



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

Actualisation des facteurs d'équivalence de la norme SN 640 320

**Aktualisierung von Äquivalenzfaktoren der Norm
SN 640 320**

Update of equivalency factors of the SN 640 320 standard

Nibuxs Sàrl
Marc-Antoine Fénart, Ing. civil EPF
Mehdi Ould Henia, Ing. civil, dr ès science EPF
Marc Delaby, Ing. civil EPF

**Projet de recherche VSS 2015/411 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

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

Actualisation des facteurs d'équivalence de la norme SN 640 320

**Aktualisierung von Äquivalenzfaktoren der Norm
SN 640 320**

Update of equivalency factors of the SN 640 320 standard

Nibuxs Sàrl
Marc-Antoine Fénart, Ing. civil EPF
Mehdi Ould Henia, Ing. civil, dr ès science EPF
Marc Delaby, Ing. civil EPF

**Projet de recherche VSS 2015/411 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Mehdi Ould Henia, Nibuxs Sàrl

Membres

Marc-Antoine Fénart, Nibuxs Sàrl

Marc Delaby, Nibuxs Sàrl

Commission d'experts responsable

Commission d'experts FK4 : Technique de construction et géotechnique

Commission de suivi

Président

Martin Horat

Membres

Martin Arraigada

Thierry Buchs

Tony Bühler

Raymond Devaud

Björn Mühlán

Christophe Rohr

Urs Schellenberg

Auteur de la demande

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

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	13
1.1 Plan de la recherche et structure du rapport.....	13
1.2 Situation actuelle, problématique	14
1.3 Motivation et objectifs du projet de recherche	14
2 Connaissances	15
2.1 Situation de la normalisation	15
2.2 Evolution de la normalisation	19
2.3 Etat de l'art	22
3 Méthodes de calcul	27
3.1 Méthode de calcul AASHTO	27
3.1.1 Chaussées souples et semi-rigides	27
3.1.2 Chaussées rigides et combinées	28
4 Données trafic	31
4.1 Stations Weigh-in-motion	31
4.2 Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)	33
4.3 Classification Swiss.....	35
5 Méthodologie	37
5.1 Autoroutes	37
5.2 Autres types de route	38
6 Conditions d'application de la méthodologie	39
6.1 Sensibilité des facteurs d'équivalence aux hypothèses de la méthode de calcul	39
6.1.1 Rapport de recherche VSS No. 1017	39
6.1.2 Discussion des hypothèses.....	40
6.2 Confiance dans les données.....	46
6.2.1 Données et calibrations WIM	46
6.2.2 Données CSACR et classification Swiss	50
6.2.3 Comparaison WIM – CSACR.....	50
6.3 Intégrité et filtrage de données WIM	53
6.4 Typologie des routes.....	54
7 Résultats d'analyses et recommandations d'actualisation	55
7.1 Preuve de la nécessité d'une actualisation des facteurs d'équivalence	55
7.2 Valeurs historiques.....	56
7.3 Silhouettes poids lourds prédominantes	57
7.3.1 Silhouettes de plus de 5 axes	57
7.3.2 Silhouettes individuelles et regroupements de silhouettes	57
7.4 Effet de la classification Swiss	61
7.5 Actualisation des facteurs d'équivalence par classes.....	65
7.6 Actualisation des facteurs d'équivalence par catégories	66
7.7 Actualisation des facteurs d'équivalence par type de route.....	68
7.7.1 Autoroutes	68

7.7.2	Routes principales et routes de liaison	71
8	Conclusions	75
8.1	Implications pour la pratique	75
8.2	Effets sur la normalisation.....	75
8.3	Recommandations	77
8.4	Proposition de recherches ultérieures	77
	Annexes	79
	Glossaire.....	99
	Bibliographie	101
	Clôture du projet	103
	Index des rapports de recherche en matière de route	107

Résumé

Le dimensionnement de la structure des chaussées selon la norme SN 640 324 fait intervenir les charges de trafic au travers de la détermination du trafic pondéral équivalent décrite dans la norme SN 640 320.

Ce processus consiste à exprimer la multitude de charges de trafic et de véhicules lourds sous la forme d'une valeur globale, appelée « facteur d'équivalence », par le biais du concept de l'essieu standard équivalent (ESAL). Le facteur d'équivalence donne ainsi l'endommagement moyen engendré par le passage d'un véhicule ou d'une catégorie de véhicule exprimé en essieu standard ESAL soit, en Suisse, un essieu simple avec une charge de 8.16 tonnes.

Les facteurs d'équivalence de la normalisation actuellement en vigueur sont basés sur des analyses menées dans les années 2000-2001 (Projet VSS 14/96). L'évolution du parc de véhicules lourds en termes de composition, de technologie, du taux du remplissage et donc des charges, de même que les modifications du cadre légal avec notamment l'abolition de la réglementation des contingents de courses de véhicules d'un poids total de 40 tonnes en 2005 ont une influence considérable sur les facteurs d'équivalence.

Ainsi, une étude sur l'évolution de ces facteurs d'équivalence s'imposait, de même qu'une éventuelle mise à jour de la normalisation correspondante. Le présent projet répond à ce besoin avec une recherche sur :

- L'analyse des données historiques et actuelles de 15 stations suisses de pesage en marche (Weigh-in-Motion, WIM) en service essentiellement sur les routes nationales.
- L'analyse des données de l'ensemble des stations du comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR).
- Le calcul des facteurs d'équivalence selon les formules de la méthode AASHTO.

Les facteurs d'équivalences sont établis chaque année sur la période comprise entre 2000 à 2015. Ceci permet dans un premier temps la validation de la méthode de calcul par l'obtention de résultats sensiblement équivalents à ceux établis en 2001 (Projet VSS 14/96).

La comparaison des facteurs d'équivalence actuels avec ceux établis en 2001 met en évidence des différences significatives qui justifie par conséquent la proposition d'adaptation de la norme SN 640 320.

Pour les chaussées souples, le facteur d'équivalence passe de 1.6 à 1.8 pour les routes à grand débit (RGD) - autoroutes de transit ; de 1.4 à 1.6 pour les routes à grand débit (RGD) – autoroutes ; de 1.3 à 1.5 pour les routes principales (RP) ; et enfin de 1.0 à 1.2 pour les routes de liaison (RL).

Zusammenfassung

Gemäss der Norm SN 640 324 braucht die Dimensionierung des Strassenaufbaus Angaben zur Verkehrsbelastung, die durch die Ermittlung einer Äquivalenten Verkehrslast in der Norm SN 630 320 beschrieben ist.

Dieses Vorgehen besteht darin, die Anzahl der Verkehrsbelastungen und Lastfahrzeuge in Form eines Globalwertes genannt « Äquivalenzfaktor » - mit dem Konzept von Äquivalente Standardachsen (ESAL) auszudrücken. Dieser Äquivalenzfaktor gibt somit in Form einer Anzahl von Standardachslastdurchgängen (ESAL) an, welche durchschnittliche Schädigung die Durchfahrt eines Fahrzeugs oder einer Fahrzeugkategorie verursacht. In der Schweiz entspricht die Standardachse aus einer Einzelachse von 8.16 Tonnen.

Die derzeitig benutzten Äquivalenzfaktoren in den Normen stammen aus Untersuchungen, die in den Jahren 2000-2001 durchgeführt wurden (Projekt VSS 14/96). Der Fuhrpark der Lastfahrzeuge hat sich in Bezug auf die Zusammensetzung, die Technologie, den Auslastungsgrad und somit auch auf die Lasten in der Zwischenzeit stark verändert, nicht zuletzt auch durch die Erhöhung der Gewichtslimite für Lastfahrzeuge auf 40 Tonnen im Jahre 2005. All dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Äquivalenzfaktoren.

Somit wurde eine neue Studie dieser Äquivalenzfaktoren notwendig, insbesondere auch im Hinblick auf eine eventuelle Aktualisierung der entsprechenden Normen. Das vorliegende Projekt entspricht diesem Bedürfnis mit einer Forschung, welche die folgenden Punkte umfasst:

- Analyse von historischen und aktuellen Daten von 15 Schweizer Anlagen für die Erfassung der Fahrzeugachslasten während der Fahrt (Weigh-in-Motion, WIM)
- Analyse der gesamten Daten aller Schweizerischen automatischen Strassenverkehrszählstationen (SASVZ).
- Berechnung der Äquivalenzfaktoren gemäss den Formeln der AASHTO Verfahrensweise.

Die Äquivalenzfaktoren wurden für jedes Jahr im Zeitraum von 2000 bis 2015 festgelegt. Dies bezweckte als erstes die Validierung des Berechnungsverfahrens: Es wurden im Wesentlichen verfahrenstechnisch gleichwertige Ergebnisse erzielt wie im Jahr 2001 (Projekt VSS 14/96).

Wie sich zeigte, bringt der Vergleich der eigentlichen, aktuellen Äquivalenzfaktoren mit den im Jahr 2001 ermittelten, erhebliche Unterschiede ans Licht. Dementsprechend ist der Vorschlag die Norm SN 640 320 anzupassen gerechtfertigt.

Für flexible Oberbau erhöhen sich die Äquivalenzfaktoren von 1.6 bis 1.8 für Hochleistungstrassen (HLS) - Transitautobahnen; von 1.4 bis 1.6 für Hochleistungstrassen (HLS) - Autobahnen; von 1.3 bis 1.5 für Hauptverkehrstrassen (HVS); und schliesslich von 1.0 bis 1.2 für Verbindungsstrassen (VS).

Summary

Pavement design according to Swiss standard SN 640 324 considers traffic loads by determination of the equivalent weight traffic as described in Swiss standard SN 640 320.

This procedure involves characterising the wide range of traffic loads and heavy vehicles with a global value designated as "equivalency factor", which is done through the concept of Equivalent Standard Axle Load (ESAL). Thus, the equivalency factor shows the average damage induced by a single vehicle or a category of vehicles expressed in terms of ESALs, which in Switzerland corresponds to a single axle with a total load of 8.16 tons.

The equivalency factors of standardisation currently in force are based on analyses carried out in the years 2000-2001 (VSS Project 14/96). The evolution of the heavy vehicles fleet in terms of composition, technology, filling rate and therefore loads, as well as changes in the legal framework including the abolition of the quota regulations of vehicles with total weight of 40 tons in 2005 have considerable influence on equivalency factors.

Therefore, studying the evolution of these equivalency factors was required, as well as a possible update of the related standards.

This project addresses this need with a research that includes:

- Analysis of historical and actual data of 15 Swiss Weigh-in Motion stations (WIM) in service primarily on motorways.
- Analysis of the Swiss network of automatic traffic counting (CSACR) data for all its station.
- Calculation of equivalency factors according to formulas of the AASHTO method.

The equivalence factors are established each year for the period 2000 to 2015. This first permitted the validation of the calculation method by obtaining substantially equivalent results to those established in 2001 (VSS Project 14/96).

Comparing the current equivalence factors with those established in 2001 highlights significant differences justifying therefore the proposal to update the standard SN 640 320.

For flexible pavements, equivalency factor changes from 1.6 to 1.8 for transit motorways; from 1.4 to 1.6 for motorways; from 1.3 to 1.5 for primary roads; and finally from 1.0 to 1.2 for secondary roads.

1 Introduction

La présente recherche a pour objectif l'étude de l'évolution des facteurs d'équivalence des véhicules lourds en vue d'une éventuelle actualisation de la normalisation en vigueur en matière de trafic pondéral équivalent.

1.1 Plan de la recherche et structure du rapport

La recherche est organisée selon le schéma de la Fig. 1.

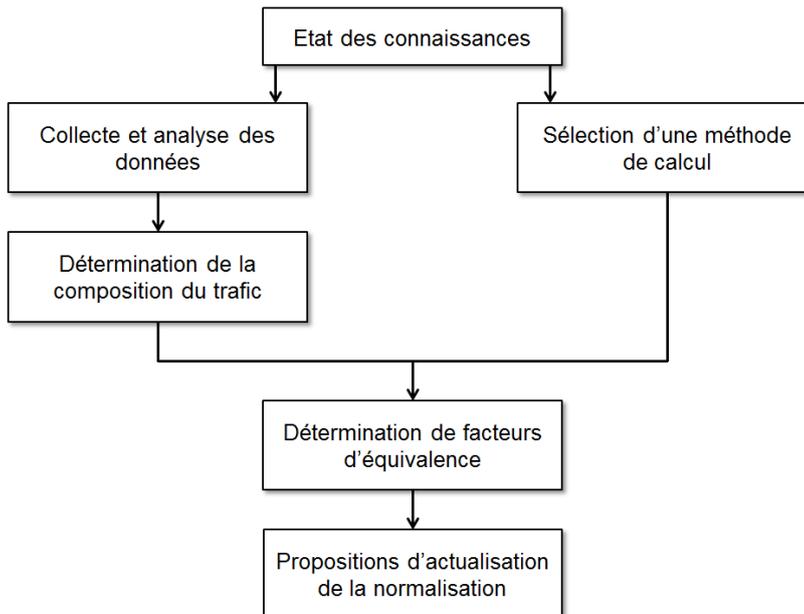


Fig. 1 Organigramme de la recherche.

Le rapport est ainsi structuré autour des chapitres suivants :

- Le premier chapitre décrit la situation actuelle en matière de détermination des facteurs d'équivalence et la problématique sous-jacente. Les lignes directrices et les objectifs du projet de recherche sont ensuite exposés.
- Le chapitre 1 décortique l'état de la normalisation suisse en vigueur ainsi que son évolution. Ce chapitre est complété par un état de l'art relatant notamment l'étude sur laquelle est basée la normalisation actuellement en vigueur.
- Les méthodes de calcul numérique des facteurs d'équivalence font l'objet du chapitre 3.
- Le chapitre 4 explicite les différentes bases de données routières exploitées dans le cadre de ce projet.
- La méthodologie de détermination des facteurs d'équivalence est détaillée dans le chapitre 5 et ses conditions de mise en application sont décrites au chapitre 6.
- Les résultats des analyses menées et des recommandations d'actualisation des facteurs d'équivalence sont proposés dans le chapitre 7.
- Au chapitre 8, sur la base des résultats obtenus, des conclusions et les effets proposés sur la normalisation en vigueur finalisent le présent rapport.

1.2 Situation actuelle, problématique

La norme suisse de dimensionnement des infrastructures routières actuellement en vigueur (SN 640 324, [4]) fait appel à la notion de trafic sous la forme de trafic pondéral équivalent ou de classes de trafic. En effet, un des facteurs prépondérants de l'endommagement des chaussées routières est le trafic et notamment le trafic composé de véhicules lourds.

En fonction du niveau de détail de connaissance du trafic, la norme SN 640 320 [1] propose une détermination du trafic pondéral équivalent sur la base de facteurs d'équivalence. Cette norme a été mise à jour en 2011 sur la base des résultats d'une recherche publiée en 2002 et basée sur des données datant du début des années 2000 [11].

L'évolution continue du parc automobile, tant au niveau de la configuration des véhicules que de leurs chargements, nécessite une actualisation régulière de ces facteurs d'équivalence. De plus, les effets de l'introduction aux 40 tonnes (quotas à partir de 2001, introduction complète en 2005) n'avaient pu être qu'estimés dans cette précédente recherche.

1.3 Motivation et objectifs du projet de recherche

A l'heure actuelle, le réseau de stations de pesage en marche (Weigh-in-Motion, WIM) ainsi que de stations du comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR) est largement développé et permet de travailler sur une importante base de données relative au trafic de véhicules lourds. D'autre part, le recul sur les effets de l'introduction aux 40 tonnes est aujourd'hui largement suffisant.

Au vu des éléments qui précèdent (Chapitre 1.2), il devient indispensable d'analyser l'évolution des facteurs d'équivalence et d'effectuer, le cas échéant, une modification de la normalisation en vigueur.

L'objectif final de ce projet est donc d'établir des propositions d'actualisation de la norme relative au trafic pondéral équivalent SN 640 320 [1].

2 Connaissances

2.1 Situation de la normalisation

Ce chapitre est consacré au recensement de la normalisation suisse en vigueur visée par le sujet de cette étude.

Poids lourds

La norme en vigueur sur le trafic pondéral équivalent SN 640 320 [1] décrit en son article 9 comme poids lourds « *tous véhicules dont le poids total maximum dépasse 3.5 tonnes* ». Par abus de langage, il est fréquent de parler de poids en kilos ou en tonnes plutôt qu'en newton ou tonne-force.

Dans la suite de ce rapport, on décrira la masse comme étant relative à la quantité de matière d'un objet, véhicule (soit une unité en [kg]) et le poids comme étant la force d'attraction qui s'applique sur cet objet, véhicule (soit une unité en [N]).

Facteur d'équivalence

Le facteur d'équivalence est défini par la norme SN 640 320 [1] comme suit :

« Le facteur d'équivalence est le nombre d'essieux de référence ESAL engendré par un essieu en fonction de sa charge, par une classe de véhicules lourds, par une catégorie de véhicules ou par le trafic lourd dans son ensemble ».

Trafic pondéral équivalent

La norme de base en matière de détermination du trafic pondéral équivalent pour le dimensionnement, l'élargissement, le renforcement et l'entretien des structures de chaussées est la SN 640 320 d'août 2011 [1].

Cette norme sert de base aux normes de dimensionnement des chaussées SN 640 324 [4] ainsi qu'aux normes relatives à l'entretien et au renforcement des chaussées SN 640 733b [5] et SN 640 735b [6].

Le trafic pondéral consiste en la somme des charges d'essieux de tous les véhicules sollicitant une chaussée, ou plus précisément une voie de circulation, pour une durée d'utilisation prévue.

On parle de trafic pondéral équivalent (unités : ESAL) dans le cas où le trafic pondéral est rapporté à l'essieu de référence, soit en Suisse, à un essieu simple¹ de 8.16 tonnes (équivalent à 18 kips en unités impériales).

Les facteurs d'équivalence peuvent être déterminés selon la norme SN 640 320 [1] à l'aide de quatre procédures distinctes, classées selon le niveau de détail de connaissance de la composition du trafic (de la plus détaillée à la plus générale) et donc de leur ordre de fiabilité :

- Charge par essieu (chiffre 19)
- Classes de véhicules lourds (chiffre 20)
- Catégories de véhicules lourds (chiffre 21)
- Type de route (chiffre 22)

Les chiffres indiqués entre parenthèses font référence aux chiffres de la norme SN 640 320 [1].

¹ Note : le terme anglais « Axle » correspond en français au terme « Essieu ». Un essieu peut-être composé de plusieurs axes (essieu tandem : groupement de deux axes, essieu tridem : groupement de trois axes).

Procédure « Charge par essieu »

Le trafic pondéral équivalent total W est calculé de la manière suivante :

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

où :

- i : configuration d'essieu (charge d'essieu ; type d'essieu)
- n_i : nombre total d'essieux de configuration i pour la durée d'utilisation déterminée
- k_i : facteur d'équivalence associé

Les facteurs d'équivalence d'essieux k_i sont décrits dans un tableau par type d'essieu (simple, tandem, tridem), par type de chaussée (souple et semi-rigide, rigide et combinée) et par charge d'essieu (Fig. 2).

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

Fig. 2 Facteurs d'équivalence d'essieux k (Tab. 2 [1]).

Procédure « Classes de véhicules lourds »

Le trafic pondéral équivalent total W est calculé de la manière suivante :

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

où :

- i : classe de véhicule
- n_i : nombre total de véhicules de classe i pour la durée d'utilisation déterminée
- k_i : facteur d'équivalence associé

Les facteurs d'équivalence k_i sont décrits par silhouettes de poids lourds et par type de chaussée (souple et semi-rigide, rigide et combinée) (Fig. 3). L'utilisation de ces valeurs est limitée à une charge totale limite de 40 tonnes par véhicule poids lourds.

Des valeurs provisoires ont été proposées pour le camion à 5 axes (camion de chantier ) sur la base d'une note de calcul simplifiée effectuée par Nibux dans le cadre de son activité dans la commission d'experts sur le dimensionnement en vue de la mise à jour de la norme en 2011 [1].

Ces valeurs de facteurs d'équivalence ne pouvant pas être appliquées aux véhicules des transports publics (bus), des valeurs spécifiques sont également fournies dans la norme [1], à savoir :

- Facteur d'équivalence moyen pour bus : 2.5
- Facteur d'équivalence moyen pour un bus articulé : 3.9
- Facteur d'équivalence pour un bus articulé à pleine charge : 9.0

Äquivalenzfaktoren k nach Schwerverkehrsklassen Facteurs d'équivalence k par classe de véhicules lourds		
Fahrzeugsilhouetten der Schwerverkehrsklassen Silhouettes des classes de véhicules lourds	Flexibler und halbstarrer Oberbau Chaussée souple et semi-rigide	Starrer und kombinierter Oberbau Chaussée rigide et combinée
	k	
	0,7	0,6
	1,4	2,1
	1,5	2,7
	1,9 ¹⁾	3,0 ¹⁾
	0,5	0,5
	1,7	1,8
	1,8	2,2
	2,0	2,2
	2,0	1,9
	1,7	1,6
	1,3	1,0
	2,5	2,6
	1,2	0,9

¹⁾ Provisorische Werte

¹⁾ Valeurs provisoires

Fig. 3 Facteurs d'équivalence k par classe de véhicules lourds (Tab. 3 [1]).

Procédure « Catégories de véhicules lourds »

Le trafic pondéral équivalent total W est calculé de la manière suivante :

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

où :

- i : catégorie de véhicule
- n_i : nombre total de véhicules de catégorie i pour la durée d'utilisation déterminée
- k_i : facteur d'équivalence associé

Les facteurs d'équivalence k_i sont décrits par catégorie de poids lourds et par type de chaussée (souple et semi-rigide, rigide et combinée) (Fig. 4).

Äquivalenzfaktoren k nach Fahrzeugkategorien Facteurs d'équivalence k par catégories de véhicules		
Kategorien von schweren Lastfahrzeugen gemäss SN 640 002 [2] Catégories de poids lourds selon la SN 640 002 [2]	Flexibler und halbstarrer Oberbau Chaussée souple et semi-rigide	Starrer und kombinierter Oberbau Chaussée rigide et combinée
	k	
Lastwagen Camion	0,9	1,0
Lastenzug Trains routiers	1,9	2,0
Sattelschlepper Tracteur à sellette	1,7	2,0
Car (Gesellschaftswagen) Autocars	2,3	2,3

Fig. 4 Facteurs d'équivalence k par catégorie de véhicules lourds (Tab. 4 [1]).

Les différentes catégories de véhicules poids lourds sont déterminées par la norme SN 640 002 « Recensements dans les transports. Comptages » [7] de la manière suivante :

- Camion : véhicule poids lourds avec une paire de roues jumelées ou plus de deux axes. (Lastwagen, LW).
- Trains routiers (camion à remorque) : poids lourds avec remorque (Lastenzug, LZ).
- Tracteur à sellette (semi-remorque) : tracteur à sellette avec semi-remorque (Sattelschlepper, SS).
- Autocars : automobiles lourdes pour le transport de plus de neuf personnes (Car, Gesellschaftswagen).

Procédure « Type de route »

Dans le cas où les précédentes procédures ne peuvent être utilisées, il convient de procéder à l'évaluation du trafic pondéral équivalent total par les facteurs d'équivalence en fonction du type de route. L'affectation du type de route fait appel à la norme SN 640 040b « Projet, bases. Types de routes » [8].

Le trafic pondéral équivalent total W est calculé de la manière suivante :

$$W = k \cdot \sum n$$

où :

- n : nombre total de poids lourds pour la durée d'utilisation déterminée
- k : facteur d'équivalence du type de route

Les facteurs d'équivalence k sont décrits par type de route et par type de chaussée (souple et semi-rigide, rigide et combinée) (Fig. 5).

Durchschnittliche Äquivalenzfaktoren k des Schwerverkehrs nach Strassentyp Facteurs d'équivalence moyens k du trafic lourd selon le type de route		
Strassentypen gemäss SN 640 040 [5] Types de routes selon la SN 640 040 [5]	Flexibler und halbstarrer Oberbau Chaussée souple et semi-rigide	Starrer und kombinierter Oberbau Chaussée rigide et combinée
	k	
Hochleistungsstrassen HLS, Transitautobahnen Routes à grand débit RGD, autoroutes de transit	1,6	1,7
Hochleistungsstrassen HLS, Autobahnen Routes à grand débit RGD, autoroutes	1,4	1,5
Hauptverkehrsstrassen HVS Routes principales RP	1,3	1,5
Verbindungsstrassen VS Routes de liaison RL	1,0	1,3

Fig. 5 Facteurs d'équivalence k par type de route (Tab. 5 [1]).

2.2 Evolution de la normalisation

Ce chapitre retrace l'évolution de la normalisation en termes de trafic pondéral équivalent.

La norme de détermination du trafic pondéral équivalent a fait l'objet des trois éditions suivantes :

- Août 2011 : SN 640 320 [1], norme actuellement en vigueur
- Décembre 2000 : SN 640 320a [2], norme caduque
- Juillet 1971 : SN 640 320 [3], norme caduque

Type de chaussée

Les deux types de chaussées traités dans la norme ont été modifiés de sorte à correspondre aux standards internationaux :

Août 2011

- Chaussées souples et semi-rigides
- Chaussées rigides et combinées

Décembre 2000

- Chaussées en enrobés bitumineux
- Chaussées en béton

Juillet 1971

- Superstructures avec revêtement hydrocarboné
- Superstructures avec revêtement en béton de ciment

Charge limite (Classes et catégories de véhicules lourds)

Les facteurs d'équivalence par classes et catégories de véhicules lourds sont applicables jusqu'à une charge limite de :

- 40 tonnes (août 2011)
- 28 tonnes (décembre 2000)

Ces valeurs ont été définies en fonction des limites légales en vigueur au moment de l'édition de ces normes.

Procédure « Charge par essieu »

La première norme de 1971 propose un tableau de facteurs d'équivalence pour des charges d'essieux simples et tandem. Les normes de 2000 et 2011 introduisent en plus les facteurs d'équivalence pour les essieux tridem.

La norme de 2011 a introduit une modification majeure des paramètres affectant le calcul des facteurs d'équivalence par essieu :

Août 2011

- SN = 3, soit $SN_{CH} = 76$ selon SN 640 324 [4]. Pour les chaussées souples et semi-rigides (SN : Structural Number).
- $D = 10$ [pouces], soit une épaisseur de dalle de béton de 25 cm.

Décembre 2000

- SN = 2, soit $SN_{CH} = 51$ selon SN 640 324 [4].
- $D = 11$ [pouces] soit une épaisseur de dalle de béton de 28 cm.

Ces adaptations se basent sur les propositions du rapport [11]² et sont discutées au chapitre 6.1 du présent rapport.

D'autre part, la norme d'août 2011 considère la charge médiane (en demi-tonne) comme caractéristique de la catégorie de charge, contre la charge maximale de la catégorie précédemment (en tonne pleine, 2000 et 1971). L'étendue de chaque catégorie reste identique (1 tonne).

Procédure « Classes de véhicules lourds »

La norme de 2000 établit les facteurs d'équivalence par classes de véhicules lourds en fonction de données issues des stations de pesage automatique sur l'autoroute A1 entre Lausanne et Genève en direction de Genève et sur l'autoroute A2 au Gotthard (relevés durant 39 jours).

La norme de 2011 fait référence à l'étude [11] pour la mise à jour et la détermination de ces facteurs d'équivalence (Tab. 1).

² « L'utilisation d'une valeur de SN de 3.0 pour la détermination des facteurs d'équivalence de charge par essieu simple de 18 kips donnera normalement des résultats avec une précision suffisante pour le dimensionnement ».

« L'adoption d'une plaque d'épaisseur D de 10 pour la détermination des facteurs d'équivalence de charge par essieu simple de 18 kips donnera normalement des résultats avec une précision suffisante pour le dimensionnement ».

Tab. 1 Evolution des facteurs d'équivalence par classes de véhicules lourds

Silhouette des classes de véhicules lourds	Chaussée souple et semi-rigide (Décembre 2000 : « en enrobé bitumineux »)		Chaussée rigide et combinée (Décembre 2000 : « en béton »)	
	Déc. 2000	Août 2011	Déc. 2000	Août 2011
		0.8	0.7	0.7
	1.5	1.4	2.3	2.1
	1.5	1.5	2.6	2.7
	-	1.9 ³	-	3.0 ³
	0.5	0.5	0.5	0.5
	1.6	1.7	1.7	1.8
	1.4	1.8	1.4	2.2
	1.1	-	1.4	-
	2.2	2.0	2.2	2.2
	2.6	2.0	2.7	1.9
	1.3	1.7	1.5	1.6
	1.3	1.3	1.5	1.0
	-	2.5	-	2.6
	-	1.2	-	0.9

Procédure « Catégories de véhicules lourds »

Dans la norme de décembre 2000, trois catégories de poids lourds sont considérées à savoir les camions, les camions remorques et les semi-remorques.

Dans la version d'août 2011, la terminologie pour les deux dernières catégories a été modifiée en français en renommant les camions remorques par trains routiers et les semi-remorques par tracteurs à sellette. Les dénominations en allemand n'ont pas été modifiées. La classification en catégories de véhicules lourds fait appel à la norme SN 640 002 [7] qui n'adopte, en français, actuellement pas les mêmes termes courants.

Dans la version d'août 2011, la catégorie « Autocars » a été ajoutée (Tab. 2).

Tab. 2 Evolution des facteurs d'équivalence par catégories de véhicules lourds

Catégories de véhicules poids lourds	Chaussée souple et semi-rigide (Décembre 2000 : « en enrobé bitumineux »)		Chaussée rigide et combinée (Décembre 2000 : « en béton »)	
	Déc. 2000	Août 2011	Déc. 2000	Août 2011
	Camion	1.0	0.9	1.3
Train routier (Camion remorque)	2.2	1.9	2.2	2.0
Tracteur à sellette (Semi-remorque)	1.4	1.7	1.4	2.0
Autocar	-	2.3	-	2.3

³ Valeurs provisoires.

Procédure « Type de route »

Lors de la mise à jour d'août 2011, les facteurs ont été modifiés à la hausse sur la base de [11], excepté pour les routes de liaison (RL) (Tab. 3).

Tab. 3 Evolution des facteurs d'équivalence par type de route

Types de route	Chaussée souple et semi-rigide (Décembre 2000 : « en enrobé bitumineux »)		Chaussée rigide et combinée (Décembre 2000 : « en béton »)	
	Déc. 2000	Août 2011	Déc. 2000	Août 2011
Routes à grand débit (RGD), autoroutes de transit	1.5	1.6	1.5	1.7
Routes à grand débit (RGD), autoroutes	1.3	1.4	1.5	1.5
Routes principales (RP)	1.2	1.3	1.4	1.5
Routes de liaison (RL)	1.0	1.0	1.3	1.3

La norme de 1971 propose, en plus du tableau des facteurs d'équivalence par charges d'essieu, une estimation du trafic pondéral équivalent sur la base d'un facteur global de 1.2.

2.3 Etat de l'art

Plusieurs études ont été menées en Suisse sur le sujet des facteurs d'équivalence, du trafic pondéral et des comptages de trafic depuis la publication de la norme SN 640 320 de 1971 [3]. Celles-ci (Wägungen ISETH, Wägungen ASB, UNO-Zählungen, Automatische Strassenverkehrszählung 1999, etc.) sont décrites dans la principale étude portant sur les facteurs d'équivalence en Suisse, menée dans le cadre du projet de recherche VSS 14/96 [11] datant de 2002. Le but de ce projet de recherche était d'aboutir à des propositions de modifications des facteurs d'équivalence pour les différentes classes de véhicules lourds, les différentes catégories de véhicule lourds et les différents types de route. Les propositions de modifications de la norme SN 640 320 issues de ce mandat de recherche ont été intégrées dans la version d'août 2011 [1], soit près de dix ans après l'étude.

Depuis la publication de [11], on ne relève pas, en Suisse, d'études à proprement parlé sur le sujet des facteurs d'équivalence. Une étude mandatée par l'Office fédéral de la statistique (OFS, [23] [24] [25]) pour l'actualisation des coefficients du « compte routier » pour la répartition des coûts liés aux poids lourds fait référence au rapport publié par la société Nibuxs, sollicitée en tant que sous-traitant expert dans les charges de trafic [26]. Le but de cette étude était de procéder à l'actualisation des coefficients d'agressivité⁴ et de proportionnalité des catégories de véhicules lourds⁵. La méthode de calcul utilisée dans le cadre de cette étude afin de déterminer le nombre d'ESAL d'un véhicule lourd est la formule d'Eisenmann (OCDE, chapitre 3).

⁴ Coefficient d'agressivité : ratio entre le nombre d'ESAL d'un véhicule et sa charge utile.

⁵ Coefficient de proportionnalité d'une catégorie de véhicule lourd : ratio entre le poids moyen de la catégorie et l'essieu de référence.

Rapport de recherche VSS No. 477 « Facteurs d'équivalence par classes de véhicules lourds » [12]

Le but de ce projet était d'élaborer, en vue de la mise à jour de la norme SN 640 320 de décembre 2000 [2], une procédure intermédiaire (entre la procédure « charge par essieu » et une procédure globale équivalente « Par type de route ») de détermination du trafic pondéral équivalent total.

Le calcul des coefficients d'équivalence de plusieurs silhouettes est effectué sur la base du guide AASHTO [13] sous les hypothèses suivantes :

Chaussées souples et semi-rigides

- $\Delta PSI = 4.2 - 2.5$
- $SN = 2.0$ (correspondant à un SN_{CH} de 50 selon SN 640 324 [4])

Chaussées rigides et combinées

- $\Delta PSI = 4.5 - 2.5$
- $D = 11$ [pouces] (correspondant à une épaisseur de dalle d'environ 28 centimètres)

où :

- ΔPSI est la différence entre l'indice PSI (Present Serviceability Index) à l'état initial (p_0) et à la fin de la durée de service (p_t). Cet indice combiné PSI représente la viabilité de la chaussée (mesure d'état de la chaussée), $\Delta PSI = p_0 - p_t$.
- La valeur de p_0 représente la valeur de l'indice PSI à l'état initial de l'essai AASHO.
- La valeur de p_t est fixée, comme hypothèse, à 2.5.

Rapport de recherche VSS No. 1017 « Trafic pondéral équivalent journalier TF sur divers types de chaussée en Suisse » [11]

L'analyse effectuée se base sur les données de 5 stations WIM situées sur le réseau des routes nationales, entre 2000 et 2001 (Tab. 4).

Tab. 4 Stations WIM et périodes analysées dans le rapport de recherche VSS 14/96 [11]

Station WIM	N°ASTRA	Périodes d'analyse			
		Mai 2000	Septembre 2000	Mars 2001	Juillet 2001
Gotthard	402	X	X	X	X
Denges	405-406	X	X	X	X
Plazzas	403		X	X	X
Mattstetten	413-414		X	X	X
Trübbach	417-418		X	X	X

À noter que les stations de Plazzas, Mattstetten et Trübbach sont aujourd'hui hors-service et remplacées respectivement par les stations de San Bernardino (439-440), Grauholz (431-432) et Bad Raggaz (437-438).

Les périodes analysées reflètent deux situations relativement différentes quant aux conditions de trafic lourd :

- En 2000, le poids total des véhicules était limité à 28 tonnes.
- En 2001 la limite a été augmentée à 34 tonnes, étape intermédiaire avant l'introduction de la limite à 40 tonnes (2005). Des contingents des véhicules supérieurs à 34 tonnes ont également été introduits depuis 2001 dans le cadre des accords bilatéraux avec l'Union Européenne.

Les facteurs d'équivalence proposés dans le rapport de recherche [11] ont été établis sur la base de la méthode du guide AASHTO [13] (présentée en détail au chapitre 3). Ces

facteurs d'équivalence, repris ensuite pour l'actualisation de la norme SN 640 320 de 2011 [1], sont associés aux hypothèses simplificatrices suivantes :

Chaussées souples et semi-rigides

- $\Delta\text{PSI} = 4.2 - 2.5$
- $\text{SN} = 3.0$ (correspondant à un SN_{CH} d'environ 76 selon SN 640 324 [4])

Chaussées rigides et combinées

- $\Delta\text{PSI} = 4.5 - 2.5$
- $D = 10$ [pouces] (correspondant à une épaisseur de dalle d'environ 25 centimètres)

La justification de ces hypothèses ne figurant pas dans le rapport de recherche [11], celles-ci sont discutées au chapitre 6.1.2 du présent rapport.

La méthodologie employée dans l'étude consiste à établir, pour les 5 stations (Tab. 4), les facteurs d'équivalence des classes de véhicules lourds (silhouettes) les plus fréquentes des 4 catégories de véhicules lourds (Tab. 5).

Tab. 5 Silhouettes déterminantes considérées [11]

Catégories de véhicules	Classes de véhicules lourds avec n° de classification PAT ⁶				
Camion	 220	 230	 260		
Tracteur à sellette	 321	 322	 326	 329	
Train routier	 422	 423	 426	 432	 436
Autocar	 520	 530			

En considérant l'ensemble des stations, les facteurs d'équivalence moyens obtenus pour chaque classe et catégorie de véhicules lourds ont été comparés aux valeurs de la norme SN 640 320a [2] afin de proposer de nouvelles valeurs k_F (Tab. 6). Ces dernières se situent généralement entre la valeur moyenne obtenue et la valeur de la norme alors en vigueur. Les facteurs d'équivalence proposés pour les autocars, jusqu'alors absents de la norme, sont proches des résultats obtenus.

⁶ Classification selon fabricant de senseurs WIM, actuellement International Road Dynamics Inc. (IRD). Cette classification est également nommée CSF, FZC (Fahrzeugcode).

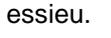
Tab. 6 Facteurs d'équivalence (chaussée souple) déterminés sur la base des données de 2001 pour les 5 stations WIM (Tab. 4) et proposition pour la normalisation [11]

Catégorie de véhicule	Classe de véhicule	Occurrence (n) pour les 5 stations	k _F déterminé (2001)	k _F norme [2] (2000)	k _F proposé 34 tonnes	k _F proposé 40 tonnes
Camion	220	33'283	0.62	0.8	0.7	0.7
	230	5'395	1.35	1.5	1.4	1.4
	260	4'806	1.55	1.5	1.5	1.5
Catégorie camion		43'484	0.82	1.0	0.9	0.9
Tracteur à sellette	321	3'312	0.70	0.5	0.6	0.5
	322	1'923	1.64	1.6	1.6	1.7
	326	10'721	1.56	1.6	1.6	1.7
	329	31'442	1.76	1.4	1.7	1.8
Catégorie tracteur à sellette		47'398	1.64	1.4	1.6	1.7
Train routier	422	24'355	1.84	2.2	1.9	2.0
	423	1'937	1.79	1.3	1.6	1.7
	426	18'051	1.80	2.6	1.9	2.0
	432	4'382	1.63	1.3	1.6	1.7
	436	2'116	1.01	1.3	1.2	1.3
Catégorie train routier		50'841	1.77	2.2	1.8	1.9
Autocar	520	9'318	2.46	-	2.5	2.5
	530	1'852	1.16	-	1.2	1.2
Catégorie autocar		11'170	2.25	-	2.3	2.3
Facteur global sans autocar		141'723	1.43	1.3 ou 1.5	1.5	1.5
Facteur global avec autocar		152'893	1.49	-	1.5	1.6

Le projet de recherche [11] avait également pour but de proposer des facteurs d'équivalence dans l'optique de l'augmentation de la limite à 40 tonnes. Sur la base des données à disposition relatives à l'introduction de la limite à 34 tonnes (2000-2001), certaines hypothèses ont été émises afin de déterminer une première tendance quant à l'évolution des charges attendues. Les variations induites par l'introduction des 34 tonnes n'étaient toutefois pas identiques sur l'ensemble du réseau :

- Au Gotthard, l'augmentation de la limite s'est fait ressentir dès mars 2001, avec des facteurs d'équivalence plus élevés qu'en 2000, en raison d'un trafic essentiellement international.
- Au contraire, à Mattstetten, les facteurs étaient similaires entre 2000 et 2001, cette station reflétant plutôt le trafic interne suisse.

Sur la base de ces observations, plusieurs prévisions ont été formulées pour établir les facteurs d'équivalence proposés pour la limite à 40 tonnes :

- Les camions et les autocars ne pourront pas être plus chargés en raison des limites de charges par essieu.
- Les tracteurs à sellette de type 321 () seront moins chargés et moins utilisés. Ils devraient être remplacés par les types 326 et 329 (, ), qui peuvent transporter de plus lourdes charges sans enfreindre la limite par essieu.
- Pour les trains routiers, l'ensemble des types devrait être plus chargé avec l'augmentation de la limite à 40 tonnes, résultant en un effet endommageant plus important.

Ces prévisions ont conduit à une proposition des facteurs d'équivalence par classes de véhicules (Tab. 6) en prévision de l'introduction de la limite à 40 tonnes qui a été retenue lors de l'actualisation de la norme SN 640 320 en 2011 [1]. Sur la base de ces facteurs établis pour des sections d'autoroutes, de nouveaux facteurs pour les autres types de route ont été proposés. Les données WIM n'étant disponibles que pour les autoroutes, ces propositions se basaient sur les comptages routiers menés par l'OFROU en 1995 et 2000. Seules les catégories de véhicules ont été utilisées, sans analyse détaillée des types de véhicules. Les charges par essieu ont été admises constantes, ce qui a permis d'utiliser les facteurs d'équivalence établis sur autoroutes pour les 4 catégories (moyennes pondérées de chaque type de véhicules composant la catégorie). Les comptages routiers fournissaient quant à eux la répartition de ces 4 catégories. Sur les routes principales (et les routes de liaison), les trains routiers et les tracteurs à sellette étaient par exemple moins fréquents. Les facteurs proposés ont également été inscrits dans la norme lors de la mise à jour de 2011, comme présenté dans le chapitre 2.2 (Tab. 3).

Dans leurs conclusions, les auteurs de l'étude rappelaient toutefois que l'utilisation de ces facteurs globaux (par type de routes, par catégories de véhicule) pour le calcul du trafic pondéral équivalent ne devait être envisagée que dans des situations standards de trafic et pour fournir une estimation de celui-ci. Dans bien des cas, des conditions locales influencent fortement les charges et la répartition (part) du trafic poids lourds. Aussi, une analyse détaillée du trafic lourd est recommandée, dans la mesure du possible, en tenant notamment compte de la direction du trafic, cette dernière pouvant influencer le remplissage des véhicules. La norme de 2000 [2] recommandait d'ores et déjà de n'utiliser le facteur d'équivalence global par type de route que dans le cas où les données de trafic ne pouvaient être obtenues.

3 Méthodes de calcul

Plusieurs méthodes de calcul permettent de déterminer les facteurs d'équivalence du trafic lourd dont notamment :

- Les formules et tableaux du guide AASHTO [13].
- La formule d'Eisenmann (OCDE).
- Les essais en vraie grandeur (par ex : Projet FORCE).
- Le calcul théorique du dommage avec des modèles de mécanique des chaussées (multicouche, éléments-finis, etc.) [27].

Dans le cadre de la présente étude, le choix de la méthode de calcul des facteurs d'équivalence s'est porté sur la méthode du guide AASHTO [13] pour les raisons suivantes :

- Méthode de calcul utilisée pour la norme suisse en vigueur [1].
- Continuité par rapport aux évaluations précédentes (notamment mandat de recherche [11]).
- Divergences significatives entre les différentes méthodes de calcul dans le cas des structures rigides.

3.1 Méthode de calcul AASHTO

3.1.1 Chaussées souples et semi-rigides

Trafic pondéral équivalent

L'équation issue du guide AASHTO [13] qui permet de déterminer le trafic pondéral équivalent est la suivante (chaussées souples et semi-rigides) :

$$\log_{10}(W_{jt}) = Z_R \cdot S_o + \log_{10}(\rho_j) + \frac{G_t}{\beta_j} + 2.32 \cdot \log_{10}(M_r) - 8.07 \quad (1)$$

avec :

- W_{jt} : le nombre d'applications de la configuration de charge et d'essieu j à la fin de la durée de service t .
- Z_R : écart-type de la distribution normale (risque accepté).
- S_o : erreur-type combinée de la prédiction du trafic et de la prédiction de la performance.

$$\log_{10}(\rho_j) = 5.93 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 4.79 \cdot \log_{10}(L_j + A_j) + 4.33 \cdot \log_{10}(A_j) \quad (2)$$

$$SN : \text{Structural Number} : SN = \sum_i a_i \cdot D_i \cdot m_i \quad (3)$$

- a_i : valeur de portance de la couche i (~valeurs de portance selon SN 640 324 [4], tab. 7, divisées par 10).
- D_i : épaisseur de la couche i exprimée en pouces.
- m_i : coefficient de drainage de la couche i .
- L_j : charge de l'essieu j exprimée en kips, $1 \text{ kN} = 0.225 \text{ kips}$.
- A_j : configuration de l'essieu j (simple : $A = 1$; tandem : $A = 2$; tridem : $A = 3$).

$$G_t = \log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right) \quad (4)$$

- ΔPSI est la différence de l'indice PSI à l'état initial (p_0) et à la fin de la durée de service (p_t). $\Delta PSI = p_0 - p_t$
- La valeur de 4.2 représente la valeur de l'indice PSI à l'état initial de l'essai AASHO.

- La valeur de 1.5 est une valeur par défaut de l'indice PSI minimale admise (excepté cas particuliers).

$$\beta_j = 0.4 + \frac{0.081 \cdot (L_j + A_j)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \cdot A_j^{3.23}} \quad (5)$$

- M_r : module d'élasticité du sol support obtenu en laboratoire exprimé en psi.

Facteurs d'équivalence

Le facteur d'équivalence k_j , pour une configuration de charge et d'essieu j donnée, est défini par l'expression suivante :

$$k_{jt} = \frac{W_{18t}}{W_{jt}} \quad (6)$$

W_j est le nombre d'applications d'une configuration de charge et d'essieu j donnée engendrant un dommage structurel sur la chaussée équivalent à un nombre d'applications d'une charge de 18 kips (8.16 tonnes, $L_j = 18$ kips) W_{18} , pour un essieu simple ($A_j = 1$).

L'équation (6) après simplification (élimination des termes invariables Z_R ; S_0 ; M_r) s'exprime comme suit :

$$\log_{10}(k_{jt}) = \left[\left(\log_{10}(\rho_{18}) - \log_{10}(\rho_j) + \left(\frac{G_t}{\beta_{18}} - \frac{G_t}{\beta_j} \right) \right) \right] \quad (7)$$

avec :

$$\log_{10}(\rho_{18}) - \log_{10}(\rho_j) = 4.79 \cdot \left[\log_{10}(L_j + A_j) - \log_{10}(18 + 1) \right] - 4.33 \cdot \log_{10}(A_j)$$

d'où :

$$k_{jt} = \frac{\left[\frac{(L_j + A_j)^{4.79}}{19} \right]}{A_j^{4.33}} \cdot \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)^{\left(\frac{1}{\beta_{18}} - \frac{1}{\beta_j} \right)} \quad (8)$$

3.1.2 Chaussées rigides et combinées

Trafic pondéral équivalent

L'équation issue du guide AASHTO [13] qui permet de déterminer le trafic pondéral équivalent est la suivante (chaussées rigides et combinées) :

$$\log_{10}(W_{jt}) = Z_R \cdot S_o + \log_{10}(\rho_j) + \frac{G_t}{\beta_j} + \gamma \quad (9)$$

avec :

- W_{jt} : le nombre d'applications de la configuration de charge et d'essieu j à la fin de la durée de service t .
- Z_R : écart-type de la distribution normale (risque accepté).
- S_o : erreur-type combinée de la prédiction du trafic et de la prédiction de la performance.
- $\log_{10}(\rho_j) = 5.85 + 7.35 \cdot \log_{10}(D + 1) - 4.62 \cdot \log_{10}(L_j + A_j) + 3.28 \cdot \log_{10}(A_j)$ (10)
- D : épaisseur de la dalle de béton exprimée en pouces.
- L_j : charge de l'essieu j exprimée en kips, $1 \text{ kN} = 0.225 \text{ kips}$.

- A_j : configuration de l'essieu j (simple : $A = 1$; tandem : $A = 2$; tridem : $A = 3$).
- $G_t = \log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)$ (11)
- ΔPSI est la différence de l'indice PSI à l'état initial (p_0) et à la fin de la durée de service (p_t). $\Delta PSI = p_0 - p_t$
- La valeur de 4.5 représente la valeur de l'indice PSI à l'état initial de l'essai AASHO.
- La valeur de 1.5 est une valeur par défaut de l'indice PSI minimale admise (excepté cas particuliers).
- $\beta_j = 1 + \frac{3.63 \cdot (L_j + A_j)^{5.2}}{(D + 1)^{8.46} \cdot A_j^{3.52}}$ (12)
- γ : partie de l'équation invariable en fonction de la charge, $f(p_t, S'_c, C_d, D, J, E_c, k)$.
- S'_c : module de rupture du béton utilisé exprimé en psi.
- C_d : coefficient de drainage.
- J : coefficient de transfert de charges.
- E_c : module d'élasticité du béton utilisé exprimé en psi.
- k : module de réaction du sol support exprimé en pci.

Facteurs d'équivalence

Le facteur d'équivalence k_j , pour une configuration de charge et d'essieu j donnée, est défini par l'expression suivante :

$$k_{jt} = \frac{W_{18t}}{W_{jt}} \quad (13)$$

W_j est le nombre d'applications d'une configuration de charge et d'essieu j donnée engendrant un dommage structural sur la chaussée équivalent à un nombre d'applications d'une charge de 18 kips (8.16 tonnes, $L_j = 18$ kips) W_{18} , pour un essieu simple ($A_j = 1$).

L'équation (13), après simplification (élimination des termes invariables Z_R ; S_0 ; γ), s'exprime comme suit :

$$\log_{10}(k_{jt}) = \left[\left(\log_{10}(\rho_{18}) - \log_{10}(\rho_j) + \left(\frac{G_t}{\beta_{18}} - \frac{G_t}{\beta_j} \right) \right) \right] \quad (14)$$

avec :

$$\log_{10}(\rho_{18}) - \log_{10}(\rho_j) = 4.62 \cdot \left[\log_{10}(L_j + A_j) - \log_{10}(18 + 1) \right] - 3.28 \cdot \log_{10}(A_j)$$

d'où :

$$k_{jt} = \frac{\left[\frac{(L_j + A_j)}{19} \right]^{4.62}}{A_j^{3.28}} \cdot \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)^{\left(\frac{1}{\beta_{18}} - \frac{1}{\beta_j} \right)} \quad (15)$$

4 Données trafic

4.1 Stations Weigh-in-motion

Sur l'ensemble du territoire suisse, on dénombre en janvier 2016 5 installations de pesage en marche (Weigh-in-motion, WIM) propriétés de l'OFROU en fonction (Denges, St-Maurice, Oberbüren, Gotthard et Monte Ceneri). L'OFROU récolte également les données de 10 stations WIM du système de redevance poids lourds (RPLP) de l'administration fédérale des douanes (AFD). Ces données sont à disposition pour ce projet (Fig. 6).

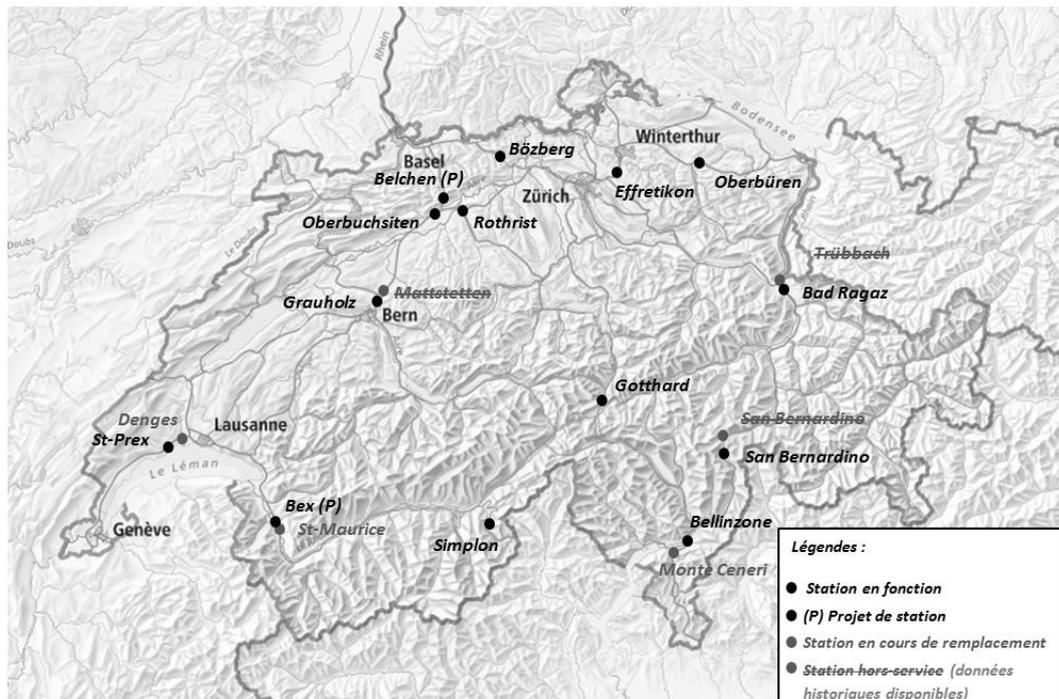


Fig. 6 Carte du réseau de stations WIM, base de carte : map.geo.admin.ch

Comme discuté au chapitre 1.2, les facteurs d'équivalence de la normalisation actuellement en vigueur font référence au projet de recherche VSS 14/96 [11] qui est basé sur des données du début des années 2000. Pour cette raison, dans le cadre de ce projet, il a été décidé d'analyser les données à disposition des années 2000 à 2015 (Tab. 7) afin d'évaluer l'évolution potentielle de ces facteurs d'équivalence. Le format de données est détaillé en annexe (Annexe II.1).

Les stations du tunnel du Gotthard (402), de Denges (405-406) et de Monte Ceneri (408-409) sont, de par la disponibilité de données datant du début des années 2000, celles qui permettent le mieux d'appréhender l'évolution des facteurs d'équivalence. C'est pourquoi, dans les exemples présentés graphiquement ou dans les tableaux du présent rapport, celle-ci sont abondamment considérées.

Il est important de souligner que la station du Gotthard bénéficie d'une vérification annuelle (calibration) et d'une exploitation dans un environnement très stable (situation en tunnel). Ces conditions en font une source de données très fiable, d'autant plus que les résultats des vérifications de ces dernières années y démontrent une grande stabilité (sans corrections). Pour ces raisons, cette station peut être considérée comme référence.

Tab. 7 Stations WIM et données analysées

Station	Années analysées															
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
402 Gotthard	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
405 Denges, dir. Lausanne	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
406 Denges, dir. Morges	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
408 Monte Ceneri, dir. Bellinzone			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
409 Monte Ceneri, dir. Chiasso			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
410 Oberbüren			X	X	X	X	X									
413 Mattstetten, dir. Zürich						X	X	X	X	X	X					
414 Mattstetten, dir. Berne						X	X	X	X	X	X					
415 Oberbüren, dir. St-Gall							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
416 Oberbüren, dir. Zürich							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
417 Trübbach, dir. Coire							X	X	X	X						
418 Trübbach, dir. Margrethen							X	X	X	X						
421 St-Maurice, dir. Sion										X	X	X	X	X	X	X
422 St-Maurice, dir. Lausanne										X	X	X	X	X	X	X
423 San Bernardino										X	X	X	X	X		
425 Oberbuchsitzen													X	X	X	X
427 Bözberg, dir. Zürich												X	X	X	X	X
428 Bözberg, dir. Bäle												X	X	X	X	X
429 St-Prex, dir. Lausanne												X	X	X	X	X
430 St-Prex, dir. Genève												X	X	X	X	X
431 Grauholz, dir. Zürich													X	X	X	X
432 Grauholz, dir. Bern													X	X	X	X
433 Effretikon, dir. Winterthur														X	X	X
434 Effretikon, dir. Zürich													X	X	X	X
435 Rothrist															X	X
436 Bellinzone															X	X
437 Bad Ragaz, dir. Zürich															X	X
438 Bad Ragaz, dir. Coire															X	X
439 San Bernardino, dir. Coire																X
440 San Bernardino, dir. Bellinzone																X
441 Simplon, dir. Brig																X
442 Simplon, dir. Gondo																X

4.2 Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)

Les installations de comptage automatique de la circulation routière sont réparties sur l'ensemble du réseau routier suisse (Fig. 7). En mars 2015, l'Office fédéral des routes (OFROU), propriétaire de ces installations, dénombre 538 stations dont 370 sur le réseau de base des routes nationales.

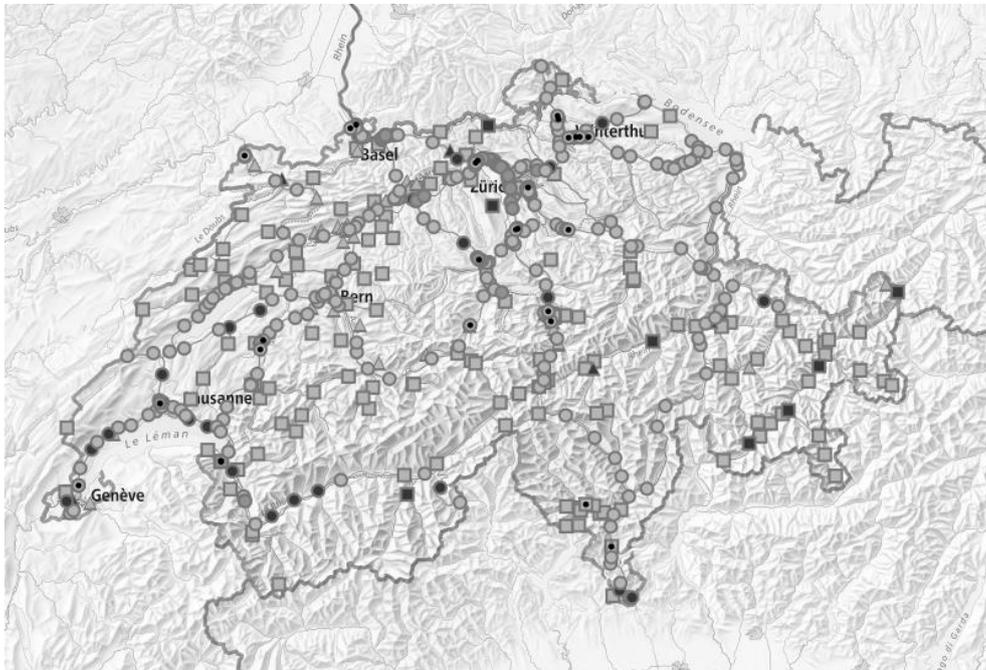


Fig. 7 Carte du CSACR, map.geo.admin.ch

Les stations CSACR collectent les informations de tous les passages de véhicules par des capteurs intégrés dans la chaussée. Le format des fichiers de données est détaillé en annexe (Annexe II.2).

Selon la méthodologie décrite au chapitre 5 (Fig. 10), les données CSACR sont utilisées afin de déterminer les facteurs d'équivalence pour les routes principales (RP) et les routes de liaison (RL). Pour cela, quatre ensembles de données CSACR sont comparés :

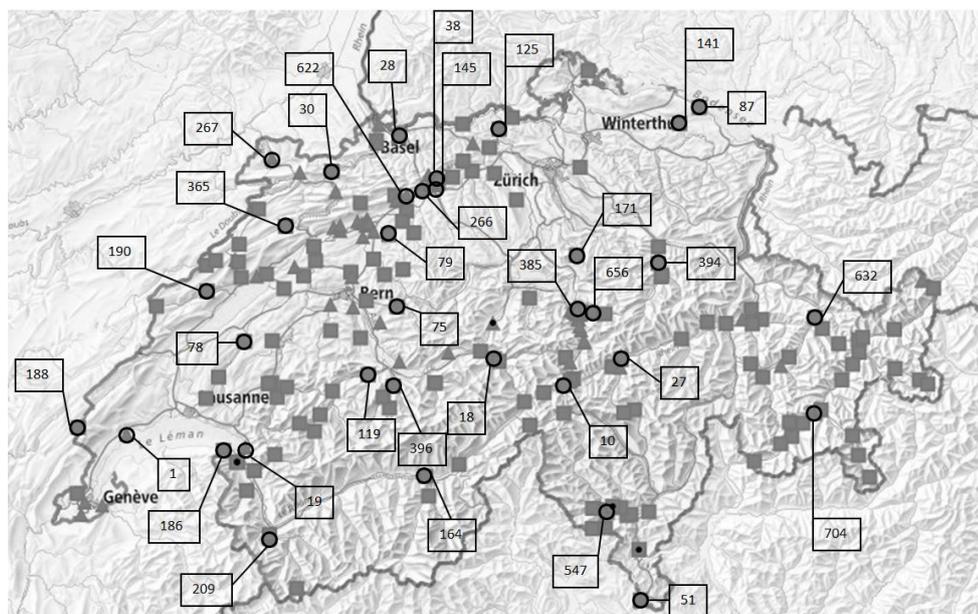
- Ensemble des stations dont les rapports annuels sont disponibles en 2014 (soit 295 stations).
- Stations sur autoroutes (rapport 2014 disponible, 153 stations).
- Sélection de stations représentatives des routes principales, voir détail ci-dessous.
- 10% de stations hors autoroutes présentant le facteur d'équivalence global le plus faible (14 stations). On admet que les 10% des valeurs inférieures des routes instrumentées au CSACR peuvent correspondre, par hypothèse sécuritaire, aux valeurs des routes de liaison qui elles, ne disposent en principe pas d'installations de comptage CSACR.

La sélection des stations représentatives (Tab. 8, Fig. 8) pour les routes principales (RP) est, dans la mesure du possible, établie selon les critères suivants :

- Répartition géographique représentative.
- Axes principaux avec trafic régional potentiellement important (hypothèse sécuritaire).
- Station disponible avec classification « Swiss 10 ».

Tab. 8 Sélection de stations CSACR représentatives (RP)

N° Route	Canton	Station	N° Station	Rapport 2014 disponible
H2	AG	Aarburg	145	X
H5	AG	Würenlingen	125	X
H1	BE	Seeberg	79	X
H6	BE	Meiringen, Lammi	18	X
H10	BE	Bowil, Bori	75	X
H11	BE	Erlenbach im Simmental	119	X
H223	BE	Reichenbach	396	
	BE	Corgémont	365	X
H2	BL	Frenkendorf – Füllinsdorf	28	
H17	GL	Glarus	394	X
H19	GR	Diesentis	27	X
H27	GR	St. Moritz, Charnaduera	704	
	GR	Davos, Laret	632	
H6	JU	Courchavon	267	
H18	JU	Soyhières	30	X
H10	NE	Noirague, Clusette	190	X
H5	SO	Hägendorf	266	
H5	SO	Oberbuchsitzen	622	X
H5	SO	Starrkirch	38	X
H8	SZ	Sattel	171	
H13	TG	Güttingen	87	X
H14	TG	Sulgen	141	X
H13	TI	Ascona Galleria	547	
H394	TI	Stabio	51	X
H2	UR	Hospental, St. Gotthard	10	
H17	UR	Spiringen	656	X
K2	UR	Aldorf	385	X
(K1) RC 1a	VD	Rolle	1	
(H123) RC 19a	VD	La Cure	188	X
(H1) RC 601a	VD	Payerne	78	X
(K9) RC 780a	VD	Villeneuve	19	X
H9	VS	Visp	164	X
H21	VS	Martigny, Le Brocard	209	X
H21	VS	St-Gingolph	186	X

**Fig. 8** Sélection de stations CSACR représentatives (RP).

4.3 Classification Swiss

Dans le cadre de cette étude, les informations qui, de manière spécifique, nous intéressent sont relatives aux poids lourds et notamment à leur classification Swiss 10. Cette classification, définie dans la directive des postes de comptage de trafic [10], permet de distinguer différentes classes de véhicules (Tab. 9).

Tab. 9 Classes de véhicules Swiss 10 [10]

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 : Voiture de tourisme avec remorque		
5 : Voiture de livraison	4 : Voiture de livraison	
6 : Voiture de livraison avec remorque		
7 : Voiture de livraison avec galerie		
1 : Bus, car	1 : Bus, car	2 : Véhicules assimilables à des camions (véhicules > 3.5 t)
8 : Camion	5 : Camion	
9 : Train routier	6 : Train articulé + véhicule articulé	
10 : Véhicule articulé		

Entre 2003 et 2007, un changement de classification a été opéré sur les postes de comptage CSACR et sur les stations WIM. Certaines données historiques font appel à la classification antérieure Swiss 7 qui est définie de la manière suivante :

Tab. 10 Classes de véhicules Swiss 7 [14]

Saisie des classes selon le schéma «Swiss 7 »	Saisie pour la gestion du trafic
Motocycle	1 : Véhicules assimilables à des VT (véhicules < 3.5 t)
1 : Voiture de tourisme et voiture de livraison	
2 : Voiture de tourisme et voiture de livraison avec remorque	
3 : Bus, car	2 : Véhicules assimilables à des camions (véhicules > 3.5 t)
4 : Camion	
5 : Train routier	
6 : Véhicule articulé	
7 : Véhicules spéciaux (hors classification poids lourds (CSF))	

5 Méthodologie

Le présent chapitre introduit la méthodologie de détermination des facteurs d'équivalence. La méthodologie est détaillée sous forme d'une approche ascendante (bottom-up), c'est-à-dire depuis le niveau le plus détaillé (procédure « charge par essieu ») au plus global (procédure « type de route »).

5.1 Autoroutes

Dans le cas des autoroutes, les données récoltées sur le réseau de stations de pesage en marche (Chap. 4.1) permettent d'inventorier toutes les silhouettes potentielles de poids lourds. Cette analyse est effectuée sur l'ensemble des véhicules de 2 à 6 axes (soit 62 silhouettes potentielles, annexe I.2). Les véhicules de 7 axes et plus représentant une part très faible du trafic poids lourds (0.5%⁷), ils ne sont pas considérés dans les analyses.

La répartition par silhouettes permet de déterminer les silhouettes prédominantes, que l'on définit comme étant celles représentant une part de plus de 1% du trafic poids lourds total (Chap. 7.3.2), et leurs facteurs d'équivalence respectifs (classes de véhicules lourds), puis, par agrégation, de déterminer les facteurs d'équivalence des catégories de véhicules lourds et finalement le facteur d'équivalence par type de route.

On propose, sur autoroutes, la méthodologie globale suivante :

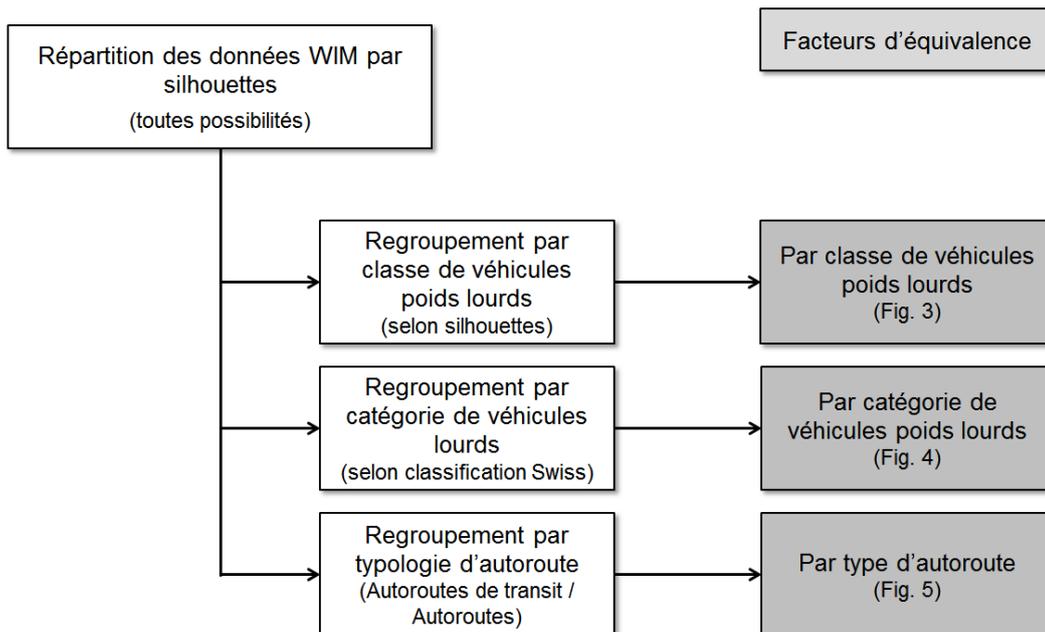


Fig. 9 Méthodologie du cas « autoroutes ».

Les autoroutes sont séparées en deux types de route à grand débit (RGD) distincts à savoir les autoroutes de transit et les autoroutes. Cette différenciation, établie en fonction des caractéristiques du trafic (international, national), est déterminée au chapitre 7.7.1.

⁷ Hors données de Bad Ragaz (437), voir chap. 7.3.1.

5.2 Autres types de route

Le réseau des stations WIM à disposition ne s'étendant qu'au réseau des routes nationales (autoroutes), on propose d'utiliser sur les autres routes (RP, RL) la base de données du comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR).

La méthodologie retenue est la suivante :

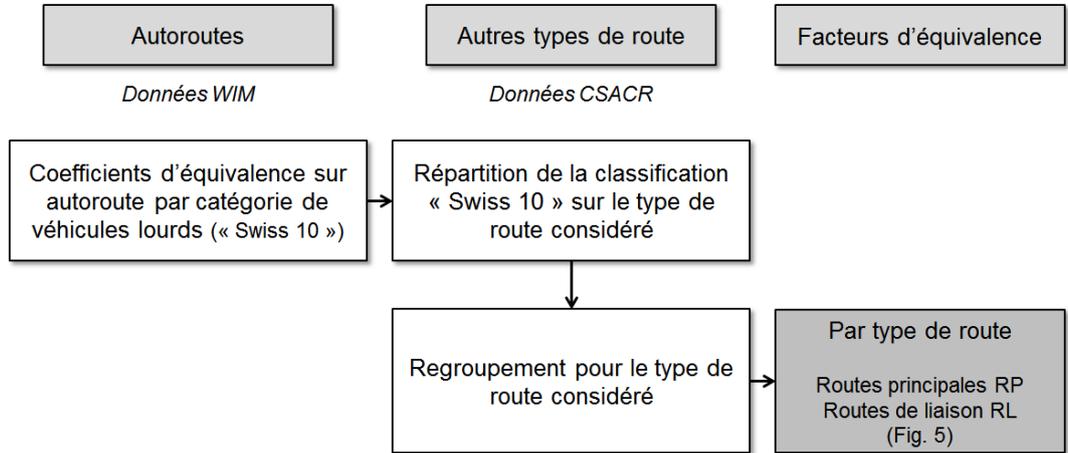


Fig. 10 Méthodologie du cas « autres types de route ».

6 Conditions d'application de la méthodologie

6.1 Sensibilité des facteurs d'équivalence aux hypothèses de la méthode de calcul

6.1.1 Rapport de recherche VSS No. 1017 [11]

Les hypothèses du rapport de recherche VSS No. 1017 sont exposées ci-dessous puis discutées au chapitre 6.1.2.

Chaussées souples et semi-rigides

L'équation (8) décrite au chapitre 3.1.1 est identique à celle proposée dans le rapport [11] (Equation 15, p. 111) avec les hypothèses suivantes :

$\Delta PSI = 4.2 - 2.5$:

- ΔPSI est la différence de l'indice PSI à l'état initial (p_0) et à la fin de la durée de service (p_t). $\Delta PSI = p_0 - p_t$
- La valeur de 4.2 représente la valeur de l'indice PSI à l'état initial de l'essai AASHO.
- La valeur de 2.5 est une valeur fixée par hypothèse.

Une seconde hypothèse concernant les valeurs β (équation (5), chap. 3.1.1) est proposée :

- $SN = 3.0$

Le SN de 3.0 selon la méthode AASHTO équivaut à un SN_{CH} d'environ 76 selon la norme SN 640 324 [4].

Chaussées rigides et combinées

L'équation (15) décrite au chapitre 3.1.2 est identique à celle proposée dans le rapport [11] (Equation 30, p. 115) avec les hypothèses suivantes :

$\Delta PSI = 4.5 - 2.5$:

- ΔPSI est la différence de l'indice PSI à l'état initial (p_0) et à la fin de la durée de service (p_t). $\Delta PSI = p_0 - p_t$
- La valeur de 4.5 représente la valeur de l'indice PSI à l'état initial de l'essai AASHO.
- La valeur de 2.5 est une valeur fixée par hypothèse.

Une seconde hypothèse concernant les valeurs β (équation (12), chap. 3.1.2) est proposée :

- $D = 10$ [pouces]

Cela équivaut à une épaisseur de dalle d'environ 25 cm.

6.1.2 Discussion des hypothèses

La normalisation en matière de trafic pondéral équivalent doit pouvoir être utilisée non seulement dans le cas d'autoroutes mais également de routes principales (RP) et de routes de liaison (RL). En effet, les valeurs des facteurs d'équivalence dans le cas des procédures « Charge par essieu », « Classes de véhicules lourds » et « Catégories de véhicules lourds » ne sont pas différenciées en fonction du type de route.

La pertinence des hypothèses prises en compte dans la détermination des facteurs d'équivalence doivent être vérifiées, et ce, pour tous les types de route.

Etat de la chaussée à la fin de la durée de service

L'indice de viabilité, Present Serviceability Index (PSI) se calcule de la manière suivante pour les chaussées souples :

$$PSI = 5.03 - 1.91 \cdot \log(1 + \overline{SV}) - 0.01\sqrt{C + P} - 1.38RD^2$$

où :

- \overline{SV} : moyenne de la variance de la pente de la chaussée (uni longitudinal).
- C : fissuration (unités : longueur dégradée par unité de surface, ft/1000 ft²).
- P : réparation des arrachements (pelades, nids de poules) (unités : surface dégradée par unité de surface, ft²/1000 ft²).
- RD : profondeur moyenne d'ornières (unités : pouces) (uni transversal).

Le PSI varie de 0 (très mauvais) à 5 (excellent). Les valeurs initiales (p_0) déterminées lors de l'essai AASHO sont de 4.2 pour les chaussées souples et 4.5 pour les chaussées rigides. Dans le guide AASHTO [13], des valeurs de 2.5 pour les autoroutes importantes respectivement de 2.0 pour les autoroutes avec volume de trafic moindre sont suggérées à la fin de la durée de service (p_t).

Dans le cadre du projet de recherche VSS 29/81 sur l'observation du comportement de tronçons de route [17], il s'est avéré que même à long terme, les tronçons des routes nationales observés atteignaient dans le cas le plus défavorable des valeurs de PSI de 2.8, avec une plus grande proportion aux alentours de 3.5 (chaussées bitumineuses, Fig. 11).

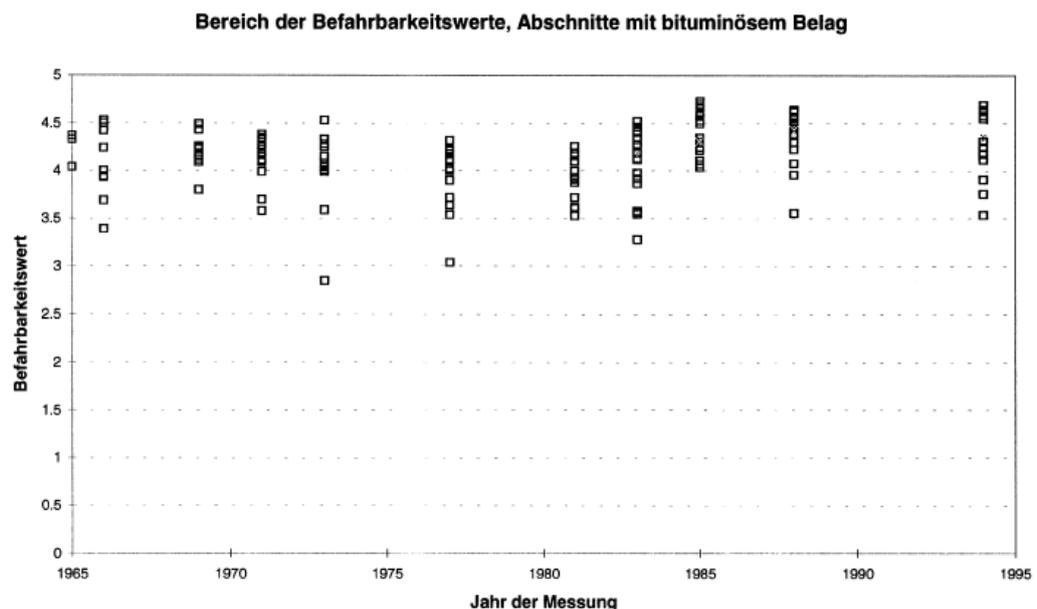


Fig. 11 Evolution du PSI sur les tronçons observés, chaussées bitumineuses [17].

Ce phénomène s'explique par le fait que des mesures d'entretien, notamment des resurfaçages (diminution des fissures en surface et des arrachements) ont été effectués et ont permis ainsi d'obtenir une note PSI plus élevée.

Pour les chaussées en béton observées, les valeurs rencontrées se situent aux environs de 3.7 avec quelques valeurs minimales autour de 2.5 (Fig. 12).

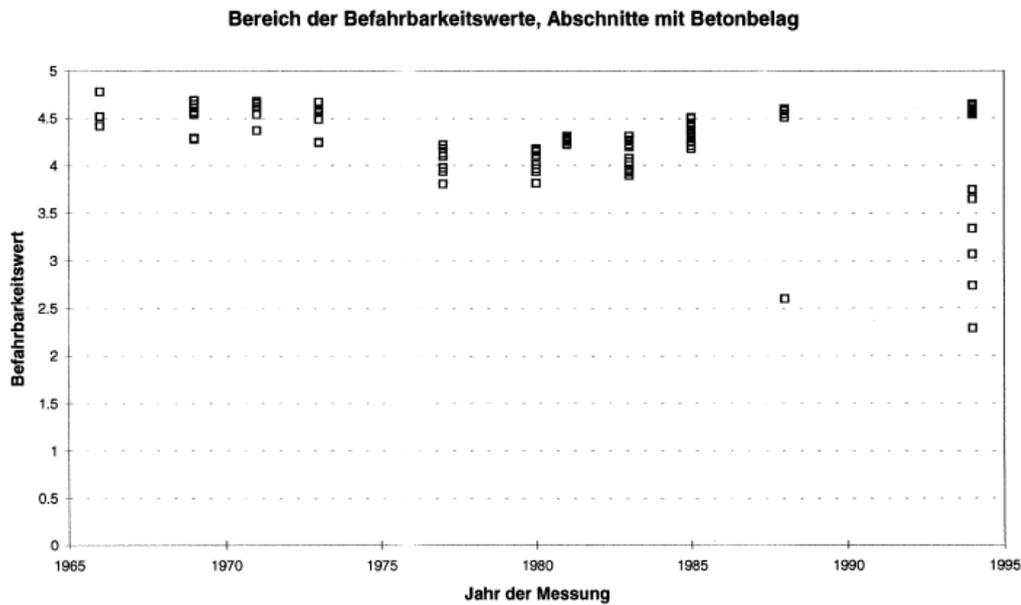


Fig. 12 Evolution du PSI sur les tronçons observés, chaussées en béton [17].

En conservant inchangée l'hypothèse sur les valeurs structurales du dimensionnement (SN = 3 ; D = 10), on analyse dans Tab. 11 et Tab. 12 l'effet de la valeur de l'état à la fin de la durée de service (p_t) sur les valeurs des facteurs d'équivalence par station. On considère :

- Pour les chaussées souples et semi-rigides : $p_t = 2.5$ et 3.5
- Pour les chaussées rigides et combinées : $p_t = 2.5$ et 3.7

On compare trois stations sur lesquelles des valeurs structurales de dimensionnement pourront être déterminées (Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15), pour les différentes catégories de poids lourds ainsi que pour la silhouette prédominante du trafic poids lourds  (Tab. 25).

Tab. 11 Comparaison des facteurs d'équivalence (chaussées souples et semi-rigides), cas « autoroutes »

Station WIM	Facteurs d'équivalence k ($p_t = 2.5 / p_t = 3.5$)					
		Camion	Train routier	Tracteur à sellette	Autocar	Global
402 Gotthard	2.49 / 2.60	0.58 / 0.75	2.10 / 2.35	2.22 / 2.38	2.41 / 2.14	2.05 / 2.19
405 Denges, dir. Lausanne	2.36 / 2.35	0.86 / 1.04	1.63 / 1.90	1.67 / 1.81	2.12 / 1.89	1.38 / 1.54
421 St-Maurice, dir. Sion	2.65 / 2.61	1.08 / 1.19	2.25 / 2.45	2.16 / 2.21	2.14 / 1.95	1.86 / 1.95

Tab. 12 Comparaison des facteurs d'équivalence (chaussées rigides et combinées), cas « autoroutes »

Station WIM	Facteurs d'équivalence k ($p_t = 2.5 / p_t = 3.7$)					
		Camion	Train routier	Tracteur à sellette	Autocar	Global
402 Gotthard	3.21 / 3.09	0.63 / 0.61	2.50 / 2.42	2.81 / 2.70	2.67 / 2.54	2.51 / 2.42
405 Denges, dir. Lausanne	2.95 / 2.77	1.09 / 1.01	1.79 / 1.73	2.00 / 1.89	2.34 / 2.22	1.63 / 1.54
421 St-Maurice, dir. Sion	3.37 / 3.20	1.39 / 1.30	2.55 / 2.46	2.65 / 2.51	2.38 / 2.27	2.24 / 2.13

On remarque tout d'abord (Tab. 12) que les facteurs d'équivalence selon les hypothèses de base ($D = 10$, $p_t = 2.5$) sont du côté de la sécurité pour les chaussées rigides et combinées. Pour les chaussées souples et semi-rigides (Tab. 11), on constate une différence maximum de 0.16 sur les facteurs d'équivalence globaux. Même si cette différence reste raisonnable, elle se situe du côté de l'insécurité. Toutefois, cela provient du fait que l'Office fédéral des routes souhaite une qualité de réseau routier élevée et intervient donc rapidement en termes de gestion de l'entretien, notamment sur les couches de roulement. Le maintien d'un indice de service élevé sur le réseau des routes nationales présente un intérêt économique à long terme. Cependant, cet aspect n'est pas abordé dans le cadre de ce mandat de recherche.

Etant donné que le présent mandat n'a pas pour but de déterminer la valeur réelle du PSI des routes nationales en fin de durée de service et que les différences obtenues entre l'hypothèse considérée ($p_t = 2.5$) et les mesures réalisées in-situ sont raisonnables, on conclut que l'hypothèse peut être conservée.

Valeurs structurelles de dimensionnement

La méthode de dimensionnement du guide AASHTO [13] consiste en un calcul itératif. En effet, la valeur structurelle (Structural Number, SN) permet :

- De déterminer le trafic pondéral équivalent total W_t qu'une structure de chaussée donnée peut supporter pour une durée de service t déterminée.
- De déterminer l'équivalence en ESAL (8.16 tonnes, essieu simple) d'une configuration de charge et d'essieu j donnée.

De ce fait, la valeur structurelle est nécessaire à la détermination du trafic pondéral avant que la chaussée ne soit à proprement parlé dimensionnée.

Afin d'éviter un calcul itératif du dimensionnement des chaussées et de permettre la détermination de facteurs d'équivalence, les hypothèses suivantes concernant les valeurs structurelles ont été énoncées dans [11] :

- $SN = 3.0$ [avec un facteur 10 sur les coefficients de portance, chap. 3.1.1]
- $D = 10$ [pouces]

Dans le but de confronter ces hypothèses aux valeurs structurelles usuelles en Suisse et de constater leur influence sur les facteurs d'équivalence, on propose :

- De déterminer les valeurs structurelles sur la base des épaisseurs du profil type des structures des routes nationales considérées.
- De déterminer l'éventail possible des valeurs structurelles de chaussées en fonction des profils types de chaussée de la norme de dimensionnement en vigueur SN 640 324 [4].

Valeurs structurelles de dimensionnement selon les profils-types réels

Les profils-types des chaussées au niveau des différentes stations WIM sont analysés. Toutefois, certains profils ne sont pas renseignés jusqu'au niveau de la fondation. Pour cette raison, il est uniquement possible de faire une estimation de la valeur structurelle SN dans les cas suivants :

- Gotthard (hors tunnel du côté Göschenen)
- Denges
- Saint-Maurice

Les tableaux suivants (Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15) présentent les profils de chaussée (état au 14.04.2016) ainsi que la valeur structurelle SN de la chaussée calculée sur la base des valeurs de portance (coefficient a) selon la norme SN 640 324 [4].

On considère les deux cas suivants pour ce calcul :

- À neuf : toutes les couches sont considérées neuves.
- Avec dégradations : les couches les plus récentes sont considérées neuves, les anciennes couches considérées avec dégradations locales.

Gotthard (Direction Zürich, hors tunnel)

Tab. 13 Profil de la chaussée et valeur structurelle, Gotthard

Couche	Épaisseur [cm]	Valeur de portance a	
		A neuf	En 2001
SMA11T (2001)	4.0	4.0	4.0
ACT22 (2001)	8.0	4.0	4.0
PB (1979)	10.5	4.0	3.4
FN (1979)	3.0	1.25	1.25
FNG100 (1979)	30.0	1.0	1.0
<i>Valeur structurelle SN :</i>		123.75	117.45

Denges (Direction Lausanne, voie de droite = voie centrale lorsque la bande d'arrêt d'urgence est ouverte à la circulation)

Tab. 14 Profil de la chaussée et valeur structurelle, Denges

Couche	Épaisseur [cm]	Valeur de portance a	
		A neuf	En 2010
PA11 (2010)	4.0	2.6	2.6
SAMI	1.0	-	-
ACEME22C1 (1999)	7.5	4.4	3.8
ACT25 (1963)	5.5	4.0	3.4
FNG100 (1963)	57.0	1.0	1.0
<i>Valeur structurelle SN :</i>		122.4	114.6

Saint-Maurice (Direction Sion, voie de droite)

Tab. 15 Profil de la chaussée et valeur structurelle, Saint-Maurice

Couche	Épaisseur [cm]	Valeur de portance a	
		A neuf	En 1998
PA11 (1998)	4.0	2.6	2.6
AC16 (1980)	1.0	4.0	3.4
AC16 (1980)	5.0	4.0	3.4
ACT25 (1980)	8.0	4.0	3.4
ACF50 (1979)	13.0	3.2	2.8
FNG100 (1979)	39.0	1.0	1.0
<i>Valeur structurelle SN :</i>		147.0	133.4

On remarque que sur les autoroutes considérées par les trois stations WIM analysées, les valeurs structurelles sont plus importantes (entre 50% et 95%) que la valeur sélectionnée pour hypothèse ($SN_{CH} = 76$).

En conservant inchangée l'hypothèse sur l'état de la chaussée à la fin de la durée service ($\Delta\text{PSI} = 4.2 - 2.5$, chaussées souples et semi-rigides), celle-ci étant valable pour des autoroutes importantes, on compare, en fonction des valeurs structurelles à neuf, les valeurs des facteurs d'équivalence par station.

Tab. 16 Comparaison des facteurs d'équivalence (chaussées souples et semi-rigides), cas « autoroutes »

Station WIM	Facteurs d'équivalence k (SN = 3 / SN à neuf)					
		Camion	Train routier	Tracteur à sellette	Autocar	Global
402 Gotthard	2.49 / 2.39	0.58 / 0.54	2.10 / 2.00	2.22 / 2.13	2.41 / 2.32	2.05 / 1.96
405 Denges, dir. Lausanne	2.36 / 2.23	0.86 / 0.80	1.63 / 1.53	1.67 / 1.57	2.12 / 2.02	1.38 / 1.29
421 St-Maurice, dir. Sion	2.65 / 2.60	1.08 / 1.04	2.25 / 2.17	2.16 / 2.09	2.14 / 2.14	1.86 / 1.80

On remarque (Tab. 16) une différence de 0 à 0.13 au maximum sur les facteurs étudiés. Cette différence est faible et de plus, les résultats obtenus sur la base de l'hypothèse (SN = 3) se situent du côté de la sécurité.

Valeurs structurelles de dimensionnement selon profils de chaussées de la norme de dimensionnement SN 640 324 [4]

Globalement, lorsque la valeur structurelle est supérieure à l'hypothèse (SN = 3, $\text{SN}_{\text{CH}} = 76$), les facteurs d'équivalence obtenus se situent du côté de la sécurité ($\rho_t = 2.5$).

Erforderlicher Strukturwert SN_{erf} in Funktion von Verkehrslastklasse Ti_{20} und Tragfähigkeitsklasse Si Valeur structurelle nécessaire SN_{erf} en fonction de la classe de trafic pondéral Ti_{20} et de la classe de portance Si			
Verkehrslastklassen Classes de trafic pondéral Ti_{20}	Tragfähigkeitsklassen Classes de portance Si		
	S2	S3	S4
Erforderlicher Strukturwert Valeur structurelle nécessaire SN_{erf}			
T1 ₂₀	59	50	41
T2 ₂₀	73	59	50
T3 ₂₀	87	73	59
T4 ₂₀	105	87	73
T5 ₂₀	123	105	87
T6 ₂₀	145	123	105

Fig. 13 Valeurs structurelles, SN 640 320 (Tab. 5) [4].

Le panel des chaussées en Suisse peut donc avoir des valeurs structurelles qui varient de 40 à plus de 150 (Fig. 13). Dans le cas de routes à faible trafic (Fig. 13, partie grisée), l'hypothèse sur les valeurs structurelles se situe du côté de l'insécurité.

De plus, sur ce type de route à faible trafic et notamment en localité, on peut accepter un niveau de service final faible ($\rho_t = 1.5$, faible trafic, faible vitesse). Par rapport à la situation sous les hypothèses du rapport [11], on se situe doublement du côté de l'insécurité. En effet, l'hypothèse $\rho_t = 2.5$ est également favorable par rapport à un niveau de service plus faible.

Afin de constater l'effet des hypothèses sur les facteurs d'équivalence par rapport à des situations extrêmes, on les calcule pour différents cas spécifiques (différentes valeurs de ρ_t et de SN respectivement D).

Facteurs d'équivalence pour une route locale à faible trafic

On admet le cas d'une route locale à faible trafic avec :

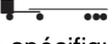
- $SN_{CH} = 40$
- $p_t = 1.5$

Avec l'hypothèse légitime que les charges des poids lourds restent inchangées qu'ils circulent sur un réseau autoroutier ou sur un réseau local, on effectue une comparaison pour les trois mêmes stations (Tab. 17). On limite la comparaison à ces trois stations car la tendance est similaire pour les autres stations.

Tab. 17 Comparaison des facteurs d'équivalence (chaussées souples et semi-rigides), cas « routes locales »

Station WIM	Facteurs d'équivalence k (selon hyp. / cas local)					Global
		Camion	Train routier	Tracteur à sellette	Autocar	
402 Gotthard	2.49 / 2.54	0.58 / 0.54	2.10 / 2.09	2.22 / 2.25	2.41 / 2.67	2.05 / 2.09
405 Denges, dir. Lausanne	2.36 / 2.52	0.86 / 0.84	1.63 / 1.61	1.67 / 1.72	2.12 / 2.35	1.38 / 1.40
421 St-Maurice, dir. Sion	2.65 / 2.81	1.08 / 1.09	2.25 / 2.28	2.16 / 2.25	2.14 / 2.35	1.86 / 1.92

Les différences obtenues sont relativement faibles excepté :

- Pour les autocars au Gotthard. Ceux-ci représentant en moyenne 12% des parts de véhicules lourds sur l'ensemble des stations CSACR en 2014, leur influence globale est donc limitée (9% au Gotthard).
- Pour la silhouette globalement prédominante  à Denges, direction Lausanne et St-Maurice, direction Sion. Sur ces stations spécifiques, sa part sur l'ensemble des véhicules poids lourds étant plus faible (12-13%), son influence globale est limitée.

La différence globale sur les facteurs d'équivalence entre la variante sous les hypothèses du rapport [11] et la variante « route locale à faible trafic » ($SN_{CH} = \sim 40$; $p_t = 1.5$) est de 2% à 3%. Bien que l'hypothèse soit du côté de l'insécurité, cela n'a, globalement, plus aucun effet une fois les valeurs arrondies à la décimale supérieure.

Comparaisons de cas pour chaussées rigides et combinées

Aucune station WIM n'est positionnée sur une chaussée en béton. Afin de constater l'influence des hypothèses émises dans le rapport [11], on les compare (Tab. 18) avec deux cas extrêmes réalistes :

- Cas théorique « autoroute » : épaisseur de béton maximale (Trafic pondéral équivalent total $W_n = 100'000'000$ ESAL ; portance S2), soit 310 mm avec $p_t = 2.5$.
- Cas théorique « route locale » : épaisseur de béton minimale ($W_n = 200'000$ ESAL ; portance S4), soit 150 mm avec $p_t = 1.5$.
- Hypothèses rapport [11] : $D = 10$ [pouces], soit 254 mm avec $p_t = 2.5$.

Tab. 18 Comparaison des facteurs d'équivalence (chaussées rigides et combinées)

Station WIM	Facteurs d'équivalence k (cas autoroute / cas route locale / hypothèse)					Global
		Camion	Train routier	Tracteur à sellette	Autocar	
402 Gotthard	3.25 / 3.27 / 3.21	0.64 / 0.64 / 0.63	2.52 / 2.53 / 2.50	2.84 / 2.86 / 2.81	2.71 / 2.72 / 2.67	2.54 / 2.55 / 2.51
405 Denges, dir. Lausanne	3.01 / 3.03 / 2.95	1.12 / 1.13 / 1.09	1.82 / 1.82 / 1.79	2.04 / 2.06 / 2.00	2.38 / 2.40 / 2.34	1.66 / 1.68 / 1.63
421 St-Maurice, dir. Sion	3.44 / 3.46 / 3.37	1.43 / 1.44 / 1.39	2.58 / 2.59 / 2.55	2.70 / 2.72 / 2.65	2.42 / 2.44 / 2.38	2.28 / 2.29 / 2.24

La différence globale sur les facteurs d'équivalence entre la variante sous les hypothèses du rapport [11] et les variantes décrites ci-dessus est de 1.5% à 3%. Bien que l'hypothèse soit du côté de l'insécurité, cela n'a, globalement, plus aucun effet une fois les valeurs arrondies à la décimale supérieure.

Conclusion

Sous les différentes considérations de ce sous-chapitre, on peut donc admettre que les hypothèses du rapport [11], qui sont également celles de la normalisation suisse actuellement en vigueur [1], peuvent être conservées.

6.2 Confiance dans les données

Le présent chapitre décrit les niveaux ou degrés de confiance dans les différentes bases de données à disposition. Cela permet de déterminer sur quelles bases les facteurs d'équivalence peuvent être calculés.

6.2.1 Données et calibrations WIM

La calibration des diverses stations WIM s'effectue régulièrement. Lors de chaque calibration, une quarantaine de véhicules par voie sont analysés. Un facteur de correction est appliqué si nécessaire sur les facteurs de calibration du système WIM en fonction des différences entre les charges mesurées de manière statique et dynamique. Le facteur de correction global est calculé selon l'équation suivante :

- $f = -0.5 \cdot (m_1 + m_2)$, facteur de correction [%].

où :

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{P_{i \text{ tot statique}}}{P_{i \text{ tot dynamique}}} \right)}{n}, \text{ moyenne des rapports de poids total [\%].}$$

- $P_{i \text{ tot statique}}$: poids total du véhicule lourd i mesuré statiquement (balance).
- $P_{i \text{ tot dynamique}}$: poids total du véhicule lourd i mesuré dynamiquement (WIM).
- n : nombre de véhicules lourds analysés.

$$m_2 = \frac{\sum_{j=1}^q \left(1 - \frac{P_{j \text{ essieu simple statique}}}{P_{j \text{ essieu simple dynamique}}} \right)}{q}, \text{ moyenne des rapports de poids par essieu simple [\%].}$$

- $P_{j \text{ essieu simple statique}}$: poids de l'essieu simple j du véhicule i mesuré statiquement (balance).
- $P_{j \text{ essieu simple dynamique}}$: poids de l'essieu simple j du véhicule i mesuré dynamiquement (WIM).
- q : nombre d'essieux simples analysés.

Si la valeur absolue du facteur de correction est plus importante que 2%, alors les facteurs de calibration sont adaptés. On nomme les facteurs de correction par type d'essieu (axe simple, axes regroupés) « facteurs de correction individuels ».

La variation des charges est, avec une bonne approximation, reliée à la variation des facteurs d'équivalence par la loi de puissance ($\alpha = 4$). Il en résulte qu'une déviation de $x\%$ sur la valeur de la charge engendre une variation de $\alpha \cdot x\%$ de la valeur du facteur d'équivalence.

On fixe les niveaux de confiance suivants, valables pour les facteurs de correction globaux et individuels de la dernière calibration par station :

- Très bon (✓✓), variation de 0.8% au maximum sur les charges, équivalente à une variation d'environ 3% sur les facteurs d'équivalence (± 0.1 pour un facteur d'équivalence de 3.0).
- Bon (✓), variation de 2% au maximum sur les charges, équivalente à une variation d'environ 8% sur les facteurs d'équivalence (± 0.25 pour un facteur d'équivalence de 3.0).
- Satisfaisant (O), variation de 3.2% au maximum sur les charges, équivalente à une variation d'environ 13% sur les facteurs d'équivalence (± 0.40 pour un facteur d'équivalence de 3.0).
- Mauvais (X), variation de plus de 3.2% sur les charges.

Ces niveaux de confiance permettent de déterminer quelles sont les données des stations WIM qui pourront être ou non utilisées comme données de référence. C'est-à-dire sur lesquelles la confiance dans le calcul des facteurs d'équivalence est la plus élevée.

Les dates des calibrations des stations WIM de même que leur niveau de confiance respectif sont renseignés ci-après (Tab. 19). On admet, dans le cadre de la proposition de facteurs d'équivalence actualisés, que :

- Les données de l'année précédant la calibration sont utilisées comme référence pour un niveau de confiance très bon ou bon.
- Les données de l'année suivant la calibration sont utilisées comme référence dans le cas :
 - D'un niveau de confiance très bon ou bon.
 - D'application d'un facteur de correction (niveau satisfaisant ou mauvais). Sous condition que le niveau de confiance obtenu après calibration soit très bon.

Exemples :

- Calibration en octobre 2015, niveau de confiance « Bon » → pas d'application d'un facteur de correction
Référence : données 2015
- Calibration en octobre 2014, niveau de confiance « Bon » → pas d'application d'un facteur de correction
Référence : données 2014 et données 2015
- Calibration en juillet 2014, niveau de confiance « Satisfaisant » → application d'un facteur de correction
Niveau de confiance « Bon » après calibration
Non référence
- Calibration en juillet 2014, niveau de confiance « Satisfaisant » → application d'un facteur de correction
Niveau de confiance « Très bon » après calibration
Référence : données août à décembre 2014 et données 2015

Tab. 19 Calibration des stations WIM

Stations	Dernière calibration	Niveau de confiance (avant év. calibration)	Utilisation données 2015
402 Gotthard	10/2015	✓	Oui
405 Denges, dir. Lausanne	09/2011	✓	
406 Denges, dir. Morges	09/2011	O	
408 Monte Ceneri, dir. Bellinzone			
409 Monte Ceneri, dir. Chiasso	09/2015	✓✓	Oui
415 Oberbüren, dir. St-Gall	07/2015	O	
416 Oberbüren, dir. Zürich	07/2015	✓✓	Oui
421 St-Maurice, dir. Sion	09/2014	X	Oui
422 St-Maurice, dir. Lausanne	09/2014	X	*
425 Oberbuchsitzen	10/2014	X	Oui
427 Bözberg, dir. Zürich	07/2015	✓✓	Oui
428 Bözberg, dir. Bâle	07/2015	X	
429 St-Prex, dir. Lausanne	07/2015	✓✓	Oui
430 St-Prex, dir. Genève	07/2015	X	
431 Grauholz, dir. Zürich	10/2014	X	Oui
432 Grauholz, dir. Bern	10/2014	X	*
433 Effretikon, dir. Winterthur	09/2014	X	*
434 Effretikon, dir. Zürich	09/2014	X	*
435 Rothrist	09/2015	✓	Oui
436 Bellinzone			
437 Bad Ragaz, dir. Zürich	09/2015	X	
438 Bad Ragaz, dir. Coire	09/2015	X	
439 San Bernardino, dir. Coire			
440 San Bernardino, dir. Bellinzone			
441 Simplon, dir. Brig			
442 Simplon, dir. Gondo			

Légende utilisation données 2015 :

Oui : Données 2015 utilisées comme référence

* : Facteur de correction après calibration > 0.8% (données non-utilisées)

Vide : Données non-utilisées

Exemple de l'effet d'une calibration sur les facteurs d'équivalence

Une des stations présentant le plus gros écart entre les charges mesurées statiquement et celles mesurées dynamiquement est la station 433, Effretikon N, direction Winterthur. La calibration de cette station a eu lieu le 10 septembre 2014.

Le site est composé de trois voies en direction de Winterthur dont deux voies instrumentées par des capteurs WIM, la voie centrale et la voie de droite.

L'écart le plus important est constaté sur la voie centrale (voie de dépassement) avec des mesures de charges statiques (balance) qui sont en moyenne 11% supérieures aux mesures de charges dynamiques (WIM). Il est à noter ici que les valeurs des facteurs d'équivalence obtenues sont plus faibles que les propositions (Tab. 27) pour deux raisons :

- La station d'Effretikon présente un facteur d'équivalence global faible (Fig. 29).
- Les poids lourds présents sur la voie de dépassement sont généralement moins chargés et donc les facteurs d'équivalence sont plus faibles.

On évalue la différence des facteurs d'équivalence par catégories de véhicules lourds sur la voie centrale par comparaison des données du 1^{er} septembre 2014 au 9 septembre 2014 (avant calibration) et du 11 septembre 2014 au 30 septembre 2014 (après calibration) (Tab. 20).

Tab. 20 Comparaison des facteurs d'équivalence par catégories de véhicules lourds, voie centrale, Effretikon, septembre 2014

Catégories de véhicules poids lourds	Chaussée souple et semi-rigide		
	Début septembre	Fin septembre	Différence
Camion	0.43	0.62	+ 44%
Train routier (Camion remorque)	0.99	1.29	+ 30%
Tracteur à sellette (Semi-remorque)	0.74	1.24	+ 67%
Autocar	1.14	1.87	+ 64%
Global	0.79	1.21	+ 53%

Par la relation de la loi de puissance ($\alpha = 4$), une variation sur les charges d'environ 11%, correspond à une différence de 52% sur les facteurs d'équivalence, ce qui est proche du résultat obtenu (Tab. 20).

Conclusion

Pour le calcul des facteurs d'équivalence, on considère comme référence les données des stations ayant la valeur « Oui » dans la colonne « Utilisation données 2015 » du Tab. 19.

Toutefois, la considération dans les calculs (Annexes III.2 et III.3) de toutes les données 2015 aboutit à des différences minimales par rapport aux calculs réalisés uniquement sur les données de référence. Pour cette raison, les résultats des deux calculs sont systématiquement représentés et les propositions d'actualisation des facteurs d'équivalence sont établies sur l'ensemble des données WIM 2015.

6.2.2 Données CSACR et classification Swiss

Taux d'exactitude de la classification Swiss

La fiabilité de la classification Swiss est définie dans la directive des postes de comptage [10]. On s'intéresse ici au taux d'exactitude qui est la base sur laquelle on peut admettre le seuil d'exactitude des données du comptage automatique (Tab. 21). Le taux d'exactitude est défini, sur au moins 1000 véhicules par voie, par le rapport entre la somme des véhicules par classe saisis automatiquement et la somme des véhicules de cette classe identifiés par contrôle visuel :

$$\text{Taux d'exactitude de la classe } i = \frac{\sum n_{i \text{ enregistré au CSACR}}}{\sum n_{i \text{ identifié visuellement}}}, n : \text{ nombre de véhicules}$$

Cette valeur ne tient donc pas compte des enregistrements faux-positifs (véhicule mal-classé ou véhicule « fantôme »). En effet, il s'agit ici d'une comparaison de la somme des véhicules de chaque classe entre une donnée enregistrée automatiquement et une donnée relevée visuellement et non d'une comparaison individuelle, véhicule par véhicule. Les stations de comptage peuvent donc enregistrer des véhicules dans une mauvaise catégorie ou enregistrer de fausses informations sans qu'elles ne soient directement détectées dans la détermination du taux d'exactitude.

Tab. 21 Taux d'exactitude de la classification « Swiss 10 » [10]

Classe	Taux d'exactitude	
	Valeur cible OFROU	Valeur minimale
1 : Bus, car	> 90%	> 75%
8 : Camion	> 95%	> 90%
9 : Train routier	> 95%	> 90%
10 : Véhicule articulé	> 95%	> 90%
Véhicules lourds de transport (Classes 8, 9 et 10)	> 95%	> 95%
Véhicules assimilables à des camions (Classes 1, 8, 9 et 10)	> 95 %	> 95%
Nombre total de véhicules (Classes 1 à 10)	> 99%	> 99%

Il est important de souligner que les taux d'exactitude sont définis pour un ensemble restreint mais déterminant de catégories de véhicules ou pour la totalité des véhicules.

6.2.3 Comparaison WIM – CSACR

Sur les axes routiers du Gotthard, du San Bernardino et sur l'axe Genève-Lausanne à la hauteur de Denges, un poste de comptage CSACR est à proximité d'une station WIM. Cela permet de comparer les mesures de ces deux types de comptage et leurs influences sur les valeurs des facteurs d'équivalence.

On effectue, pour chaque station, les comparaisons suivantes (année 2014) :

- Tab. 22 : Facteurs d'équivalence par catégories par rapport aux facteurs d'équivalence proposés pour l'actualisation de la normalisation (Tab. 27).
- Fig. 14 : Parts de véhicules lourds.
- Tab. 23 : Facteur d'équivalence global de la station WIM, facteur d'équivalence global rapporté de la station WIM (le terme rapporté est explicité ci-après), facteur d'équivalence global de la station CSACR.

Le terme rapporté, tel que décrit au chapitre 7.7.1, fait référence à une valeur moyenne calculée sur la base des parts des différentes catégories relevées sur la station WIM et des facteurs d'équivalence proposés par catégories (Tab. 27) et non plus des facteurs d'équivalence calculés sur la base des charges relevées à la station.

Cette valeur moyenne rapportée (WIM) est utilisée pour comparaison car les comptages CSACR ne permettent pas de connaître les charges des véhicules lourds et donc leurs facteurs d'équivalence. C'est pourquoi on utilise les parts des catégories de véhicules lourds et leurs facteurs d'équivalence proposés respectifs.

Tab. 22 Comparaison des facteurs d'équivalence par catégories de véhicules lourds

Catégories de véhicules poids lourds	Chaussée souple et semi-rigide (WIM 2014)			
	Proposition (Tab. 27)	Gotthard 2014	San Bernardino 2014	Denges 2014
Camion (8)	0.9	0.60	0.65	0.94
Train routier (9) (Camion remorque)	1.8	2.13	2.06	1.84
Tracteur à sellette (10) (Semi-remorque)	1.9	2.22	2.29	1.76
Autocar (1)	2.1	2.37	1.94	2.15

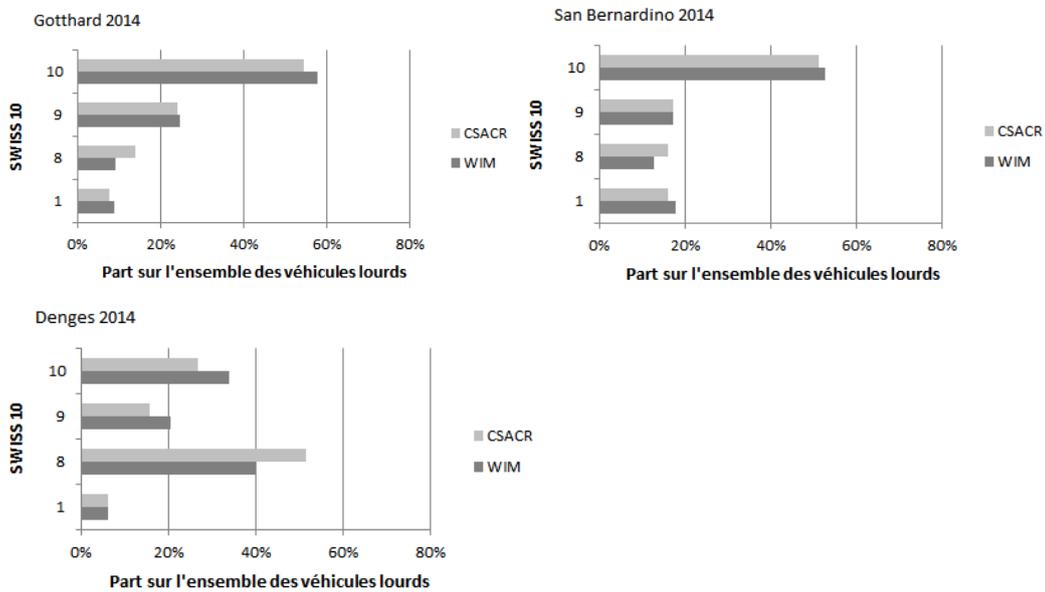


Fig. 14 Part de véhicules lourds par catégories, 2014

Tab. 23 Valeurs moyennes des facteurs d'équivalence globaux par station, 2014

Station	Chaussée souple et semi-rigide	Chaussée rigide et combinée
<i>Facteur global de la station WIM</i>		
Gotthard	2.06	2.52
San Bernardino	1.98	2.44
Denges	1.40	1.67
<i>Facteur global de la station WIM rapporté à Tab. 27</i>		
Gotthard	1.79	2.12
San Bernardino	1.78	2.10
Denges	1.46	1.76
<i>Facteur global du poste de comptage CSACR (basé sur Tab. 27)⁸</i>		
Gotthard	1.74	2.06
San Bernardino	1.74	2.06
Denges	1.33	1.64

On constate deux phénomènes (Tab. 23) :

- Les valeurs des facteurs d'équivalence globaux obtenus sur la base des données WIM (données de charge mesurées) sont plus élevées que celles obtenues sur la base des données CSACR.
- D'autre part, les facteurs globaux rapportés au Tab. 27 sont à nouveau supérieurs aux résultats obtenus sur la base des données CSACR.

Le premier phénomène, notamment visible sur les stations du Gotthard et de San Bernardino, s'explique par le fait que les valeurs individuelles des facteurs d'équivalence des catégories dominantes sont plus élevées sur ces deux stations que les valeurs sélectionnées pour le calcul basé sur les données CSACR (Tab. 22).

Le second phénomène s'explique par le fait que les classes de poids lourds ayant une valeur de facteur d'équivalence plus élevée (Swiss10 1, 9, 10) sont plus faiblement détectées au CSACR et qu'au contraire, la classe « camions » Swiss10 8 obtient une part plus importante (Fig. 14).

Cette seconde tendance est également décrite dans le rapport [18] de l'Office fédéral des transports (OFT) qui, dans une remarque préliminaire, présente une comparaison des données des stations de contrôle de la RPLP aux passages alpins par rapport aux données des comptages CSACR. Les différences sont notamment expliquées par le fait que de grands véhicules de tourisme ainsi que certaines fourgonnettes sont attribuées à la classe Swiss10 8 « camions », tout en relevant également que la part de tracteurs à sellette (nommés trains semi-remorques dans le rapport [18]) est sous-estimée.

Conclusions

Dans cette étude, on émet l'hypothèse d'une plus grande confiance dans les données des stations WIM pour les raisons suivantes :

- La classification Swiss10 utilisée est identique dans les deux types de données (CSACR et WIM).
- Les données WIM traitent uniquement des véhicules lourds (≥ 3.5 tonnes), alors que des véhicules légers, typiquement les camionnettes (fourgonnettes) ou camping-cars, peuvent être intégrés à des classes de véhicules lourds au CSACR (sur-détection de camions).

⁸ Les valeurs obtenues aux postes de comptage du Gotthard et de San Bernardino obtiennent les mêmes valeurs moyennes globales mais cela n'est que pure coïncidence. La répartition des parts des différentes catégories ne sont pas identiques.

- La détermination de facteurs d'équivalence par silhouettes, possible avec les données WIM, est plus précise que la détermination de facteurs d'équivalence par catégories de véhicules lourds (Classification Swiss10).
- Les tendances des résultats des stations WIM sont identiques à celles décrites dans le rapport [18].
- Les stations WIM sont régulièrement calibrées.

Dans le cadre de la détermination des facteurs d'équivalence globaux par type de route, des corrections des parts des catégories de véhicules lourds obtenues au CSACR seront appliquées (Chap. 7.7.2).

6.3 Intégrité et filtrage de données WIM

Sur la base des filtrages de données WIM effectués dans le cadre du projet de recherche AGB 2010/003 « Simulations de trafic intégrant la détermination d'indices de performance structurale » [21], des recherches menées au Laboratoire des voies de circulation de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LAVOC-EPFL) dans le cadre de l'analyse de la méthode suisse de dimensionnement [22] et de discussions avec le domaine du Monitoring du trafic de l'OFROU, une vérification de l'intégrité des données WIM et une méthodologie de filtrage ont été mises en place :

Intégrité des données :

- Détermination des fichiers journaliers d'enregistrements manquants ou de perte d'information temporaire.
- Vérification de la concordance des enregistrements WIM lors du dédoublement temporaire du fichier de données. (Il est régulier, un jour par année, d'avoir deux fichiers d'enregistrements avec un dédoublement des enregistrements). Le cas échéant, certaines informations sont supprimées (fichier le moins complet).

Filtrage des données (exclusions d'enregistrements du fichier de données) :

- Vérification des enregistrements par direction. A l'exception de cas particuliers, les stations WIM ne relèvent qu'une seule direction. Toutefois, des enregistrements dans la seconde direction apparaissent.
- Longueur totale enregistrée nulle.
- Longueur totale enregistrée supérieure à 26 m (limite légale : 18.75 m, excepté autorisations spéciales).
- Poids nul enregistré sur un des axes.
- Entraxe enregistré inférieur à 60 cm (deux demi-diamètres de pneus).
- Poids total enregistré supérieur à 65 tonnes (limite légale : 40 tonnes, excepté autorisations spéciales).
- Poids supérieur à 18 tonnes enregistré sur un des axes (limite légale 11.5 tonnes, excepté autorisations spéciales).
- Poids total enregistré inférieur à 3.5 tonnes (véhicule léger).

Ces filtres permettent de supprimer potentiellement les erreurs d'enregistrements des stations WIM et de limiter ainsi les incohérences sur les valeurs des facteurs d'équivalence. Leur éloignement par rapport aux limites légales permet de tenir compte d'éventuels convois spéciaux.

6.4 Typologie des routes

Dans la norme SN 640 320 [1], les facteurs d'équivalence par type de route sont donnés pour les quatre catégories suivantes :

- Facteur d'équivalence global pour le type de route « Routes à grand débit RGD, autoroutes de transit ».
- Facteur d'équivalence global pour le type de route « Routes à grand débit RGD, autoroutes ».
- Facteur d'équivalence global pour le type de route « Routes principales RP ».
- Facteur d'équivalence global pour le type de route « Routes de liaison RL ».

La différenciation entre les autoroutes de transit et autoroutes n'est pas explicitée dans la normalisation. Plutôt que de déterminer en préambule les autoroutes à classer « avec trafic de transit », on préfère se baser sur les résultats qui sont obtenus dans les chapitres qui suivent pour ce faire. Le lecteur est ainsi invité à consulter le chapitre 7.7.

7 Résultats d'analyses et recommandations d'actualisation

7.1 Preuve de la nécessité d'une actualisation des facteurs d'équivalence

Le rapport de recherche VSS 14/96 [11] mettait en évidence la probabilité que certaines silhouettes allaient évoluer tant du point de vue de leur utilisation (part sur l'ensemble du trafic poids lourds) que du point de vue de leurs chargements.

La silhouette prédominante du trafic poids lourds consiste en un tracteur à sellette composé d'un véhicule tracteur à deux axes et d'une remorque à trois axes (■—•—•••, Tab. 25). Cette silhouette représente au niveau du tunnel du Gotthard 37% du trafic poids lourds, 30% au niveau de la galerie de Monte Ceneri et 11% sur l'axe Genève-Lausanne.

Actuellement, la norme lui confère un facteur d'équivalence pour le cas des chaussées souples et semi-rigides de 1.8, or, comme on peut le constater sur le graphique ci-dessous (Fig. 15), la valeur moyenne calculée a suivi une augmentation depuis 2001 et est actuellement stabilisée autour de 2.3 à 2.5.

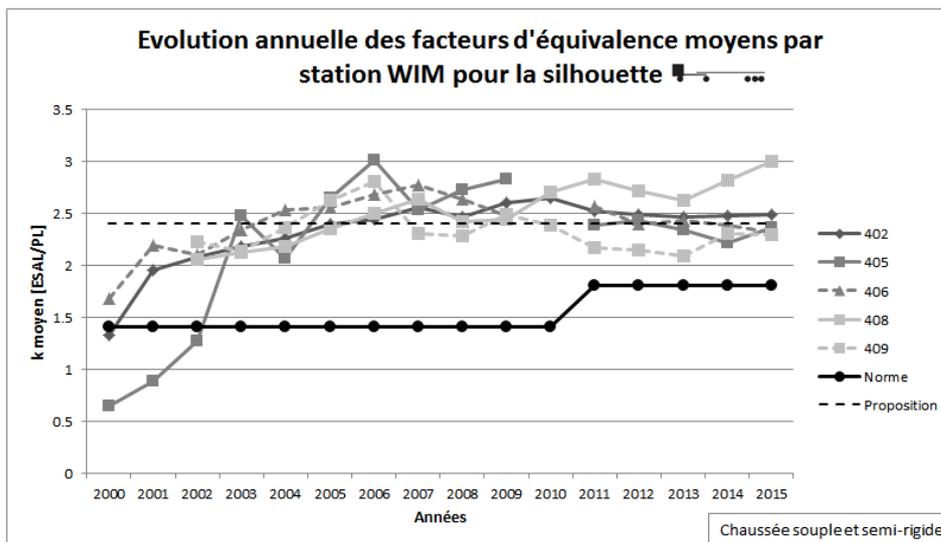


Fig. 15 Evolution des facteurs d'équivalence moyens de la silhouette prédominante ■—•—•••, chaussées souples et semi-rigides.

Dans le cas du tracteur à sellette composé d'un véhicule tracteur à deux axes et d'une remorque à deux axes (■—•—••), le rapport de recherche [11] émettait l'hypothèse qu'une plus forte utilisation et qu'une combinaison de charges plus élevée étaient envisageables. Les valeurs actuelles des facteurs d'équivalence moyens pour cette silhouette sont stables à 1.2 sur l'axe du Gotthard depuis 2011, contre 1.7 dans la norme (chaussées souples et semi-rigides).

Finalement, certaines silhouettes, telles que le camion à remorque composé d'un tracteur à deux axes et d'une remorque avec un axe avant et deux axes arrières (■—••—••), présentent une utilisation en nette diminution (1.1% du trafic total poids lourds au Gotthard en 2002, contre 0.15% en 2015).

L'évolution des chargements par silhouettes, leur utilisation ainsi que l'établissement de valeurs arrêtées pour les valeurs provisoires nécessitent une mise à jour de la normalisation sur le trafic pondéral équivalent actuellement en vigueur. De plus, des analyses d'évolution continues sont conseillées.

7.2 Valeurs historiques

La méthodologie introduite dans ce projet se distingue de celle adoptée dans le projet de recherche [11] par :

- Une base de données WIM comprenant les enregistrements de 15 installations WIM au lieu de 5 installations.
- Une période d'analyse étendue, ensemble des enregistrements journaliers sur une année complète (années analysées selon Tab. 7) au lieu de 4 mois dans [11].
- Une analyse par détection de silhouettes (Annexe I.2) en lieu et place de l'utilisation de la classification CSF (PAT).

De par ces distinctions, il est nécessaire d'évaluer si les valeurs des facteurs d'équivalence obtenues avec la méthodologie proposée sont proches de celles obtenues dans [11]. Cette comparaison est effectuée sur les stations : Gotthard (402), Denges, direction Lausanne (405) et Denges, direction Morges (406).

Tab. 24 Comparaison de facteurs d'équivalence sur la base des données de 2001 (chaussées souples et semi-rigides).

Catégorie de véhicule	Classe de véhicule	k_F déterminé (2001) [11]	k_F norme [1]	402 Gotthard (2001)	405 Denges (2001)	406 Denges (2001)	Moyenne (2001)
Camion		0.62	0.7	0.54	0.32	0.82	0.57
		1.35	1.4	1.25	0.65	1.51	1.15
		1.55	1.5	2.10	0.78	2.06	1.50
Catégorie camion		0.82	0.9	0.75	0.44	1.09	0.77
Tracteur à sellette		0.70	0.5	0.49	0.21	0.47	0.39
		1.64	1.7	1.77	0.75	2.35	1.62
		1.56		1.62	0.73	1.81	1.45
		1.76	1.8	1.95	0.88	2.19	1.89
Catégorie tracteur à sellette		1.64	1.7	1.85	0.72	1.77	1.67
Train routier		1.84	2.0	2.30	0.72	2.32	1.84
		1.79		2.18	0.86	2.29	2.05
		1.63	1.7	1.83	1.02	2.06	1.76
		1.80	2.0	2.41	0.59	1.76	2.14
		1.01	1.3	1.09	0.48	1.07	1.07
Catégorie train routier		1.77	1.7	2.06	0.72	2.16	1.84
Autocar		2.46	2.5	3.12	1.39	2.67	2.65
		1.16	1.2	1.31	0.87	1.23	1.20
Catégorie autocar		2.25	2.3	2.85	1.31	2.47	2.44

En moyenne, on constate que les valeurs obtenues par comparaison de trois stations uniquement sont relativement proches de celles obtenues dans [11]. Au vu des variations obtenues par stations et par directions considérées (Fig. 15, Fig. 29, Fig. 30) de telles différences (5-10% sur les catégories) sont envisageables. La nouvelle méthodologie peut donc être utilisée.

7.3 Silhouettes poids lourds prédominantes

7.3.1 Silhouettes de plus de 5 axes

La norme SN 640 320 d'août 2011 [1] ne prend en considération que des silhouettes de 5 axes ou moins. Sur l'ensemble des stations WIM, exception faite de celle de Bad Ragaz⁹, le taux de véhicules de 6 axes ou plus est au maximum de 2.3% (Fig. 16) et aucune silhouette parmi les véhicules de 6 axes ou plus n'est prédominante (part individuelle maximale inférieure à 0.2% de l'ensemble du trafic poids lourds).

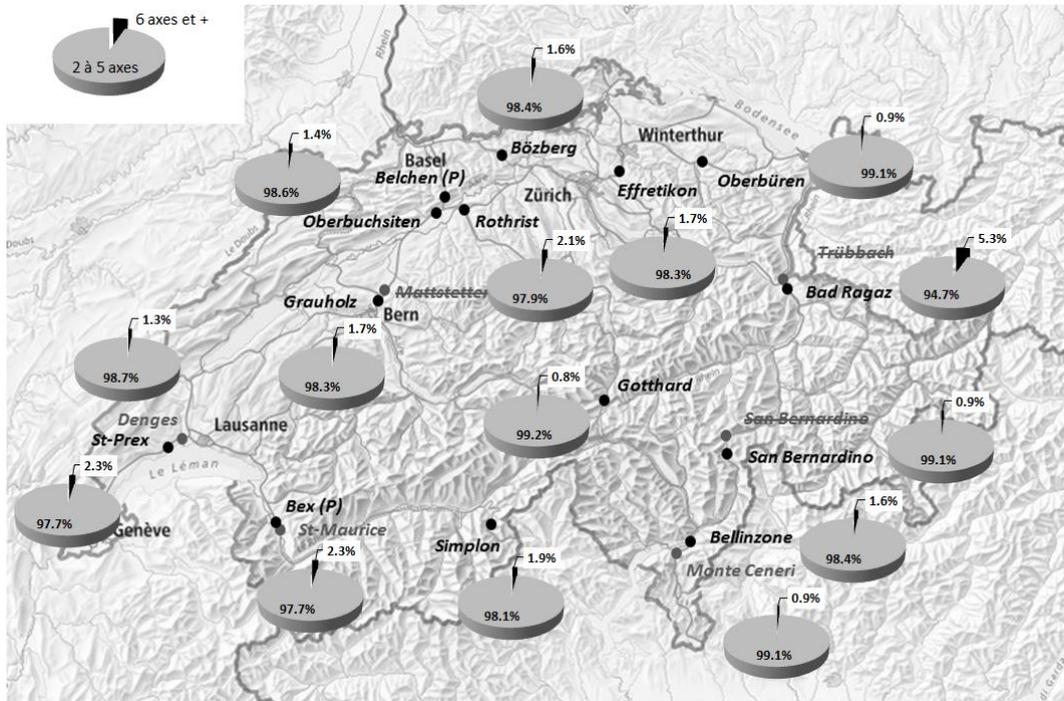


Fig. 16 Répartition des poids lourds par nombre d'axes (2015).

Recommandation d'actualisation :

Pas d'intégration de classes de plus de 5 axes. Aucune modification n'est proposée.

7.3.2 Silhouettes individuelles et regroupements de silhouettes

Dans la suite de l'analyse des silhouettes poids lourds, afin de déterminer les différentes classes à traiter dans le cadre de la normalisation, on considère l'hypothèse suivante :

« Est décrite comme classe prédominante du trafic poids lourds toute silhouette dont la part se monte à plus de 1% du nombre total de poids lourds »

⁹ Cette station présente, en direction de Zürich, un taux de véhicules poids lourds de 6 axes ou plus très élevé (7.9%). Toutefois, cet équipement est en service depuis septembre 2014 et présentait déjà lors de la calibration de septembre 2015, des déviations importantes. Son niveau de confiance est « mauvais ».

Tab. 25 Silhouettes prédominantes 2015 et tendance globale depuis 2010.

Silhouette	Stations WIM (Part PL ; tendance 2010-2015)									
	402		405		406		408		409	
	6.7%	o	19.7%	-	19.5%	-	9.4%	o	12.6%	o
	1.3%	o	3.8%	+	4.2%	-	2.3%	+	2.5%	+
	0.2%	o	4.6%	-	4.7%	x	2.6%	-	3.1%	x
	0.1%	x	0.6%	+	0.5%	+	0.3%	x	0.2%	-
	0.8%	+	1.9%	-	2.0%	-	0.7%	-	1.0%	x
	0.2%	o	0.6%	-	0.7%	-	0.9%	-	1.1%	o
	9.2%	o	9.9%	+	9.7%	+	5.9%	o	8.5%	o
	37.2%	-	11.7%	+	11.0%	+	29.8%	-	29.7%	-
	2.8%	-	6.4%	-	5.7%	-	1.8%	-	2.3%	-
	4.9%	o	3.1%	+	2.6%	+	2.6%	-	3.1%	-
	0.1%	-	0.2%	+	0.2%	o	0.1%	-	0.2%	-
	2.3%	x	2.6%	+	3.3%	+	1.7%	o	1.4%	o
	3.5%	-	0.7%	x	0.8%	x	2.1%	-	2.2%	-
	6.5%	+	3.6%	x	3.6%	-	4.9%	o	5.0%	o
	1.8%	+	1.0%	x	1.1%	+	1.5%	+	1.5%	+
SOMME	77.6%		70.4%		69.6%		66.6%		74.4%	

Légende tendance :

+ : Hausse de la part - : Diminution de la part o : Stabilité de la part x : Tendance non-dégagée

On remarque que l'ensemble des silhouettes proposées dans la norme représente entre les deux tiers et les trois quarts de l'ensemble du trafic poids lourds (Tab. 25). Les autres silhouettes majoritairement prédominantes (plus de 1% en part) sont similaires à celles proposées dans la norme mais avec une classification Swiss10 qui les attribue à une mauvaise classe (ex :  en tracteur à sellette, train routier ou alors à une classe « véhicules légers » alors que ces enregistrements font référence à des véhicules de plus de 3.5 tonnes).

Nouvelle silhouette

Une seule nouvelle silhouette apparaît dans les silhouettes prédominantes connues dans la classification poids lourds (CSF) depuis le passage à la classification Swiss10. Elle est discutée au chapitre 7.4.

Silhouette présente dans la normalisation devenant non-prédominante

On constate pour la silhouette  une constante diminution de sa part depuis les années 2000 jusqu'à obtenir actuellement des valeurs très faibles (au mieux 0.2%, Fig. 17). On peut donc se poser la question de la nécessité de la conserver parmi les classes prédominantes.

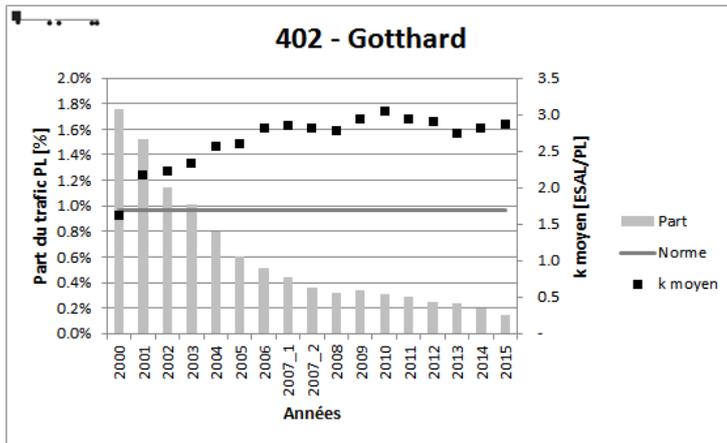


Fig. 17 Evolution de la silhouette au Gotthard (facteur d'équivalence : chaussées souples et semi-rigides).

Cette silhouette est actuellement regroupée avec . Avant la publication de la norme de 2011, ces silhouettes étaient encore regroupées avec .

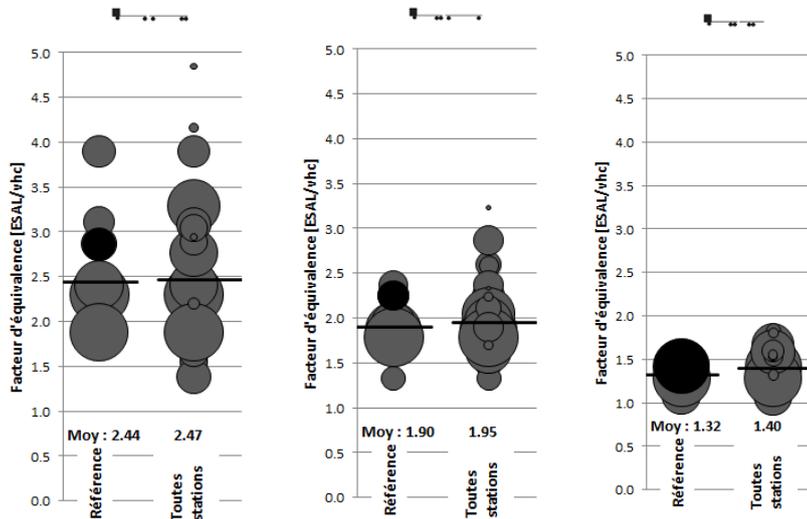


Fig. 18 Répartition des facteurs d'équivalence par silhouettes en 2015, chaussées souples et semi-rigides.¹⁰

On remarque (Fig. 18) des différences de facteurs d'équivalence importantes entre ces trois silhouettes. La silhouette étant également prédominante, sa séparation est justifiée (Tab. 25).

¹⁰ Remarques sur les diagrammes à bulles : la surface des bulles est proportionnelle à l'occurrence relative de la silhouette par station. La station du Gotthard (402) est représentée en noir. Le trait horizontal représente la valeur moyenne.

La silhouette  a un facteur d'équivalence moyen plus faible que celui de la silhouette . La part de cette dernière étant négligeable (Tab. 25), son influence est moindre sur la valeur du facteur d'équivalence regroupé (différence de 0.03 sur la valeur moyenne) et le regroupement est justifié (Fig. 19).

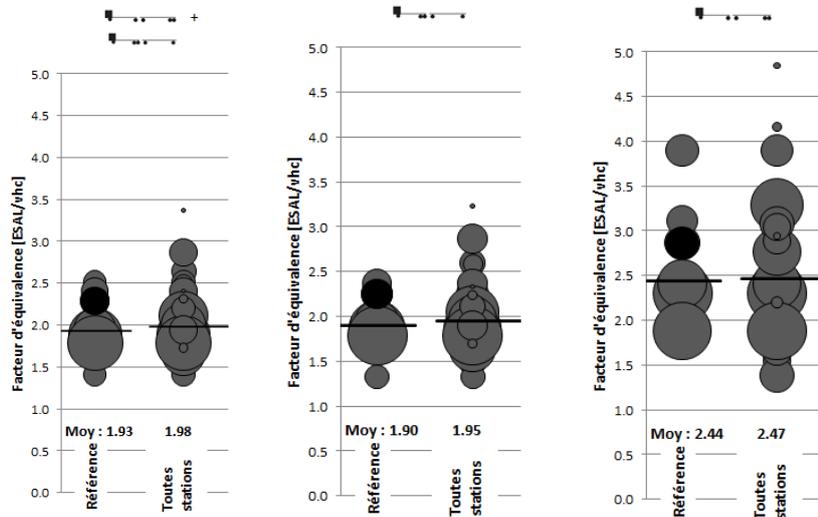
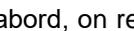
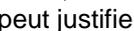


Fig. 19 Répartition des facteurs d'équivalence par silhouettes en 2015, chaussées souples et semi-rigides.

Sous cette vérification, on propose donc de conserver ce regroupement.

Les silhouettes  et  sont également regroupées dans la norme actuelle. Tout d'abord, on remarque que la silhouette  n'est pas prédominante (Tab. 25) ce qui peut justifier un regroupement.

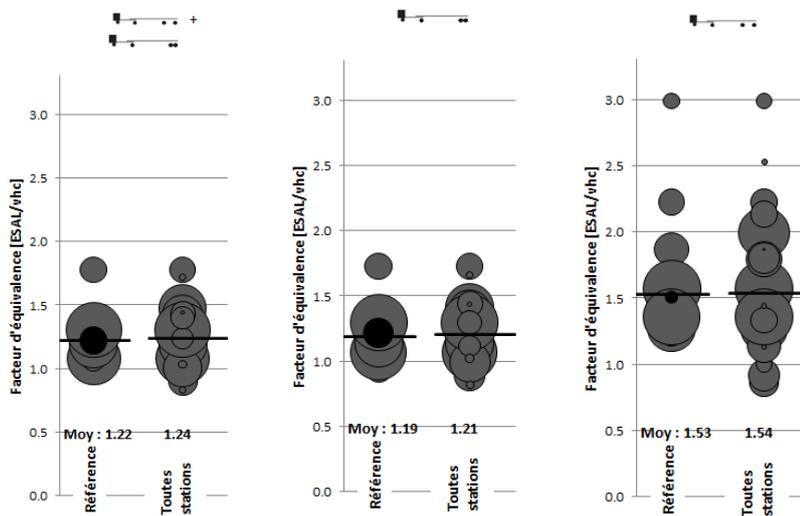


Fig. 20 Répartition des facteurs d'équivalence par silhouettes en 2015, chaussées souples et semi-rigides.

L'influence de la silhouette  sur le facteur d'équivalence regroupé est moindre (différence de 0.03 sur la valeur moyenne). Sous cette vérification, on propose donc de conserver ce regroupement.

Recommandations d'actualisation :

Les silhouettes proposées dans la norme actuelle (2011, [1]), de même que les regroupements de plusieurs silhouettes sont justifiés. Aucune modification n'est proposée.

7.4 Effet de la classification Swiss

Entre 2003 et 2007, la classification Swiss7 a fait place à la classification Swiss10 (Chap. 4.3) sur les différentes stations en fonctionnement. Cette nouvelle classification a des effets importants sur certaines classes de véhicules lourds.

Nouvelle silhouette prédominante

Comme mentionné au chapitre 7.3.2, une seule nouvelle silhouette connue dans la classification poids lourds (CSF) devient silhouette prédominante (Valeurs 2015 : 402 : 5.7% ; 405 : 1.5% ; 406 : 1.5% ; 408 : 2.4% ; 409 : 2.0%). Il s'agit de la combinaison (0 - - - - 0 + - - 000 - -) en train routier, soit une silhouette ayant l'allure potentielle suivante : . Les remorques à trois axes groupés sont généralement détectées sous la forme  soit un tracteur à sellette. Les remorques à bateaux tirées par un véhicule de tourisme et les remorques de transport d'un véhicule unique tirées par un véhicule de tourisme (garagistes) constituent la possibilité la plus plausible pour cette « nouvelle silhouette ». Cependant, au vu de la valeur élevée de son facteur d'équivalence calculé (2.3 – 2.5, chaussées souples et semi-rigides) et de la part importante enregistrée, il paraît impossible qu'il s'agisse de ce type de véhicule qui de plus devrait être renseigné dans la classe Swiss10 4 (voiture de tourisme avec remorque).

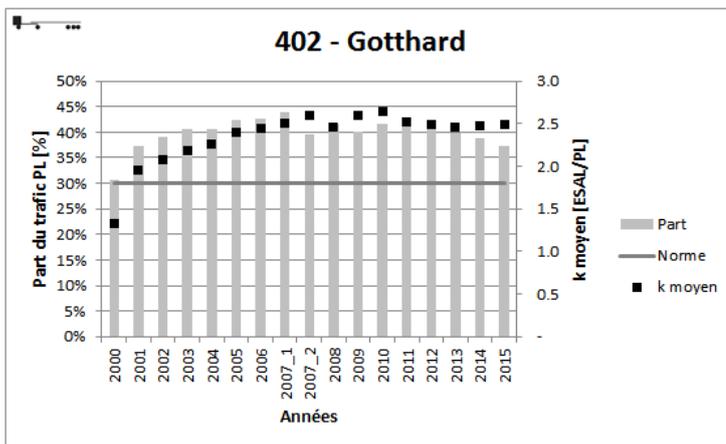


Fig. 21 Evolution de la silhouette  au Gotthard (facteur d'équivalence : chaussées souples et semi-rigides).

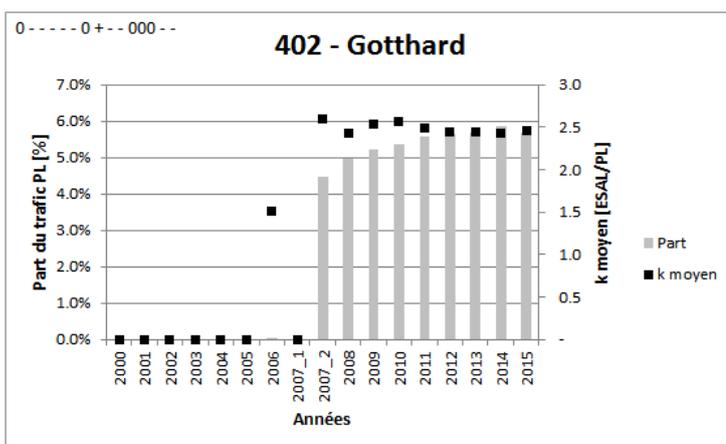


Fig. 22 Evolution de la silhouette potentielle  au Gotthard (facteur d'équivalence : chaussées souples et semi-rigides).¹¹

¹¹ La valeur de 2006 correspond à une erreur d'information dans le fichier de données WIM. Cela ne concerne qu'un unique enregistrement.

La diminution de la part de la silhouette  au passage à la classification Swiss10 (12.06.2007) est de 4.45% (Fig. 21) ce qui correspond à la part de la silhouette potentielle  qui apparaît en 2007 (4.48%, Fig. 22). De plus, les valeurs des facteurs d'équivalence sont identiques.

On en tire les conclusions suivantes :

- Sans combinaison de caméras et de relevés de station WIM ou de relevés sur place, il n'est pas possible de déterminer avec certitude que cette silhouette détectée est correctement renseignée.
- Au vu de la proximité de la valeur du facteur d'équivalence de cette nouvelle silhouette et de la diminution de la part de la silhouette  suite au passage de la classification Swiss7 à Swiss10, on peut admettre qu'il s'agit bien de cette dernière pour laquelle la classification Swiss10 a été mal détectée.
- Cette « nouvelle silhouette » n'est pas intégrée aux silhouettes prédominantes.

Effet conséquent sur la silhouette

On note un effet conséquent du passage de la classification Swiss7 à la classification Swiss10 sur les valeurs de part et de facteur d'équivalence de la silhouette  (Fig. 23). Les constatations effectuées sur la station du Gotthard sont similaires à celles des autres stations historiques (Annexe III.1).

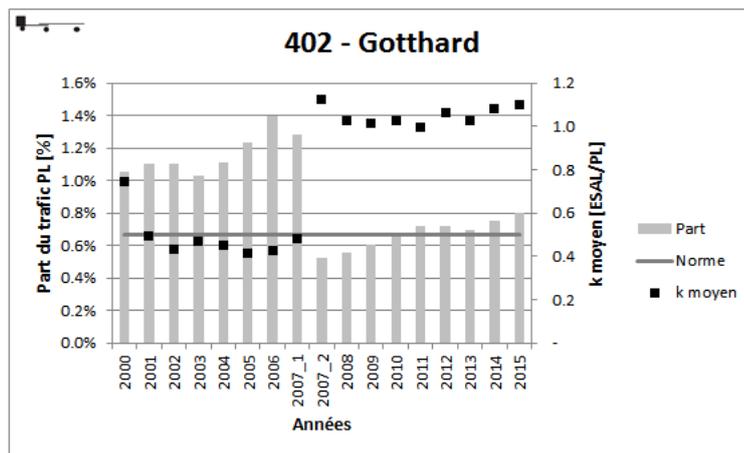


Fig. 23 Evolution de la silhouette  au Gotthard (facteur d'équivalence : chaussées souples et semi-rigides).

Sur les données relatives à la classification Swiss7 (2000 – début 2007), on constate une valeur du facteur d'équivalence semblable à celle de la norme. Après la mise en place de la classification Swiss10, on remarque une diminution importante de la part de la silhouette (plus de la moitié) et une augmentation nette de la valeur du facteur d'équivalence.

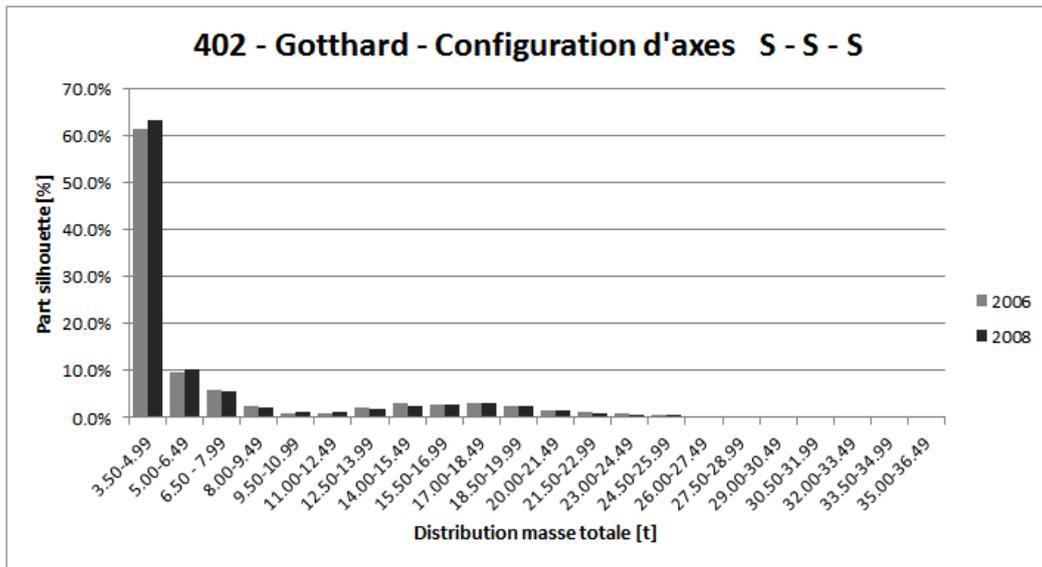


Fig. 24 Distribution de la masse totale enregistrée, Gotthard, configuration d'axes S-S-S.

Comme on pouvait s'y attendre, la distribution de la masse totale enregistrée de la configuration d'axes « 3 essieux simples S-S-S » (Annexe I.2), comprenant la silhouette , est similaire entre 2006 et 2008 (Fig. 24). Les occurrences sont également sensiblement identiques.

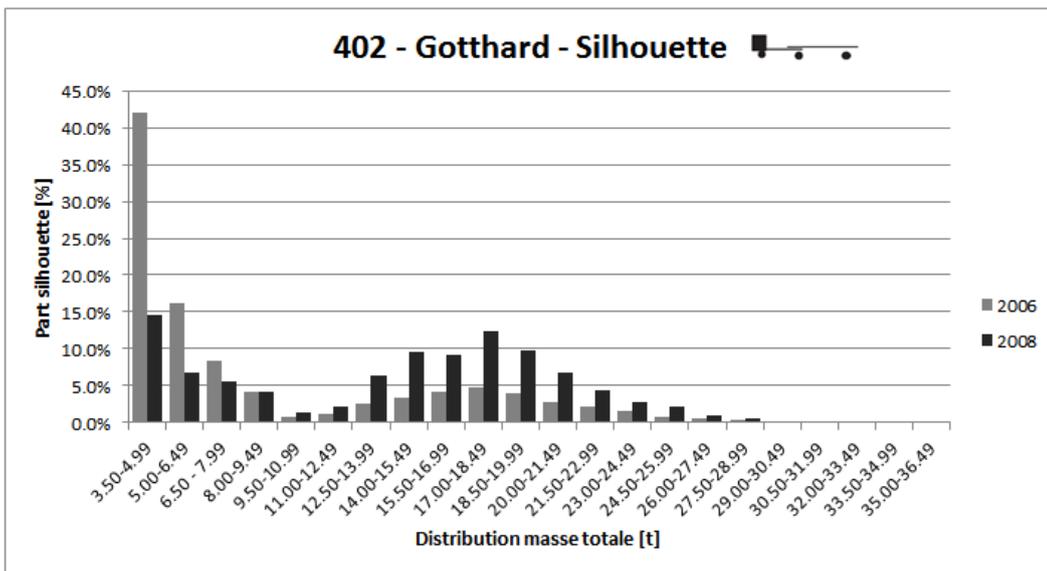


Fig. 25 Distribution de la masse totale enregistrée, Gotthard, silhouette  (Part).

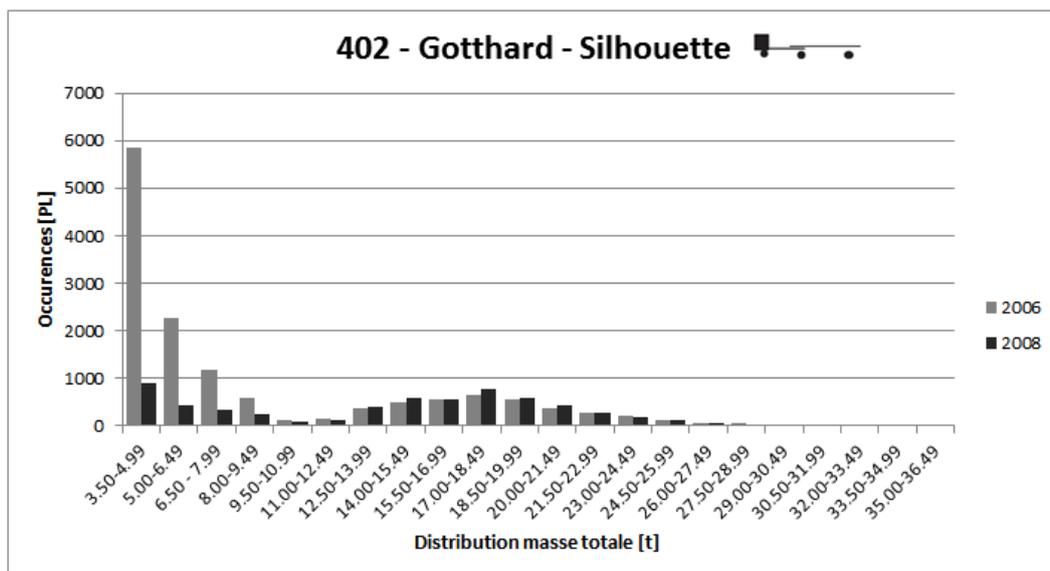


Fig. 26 Distribution de la masse totale enregistrée, Gotthard, silhouette (Occurrences).

Pour la silhouette , on remarque que les occurrences de la partie centrale de la distribution de masse totale du véhicule (9.5 tonnes à 26 tonnes, Fig. 26) sont sensiblement identiques entre 2006 et 2008. La différence qui influence de manière importante les valeurs du facteur d'équivalence se situe dans les proportions enregistrées de véhicules à moins de 8 tonnes (Fig. 25). Leur plus grande proportion en 2006 a pour résultat une diminution importante (~50%) du facteur d'équivalence.

Ces phénomènes peuvent être expliqués par :

- Une meilleure détection des tracteurs à sellette avec la nouvelle classification.
- Un report de la part de la silhouette avec la classification Swiss7 sur des classes assimilables à des véhicules légers avec la classification Swiss10 (non-tracteurs à sellette). La proportion de véhicules classés Swiss10 4 et 6 devient plus importante (voiture de tourisme ou voiture de livraison avec remorque). Ces derniers sont toutefois enregistrés à plus de 3.5 tonnes.

Par analyse de fiches techniques de véhicules tracteurs à sellette (exemple : SCANIA EURO6, EURO5), la masse totale du véhicule tracteur (sans remorque) est d'environ 7 tonnes. Les résultats obtenus sur la base de la classification Swiss10 sont donc cohérents.

Effets sur les autres silhouettes

Les effets du changement de classification Swiss sur les autres silhouettes, en termes de parts et de valeurs des facteurs d'équivalence, sont faibles voir indifférenciables.

7.5 Actualisation des facteurs d'équivalence par classes

Sur la base de la répartition des facteurs d'équivalence sur l'ensemble des stations disponibles en 2015 (Annexes III.2 et III.3), on établit une proposition (Tab. 26) qui correspond à la moyenne arrondie à la décimale supérieure des facteurs d'équivalence¹².

Recommandations d'actualisation :

Tab. 26 Proposition de facteurs d'équivalence par classes de véhicules lourds

Silhouette des classes de véhicules lourds	Chaussée souple et semi-rigide		Chaussée rigide et combinée	
	Proposition	Valeur norme 2011	Proposition	Valeur norme 2011
	0.8	0.7	0.7	0.6
	1.3	1.4	1.7	2.1
	1.7	1.5	3.0	2.7
	2.3	1.9 ¹³	5.4	3.0 ¹³
	1.2	0.5	1.1	0.5
	1.3	1.7	1.3	1.8
	2.4	1.8	3.0	2.2
	1.7	2.0	1.6	2.2
	2.1	2.0	2.3	1.9
	2.0	1.7	2.5	1.6
	1.4	1.3	2.0	1.0
	2.5	2.5	2.6	2.6
	1.1	1.2	1.4	0.9

¹² Toutes les stations dont les données sont disponibles en 2015 sont considérées. La valeur moyenne est obtenue par pondération du nombre de véhicules relevés.

¹³ Valeurs provisoires.

7.6 Actualisation des facteurs d'équivalence par catégories

Sur la base des silhouettes classées par catégories poids lourds Swiss10 (Tab. 9, Annexe I.2), on établit, pour les données 2015, les facteurs d'équivalence par catégories.

La silhouette , bien qu'elle ne soit actuellement pas classée (Classification CSF, Annexe I.2), est intégrée à la classe Swiss10 8 (camions).

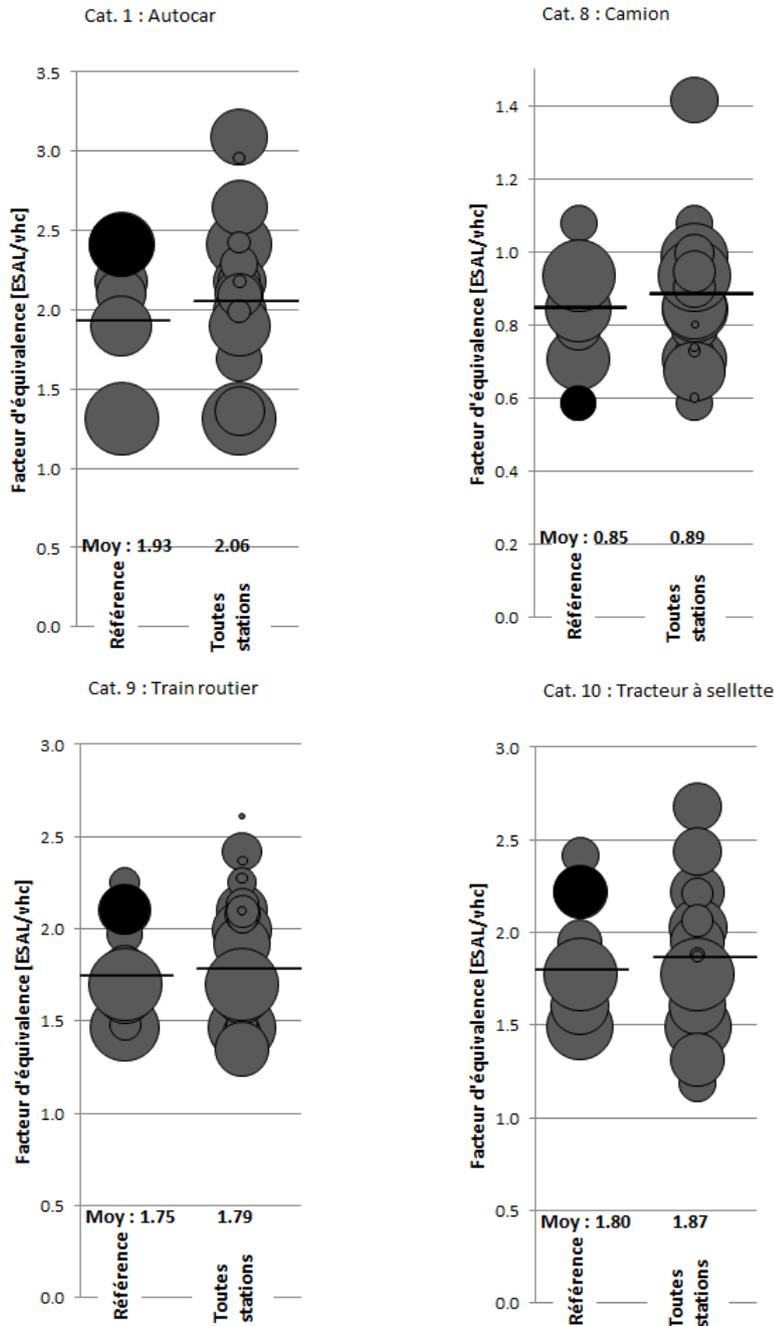


Fig. 27 Répartition des facteurs d'équivalence par catégories en 2015, chaussées souples et semi-rigides.

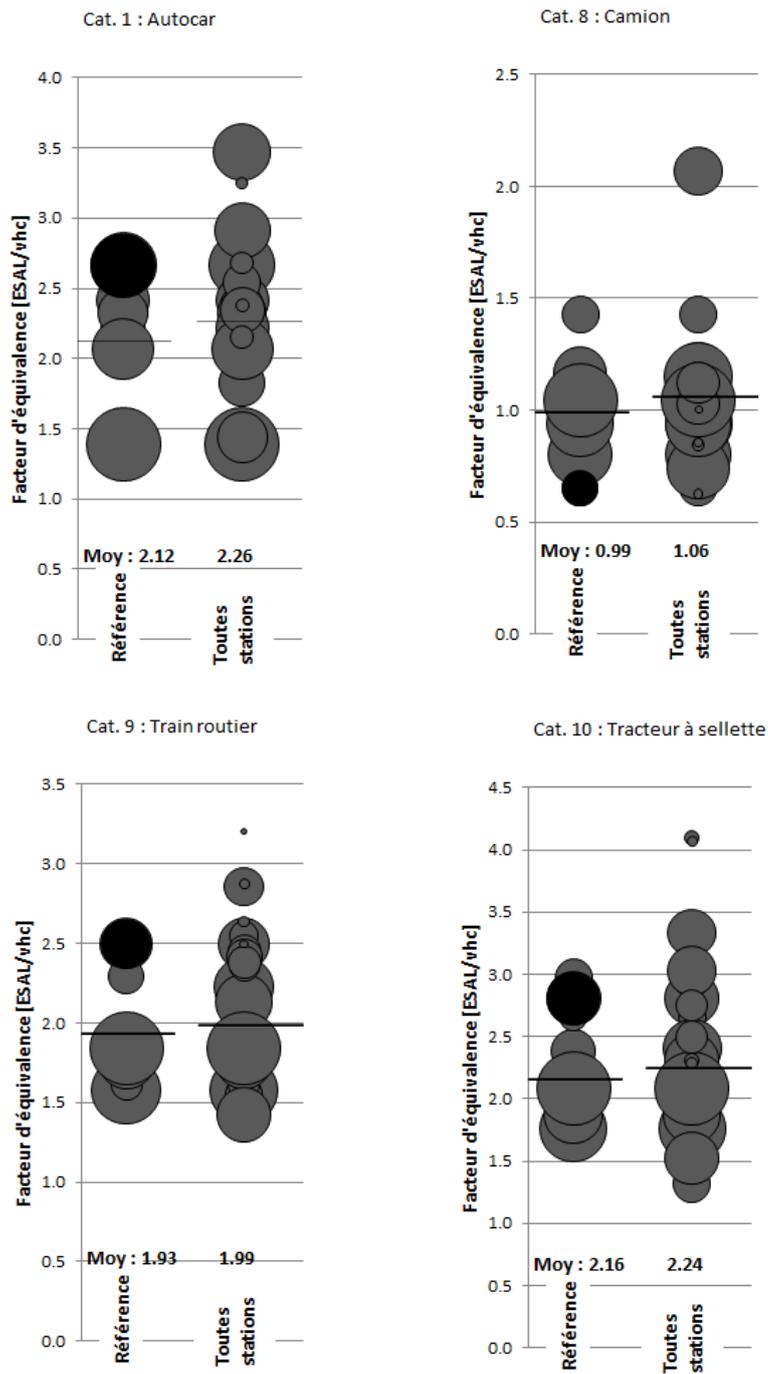


Fig. 28 Répartition des facteurs d'équivalence par catégories en 2015, chaussées rigides et combinées.

Recommandations d'actualisation :

Sur la base de la répartition des facteurs d'équivalence sur l'ensemble des stations disponibles en 2015 (Fig. 27, Fig. 28), on établit une proposition (Tab. 27) qui correspond à la moyenne arrondie à la décimale supérieure des facteurs d'équivalence.

Tab. 27 Proposition de facteurs d'équivalence par catégories de véhicules lourds

Catégories de véhicules lourds	Chaussée souple et semi-rigide		Chaussée rigide et combinée	
	Proposition	Valeur norme 2011	Proposition	Valeur norme 2011
Camion	0.9	0.9	1.1	1.0
Train routier (Camion remorque)	1.8	1.9	2.0	2.0
Tracteur à sellette (Semi-remorque)	1.9	1.7	2.3	2.0
Autocar	2.1	2.3	2.3	2.3

7.7 Actualisation des facteurs d'équivalence par type de route

7.7.1 Autoroutes

Les facteurs d'équivalence par type de route font appel à la typologie des routes définie précédemment (Chap. 6.4). Les valeurs normalisées des facteurs d'équivalence indiquent que les autoroutes dites « de transit » sont plus chargées, globalement que les autres autoroutes.

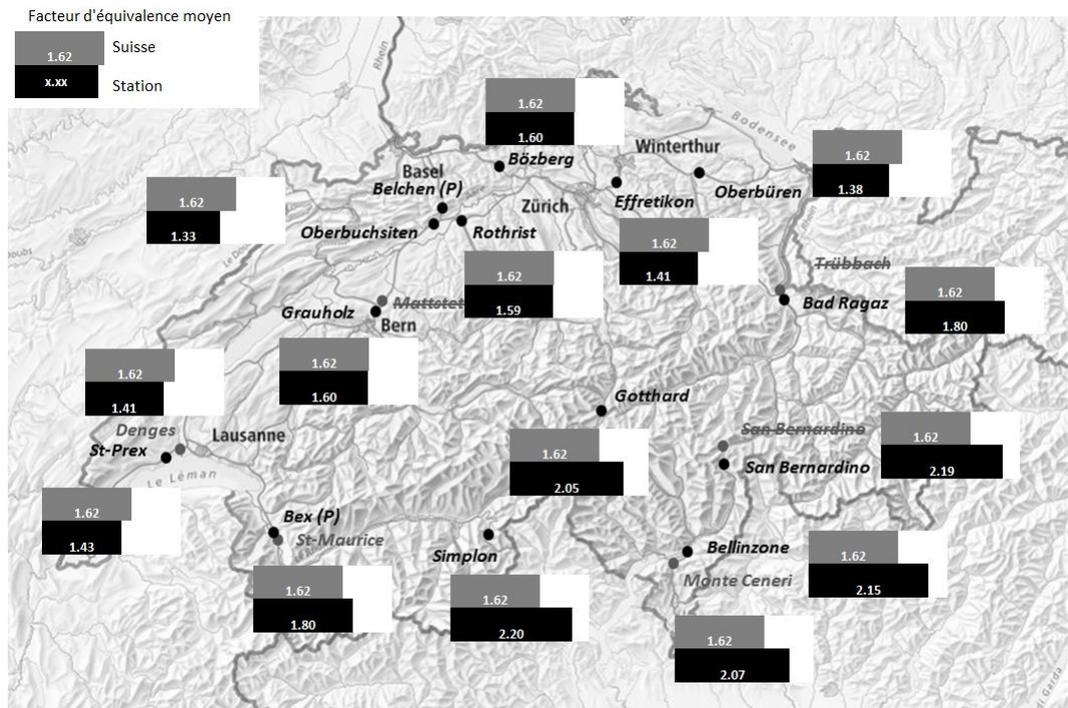


Fig. 29 Facteurs d'équivalence moyens par station en 2015, chaussées souples et semi-rigides.

Tout d'abord, on constate que les stations situées au sud / sud-est du pays ont des caractéristiques différentes de celles au nord / ouest des Alpes suisses (Fig. 29). Le facteur d'équivalence moyen au sud / sud-est est plus important que la moyenne nationale d'environ 30% alors que le reste est inférieur à la moyenne d'environ 11%.

Les valeurs moyennes de facteurs d'équivalence dépendent largement de la direction sollicitée (Fig. 30). En effet, on constate à proximité des frontières et ce notamment sur l'axe Nord-Sud que les véhicules poids lourds entrant en Suisse sont plus chargés que ceux sortant de Suisse.

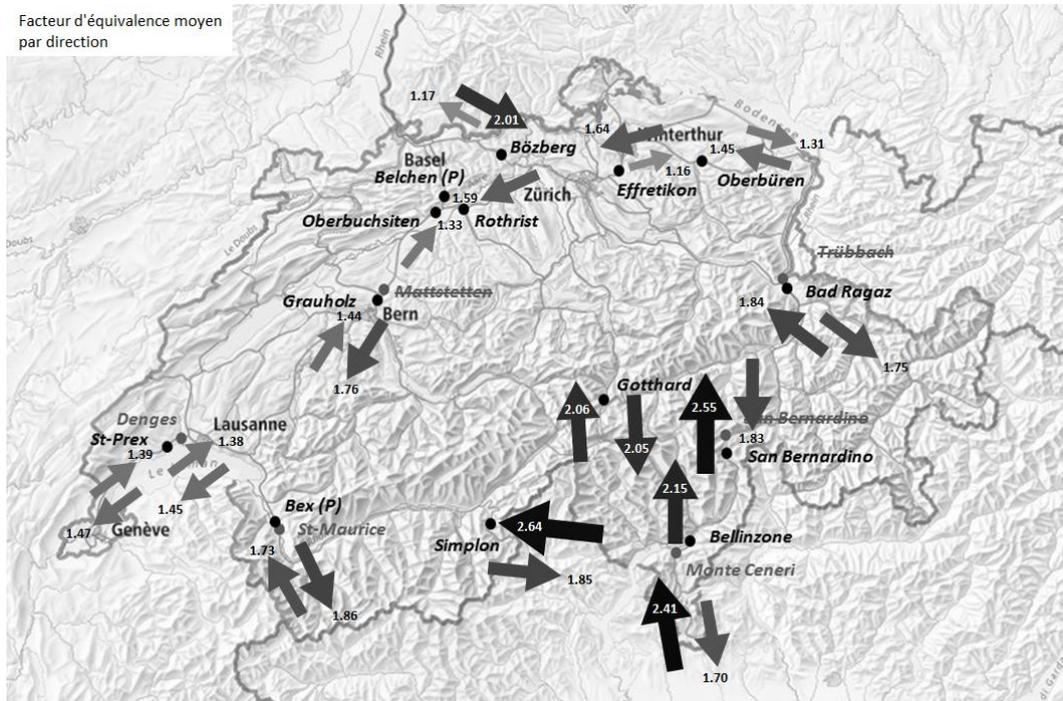


Fig. 30 Facteurs d'équivalence moyens par direction en 2015, chaussées souples et semi-rigides.

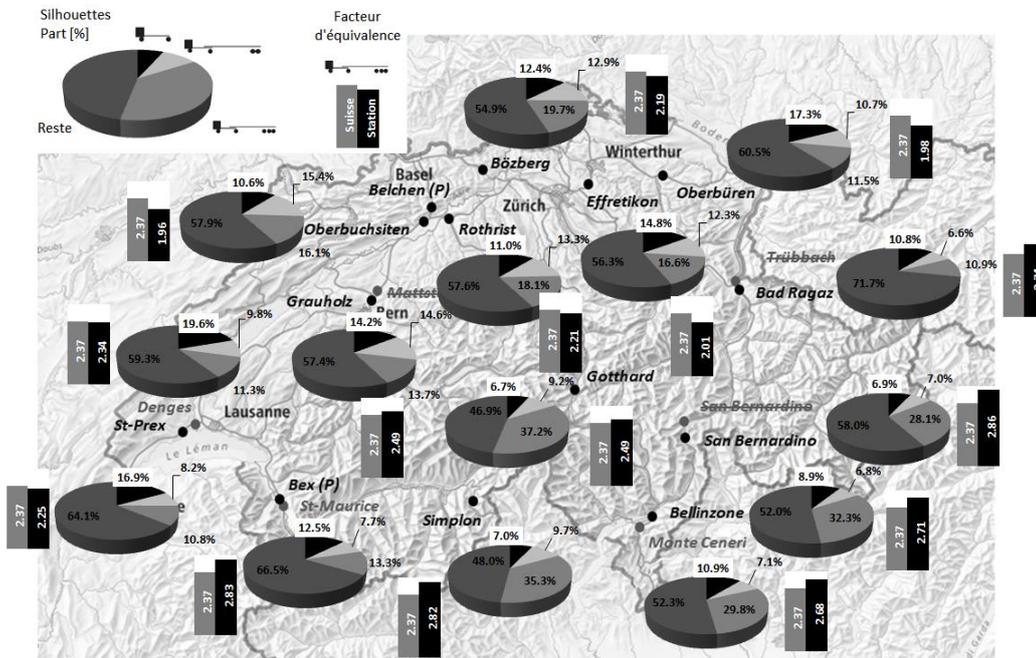


Fig. 31 Part des trois silhouettes prédominantes et facteur d'équivalence moyen de la silhouette , données 2015, chaussées souples et semi-rigides.

Le facteur d'équivalence moyen de la station dépend fortement de la part de la silhouette , de même que de son facteur d'équivalence (Fig. 31). Sur les points d'entrée principaux du trafic lourd, cette silhouette est fortement sollicitée en termes d'utilisation (part) et de charge. Au contraire, sur des axes où le trafic s'effectue de ville en ville,

typiquement la région Lausanne-Morges-Genève (Autoroute A1), la part de véhicules moins sollicitants, par exemple la silhouette , est plus importante et ainsi le facteur d'équivalence moyen sur l'axe routier est plus faible.

Sur la base des propositions par classes (Chap. 7.5) et par catégories (Chap. 7.6), la détermination du trafic pondéral équivalent des stations qui présentent globalement un facteur d'équivalence moyen supérieur à la moyenne suisse sera sous-estimé. Cela est dû au fait que les différentes propositions d'actualisation ont été basées sur les valeurs moyennes et non sur les valeurs maximales des facteurs d'équivalence. La sous-estimation du trafic pondéral peut atteindre dans le cas extrême 30% (Simplon). On recommande donc d'utiliser une méthode de prédiction du trafic pondéral équivalent adaptée à la situation étudiée (Chap. 8.3).

Afin de conserver la logique utilisée dans les propositions par classes et catégories, les valeurs moyennes doivent également être considérées pour la proposition d'actualisation des facteurs d'équivalence selon le type de route.

On parle de valeurs moyennes rapportées car les facteurs d'équivalence globaux ne sont plus calculés sur la base des charges mesurées mais sur la base des parts des différentes catégories et de leurs facteurs d'équivalence respectifs proposés :

- Conservation des parts des différentes catégories [%].
- Modification des facteurs d'équivalence des différentes catégories (selon proposition, chap. 7.6).

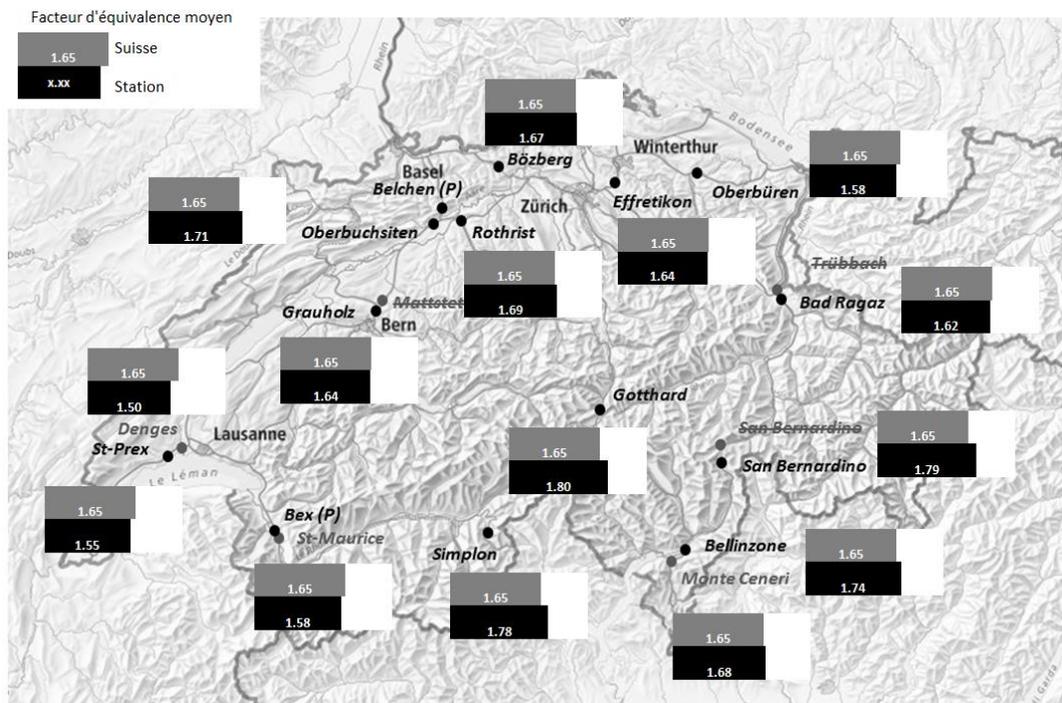


Fig. 32 Facteurs d'équivalence moyens rapportés à la proposition par catégories, chaussées souples et semi-rigides, parts 2015.

Sur la base de ces résultats (Fig. 32) et de la disposition des autoroutes suisses (Fig. 33), on propose, pour les chaussées souples et semi-rigides, un facteur d'équivalence moyen de 1.8 pour les autoroutes de transit (partie centrale de l'A1 entre les jonctions avec l'A6 à l'Ouest et l'A7 à l'Est, A2, A3, A13) et un facteur d'équivalence moyen de 1.6 pour les autres autoroutes.

Sur le même principe (Annexe III.4), on propose, pour les chaussées rigides et combinées, un facteur d'équivalence moyen de 2.1 pour les autoroutes de transit et un facteur d'équivalence moyen de 1.9 pour les autres autoroutes.

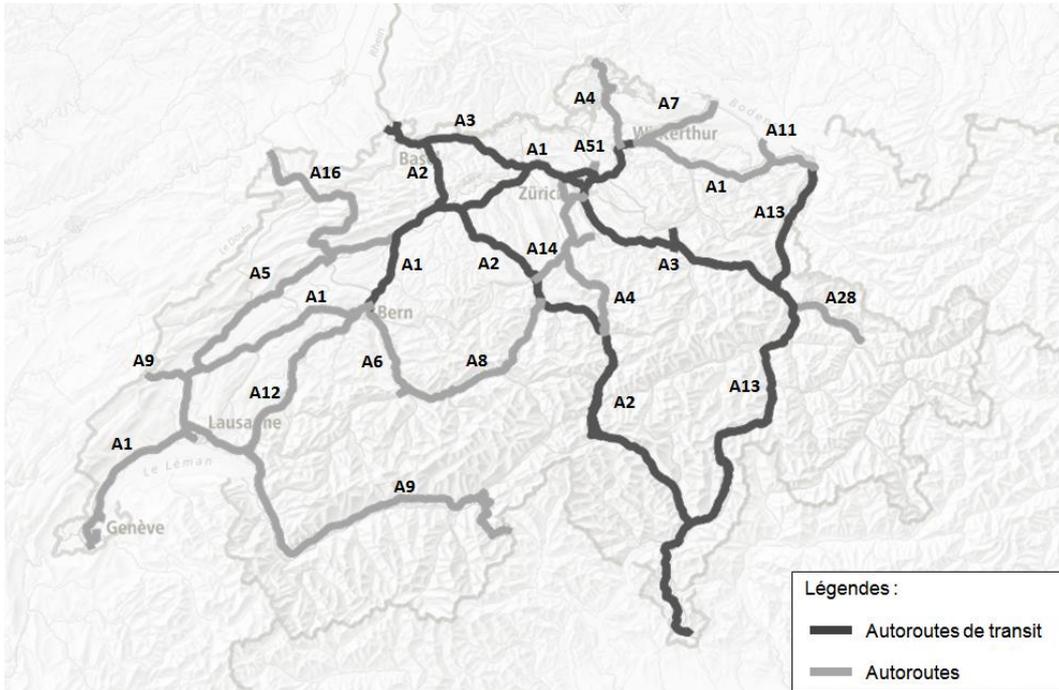


Fig. 33 Carte des autoroutes suisses.

7.7.2 Routes principales et routes de liaison

Selon la méthodologie proposée (Chap. 5.2), la valeur moyenne du facteur d'équivalence par station est calculée de la manière suivante :

$$k_{moy} = \frac{\sum_i (n_i \cdot k_i)}{\sum_i n_i}$$

avec :

- k_{moy} : facteur d'équivalence moyen de la station.
- i : classes Swiss10 (1 ; 8 ; 9 ; 10).
- n_i : nombre annuel de poids lourds de la classe i selon rapport CSACR.
- k_i : facteur d'équivalence de la classe i (Catégorie, selon Tab. 27).

Si l'on considère l'ensemble des stations CSACR à disposition en 2014 (295 stations), sur la base des facteurs d'équivalence proposés par catégories de véhicules lourds (Tab. 27), on obtient un facteur d'équivalence moyen de 1.41 pour les chaussées souples et semi-rigides et un facteur d'équivalence moyen de 1.71 pour les chaussées rigides et combinées.

Dans ce calcul de moyenne, toutes les stations ont un poids de 1.0 quel que soit le trafic sur l'axe routier. Ce calcul tient également compte de stations situées sur autoroutes.

Les stations situées sur autoroutes présentent les valeurs suivantes :

Tab. 28 Valeurs moyennes des facteurs d'équivalence ; Stations CSACR sur autoroutes ; Données 2014

Autoroute	Nombre de stations	Chaussée souple et semi-rigide	Chaussée rigide et combinée
A1	38	1.45	1.76
A2	27	1.62	1.94
A3	10	1.51	1.83
A4	14	1.47	1.78
A5	12	1.37	1.68
A6	6	1.32	1.62
A7	4	1.53	1.84
A8	2	1.35	1.64
A9	7	1.39	1.70
A11	1	1.18	1.49
A12	7	1.49	1.80
A13	10	1.49	1.80
A14	3	1.41	1.72
A16	3	1.22	1.52

Sur la base des comparaisons des valeurs moyennes obtenues sur autoroutes (Fig. 32 ; Tab. 28), des comparaisons des valeurs sur trois stations spécifiques (Chapitre 6.2.3) et de la remarque préliminaire du rapport [18], on admet pour corrections des valeurs des facteurs d'équivalence obtenus sur la base des données CSACR du Gotthard, de San Bernardino et de Denges que :

- La part d'autocars (Swiss10 1) est sous-estimée au CSACR de 1%.
- La part de camions (Swiss10 8) est surestimée au CSACR de 5%.
- La part de trains routiers (Swiss10 9) au CSACR est correcte.
- La part de tracteurs à sellette (Swiss10 10) est sous-estimée au CSACR de 4%.

Sur la base des corrections proposées, on obtient :

Tab. 29 Valeurs moyennes des facteurs d'équivalence ; Stations CSACR ; Données 2014 avec parts corrigées

Base de données	Chaussée souple et semi-rigide	Chaussée rigide et combinée
Toutes stations	1.54	1.84
Gotthard (CSACR 150)	1.80	2.12
Autoroute A1 partie centrale	1.63	1.94
Autoroute A2	1.71	2.04
Autoroute A3	1.62	1.93
Autres autoroutes	1.54	1.86
Hors autoroutes	1.48	1.77
Sélection RP (Tab. 8)	1.50	1.81
Moyenne des 10% inférieures (Hors autoroutes)	1.13	1.43

On constate que les valeurs précédemment proposées pour les autoroutes sont vérifiées (Chap. 7.7.1).

Sur la base de ces résultats (Tab. 29), on propose, pour les routes principales, un facteur d'équivalence moyen de 1.5 pour les chaussées souples et semi-rigides et un facteur d'équivalence moyen de 1.8 pour les chaussées rigides et combinées.

Comme décrit au chapitre 4.2, on admet que les 10% des valeurs inférieures des routes instrumentées au CSACR peuvent correspondre, par hypothèse sécuritaire, aux valeurs des routes de liaison (l'instrumentation concernant uniquement des routes principales).

Sur la base des résultats obtenus (Tab. 30), on propose, pour les routes de liaison, un facteur d'équivalence moyen de 1.2 pour les chaussées souples et semi-rigides et un facteur d'équivalence moyen de 1.5 pour les chaussées rigides et combinées.

Note importante

On remarque que l'utilisation d'un facteur d'équivalence moyen par type de route est subjective. D'une région à l'autre (Fig. 29, Fig. 31), voire d'une direction à l'autre (Fig. 30), alors que le type de route est identique, les facteurs d'équivalence moyens peuvent montrer des différences importantes.

De même, en fonction des spécificités locales (carrière, transports en commun, entrepôts, magasins de grande distribution, ...), les types de silhouettes présentes, leur chargement et donc les valeurs des facteurs d'équivalence moyens peuvent fortement varier.

Dans la mesure du possible, il est donc recommandé, comme actuellement dans la norme [1], de n'utiliser ces facteurs d'équivalence par type de route que dans le cas où des données de trafic plus détaillées ne sont pas disponibles.

Recommandations d'actualisation :

Sur la base des résultats obtenus, on émet la proposition suivante :

Tab. 30 Proposition de facteurs d'équivalence selon le type de route					
Types de route	Chaussée souple et semi-rigide		Chaussée rigide et combinée		
	Proposition	Valeur norme 2011	Proposition	Valeur norme 2011	
Routes à grand débit RGD, autoroutes de transit	1.8	1.6	2.1	1.7	
Routes à grand débit RGD, autoroutes	1.6	1.4	1.9	1.5	
Routes principales RP	1.5	1.3	1.8	1.5	
Routes de liaison RL	1.2	1.0	1.5	1.3	

On peut constater globalement que les nouvelles propositions suivent une augmentation qui est proportionnelle en fonction du type de route autant pour le cas des chaussées souples et semi-rigides que pour le cas des chaussées rigides et combinées.

8 Conclusions

8.1 Implications pour la pratique

Sur la base des réflexions menées dans [11] et de la normalisation en vigueur [1], la présente étude a permis d'établir des propositions d'actualisation des facteurs d'équivalence à la suite de l'évolution du parc automobile poids lourds.

Les résultats proposés (Chap. 8.2) peuvent être utilisés pour l'adaptation de la norme SN 640 320 [1].

8.2 Effets sur la normalisation

Les tableaux de la norme SN 640 320 [1] actualisés sont proposés ci-après.

Äquivalenzfaktoren k nach Schwerverkehrsklassen <i>Facteurs d'équivalence k par classes de véhicules lourds</i>			
Kategorien Catégories	Fahrzeugsilhouetten der Schwerverkehrsklassen <i>Silhouettes des classes de véhicules lourds</i>	Flexibler und halbstarrer Oberbau <i>Chaussée souple et semi-rigide</i>	Starrer und kombinierter Oberbau <i>Chaussée rigide et combinée</i>
		k	
Lastwagen Camion		0,8	0,7
		1,3	1,7
		1,7	3,0
		2,3	5,4
Lastenzug Train routier		1,7	1,6
		2,1	2,3
		2,0	2,5
		1,4	2,0
Sattelschlepper Tracteur à selle		1,2	1,1
		1,3	1,3
		2,4	3,0
Car Autocar		2,5	2,6
		1,1	1,4

Fig. 34 Facteurs d'équivalence actualisés par classes de véhicules lourds.

Äquivalenzfaktoren k nach Fahrzeugkategorien Facteurs d'équivalence k par catégories de véhicules		
Kategorien von schweren Lastfahrzeugen gemäss SN 640 002 <i>Catégories de poids lourds selon la SN 640 002</i>	Flexibler und halbstarrer Oberbau <i>Chaussée souple et semi-rigide</i>	Starrer und kombinierter Oberbau <i>Chaussée rigide et combinée</i>
	k	
Lastwagen <i>Camion</i>	0,9	1,1
Lastenzug <i>Train routier</i>	1,8	2,0
Sattelschlepper <i>Tracteur à sellette</i>	1,9	2,3
Car (Gesellschaftswagen) <i>Autocar</i>	2,1	2,3

Fig. 35 Facteurs d'équivalence actualisés par catégories de véhicules.

Durchschnittliche Äquivalenzfaktoren k des Schwerverkehrs nach Strassentyp Facteurs d'équivalence moyens k du trafic lourd selon le type de route		
Strassentypen gemäss SN 640 040 <i>Types de routes selon la SN 640 040</i>	Flexibler und halbstarrer Oberbau <i>Chaussée souple et semi-rigide</i>	Starrer und kombinierter Oberbau <i>Chaussée rigide et combinée</i>
	k	
Hochleistungsstrassen HLS, Transitautobahnen <i>Routes à grand débit RGD, autoroutes de transit</i>	1,8	2,1
Hochleistungsstrassen HLS, Autobahnen <i>Routes à grand débit RGD, autoroutes</i>	1,6	1,9
Hauptverkehrsstrassen HVS <i>Routes principales RP</i>	1,5	1,8
Verbindungsstrassen VS <i>Routes de liaison RL</i>	1,2	1,5

Fig. 36 Facteurs d'équivalence actualisés par type de route.

8.3 Recommandations

L'utilisation de facteurs d'équivalence par classes ou catégories (valeurs normatives) ne doit être envisagée que pour estimer le trafic pondéral équivalent. Dans le cas où des données de pesage ou de comptage locales sont à disposition, on recommande de pratiquer la détermination du trafic pondéral équivalent sur la base de ces données. En effet, comme constaté dans cette étude (Fig. 30), des conditions locales peuvent fortement influencer la composition du trafic lourd et conduire ainsi à une évaluation erronée du trafic pondéral.

Finalement, l'utilisation de facteurs d'équivalence globaux (par type de route, Fig. 36) ne doit être envisagée que si aucune des trois autres procédures définies par la norme SN 640 320 [1] ne peut être appliquée.

8.4 Proposition de recherches ultérieures

L'évolution du parc automobile (silhouettes, parts, chargements) et son influence sur les facteurs d'équivalence doivent être suivies régulièrement. Aucune hypothèse sur l'évolution potentielle du parc automobile n'a été considérée dans cette étude dans l'optique que des recherches ultérieures feront l'objet de ce suivi.

Annexes

I	Silhouettes	81
I.1	Détermination du type d'essieux.....	81
I.2	Silhouettes	82
II	Format des fichiers de données	85
II.1	Données WIM.....	85
II.2	Données CSACR	85
III	Facteurs d'équivalence	87
III.1	Influence de la classification Swiss	87
III.2	Chaussées souples et semi-rigides	88
III.3	Chaussées rigides et combinées	93
III.4	Facteurs par stations	98

I Silhouettes

I.1 Détermination du type d'essieux

Une des hypothèses principales concernant la répartition du trafic poids lourds dans les différentes silhouettes potentielles est la distribution des axes en types d'essieux. Les informations brutes récoltées dans les données WIM ne permettent pas de déterminer directement le type d'essieu mesuré (simple, tandem, tridem). On admet que les différents types d'essieux, composés de plusieurs axes, peuvent être déterminés en fonction des distances d'entraxe.

Selon [15] (Suisse, 2004), lorsque les écartements des axes sont compris entre 1.35 et 1.50 m, ils peuvent être considérés comme groupés.

Selon [16] (Canada, 2014), les dimensions des écartements des essieux sont les suivantes :

- L'écartement de l'essieu tandem moteur est compris entre 1.2 et 1.85 m.
- L'écartement total de l'essieu tridem moteur est compris entre 2.4 et 2.8 m, soit des écartements individuels compris entre 1.2 et 1.4 m.
- L'écartement de l'essieu tandem de remorque est compris entre 1.2 et 1.85 m.
- L'écartement total de l'essieu tridem de la remorque est compris entre 2.4 et 3.7 m, soit également des écartements individuels compris entre 1.2 et 1.85 m.
- Dans le cas de remorques à sellette, l'écartement total de l'essieu tridem est compris entre 2.4 et 3.1 m.
- Dans le cas de remorques portées, l'écartement total de l'essieu tridem est compris entre 2.4 et 2.5 m.

L'Ordonnance sur les règles de la circulation routière ([28], OCR, Suisse, état 2015), sans définir précisément des distances d'entraxes pour des essieux groupés, détermine des charges d'essieux en fonction des entraxes. Les valeurs d'intervalles décrites sont les suivantes :

- Essieu double :] ... ; 1.00 m[- [1.00 m ; 1.30 m[- [1.30 m ; 1.80 m[- [1.80 m ; ... [
- Essieu triple (par entraxe) :] ... ; 1.30 m[- [1.30 m ; 1.40 m[- [1.40 m ; ... [

La classification suisse des poids lourds (CSF, FZC, avec pour référence la classification PAT) détermine un groupe d'axes lorsque la distance d'entraxe est de moins de 2 mètres en règle générale, excepté pour un essieu triple centré sur la remorque, où dans ce cas, la somme des entraxes sur l'essieu triple est de moins de 3 mètres.

Cette dernière hypothèse, avec une certaine marge relative à la précision de la mesure, s'approche des valeurs décrites précédemment. Pour cette étude, on aura recours aux configurations de cette classification (CSF).

Dans le cas où la classification n'est pas décrite pour une configuration d'axes, c'est l'hypothèse suivante qui est appliquée :

« On considère comme axes regroupés en essieu des axes espacés de moins de 2 mètres »

I.2 Silhouettes

L'ensemble des silhouettes potentielles est décrit dans le tableau ci-dessous (Tab. 1). Le nombre N de silhouettes par nombre d'axes n est défini par : $N = 2^{(n-1)}$. Certaines silhouettes sont certes non-réalistes (exemple : véhicule de 2 axes avec un écartement très faible), mais elles sont tout de même répertoriées.

La configuration des axes fait appel à la nomenclature suivante :

- S : Essieu simple
- Ta : Essieu tandem
- Tr : Essieu tridem
- Serrés : série d'axes espacés de moins de 2 mètres

Tab. 1 Configuration des silhouettes

Axes	Configuration des axes	CSF	SW7	SW10	Classe PL	Catégorie PL	
2	S / S o - - - - o (< 5500kg) (> 5499kg)	520	3	1		Autocar	
		219	4	8		Camion	
		220	4	8		Camion	
		320	6	10		Sellette	
2	Serrés	oo					
3	S / S / S o - - - - o - - - - o o - - - - o + - - o - - (< 7500kg) (> 7499kg)	570	3	1		Autocar	
		521	3	1		Autocar	
		421	5	9		Train routier	
		319	6	10		Sellette	
		321	6	10		Sellette	
3	Ta / S	oo - - - - o	250	4	8	Camion	
3	S / Ta	o - - - - oo	530	3	1		Autocar
			230	4	8		Camion
3	Serrés	ooo					
4	S / Tr	o - - - - ooo	540	3	1		Autocar
			240	4	8		Camion
4	Tr / S	ooo - - - o					
4	Ta / Ta	oo - - - - oo	260	4	8		Camion
4	S / S / Ta	o - - - - o + - - - - oo o - - - - o + - - - - oo - - (< 5500 kg) (> 5499 kg)	326	6	10		Sellette
			522	3	1		Autocar
			419	5	9		Train routier
			426	5	9		Train routier
4	S / Ta / S	o - - - - oo + - - - o - - -	531	3	1		Autocar
			431	5	9		Train routier
			331	6	10		Sellette
4	Ta / S / S	oo - - - - o + - - - o - - -	451	5	9		Train routier
4	S / S / S / S	o - - - - o + o - - - - o o - - - - o + - - - - o - o	422	5	9		Train routier
			322	6	10		Sellette
4	Serrés	oooo					
5	Tr / Ta	ooo - - - oo					
5	Ta / Tr	oo - - - ooo					

5	S / S / Tr	o - - - - - o + - - - - ooo	329	6	10		Sellette
		o - - - - - o + - - - - ooo - -	427	5	9		Train routier
5	S / Tr / S	o - - - - ooo + - - - o - - -	441	5	9		Train routier
5	Tr / S / S	ooo - - - o + - - - o - - -					
5	S / Ta / Ta	o - - - - oo + - - - oo - -	532	3	1		Autocar
			436	5	9		Train routier
		o - - - - oo + - - - - oo	336	6	10		Sellette
5	Ta / S / Ta	oo - - - - o + - - - oo - -	456	5	9		Train routier
5	Ta / Ta / S	oo - - - oo + - - - o - - -	481	5	9		Train routier
5	S / S / S / Ta	o - - - - - o + o - - - - oo	423	5	9		Train routier
5	S / S / Ta / S	o - - - - - o + oo - - - - o					
5	S / Ta / S / S	o - - - - oo + - - - - o - o	332	6	10		Sellette
		o - - - - oo + o - - - - - o	432	5	9		Train routier
5	Ta / S / S / S	oo - - - - o + o - - - - - o	452	5	9		Train routier
5	S / S / S / S / S						
5	S / 4 serrés						
5	4 serrés / S						
5	Serrés						
6	Tr / Tr						
6	S / Ta / Tr	o - - - - oo + - - - - ooo	339	6	10		Sellette
6	S / Tr / Ta	o - - - - ooo + - - - oo - -	446	5	9		Train routier
6	Ta / S / Tr						
6	Ta / Tr / S						
6	Ta / Ta / Ta	oo - - - oo + - - - oo - -	486	5	9		Train routier
6	Tr / S / Ta						
6	Tr / Ta / S						
6	S / S / Ta / Ta	o - - - - - o + oo - - - - oo	428	5	9		Train routier
6	S / Ta / S / Ta	o - - - - oo + o - - - - oo	433	5	9		Train routier
6	S / Ta / Ta / S						
6	Ta / S / S / Ta	oo - - - - o + o - - - - oo	453	5	9		Train routier
6	Ta / S / Ta / S						
6	Ta / Ta / S / S	oo - - - oo + o - - - - - o	482	5	9		Train routier
6	S / S / S / Tr	o - - - - - o + o - - - - ooo	424	5	9		Train routier
6	S / S / Tr / S						
6	S / Tr / S / S	o - - - - ooo + o - - - - - o	442	5	9		Train routier
6	Tr / S / S / S						
6	S / S / S / S / Ta						
6	S / S / S / Ta / S						
6	S / S / Ta / S / S						
6	S / Ta / S / S / S						
6	Ta / S / S / S / S						
6	S / S / S / S / S / S						
6	Ta / 4 serrés						

6	4 serrés / Ta							
6	S / S / 4 serrés							
6	S / 4 serrés / S							
6	4 serrés / S / S							
6	S / 5 serrés							
6	5 serrés / S							
6	6 serrés							
7	S / Ta / S / Tr	o - - - - oo + o - - - - oo	434	5	9			Train routier
7	S / Ta / Ta / Ta	o - - - - oo + oo - - - - oo	438	5	9			Train routier
7	S / Tr / S / Ta	o - - - - oo + o - - - - oo	443	5	9			Train routier
7	Ta / S / S / Tr	oo - - - - o + o - - - - oo	454	5	9			Train routier
7	Ta / S / Ta / Ta	oo - - - - o + oo - - - - oo	458	5	9			Train routier
7	Ta / Ta / S / Ta	oo - - - - oo + o - - - - oo	483	5	9			Train routier
8	S / Tr / S / Tr	o - - - - oo + o - - - - oo	444	5	9			Train routier
8	S / Tr / Ta / Ta	o - - - - oo + oo - - - - oo	448	5	9			Train routier
8	Ta / Ta / S / Tr	oo - - - - oo + o - - - - oo	484	5	9			Train routier
8	Ta / Ta / Ta / Ta	oo - - - - oo + oo - - - - oo	488	5	9			Train routier

II Format des fichiers de données

II.1 Données WIM

Les stations WIM collectent toutes les informations relatives aux poids des véhicules, pour la plupart uniquement pour les poids lourds. Les journaux d'enregistrement journaliers (*.VA0, *.V00) contiennent les informations suivantes :

- Identifiant de la station WIM
- Identifiant de l'enregistrement
- Date et heure (détail au dixième de seconde)
- Numéro de voie
- Numéro de direction
- Headway (temps entre l'avant du véhicule précédent et l'avant du véhicule suiveur) [s]
- Temps intervéhiculaire (entre l'arrière du véhicule précédent et l'avant du véhicule suiveur) [s]
- Vitesse [km/h]
- Longueur du véhicule [cm]
- Nombre d'axes
- Classe du véhicule (Tab. 9)
- Longueur totale d'entraxes [cm]
- Longueur d'entraxe [cm]
- Masse totale du véhicule [kg*10 ou kg]
- Masse par axe [kg*10 ou kg]

II.2 Données CSACR

Les enregistrements bruts du comptage automatique sont disponibles via une interface sécurisée sur internet dans les deux minutes qui suivent la détection. Les journaux d'enregistrement journalier (*.log) contiennent les informations suivantes :

- Identifiant de l'enregistrement
- Date et heure (détail au centième de seconde)
- Numéro de voie
- Numéro de direction
- Headway (temps entre l'avant du véhicule précédent et l'avant du véhicule suiveur) [s]
- Temps intervéhiculaire (entre l'arrière du véhicule précédent et l'avant du véhicule suiveur) [s]
- Vitesse [km/h]
- Longueur du véhicule [cm]
- Classe du véhicule (Tab. 9)

III Facteurs d'équivalence

III.1 Influence de la classification Swiss

Effets sur la silhouette 

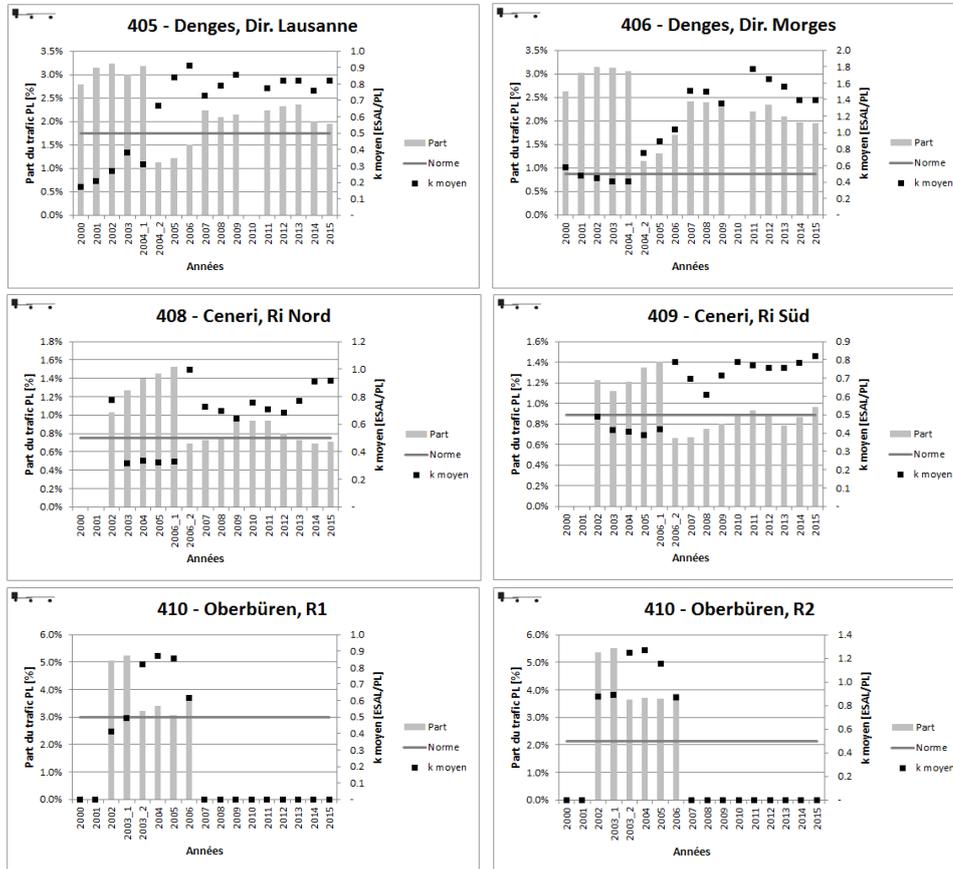
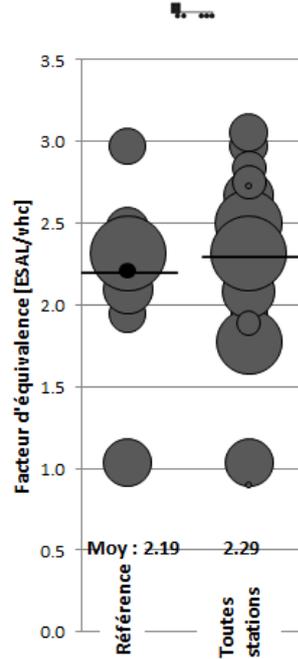
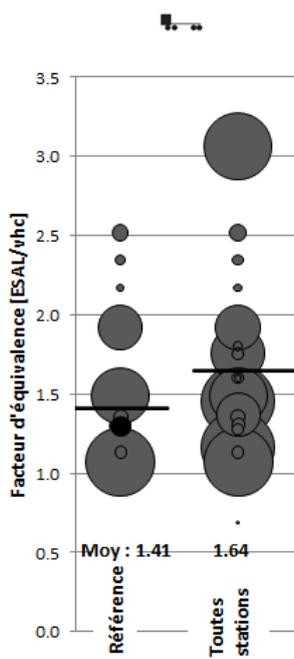
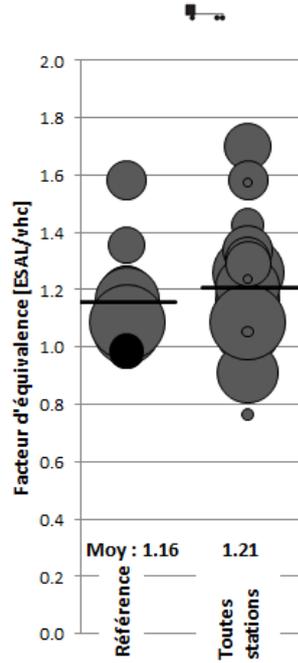
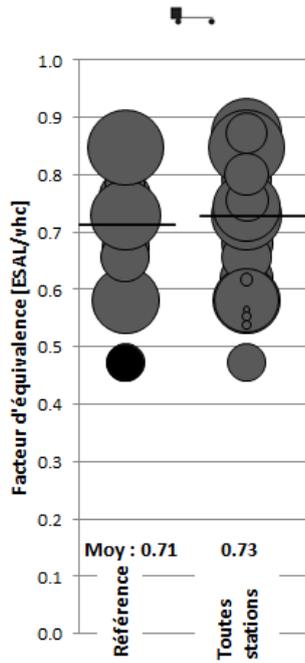
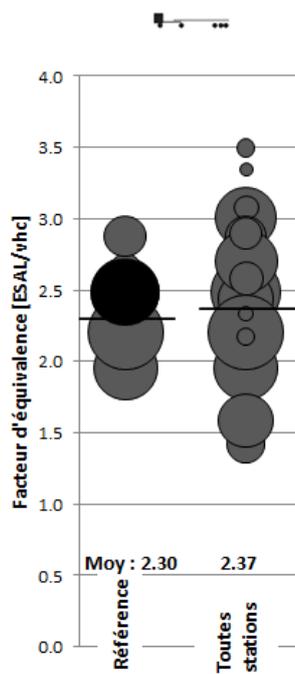
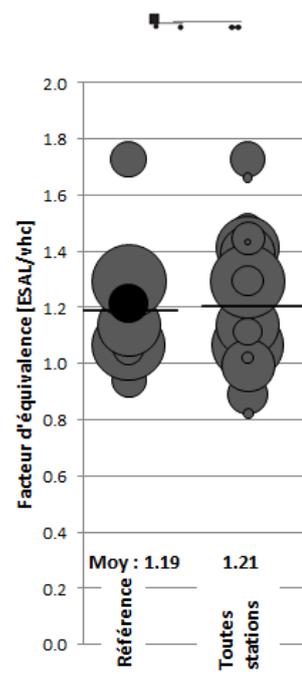
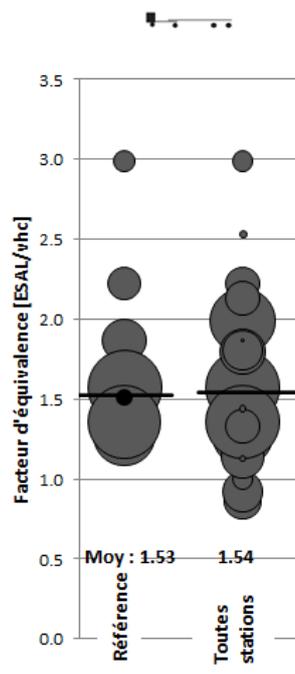
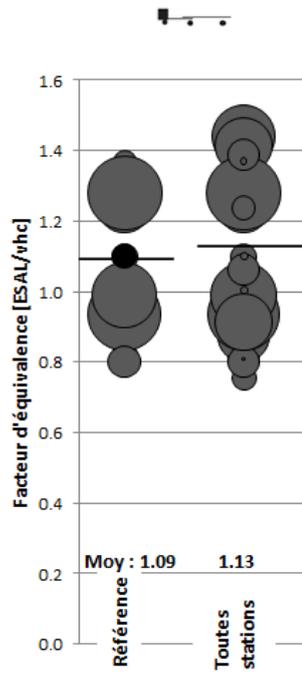
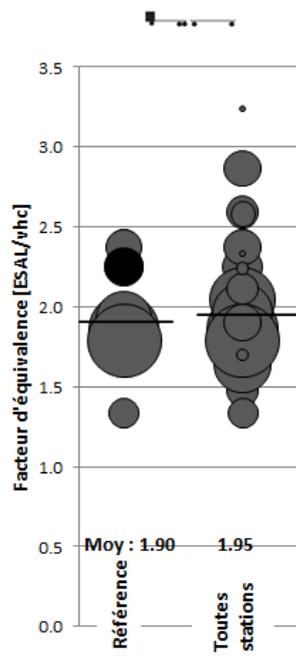
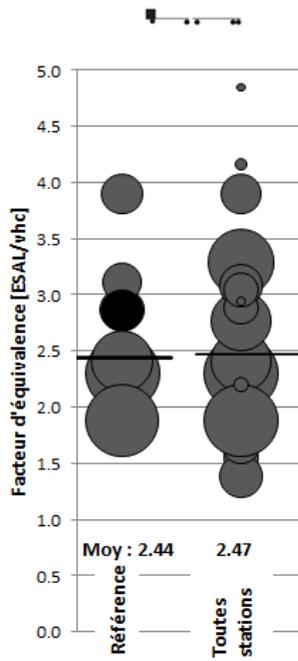
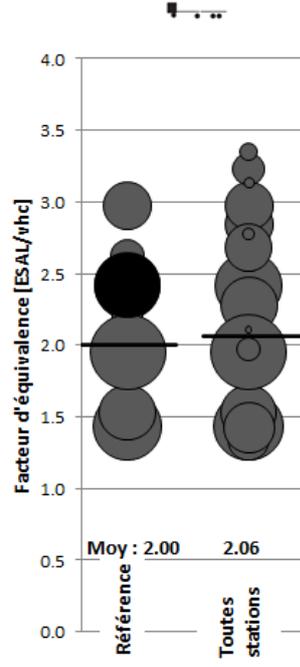
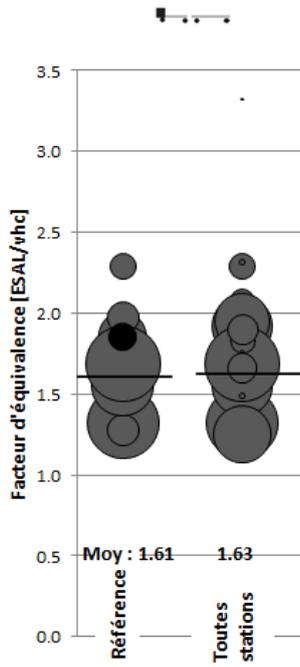


Fig. 1 Effets de la classification Swiss sur la silhouette , chaussées souples et semi-rigides.

III.2 Chaussées souples et semi-rigides







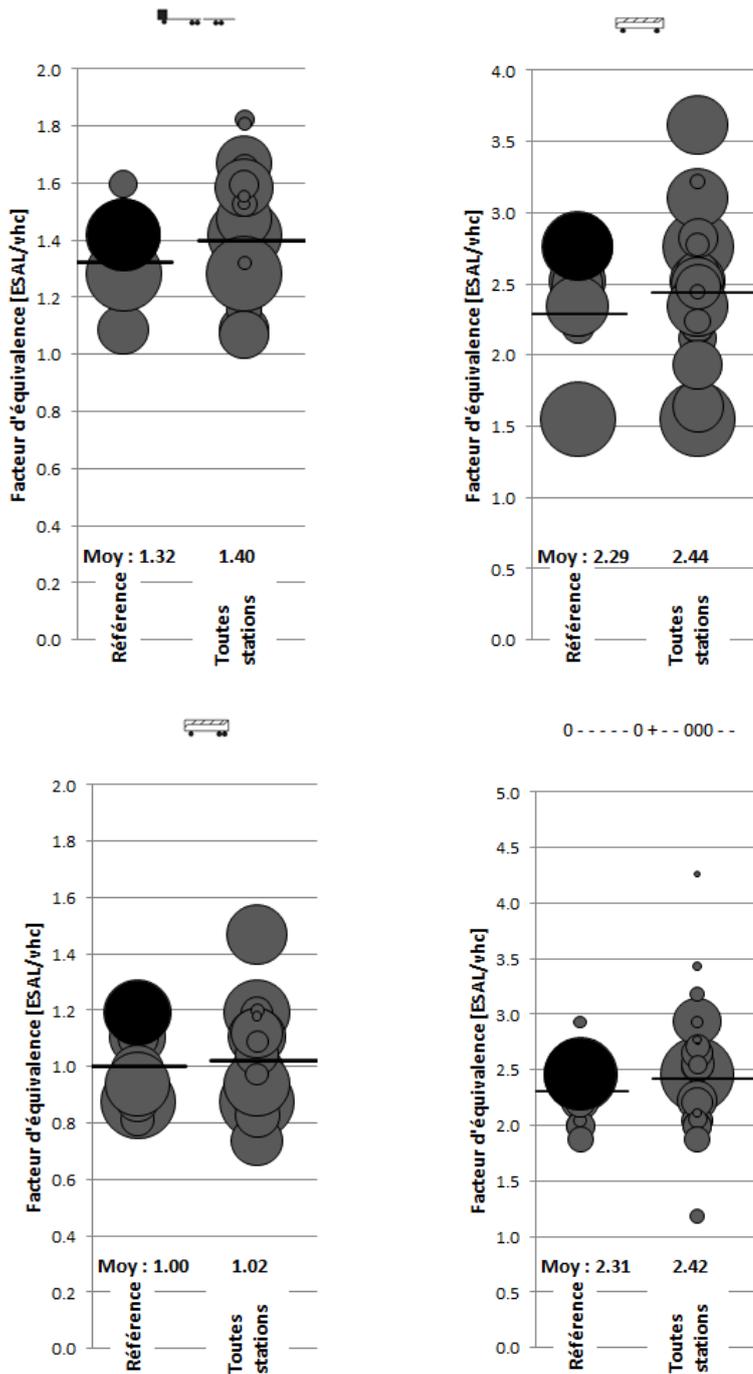


Fig. 2 Facteurs d'équivalence, chaussées souples et semi-rigides, 2015.

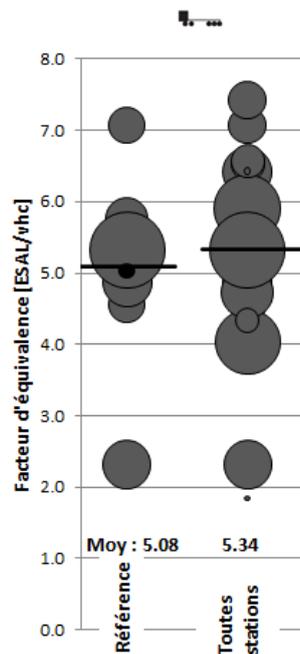
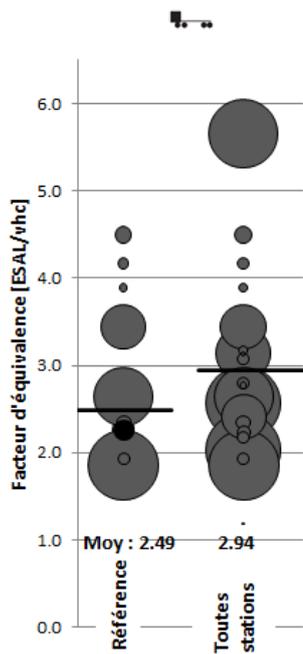
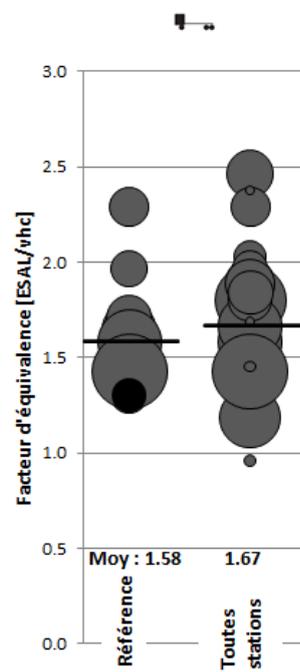
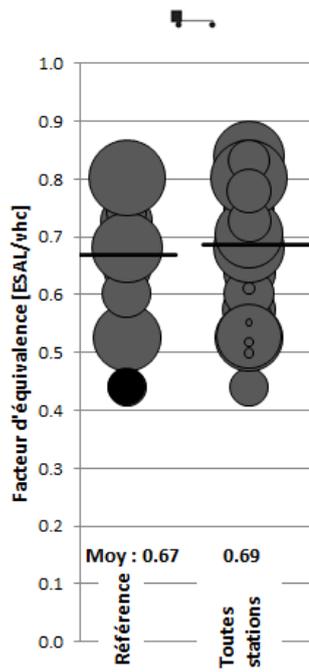
Tab. 2 Comparaisons des facteurs d'équivalence - Toutes données 2015 / Données 2015 référence (Tab. 19) – Toutes données 2014. Chaussées souples et semi-rigides.

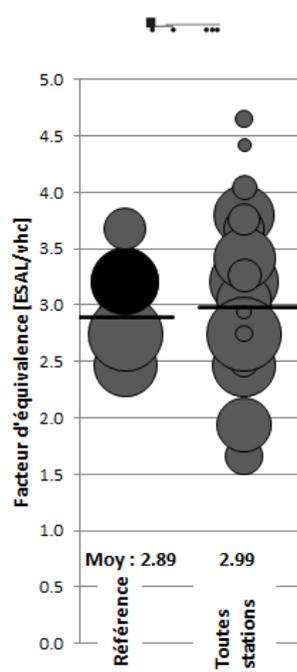
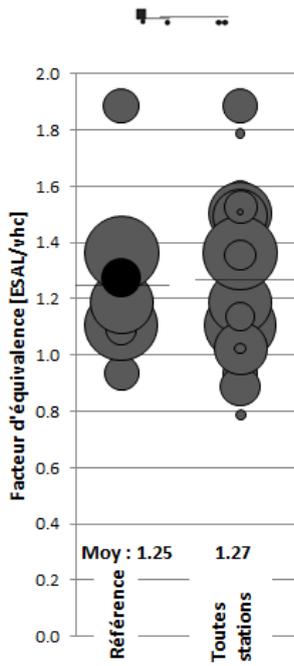
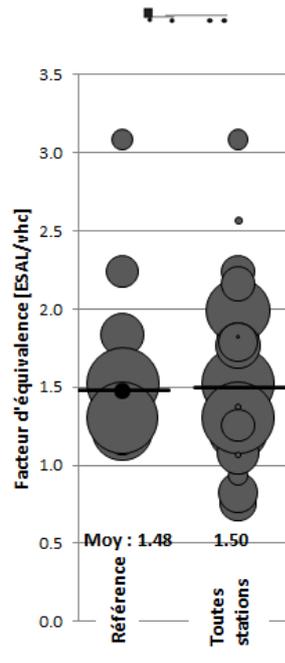
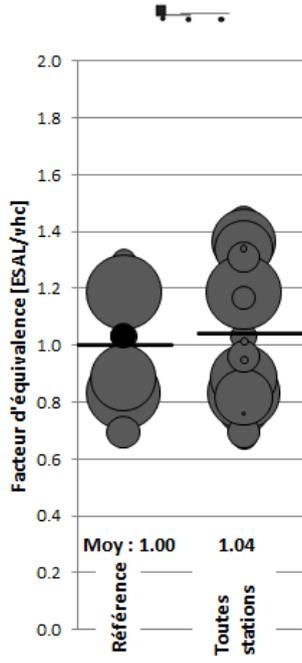
Silhouette des classes de véhicules lourds	Facteurs d'équivalence			
	Toutes données		Données de référence	
	2015	2015	2015	2014
	0.73	0.71	0.71	0.73
	1.21	1.16	1.16	1.23
	1.64	1.41	1.41	1.73
	2.29	2.19	2.19	2.37
	1.13	1.09	1.09	1.14
	1.54	1.53	1.53	1.57
	1.21	1.19	1.19	1.23
	2.37	2.30	2.30	2.38
	1.63	1.61	1.61	1.69
	2.06	2.00	2.00	2.07
	2.47	2.44	2.44	2.51
	1.95	1.90	1.90	2.02
	1.40	1.32	1.32	1.40
	2.44	2.29	2.29	2.45
	1.02	1.00	1.00	1.02

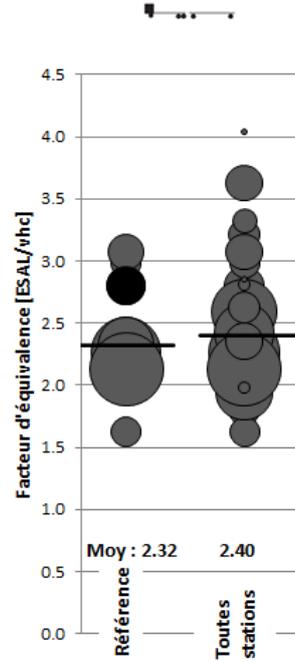
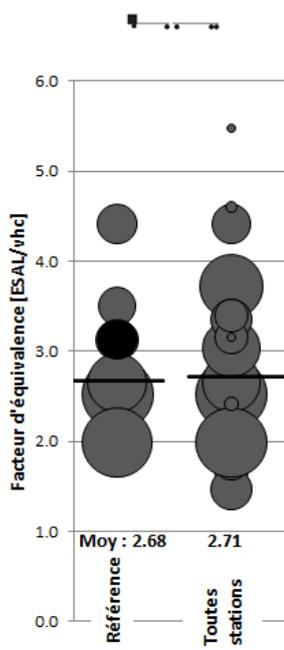
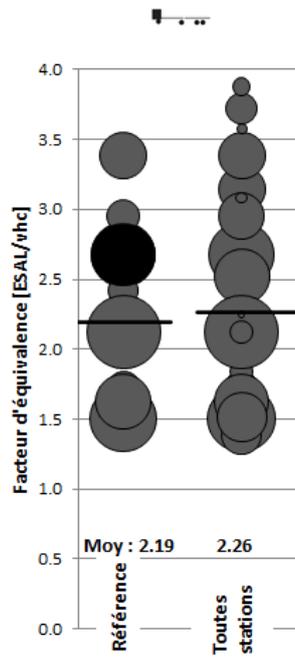
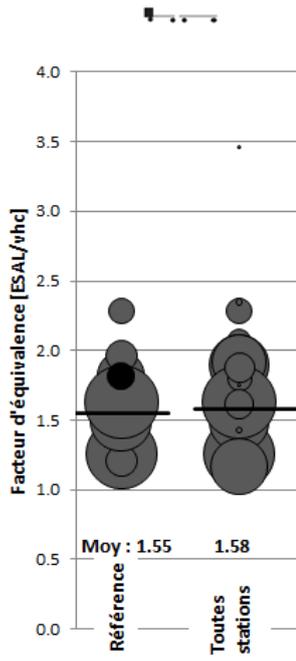
Les facteurs d'équivalence issus des données de référence en 2015 sont inférieurs aux valeurs issues de l'ensemble des stations à disposition. A priori, de manière globale, les capteurs non-calibrés ont tendance à augmenter les charges mesurées. Les données de 2014 sont plus élevées que celles de 2015. On peut expliquer ces résultats par le fait que l'ensemble des stations a été calibré entre fin 2014 et 2015.

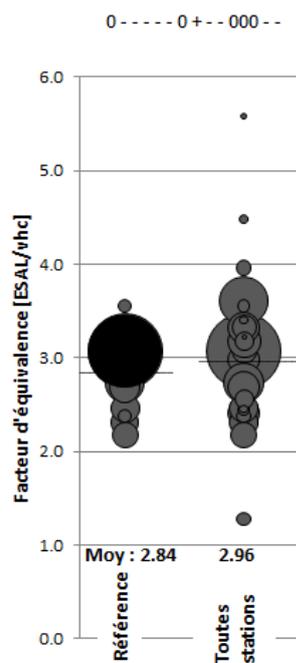
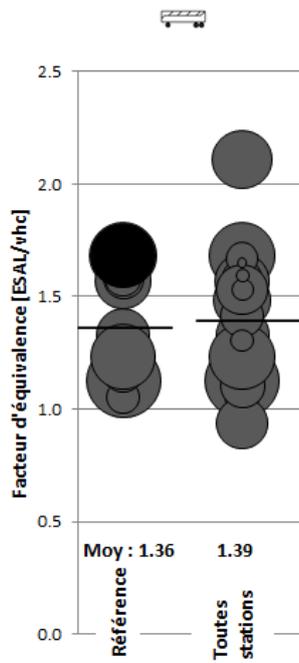
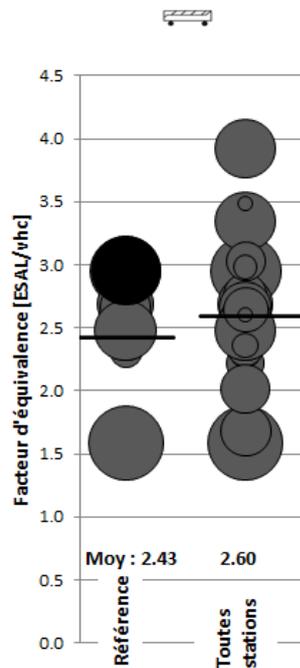
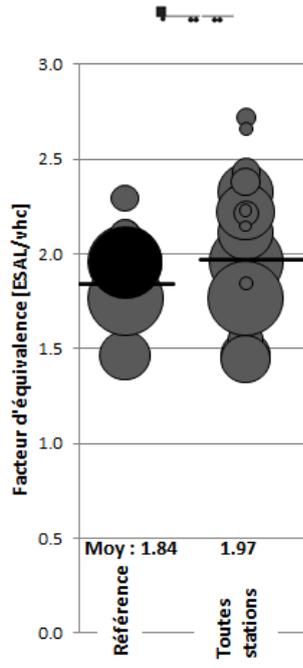
Afin de considérer l'ensemble du trafic lourd sur le territoire national et non une sélection (référence) de stations WIM, les valeurs de 2015 peuvent être légitimement utilisées afin de proposer une actualisation des facteurs d'équivalence.

III.3 Chaussées rigides et combinées









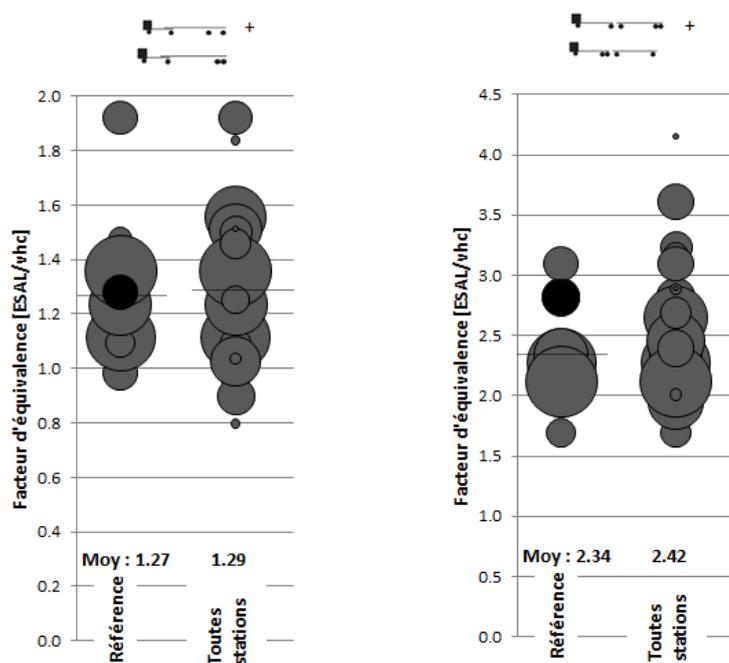


Fig. 3 Facteurs d'équivalence, chaussées rigides et combinées, 2015.

Tab. 3 Comparaisons des facteurs d'équivalence - Toutes données 2015 / Données 2015 référence (Tab. 19) – Toutes données 2014. Chaussées rigides et combinées.

Silhouette des classes de véhicules lourds	Facteurs d'équivalence		
	Toutes données 2015	Données de référence 2015	Toutes données 2014
	0.69	0.67	0.69
	1.67	1.58	1.72
	2.94	2.49	3.11
	5.34	5.08	5.51
	1.04	1.00	1.06
	1.50	1.48	1.53
	1.27	1.25	1.30
	2.99	2.89	3.00
	1.58	1.55	1.64
	2.26	2.19	2.26
	2.71	2.68	2.75
	2.40	2.32	2.51
	1.97	1.84	1.98
	2.60	2.43	2.60
	1.39	1.36	1.39

Pour les mêmes raisons que dans le cas des chaussées souples et semi-rigides, l'ensemble des données 2015 peut être utilisé afin de proposer une actualisation des facteurs d'équivalence.

III.4 Facteurs par stations

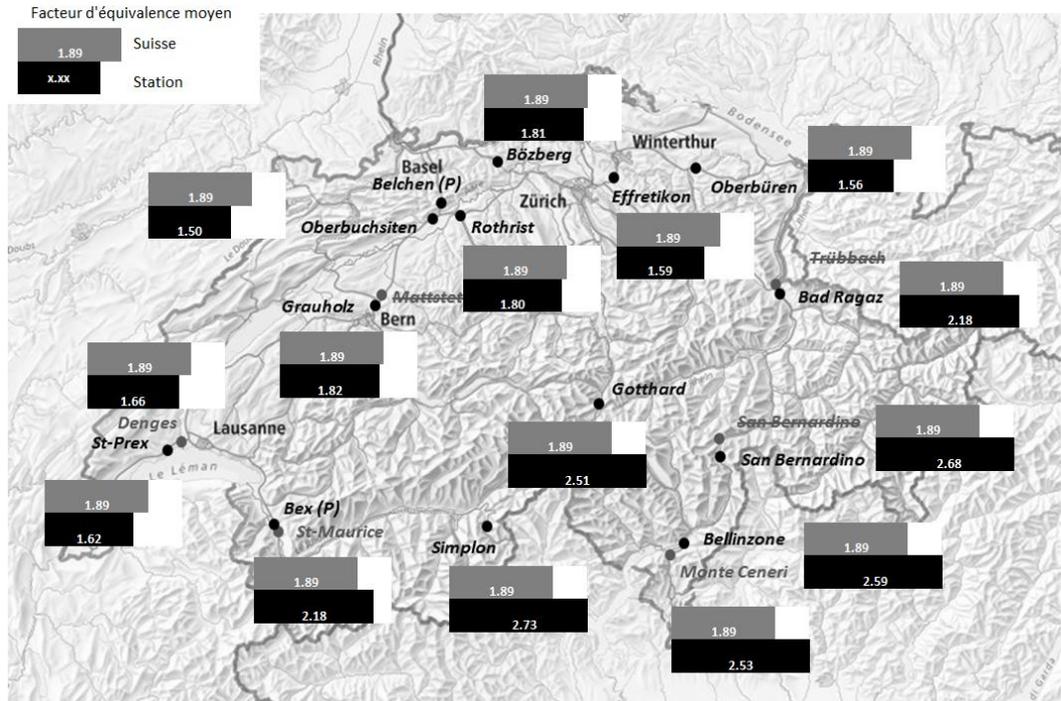


Fig. 4 Facteurs d'équivalence moyens par station en 2015, chaussées rigides et combinées.

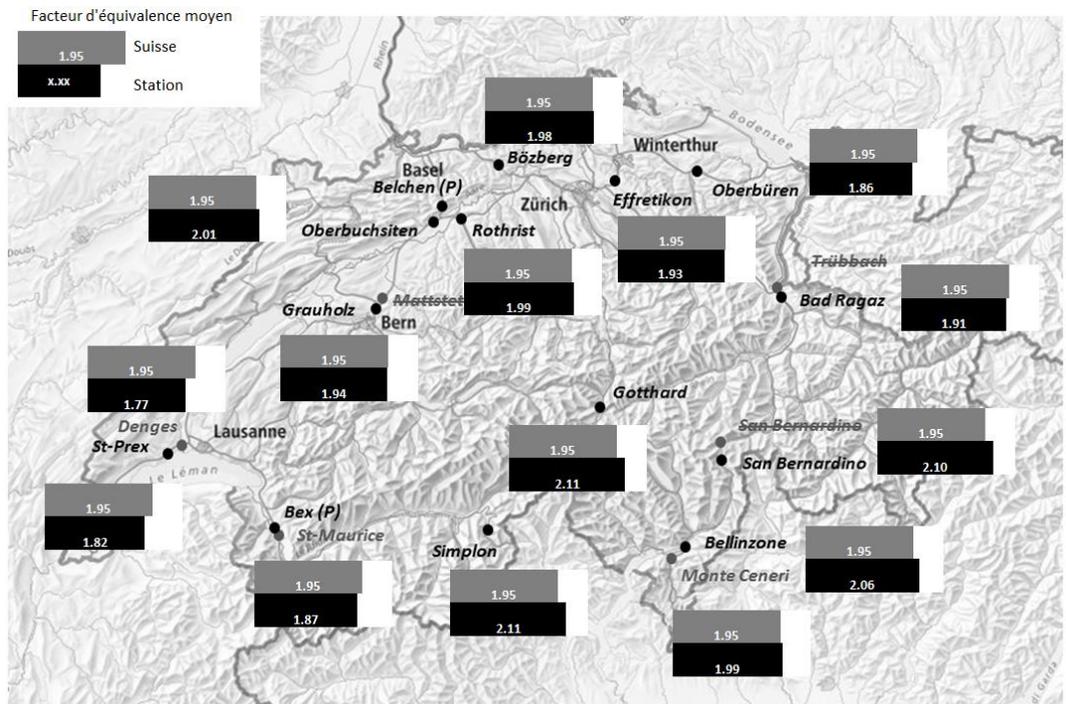


Fig. 5 Facteurs d'équivalence moyens rapportés à la proposition par catégories, chaussées rigides et combinées, parts 2015.

Glossaire

Terme	Signification
AASHO	American Association of State Highway Officials, AASHTO depuis 1973 (AASHO)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
AC	Enrobé bitumineux (AC)
AC EME	Enrobé bitumineux à module élevé (AC EME)
ACF	Enrobé bitumineux pour couches de fondation (ACF)
ACT	Enrobé bitumineux pour couches de base (ACT)
AFD	Administration fédérale des douanes (AFD)
AGB	Groupe de travail recherche en matière de ponts (AGB)
ASB	Bundesamt für Strassen, actuellement ASTRA (ASB)
C	Cracking, fissuration (C)
cm	Unité de base métrique, centimètre (cm)
CSACR	Comptage suisse automatique de la circulation routière (CSACR)
CSCR	Comptage suisse de la circulation routière (CSCR)
CSF FZC	Classification poids lourds (CSF) <i>Fahrzeugcode (FZC)</i>
D	Epaisseur de la dalle de béton (D)
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)
UVEK DATEC	<i>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)</i> <i>Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC)</i>
EALF	Equivalent Axle Load Factor, facteur d'équivalence de la charge d'essieu (EALF)
EPF	Ecole Polytechnique Fédérale (EPF)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
ESAL	Equivalent Single Axle Load, charge d'un essieu de référence (ESAL)
ETHZ	Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (ETHZ)
FORCE	First OECD Road Common Experiment, essai en vraie grandeur, OCDE (FORCE)
FN	Couche de fondation en matériaux non-liés (FN)
FNG	Couche de fondation en matériaux non-liés, grave 0/100 (FNG)
ft	Feet, pied, unité de longueur (ft)
ISETH	Institut für Strassen, Eisenbahn und Felsbau, actuellement IVT (ISETH)
ITS	Intelligent transportation system, système de transport intelligent (ITS)
IVT	Institute for Transport Planning and Systems, ETHZ (IVT)
k	Facteur d'équivalence (k)
k _F	Facteur d'équivalence par véhicule lourd (k _F)
kg	Unité de masse dans le système international d'unités, kilogramme (kg).
LW	Lastwagen, camion (LW)
LZ	Lastenzug, camion à remorque (LZ)
N	Unité de mesure de la force dans le système international, Newton (N)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation, EPFL (LAVOC)
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE)

OCR	Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR)
OFROU ASTRA USTRA FEDRO	Office fédéral des routes (OFROU) <i>Bundesamt für Strassen (ASTRA)</i> <i>Ufficio federale delle strade (USTRA)</i> <i>Federal roads office (FEDRO)</i>
OFS	Office fédéral de la statistique (OFS)
OFT	Office fédéral des transports (OFT)
ONU UNO	Organisation des nations unies (ONU) <i>Organisation der Vereinten Nationen (UNO)</i>
P	Patching, réparation des arrachements (P)
pci	Pound-force per cubic inch, livre-force par pouce cube (pci)
p ₀	Indice PSI à l'état initial (p ₀)
p _t	Indice PSI à la fin de la durée de service (p _t)
PA	Béton bitumineux drainant (PA)
PAT	Entreprise spécialisée dans les ITS, actuellement International Road Dynamics Inc. (IRD) (PAT)
PB	Béton bitumineux pour couche de base (PB)
psi	Pound-force per square inch, unité de mesure de contrainte et de pression, livre-force par pouce carré (psi)
PSI	Present Serviceability Index, indice de viabilité (PSI)
RD	Rut depth, profondeur d'ornières (RD)
RGD HLS	Route à grand débit (RGD) <i>Hochleistungsstrasse (HLS)</i>
RL VS	Route de liaison (RL) <i>Verbindungsstrasse (VS)</i>
RP HVS	Route principale (RP) <i>Hauptverkehrsstrasse (HVS)</i>
RPLP LSVA	Redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP) <i>Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA)</i>
S	Classe de portance (S)
SAMI	Stress Absorbing Membrane Interlayer, membrane absorbant les tensions (SAMI)
SMA	Splittmastixasphalt, béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic (SMA)
SN	Norme suisse (SN)
SN	Structural Number (SN)
SN _{CH}	Structural Number selon SN 640 324 [4] pour la Suisse (SN _{CH})
SS	Sattelschlepper, semi-remorque (SS)
SV	Slope variance, variance de la pente longitudinale (SV)
T	Classe de trafic pondéral (T)
TF	Trafic pondéral équivalent journalier (TF)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
VT	Véhicule de tourisme (VT)
W	Trafic pondéral équivalent total (W)
WIM	Weigh-in-Motion, comptage poids lourds (WIM)
W _n	Trafic pondéral équivalent total (sur n années) (W _n)

Bibliographie

Normes

- [1] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Août 2011), « **Dimensionnement de la structure des chaussées – Trafic pondéral équivalent** », SN 640 320.
- [2] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Décembre 2000), « **Dimensionnement – Trafic pondéral équivalent** », SN 640 320a. Norme caduque.
- [3] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Juillet 1971), « **Dimensionnement – Trafic pondéral équivalent** », SNV 640 320. Norme caduque.
- [4] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Août 2011), « **Dimensionnement de la structure des chaussées – Sol de fondation et chaussée** », SN 640 324.
- [5] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Octobre 1997), « **Entretien des chaussées – Renforcement de superstructures de chaussées avec revêtements bitumineux à l'aide de mesures de déflexion** », SN 640 733b.
- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Août 2010), « **Entretien des chaussées – Réparation et remise en état des couches de surface en béton** », SN 640 735b.
- [7] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (mai 1988), « **Recensements dans les transports – Comptages** », SN 640 002.
- [8] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (avril 1992), « **Projet, bases – Types de route** », SN 640 040b.
- [9] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Juin 2003), « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice** », SN 640 925b.

Directives

- [10] Office fédéral des routes OFROU (2009), « **Postes de comptage du trafic** », directive ASTRA 13012, édition 2009 V1.05.

Documentation

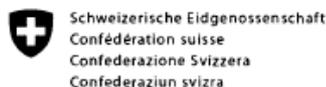
- [11] Dr. M. Shojaati, L. Zeiler-Sherer, Dr. M. Caprez, I. Scazziga, F. L. Yang (2002), « **Tägliche äquivalente Verkehrslast TF verschiedener Strassentypen in der Schweiz** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 14/96, Rapport VSS No. 1017*.
- [12] M. Horat, L. Seiler, Dr. M. Caprez (2000), « **Anzahl Äquivalenter Einheitsachslasten verschiedener Fahrzeugtypen** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 11/00, Rapport VSS No. 477*.
- [13] AASHTO (1986 - 1998), « **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures** », American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [14] Office fédéral des routes OFROU, « **WIM-Ordnungssystem : Fahrzeugklassen (CS) und Fahrzeugcodes (CSF)** », *Documentation ASTRA*.
- [15] Dr. J. Perret, Prof. A.-G. Dumont (Sept. 2004), « **Modélisation des charges d'essieu** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2000/060 ASTRA 2000/421-1, Rapport VSS No. 1142*.
- [16] Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière (Déc. 2014), « **Réglementation des poids et dimensions limites des véhicules lourds utilisés pour le transport interprovincial** », Canada.
- [17] IVT-ETHZ, I. Scazziga (Janvier 1996), « **Beobachtung des Verhaltens ausgewählter Strassenabschnitte** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 29/81, Rapport VSS No. 1304*.
- [18] OFT, centre de compétences, Données du transport de marchandises (Avril 2015), « **Transport transalpin de marchandises en Suisse, Indices 2014 et interprétation de l'évolution** », *Rapport du 2^{ème} semestre 2014*, OFT, DETEC.
- [19] A.-G. Dumont, J.-C. Turtzschy, Dr. T. Pucci, M. Fontana, I. Scazziga (Juillet 2001), « **Analyse des modèles de comportement des chaussées** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 11/99, Rapport VSS No. 1002*.

-
- [20] I. Scazziga (Août 2008), « **Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen – Schadenprozesse und Zustandsverläufe** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/712, Rapport VSS No. 1304.*
-
- [21] M.-A. Fénart, A.-G. Dumont, L. D'Angelo, A. Nussbaumer (en cours), « **Simulations de trafic intégrant la détermination d'indices de performance structurale ; Partie 1 : Trafic** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche AGB 2010/003.*
-
- [22] 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** », EATA 2015, Stockholm, Suède.
-
- [23] OFS (mai 2012), « **Aktualisierte Schätzung zum schwerverkehrsbedingten Anteil an den Strassenkosten, Phase I** », *Rapport phase I*, OFS.
-
- [24] OFS (juillet 2013), « **Aktualisierte Schätzung zum schwerverkehrsbedingten Anteil an den Strassenkosten, Phase II** », *Rapport phase II*, OFS.
-
- [25] OFS (septembre 2013), « **Aktualisierte Schätzung zum schwerverkehrsbedingten Anteil an den Strassenkosten, Synthesebericht** », *Rapport de synthèse*, OFS.
-
- [26] M. Ould Henia, J. Perret (novembre 2010), « **Compte routier. Actualisation des coefficients pour la répartition des coûts liées au poids** », *Rapport final*, client ECOPLAN pour le compte de l'OFS.
-
- [27] J. Perret, A.-G. Dumont, J.-C. Turtzschy, M. Ould Henia (décembre 2001), « **Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement : 1^{ère} partie : Enrobés à haut module** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 20/96, Rapport VSS No. 1000.*
-

Ordonnances

-
- [28] Confédération suisse (1962, état au 1^{er} juin 2015), « **Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR)** », RS 741.11, www.admin.ch.
-

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 : 03.10.2016

Données de base

Projet N° : VSS 2015/411

Titre du projet : Actualisation des facteurs d'équivalence de la norme SN640320

Echéance effective : 30.11.2016

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche contient une évaluation actuelle et également historique des caractéristiques des charges et des véhicules lourds sur l'ensemble du réseau routier suisse.

La méthodologie retenue est basée sur l'approche AASHTO qui constitue toujours le fondement de la méthode de dimensionnement suisse actuelle. Ce choix permet de garantir la continuité par rapport aux recherches précédentes et de s'assurer que les tendances observées soient indépendantes de la méthode d'analyse mise en œuvre.

L'analyse des charges et de la composition du trafic exploite différentes sources de données:

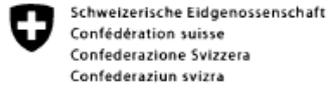
- Les stations de pesage en marche (Weigh in Motion: WIM) au nombre de 15, et réparties sur plusieurs axes des routes nationales,
- Les stations de comptage suisse automatiques (stations CSACR), dont une sélection de 34 stations a été considérée en détail.

Les stations WIM enregistrent, en plus de la classe du véhicule lourd (selon la classification Swiss 10), la charge mesurée pour chaque axe du véhicule identifié. Ces deux informations permettent de déterminer, pour chaque unité de regroupement de la norme SN 640 320, un facteur d'équivalence moyen correspondant.

Les données pondérales n'étant disponibles que sur les stations WIM des routes nationales, les facteurs d'équivalence sont extrapolés pour les routes principales et de liaison selon des hypothèses argumentées. L'extrapolation est mise en œuvre avec la considération des facteurs d'équivalence obtenus sur les routes nationales et les répartitions en classes de véhicules selon le système Swiss 10 sur le réseau des routes principales et de liaison.

Une analyse critique des différents résultats est menée, notamment l'effet du changement du système de classification (Swiss 7 à Swiss 10) et la pertinence du regroupement de certaines classes de véhicules.

La recherche est conclue par la proposition de nouvelles valeurs pour les facteurs d'équivalence dans le cas où ce changement se justifie par rapport aux tendances observées.



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

Atteinte des objectifs :

L'objectif principal de projet de recherche est atteint avec la proposition de valeurs actualisées des facteurs d'équivalence pour les catégories de véhicules lourds.

Les résultats obtenus constituent une base utile pour décider d'une mise à jour de la norme SN 640 320.

Déductions et recommandations :

Le projet aboutit aux déductions et recommandations suivantes :

- 1) Utiliser dans la mesure du possible les données de pesage ou de comptage locales disponibles. Les conditions locales peuvent fortement influencer la composition du trafic lourds et conduire à une évaluation erronée du trafic pondéral.
- 2) Les facteurs d'équivalence globaux ne doivent être utilisés que si aucune des procédures détaillées décrites dans la norme SN 640 320 ne peut être appliquée.
- 3) L'évolution du parc automobile (silhouettes, parts, chargements) et son influence sur les facteurs d'équivalence doivent être suivies régulièrement. Nous recommandons pour cela une périodicité de la vérification entre 10 à 15 années.

Publications :

Aucune

Chef/cheffe de projet :

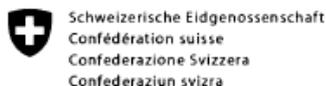
Nom : Ould Henia

Prénom : Mehdi

Service, entreprise, institut : Nibuxs Sàrl

Signature du chef/de la cheffe de projet :





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 :

L'objectif du projet est atteint par la mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse des différentes sources de données disponibles en Suisse.

La présente recherche arrive à la conclusion que la composition du trafic actuel sur le réseau routier suisse présente une évolution significative qui justifie une adaptation des facteurs d'équivalence de la norme SN 640 320.

Mise en oeuvre :

Les résultats du présent mandat devraient servir de base pour la révision de la norme SN 640 320.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

La représentativité des valeurs des facteurs d'équivalence doit être vérifiée régulièrement.

Influence sur les normes :

Les résultats obtenus sont à prendre en considération lors de la révision de la norme SN 640 320.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Horat

Prénom : Martin

Service, entreprise, institut : Tiefbauamt Stadt Zürich

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :



Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement est à télécharger sur le site www.astra.admin.ch (Service → Recherche en matière de routes → Downloads → Formulaires).