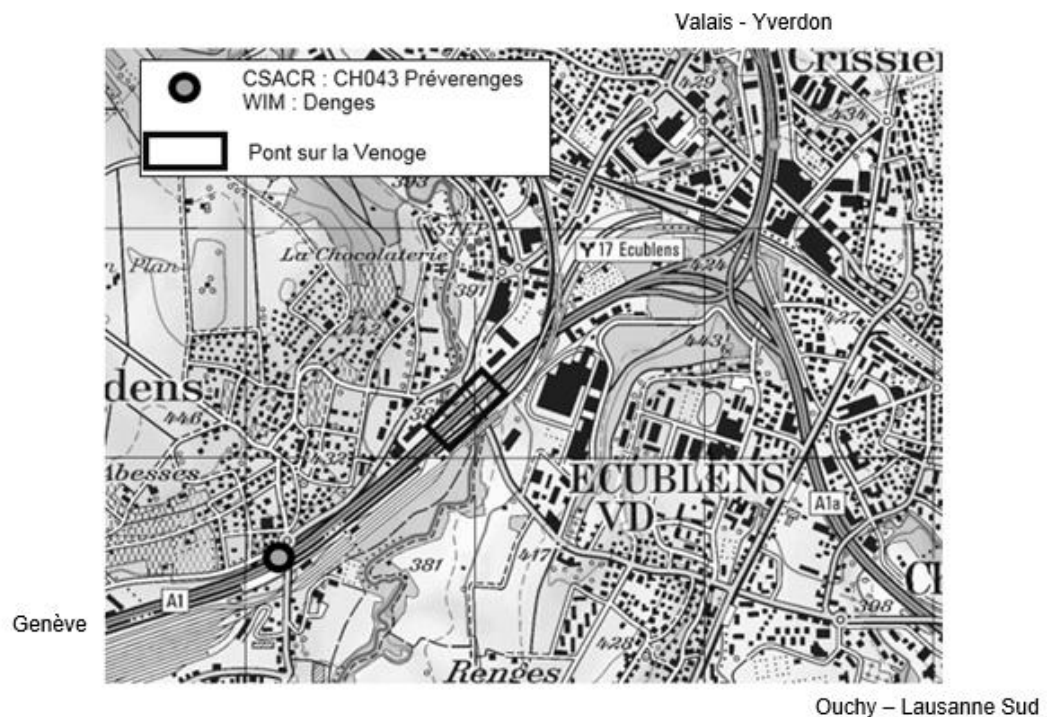


Fig. 75 Situation de l'ouvrage étudié (Fonds de carte : geo.admin.ch).

Base de données routières

- CSACR : Préverenges CH043, direction 1 : Lausanne, direction 2 : Morges (6 voies).
- WIM : Denges, 405 direction Lausanne, 406 direction Morges.

Modélisation spatiale et caractéristiques du réseau routier

- Tronçon rectiligne de deux voies d'une longueur de 3 kilomètres.
- Aucune entrée ou sortie intégrée.
- Limite maximale de vitesse légale à 120 km/h au niveau du détecteur.
- Sens de circulation sélectionné : 1 étude 405 direction Lausanne (résultats présentés), 1 étude 406 direction Morges.
- Autorisation du dépassement par les poids lourds.
- Détecteur d1 : voie rapide ; Détecteur d2 : voie lente

Le tronçon étudié est composé du système de BAU Active. Au niveau du Pont sur la Venoge en direction de Lausanne, les présélections pour l'échangeur d'Ecublens sont d'ores et déjà indiquées. Dans le sens contraire, en direction de Genève, les changements de voies ne sont pas encore stabilisés (arrivées depuis Lausanne-Sud et depuis Crissier).

Les entrées et sorties d'autoroute (Morges-Est notamment) sont admises comme n'ayant pas d'influence sur ce tronçon en situation non-congestionnée. Au niveau de la station CSACR CH043 de Préverenges et du WIM de Denges, situés à quelques mètres l'un de l'autre (Fig. 76), la vitesse limite légale est de 120 km/h lorsque le système (BAU Active) n'est pas actif.

Le cas défavorable considéré est le suivant : les véhicules sollicitent l'ouvrage sur deux voies (système inactif).



Fig. 76 WIM de Denges et CSACR CH043 Préverenges.

Intégration du trafic

- Matrices OD WIM par 15 minutes, 14 classes.
- Matrices OD CSACR par 60 minutes, 6 classes.

Tab. 32 Répartition des catégories de poids lourds, WIM 2008, Denges, selon chap. 3.4

Catégorie	Total [vhc]	Part	Direction Lausanne [vhc]	Part	Direction Morges [vhc]	Part
Global	1'232'740	100.0%	653'495	100.0%	579'245	100.0%
11	301'146	24.4%	153'229	23.4%	147'917	25.5%
12	55'494	4.5%	25'556	3.9%	29'938	5.2%
22	55'338	4.5%	27'912	4.3%	27'426	4.7%
111	31'173	2.5%	15'798	2.4%	15'375	2.7%
1111r	94'749	7.7%	48'732	7.5%	46'017	7.9%

112r	25'970	2.1%	13'339	2.0%	12'631	2.2%
1211r	25'845	2.1%	10'925	1.7%	14'920	2.6%
122	6'483	0.5%	3'154	0.5%	3'329	0.6%
1112r	3'057	0.2%	1'607	0.2%	1'450	0.3%
112a	114'656	9.3%	58'865	9.0%	55'791	9.6%
113a	133'276	10.8%	68'978	10.6%	64'298	11.1%
123a	1'926	0.2%	954	0.1%	972	0.2%
23	1'929	0.2%	994	0.2%	935	0.2%
Non-classés	381'698	31.0%	223'452	34.2%	158'246	27.3%

Tab. 33 Répartition des catégories de poids lourds sans limites de poids, WIM 2008, Denges, selon démarche proposée au chapitre 7.3

Catégorie	Total [vhc]	Part	Direction Lausanne [vhc]	Part	Direction Morges [vhc]	Part
Global	1'232'740	100.0%	653'495	100.0%	579'245	100.0%
11	383'434	31.1%	196'674	30.1%	186'760	32.2%
11bis	114'346	9.3%	73'092	11.2%	41'254	7.1%
12	56'531	4.6%	26'105	4.0%	30'426	5.3%
22	56'640	4.6%	28'711	4.4%	27'929	4.8%
111	53'573	4.3%	27'084	4.1%	26'489	4.6%
1111r	94'826	7.7%	48'772	7.5%	46'054	8.0%
112r	26'488	2.1%	13'621	2.1%	12'867	2.2%
1211r	25'853	2.1%	10'929	1.7%	14'924	2.6%
122	6'509	0.5%	3'172	0.5%	3'337	0.6%
1112r	3'153	0.3%	1'653	0.3%	1'500	0.3%
112a	141'278	11.5%	72'155	11.0%	69'123	11.9%
113a	133'632	10.8%	69'188	10.6%	64'444	11.1%
123a	1'927	0.2%	954	0.1%	973	0.2%
23	1'961	0.2%	1'015	0.2%	946	0.2%
Non-classés	132'589	10.8%	80'370	12.3%	52'219	9.0%

Sans investigations supplémentaires (possibilités d'études spécifiques selon [23]), la part de véhicules non-classés est acceptable (10.8%) et sera considérée comme facteur de variation potentielle des résultats.

Vérification du modèle

- Tronçon rectiligne simplifié : pas de comportement suspect perceptible, écoulement des flux correct.

Calibrage

- Mercredi type 2008.
- Pas d'agrégation des données sur 60 minutes.
- Vérification des flux (débits) et des vitesses.

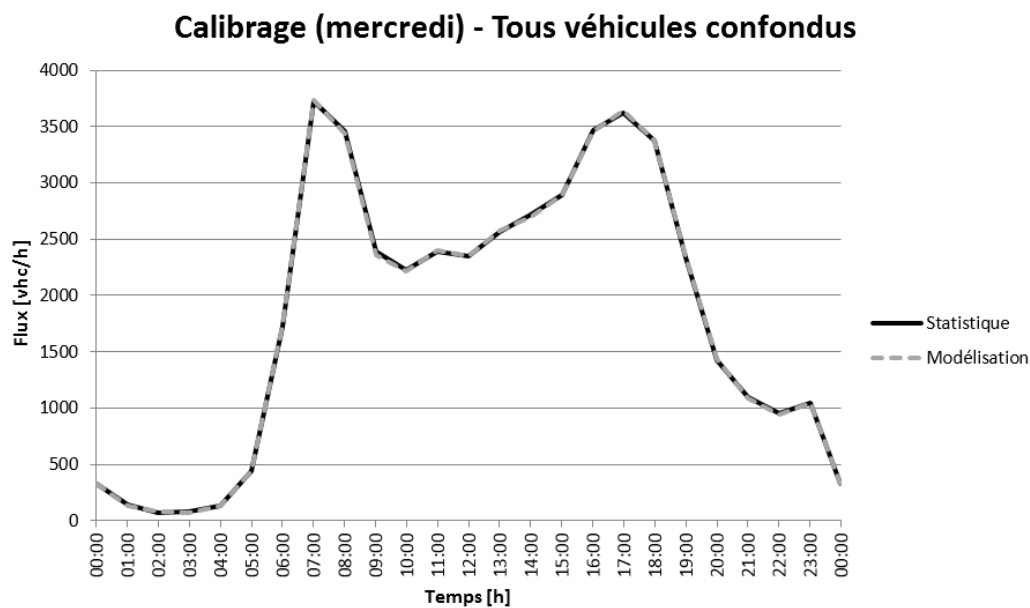


Fig. 77 Calibrage, mercredi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous véhicules.

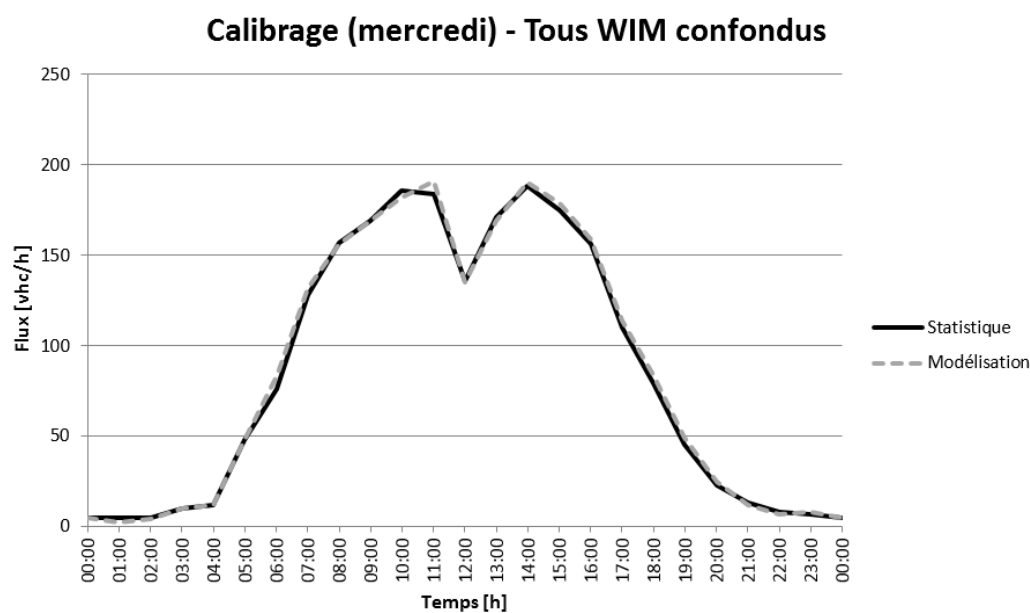


Fig. 78 Calibrage, mercredi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous PL.

Calibrage – Test de Kolmogorov-Smirnov

Mercredi Tous véhicules confondus

Modèle 1 (2008)

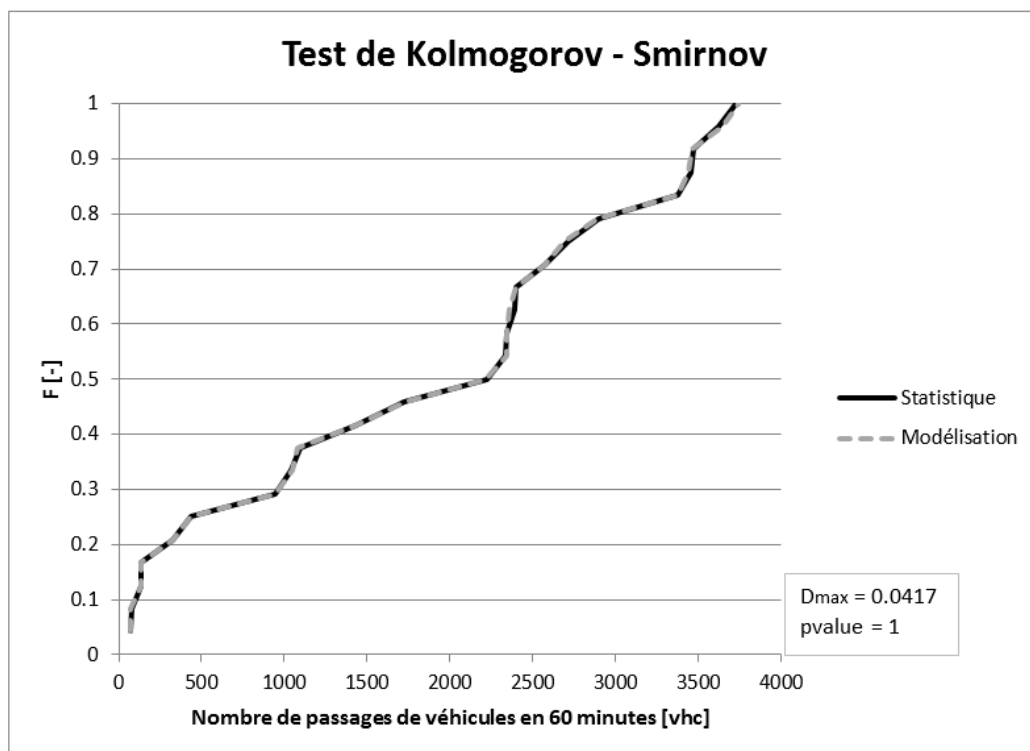


Fig. 79 KS-Test, mercredi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous véhicules.

Mercredi Tous PL WIM confondus

Modèle 1 (2008)

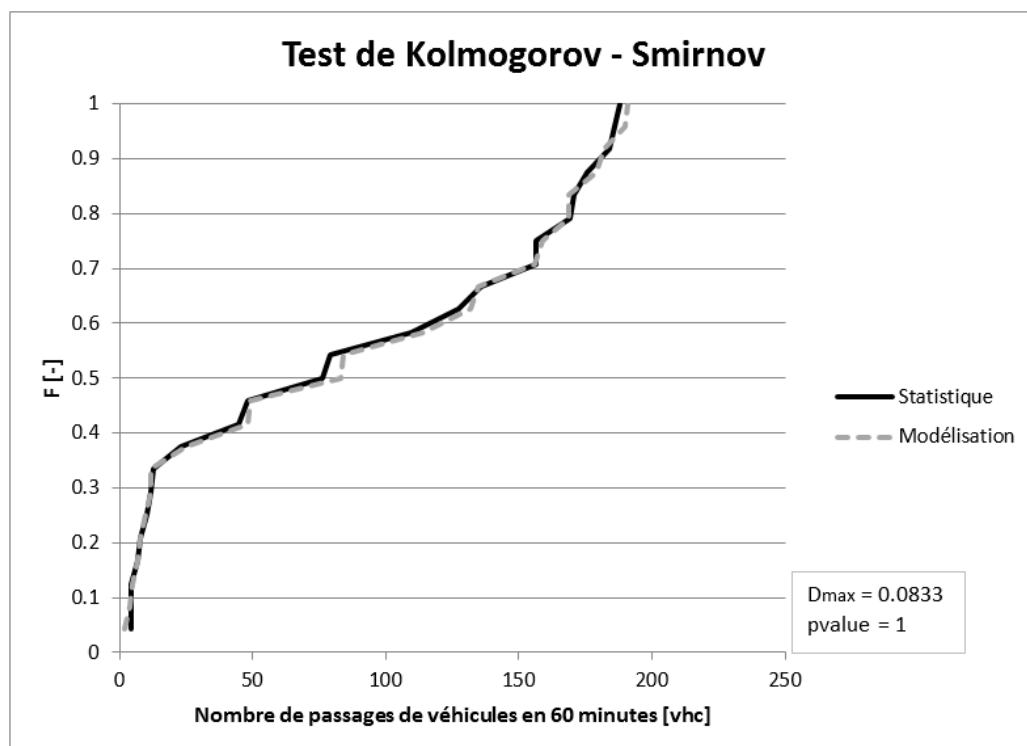


Fig. 80 KS-Test, mercredi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous PL.

Tab. 34 Vitesses moyennes aux détecteurs d1 - d2. Calibrage.
 Mercredi type 2008, Denges, direction Lausanne

Classes	Statistique [km/h]	Modélisation d1 [km/h]	Modélisation d2 [km/h]
11	88±10	95.22	85.15
111	87±8	93.01	85.57
1111r	87±7	86.51	82.60
1112r	87±7	-	80.98
112a	88±6	87.47	83.81
112r	88±6	88.51	83.63
113a	87±6	86.14	83.74
11bis	96±15	104.16	91.61
12	88±9	95.80	81.63
1211r	86±7	87.23	84.15
122	87±8	89.15	85.51
123a	87±6	-	81.16
22	87±9	80.51	80.41
23	87±7	-	81.94
2	111±17	109.53	98.28
3	108±15	108.15	97.73
4	89±11	91.00	81.80
5	108±15	104.09	88.09
6	88±11	93.29	82.17
7	87±7	84.54	79.56

Des ajustements de vitesses moyennes sont effectués pour les classes 5 et 7. (Tab. 34, valeurs en gras).

Sur 10 répliques effectuées, seules deux vitesses moyennes doivent être corrigées. Les débits sont valides. Le calibrage est donc accepté.

Validation

- Mardi type 2008.
- Pas d'agrégation des données sur 60 minutes.
- Vérification des flux (débits) et des vitesses.

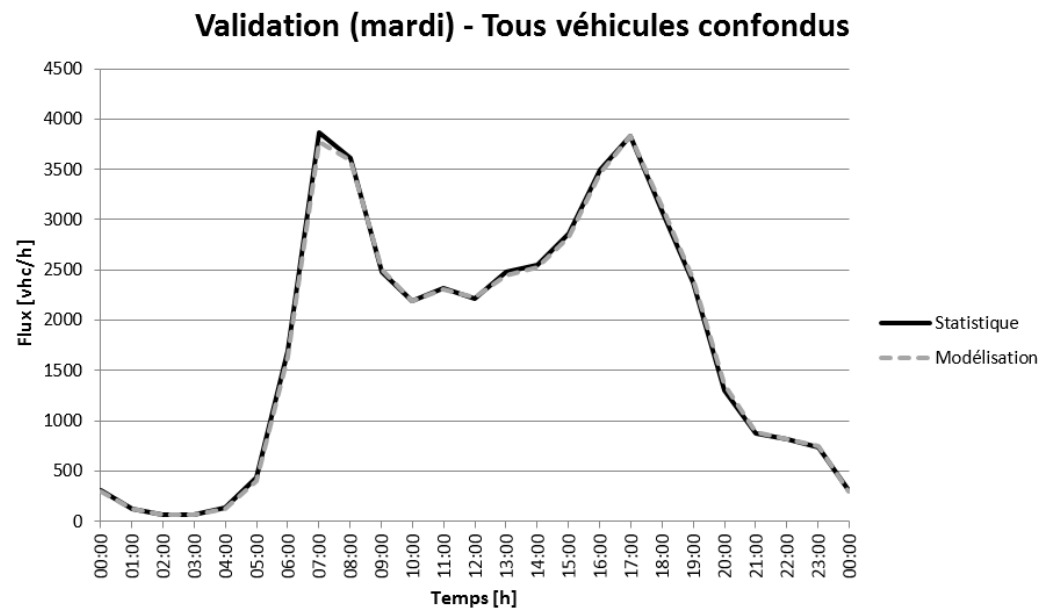


Fig. 81 Validation, mardi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous véhicules.

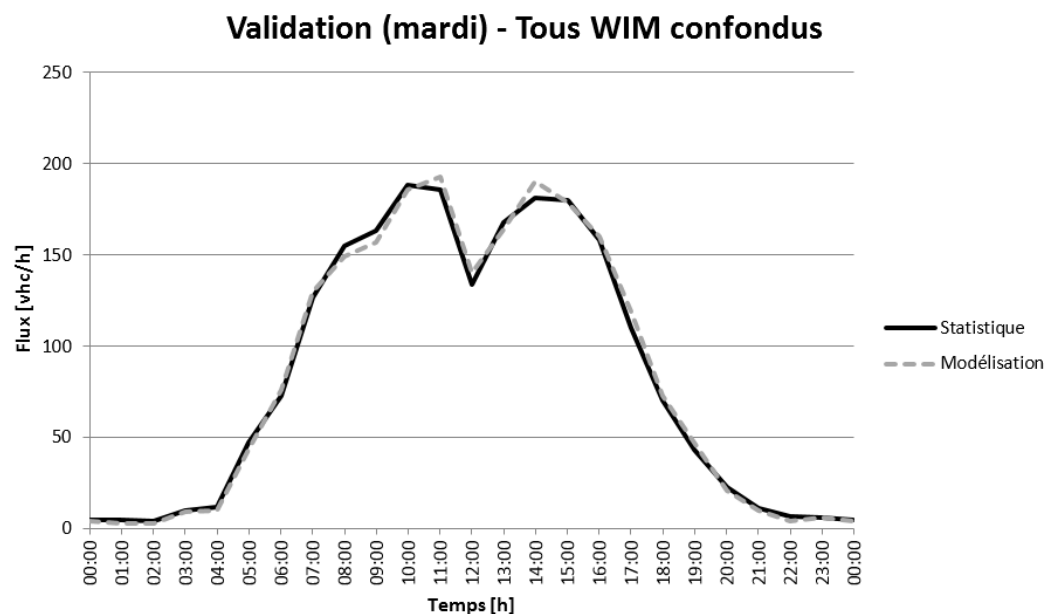


Fig. 82 Validation, mardi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous PL.

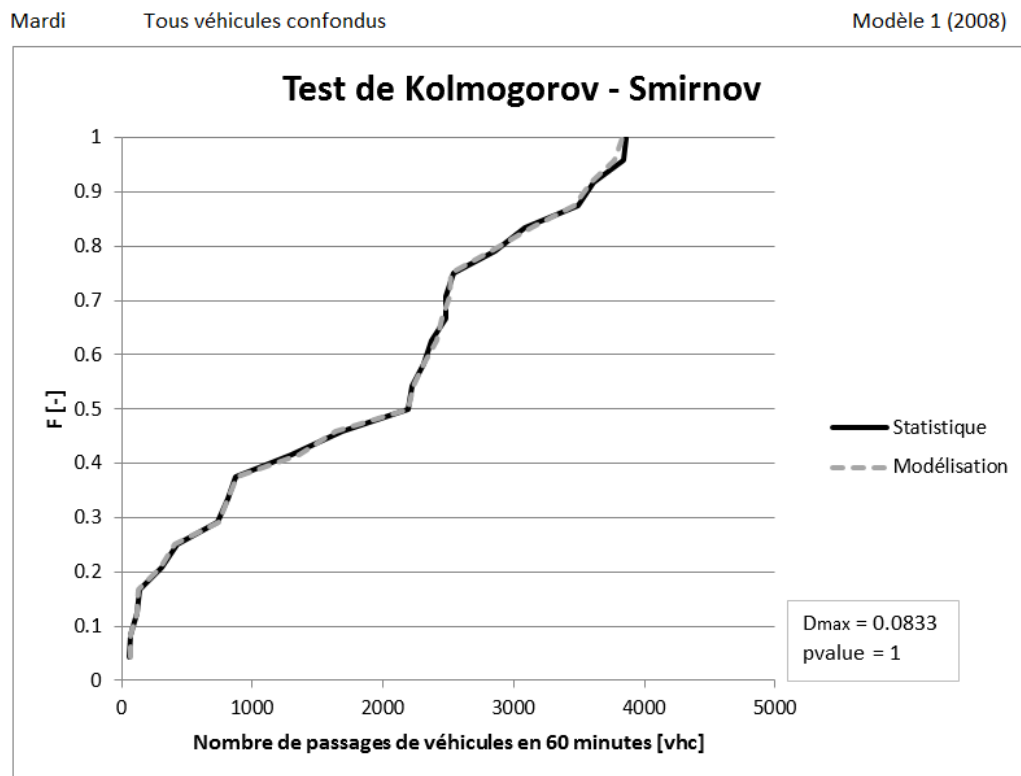


Fig. 83 KS-Test, mardi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous véhicules.

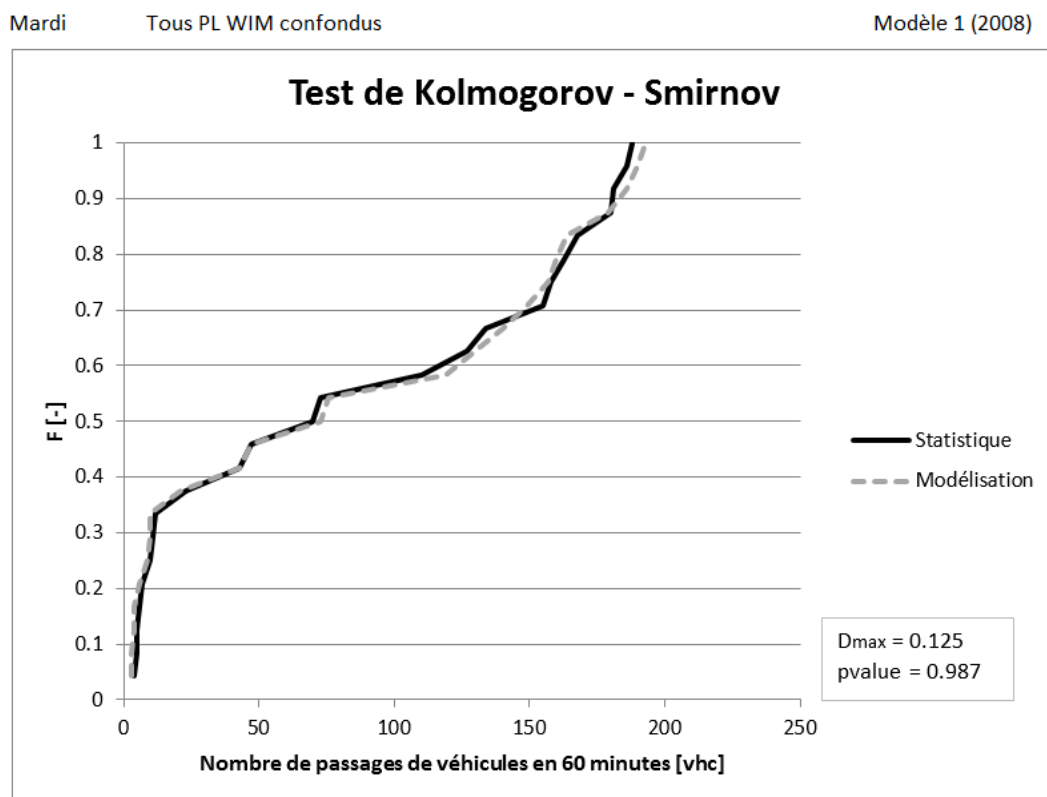


Fig. 84 KS-Test, mardi type 2008, Denges, direction Lausanne. Tous PL.

Tab. 35 Vitesses moyennes aux détecteurs d1 - d2. Validation. Mardi type 2008, Denges, direction Lausanne

Classes	Statistique [km/h]	Modélisation d1 [km/h]	Modélisation d2 [km/h]
11	88±10	96.29	85.43
111	87±8	92.10	86.53
1111r	87±7	87.53	84.60
1112r	87±7	85.34	82.16
112a	88±6	87.95	84.87
112r	88±6	91.42	84.62
113a	87±6	88.92	84.52
11bis	96±15	104.71	91.62
12	88±9	89.86	83.61
1211r	86±7	86.59	84.65
122	87±8	-	85.14
123a	87±6	88.64	-
22	87±9	83.74	81.78
23	87±7	-	84.90
2	111±17	109.48	97.05
3	108±15	108.50	98.73
4	89±11	92.89	82.88
5	108±15	105.68	93.02
6	88±11	94.47	84.73
7	87±7	89.16	83.91

Sur 10 répliques effectuées, la correction des vitesses moyennes est acceptée. Les débits sont valides. La validation est donc acceptée.

Scénarios

- Situation de trafic standard.
- Evaluation d'une semaine type 2008.
- Evaluation d'une semaine type 2012.
- Simulation + 20% (augmentation globale de 20% du trafic [nombre de véhicules]).

L'évolution du trafic est estimée pour chaque classe de véhicule (Swiss 10 et PL) à partir des données 2008 et 2012.

Contrôles

Des contrôles sont effectués sur les débits de l'ensemble des véhicules (col. gauche) et des véhicules PL (col. droite) pour l'ensemble de la semaine type 2008 (Fig. 85).

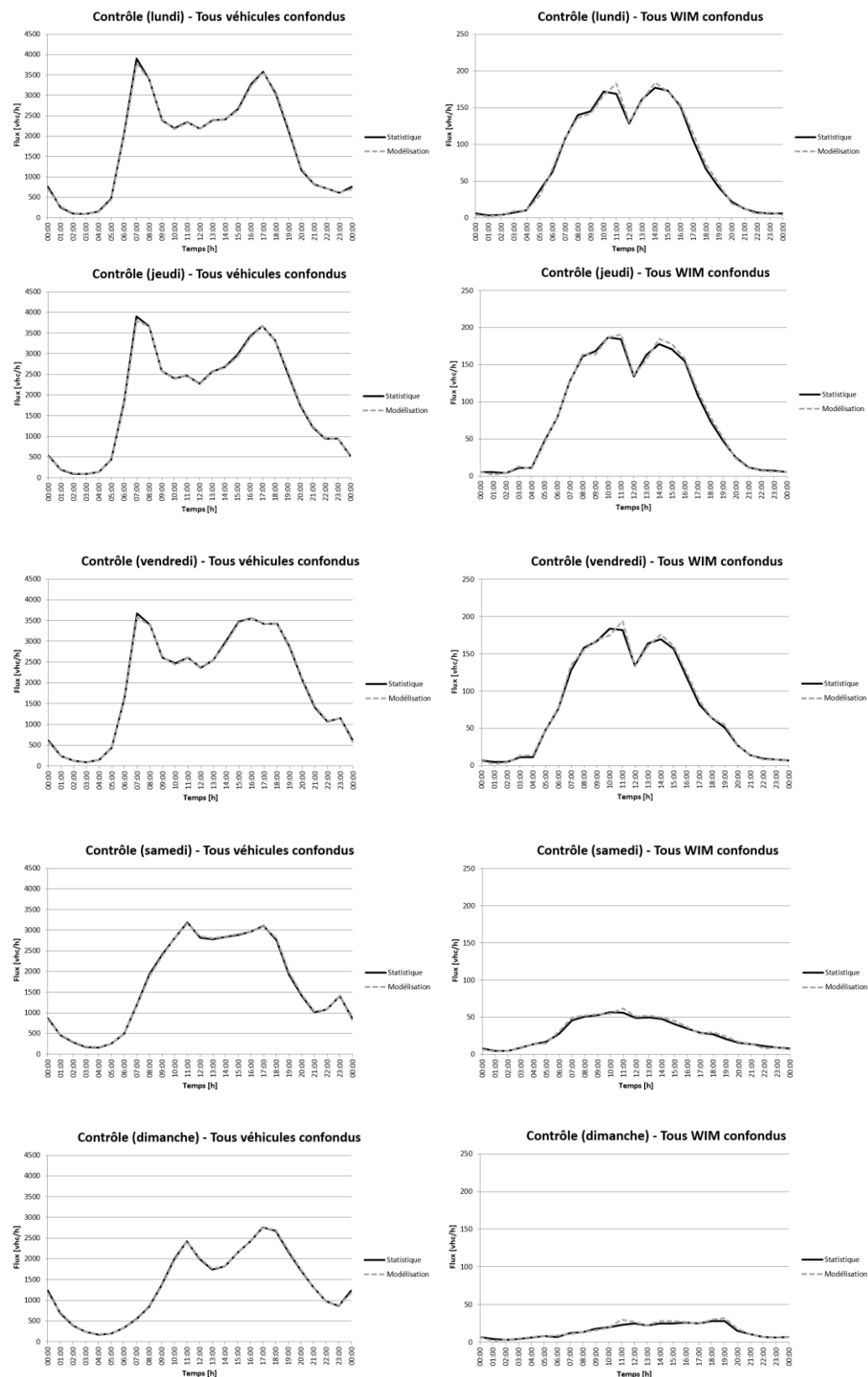


Fig. 85 Miniatures des contrôles, semaine type 2008, Denges, direction Lausanne.

7.2 Mex – Maladière – Ecublens – Morges – Genève Aéroport

Le modèle du cas d'étude de Denges a servi de base à la modélisation d'un réseau complexe utilisé dans le cadre du projet de recherche ASTRA 2010/023 « Effets sur le trafic de l'utilisation des bandes d'arrêt d'urgence ». Ce modèle a les limites géographiques suivantes :

- Mex (en direction d'Yverdon)
- Blécherette (en direction du Valais)
- Rond-point de la Maladière (en direction d'Ouchy, Lausanne-Sud)
- Genève-Aéroport

Sont également modélisées toutes les entrées et sorties d'autoroute de même que les éléments de première influence sur le trafic autoroutier (première intersection ou feu de signalisation, ...).



Fig. 86 Modélisation du réseau autoroutier A1 Lausanne-Genève, Morges-Est.

Un des résultats importants obtenus de ce modèle est d'être parvenu à modéliser la répartition réaliste actuelle des véhicules avec le système de BAU Active (environ 17% de véhicules sur la BAU (Fig. 87).

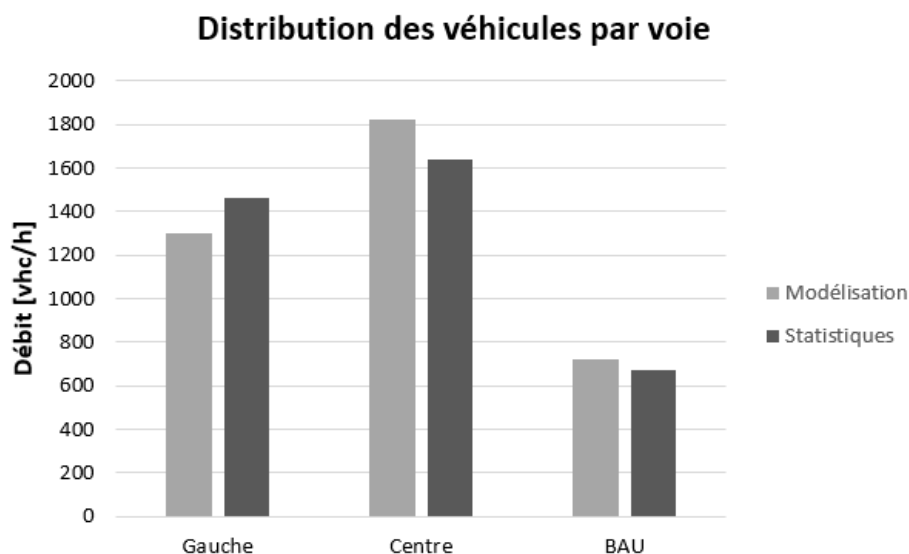


Fig. 87 Distribution des véhicules par voie. BAU Active, direction Genève, matin.

7.3 Monte Ceneri

Zone d'étude

Trafic sur l'axe Lugano – Bellinzona, Monte Ceneri. Autoroute A2.

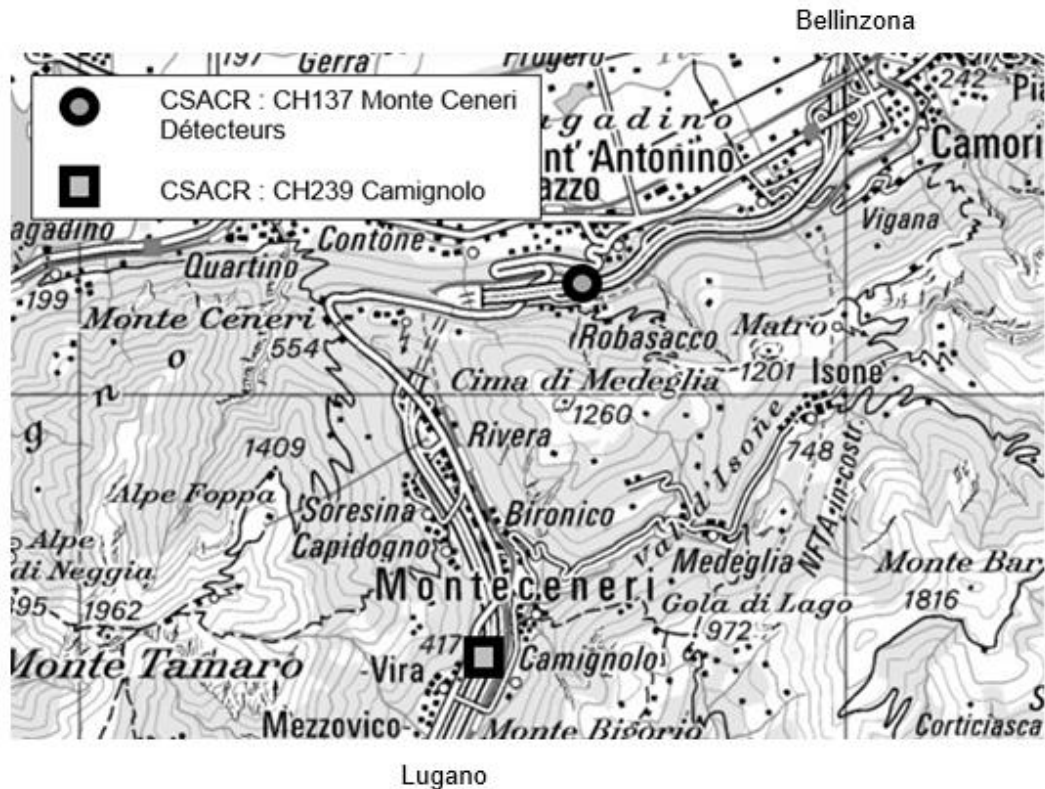


Fig. 88 Situation de la zone d'étude (Fonds de carte : geo.admin.ch).

Base de données routières

- CSACR : Monte Ceneri CH137, direction 1 : Lugano, direction 2 : Bellinzona (6 voies).
- CSACR : Camignolo CH289, direction 1 : Lugano, direction 2 : Rivera (4 voies).
- WIM : Galleria Monte Ceneri, 408 direction Bellinzona, 409 direction Lugano.

Les données CSACR ne sont disponibles à la station CH137 qu'à partir de 2010. On admettra que les caractéristiques géométriques des véhicules (longueurs) sont similaires entre 2008 et 2010 et d'autre part, on diminuera le trafic 2008 relativement à l'accroissement mesuré entre 2008 et 2010 à la station CH289 (évolution annuelle de 2.4%).

Modélisation spatiale et caractéristiques du réseau routier

- Tronçon réel entre Camignolo et la sortie de Bellinzona Sud (échangeur au-dessus de Vigana, (Fig. 88).
- Les détecteurs sont placés au niveau du CSACR CH137.
- Aucune entrée ou sortie d'autoroute n'est considérée.
- Limite maximale de vitesse légale est de 100 km/h au niveau du détecteur.
- Sens de circulation sélectionné : 408 direction Bellinzona.
- Autorisation du dépassement par les poids lourds.
- Détecteur d1 : voie de rapide ; Détecteur d2 : voie lente.

Intégration du trafic

- Matrices OD WIM par 15 minutes, 14 classes.
- Matrices OD CSACR par 60 minutes, 6 classes.

Tab. 36 Répartition des catégories de poids lourds, WIM 2008, Monte Ceneri, selon chap. 3.4

Catégorie	Total [vhc]	Part	Direction Bellinzona [vhc]	Part	Direction Lugano [vhc]	Part
Global	1'827'143	100.0%	956'454	100.0%	870'689	100.0%
11	253'414	13.9%	125'369	13.1%	128'045	14.7%
12	61'256	3.4%	32'110	3.4%	29'146	3.3%
22	47'669	2.6%	25'087	2.6%	22'582	2.6%
111	7'329	0.4%	3'547	0.4%	3'782	0.4%
1111r	45'315	2.5%	22'116	2.3%	23'199	2.7%
112r	51'727	2.8%	25'975	2.8%	25'752	3.0%
1211r	28'830	1.6%	16'184	1.7%	12'646	1.5%
122	59'616	3.3%	30'666	3.2%	28'950	3.3%
1112r	4'633	0.3%	2'504	0.3%	2'129	0.2%
112a	132'664	7.3%	60'611	6.3%	72'053	8.3%
113a	611'346	33.5%	321'465	33.6%	289'881	33.3%
123a	1'774	0.1%	966	0.1%	808	0.1%
23	2'174	0.1%	1'057	0.1%	1'117	0.1%
Non-classés	519'396	28.4%	288'797	30.2%	230'599	26.5%

Tab. 37 Répartition des catégories de poids lourds, WIM 2012, Monte Ceneri, selon chap. 3.4

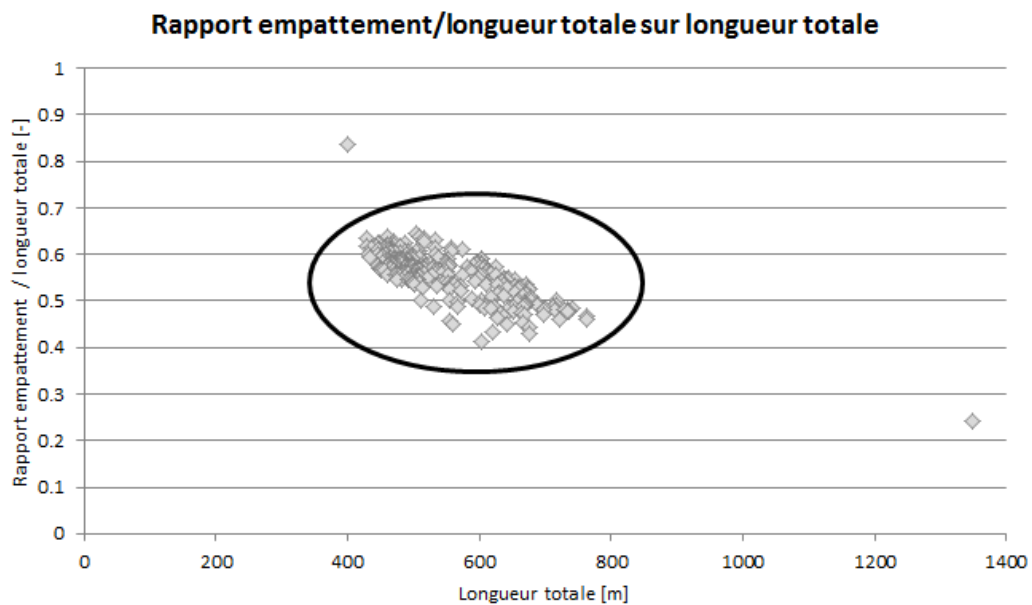
Catégorie	Direction Bellinzona [vhc]	Part
Global	1'009'455	100.0%
11	115'499	11.4%
12	35'772	3.5%
22	32'393	3.2%
111	4'231	0.4%
1111r	19'372	1.9%
112r	17'655	1.7%
1211r	15'503	1.5%
122	24'794	2.5%
1112r	1'979	0.2%
112a	50'736	5.0%
113a	300'012	29.7%
123a	1'068	0.1%
23	5'674	0.6%
Non-classés	384'767	38.1%

La part de véhicules non-classés étant considérable (38%, Tab. 37), il convient de l'étudier en détail. En sélectionnant un jour de manière aléatoire (mercredi 13.06.2012), dans la direction 408 (Bellinzona), sur 4'055 observations, 2'335 ne sont pas classées (58%).

Tab. 38 Répartition des catégories de poids lourds, WIM 13.06.2012, Monte Ceneri. Reclassement sans limite de poids

Catégorie	Direction Bellinzona [vhc]	Poids inférieur [vhc]	Poids supérieur [vhc]
Global non-classés	2'335		
11	216	216	0
12	8	8	0
22	5	5	0
111	17	17	0
112a	18	18	0
113a	3	3	0
23	2	2	0
Reste non-classés	2'066		

En supprimant les limites de poids proposées au chapitre 3.4, on reclasse 269 véhicules (Tab. 38). Les poids par essieux de ces enregistrements ne présentant pas d'incohérences, ils sont considérés comme données valides. Sur les 2'066 enregistrements restants, 334 concernent des véhicules à deux essieux. 21 enregistrements sont exclus de ces données en raison d'un poids total supérieur à 18 tonnes (OCR, art. 67 al. 1e), d'un poids par essieux supérieur à 11.5 tonnes (OCR, art. 67 al. 2) ou d'un empattement inférieur à 2.5m.

**Fig. 89** Rapport empattement / longueur totale, WIM 13.06.2012, données partielles (313 enregistrements).

On remarque une homogénéité sur le rapport empattement/longueur totale rapporté à la longueur totale. On considérera les enregistrements hors de cette zone homogène comme étant de potentielles erreurs de mesures. On en déduit une condition supplémentaire : le rapport empattement / longueur totale doit être compris entre 0.4 et 0.65 [-] (Classe 11_bis).

Sous ces différentes hypothèses, la nouvelle répartition est la suivante (Tab. 39).

Tab. 39 Répartition des catégories de poids lourds sans limites de poids, WIM 2008, Monte Ceneri

Catégorie	Total [vhc]	Part	Direction Bellinzona [vhc]	Part	Direction Lugano [vhc]	Part
Global	1'827'143	100.0%	956'454	100.0%	870'689	100.0%
11	391'980	21.5%	187'983	19.7%	203'997	23.4%
11bis	201'944	11.1%	139'881	14.6%	62'063	7.1%
12	63'355	3.5%	32'909	3.4%	30'446	3.5%
22	48'449	2.7%	25'393	2.7%	23'056	2.6%
111	32'134	1.8%	16'016	1.7%	16'118	1.9%
1111r	45'485	2.5%	22'223	2.3%	23'262	2.7%
112r	51'978	2.8%	26'047	2.7%	25'931	3.0%
1211r	28'835	1.6%	16'185	1.7%	12'650	1.5%
122	59'636	3.3%	30'670	3.2%	28'966	3.3%
1112r	4'657	0.3%	2'514	0.3%	2'143	0.2%
112a	143'502	7.9%	66'391	6.9%	77'111	8.9%
113a	611'591	33.5%	321'499	33.6%	290'092	33.3%
123a	1'774	0.1%	966	0.1%	808	0.1%
23	2'182	0.1%	1'060	0.1%	1'122	0.1%
Non-classés	139'641	7.6%	66'717	7.0%	72'924	8.4%

Sans investigations supplémentaires, la part de véhicules non-classés est acceptable (7.6%) et sera considérée comme facteur de variation potentielle des résultats.

Vérification du modèle

- Tronçon sans entrées ni sorties : pas de comportement suspect perceptible, écoulement des flux correct.

Calibrage

- Mercredi type 2008.
- Pas d'agrégation des données sur 60 minutes.
- Vérification des flux (débits) et des vitesses.

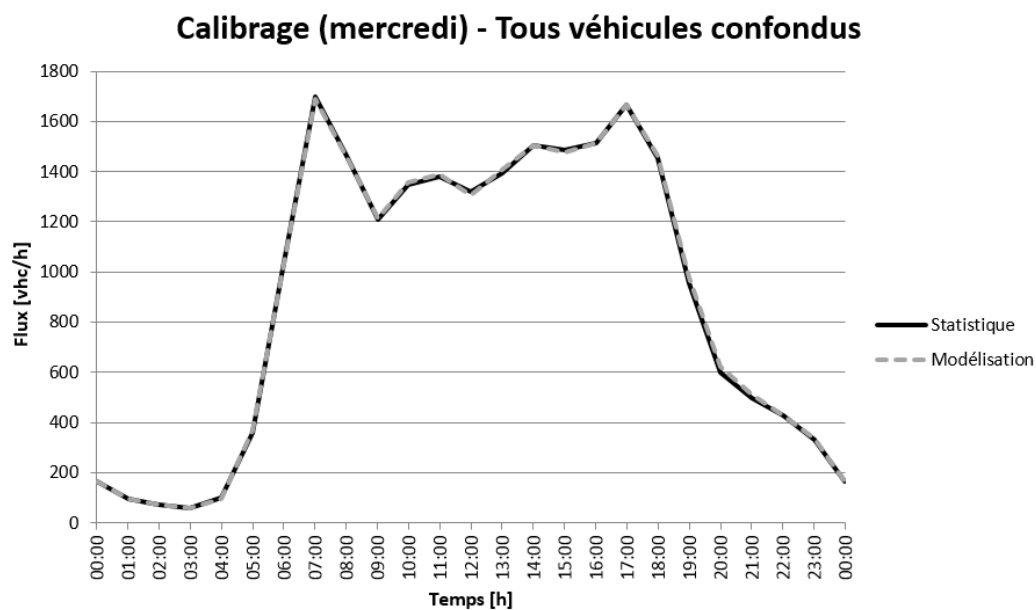


Fig. 90 Calibrage, mercredi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous véhicules.

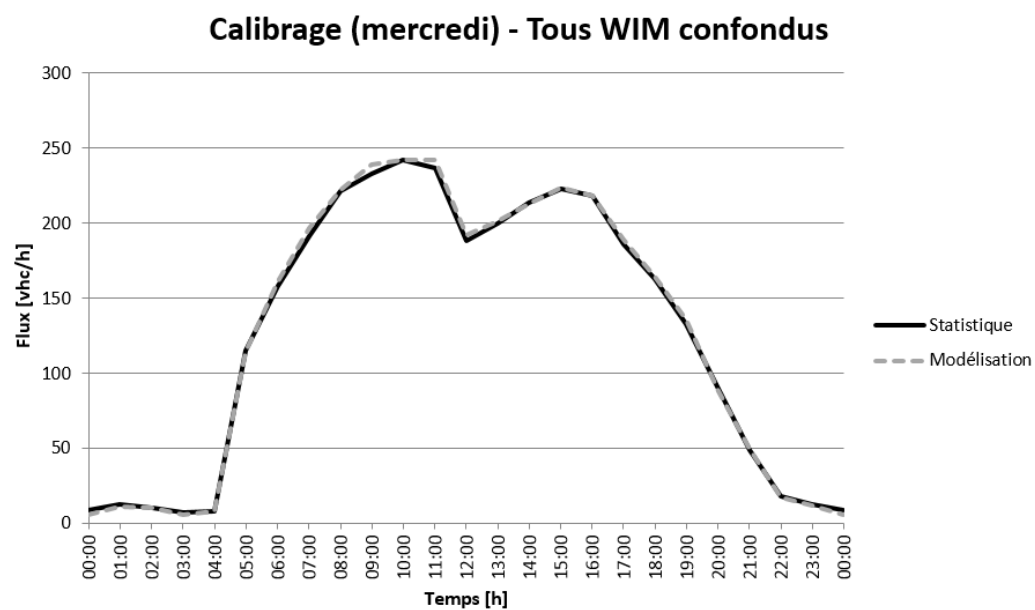


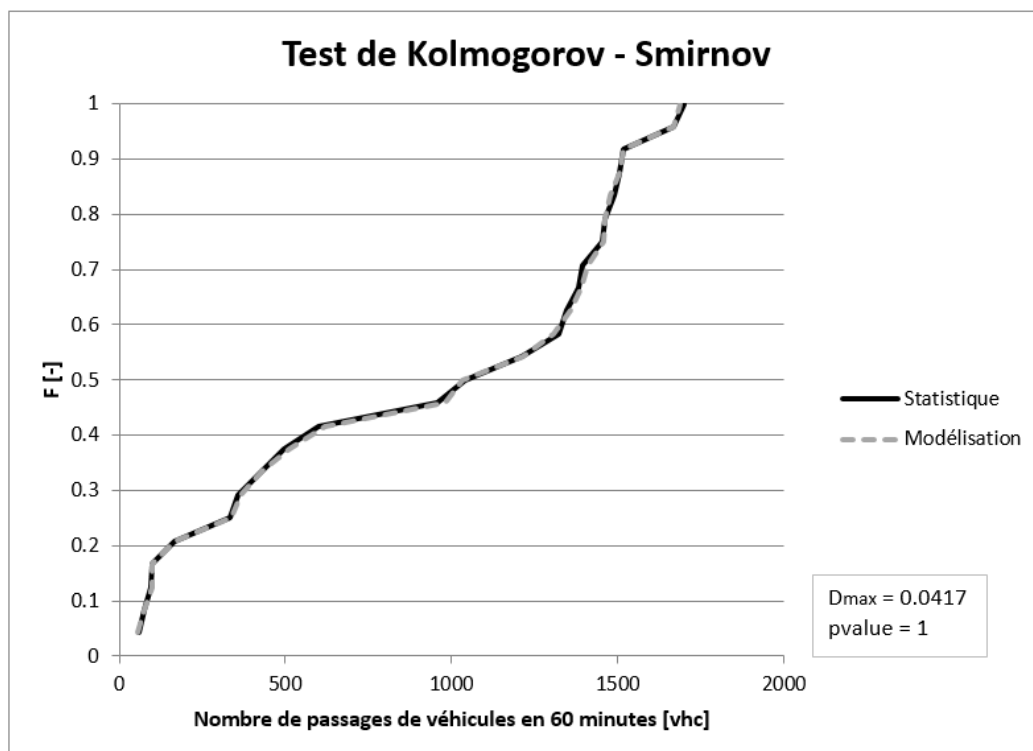
Fig. 91 Calibrage, mercredi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous PL.

Calibrage – Test de Kolmogorov-Smirnov

Mercredi

Tous véhicules confondus

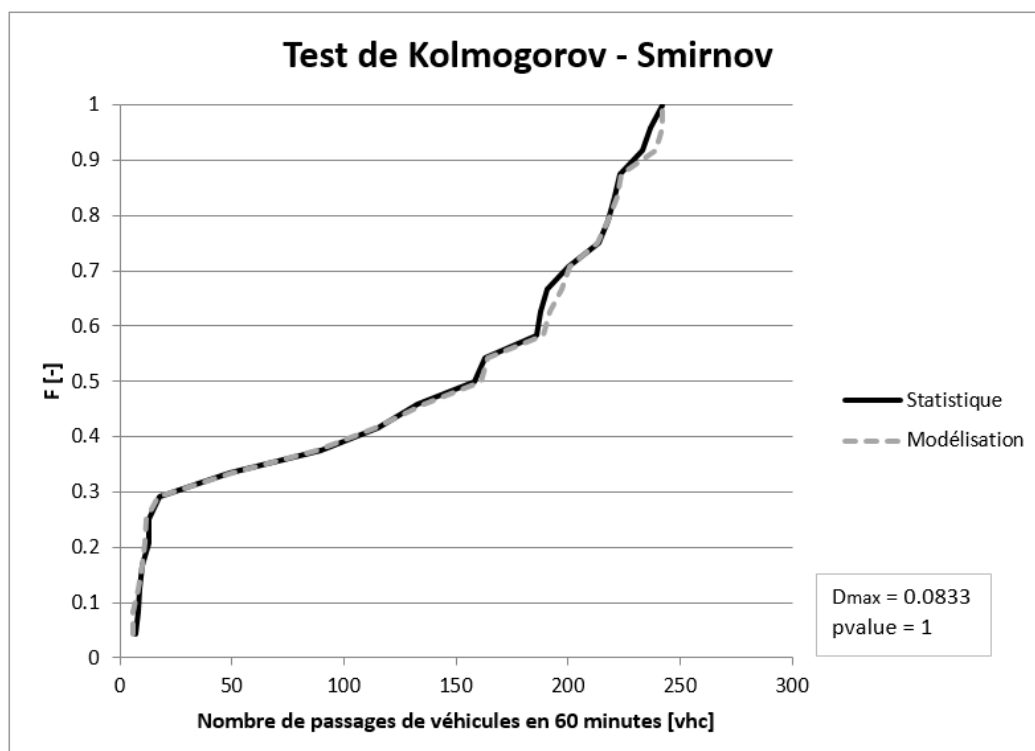
Modèle 1 (2008)

**Fig. 92** KS-Test, mercredi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous véhicules.

Mercredi

Tous PL WIM confondus

Modèle 1 (2008)

**Fig. 93** KS-Test, mercredi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous PL.

Tab. 40 Vitesses moyennes aux détecteurs d1 - d2. Calibrage. Mercredi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona

Classes	Statistique [km/h]	Modélisation d1 [km/h]	Modélisation d2 [km/h]
11	90±10	96.71	87.10
111	90±8	89.74	86.88
1111r	88±4	88.88	85.81
1112r	87±6	92.95	85.55
112a	88±5	89.93	86.54
112r	88±4	89.40	86.08
113a	88±4	88.06	86.22
11bis	107±14	103.77	96.10
12	89±9	93.70	87.62
1211r	88±4	84.48	86.11
122	88±4	88.19	86.22
123a	88±5	-	83.92
22	85±7	85.53	82.19
23	87±8	-	81.08
2	104±17	107.17	100.49
3	103±14	106.61	101.40
4	81±12	95.82	84.53
5	93±16	102.54	91.21
6	81±10	96.62	85.86
7	79±7	-	82.12

Une seule moyenne de vitesse présente une valeur trop élevée. Celle-ci se situant sur la voie de dépassement, aucun ajustement n'est effectué.

Sur 10 répliques effectuées, aucune correction n'est effectuée. Les débits et vitesses sont valides. Le calibrage est donc accepté.

Validation

- Mardi type 2008.
- Pas d'agrégation des données sur 60 minutes.
- Vérification des flux (débits) et des vitesses.

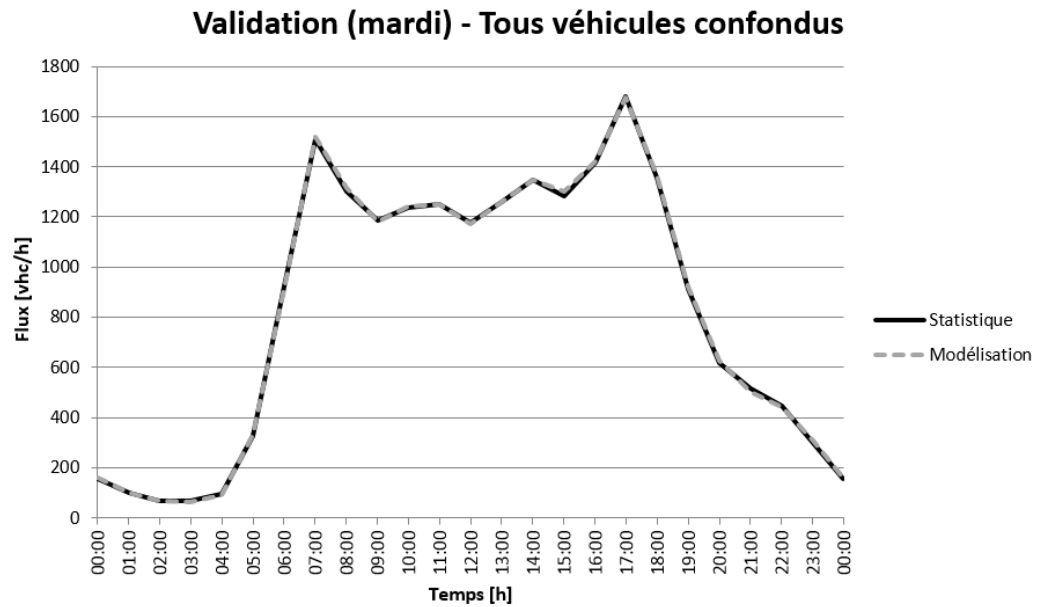


Fig. 94 Validation, mardi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous véhicules.

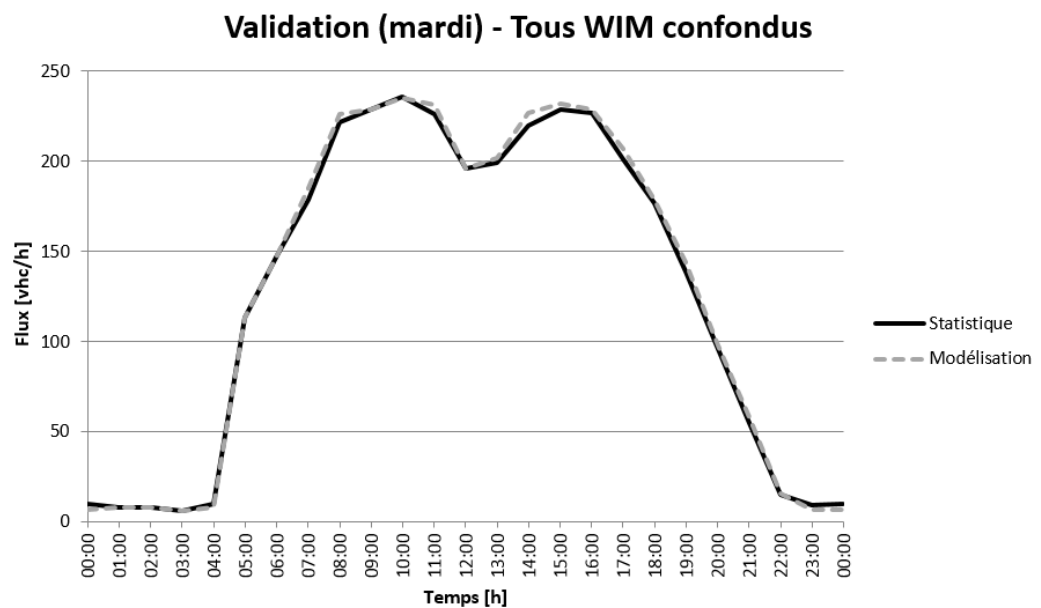


Fig. 95 Validation, mardi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous PL.

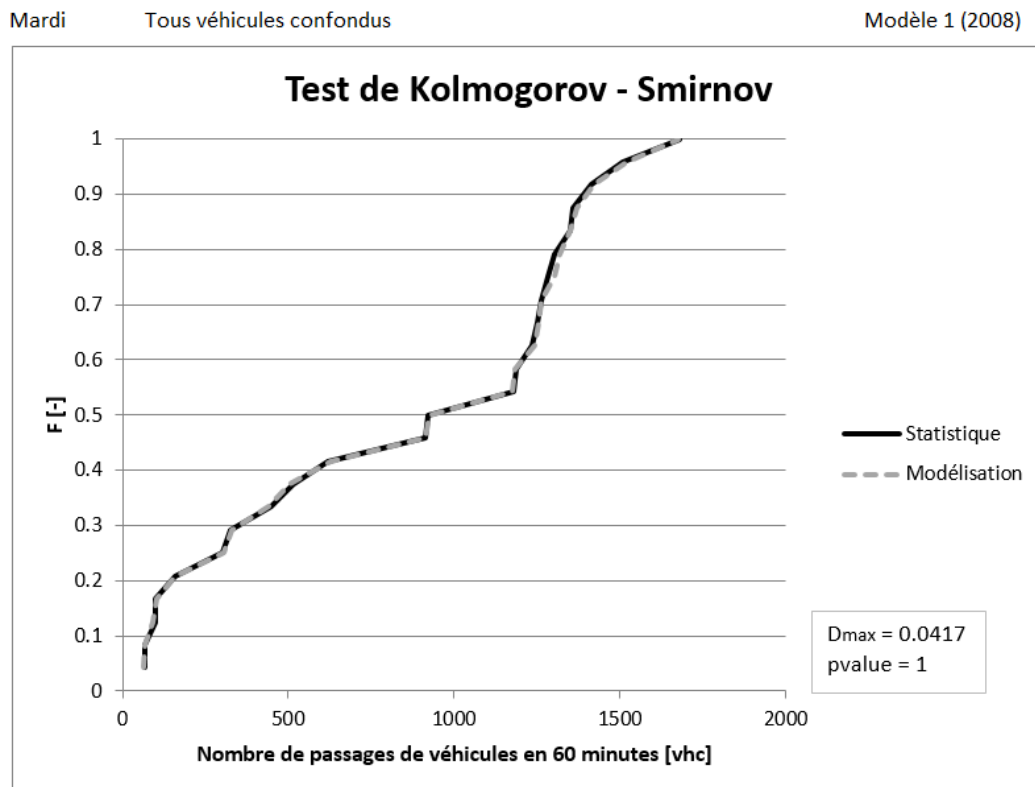


Fig. 96 KS-Test, mardi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous véhicules.

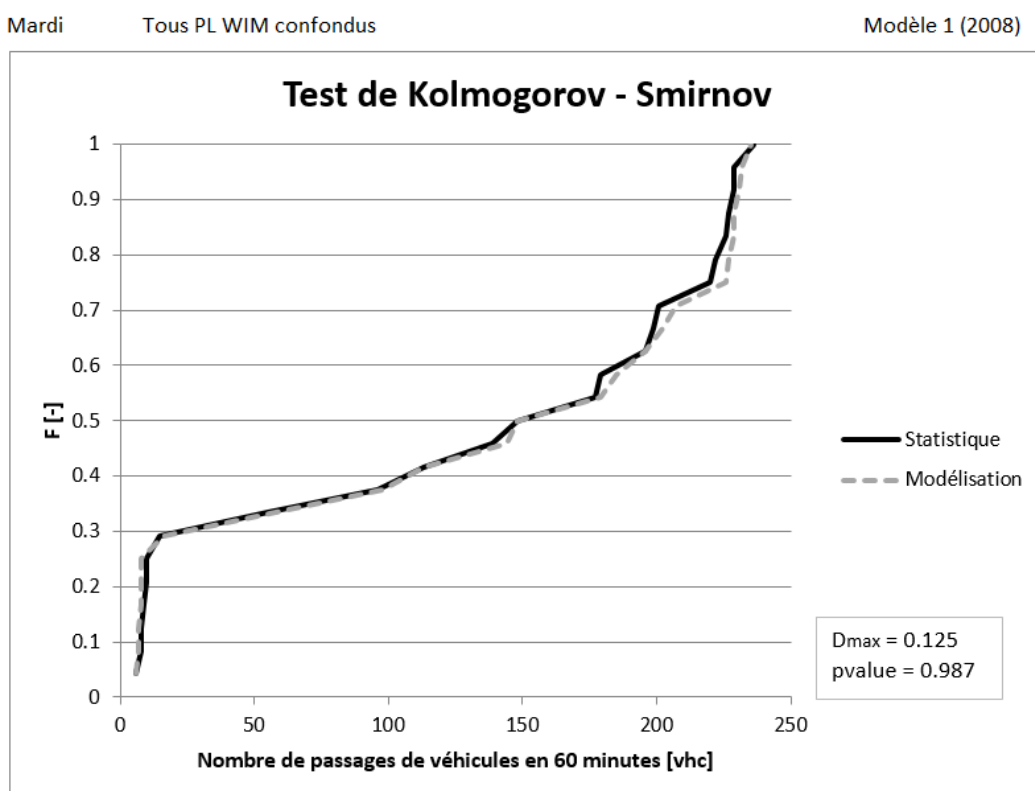


Fig. 97 KS-Test, mardi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona. Tous PL.

Tab. 41 Vitesses moyennes aux détecteurs d1 - d2. Validation. Mardi type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona

Classes	Statistique [km/h]	Modélisation d1 [km/h]	Modélisation d2 [km/h]
11	90±10	98.82	87.85
111	90±8	96.06	88.82
1111r	88±4	88.19	86.31
1112r	87±6	87.93	83.65
112a	88±5	90.58	86.62
112r	88±4	87.50	86.56
113a	88±4	87.31	86.48
11bis	107±14	106.62	98.06
12	89±9	94.67	85.86
1211r	88±4	85.97	86.66
122	88±4	88.89	86.80
123a	88±5	-	89.90
22	85±7	80.15	82.23
23	87±8	-	84.44
2	104±17	115.49	106.84
3	103±14	113.56	108.58
4	81±12	97.02	85.75
5	93±16	106.40	94.04
6	81±10	91.74	84.42
7	79±7	-	79.44

Les dépassements de vitesses moyennes étant peu importants, celles-ci peuvent être considérées comme validées.

Sur 10 répliques effectuées, les débits et vitesses sont valides. La validation est donc acceptée.

Scénarios

- Situation de trafic standard.
- Evaluation d'une semaine type 2008.
- Simulation + 20% (augmentation globale de 20% du trafic [nombre de véhicules]).

L'évolution du trafic est estimée pour chaque classe de véhicule (Swiss 10 et PL) à partir des données de 2010 à 2012.

Contrôles

Des contrôles sont effectués sur les débits de l'ensemble des véhicules (col. gauche) et des véhicules PL (col. droite) pour l'ensemble de la semaine type 2008 (Fig. 98).

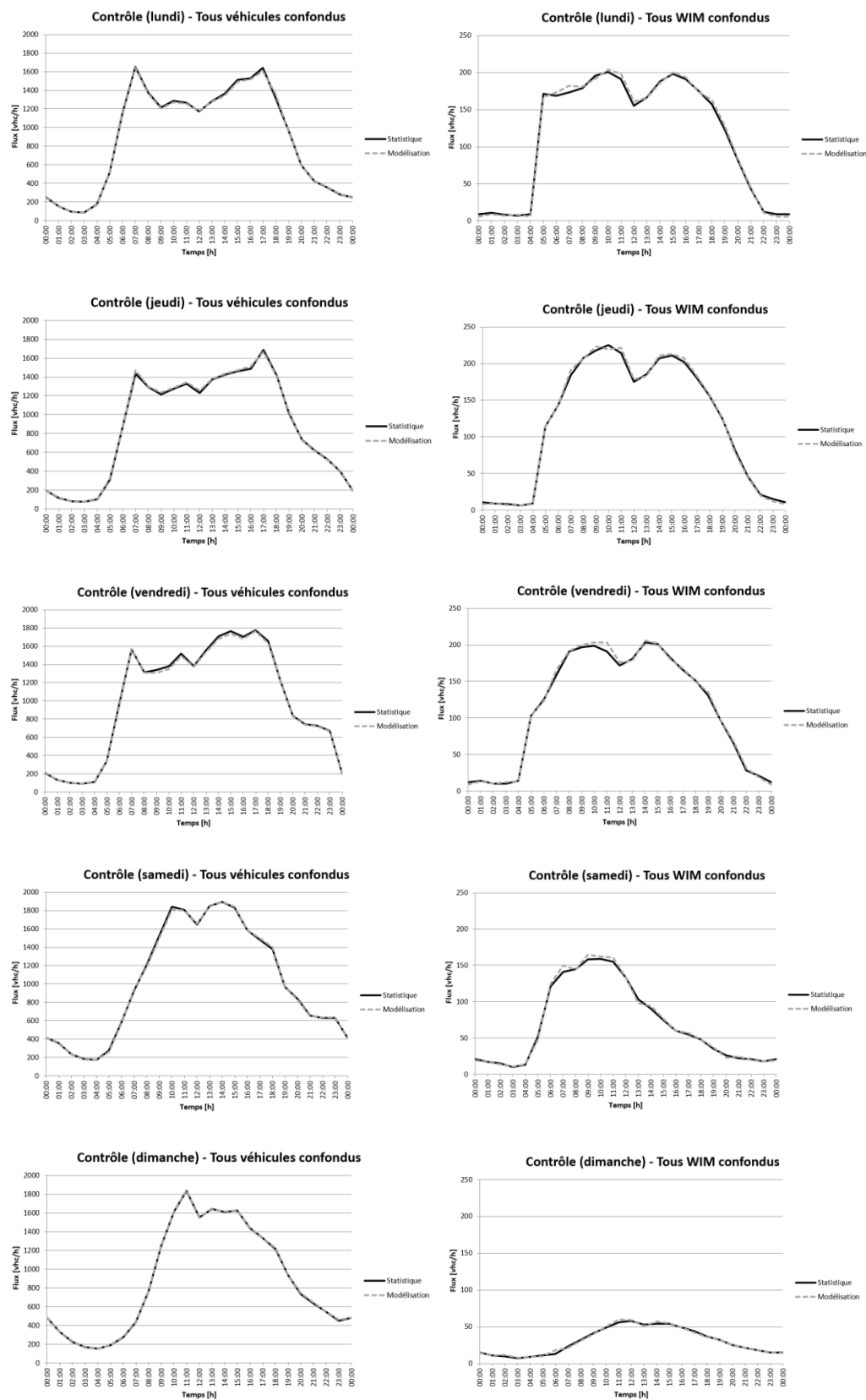


Fig. 98 Miniatures des contrôles, semaine type 2008, Monte Ceneri, direction Bellinzona.

7.4 Aarwangen

Ouvrage étudié

- Pont sur l'Aar, route cantonale n°244 Langenthal – Niederbipp-Oensingen.

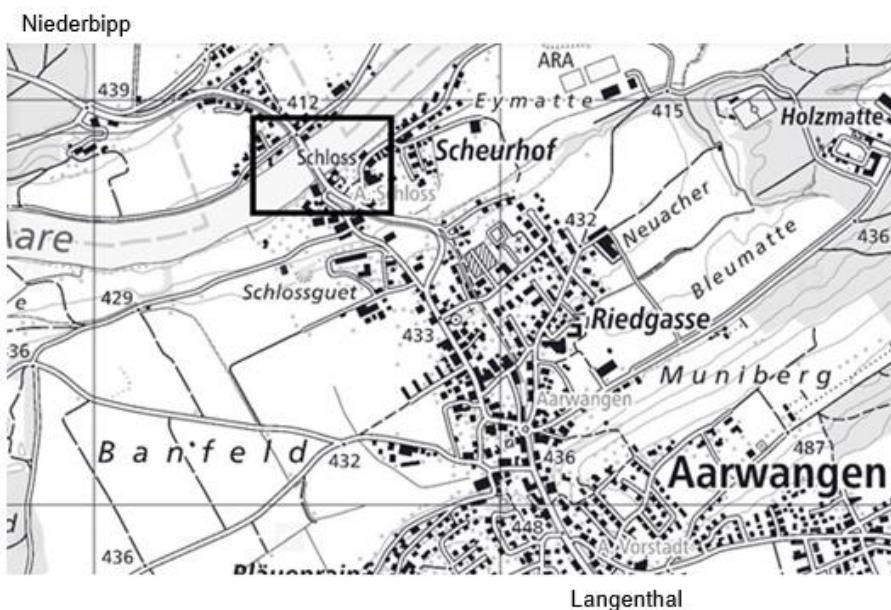


Fig. 99 Situation de l'ouvrage étudié (Fonds de carte : geo.admin.ch).

Le village d'Aarwangen est traversé par un trafic lié au transit entre Langenthal et Huttwil. De plus, une liaison ferroviaire emprunte, au cœur du village, l'espace routier et engendre des perturbations supplémentaires (axe fortement sollicité) en raison de deux passages à niveaux.

Selon les résultats annuels du CSACR 2013, le trafic journalier moyen de la traversée d'Aarwangen est d'environ 12'000 véhicules à moteur avec une part de trafic poids lourds de 17% ([40]). La sécurité des usagers (trafic local, cyclistes, piétons) ainsi que les nuisances sonores sur cet axe étroit sont remises en cause. On notera également qu'aux heures de pointes, des congestions sont constatées. Afin de décongestionner cet axe routier, une étude de projet de contournement du village est en cours (Fig. 100).

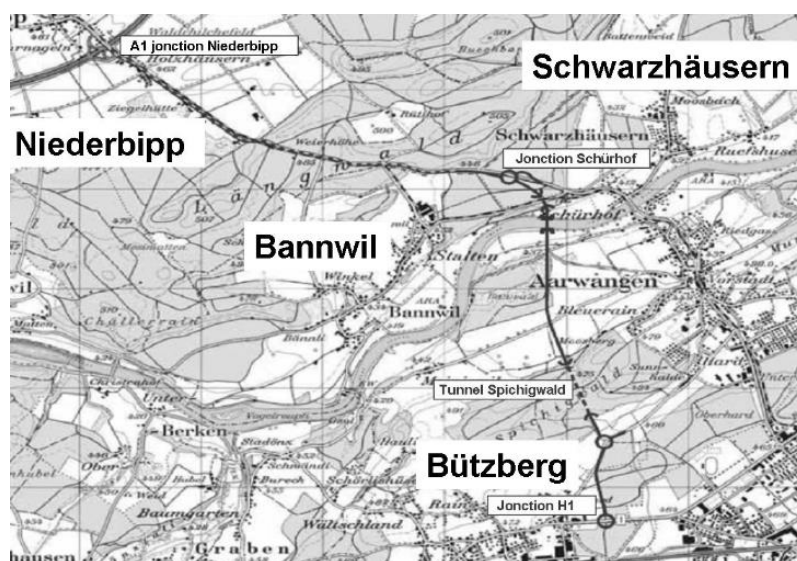


Fig. 100 Projet de contournement d'Aarwangen [41].

Base de données routières

- CSACR : Aarwangen, Schuerhof CH363, direction 1 : Niederbipp, direction 2 : Aarwangen (2 voies).
- WIM : Installation de pesage en marche temporaire de type « Golden River », entre le pont de l'Aar et le centre d'Aarwangen du 09.10.1998 au 27.10.1998, voie 1 : Niederbipp, voie 2 : Aarwangen

Tab. 42 Répartition des catégories de poids lourds, plus de 10 tonnes, WIM 1998, Aarwangen

Catégorie	Total [vhc]	Part	Direction (1) Niederbipp [vhc]	Part	Direction (2) Aarwangen [vhc]	Part
Global	6'577	100.0%	2'922	100.0%	3'655	100.0%
11	3'265	49.6%	1'245	42.6%	2'020	55.3%
12	101	1.5%	62	2.1%	39	1.1%
22	65	1.0%	48	1.6%	17	0.5%
111	375	5.7%	97	3.3%	278	7.6%
111r	1'730	26.3%	758	25.9%	972	26.6%
112r	30	0.5%	15	0.5%	15	0.4%
1211r	6	0.1%	5	0.2%	1	0.0%
122	1	0.0%	1	0.0%	0	-
1112r	45	0.7%	19	0.7%	26	0.7%
112a	325	4.9%	249	8.5%	76	2.1%
113a	86	1.3%	53	1.8%	33	0.9%
123a	0	-	0	-	0	-
23	0	-	0	-	0	-
Non-classés	548	8.3%	370	12.7%	178	4.9%

Tab. 43 Répartition des véhicules non-classés par nombre d'axes

Catégorie	Total [vhc]	Part
Global	548	100.0%
2 axes	197	35.9%
3 axes	134	24.5%
4 axes	117	21.4%
5 axes	74	13.5%
6 axes	21	3.8%
7 axes	5	0.9%

Parmi les véhicules à deux axes (Tab. 43), 97% n'ont pas été classés dans la catégorie 11 en raison d'un entraxe inférieur à 3.60m (entre 3m et 3.60m). Les autres en raison d'un poids total supérieur à 30 tonnes (jusqu'à 39.6 to détecté) ou d'un entraxe supérieur aux limites de la catégorie.

Les 197 véhicules à deux axes non-classés seront introduits dans la catégorie 11. Leurs caractéristiques n'entreront toutefois pas en compte pour déterminer les caractéristiques types de la catégorie.

Sans investigations supplémentaires, la part de véhicules non-classés est alors acceptable (5.3%) et sera considérée comme facteur de variation potentielle des résultats.

Modélisation spatiale et caractéristiques du réseau routier

- Tronçon réel de deux voies (bidirectionnelle) d'une longueur de 1.7 kilomètres.

- Les influences du transport ferroviaire ne sont pas considérées.
- Limite maximale de vitesse légale à 50 km/h au niveau du détecteur (pont).
- Sens de circulation étudiés : 2 sens de circulation.
- Interdiction de dépassement.
- Détecteur d1 : direction Niederbipp ; Détecteur d2 : direction Aarwangen

Traitements statistiques

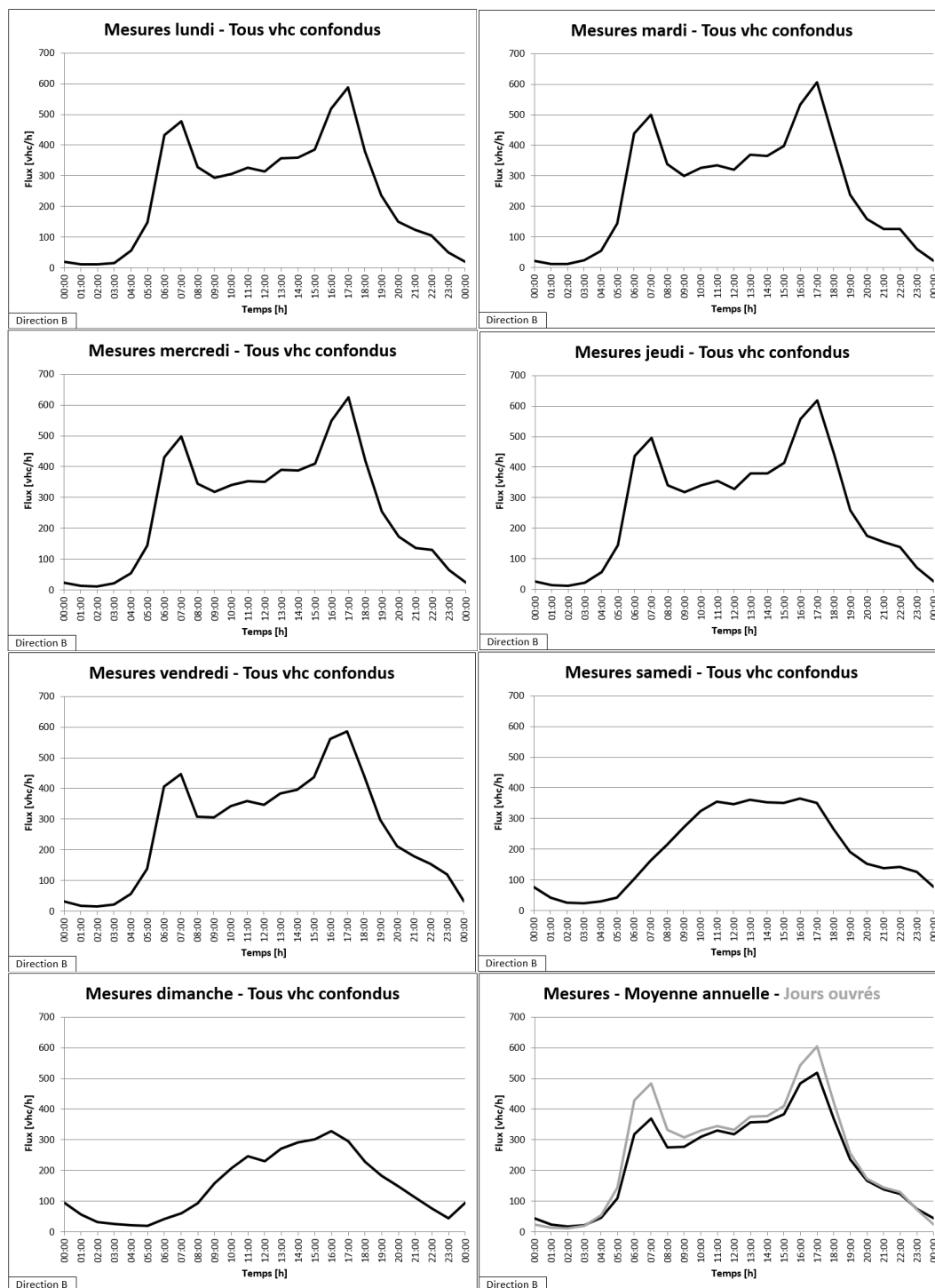


Fig. 101 Histogrammes de débits, CSACR. Tous véhicules. Direction 1 : Niederbipp

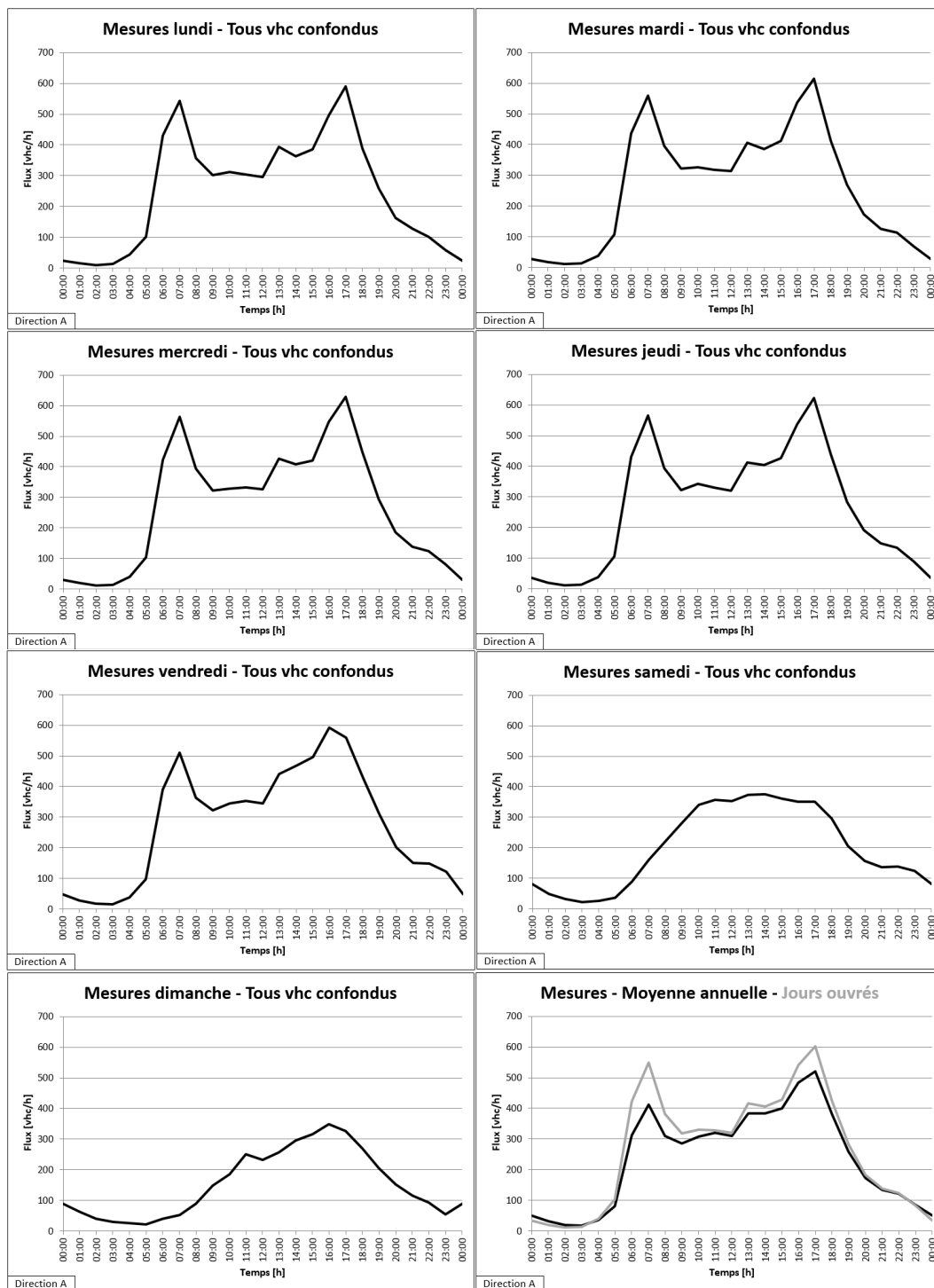


Fig. 102 Histogrammes de débits, CSACR. Tous véhicules, 2013. Direction 2 : Aarwangen

Mesures WIM – Tous poids lourds de plus de 10 tonnes. Direction 1 : Niederbipp

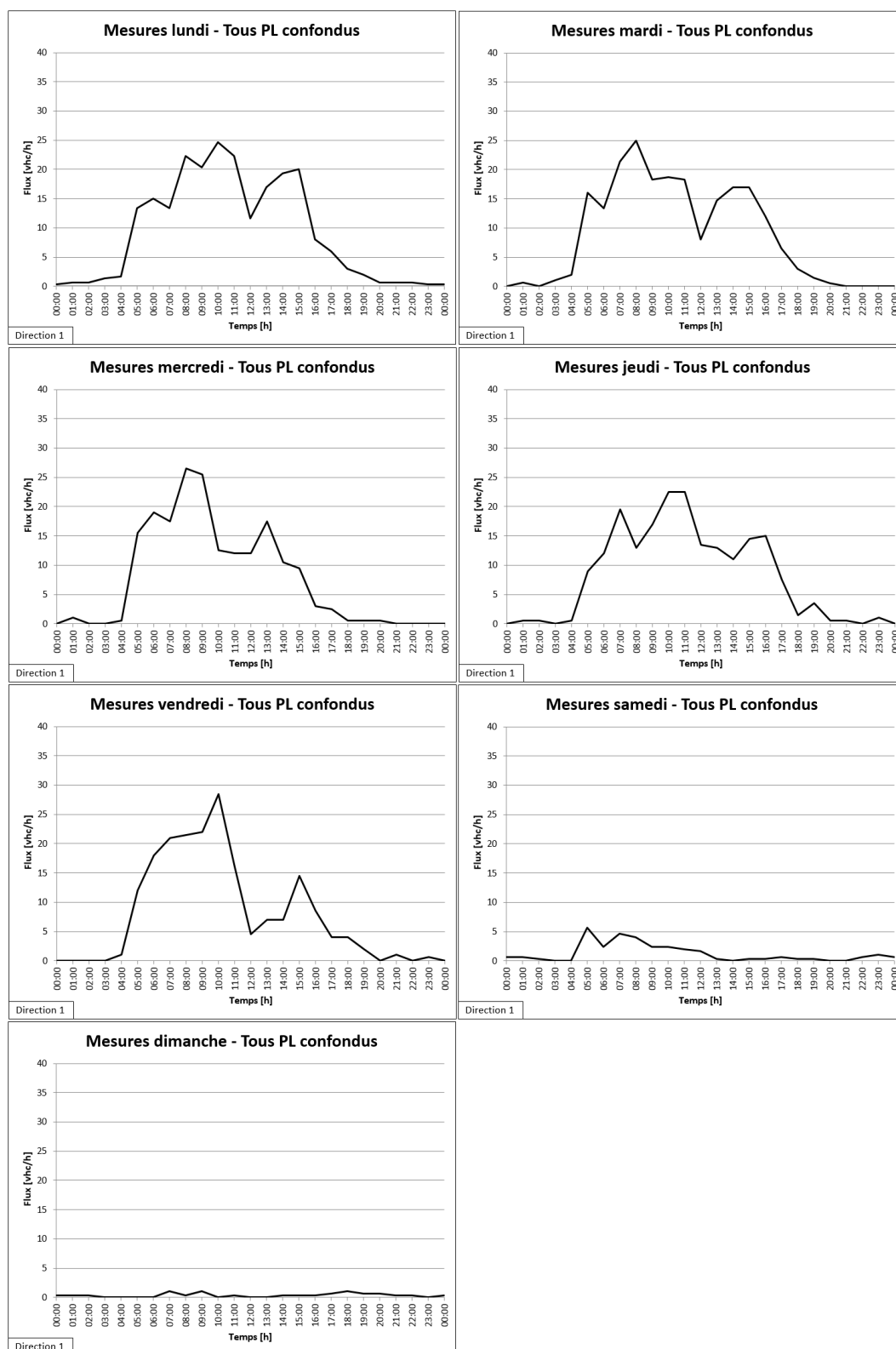


Fig. 103 Histogrammes de débits, WIM. PL +10 to, 1998. Direction 1 : Niederbipp

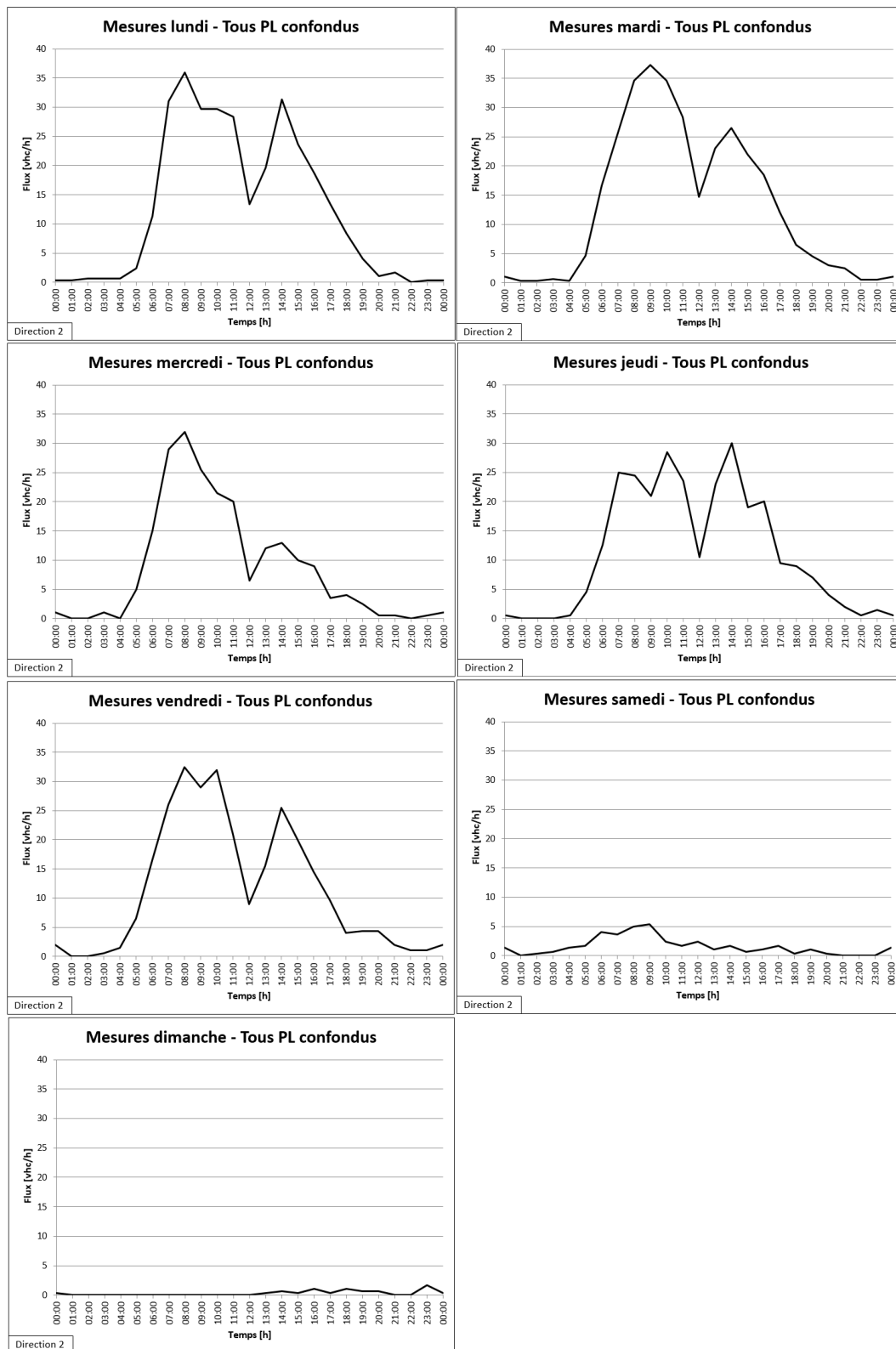


Fig. 104 Histogrammes de débits, WIM. PL +10 to, 1998. Direction 2 : Aarwangen

Vérification du modèle

- Tronçon sans interactions : pas de comportement suspect perceptible, écoulement des flux correct.

Calibrage

- Mercredi type 2008.
- Pas d'agrégation des données sur 60 minutes.
- Vérification des flux PL (débits).

Les vitesses de toutes les classes de véhicules sont proches de la limite légale à savoir 50 km/h, aucun calibrage de vitesse n'est effectué.

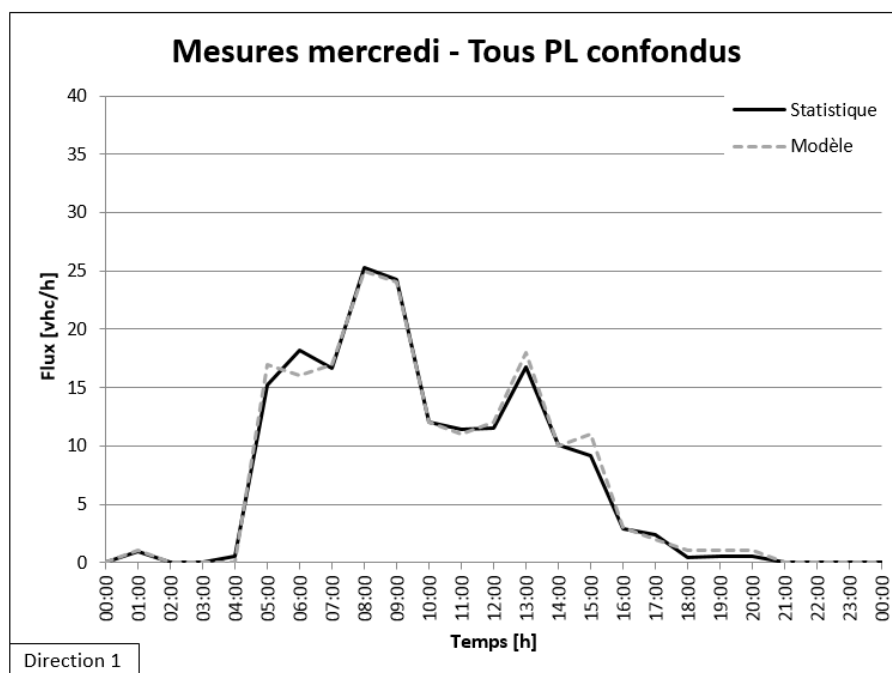


Fig. 105 Calibrage, mercredi type 1998, Aarwangen, direction Niederbipp. Tous PL.

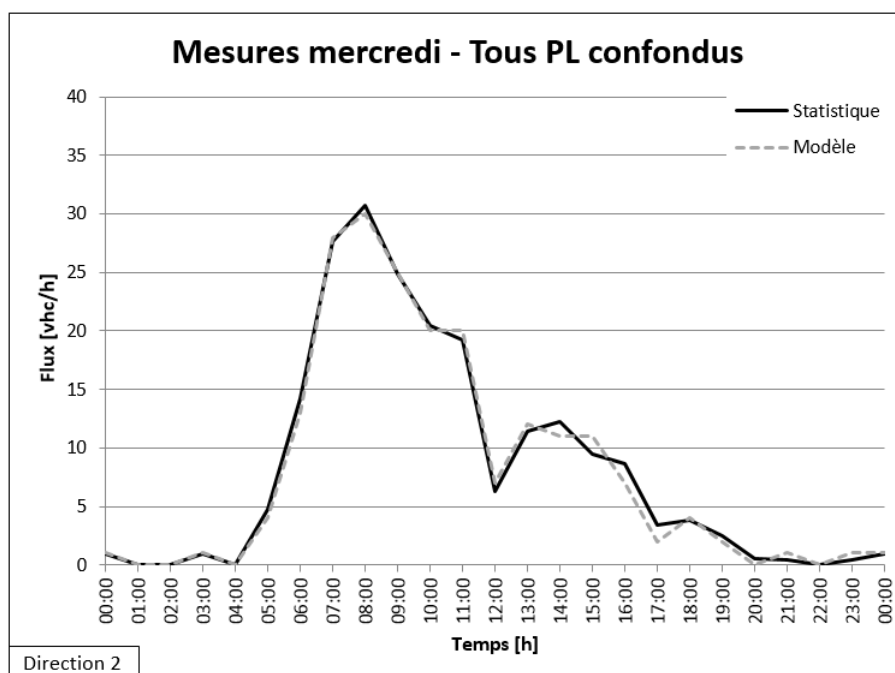


Fig. 106 Calibrage, mercredi type 1998, Aarwangen, direction Aarwangen. Tous PL.

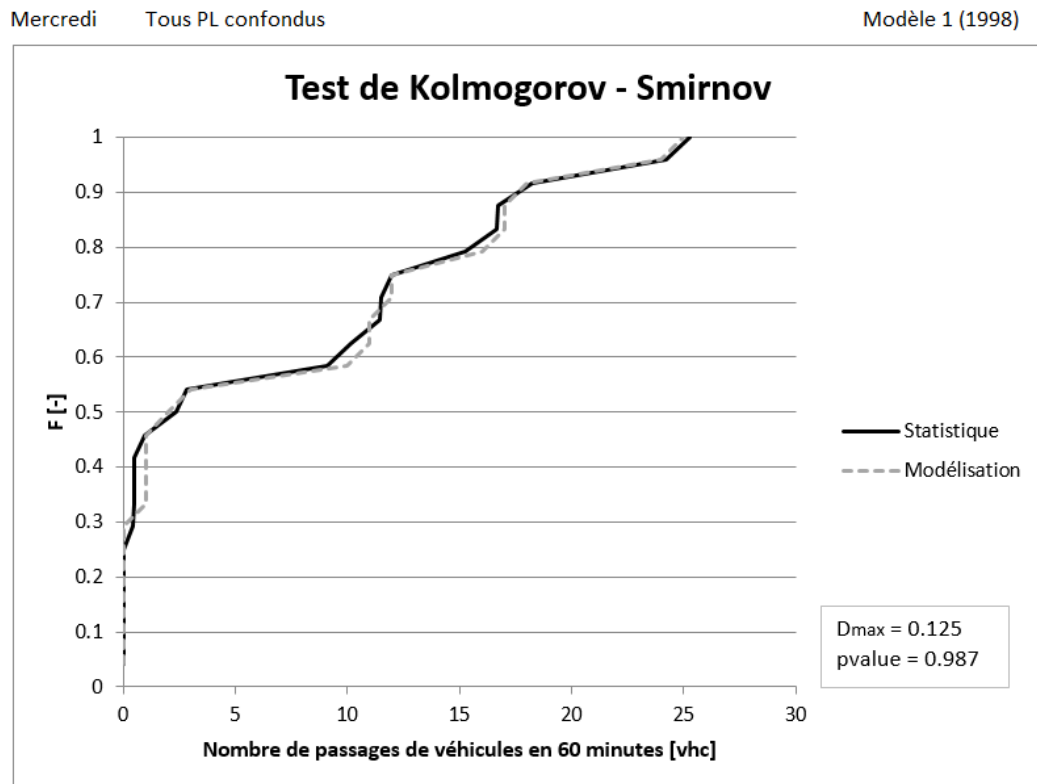


Fig. 107 KS-Test, mercredi type 1998, Aarwangen, direction Niederbipp. Tous PL.

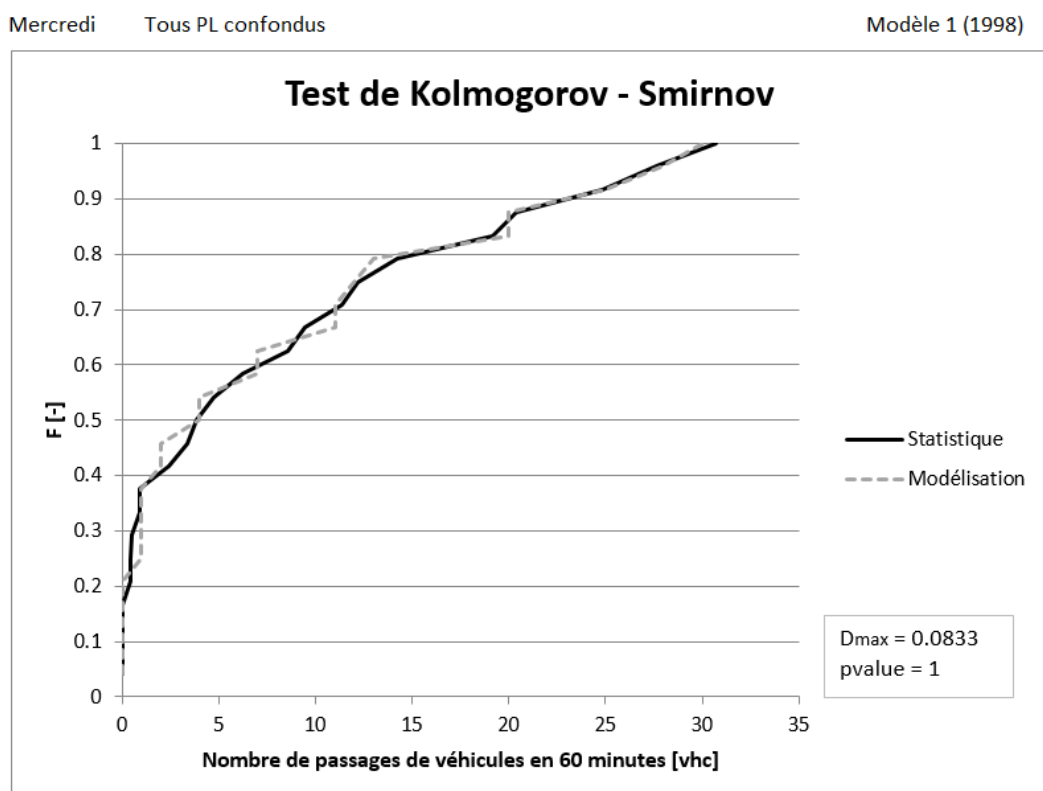


Fig. 108 KS-Test, mercredi type 1998, Aarwangen, direction Aarwangen. Tous PL.

Sur 10 répliquions effectuées, les débits sont valides. Le calibrage est donc accepté.

Validation

- Mardi type 2008.
- Pas d'agrégation des données sur 60 minutes.
- Vérification des flux PL (débits).

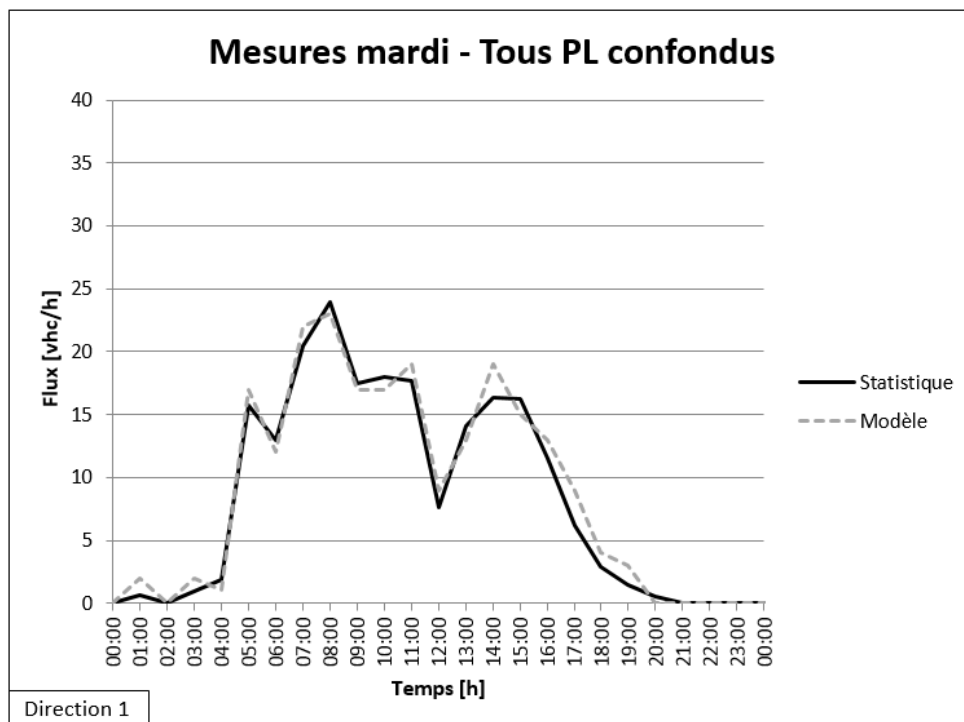


Fig. 109 Validation, mardi type 1998, Aarwangen, direction Niederbipp. Tous PL.

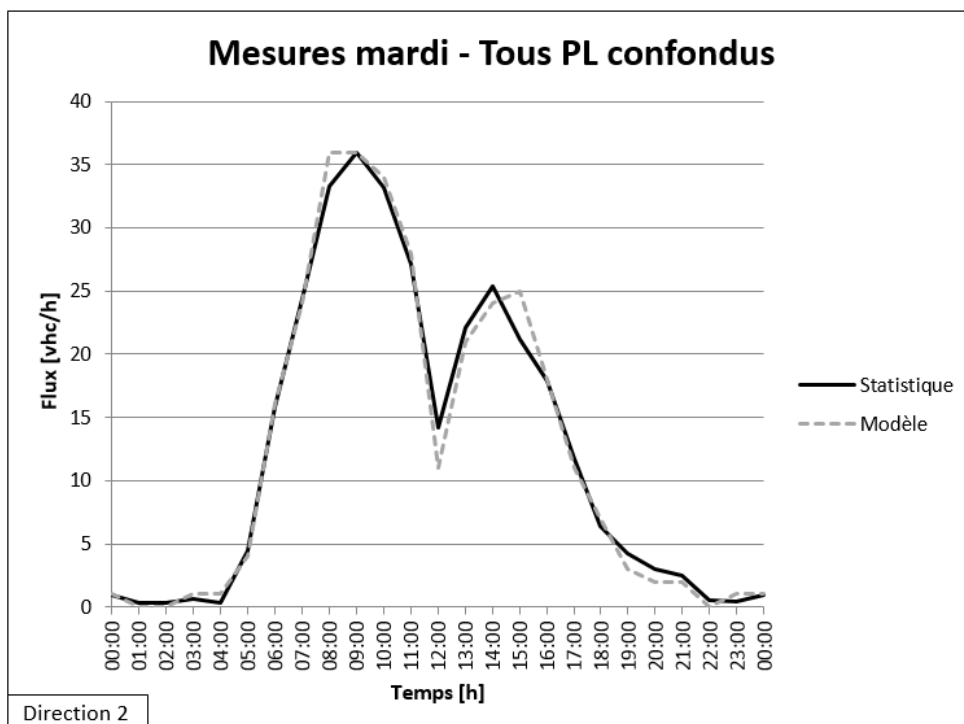


Fig. 110 Validation, mardi type 1998, Aarwangen, direction Aarwangen. Tous PL.

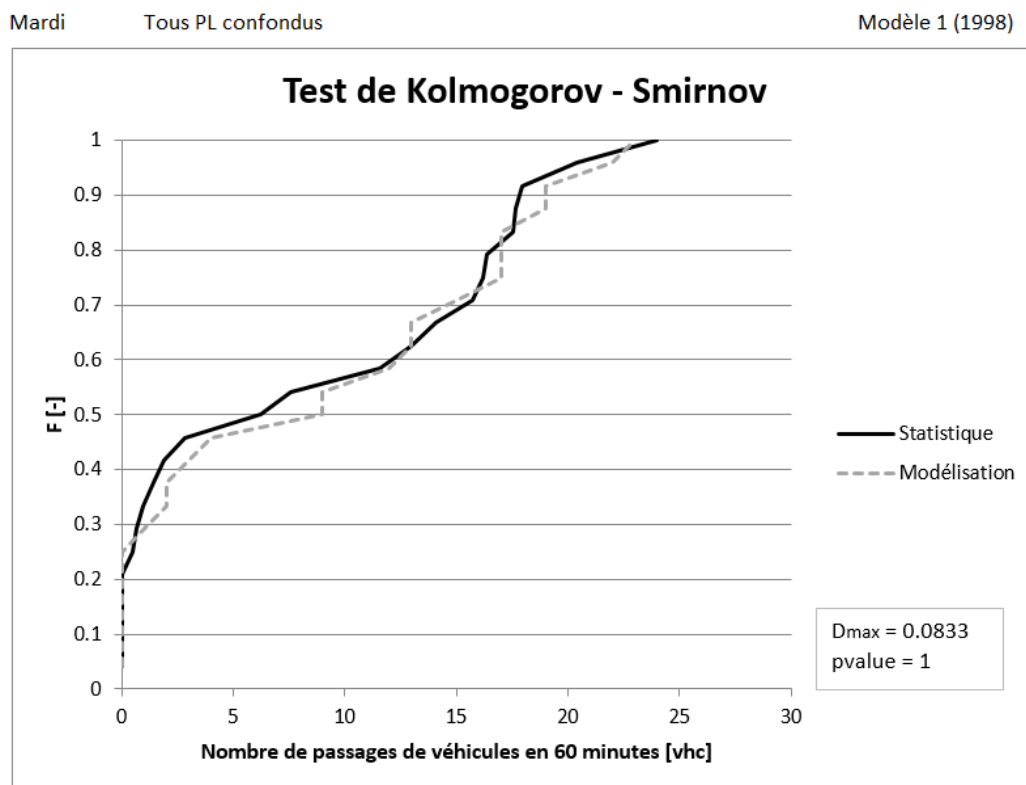


Fig. 111 KS-Test, mardi type 1998, Aarwangen, direction Niederbipp. Tous PL.

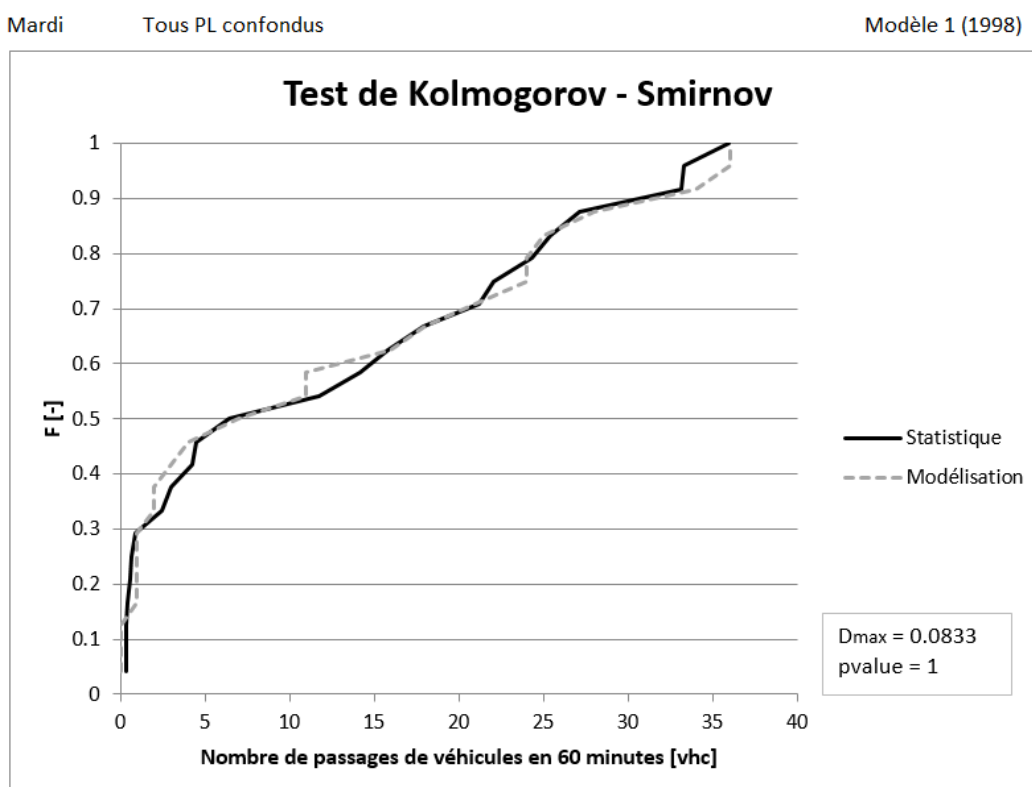


Fig. 112 KS-Test, mardi type 1998, Aarwangen, direction Aarwangen. Tous PL.

Sur 10 réplications effectuées, les débits sont valides. La validation est donc acceptée.

Méthode de calcul de l'évolution annuelle

Afin de parvenir à déterminer l'effet du trafic lourd relevé uniquement durant le mois d'octobre 1998, de le projeter sur l'ensemble d'une année puis à long terme, plusieurs méthodes de calcul ont été analysées.

A partir des enregistrements WIM

Une première possibilité d'analyse de l'évolution annuelle du trafic parcourant le secteur d'étude aurait été de comparer le nombre de véhicules déclenchant un enregistrement (HEAD) dans le fichier WIM (1998). Entre les enregistrements poids lourds, les enregistrements des véhicules légers sont effacés mais la valeur (HEAD) reste à priori incrémentée.

Toutefois, il apparaît que les valeurs trouvées (maximum pour une tranche horaire de 200 vhc/h lors de jours ouvrables, facteur 1 : 3 par rapport au CSACR 2013) ne sont pas représentatives. Il est donc fort possible que tous les véhicules ayant passé sur les capteurs n'aient pas déclenché un enregistrement ou alors celui-ci a été supprimé et la valeur de head non incrémentée.

A partir des enregistrements CSACR

Le capteur d'Aarwangen fournit des informations depuis 2009. Entre 2009 et 2013, l'évolution du trafic est globalement linéaire (+ 8.4% dans la direction de Langenthal et + 7.1% dans la direction de Niederbipp en 4 ans). Afin d'évaluer l'évolution depuis 1998, il est à priori risqué de considérer l'évolution entre les années 2009 et 2013 comme également valable entre 1998 et 2009.

A proximité de la zone d'étude (Hauenstein), un capteur possède des enregistrements depuis 2000. Entre 2000 et 2005, ce capteur a montré une diminution de 2.8 %. Ceci alors que la majeure partie du réseau national montrait une augmentation du trafic routier. Nous nous baserons donc sur les évolutions globales relevées du réseau suisse.

Entre 1985 et 1990, l'évolution globale du trafic routier était de 23%. Entre 1990 et 1995, on a noté une augmentation de 10% sur les routes hors localités, de 13% pour les routes nationales et de 7% pour les autres routes. Entre 1995 et 2000, l'augmentation sur les routes hors localités était de 11%, 14% pour les routes nationales et 8% pour les autres routes.

Les rapports pour les années suivant l'année 2000 n'étant pas directement disponibles, on se basera sur l'évolution annuelle des postes de comptages de manière globale. Entre 2002 et 2008, on note une évolution globale d'environ 9.2%.

Hypothèses sélectionnées

Par simplification, on considérera entre 1998 et 2014 une évolution générale du trafic sur l'axe analysé. On prendra comme valeur une augmentation de +10% du trafic tous les 5 ans ce qui dans l'ensemble correspond aux valeurs enregistrées pour le capteur d'Aarwangen ainsi que des valeurs globales des routes hors localités.

Comparaison mensuelle

Comparons également pour l'année 2013 au niveau des données du CSACR si pendant le mois d'octobre, mois durant lequel a été effectuée l'analyse WIM, le trafic est plus élevé ou moins élevé que la moyenne annuelle.

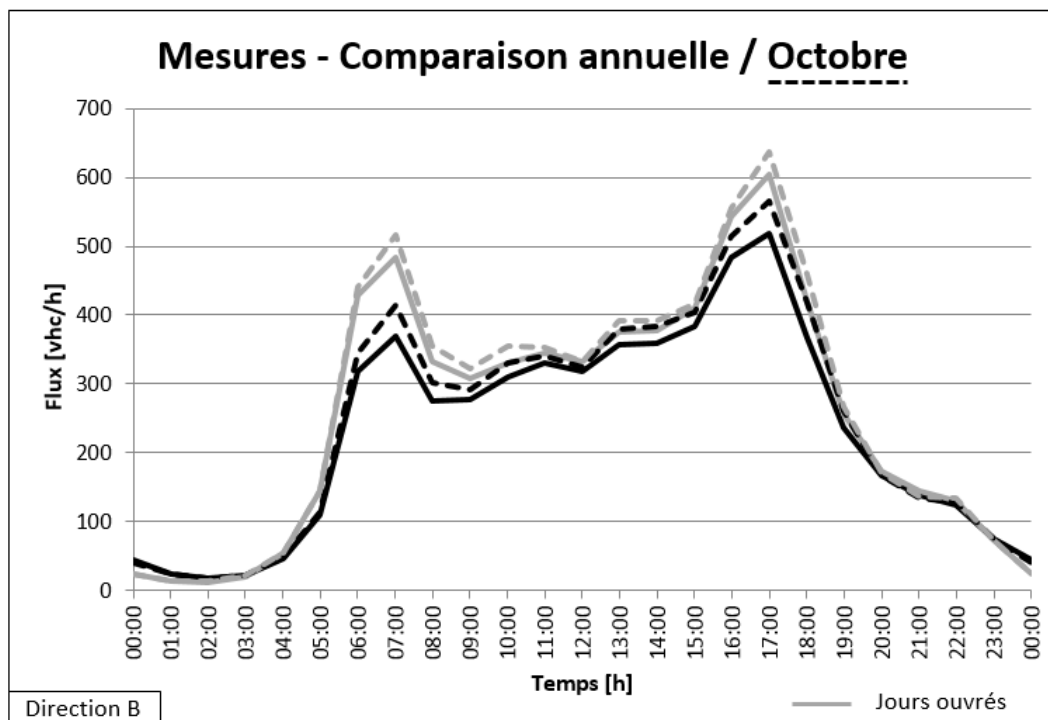


Fig. 113 CSACR CH363, Aarwangen, direction Niederbipp. Tous véhicules.

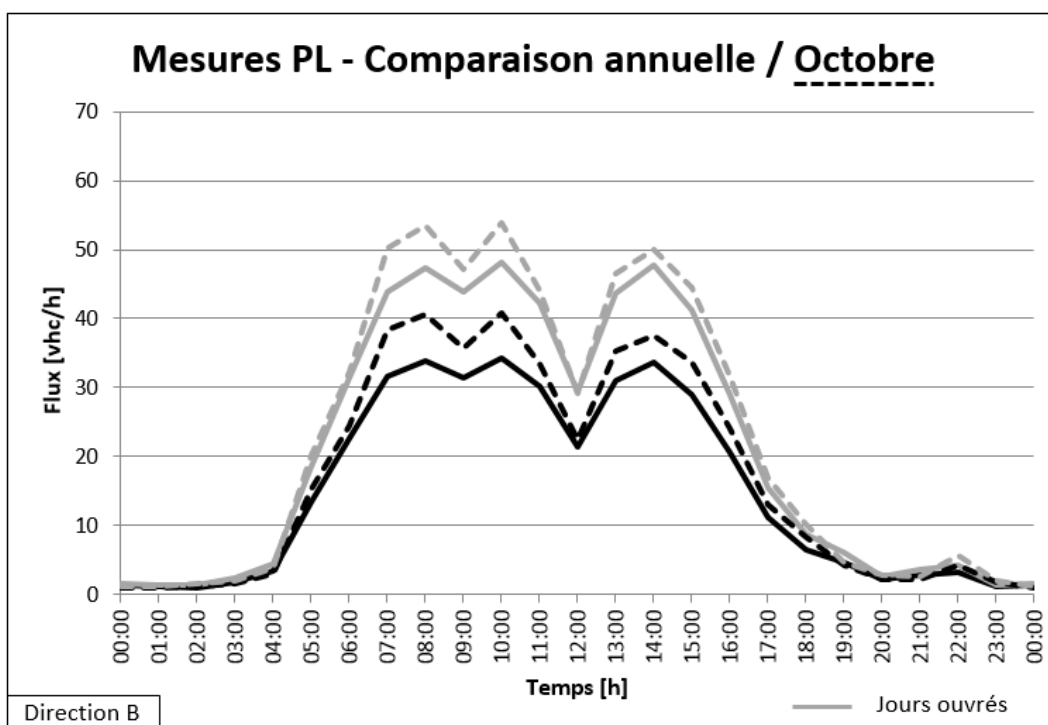


Fig. 114 CSACR CH363, Aarwangen, direction Niederbipp. Tous PL (Swiss 10).

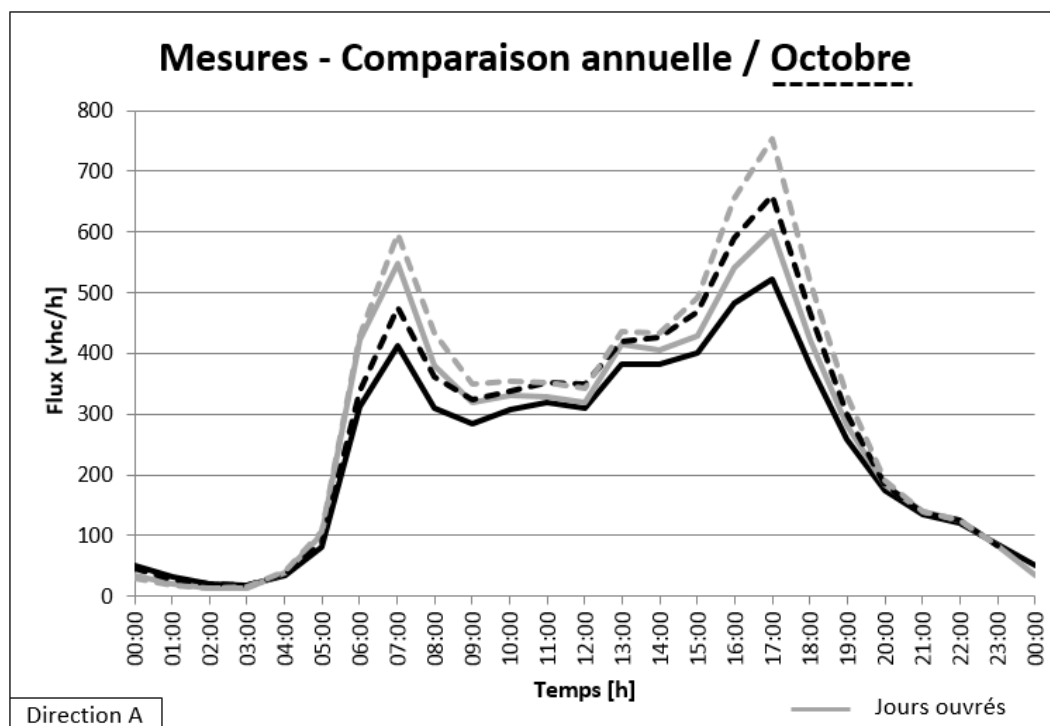


Fig. 115 CSACR CH363, Aarwangen, direction Aarwangen. Tous véhicules.

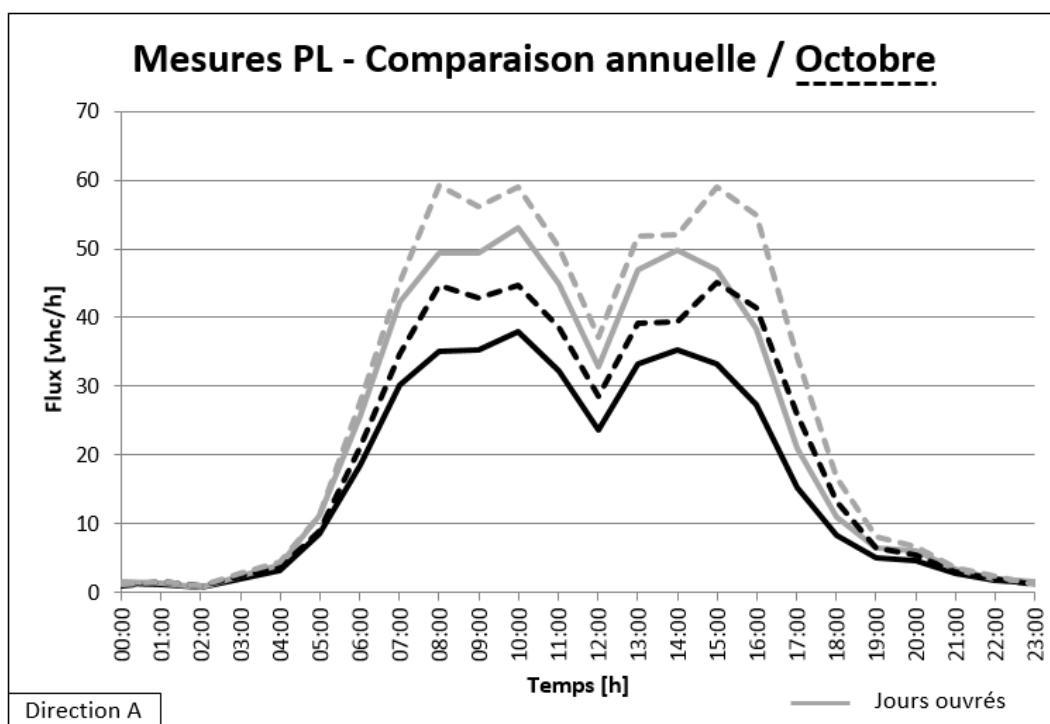


Fig. 116 CSACR CH363, Aarwangen, direction Aarwangen. Tous PL (Swiss 10).

Globalement, on constate que le trafic au mois d'octobre est supérieur au trafic annuel. En direction de Niederbipp, les courbes relatives aux véhicules poids lourds ont un comportement globalement identique (décalé) entre le mois d'octobre et les valeurs annuelles. Dans la direction d'Aarwangen, les courbes diffèrent en certains points de manière significative (notamment à 8 : 00, 15 : 00, 16 : 00).

Cette comparaison permet d'évaluer en fonction des données du mois d'octobre obtenues au WIM les valeurs annuelles. On prendra dans ce cas l'hypothèse sécuritaire d'une diminution de 13% correspondant à la différence entre la courbe annuelle et celle du mois d'octobre pour la direction de Niederbipp et dans le cas où tous les jours sont considérés.

Scénarios

Seules les simulations du mardi type et mercredi type 1998 ont été effectuées. Toutefois les démarches identiques à celles des études de cas de Denges et de Monte Ceneri sont tout à fait applicables au cas de Aarwangen et donc à des réseaux routiers cantonaux ou communaux.

8 Performance des chaussées

Un des buts de ce projet est de déterminer des indices de performance structurale en termes de structures porteuses (ouvrages d'art) et de structures routières (chaussées).

L'ingénieur civil doit garantir, pour une durée de service prévue, que la structure qu'il dimensionne, que ce soit du point de vue des ouvrages d'art ou des infrastructures routières, puisse répondre aux différentes sollicitations, dont les charges de trafic. Celles-ci sont donc un input du dimensionnement des structures.

Ce chapitre fait référence à des chaussées bitumineuses.

8.1 Dimensionnement et renforcement des chaussées

Démarche empirique suisse

Pour une durée de service de 20 ans et à partir du trafic, de la classe de portance du sol et d'une structure type de chaussée, la norme SN 640 324 donne les épaisseurs des couches nécessaires (Fig. 117). Une vérification au gel doit être menée.

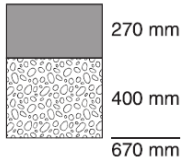
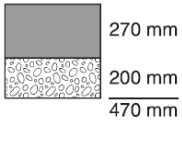
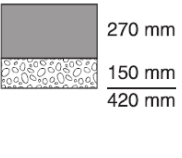
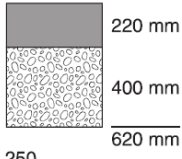
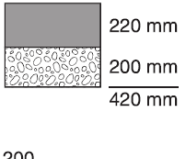
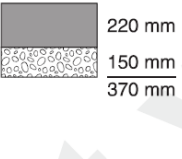
Oberbautyp 1 Type de chaussée 1		Asphaltschicht(en) auf ungebundenem Gemisch Couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée		Frostdimensionierung Dimensionnement au gel		
		Tragfähigkeitsdimensionierung Dimensionnement de la portance		Frost- indices Indices de gel FI_s	Frostdimensionie- rungsfaktor f Facteur de dimensionnement f	
Ti_{20}		S2	S3		G3	G4
$T6_{20}$						
	FI_s^*	300	200			
$T5_{20}$					< 400 400...600 > 600	
	FI_s^*	250	200			
					0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65

Fig. 117 Exemple de tableau de la norme de dimensionnement suisse SN 640 324.

Le dimensionnement à la portance peut également s'effectuer directement à l'aide du trafic pondéral équivalent total W_n selon le tableau 6 de la norme SN 640 324 (Fig. 118). Ces différentes valeurs structurales suivent des courbes logarithmiques (Fig. 119).

Erforderlicher Strukturwert SN_{erf} in Funktion von der gesamten äquivalenten Verkehrslast W_n und Tragfähigkeitsklasse S_i Valeur structurelle nécessaire SN_{erf} en fonction du trafic pondéral équivalent total W_n et de la classe de portance S_i			
Gesamte äquivalente Verkehrslast Trafic pondéral équivalent total W_n	Tragfähigkeitsklassen S_i Classes de portance		
	S2	S3	S4
	Erforderlicher Strukturwert SN_{erf} Valeur structurelle nécessaire		
200 000	63	52	42
750 000	78	64	53
1 000 000	82	67	55
2 000 000	92	76	62
5 000 000	106	88	72
10 000 000	117	98	81
20 000 000	129	109	90
50 000 000	145	124	104
75 000 000	153	131	110
100 000 000	159	136	115

Fig. 118 Dimensionnement à la portance en fonction du trafic pondéral équivalent total (Tab. 6, SN 640 324).

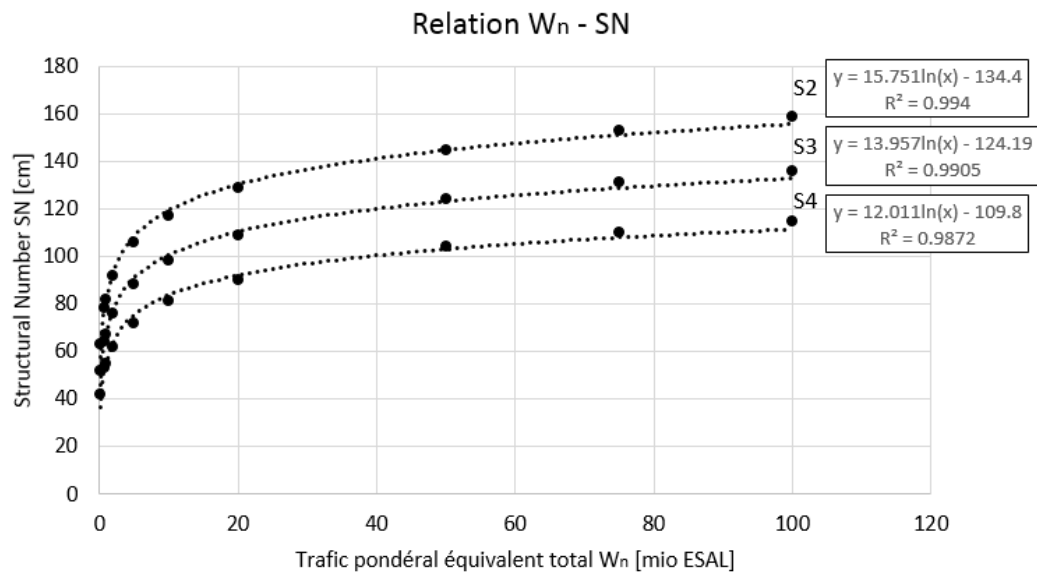


Fig. 119 Valeurs stucturelles nécessaires en fonction du trafic pondéral équivalent total.

Renforcement empirique selon normalisation suisse

Le renforcement des chaussées s'effectue en déterminant le Structural Number nécessaire $SN_{\text{néc}}$ en fonction du trafic (Fig. 118) :

$$SN_{\text{néc}} \leq SN_{\text{renf}} + SN_{\text{exist}}$$

où SN_{renf} est la valeur structurelle du renforcement et SN_{exist} la valeur de la structure existante ou de la structure existante conservée en cas d'enlèvement de matériaux. Cette dernière valeur est calculée sur la base des dégradations de la structure en place.

Une méthode de renforcement basée sur des abaques établies pour des mesures de déflexion relevées à l'aide de la poutre Benkelmann ou du déflectographe Lacroix est proposée dans les normes suisses (SN 640 733b).

Les abaques permettent de déterminer l'épaisseur de renforcement nécessaire en fonction de la déflexion déterminante, établie sur la base de la moyenne des mesures des déflexions, de leur écart-type et d'un coefficient de correction, en fonction de la classe de trafic ou du trafic pondéral équivalent sollicitant l'infrastructure et de la durée de service supplémentaire attendue.

Renforcement par backcalculation (rétrocalcul)

A partir de mesures de bassins de déflexions réalisées à l'aide d'appareils d'auscultation ou de mesures (FWD : Falling weight deflectometer, déflectomètre à masse tombante, HWD : Heavy weight deflectometer, déflectomètre lourd à masse tombante, déflectographe Lacroix, poutre Benkelmann) et de la connaissance de la composition de la chaussée (matériaux, épaisseurs), il est possible d'estimer les modules de rigidité des différentes couches par rétrocalcul.

La durée de vie de la structure est déterminée sous forme de [42]:

- Critère de vérification aux déformations permanentes

$$\varepsilon_{z,ad} = \alpha \cdot (NE)^\beta$$

- Critère de rupture en fatigue (Loi de fatigue)

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^\circ C, 25 \text{ Hz}) \cdot \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})}} \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s$$

où α , β sont des facteurs de calage des modèles, $\varepsilon_{z, ad}$ la déformation admissible en compression à la base du sol support, $\varepsilon_{t,ad}$ la déformation à la base de la couche d'enrobé considérée (allongement dû à la flexion du matériau), ε_6 la déformation à 10^6 cycles, b la pente de la loi de fatigue, E le module de rigidité, θ_{eq} la température équivalente et k_i des coefficients de calage.

Les valeurs NE correspondent au nombre d'applications de charges équivalentes à un essieu isolé à roues jumelées de 130kN pour atteindre les déformations données. Sur la base de l'histogramme des charges sollicitant l'infrastructure pour sa durée de service prévue et des valeurs limites des critères, il est alors possible de définir le profil de chaussée nécessaire.

En admettant que le matériau atteint sa limite de rupture lorsque le module de rigidité chute à 50% de sa valeur initiale, à l'aide de courbes de fatigue de Wöhler-Miner, on peut alors déterminer de façon analogue à la méthode de dimensionnement le nombre d'applications de charges résiduel pouvant encore solliciter l'ouvrage (durée de vie résiduelle).

8.2 Coefficients d'équivalence

Le dimensionnement, le renforcement, l'estimation de la durée de vie résiduelle des chaussées, en Suisse, sont basés, du point de vue du trafic, sur les effets dans la structure dus à une charge d'essieu standard de 8.16 tonnes (essieu simple, équivalent en force de 80kN).

Afin de se rapporter à cette charge standard, un facteur d'équivalence (EALF, equivalent axle load factor) peut être déterminé pour chaque combinaison de charge et de configuration d'essieux. Le trafic pondéral équivalent total tel que décrit au chapitre 2.2 est défini sur la base de ces facteurs (k_i).

Selon les formules mathématiques proposées dans [43], les facteurs d'équivalence

dépendent de la charge d'essieu, du type d'essieu (simple, tandem, tridem), du niveau de service attendu et du Structural Number de la chaussée sollicitée.

Par simplification, les normes suisses en vigueur proposent une table de transformation en facteurs d'équivalence (Fig. 120).

Achsäquivalenzfaktoren k Facteurs d'équivalence d'essieux k						
Achslast Charge d'essieu	Flexibler und halbstarrer Oberbau Chaussée souple et semi-rigide			Starrer und kombinierter Oberbau Chaussée rigide et combinée		
	Einzelachse Essieu simple	Tandemachse Essieu tandem	Tridemachse Essieu tridem	Einzelachse Essieu simple	Tandemachse Essieu tandem	Tridemachse Essieu tridem
[t]	k					
0,5	0,00006	0,00002	0,00001	0,00004	0,00002	0,00002
1,5	0,0017	0,0002	0,0001	0,0011	0,0003	0,0002
2,5	0,01	0,001	0,0004	0,007	0,001	0,001
3,5	0,04	0,004	0,001	0,028	0,005	0,002
4,5	0,11	0,011	0,003	0,08	0,012	0,005
5,5	0,24	0,024	0,006	0,18	0,026	0,010
6,5	0,43	0,05	0,011	0,37	0,052	0,02
7,5	0,73	0,08	0,020	0,69	0,09	0,03
8,5	1,16	0,13	0,032	1,19	0,16	0,05
9,5	1,79	0,19	0,050	1,92	0,25	0,08
10,5	2,67	0,28	0,073	2,95	0,38	0,12
11,5	3,88	0,38	0,103	4,35	0,56	0,17

Fig. 120 Facteurs d'équivalence d'essieux (Tab. 2, SN 640 320).

Les études [43] et [23] insistent sur le fait de considérer le plus de détail possible dans la transformation des groupes de charges (réciproquement des classes de véhicules) à l'aide de ces facteurs d'équivalence.

8.3 Orniérage

L'orniérage des chaussées est un phénomène qui est généralement observé sur les routes à fort trafic et notamment à trafic lourd ou en des lieux spécifiques des réseaux routiers (arrêts de bus, stop, feux, giratoires).



Fig. 121 Orniérage marqué au droit d'un arrêt de bus.

Cette déformation du profil transversal de la chaussée au droit des traces de roues diminue la performance de la chaussée. D'une part la durée de service de la route est réduite car la déformation permanente peut atteindre la couche de fondation de la chaussée nécessitant alors une réfection en profondeur ou diminuer l'épaisseur de la couche de roulement de sorte à causer d'autres dégradations (pelades, nids de poules, perte de matériaux, ...). De plus, les renflements, bourrelets, qui apparaissent de part et d'autre empêchent l'écoulement transversal de l'eau (risque d'aquaplanage), perturbent le déplacement latéral des véhicules et diminuent ainsi la sécurité et le confort des usagers.

La relation entre la charge de trafic et l'orniérage a été décrite au chapitre 2.2.

8.4 Chaussées sur ouvrage d'art

Ce projet de recherche est notamment axé sur l'étude des ponts routiers (Rapport partie 2). Les différentes performances des chaussées décrites dans ce chapitre et dans le chapitre 2.2 font référence à des structures de chaussées sur sol-support.

Un revêtement en enrobé employé sur un pont routier n'a généralement pas de fonction de résistance mécanique pour l'ensemble de l'ouvrage (ouvrage d'art + chaussée) mais permet de protéger l'ouvrage (durabilité, abrasion mécanique, attaque aux sels de déverglaçage, corrosion, étanchéité, ...) et de garantir la sécurité et le confort des usagers (qualité antidérapante, qualité phonoabsorbante, marquage). La facilité de réfection des enrobés bitumineux et leurs coûts sont également deux facteurs qui favorisent l'emploi d'un revêtement bitumineux plutôt que d'avoir pour surface de roulement le matériau brut de l'ouvrage (béton).

Dans le cadre de structures de chaussées construites sur des ouvrages d'art, leur comportement est spécifique :

- Les déformations des ouvrages d'art et la configuration des joints induisent des contraintes dans les matériaux bitumineux (flexion de l'ouvrage, allongement thermique, forces de freinage, sollicitations importantes aux joints, ...).
- En fonction du système statique de l'ouvrage, les efforts dans les couches bitumineuses, suivant les efforts des éléments constituant l'ouvrage peuvent être alternés [44].
- Les températures intrinsèques des matériaux bitumineux diffèrent par rapport à celles d'une structure sur sol-support dans les mêmes conditions climatiques (inertie thermique de l'ouvrage d'art et pas de déperdition par le sol).
- La couche de support des matériaux bitumineux est rigide.
- L'adhérence entre le revêtement bitumineux, la couche de liaison et le matériau principal (béton, métal, ...) doit être garantie.
- Transmission des charges du trafic à l'ouvrage d'art.

Des normes suisses en vigueur traitent de ce sujet pour les ponts avec tablier en béton (SN 640 450a) et pour des ponts avec tablier en bois (SN 640 451). Des solutions standards de profils de chaussée sont proposées sans considérations relatives au trafic. De ce fait et étant donné que les dégradations des couches bitumineuses sur les ponts dépendent fortement de la configuration de l'ouvrage d'art, des comportements généralisés sont difficilement applicables, raison pour laquelle les indices de performance des chaussées qui sont proposés ci-après ne sont pas applicables à ce cas particulier.

8.5 Indice de performance relatif aux chaussées

Les normes de dimensionnement et de renforcement des chaussées (REDIRE, VSS 2008/505) de même que les implications des méthodes de mesures (Corrélation entre déflexions FWD et Benkelmann, VSS 2011/503) faisant l'objet de projets de recherche actuels, on proposera dans ce projet des postulats basés sur la normalisation en vigueur.

Afin de proposer une logique qui reste dans celle de la normalisation suisse en vigueur, on n'entrera pas dans les calculs de dimensionnement tels que ceux discutés au chapitre 8.1 (renforcement par backcalculation, méthode française de dimensionnement).

Postulat 1 : Indice de performance relatif au profil type de chaussée

Sur la base de la Fig. 119 et des coefficients de portance des couches de la chaussée (couches neuves, Tab. 7 SN 640 324), les valeurs du trafic pondéral équivalent total limite W_s sont déterminées de la manière suivante :

- Détermination de la valeur structurelle (à neuf) :

$$SN = \sum_i a_i \cdot D_i$$

On détermine la valeur structurelle en fonction du profil type de chaussée réalisé (plans conformes) ou en fonction de carottages permettant de déterminer le profil type de chaussée. a_i est le coefficient de portance de la couche de chaussée à neuf considérée et D_i l'épaisseur de la couche de chaussée.

- Les valeurs limites W_s dépendent de la portance du sol. Celle-ci est déterminée en fonction de la portance connue avant réalisation du chantier ou d'essais de plaques menés à proximité de la zone d'étude dans des terrains de typologie similaire. Un essai réalisé dans une fenêtre excavée dans la chaussée existante fausserait le résultat obtenu en raison de la consolidation du sol support au fil du temps (passages des véhicules). Un éventuel renforcement du sol support au stade de la construction doit être pris en compte.

- Portance S2

$$W_s = e^{\left(\frac{SN+134.40}{15.751}\right)}$$

- Portance S3

$$W_s = e^{\left(\frac{SN+124.19}{13.957}\right)}$$

- Portance S4

$$W_s = e^{\left(\frac{SN+109.8}{12.011}\right)}$$

Il faut toutefois tenir compte des remarques suivantes :

- Ces formules sont uniquement valables pour des valeurs de W respectivement W_s de 200'000 [ESAL] à 100 millions [ESAL].
- La résistance mécanique supplémentaire induite par le dimensionnement au gel de la structure, généralement composée d'une couche de grave supplémentaire, peut être prise en compte dans la détermination de la valeur structurelle SN.

- Ce postulat ne tient pas compte des dégradations effectives des chaussées mais permet de prédire le trafic pondéral équivalent total que la chaussée peut *globalement* supporter. Il faut garder à l'esprit que les différentes couches de la chaussée ont des durées de service variables.

Postulat 2 : Indice de performance spécifique à l'orniérage

Sur la base de [21] et de la norme suisse de gestion de l'entretien des chaussées (SN 640 925b), on propose la démarche suivante :

- En termes de gestion de l'entretien, à partir de données de relevés d'état de caractéristiques de surface (indice d'état I_1), il est proposé sur la base d'expériences [45] de fixer une incrémentation annuelle de l'indice I_1 proche de 0.10 - 0.15 (loi d'évolution des dégradations considérée linéaire, voir remarques Fig. 3). On obtient ainsi une note d'indice d'état d'environ 3.0 pour la durée de service considérée (20 ans). On propose, par analogie avec l'indice d'état I_1 pour l'indice d'état I_3 (planéité transversale), comme limite correspondant à la durée de service des chaussées, un indice d'état d'une valeur de 3.0. Cette valeur correspond également à la valeur limite de changement de catégorie d'état (passage de suffisant à critique).
- En fonction du type de route, la note d'indice d'état I_3 de 3.0 correspond aux valeurs de profondeur d'ornières suivantes (Tab. 44) :

Tab. 44 Profondeurs d'ornières T pour $I_3 = 3.0$

Type de route	Profondeur d'ornières T [mm]
Route à grand débit	9
Route principale	12
Route de liaison	16
Route collectrice	16
Route de desserte	16

- Selon [21], la profondeur d'ornière peut être prédite par la formule suivante :

$$T = C_\theta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{C_w \cdot W}{1000 \cdot C_v} \right)^\beta + \delta$$

avec :

- α et β , coefficients expérimentaux déterminés par essai à l'orniéreur LPC.
- C_θ , C_w et C_v coefficients de calage déterminés selon [21].
- δ un coefficient de calage constant, égal à 4.9.

Par inversion, la formule afin de déterminer le trafic pondéral équivalent total W devient :

$$W = \left(\frac{T - \delta}{C_\theta \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \cdot \frac{1000 \cdot C_v}{C_w}$$

Sur la base du Tab. 44 et de la formule ci-dessus, on propose la formule de détermination du trafic pondéral équivalent total limite W_s suivante :

$$W_s = \left(\frac{\gamma}{C_\theta \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \cdot \frac{1000 \cdot C_v}{C_w}$$

avec pour valeurs du coefficient de calage γ :

Tab. 45 Valeurs de γ

Type de route	γ
Route à grand débit	4.1
Route principale	7.1
Route de liaison	11.1
Route collectrice	11.1
Route de desserte	11.1

Indice de performance

Dans les deux cas présentés (structure et orniérage), l'indice de performance des chaussées, v sera déterminé de la manière suivante :

$$v = \frac{W}{W_s}$$

où :

- W est le trafic équivalent total [ESAL] ayant sollicité la chaussée dans le cadre de l'estimation de l'indice de performance d'une chaussée existante ou
- W est le trafic équivalent total [ESAL] ayant sollicité la chaussée, additionné au trafic équivalent total prévisionnel futur dans le cadre de l'estimation de la durée de service résiduelle globale de la chaussée.
- W_s est le trafic équivalent total limite [ESAL] déterminé à partir d'un des deux postulats.

Une valeur de l'indice de performance des chaussées v de 0.0 signifie que la chaussée n'a pas encore été sollicitée (même par un trafic de chantier), une valeur supérieure ou égale à 1.0 signifie que la chaussée a potentiellement atteint sa durée de service.

9 Etudes complémentaires

9.1 Taux de poids lourds

Basé sur les résultats obtenus au chapitre 3.5.3, le taux de poids lourds détecté au WIM est supérieur au taux de poids lourds issus de la classification « Swiss 10 » du CSACR.

En estimant le nombre total de détections WIM dans le cas où la voie de gauche (voie de dépassement) serait également équipée, sur la base de la répartition entre voies des détections du CSACR et en rapportant cette valeur au nombre total de détections au comptage CSACR, on peut comparer les taux de poids lourds respectifs (Tab. 46).

Tab. 46 Comparatifs comptages juin 2008 à Denges

Type de comptage	Direction Lausanne	Direction Morges
Pourcentage de poids lourds selon données WIM estimées	4.9%	4.5%
Pourcentage de poids lourds selon classification « Swiss 10 »	3.9%	3.8%

Les pourcentages de poids lourds publiés par l'Office fédéral des routes sont déterminés sur la base de la classification « Swiss 10 », il y a donc une potentielle sous-estimation du nombre de poids lourds (WIM). Sur la base unique du comparatif effectué au mois de juin 2008 à la station de Denges, cette sous-estimation se situe entre 0.7% et 1%.

Le rapport [32] évoque dans une remarque préliminaire que le nombre de courses transalpines de poids lourds en trafic marchandises est exagéré. Ce qui irait à priori dans le sens contraire des résultats obtenus à l'aide de stations WIM.

Ces résultats devraient être validés par l'analyse de plusieurs mois sur plusieurs stations de comptages spécifiques telle que celle de Denges où les deux types de comptages peuvent être synchronisés avec l'appui d'analyses vidéos.

Les résultats d'une éventuelle recherche ultérieure auraient des effets importants sur la fiabilité des stations de comptages WIM et CSACR, sur la part de poids lourds et donc sur le dimensionnement des chaussées et finalement sur les valeurs réelles des poids lourds passant les alpes et donc une influence sur les stratégies de la Confédération en matière d'application de l'initiative des Alpes.

9.2 Répartition entre voies

La norme SN 640 320 propose une répartition du trafic pondéral entre les différentes voies de circulation (Fig. 122).

Aufteilung der totalen Verkehrslast des Strassenquerschnittes je nach Anzahl Fahrstreifen Répartition du trafic pondéral total de la section transversale de la route en fonction du nombre de voies de circulation						
Strasse mit	%					
1 Fahrstreifen	100					
2 Fahrstreifen	50	50				
3 Fahrstreifen	50	0	50			
2x2 Fahrstreifen	45	5	5	45		
2x3 Fahrstreifen	45	5	0	0	5	45
	Route à					
	1 voie de circulation					
	2 voies de circulation					
	3 voies de circulation					
	2x2 voies de circulation					
	2x3 voies de circulation					

Fig. 122 Répartition du trafic pondéral entre les voies de circulation.

Les résultats obtenus aux chapitres 5 et 7 permettent de déterminer une répartition du trafic poids lourds, représentant globalement le trafic pondéral équivalent, exception faite de la spécificité liée aux voitures de livraison (Chap. 3.5.3).

Sur la base des données du CSACR (Classes 1, 8, 9, 10) à Denges en juin 2008, les répartitions entre voies sont telles qu'indiquées dans les Fig. 123 et Fig. 124.

		Dir. Morges	
		Voie 3	Voie 4
Voie 1	Voie 2	4,4%	45,0%
46,5%	4,0%		
Dir. Lausanne			

Fig. 123 Répartition du trafic poids lourds à Denges, juin 2008.

		Dir. Morges	
		Voie 3	Voie 4
Voie 1	Voie 2	4,5%	45,5%
46,0%	4,0%		
Dir. Lausanne			

Fig. 124 Répartition du trafic poids lourds relative à une répartition à 50% (Denges, juin 2008).

Sur la base d'une répartition hypothétique à 50% pour chaque direction, on constate une légère sous-estimation de la répartition du trafic poids lourds sur la voie lente comparativement au modèle proposé par la norme (0.5% à 1%).

Ce résultat pourra faire l'objet d'étude complémentaire sur plusieurs mois, voire années sur différentes stations de comptages CSACR afin de déterminer si cette tendance est conservée. Toutefois, il faudrait prendre en compte le fait que certains poids lourds ne sont pas détectés par la classification « Swiss 10 » tel que souligné au chapitre 3.5.3, analyser leur répartition individuelle et l'influence de celle-ci sur la répartition globale des poids lourds.

De plus, il s'agit là d'une répartition des poids lourds et non des charges par essieux qui déterminent le trafic pondéral équivalent total. Afin d'obtenir les répartitions des charges par essieux, il serait nécessaire d'avoir à disposition des installations de comptages WIM sur toutes les voies de circulation ce qui n'est généralement pas le cas.

Les remarques et hypothèses émises sur la possibilité que les véhicules poids lourds les plus légers se trouvent sur la voie rapide (Chap. 6.2.4) sont également à prendre en considération.

9.3 Limite de longueur des véhicules poids lourds

La norme SN 640 320 de 2011 propose une estimation du nombre de poids lourds selon le recensement des véhicules d'une longueur totale de plus de 6 mètres. La station WIM de Oberbuchsiten (Autoroute A1 ; 425) enregistre pour la voie normale et la voie de dépassement tous les véhicules (y compris ceux de moins de 3.5 tonnes).

Une analyse des longueurs en fonction des poids des véhicules est effectuée pour cette station durant le mois de juin 2012.

Tab. 47 Longueurs relatives aux poids des véhicules. Oberbuchsitzen, juin 2012

Type de véhicule	Longueur	Poids	Occurrences
Poids lourds	≥ 6 mètres	≥ 3.5 tonnes	140'057
Poids lourds	< 6 mètres	≥ 3.5 tonnes	15'096
Véhicules légers	≥ 6 mètres	< 3.5 tonnes	61'221
Véhicules légers	< 6 mètres	< 3.5 tonnes	1'080'573

En tenant compte uniquement des véhicules de plus de 6 mètres, environ 10% (15'096 occurrences sur 155'153) de véhicules poids lourds ne sont pas recensés. D'autre part, 30% de véhicules (61'221 occurrences sur 201'278) sont comptabilisés en trop.

Sans analyses vidéos couplées aux comptages WIM et donc sans informations complémentaires, on peut envisager que parmi les véhicules présentant une longueur de plus de 6 mètres et un poids total inférieur à 3.5 tonnes, on retrouve probablement des véhicules utilitaires de 20 à 30m³ chargés ou non, des véhicules légers avec remorque et des campings-car.

La marge d'erreur de ce type de recensement du nombre de poids lourds est donc importante ; 30% de surestimation pour cette étude (201'278 occurrences sur les 155'153 occurrences « réelles »).

10 Conclusions partie 1

Les conclusions de ce rapport, partie 1 : trafic, sont discutées sous forme de trois chapitres qui décrivent les implications pour la pratique apportées par ce projet de recherche, les effets potentiels sur la normalisation et la législation et des propositions de sujets de recherches ultérieures.

10.1 Implications pour la pratique

Les recherches menées ont permis de développer une méthodologie de traitement des données de trafic CSACR et WIM, une ligne directrice pour l'élaboration de simulations de trafic ainsi que d'établir un modèle de circulation des poids lourds. Ces méthodes et outils, qui permettent d'obtenir des simulations d'une excellente qualité, pourront servir de bases aux ingénieurs en transports et en structures qui traitent du trafic routier.

En termes de performance des chaussées, deux postulats permettant de déterminer l'indice de performance viennent compléter les normes de gestion de l'entretien.

10.2 Effets potentiels sur la normalisation et la législation

Les développements de ce projet de recherche ont permis d'étudier certains articles des normes, de servir de bases à d'autres projets de recherche ayant une influence sur la normalisation actuellement en vigueur ou ouvrent des portes à des études complémentaires qui pourraient influencer cette normalisation ou la législation suisse.

Données de trafic, recensement

Les méthodes de traitement statistiques des données de trafic permettraient de redéfinir les courbes statistiques de variation et trafic journalier moyen de la norme SN 640 005b (Chap. 10.3).

Poids lourds, trafic pondéral

Selon l'étude spécifique du chapitre 9.3, une modification de l'article 9 de la norme SN 640 320 « Dimensionnement de la structure des chaussées ; Trafic pondéral » est proposée : Abrogation de la phrase : « Le nombre de poids lourds peut être estimé par recensement du nombre de véhicules de plus de 6 m de long. ».

Les méthodes de traitements statistiques WIM développées ont été utilisées dans le cadre du projet de recherche VSS 2015/411 « Actualisation des facteurs d'équivalence de la norme SN640320 ». Les résultats de ce projet de recherche permettront d'actualiser les facteurs d'équivalence poids lourds de la norme en vigueur.

Des études complémentaires sur la répartition du trafic pondéral permettraient de valider et éventuellement de procéder à une mise à jour des hypothèses de la norme SN 640 320, article 17 (Chap. 9.2, chap. 10.3).

Dimensionnement et renforcement des chaussées

Les méthodes de traitement des données routières ont été utilisées dans le cadre de [23]. Cet article fait partie des bases du projet de recherche REDIRE (VSS 2008/505) actuellement en cours qui concerne la révision des normes de dimensionnement et renforcement des chaussées.

L'approche analytique du dimensionnement et du renforcement des chaussées qui est souhaitée [22] devra vraisemblablement faire appel à une meilleure précision de la détermination du trafic pondéral. Les méthodes de traitement des données et de simulations permettront d'y répondre.

Dégradations des chaussées, gestion de l'entretien routier

Deux postulats d'évaluation de l'indice de performance des chaussées ont été établis (Chap. 8.5). A l'instar de la formule de détermination de profondeur d'ornièr obtenue dans [21], une intégration de ces deux postulats aux normes de gestion de l'entretien des chaussées ne semble pas d'actualité.

Forces de freinage sur les ouvrages d'art

Les résultats de l'étude de cas de Monte Ceneri (Chap. 7.3) ont été utilisés dans le cadre du mandat de recherche AGB 2011/003 « Forces de freinage actualisées pour la vérification des ponts routiers ».

Vitesse des poids lourds

Selon l'art. 5, al. 1 de l'Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR, état au 7 mai 2017), respectivement art. 32, al. 2 de la Loi fédérale sur la circulation routière (LCR, état au 1^{er} octobre 2016) la vitesse maximale est limitée à 80 km/h pour les voitures automobiles lourdes à l'exception des voitures de tourisme lourdes, pour les trains routiers et pour les véhicules articulés. Les autocars et voitures automobiles lourdes sont eux limités à 100 km/h (OCR art. 5, al. 2).

Selon l'art. 35, al. 1 de l'OCR, respectivement 43, al. 3 de la LCR, seuls les véhicules automobiles avec lesquels il est possible et permis de rouler à 80 km/h emprunteront les autoroutes et semi-autoroutes.

Il y a donc, de fait, une ambiguïté entre ces deux articles sur les vitesses « minimale » et maximale qui sont identiques, soit 80 km/h, pour les voitures automobiles lourdes.

Les résultats obtenus au chapitre 5.4.1, soit une médiane des vitesses des poids lourds à 88 km/h et une diminution potentielle du ratio d'implication dans un accident pourraient servir de pistes à une modification de la législation en vigueur (Chap. 10.3).

10.3 Proposition de recherches ultérieures

Données de trafic, recensement

Les courbes statistiques de variation et trafic journalier moyen de la norme SN 640 005b sont issues d'une recherche qui date de 2009. Bien que le présent projet n'ait pas eu pour but d'étudier spécifiquement ces courbes, les résultats issus de cette recherche ont démontré l'évolution constante du trafic routier. Une vérification de la validité de ces courbes et leur éventuelle révision pourraient faire l'objet d'une recherche ultérieure.

Cinématique du mouvement du véhicule liée à sa masse

Comme analysé au chapitre 6.2.4, les véhicules lourds les moins larges semblent majoritairement emprunter la voie de dépassement. On a émis l'hypothèse, de par leur volume ainsi réduit et leur vitesse, respectivement variation de vitesse, généralement nécessaire aux manœuvres de dépassement et dépendante de la masse, que ceux-ci sont également les moins chargés.

Toutefois, cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée, les stations WIM n'étant généralement équipées que sur la voie lente.

Une étude complémentaire permettrait de valider cette hypothèse et aurait, le cas échéant, une influence directe sur la répartition réelle du trafic pondéral dans les différentes voies (Chap. 9.2, chap. 10.2) et donc sur le dimensionnement des chaussées.

Intégrations de lois non-normales

Comme discuté aux chapitres 1.3, 3 et 5.2, le logiciel de simulation de trafic sélectionné, AIMSUN, ne permet l'intégration que de lois de distribution normale. De ce fait, afin de décrire certaines caractéristiques des véhicules, des simulations de Monte Carlo ont dû être menées.

Le développement d'outils d'intégration de lois polynomiales ou d'histogrammes dans le logiciel de simulation de trafic permettrait d'obtenir une simulation complète de trafic.

Vitesse légale des poids lourds

Les études statistiques réalisées semblent démontrer que la vitesse limite légale des poids lourds (80 km/h) n'est généralement pas respectée (Chap. 5.3, 5.4). De plus, l'ambiguïté législative entre la vitesse « minimale » et maximale des voitures automobiles lourdes a été relevée (Chap. 5.4.1, 10.2).

Une étude à grande échelle de la vitesse des poids lourds mesurée sur l'ensemble du réseau autoroutier suisse permettrait d'évaluer, de manière plus précise, l'hypothèse que la médiane relevée se situe à 88 km/h.

Les discussions relatives aux limitations de vitesse ont souvent été liées à l'accidentologie. Une première piste abordée (Chap. 5.4.1) semble montrer la diminution du taux d'accidents. Toutefois, une augmentation de vitesse des poids lourds impliquerait une augmentation de la gravité potentielle des accidents. C'est pourquoi une éventuelle influence sur la législation en vigueur ne devrait être abordée sans discuter de la sécurité routière.

Comportement des matériaux bitumineux sur les ponts

L'état de l'art en matière de matériaux bitumineux disposés sur des ouvrages d'art est restreint. Une étude de l'évolution des dégradations, du comportement de ces matériaux, dans l'optique également d'une approche de dimensionnement analytique serait judicieuse.

Vérifications WIM – CSACR – Caméras

Durant ce projet, plusieurs sources de données routières ont été utilisées. Il a vite été remarqué que les concordances entre ces différentes sources donnent des écarts significatifs et que des corrections sont nécessaires.

Une étude complète de concordance des silhouettes poids lourds, de leur fiabilité, et de cohérence des différents systèmes de mesure est essentielle. En effet, le dimensionnement des chaussées, le dimensionnement des ouvrages d'arts, l'entretien des infrastructures routières mais également l'application de l'initiative des Alpes sont dépendants de ces systèmes de mesure.

11 Conclusions générales

Pour définir un modèle de trafic routier, cette recherche met en évidence la nécessité de mener des études locales plutôt que de se baser sur un modèle appliqué à l'échelle nationale en termes de composition et de charges de trafic. Les résultats établis et les démarches proposées dans ce document permettent d'atteindre, en fonction du niveau de détail souhaité, et adapté à chaque cas étudié, un modèle de trafic routier.

En ce qui concerne les charges de trafic poids lourds, l'étude s'est basée sur des investigations statistiques des comptages routiers (CSACR) et des stations de pesage en marche (WIM), sur des études vidéo et d'accidentologie, à différentes échelles de temps (jour à années). Elle a permis de déterminer un modèle de comportement des poids lourds. Grâce à ce modèle, qui doit être adapté à chaque situation spécifique, il est alors possible d'évaluer de manière précise les effets du trafic total (véhicules légers et poids lourds) passé, actuel et futur en effectuant des simulations de trafic sur la durée souhaitée (en général une semaine).

Afin de démontrer la démarche, elle est effectuée pour trois cas d'étude :

- Denges, autoroute A1, proche du pont sur la Venoge sur l'axe Lausanne - Genève (le réseau complet avec nœuds a été développé : Mex – Maladière – Ecublens – Morges – Genève Aéroport)
- Monte Ceneri, Autoroute A2, sur l'axe Lugano – Bellinzona
- Aarwangen, pont sur l'Aar, route cantonale n°244 Langenthal – Niederbipp-Oensingen

Les comparaisons entre simulations et trafic réels démontrent l'excellente qualité des simulations en termes de débits, de vitesses moyennes et de variations sur 10 réplifications. En outre, elles confirment une médiane des vitesses des poids lourds à 88 km/h, plus élevée que la limitation et pouvant cependant expliquer une diminution potentielle du ratio d'implication des poids lourds dans un accident.

Ce projet a permis la création de passerelles entre les différents outils et ainsi l'utilisation des résultats des simulations pour l'évaluation des ouvrages d'art et des dégradations des chaussées soumis au trafic routier via des indices de performance v . Dans le cas de la dégradation, deux postulats permettant de déterminer l'indice de performance sont fournis. Dans le cas de la fatigue, ceci s'effectue à l'aide de passerelles développées entre AIMSUN (logiciel de simulation de trafic) et les routines Matlab de détermination des efforts dans les sections/détails déterminants.

Pour estimer les courbes de résistance à la fatigue nécessaire au calcul de l'indice de performance à la fatigue, l'approche combinée « maximum likelihood » (ML) et simulations de Monte-Carlo (MCS) proposée constitue un outil puissant pour la redéfinition de courbes S-N normalisées (caractéristiques). Avec l'estimation des fractiles p des durées de vie par MCS, une évaluation plus réaliste des positions du coude et de la limite de fatigue (CAFL) est possible. Ceci permet de démontrer que, pour les détails de fatigue étudiés, gousset soudé sur le chant d'un plat et plat de recouvrement soudé sur une poutre, la position fixe à 5 millions de cycles du coude, qui fixe le niveau de la CAFL, conduit à des vérifications en fatigue par rapport à cette même CAFL non-conservatrices. La même approche développée plus avant est également un outil puissant pour la redéfinition de la partie à amplitude variable (seconde pente, m_2) des courbes S-N normalisées ainsi qu'une évaluation plus réaliste de la valeur critique du cumul de dommage, D_c . Il est important d'insister sur le fait que l'efficacité de l'approche proposée, et de la confiance dans la vérification en fatigue, est conditionnée par les résultats à disposition qui contiennent suffisamment d'information (sous CA et VA) dans la région à grand nombre de cycles ($N > 5 \cdot 10^6$ cycles), ce qui fait souvent défaut à ce jour.

Une nouvelle méthodologie développée dans cette étude avec les outils ML-MCS permet en outre d'effectuer des estimations de la fiabilité en fatigue des ponts existants en se servant de trafic simulés. Dans cette méthodologie, la probabilité de rupture en fatigue est définie en prenant en considérant la probabilité conjointe de l'événement de dépassement de la CAFL et de l'événement d'accumulation de dommage critique. Pour terminer, l'approche ML-MCS a aussi été intégrée dans une nouvelle méthodologie pour le rééquilibrage des facteurs partiels de sécurité à la fatigue des structures (nouvelles ou existantes). Appliquée à deux détails de fatigue des normes, elle a permis à nouveau de démontrer que les vérifications en fatigue par rapport à la limite de fatigue (CAFL) sont non-conservatrices (avec les valeurs actuelles γ_{Mf} de l'Eurocode). Même si appliqués à des assemblages soudés, les outils développés ont une applicabilité générale. Pour comparaison, l'estimation de la fiabilité en fatigue a été appliquée au cas d'étude du pont existant de la Venoge. Bien que le pont possède un indice de fiabilité élevé, elle démontre l'inexactitude de la vérification avec l'Eurocode pour estimer l'évolution de l'indice de fiabilité durant les 100 ans de durée de vie du pont.

L'approche proposée pour estimer les courbes de fatigue sous VA (et a fortiori les courbes sous CA) peut être utilisée pour améliorer les normes à la fois pour les nouvelles structures comme pour les structures existantes. Le fait est que le besoin d'avoir des méthodes plus précises est important pour les structures existantes, où l'évaluation fournit des valeurs de durées de vie restantes. Par conséquent, la redéfinition de courbes de fatigue dans les normes d'évaluation de ponts existants doit être discutée ; les courbes actuelles de l'Eurocode pour les nouvelles structures peuvent être conservées pour le moment.

Des discussions plus complètes des conclusions exposées ci-dessus se trouvent dans le chapitre précédant celui-ci de chacun des rapports partie 1 (trafic) ou partie 2 (fatigue), suivant le sujet.

Glossaire

Terme	Signification
AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks (AIMSUN)
AGB	Groupe de travail recherché en matière de ponts (AGB)
ASTAG	Association suisse des transports routiers (ASTAG)
BAU	Bande d'arrêt d'urgence
bpa	Bureau de prévention des accidents (bpa)
CA	Amplitude constante (CA)
CAFL	Limite de fatigue (CAFL)
CSACR	Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)
CSCR	Comptage suisse de la circulation routière (CSCR)
EALF	Equivalent axle load factor (EALF)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
ESAL	Essieux équivalents (ESAL)
FWD	Défectomètre à masse tombante (FWD)
HEAD	Identifiant d'enregistrement (HEAD)
HWD	Défectomètre lourd à masse tombante (HWD)
ICOM	Laboratoire de la construction métallique, EPFL (ICOM)
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)
KS	Kolmogorov-Smirnov (KS)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation, EPFL (LAVOC)
LCR	Loi fédérale sur la circulation routière (LCR)
LPC	Laboratoire des Ponts et Chaussées, actuellement IFSTTAR (LPC)
MCS	Simulations de Monte Carlo (MCS)
ML	Maximum Likelihood (ML)
MySQL	Système de gestion de bases de données relationnelles (MySQL)
NFLA	Nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes (NFLA)
OAQ	Ordonnance sur les amendes d'ordre (OAQ)
OCR	Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR)
O-D	Origine – destination (OD)
OETV	Ordonnance concernant les exigences techniques requises pour les voitures automobiles de transport et leurs remorques (OETV)
OFROU ASTRA	Office fédéral des routes (OFROU) Bundesamt für Strassen (ASTRA)
OSM	OpenStreetMap (OSM)
PHP	Hypertext Preprocessor (PHP)
PL	Poids lourds (PL)
RPLP	Redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP)
RTPL	Redevance sur le trafic des poids lourds (RTPL)
SIA	Société suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA)

SIG	Système d'information géographique (SIG)
SN	Norme suisse (SN)
SN	Structural Number (SN)
SQL	Langage de requête structurée (SQL)
SVA	Pourcentage poids lourds (SVA)
TOPO	Geodetic Engineering Laboratory, EPFL (TOPO)
TSS	Transport Simulation Systems (TSS)
VA	Amplitude variable (VA)
vhc	Véhicules (vhc)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
VT	Voiture automobile de tourisme (VT)
WIM	Pesage en marche (WIM)

Bibliographie

- [1] Th. Meystre, M. A. Hirt. (mars 2006), « **Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualisé** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche AGB 2002/005, Rapport VSS No. 594*.
- [2] N. Maddah, A. Nussbaumer (novembre 2013), « **Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche AGB 2007/004, Rapport VSS No. 655*.
- [3] DIC SA Ingénieurs, Th. Meystre, D. Stucki, J.-P. Lebet (octobre 2014), « **Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche AGB 2009/005, Rapport VSS No. 664*.
- [4] J. Perret (2003), « **Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic** », thèse de doctorat No. 2786, ENAC – EPFL, Lausanne.
- [5] M. J. Lighthill, F.R.S, G.B. Whitham (novembre 1954), « **On kinematic waves ; II. A theory of traffic flow on long crowded roads** », Département de mathématiques, Université de Manchester.
- [6] P. I. Richards (juillet 1955), « **Shock waves on the highway** », *Operations Research*, volume 4, No 1, pp. 42-51.
- [7] B.S. Kerner (2004), « **The Physics of Traffic** », *Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*. Springer.
- [8] B.S. Kerner (2009), « **Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control** », *The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Springer.
- [9] M. Treiber, A. Kesting (2013), « **Traffic Flow Dynamics** », *Data, Models and Simulation*. Springer.
- [10] L. Montero, E. Codina, J. Barcelo, P. Barcelo (2001), « **Combining Macroscopic and Microscopic Approaches for Transportation Planning and Design of Road Networks** », *Transportation Research C 9*, pp. 213-230.
- [11] S.P. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy (juin 2001), « **State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling** », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, pp. 283-303.
- [12] S. Müller (2012), « **The Impact of Electronic Coupled Heavy Trucks on Traffic Flow** », *ETC Proceedings. 40th European Transport Conference (ECT)*, 8.-10. October 2012, Glasgow.
- [13] S. Chanut (2004), « **Prise en compte des poids lourds dans un modèle macroscopique bi-fluide d'écoulement du trafic routier** », *Recherche Transport et Sécurité*, vol. 82, pp. 47-64.
- [14] S. Peeta, Z. Pengcheng, Z. Weimin (2005), « **Behavior-based analysis of freeway car-truck interactions and related mitigation strategies** », *Transportation research. Part B : methodological A.*, vol. 39, No. 5, pp. 417-451.
- [15] J. W. C. Van Lint, S. P. Hoogendoorn, M. Schreuder (2008), « **FASTLANE : New Multiclass First-Order Traffic Flow Model** », *Transportation research. Records*, No. 2088, pp. 177-187.
- [16] A.-G. Dumont, F. Huguenin (décembre 2005), « **Evaluation de la sécurité du trafic par microsimulation** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche OFROU 2003/005, Rapport VSS No. 1160*.
- [17] E. Bert, E. Chung, A.-G. Dumont (juin 2009), « **Dynamic Urban Origin-Destination Matrix Estimation Methodology** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2006/016, Rapport VSS No. 1275*.
- [18] A. Bhaskar, E. Chung, A.-G. Dumont (janvier 2011), « **Development of urban network travel time estimation methodology** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2006/015, Rapport VSS No. 1337*.
- [19] M. H. Pham, E. Chung, A.-G. Dumont (décembre 2012), « **Amélioration du modèle de comportement individuel du conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2004/015, Rapport VSS No. 1406*.
- [20] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (juillet 2004), « **Traffic Analysis Toolbox Volume III : Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software** », Research, Development, and Technology. Turner-Fairbank Highway Research Center. Georgetown.
- [21] M. Ould-Henia, M. Rodriguez, A.-G. Dumont (août 2004), « **Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 1998/074, Rapport VSS No. 1081*.
- [22] J. Perret, A.-G. Dumont (septembre 2005), « **Modélisation des charges d'essieu** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche OFROU 2000/421-1, Rapport VSS No. 1142*.

-
- [23] S. Bressi, J.-M. Fuerbringer, M.-A. Fénart, A.-G. Dumont (octobre 2014), « **Global Sensitivity Analysis and Monte Carlo Analysis of Swiss design method applied to flexible pavements** », *papier proposé et présentation de poster*, EATA 2015, Stockholm, Suède.
-
- [24] Ministère des transports, Ontario (s. d.), « **Programme des trains routiers de l'Ontario** », Ontario.
-
- [25] P. Vanden Camp (2007), « **Mémento pour le professionnel de l'assurance auto** », Bruxelles.
-
- [26] A.-G. Dumont, J.-C. Turtzschy, T. Pucci, M. Fontana, I. Scazziga (juillet 2001), « **Analyse des modèles de comportement des chaussées** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 1999/119, Rapport VSS No. 1002*.
-
- [27] I. Scazziga (août 2008), « **Processus de dégradation et lois d'évolution** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/712, Rapport VSS No. 1304*.
-
- [28] Rexer Analytics (2011), « **Rexer Analytics 2011 Data Miner Survey** ».
-
- [29] M.-A. Fénart (2013), « **AIMSUN : véhicules perdus, un comportement réaliste** ». *Documentation LAVOC, EPFL*.
-
- [30] L. D'Angelo, A. Nussbaumer, M.-A. Fénart, A.-G. Dumont (2013), « **Fatigue Life Assessment of Existing Motorway Bridge** ». *5th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, South Africa. Publié dans *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, pp. 757-761, CRC Press/Balkema.
-
- [31] D. Salomon (Juillet 1964), « **Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle** ». *Traffic Systems Research Division, Office of Research and Development, U.S. Department of Commerce*. Etats-Unis d'Amérique.
-
- [32] OFT, centre de compétences Données du transport de marchandises (avril 2015), « **Transport transalpin de marchandises en Suisse. Indices 2014 et interprétation de l'évolution** ». *Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication*, DETEC.
-
- [33] J. Chapoton (2014), « **Analyse et positionnement de poids lourds dans le trafic** ». *Travail de master*, LAVOC, EPFL.
-
- [34] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (août 2000), « **The Capability and Enhancement of VDANL and TWOPAS for Analyzing Vehicle Performance on Upgrades and Downgrades Within IHSDM** », *Publication No 00-078*, Research, Development, and Technology. Turner-Fairbank Highway Research Center. Georgetown.
-
- [35] P.G. Gipps (avril 1981), « **A behaviour car-following model for computer simulation** ». *Transportation Research Part B : Methodological*, Volume 15, Issue 2, pp. 105-111.
-
- [36] P.G. Gipps (octobre 1986), « **A model for the structure of lane-changing decisions** ». *Transportation Research Part B : Methodological*, Volume 20, Issue 5, pp. 403-414.
-
- [37] F. Bühlmann, H.-P. Lindenmann, P. Spacek (octobre 1991), « **Sichtweiten : Überprüfen der Grundlagen zur Norm SN 640 090 Projektierungsgrundlagen, sichtweiten** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 17/84, Rapport VSS No. 237*.
-
- [38] H. Bordes (2014), « **Etude de la sécurité routière du bassin lémanique et comparaisons internationales** ». *Travail de master*, LAVOC, EPFL.
-
- [39] S. Lennie, J. Bunker (2005), « **Using Lateral Position Information as a Measure of Driver Behaviour around MCVs** », *Road & Transport Research* 14, pp. 62-77.
-
- [40] Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie du canton de Berne (mai 2012), « **Rapport : 1007 / Breteille autoroutière de Haute-Argovie ; avant-projet** ».
-
- [41] Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie du canton de Berne (mai 2012), « **Initiative déposée par le canton de Berne : Intégration des bretelles d'autoroute de l'Emmental et de la Haute-Argovie au réseau des routes nationales** ».
-
- [42] SETRA-LCPC (décembre 1994), « **Conception et dimensionnement des chaussées neuves** », *Guide technique, chapitre 6*, SETRA-LCPC.
-
- [43] Yang H. Huang (2004), « **Pavement Analysis and Design, Second Edition** », University of Kentucky.
-
- [44] A. Houel (juin 2008), « **Endommagement à la fatigue et fissuration mécanique des enrobés bitumineux sur dalle orthotope** », *Thèse*, MEGA, ENTPE, Lyon.
-
- [45] M.-A. Fénart (juin 2011), « **Stratégie de maintenance d'un réseau routier urbain à la Chaux-de-Fonds** », *Travail de master*, LAVOC, EPFL.
-

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 12 Octobre 2016

Données de base

Projet N° : AGB 2010/003
Titre du projet : Simulations de trafic intégrant la détermination d'indices de performance structurale
Echéance effective : 31 Octobre 2016

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Les résultats de la recherche sont séparés en deux parties, qui se rejoignent dans une méthodologie complète permettant l'évaluation structurale des ouvrages d'art et des chaussées : le trafic et l'effet de ce dernier sur les chaussées et dans l'évaluation structurale des ponts routiers sous l'effet du trafic, en particulier vis-à-vis de la fatigue.

En ce qui concerne les charge de trafic poids lourds, l'étude s'est basée sur des investigations statistiques des comptages routiers et des stations de pesage en marche (WIM), sur des études vidéo et d'accidentologie, à différentes échelles de temps (de jour à années). Elle a permis de déterminer un modèle de comportement des poids lourds. Grâce à ce modèle, qui doit être adapté à chaque situation spécifique, il est alors possible d'évaluer de manière précise les effets du trafic total (véhicules légers et poids lourds) passé, actuel et futur, en effectuant des simulations de trafic sur la durée souhaitée (en général une semaine). Afin de démontrer la démarche, cette dernière a été effectuée pour trois cas d'étude :

- Denges, autoroute A1, proche du pont sur la Venoge sur l'axe Lausanne - Genève (le réseau complet avec les nœuds a été développé : Mex - Maladière - Ecublens - Morges - Genève Aéroport)
- Monte Ceneri, Autoroute A2, sur l'axe Lugano - Bellinzona
- Aarwangen, pont sur l'Aare, route cantonale n°244 Langenthal - Niederbipp-Oensingen

Les comparaisons entre simulations et trafic réels démontrent l'excellente qualité des simulations en termes de débits, de vitesses moyennes et de variations sur 10 répétitions.

Ce projet a permis la création de passerelles entre différents outils et ainsi l'utilisation des résultats des simulations pour l'évaluation des ouvrages d'art et des dégradations des chaussées soumis au trafic routier, via des indices de performance, v. Dans le cas de la fatigue, ceci s'effectue à l'aide de passerelles développées entre AIMSUN (logiciel de simulation de trafic) et les routines Matlab de détermination des efforts dans les sections/détails déterminants.

Pour estimer les courbes de résistance à la fatigue nécessaire au calcul de l'indice de performance à la fatigue, l'approche combinée « maximum likelihood » (ML) et Simulations de Monte-Carlo (MCS) proposée constitue un outil puissant pour la redéfinition de courbes S-N normalisées (caractéristiques) et de la partie à amplitude variable (seconde pente) de ces mêmes courbes, ainsi qu'une évaluation plus réaliste de la valeur critique du cumul de dommage. Il est important d'insister sur le fait que l'efficacité de l'approche proposée et de la confiance dans la vérification en fatigue sont conditionnées par les résultats à disposition contenant suffisamment d'information (sous CA et VA) dans la région à grand nombre de cycles ($N > 5$ millions de cycles), ce qui fait souvent défaut à ce jour.

Une nouvelle méthodologie développée dans cette étude avec les outils ML-MCS permet en outre d'effectuer des estimations de la fiabilité en fatigue des ponts existants en se servant de trafics simulés. Dans cette méthodologie, la probabilité de rupture en fatigue est définie en prenant en considérant la probabilité conjointe de l'événement de dépassement de la CAFL et de l'événement d'accumulation de dommage critique. L'estimation de la fiabilité en fatigue a été appliquée au cas d'étude du pont existant de la Venoge. Bien que le pont possède un indice de fiabilité élevé, elle démontre l'inexactitude de la vérification avec l'Eurocode pour estimer l'évolution de l'indice de fiabilité durant les 100 ans de durée de vie du pont. Même lorsqu'ils sont appliqués à des assemblages soudés, les outils développés ont une applicabilité générale.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Atteinte des objectifs :

Les objectifs de la recherche ont été en grande partie atteints:

- Détermination d'un modèle de comportement des poids lourds : les résultats établis et les démarches proposées permettent d'atteindre, en fonction du niveau de détail souhaité et adapté à chaque cas étudié, un modèle de trafic routier.
- Démarche pour atteindre, en fonction du niveau de détail souhaité et adapté à chaque cas étudié, un modèle de trafic routier : la démonstration est faite, au travers de trois cas d'étude, de la manière d'effectuer des simulations de trafic précises pour les effets du trafic total (véhicules légers et poids lourds) passé, actuel et futur.
- Création de passerelles entre les différents outils et, ainsi, possibilité d'utilisation des résultats des simulations de trafic pour l'évaluation des ouvrages d'art et des dégradations des chaussées soumis au trafic routier, via des indices de performance.
- Définition des indices de performance structurale pour un ouvrage d'art et pour une chaussée bitumineuse; de plus amples développements sont cependant souhaitables pour la détermination de ces indices.
- Développement de l'approche combinée « maximum likelihood » (ML) et Simulations de Monte-Carlo (MCS) en un outil puissant pour la redéfinition de courbes de fatigue normalisées sous amplitude constante et variable.
- Nouvelle méthodologie, avec les outils ML-MCS, permettant d'effectuer des estimations de la fiabilité en fatigue des ponts existants.

Déductions et recommandations :

- Pour définir un modèle de trafic routier, cette recherche met en évidence la nécessité de mener des études locales plutôt que de se baser sur un modèle appliqué à l'échelle nationale en termes de composition et de charges de trafic.
- L'approche proposée pour estimer les courbes de fatigue sous amplitude variable (et a fortiori les courbes sous amplitude constante) peut être utilisée pour améliorer les normes à la fois pour les nouvelles structures et pour les structures existantes. Le fait est que le besoin d'avoir des méthodes plus précises est important pour les structures existantes, où l'évaluation fournit des valeurs de durées de vie restantes. Par conséquent, la redéfinition de courbes de fatigue dans les normes d'évaluation de ponts existants doit être discutée; les courbes actuelles de l'Eurocode pour les nouvelles structures peuvent être conservées pour le moment.
- En fatigue, les valeurs de l'indice de fiabilité obtenues sont probablement trop élevées, le coefficient de variabilité pour les effets du trafic étant très faible de par la répétition de simulations de courtes durées, une semaine (théorème de limite centrale). Il est recommandé d'effectuer des simulations de plus longues durées.
- Un manque de résultats d'essais (sous CA et VA) dans la région à grand nombre de cycles ($N > 5$ millions de cycles) a été identifié. Pour permettre une meilleure redéfinition des courbes de fatigue et l'utilisation des méthodes avancées développées, il faut investir dans de nouveaux programmes d'essais de fatigue des détails les plus utilisés.

Publications :

D'Angelo, L., Nussbaumer, A., Fénart, M.-A., Dumont, A.-G. (2013), Fatigue life assessment of existing motorway bridge, 5th Int. Conf. on Structural Eng., Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, Sept. 2-5.
D'Angelo, L., Rocha, M., Nussbaumer, A., Brühwiler, E. (2014), SNP Fatigue Curves using Maximum Likelihood, paper 461, EUROSTEEL 2014, Sept. 10-12, Naples, Italy.
D'Angelo, L., Nussbaumer, A. (2015), Reliability based fatigue assessment of existing motorway bridge, Structural Safety, 57, pp. 35-42.
D'Angelo, L., Faber, M. H., Nussbaumer, A. (2015), Calibration of partial safety factors for fatigue design of steel bridges, paper 621, ICASP12, Vancouver, Canada, July 12-15.
D'Angelo, L. (2015), Probabilistic approach for fatigue evaluation of welded connections with application to road steel bridges, PhD thesis EPFL no 6827, EPF Lausanne.

Chef/cheffe de projet :

Nom : Nussbaumer

Prénom : Alain

Service, entreprise, institut : RESSLab (anciennement ICOM), ENAC, EPFL, Lausanne

Signature du chef/de la cheffe de projet :



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Les démarches conduites et les résultats obtenus sont évalués de manière positive par la commission, qui relève également que les objectifs principaux de la recherche ont été atteints.

Au chapitre des conclusions de la recherche, la commission souligne ses apports importants, notamment en matière

- de méthodologie de traitement des données de trafic CSACR et WIM,
- d'élaboration de simulations de trafic,
- d'établissement, à partir d'un modèle de leur comportement, d'un modèle de circulation des poids lourds,
- de manière (démontrée à l'aide de trois cas d'étude) d'effectuer des simulations précises de trafic pour les effets du trafic passé, actuel et futur,
- de définition du trafic sollicitant réellement un ouvrage et, en conséquence, d'estimation des sollicitations futures afférentes,
- de définition des indices de performance structurale pour les ouvrages d'art et pour les chaussées revêtues de bitume,
- d'élaboration d'un outil pour la redéfinition de courbes de fatigue normalisées sous amplitude constante et variable,
- de développement d'une nouvelle méthodologie pour estimer la fiabilité en fatigue des ponts existants

ou encore la mise en évidence d'une ambiguïté législative en ce qui concerne la vitesse des poids lourds.

Mise en oeuvre :

La recherche fournit des conclusions très utiles pour le dimensionnement et/ou la vérification des infrastructures routières (ponts, chaussée) en ce qui concerne la définition respectivement le pronostic de charges et de composition du trafic ayant sollicité, sollicitant ou étant appelé à solliciter ces infrastructures, en particulier

- la nécessité, en termes de composition et de charges de trafic, de mener des études locales plutôt que de se baser sur un modèle appliqué à l'échelle nationale;
- la prise en compte du comportement effectif des poids lourds.

Les résultats de la recherche permettront d'actualiser les facteurs d'équivalence des poids lourds de la norme en vigueur.

La meilleure précision de la détermination du trafic pondéral pourra servir de base au niveau de l'approche du dimensionnement et du renforcement des chaussées.

En matière de comportement à la fatigue des ouvrages, tant au niveau de leur dimensionnement que de leur vérification, la recherche conduit à proposer l'utilisation d'une approche d'estimation des courbes de fatigue sous amplitude variable et sous amplitude constante. Ayant mis en évidence le fait que les valeurs de l'indice de fiabilité obtenues sont probablement trop élevées, au motif de la répétition de simulations de courbes durées, la recherche recommande d'effectuer des simulations de plus longues durées.

L'ambiguïté relevée au niveau des dispositions législatives en vigueur en ce qui la vitesse des poids lourds pourrait devoir faire l'objet de révisions légales, en intégrant l'aspect de la sécurité routière dans le contexte de cette réflexion.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

L'identification d'un manque de résultats d'essais (sous CA et VA) dans la région à grand nombre de cycles ($N > 5$ millions de cycles) nécessite, afin de permettre une meilleure redéfinition des courbes de fatigue et l'utilisation des méthodes avancées développées, de mettre en oeuvre de nouveaux programmes d'essais de fatigue des détails les plus utilisés. Des études complémentaires sur la répartition du trafic pondéral permettraient de valider ou d'actualiser les hypothèses de la SN 640 320 à son article 17.

À son chapitre 10.3, le rapport de recherche met en outre en évidence des besoins en matière de recherche, notamment au niveau de données et de recensement de trafic, de développement d'outils complémentaires pour la simulation de trafic, d'étude de l'évolution de la dégradation des revêtements bitumineux sur les ponts ou encore d'amélioration de la concordance entre les résultats des systèmes de relevés/mesures de données routières.

Influence sur les normes :

Une redéfinition des courbes de fatigue dans les normes d'évaluation des ponts existants doit être discutée ; les courbes actuelles de l'Eurocode pour les nouvelles structures peuvent être conservées pour le moment.

L'approche proposée pour estimer les courbes de fatigue sous amplitude variable (et a fortiori sous amplitude constante) peut être utilisée pour améliorer les normes à la fois pour les nouvelles structures et pour les structures existantes, pour lesquelles le besoin d'avoir des méthodes plus précises est important, l'évaluation fournissant des valeurs de durées de vie restantes.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Putallaz

Prénom : Jean-Christophe

Service, entreprise, institut : Service des routes, transports et cours d'eau, DTEE, Sion

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3

Page 3 / 3

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur le site www.astra.admin.ch (Service --> Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).