



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

Conception des arrêts de bus

Konzeption von Bushaltestellen

Design of bus stops

Nibuxs Sàrl

Mehdi Ould-Henia, Ing. civil, dr ès science EPF

Parisa Rossel, Ing. civil, dr ès science KTH

Nicolas Bueche, Ing. civil, dr ès science EPF

**Projet de recherche VSS 2013/502 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Mars 2020

1668

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

Conception des arrêts de bus

Konzeption von Bushaltestellen

Design of bus stops

Nibuxs Sàrl

Mehdi Ould-Henia, Ing. civil, dr ès science EPF

Parisa Rossel, Ing. civil, dr ès science KTH

Nicolas Bueche, Ing. civil, dr ès science EPF

Projet de recherche VSS 2013/502 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

Parisa Rossel, Nibuxs Sàrl

Nicolas Bueche, Nibuxs Sàrl

Commission d'experts responsable

Commission d'experts CNR 4.1 : Dimensionnement, terrassement, infrastructure

Commission de suivi

Président

Martin Horat

Membres

Frédéric Stoppa

Martin Bänziger

Christiane Raab

Rolf Werner

Studer Dominik

Yvan Ramel

Cofinancement du projet de recherche

Office fédérale des Routes

Ville de La Chaux-de-Fonds

Ville de Lausanne

Ville de Zurich

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	9
Zusammenfassung	13
Summary	17
1 État des connaissances	21
1.1 Modes d'endommagement dans les chaussées des voies et arrêts de bus	21
1.1.1 Généralités	21
1.1.2 Déformation plastique – Orniérage	21
1.1.3 Fissuration et fatigue mécanique	23
1.1.4 Décollement – délamination des chaussées mixtes	24
1.2 Sollicitations particulières sur les voies et arrêts de bus	25
1.2.1 Généralités sur l'évaluation du trafic	25
1.2.2 Facteur d'équivalence – agressivité des véhicules	26
1.2.3 Canalisation du trafic	26
1.2.4 Vitesse de circulation	27
2 Inventaire des Success stories	29
2.1 Récolte des expériences	29
2.2 Structures rigides	30
2.2.1 Dalles en béton avec ou sans goujons	30
2.2.2 Dalles en béton armé continu	31
2.3 Structures bitumineuses.....	32
2.3.1 Enrobés à haut module	32
2.3.2 Enrobés spéciaux et enrobés avec additifs	33
2.4 Structures mixtes ou composites	34
2.4.1 Enrobé percolé (VMB).....	34
2.4.2 Whitetopping – Béton de ciment mince collé (BCMC)	35
2.4.3 Béton armé continu sur enrobé bitumineux	37
2.5 Autres structures	39
2.5.1 Pavés	39
3 Conception et instrumentation des structures expérimentales	41
3.1 Choix des structures	41
3.2 Chaussée bitumineuse – Ville de La Chaux-de-Fonds.....	41
3.2.1 Choix de la structure	41
3.2.2 Site	41
3.2.3 Trafic	41
3.2.4 Portance du sol	42
3.2.5 Dimensionnement	42
3.2.6 Instrumentation.....	43
3.2.7 Construction	44
3.3 Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne.....	45
3.3.1 Choix de la structure	45
3.3.2 Site	45
3.3.3 Trafic	46
3.3.4 Portance du sol	47
3.3.5 Conception et dimensionnement.....	47
3.3.6 Instrumentation.....	48
3.3.7 Construction	48
3.4 Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich	51
3.4.1 Choix de la structure	51
3.4.2 Site	52

3.4.3	Trafic	52
3.4.4	Portance du sol	53
3.4.5	Conception et dimensionnement	53
3.4.6	Instrumentation	55
3.4.7	Construction	56
4	Mesures sur les structures expérimentales	59
4.1	Chaussée bitumineuse – Ville de la Chaux-de-Fonds	59
4.1.1	Conditions générales	59
4.1.2	Caractéristiques des véhicules	59
4.1.3	Sollicitations types et amplitudes maximales	60
4.1.4	Mesure de la portance avec le HWD	62
4.2	Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne	63
4.2.1	Conditions générales	63
4.2.2	Caractéristiques des véhicules	64
4.2.3	Sollicitations types et amplitudes maximales	64
4.2.4	Mesure de la portance avec le HWD	67
4.3	Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich	69
4.3.1	Conditions générales	69
4.3.2	Caractéristiques des véhicules	69
4.3.3	Sollicitations types et amplitudes maximales	70
4.3.4	Mesure de la portance avec le HWD	73
5	Monitoring de l'état des structures expérimentales	75
5.1	Chaussée bitumineuse – Ville de la Chaux-de-Fonds	75
5.2	Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne	75
5.3	Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich	76
6	Analyse du comportement mécanique des structures expérimentales par simulations numériques	79
6.1	Introduction	79
6.2	Hypothèses de calcul	79
6.3	Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne	81
6.3.1	Modèle	81
6.3.2	Lois de contact	82
6.3.3	Résultats	83
6.4	Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich	86
6.4.1	Modèle	86
6.4.2	Lois de contact	87
6.4.3	Résultats	87
7	Conception des chaussées	91
7.1	Trafic	91
7.1.1	Rappel des recommandations de la norme actuelle (SN 640 320)	91
7.1.2	Procédure de calcul proposée selon les caractéristiques de la flotte de bus	91
7.2	Choix de la structure	94
7.3	Choix de la couche de roulement	94
7.4	Conception de la zone de transition	94
7.4.1	Réfection simultanée de l'arrêt de bus et de la zone de transition	94
7.4.2	Réfection de la surface de l'arrêt de bus uniquement	97
8	Conclusions	99
	Annexes	101

Glossaire	119
Bibliographie	121
Clôture du projet	123
Index des rapports de recherche en matière de route	126

Résumé

La conception et le dimensionnement des chaussées pour voies et arrêts de bus est une tâche du planificateur pour laquelle les normes actuelles donnent les principes généraux mais pas une démarche pratique détaillée pour couvrir les aspects importants de la problématique.

L'approche pratique voulue pour ce projet s'est basée sur l'analyse des différentes expériences nationales et internationales sur les surfaces à fortes sollicitations (essentiellement des arrêts de bus) qui peuvent être qualifiées de réussies en terme de durabilité mécanique par rapport au coût global de mise en œuvre. Cette démarche d'analyse des expériences existantes vise l'exhaustivité des techniques de construction et la disponibilité d'un recul suffisant.

Pour compléter la revue bibliographique des expériences internationales, une enquête des pratiques nationales a été réalisée avec la distribution d'un questionnaire aux principales villes et communes suisses.

Les expériences positives récoltées ont permis de cibler trois structures de chaussées prometteuses proposées aux villes partenaires pour leur construction et leur suivi pendant toute la durée du projet. Une volonté d'explorer le potentiel de matériaux et techniques de construction innovants a été encouragée par les villes partenaires.

Les sections expérimentales retenues sont les suivantes :

1. Structure standard entièrement bitumineuse avec couche de roulement en liant PmB. La couche de roulement bitumineuse est imposée par le climat froid du site supportant un service hivernal intense ;
2. Couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) avec gravillonnage reposant sur une couche de liaison en enrobé à module élevé (AC EME) ;
3. Structure composite avec une couche en béton armé continu parfaitement collée sur une couche bitumineuse en AC T. La liaison entre la dalle principale et la chaussée existante est assurée par la mise en œuvre d'une dalle de transition de 2 m de longueur et avec un épaisseur variant linéairement. La dalle en béton a été recouverte par un matériau de type asphalte coulé peu bruyante (PMA 8).

Les limitations de la méthode de dimensionnement suisse a nécessité le recours à des méthodes analytiques pour les deux dernières structures. Les méthodes analytiques sont plus adaptées au fonctionnement mécanique des chaussées composites et autorisent l'utilisation rationnelle des matériaux spéciaux.

Les résultats des méthodes de dimensionnement analytiques ont été complétés par une étude mécanique plus poussée avec la méthode des éléments finis permettant une évaluation plus fine des sollicitations au niveau des discontinuités (bords des dalles, zone de transition).

Les sections expérimentales sont construites entre 2014 et 2015 et sont instrumentées avec des capteurs de déformation et de température afin de valider leur comportement mécanique par rapport aux hypothèses initiales.

Le suivi de chaque section expérimentale comprend les investigations suivantes :

- Mesure des déformations de la structure sous trafic réel (passage de bus) avec pesage simultané des essieux des bus ;
- Mesure de la capacité portante de la structure avec le déflectomètre à masse tombante (HWD) ;

- Surveillance de l'état de surface de la chaussée pendant la durée du projet.

Les campagnes de mesure de la déformation et de la portance ont permis de récolter des données pertinentes sur le fonctionnement mécanique des structures de chaussées. Les déformations mesurées confirment en général les déformations calculées lors de la procédure de dimensionnement analytique. Des écarts sont notés pour la structure en BFUP, avec des valeurs mesurées plus importantes que les valeurs calculées.

Le suivi du comportement des chaussées sur une période de 3 années a permis de noter les éléments suivants :

La structure bitumineuse a vu la formation d'un orniérage significatif. Ce constat illustre l'importance d'opter pour des matériaux résistants à l'orniérage même si le climat hivernal du site est particulièrement sévère.

La structure avec couche de roulement en BFUP a démontré un comportement satisfaisant sur un site très exigeant. Un entretien du joint a été nécessaire et quelques arrachements localisés ont été observés dans le gravillonnage. Un décollement du BFUP de son support bitumineux a cependant été constaté après 3.5 années de service.

La structure en béton armé continu est celle qui offre le plus grand potentiel de durabilité structurelle. La couche de roulement bitumineuse de cette section expérimentale a subi une dégradation prématurée (déformation de poussée) sur la trace de roue droite. Cette dégradation est liée a priori à un défaut de collage avec la surface supérieure du béton, et ne met pas en cause le fonctionnement mécanique des couches structurelles.

La durabilité du recouvrement du béton avec des couches bitumineuses, dans une optique d'assainissement du bruit de roulement, demeure une problématique en suspens.

Des recommandations sur la conception des voies et arrêts de bus sont données. Elles portent essentiellement sur les principes de détermination du trafic pondéral équivalent, le choix des structures et des couches de roulement en fonction de critères jugés déterminants.

La détermination du trafic pondéral équivalent devrait se faire selon la procédure de base décrite au chiffre 19 de la norme SN 640 320. Les facteurs d'équivalence proposés au chiffre 20 de cette même norme ne sont pas représentatifs de l'effet effectif des bus et leur usage est donc déconseillé. La conversion en essieux standards de 8.16t est réalisée à l'aide du tableau 2 de la norme SN 640 320.

L'évaluation des charges représentatives par essieu se base sur les caractéristiques des véhicules, notamment les charges à vide et maximales, ainsi que le taux de remplissage des véhicules connu du gestionnaire de la flotte de véhicules. L'effet important du taux de remplissage sur le facteur d'équivalence du véhicule justifie la considération de périodes de fréquentation représentatives (périodes de pointe, périodes creuses, etc.).

Le facteur d'équivalence considéré est pondéré en fonction de la largeur de la voie de bus et dans les zones d'arrêt. Le taux d'accroissement annuel du trafic n'est a priori pas applicable dans la part du trafic pondéral relative aux bus.

La zone de transition entre la chaussée de l'arrêt de bus et la voie adjacente est souvent sujette à des dégradations localisées liées principalement à la différence de rigidité entre les deux structures. La durabilité de la zone de transition peut être améliorée par toute mesure visant une variation progressive de la rigidité de la structure.

Lors de la réfection d'un arrêt de bus, il est recommandé, bien que cela ne soit pas toujours possible, de traiter simultanément l'arrêt de bus et la zone de transition située de part et d'autre de l'arrêt. Afin de minimiser les dégradations au niveau des zones de

transition, des recommandations constructives sont données dans le cas d'une structure bitumineuse et d'une structure rigide.

La présente recherche apporte de nouvelles connaissances et solutions prometteuses tout en soulevant certaines faiblesses et points en suspens.

On mentionnera particulièrement la durabilité du collage entre les couches bitumineuses et les couches au liant hydraulique (béton, BFUP).

Le recouvrement des dalles béton avec une couche bitumineuse mince est une pratique qui sera de plus en plus envisagée en milieu urbain en tant que mesure pour la diminution du bruit de roulement. La pérennité de cette mesure doit résoudre la problématique de l'adhésion à l'interface enrobé/béton très sollicitée en cisaillement sur les arrêts de bus.

La mise en œuvre d'une couche mince en BFUP est une technique prometteuse pour les surfaces fortement sollicitées comme les arrêts de bus. La durabilité de cette technique dépend de l'adhésion pérenne du BFUP sur le support bitumineux.

L'amélioration de l'attractivité de la technique du BFUP en couche de roulement peut se faire au travers de toute mesure visant à rendre le coût de mise en œuvre concurrentiel. On mentionnera notamment une mécanisation plus poussée de la pose du BFUP, et des techniques de traitement de la surface de roulement (gravillonnage) plus économiques.

Zusammenfassung

Für die Planung und Dimensionierung von Busfahrbahnen und -haltestellen sind in den aktuellen Normen zwar allgemeine Grundsätze zu finden, die Normen machen aber weder detaillierten Vorgaben noch bieten sie konkrete Ansätze für Planung und Dimensionierung.

Der für die Bearbeitung des vorliegenden Projekts gewählte praktische Ansatz basiert auf einer Analyse nationaler und internationaler Erfahrungen mit stark beanspruchten Oberflächen (hauptsächlich Bushaltestellen) in Form einer Literaturrecherche. Dabei wurden Konstruktionen ausgewählt, deren mechanische Dauerhaftigkeit im Verhältnis zu den Gesamtkosten der Implementierung als erfolgreich bezeichnet werden konnte. Die Analyse bestehender Erfahrungen zielte darauf ab, Bautechniken möglichst vollständig aufzuführen und zu bewerten.

Weiterhin wurde eine Umfrage zu nationalen Praktiken und Lösungen durchgeführt. Diese Umfrage erfolgte mit Hilfe eines an die wichtigsten Schweizer Städte und Gemeinden versendeten Fragebogens.

Als Resultat der durchgeführten Analysen wurden schliesslich drei vielversprechende Bauweisen ausgewählt und den im Projekt beteiligten Partnerstädten zur Ausführung vorgeschlagen. Die Überwachung der Objekte erfolgte über die gesamte Projektdauer. Dabei war die Bereitschaft innovative Baumaterialien und -techniken zu erforschen bei den beteiligten Partnerstädten vorhanden.

Die ausgewählten Bauweisen und Belagsstrukturen (auch Versuchsabschnitte genannt) waren die folgenden:

1. Standardmässiger bitumenhaltiger Aufbau mit Binderschicht und Deckschicht mit polymermodifiziertem Bindemittel. Aufgrund der geografischen Lage war die Asphaltdeckschicht einem kalten Klima ausgesetzt und wurde durch einen intensiven Winterdienst besonders beansprucht.
2. Ultrahochleistungsfaserbeton (UHFB) Deckschicht mit einer Splittabstreuerung auf einer Hochmodul-Asphalttragschicht (AC EME);
3. Kompositstruktur mit einer durchgehend bewehrten Betonplatte und gutem Verbund zu einer darunterliegenden bitumenhaltigen Tragschicht. Die Verbindung zwischen der Hauptbetonplatte und der vorhandenen Fahrbahn wird durch eine 2 m lange Schleppplatte sichergestellt. Die Betonplatte wurde mit einer lärmarmen Gussasphaltschicht (PMA 8) abgedeckt.

Aufgrund der unzureichenden schweizerischen Bemessungsmethode wurde für die beiden letztgenannten Bauweisen eine analytische Bemessungsmethode gewählt. Analytische Verfahren eignen sich besser, das mechanische Verhalten von Verbundbelägen abzubilden und ermöglichen es, den Einsatz von Spezialmaterialien zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der analytischen Bemessungsmethode wurden durch eine detailliertere Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode ergänzt, die eine Bestimmung der diskontinuierlichen Spannungsverteilung an der Betonplatte, den Rändern und in der Übergangszone ermöglicht.

Alle 3 Versuchsabschnitte wurden zwischen 2014 und 2015 realisiert und sind mit Dehnungs- und Temperatursensoren ausgestattet, um ihr mechanisches Verhalten in Bezug auf die Ausgangsannahmen zu validieren.

Die Begleitung der Versuchsabschnitte umfasste die folgenden Untersuchungen:

- Messung von Strukturverformungen unter realem Verkehr (Busdurchfahrt) bei gleichzeitiger Erfassung der Busachslasten;
- Messung der Tragfähigkeit der Struktur mit einem Fallgewichtsdeflektometer (HWD);

Die Kampagnen zur Messung der Verformung und Tragfähigkeit ermöglichten die Sammlung relevanter Daten betreffend der mechanischen Funktionsweise von Fahrbahnstrukturen. Die gemessenen Verformungen bestätigen dabei im Allgemeinen die mit Hilfe des analytischen Dimensionierungsverfahrens berechneten Werte. Für die UHFB-Struktur wurden Abweichungen festgestellt, wobei die Messwerte grösser als die berechneten Werte waren.

Die Überwachung der Fahrbahnbelastung über einen Zeitraum von drei Jahren ergab folgende Erkenntnisse:

- Beim Testfeld mit der bitumenhaltigen Struktur kam es zu einer signifikanten Spurrinnenbildung. Dies zeigt, dass es auch bei einem strengen Winterklima wichtig ist, möglichst spurrinnenresistente Materialien zu wählen.
- Insgesamt hat sich die Versuchsanordnung mit einer UHFB-Deckschicht trotz hoher Beanspruchungen gut bewährt. Zwischenzeitlich musste nur Fugenunterhalt betrieben werden und lokal wurden Ausbrüche bei der Splittabstreuerung festgestellt. Allerdings wurde nach 3,5 Betriebsjahren eine Ablösung des UHFB von der bitumenhaltigen Unterlage beobachtet.
- Der Aufbau mit einer durchgehend bewehrte Betonplatte bietet das grösste Potenzial zur Gewährleistung einer langen Lebensdauer. Im vorliegenden Fall wurde die Asphaltdeckschicht des Versuchsabschnitts im Bereich der rechten Radspur vorzeitig geschädigt (Schubverformung). Diese Schädigung war auf einen Verklebungsfehler an der Oberseite des Betons zurückzuführen und beeinträchtigt nicht die mechanische Funktion und Dauerhaftigkeit des Aufbaus.
- Die Dauerhaftigkeit Überdeckung des Betonbelags mit bitumenhaltigen Schichten im Hinblick auf der Minderung des Rollgeräusches ist ein noch offenes Thema.

Im Forschungsprojekt werden Empfehlungen zur Konzeption von Busspuren und -- haltestellen gegeben. Diese konzentrieren sich auf die Grundlagen zur Bestimmung der äquivalenten Verkehrslasten, die Wahl des Oberbaus und der Deckschichtentypen nach als entscheidend erachteten Kriterien.

Die Bestimmung der äquivalenten Verkehrslasten sollte nach dem in SN 640 320, Ziffer 19 beschriebenen Verfahren erfolgen. Die in Ziffer 20 derselben Norm vorgeschlagenen Äquivalenzfaktoren sind nicht repräsentativ für die tatsächliche Wirkung von Bussen und ihre Verwendung wird daher nicht empfohlen. Die Umrechnung auf 8,16t Standardachsen erfolgt nach Tabelle 2 der SN 640 320.

Die Bewertung der repräsentativen Achslasten basiert auf den Fahrzeugmerkmalen, insbesondere der Leer- und Höchstlast, und der dem Flottenmanager bekannten Fahrzeugauslastung. Die signifikante Auswirkung des Auslastungsfaktors auf den Fahrzeugäquivalenzfaktor rechtfertigt die Berücksichtigung repräsentativer Nutzungszeiträume (Haupt- und Nebenverkehrszeiten usw.).

Der berücksichtigte Äquivalenzfaktor wird entsprechend der Breite der Busspur und in den Haltezonen erhöht. Die jährliche Zunahmerate des Verkehrsaufkommens ist a priori auf den äquivalenten Verkehrslastanteil des Busverkehrs nicht anwendbar.

In der Übergangszone zwischen der Bushaltestelle und der angrenzenden Fahrspur treten häufig lokale Schäden auf, die hauptsächlich auf die unterschiedliche Steifigkeit der beiden Strukturen zurückzuführen sind. Die Haltbarkeit der Übergangszone kann

durch Massnahmen, die auf eine progressive Veränderung der Steifigkeit der Struktur abzielen, verbessert werden.

Bei der Erneuerung einer Bushaltestelle wird empfohlen, wenn immer möglich, die Bushaltestelle und die Übergangszone auf beiden Seiten der Haltestelle gleichzeitig zu bearbeiten. Im Falle einer bituminösen Struktur und einer starren Struktur werden in jeder der oben genannten Situationen konstruktive Empfehlungen gegeben. Um die Schäden in den Übergangszonen zu minimieren, werden konstruktive Empfehlungen sowohl für bituminöse als auch für starre Beläge gegeben.

Diese Forschung liefert neue Erkenntnisse und vielversprechende Lösungen, offenbart aber gleichzeitig einige Schwächen und ungelöste Probleme (Fragestellungen).

Besonders hervorzuheben ist die Dauerhaftigkeit des Verbundes zwischen bituminösen Schichten und Schichten mit hydraulischem Bindemittel (Beton, UHFB).

Die Abdeckung von Betonplatten mit einer dünnen Asphaltsschicht ist in städtischen Gebieten als Massnahme zur Reduzierung des Rollgeräuschs, die immer häufiger in Betracht gezogen wird. Das Langzeitverhalten dieser Massnahme sollte das Problem der Haftung an der Schnittstelle Asphalt/Beton lösen, die an den Bushaltestellen stark schubbelastet ist.

Das Auftragen einer dünnen UHFB Schicht ist eine vielversprechende Technik für hochbeanspruchte Oberflächen wie z.B. Bushaltestellen. Die Haltbarkeit dieser Technik hängt von der dauerhaften Haftung des UHFB auf dem bituminösen Untergrund lösen.

Eine Verbesserung der Attraktivität der UHFB Anwendung als Deckschichten kann durch Massnahmen erreicht werden, die darauf abzielt, die Kosten für die Verlegung zu verringern und diese Bauweise dadurch wettbewerbsfähig zu machen. Dazu gehören die weitgehende Mechanisierung des UHFB Bau und Entwicklung wirtschaftlicherer Techniken zur Behandlung von Fahrbahnoberflächen (Splittabstreuung).

Summary

The design of pavement structures for bus lanes and bus stops is an engineering task for which current swiss standards only provide general principles but lack detailed practical approaches to cover important aspects of the problem.

The practical approach for this project was based on the analysis of various national and international experiences with highly loaded pavement surfaces (mainly bus stops) that can be described as successful in terms of mechanical durability in relation to the overall cost of implementation. This approach to analyse the existing experiences is to ensure the integrity of the assessed construction techniques and the availability of sufficient feedbacks.

To complete the literature review of international experiences, a survey of national practices was carried out with the distribution of a questionnaire to main Swiss cities and municipalities.

Based on the positive experiences from the national survey and the literature review, three promising pavement structures were proposed to three partner cities. These structures were monitored through the project duration. The partner cities had the willingness to explore the innovative materials and building techniques and they have been encouraged to do so.

The selected experimental sections are as follows:

1. Standard full depth bituminous structure with wearing courses with PmB binder. The asphalt wearing course is imposed by the cold climate of the site, which supports intense winter service;
2. Ultra High Performance Fiber Concrete (UHPFC) wearing course with chipping surface dressing on a high modulus asphalt binder course (AC EME);
3. Composite structure with a continuous reinforced concrete layer perfectly bonded to an AC T bituminous layer. The connection between the main slab and the existing pavement is ensured by the building of a 2 m long transition slab and with a linear varying thickness. The concrete slab was covered with a low-noise mastic asphalt material (PMA 8).

The limitations of the Swiss design method demanded the use of mechanical-empirical or analytical design methods for the last two structures. Analytical methods are more suitable when dealing with the mechanical behaviour of composite pavements and allow the efficient use of nonconventional materials.

The results of the analytical design methods have been completed by a more detailed numerical study with the finite element method allowing a more comprehensive evaluation of the stresses at the structure discontinuities (slab edges, transition zone).

The experimental sections were built between 2014 and 2015 and are instrumented with strain and temperature sensors to validate their mechanical behaviour against the initial assumptions.

The assessment of each experimental section includes the following investigations:

- Measurement of structural strains under real traffic (bus passage) with simultaneous weighing of bus axles;
- Measurement of the bearing capacity of the structures with the heavy falling weight deflectometer (HWD);
- Monitoring of pavement surface condition during the project period.

The strain and bearing capacity measurement campaigns have made it possible to collect relevant data on the mechanical behaviour of pavement structures. The measured strains generally confirm the strains calculated by the analytical design procedure. Deviations are noted for the UHPFC structure, with larger measured values than the calculated values.

The monitoring of pavement performance over a 3-year period revealed the following findings:

The bituminous structure has formed significant rutting. This illustrates the importance of choosing rut-resistant materials even if the winter climate on the site is particularly severe.

The structure with a UHPFC wearing course has shown satisfactory performance on a very demanding site. Joints maintenance was necessary and some localized ravelling was observed on the chipping. However, a debonding of the UHPFC from its bituminous bed was observed after 3.5 years of service.

The continuous reinforced concrete structure offers the best potential in terms of structural lifespan. The asphalt wearing course of this experimental section underwent premature degradation (slippage cracking) on the right wheel path. This degradation is mainly related to a coat bonding defect with the upper surface of the concrete, and does not affect the mechanical lifespan of the structural layers.

The durability of concrete overlaying with bituminous layers, in order to reduce the rolling noise, is still an unresolved issue.

Recommendations on the design of bus lanes and stops are given. These recommendations focus on the principles of determining equivalent design traffic, the choice of structures and wearing courses types according to significant considered criteria.

The determination of the equivalent traffic should be carried out according to the basic procedure described in SN 640 320, paragraph 19. The equivalence factors proposed in paragraph 20 of the same standard are not representative of the actual effect of the buses and their use is therefore not recommended. The conversion to standard axle load of 8.16 t is carried out using the Table 2 of the standard SN 640 320.

The evaluation of the representative axle load is based on the vehicle characteristics, especially the empty and maximum loaded weight, as well as the occupancy rate provided by the fleet manager. The significant effect of the occupancy rate on the vehicle equivalence factor justifies the consideration of representative periods of traffic (peak and off-peak periods, etc.).

The considered equivalent factor is augmented according to the width of the bus lane and the stopping zone. The annual traffic growth rate is, in principle, not applicable in the part of the equivalent traffic related to the bus traffic.

The transition zone between the bus stop and the neighboring pavement area is often subjected to the localized damage, mainly due to the difference in stiffness between the two structures. The durability of the transition zone can be improved by a progressive variation of the stiffness of the structure.

In the case of a bus stop rehabilitation, it is recommended, although not always possible, to work on the bus stop and the transition area on either side of the stop at the same time. In order to mitigate degradation in the transition zones, constructive recommendations are given for both bituminous and rigid structures.

This research provides new knowledge and promising solutions while raising some weaknesses and unresolved issues.

We can highlight specially the importance of the durability of the bond between bituminous layers and layers with hydraulic binder (e.g. concrete, UHPFC).

Covering concrete slabs with a thin asphalt layer is a practice that will be increasingly considered in urban areas as a measure to reduce the rolling noise. The durability of this measure should solve the problem of the asphalt/concrete interface bonding which is highly solicited in term of shear in the bus stops.

The application of a thin layer of UHPFC is a promising technique for highly loaded surfaces such as bus stops. The durability of this technique should solve the problem on the interface bonding between the UHPFC and the underlying bituminous layer.

Increasing the popularity of the application of the UHPFC as a wearing layer can be achieved through measures, which reduce the construction costs. These include further mechanization of UHPFC paving and more economical wearing course surface treatment techniques (gravelling).

1 État des connaissances

1.1 Modes d'endommagement dans les chaussées des voies et arrêts de bus

1.1.1 Généralités

Les chaussées routières subissent lors de leur exploitation des sollicitations diverses liées au trafic et au climat. La répétition de ces sollicitations conduit avec le temps à l'apparition de dégradations diverses visibles en surface de la chaussée.

Les dégradations des chaussées sont relevées selon des normes spécifiques à chaque pays. Le catalogue de dégradations de chaussées à relever est décrit en Suisse dans l'annexe de la norme 640 925b [8] qui les répartit en groupes principaux en fonction de la nature du revêtement.

Les chaussées avec revêtement bitumineux considèrent les groupes principaux suivants :

- Surface glissante ;
- Dégradations des revêtements ;
- Déformations des revêtements ;
- Dégradations structurelles ;
- Réparations.

Les chaussées avec revêtement en béton intègrent de leur côté les groupes principaux suivants :

- Surface glissante ;
- Dégradations aux bords et aux joints ;
- Décalage vertical ;
- Fissures, cassures ;
- Réparations.

Les dégradations qui apparaissent principalement dans le cas de chaussées des voies et arrêts de bus sont données, par fréquence d'occurrence, ci-après :

- Orniérage ;
- Fissures de bords ;
- Fissures diverses ;
- Tôle ondulée.
- Etc.

Ce constat se base sur la recherche bibliographique ainsi que l'exploitation des résultats du questionnaire abordée au paragraphe 2.1.

Les mécanismes à l'origine de ces dégradations seront abordés et discutés dans ce qui suit.

1.1.2 Déformation plastique – Orniérage

Un des plus importantes modes d'endommagement dans les chaussées avec un trafic lourd comme les arrêts de bus, est la déformation permanente ou l'orniérage. Des modèles simples de calcul de la déformation permanente des chaussées existent à l'image du modèle du logiciel VESYS qui estime la déformation permanente à partir de la déformation élastique associée à chaque couche de la structure.

Une démarche originale et quelque peu différente a été élaborée par le centre de recherche routière belge BRRC dans son logiciel d'aide à la formulation des enrobés bitumineux « Prado », et ensuite sa nouvelle version « PradoWin ». Le BRRC a analysé une grande quantité d'échantillons d'enrobés bitumineux standards à l'aide d'un essai de compression triaxial avec différentes compositions du mélange bitumineux [24].

La déformation plastique d'un volume sous un état de contrainte homogène est donnée par la formule :

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2E_p(T, V)} \left(\frac{N}{450V} \right)^{1/4}$$

Avec :

- N : Nombre de charges
- T : Température en °C
- V : Vitesse en km/h
- σ_v, σ_h : contraintes principales verticales et horizontales sous l'effet d'une charge
- E_p : module de déformation permanente dépendant de la composition du mélange bitumineux, de la température et de la vitesse

L'état de contrainte est ensuite déterminé à différentes profondeurs de la couche bitumineuse avec un modèle de calcul multicouches après la décomposition de la structure bitumineuse en une série de sous-couches de faible épaisseur (environ 20 mm) garantissant un état de contrainte homogène. L'état de contrainte calculé permet de déterminer avec la formule précédente la déformation permanente attendue après l'application de la charge.

L'ornière totale est obtenue en sommant le tassement permanent de toutes les sous-couches formant la structure bitumineuse par la formule :

$$T = \sum h_i \cdot \varepsilon_{pi}$$

Avec :

- T : profondeur de l'ornière
- h_i : épaisseur de la sous-couche i
- ε_{pi} : déformation permanente de la sous-couche i

Le mandat de recherche VSS numéro 12/98 [23] a proposé en 2004 une approche semi-empirique pour analyser et prédire l'orniérage d'une chaussée bitumineuse. La démarche élaborée permet le calcul de la profondeur d'ornière en fonction du trafic, des conditions climatiques du site ainsi que de deux paramètres caractérisant le comportement plastique du matériau des couches en surface.

Les résultats prédits par le modèle illustrent une bonne corrélation avec le comportement *in situ* tel qu'illustré sur la Fig. 1.

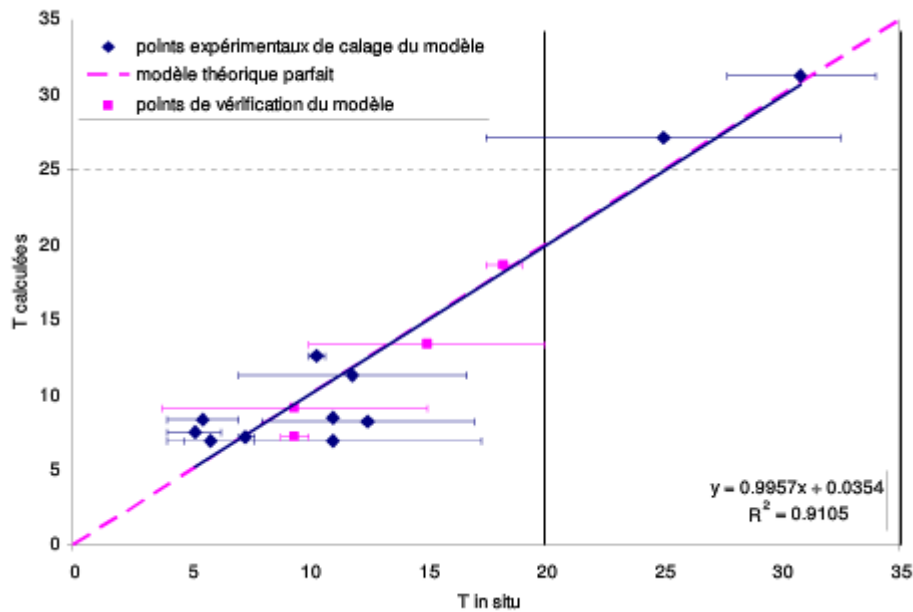


Fig. 1 Ornières mesurées versus ornières calculées par le modèle prédictif du mandat de recherche VSS 12/98

1.1.3 Fissuration et fatigue mécanique

L'endommagement par fissuration est un phénomène complexe dans le domaine de comportement des chaussées. Cette complexité est liée non seulement aux mécanismes mécaniques non linéaires qui gouvernent son initiation et son évolution, mais également de la diversité des causes à l'origine de son apparition.

Les fissures peuvent être classées selon le lieu de leur apparition dans la structure de la chaussée :

- En profondeur, au niveau de la fondation, de la couche de base et le bas de la couche de roulement, et qui remontent ensuite jusqu'à la surface. Il s'agit dans ce cas de dégradation structurelle.
- En surface, et qui se limitent à la couche supérieure de la chaussée. On parle dans ce cas de dégradation superficielle.

La fissuration dans les chaussées peut en outre provenir de diverses origines :

- Retrait thermique ;
- Retrait de la fondation ou de la couche de base à liant hydraulique (stabilisation au ciment, béton) ;
- Discontinuités dans les couches inférieures (joint de construction longitudinal, dalles béton, fissures dans les couches bitumineuses profondes, élargissement de la chaussée, etc.) ;
- Fatigue mécanique ;
- Vieillesse sous l'action de l'environnement (UV, chaleur, eau, etc.)
- Vieillesse chimique ;
- Affaissement de la fondation ;
- Gonflement de la fondation sous l'action du gel ;

1.1.4 Décollement – délamination des chaussées mixtes

Ce mode de dégradation a été peu étudié dans la littérature bien que beaucoup de recherches reconnaissent sa grande importance dans la durabilité de l'interface entre le béton et l'enrobé bitumineux [20,21,22].

Le décollement, désigné plus précisément par le terme « délamination », a été étudié de manière assez poussée entre autre dans le travail de thèse de Bertrand Pouteau [16]. Les résultats présentés ci-dessous sont, sauf mention contraire, issus de la thèse de Pouteau.

Les structures dites mixtes ou composites comportent une couche en béton et une couche en enrobé bitumineux qui sont collées et travaillent mécaniquement comme une seule structure monolithique.

Ces structures présentent un intérêt économique (réduction significative de l'épaisseur des matériaux) pour un trafic important si un collage durable est garanti entre le béton et l'enrobé bitumineux.

On parle souvent dans la littérature française de techniques « blanc sur noir » et qui ont fait leur apparition en France depuis le début des années 1990. Nous pouvons citer particulièrement les techniques suivantes :

- Béton de Ciment Mince Collé (BCMC) : Il s'agit d'une application en France [12] de la technique du Whitetopping provenant des USA [20] en épaisseur mince et ultramince (50 à 100 mm).
- Béton armé continu sur de la grave bitume [10,11].

Le mécanisme de dégradation proposé pour le collage blanc sur noir est le délaminage (décollement) de la structure au niveau de l'interface blanc/noir. Il se distingue par 2 phases :

- Initiation de la fissure à l'interface blanc/noir au niveau des fissures verticales existantes dans le matériau en surface (par exemple fissure de retrait du béton ou bord libre de la dalle)
- Propagation de la fissure au niveau de l'interface horizontale blanc/noir, soit le phénomène de délaminage

Lors de ces 2 phases, l'interface subit un chargement cyclique composé de l'application d'une contrainte de compression combinée à une contrainte de cisaillement générée par la déformation du matériau béton par rapport au matériau bitumineux.

Critères d'initiation de la fissure

Plusieurs auteurs ont proposé des critères de prédiction du nombre de cycles précédent l'amorçage de la fissure dans une zone fortement sollicitée du matériau.

Nous pouvons citer de manière non exhaustive :

$$\ln K_N = a + b \cdot \ln N_A$$

$$K_N = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{d}{p}}}$$

- la méthode du coefficient de Neuber (1958) :

$$\ln N_A = a + b \cdot \ln (E\sigma_{\max}\varepsilon_a)$$

- sa variante modifiée par Smith et al. (1970) :

- la méthode des facteurs d'intensité des contraintes (Jack et Price 1970) :

$$N_A = \frac{a}{(\Delta K)^4}$$

$$\frac{\Delta K}{\sqrt{r}} = b + c \cdot \ln N_A$$

En pratique, les structures réelles présentent toutes dès leur construction des défauts plus ou moins développés. Il est donc raisonnable d'admettre que le nombre de cycle précédent l'amorçage de la fissure est en réalité très faible voire nul, la structure se situant ainsi dès le début de sa mise en service dans la phase de propagation de la fissure.

Critères de propagation de la fissure

Le propagation de la fissure opère depuis une amorce de fissure (défaut) et est généralement caractérisée par une vitesse d'avance de son ouverture (a) par cycle de sollicitation. Ce ratio (da/dN) est généralement lié aux valeurs de contrainte maximale et minimale ainsi que de l'ouverture de la fissure (a), soit :

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma_{\min}, \sigma_{\max}, a)$$

Plusieurs relations de ce type existent dans la littérature, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- relation de Frost et Dugdale (1958) :
$$\frac{da}{dN} = (P + Q\bar{\sigma}) \cdot (\Delta\sigma)^3 \cdot a$$
- relation de Head (Marchand 1984) :
$$\frac{da}{dN} = \frac{a^{3/2}}{\sqrt{2R_p}} \cdot f(\sigma)$$
- relation de Boettner et al :
$$\frac{da}{dN} = A (\varepsilon_t \sqrt{a})^n$$

Et enfin la formule la plus utilisée dans littérature proposée par Paris et Erdogan

$$(1963) : \frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m$$

Bien que cette formule très simplifiée ne tienne pas compte de plusieurs phénomènes importants, son utilisation répandue est liée à la facilité de la détermination expérimentale de ses deux paramètres caractérisant le comportement du matériau.

D'autres auteurs ont proposé des formules « améliorées » qui se basent sur la formule de Paris et Erdogan tout en comblant ses lacunes (loi de Forman ou loi de Sih).

1.2 Sollicitations particulières sur les voies et arrêts de bus

1.2.1 Généralités sur l'évaluation du trafic

La norme SN 640 320 [2] décrit les méthodes utilisables pour déterminer la charge de trafic que doit supporter la chaussées à dimensionner en terme de trafic pondéral équivalent.

La procédure dite de « base », objet du chiffre 19 de la norme SN 640 320 est la seule démarche de cette norme permettant le calcul du trafic pondéral en présence d'un trafic particulier comme c'est le cas pour des voies et arrêts de bus. Les autres procédures arrivent en effet à leur limite, car se basant sur des coefficients d'équivalence moyen dont les valeurs sont très éloignées des valeurs caractéristiques des véhicules de transport public. Cette limitation est mentionnée clairement au chiffre 20 de la norme.

Dans le cas d'une chaussée standard, le trafic pondéral équivalent tient compte de l'évolution du trafic pendant la durée d'utilisation de l'infrastructure. La section E de la norme SN 640 320 décrit la méthode pour tenir compte de cette évolution par la

considération d'un taux d'accroissement annuel du trafic entrant dans le calcul du trafic pondéral équivalent journalier TF_n (chiffre 23) et du trafic pondéral équivalent total W_n (chiffre 24).

Dans le cas de voies de bus, la considération du taux d'accroissement n'est pas pertinente. Le trafic des transports publics est en effet un trafic planifié à l'avance car se basant sur des horaires stables sur de longues périodes de temps.

La méthode de dimensionnement allemande RStO 12 [6] préconise d'attribuer à la chaussée considérée une classe de trafic pondéral en fonction du nombre de bus qui circulent sur la voie.

Le guide du CERTU recommande également de tenir compte du nombre de bus, et préconise une estimation la plus précise possible du nombre de bus par période significative (heures de pointe, heures creuses, jours de semaine, samedi, dimanche, vacances, etc.) associée au type de bus exploités pendant ces périodes.

1.2.2 Facteur d'équivalence – agressivité des véhicules

La procédure du chiffre 19 de la norme SN 640 320 permet de calculer, à l'aide des facteurs d'équivalence par essieu (tableau 2), le facteur d'équivalence total qui caractérise chaque véhicule de transport public.

Les facteurs d'équivalence calculés avec cette méthode sont très sensibles à la valeur de la charge appliquée sur chaque essieu. Celle-ci dépend fortement du taux de remplissage des véhicules.

En Suisse, le domaine de variation des charges par essieux peut être obtenu par l'examen des valeurs données dans les rapports d'expertise des bus (formulaires 13.20). Ces documents donnent notamment la charge à vide et la charge maximale autorisée sur chaque essieu ainsi que sa configuration (roues jumelées ou simple, axe simple ou tandem).

Les facteurs d'équivalence du tableau 2 de la norme SN 640 320 proviennent des résultats de l'essai AASHTO et sont fortement liée aux caractéristiques des véhicules et des techniques de construction de l'époque (début des années 60).

Des formules plus récentes permettent de calculer l'endommagement équivalent d'une chaussée sous l'action d'essieux en se basant sur des expériences et des technologies de véhicules plus récentes. Nous pouvons citer par exemple la formule dite d'Eisenmann, et qui été proposée lors de la publication du rapport de l'OCDE [19], et qui tient compte, outre de la charge, de la configuration des essieux tout en restituant de manière plus réaliste la fragilité des chaussées rigides en présence de charges par essieu très élevées (surcharges).

Le guide du CERTU [14] recommande une évaluation la plus fiable possible des coefficients d'agressivité des bus par la considération d'hypothèses d'occupation des véhicules (25% des bus pleins, 50% de bus à mi-charge et 25% des bus roulants à vide) et de hypothèse de répartition des charges sur les différents essieux. A défaut de disposer de données fiables sur les charges de véhicules, le guide du CERTU propose des coefficients d'agressivité indicatifs par type de bus (Minibus, Midibus, Bus standard, Bus articulé, etc.). Le coefficient d'agressivité est multiplié par un facteur 2 dans le cas d'un giratoire.

1.2.3 Canalisations du trafic

Les charges de trafic se caractérisent, sur une voie de circulation standard, par une variabilité significative de leur position latérale dans la voie. Dans le cas d'un bus circulant sur une voie avec une largeur réduite, la variabilité de la position latérale est très réduite, ce qui augmente sensiblement l'endommagement total subi par la structure de la

chaussée. Un exemple de la répartition latérale du dommage est donné sur la figure 2 qui illustre, pour un nombre de charge identique, l'effet de la répartition latérale des charges sur le dommage cumulé qui peut engendrer un endommagement plus rapide de la structure de la chaussée.

Le guide du CERTU propose de majorer le trafic pondéral par un coefficient qui dépend de la largeur de la voie :

- 1.0, lorsque la largeur est supérieure à 3.50 m ;
- 1.3, lorsque la largeur est comprise entre 3 et 3.50 m ;
- 1.6, lorsque la largeur est inférieure ou égale à 3 m ;

Le guide RStO 12 [6] préconise une démarche similaire dans son annexe 1.5, avec une majoration variant de 1.0 à 2.0 pour une largeur de voie entre 3.75 m et 2 m. A noter que la majoration du guide RStO 12 est applicable pour toutes les chaussées et ne se limite pas aux voies de bus.

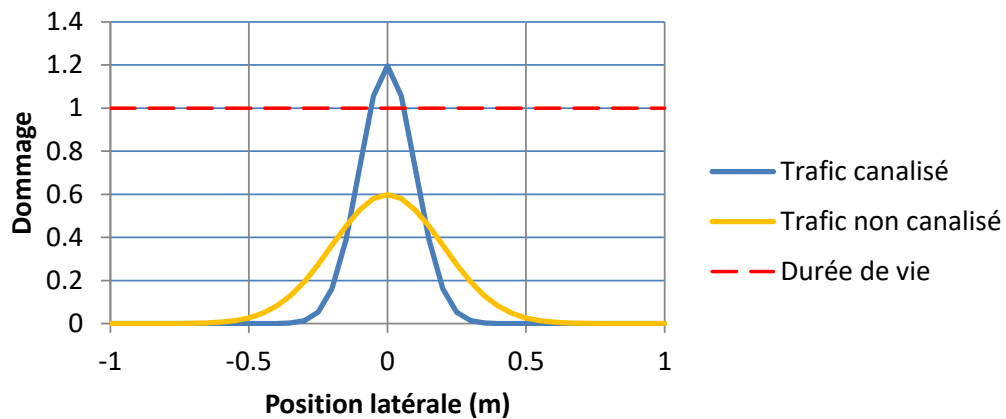


Fig. 2 Dommage cumulé des charges de trafic en fonction de la position latérale

Les méthode américaine de type incrémental [21] (Pavement ME, anciennement ME PDG) considère la dispersion latérale du trafic comme un paramètre entrant (Traffic Wander Standard Deviation). La valeur par défaut de l'écart type de la position latérale de la charge est de 25.4 cm (10 pouces). Le planificateur a la possibilité retenir une valeur différente en fonction de la classe de la voie, notamment une valeur réduite dans le cas de voies de bus.

Les normes de dimensionnement suisses actuelles ne tiennent pas compte du phénomène de canalisation des charges de trafic engendrées par la circulation des bus.

1.2.4 Vitesse de circulation

La circulation des bus au droit des arrêts se fait à des vitesses très faibles. Cette configuration des charges de trafic influence particulièrement la durabilité des chaussées bitumineuses en ayant un effet sur les phénomènes suivants :

- Résistance à l'orniérage : Les enrobés bitumineux subissant des vitesses de chargement lentes présentent des déformations plastiques importantes. Ces déformations irréversibles sont amplifiées par les températures élevées dans le matériaux en période estivale.
- Fatigue mécanique : Le module de rigidité de l'enrobé bitumineux diminue fortement dans le cas de charges lentes en raison du comportement viscoélastique du matériau.

Un module élastique faible se traduit par une structure de chaussée qui se déforme plus et qui est donc plus exposée à l'endommagement par fatigue mécanique.

Le résistance à l'orniérage est une problématique purement matériau qui se traduit par le choix de matériaux avec de bonnes caractéristiques de résistance à la déformation plastique. Il s'agit généralement d'enrobés bitumineux résistants à l'orniérage ou des matériaux rigides liés au ciment.

La fatigue mécanique à faible vitesse est contrecarrée par le choix de matériaux plus performants vis-à-vis de la fatigue et plus rigides que les enrobés standards. Les caractéristiques de fatigue et de rigidité choisies sont utilisées comme données d'entrée dans la procédure de dimensionnement selon des méthodes analytiques.

Pour tenir compte de l'effet de la vitesse réduite, le guide du CERTU propose de majorer le trafic pondéral par un facteur de 2.0 quel que soit la largeur de la voie. Cette majoration sévère est justifiée par le fait que les bus doivent accoster au plus près du quai avec une très faible dispersion dans le positionnement latérale des roues.

Les méthode américaine de type incrémental (Pavement ME, anciennement ME PDG) considère la vitesse de circulation comme un paramètre entrant. La vitesse intervient dans le dimensionnement non seulement pour les chaussées bitumineuses (diminution du module de rigidité) que pour les dalles en béton (augmentation de la déflexion dans le coin et de la déformation dans le bord des dalles).

2 Inventaire des Success stories

2.1 Récolte des expériences

La récolte des expériences internationales s'est faite au travers de la recherche bibliographique exposée dans le chapitre 1.

La récolte des expériences nationales s'est faite à la suite d'une consultation d'une sélection d'administrations communales et cantonales, par la distribution d'un questionnaire en 2016.

Les administrations étaient invitées à partager les techniques de construction et les expériences qu'elles jugent significatives par une documentation succincte des objets (arrêts de bus) sélectionnés et un relevé simplifié des éventuelles dégradations observées.

Le canevas de documentation des objets est donné dans la figure 3.

Objet - Arrêt (localisation) :
Année de construction :
Type de structure : <input type="checkbox"/> Bitumineuse <input type="checkbox"/> Rigide (béton) <input type="checkbox"/> Mixte/Autre
<u>Composition structure:</u>
Couche1 : <input type="checkbox"/> AC (enrobé) <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> Pavés <input type="checkbox"/> Autre :
Couche2 : <input type="checkbox"/> AC (enrobé) <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> AC EME <input type="checkbox"/> Autre :
Couche3 : <input type="checkbox"/> AC (enrobé) <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> AC EME <input type="checkbox"/> Autre :
Couche4 : <input type="checkbox"/> Grave non liée <input type="checkbox"/> Autre :
<u>Classe trafic</u> : <input type="checkbox"/> <T4 <input type="checkbox"/> T4 <input type="checkbox"/> T5 <input type="checkbox"/> T6 <input type="checkbox"/> Bus par jour =
<u>Relevé de l'état / type de dégradations observées</u> :
<input type="checkbox"/> Ornière avec profondeur > 20 mm..... <input type="checkbox"/> Ornière avec profondeur < 20 mm
<input type="checkbox"/> Fissures dans la trace des roues <input type="checkbox"/> Fissures dans la zone de transition
<input type="checkbox"/> Fissures de bord de dalles..... <input type="checkbox"/> Fissures des coins de dalles
Autres :

Fig. 3 Canevas pour la documentation des arrêts de bus

Les réponses au questionnaire obtenues proviennent de 7 administrations avec un peu plus de 60 objets renseignés. Une sélection parmi ces objets a été faite afin d'éliminer des informations visiblement erronées et parfois redondantes. Finalement, les expériences nationales ont été résumées au travers de 35 objets couvrants a priori l'ensemble des techniques de construction pour arrêts de bus expérimentées en Suisse.

Les objets analysés comprennent 15 structures bitumineuses, 13 structures rigides et 7 structures mixtes ou qualifiées par « autre ». La moitié des objets ont un âge supérieur à 5 ans avec 3 sites ayant dépassé les 20 ans.

Les résultats de l'enquête et leur analyse par rapport aux dégradations constatées sont développés davantage dans l'annexe I.

Les résultats de l'enquête nationale et de la littérature internationale sont utilisés dans la suite du chapitre pour décrire les techniques jugées satisfaisantes (Success stories) avec les particularités et les limitations qui y sont associées.

2.2 Structures rigides

2.2.1 Dalles en béton avec ou sans goudons

La conception, le contrôle et l'exécution des chaussées en béton sont réglementés en Suisse par la norme SN 640 461 : 2014. Le dimensionnement est réalisé pour sa part selon la norme SN 640 324.

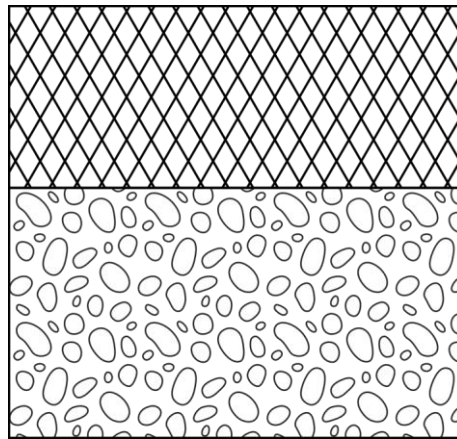


Fig. 4 Structure dalle en béton

Les chaussées en béton sont un type de chaussées dont la capacité portante est assurée par la rigidité du matériau béton. Les normes suisses recommandent de construire les dalles sur un support liée. Il s'agit généralement d'une couche bitumineuse qui a pour fonction de garantir un bon support à la dalle et de prévenir la remontée de fines et l'érosion de la fondation.

La susceptibilité du béton aux fissures de retrait nécessite, dans le cas de dalles sans armatures, l'aménagement de joints transversaux avec un espacement (longueur de dalles) variant entre 5 et 10 m. Les expériences avec ce type de structures ont montré la pertinence de favoriser la borne inférieure de 5 m pour la longueur des dalles. La construction de dalles avec des longueurs plus importantes, requiert la mise en place d'armatures soigneusement disposées.

Le fonctionnement mécanique des dalles en béton doit garantir un transfert de charge efficace entre les dalles. Ce transfert de charge peut être amélioré par la réalisation de goudons positionnés au niveau du joint et à mi-hauteur de la dalle.

La largeur de la dalle correspond généralement à la largeur de la voie. Les dalles de part et d'autre d'un joint longitudinal sont solidarisiées avec des barres d'ancrages.

Les dalles des chaussées en béton constituent généralement les couches de base et de roulement. La surface béton peut être recouverte d'une couche bitumineuse afin de diminuer le bruit de roulement. Ce recouvrement est souvent délicat à réaliser car nécessitant de maîtriser plusieurs éléments : la stabilisation du battement des dalles, le collage et le sciage du revêtement bitumineux au niveau des joints.



Fig. 5 Exemple d'arrêt de bus avec dalle en béton armé sans joints transversaux

Avantages

- couche insensible à l'orniérage ;
- durabilité élevée.

Inconvénients

- durée et coût de construction relativement élevés ;
- conception et construction assez complexe ;
- entretien régulier des joints ;
- réparation difficile
- surface béton bruyante.

2.2.2 Dalles en béton armé continu

Les chaussées en béton armé continu (BAC) sont réglementées en Suisse avec le même recueil de normes que les dalles béton (chapitre 2.2.1) et plus spécifiquement le chapitre E de la norme SN 640 461-2014.

Le BAC se distingue des dalles standards par l'absence de joints transversaux grâce à la disposition d'armatures longitudinales au milieu de la section dont le rôle est de répartir et de maîtriser l'ouverture des fissures de retrait. La version 2014 de la SN 640 461 préconise un taux d'armature longitudinal minimum de 0.75%, valeur proche des valeurs en vigueur par exemple en France (0.6 à 0.7%). Les extrémités de la structure en BAC doivent être ancrées.

Il est préconisé, toujours selon la SN 640 461, de poser les couches en BAC sur un support bitumineux. Cette pratique, présente pas mal d'avantages mécaniques et de durabilité, notamment d'exploiter la résistance à la fatigue de la couche bitumineuse et la protection qu'elle apporte par rapport à la remontée de fines et à l'érosion de la fondation.

La combinaison de la couche de BAC avec un support bitumineux suggère un classement de ce type de structures dans la famille des chaussées composites, décrites plus en détail dans le chapitre 2.4.3.

2.3 Structures bitumineuses

2.3.1 Enrobés à haut module

Les enrobés à haut module (AC EME) sont des matériaux bitumineux destinés initialement à améliorer la capacité portante des structures de chaussées grâce à leur rigidité plus importante tout en minimisant le comportement fragile souvent associé à une augmentation de la rigidité.

La rigidité élevée des enrobés à module élevés est obtenue par la combinaison de deux leviers :

- l'augmentation de la rigidité du liant par le recours à des bitumes durs mais offrant de bonnes performances aux basses températures ;
- l'optimisation de la courbe granulométrique en visant un matériau le plus compact possible (teneur en vides en place moyenne comprise entre 0.5% et 6%) avec un comportement très frottant.

Les bitumes durs correspondent, selon le type de l'AC EME, aux classes 10/20 ou 15/25. La consistance dure aux températures de service ne doit pas se faire au détriment du comportement à basse température avec, comme garde-fou, des spécifications de valeurs limites par rapport à l'essai du point Fraass.

Des expérimentations sont faites en Suisse avec des liants durs modifiés aux polymères. Ces produits sont généralement moins rigides que les AC EME standards mais offrent par contre de bonnes performances par rapport à la résistance à l'orniérage. Les AC EME avec liant dur PmB peuvent être considérés dans une certaine mesure comme des produits spéciaux.

Les AC EME sont actuellement les seuls enrobés bitumineux normalisés en Suisse devant respecter des exigences performancielles en terme de module de rigidité et de résistance à la fatigue mécanique.

Le recours aux AC EME pour la réalisation des arrêts de bus est justifié par leur résistance à l'orniérage en plus de leur apport structurel. En pratique, les enrobés disponibles sur le marché présentent des écarts importants au niveau des performances en raison des choix faits pour les caractéristiques des liants, des granulats et des formules fabriquées.

Ces matériaux sont posés généralement en couche de base ou de liaison afin de les préserver des sollicitations thermiques (basses températures) contre lesquelles ils sont moins performants que des couches de roulement plus flexibles.

Il existe des enrobés à module élevé prévus pour une pose en couche de roulement. Il s'agit en principe de produits spéciaux (produits d'entreprises) décrits plutôt au chapitre 2.3.2.

Avantages

- réalisation avec du matériel de pose standard ;
- délais de réalisation relativement courts (1 à 2 jours) ;
- coûts de construction modérés.

Inconvénients

- le matériau doit être recouvert par une couche de roulement avant l'hiver ;
- la mise en place nécessite une énergie de compactage très élevées, ce qui complique l'application de ce matériau sur des ouvrages d'art ou dans des fouilles profondes ou de petites dimensions (par exemple compactage des bords de l'arrêt de bus) ;
- risque d'apparition d'un orniérage dans le cas de chaussées avec un trafic très élevé.

2.3.2 Enrobés spéciaux et enrobés avec additifs

Les enrobés spéciaux est une dénomination assez large désignant les différents enrobés bitumineux développés la plupart du temps par des entreprises selon des procédés généralement brevetés.

Le caractère confidentiel et la diversité des détails de fabrication et de mise en œuvre des enrobés spéciaux ne permet pas de les décrire dans ce chapitre de manière exhaustive.

En règle générale, les enrobés spéciaux ne sont pas normalisés en Suisse. Le maître d'ouvrage se base sur les fiches techniques des produits pour le suivi et le contrôle qualité, ainsi que les garanties apportées par l'entreprise en charge de la mise en œuvre.

Les enrobés spéciaux sont souvent des variantes optimisées des enrobés à modules élevés avec des produits conçus pour une utilisation en couche de roulement (sortes d'enrobés plus fines 0/11 ou 0/16).

Les caractéristiques mécaniques des produits, notamment la résistance à l'orniérage, sont parfois améliorées par l'incorporation d'additifs dans l'enrobé au moment du malaxage en centrale.

Les additifs sont généralement des produits d'entreprise dont l'utilisation est régie par des fiches techniques spécifiques. Sans viser à être exhaustifs, nous pouvons citer les produits suivants : Gilsonite ®, Selenizza ®, RWPLAST®, PR PLAST S®, etc.

Avantages

- les performances mécaniques comme l'orniérage et la résistance aux cisaillement sont généralement élevées ;
- la mise en œuvre est réalisées avec du matériel de pose standard ;
- l'ajout d'additifs est un procédé relativement simple, ne nécessitant pas des modifications complexes des centrales d'enrobage.

Inconvénients

- la qualité du matériau n'est pas favorisée par la production de quantités faibles ;
- la réparation est relativement complexe à réaliser avec l'enrobé spécial en raison toujours du problème de production de faibles quantités et une mise en œuvre difficile sur de petites surfaces,
- produits généralement proposés comme variante d'entreprise ce qui rend la rédaction des appels d'offres et la validation des variantes d'entreprise une tâche relativement complexe pour le maître d'ouvrage.

2.4 Structures mixtes ou composites

2.4.1 Enrobé percolé (VMB)

Description

Les enrobés percolés sont une famille de matériaux composites utilisés à la base pour les surfaces industrielles en raison de leur résistance élevée aux charges de poinçonnement. Ces matériaux sont désignés en pratique par l'acronyme VMB (Vermörtelungsbeläge).

Les enrobés percolés sont régis en Suisse par la norme SIA 252 dans son chapitre F. Il n'existe pas actuellement de norme SN spécifique à l'enrobé.

Le matériau consiste à poser un enrobé bitumineux 0/11 à 0/22 dont la formule permet d'avoir des vides communicants, avec une teneur en vides se situant entre 20% et 25%. L'enrobé, dont l'épaisseur varie entre 50 et 100 mm, est posé avec du matériel routier standard sur un support bitumineux ou autre existant. Le matériau poreux est ensuite percolé avec un coulis rigidifiant.

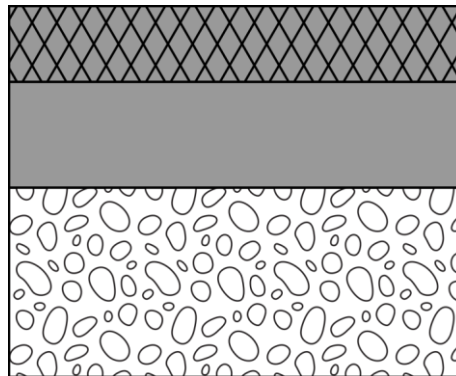


Fig. 6 Structure avec couche de roulement en enrobé percolé

Le coulis de percolation peut être selon la nature du liant utilisé :

- organique : le liant est une résine dont la consistance est contrôlée avec des charges minérales et des additifs ;
- hydraulique : le coulis est un mortier de ciment avec des adjuvants permettant également une maîtrise de sa consistance ;
- une combinaison des deux familles précédentes de liants.



Fig. 7 Exemple d'arrêt de bus avec couche de roulement en enrobé percolé

Avantages

- résistance élevée à l'orniérage et au poinçonnement ;
- aspect esthétique (couleur claire) ;
- surface offrant une bonne texture vis-à-vis de l'adhérence, mais moins favorable pour la réduction du bruit de roulement.

Inconvénients

- pose délicate particulièrement la maîtrise de la consistance du coulis par rapport aux conditions météorologique du chantier et le squelette granulaire de l'enrobé ;
- délai de réalisation relativement important. Les expériences en Suisse mentionnent une durée de remise à la circulation d'une semaine ;
- relativement difficile à réparer, en raison notamment du problème de fabrication de petites quantités du produit ;
- apparition d'orniérage ou de fissures en fonction de la composition du coulis. L'orniérage n'apparaît pas de manière systématique, il est vraisemblablement lié à une maîtrise du remplissage du squelette granulaire garantissant un comportement frottant de ce dernier ;

2.4.2 Whitetopping – Béton de ciment mince collé (BCMC)

Le Whitetopping ou l'Ultra Thin Whitetopping (UTW) est une technique d'entretien des structures bitumineuses mise au point initialement aux Etats-Unis [18]. La France a repris le principe de la technique sous la dénomination de Béton de Ciment Mince Collé (BCMC) [12].

Le Whitetopping consiste à remplacer après fraisage la partie supérieure de la couche bitumineuse par une couche mince en béton de ciment avec une épaisseur comprise entre 2 et 4 pouces aux USA, ou 60 et 100 mm en France.

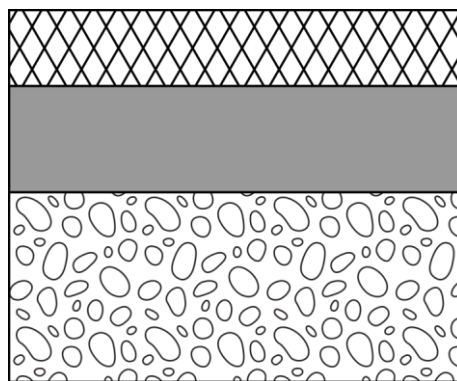


Fig. 8 Structure avec couche de roulement en béton de ciment mince collé

La prévention de la fissuration par retrait du béton est obtenue par un sciage précoce (pendant la prise du béton) selon un maillage d'environ 10 à 15 fois l'épaisseur de la couche posée. La réussite et la durabilité de la technique repose sur une maîtrise du délai d'exécution du sciage en fonction des conditions du chantier.

La structure bitumineuse (après fraisage) doit être de bonne qualité et avoir une épaisseur résiduelle d'au moins 80 mm.

Le bon collage entre le béton et la couche bitumineuse existante est assuré par un nettoyage minutieux de la surface après le fraisage.



Fig. 9 Exemple d'arrêt de bus avec couche de roulement en béton de ciment mince collé

La surface du béton peut être texturée par divers traitements : grenailage du béton durci, balayage ou désactivation du béton frais.

La formulation du béton de ciment est assez proche d'un béton traditionnel utilisé dans le domaine routier. La taille du grand grain retenue est, en fonction de l'épaisseur mise en œuvre, comprise entre 6 et 16 mm.

Divers ajouts sont possibles comme l'ajout de fibres synthétiques (afin de minimiser les fissures de retrait) ou des adjuvants pour réduire le délai de remise en circulation.

Avantages

- insensible à l'orniérage ;
- caractéristiques stables dans le temps.

Inconvénients

- maîtrise délicate du durcissement avec un sciage qui doit être exécuté au moment optimal. Le bon timing pour le sciage dépend de la composition du matériau et des conditions météorologique ce qui nécessite une bonne expérience et un bon suivi de l'entreprise ;
- la chaussée existante doit avoir une épaisseur garantissant une portance suffisante de la couche bitumineuse résiduelle (typiquement une épaisseur supérieure à 160 mm).
- les fissures peuvent apparaître aux coins et aux bords de la surface. Ces fissures sont courantes et apparaissant assez tôt après la construction, mais ne représentent pas généralement un problème pour la durabilité à long terme ;
- la réparation des surfaces en Whitetopping est relativement complexe ;
- le surface peut être bruyante.

2.4.3 Béton armé continu sur enrobé bitumineux

La structure de chaussée en béton armé continu (BAC) sur AC T est composée d'une couche de fondation en AC T recouverte d'un BAC. Cette combinaison allie les performances et les avantages mécaniques des deux types de matériau qui la composent (béton et enrobé bitumineux) [10]:

- Le matériau AC T apporte la déformabilité et la résistance à la fatigue des matériaux bitumineux et garantit un support résistant à l'érosion, empêchant les remontées de fines et non sujet aux phénomènes de retrait. Ce matériau reprend dans la structure de chaussée les efforts répétés de traction par flexion induits par le trafic, en particulier lorsque l'interface BAC-AC T est collée. Le collage est admis efficace pendant la première phase de fonctionnement de la structure dont la durée est estimée actuellement à 15 années ;
- le BAC apporte la résistance au poinçonnement, la rigidité et la durabilité des couches en béton. L'absence de joints permet de s'affranchir de l'entretien de ces discontinuités. Lorsque le collage entre le BAC et l'AC T n'est plus effectif, la couche en béton reprend en partie les efforts de traction par flexion pendant la seconde phase de fonctionnement après les 15 premières années de service.

La valeur seuil de 15 années a été admise en France sur la base du recul actuel et correspond aux structures pour lesquels un soin particulier a été apporté pour garantir un bon collage à l'interface béton – enrobé bitumineux.

Le technique BAC / AC T est à distinguer de l'ancienne variante expérimentée BAC / AC. Les avantages apportés par la nouvelle technique sont le soin particulier accordé à la qualité du collage par une préparation de la surface du matériau AC T, soit par un grenailage, soit par un micro-fraisage. Additionnellement, l'apport structurel de la couche AC T est supérieur à celui du AC, faisant descendre l'axe neutre du composite et réduire la contrainte de traction dans le béton (Fig. 10).

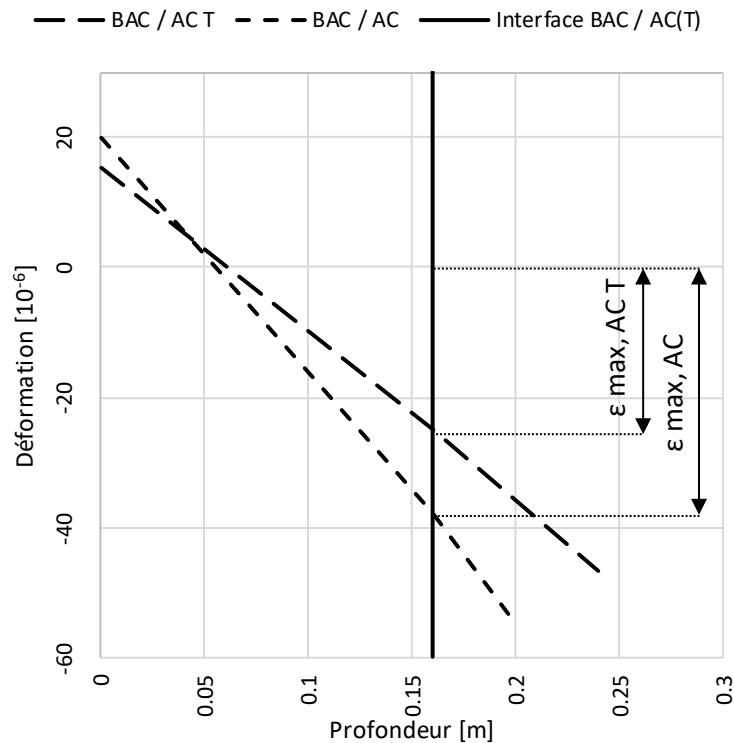


Fig. 10 Profil des sollicitations en fonction de la profondeur dans une structure BAC / AC T et BAC sur AC

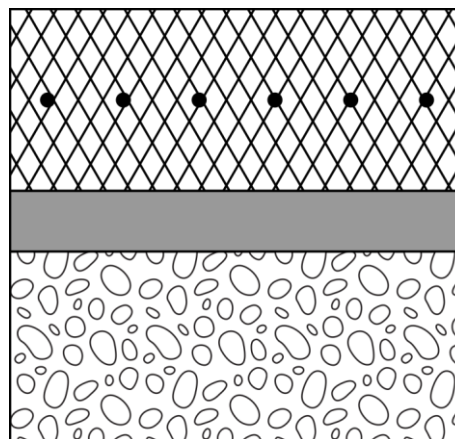


Fig. 11 Structure en béton armé continu sur enrobé bitumineux

L'absence de joints dans la couche en BAC est obtenue par la mise en place d'une armature minimisant les fissures de retrait, disposée à mi-hauteur de la couche.

La couche en BAC peut être recouverte par un enrobé bitumineux mince pour favoriser certaines caractéristiques de surface tout en maintenant une contribution significative du béton à la résistance à l'orniérage.

Le collage entre la surface béton et la couche de roulement doit être étudié avec soin. La solution optimale recommandée dans la littérature pour les autoroutes est l'application d'un enduit superficiel (garantissant une bonne adhésion avec le support béton) suivie de la pose d'un enrobé mince. La solution de recouvrement optimale pour un arrêt de bus

doit résoudre, en plus du collage, la problématique des efforts de cisaillement engendrés par les freinages répétés des bus.

Avantages

- la surface en béton est insensible à l'orniérage ;
- représente actuellement le meilleur rapport « durée de vie/épaisseur » grâce à l'exploitation optimale des caractéristiques mécaniques des bétons et des enrobés bitumineux ;
- durabilité très élevée ;
- diminution du nombre de joints transversaux au niveau de la surface (uniquement les extrémités de la chaussée).

Inconvénients

- le recouvrement par un enrobé bitumineux se heurte à la problématique du collage avec la surface béton qui, dans le cas d'un arrêt de bus, est soumise à d'importants efforts de cisaillement ;
- le surface béton est relativement bruyante dans le cas où le recouvrement avec une couche bitumineuse n'est pas prévu ;
- durée d'exécution relativement élevée. Elle est typiquement de 2 à 3 semaines ;
- réparations difficiles ;
- coûts de construction relativement élevés.

2.5 Autres structures

2.5.1 Pavés

Les chaussées en pavés représentent la technique de construction historique des chaussées jusqu'à la fin 19^{ème} siècle.

Malgré l'avènement et le succès croissant des chaussées bitumineuses et béton, les chaussées en pavés ont vu leur utilisation perdurer dans des applications où la vitesse de circulation et le confort de roulement ne sont pas déterminants. Nous pouvons citer par exemple les zones de manutention comme les terminaux de ports et les entrepôts, des zones piétonnes et les centres historiques des villes.

Les pavés peuvent être :

- En pierre naturelle : Leur utilisation justifiée par le critère esthétique se limite au centres historiques des villes dans les secteurs dédiées principalement au trafic piéton.
- En béton de ciment : Il s'agit de surfaces adaptées à une circulation de charges lourdes ou statiques comme des terminaux ou quais de chargement, ou encore des parkings pour poids-lourds.

La conception, le dimensionnement, le contrôle et l'exécutions des chaussées en pavé sont réglementés en Suisse par la norme SN 640 480a. Les pavés destinés à supporter des charges importantes sont généralement autobloquants et reposant sur une surface peu déformable (rigide ou stabilisée selon le trafic planifié). La norme SN 640 480a considère que la structure en pavés n'est plus appropriée au-delà de la classe de trafic T4.

Avantages

- surface insensible à l'orniérage lorsque la fondation est suffisamment rigide ;
- réparations facile, particulièrement pour les petites surfaces ;
- matériaux réutilisables ;
- surface esthétique.

Inconvénients

- pose relativement lente manuellement. Il existe cependant des solutions de mécanisation ;
- le blocage des pavés est généralement assuré par un frottement obtenu par adjonction de sable et ces joints doivent être entretenus régulièrement. Un produit de garnissage des joints liés peut être mis en place pour réduire la fréquence de l'entretien des pavés ;
- surface de roulement inconfortable, particulièrement pour les cyclistes ;
- surface particulièrement bruyante. A noter cependant le développement récemment de pavés avec une surface peu bruyante.

3 Conception et instrumentation des structures expérimentales

3.1 Choix des structures

Le choix des structures pour arrêt de bus considérées comme prometteuses se base sur la liste établie au chapitre précédent.

Une première sélection réduite de structures a été proposée à chacune des trois villes partenaires du projet qui, selon ses préférences et ses contraintes techniques ou climatiques, a procédé à un choix définitif.

Les discussions avec les villes ont été menées afin de les inciter à faire bénéficier le projet d'une large palette de structures à construire tout en tenant compte de leurs préférences et attentes.

3.2 Chaussée bitumineuse – Ville de La Chaux-de-Fonds

3.2.1 Choix de la structure

La Ville de la Chaux-de-Fonds, de par son altitude d'environ 1000 m, doit composer avec des conditions hivernales relativement sévères. La mise en place d'une couche en surface en béton est exclue par la ville à cause de la vulnérabilité de ce matériau vis-à-vis d'une exposition importante aux sels de déverglaçage.

La ville a mis à disposition du projet le chantier de la construction de la nouvelle place de la Gare. Cette surface intéressante par le niveau de trafic supporté (terminus de bus) est passablement étendue et ne permet donc pas la construction, avec le budget disponible, de couches de fondation ou de base rigide (dalles béton ou enrobés à modules élevés).

Le dimensionnement au gel a conditionné la profondeur posée de la couche de grave de 530 mm). Afin d'améliorer la résistance aux pressions importantes des charges en surface, la ville a opté pour une couche de liaison et une couche de surface avec un bitume polymère. La chaussée retenue est en conclusion une structure bitumineuse classique.

3.2.2 Site

Le réaménagement de la Place de la Gare de La Chaux-de-Fonds est un large projet démarré en mars 2014 pour s'achever en juin 2016. Une partie de ce projet concerne la réfection totale des arrêts de bus, avec la reconstruction d'une chaussée neuve à partir d'un sol support stabilisé.

3.2.3 Trafic

Le terminus de la place de la Gare est une surface étendue particulière. Les véhicules lourds circulent en principe sur des voies bien définies dont la localisation est déterminée par l'emplacement des quais sous le couvert (figure 12).

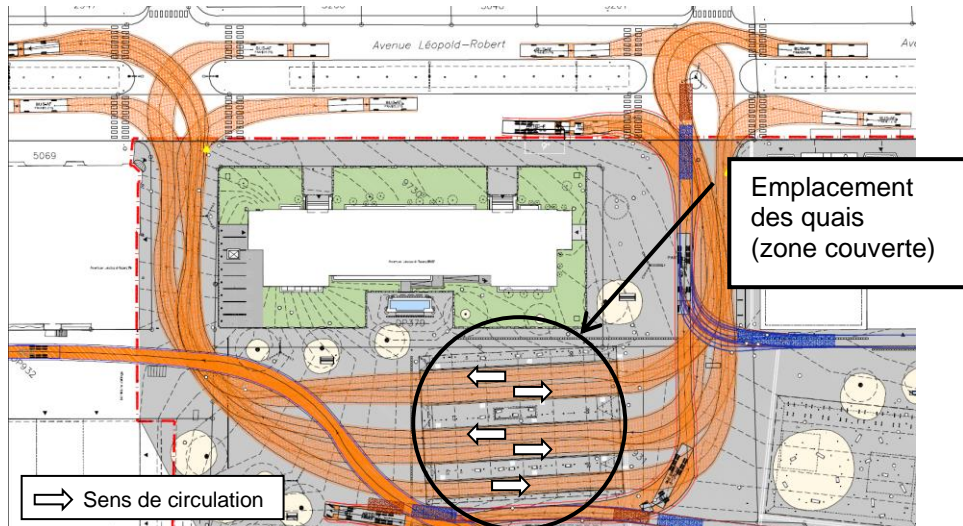


Fig. 12 Vue générale de la place de la Gare avec le schéma de circulation

Le trafic supporté par chaque voie (quai) est estimé sur la base des informations fournies par la compagnie des transports public (TransN), à savoir l'horaire par ligne et les caractéristiques des véhicules, notamment les charges à vide et maximales. La gamme de véhicules considérée est très variée allant du minibus à 2 axes à l'autobus articulé de 3 axes et 18 m de longueur.

Les caractéristiques détaillées de ces véhicules sont données en annexe II.

Le remplissage moyen des bus est admis à 80% et permet le calcul des facteurs d'équivalence des bus.

Selon les recommandations du guide du CERTU [14] les facteurs d'équivalence sont majorés par un coefficient de 1.2 pour tenir compte de la situation particulière de l'arrêt des véhicules sur la surface. Aucun coefficient de majoration pour tenir compte de la canalisation du trafic n'a été appliqué.

Les facteurs d'équivalences calculés et utilisés pour le dimensionnement varient de 0.05 pour le minibus à 6.6 pour l'autobus articulé.

La répartition de la circulation des bus selon l'horaire sur chaque voie/quai aboutit à un trafic pondéral journalier compris entre 240 et 2030 ESAL 8t, soit un trafic passant de la classe T3 pour le quai le moins chargé à la classe T5 pour le quai le plus chargé.

Le trafic de bus est admis sans accroissement annuel et représente 100% du trafic pondéral total (zone réservée exclusivement aux bus).

3.2.4 Portance du sol

Conformément aux discussions avec le maître de l'ouvrage, une classe de portance S2 a été considérée.

3.2.5 Dimensionnement

Le dimensionnement de la structure de la place de la Gare ne présente pas de difficultés particulières. Le calcul des épaisseurs des couches bitumineuses est réalisé selon la méthode suisse (SN 640 324) et la méthode française et aboutit aux structures suivantes :

- Variante de base : 40 mm AC 11 N / 60 mm AC B 16 S / 120 mm AC T 32 / 530 mm Grave

- Variante alternative 1 : 40 mm AC 11 S / 80 mm AC EME 22 C1 / 100 mm AC T 22 S / 530 mm Grave
- Variante alternative 2 : 40 mm AC 11 S / 80 mm AC EME 22 C1 / 80 mm AC EME 22 C2 / 530 mm Grave

L'épaisseur de la grave de 530 mm découle de la vérification du dimensionnement au gel avec un indice de gel de la route de 470 °C . jour et un degré de gélivité estimé à G3 pour le sol ($X_{30}=1.50$ m, $d_s=0.75$ m).

Le maître d'ouvrage a souhaité renoncer à la pose d'enrobés à module élevé et a retenu pour les couches de liaison et de roulement un liant modifié aux polymères afin d'améliorer la résistance aux déformations permanentes.

La structure finale construite à la Chaux-de-Fonds comprend les couches suivantes :

- AC 11 N avec liant PmB (CH-C) 65/105-45 : 40 mm
- AC B 16 S : 60 mm
- AC T 32 : 120 mm
- Grave : 530 mm

3.2.6 Instrumentation

Les capteurs de déformation (DMS) constituent l'essentiel des capteurs posés dans la masse de la structure de chaussée. Des sondes de températures complètent l'instrumentation mise en place.

Les capteurs ont été installés au bas de la structure bitumineuse à l'interface entre la couche en ACT 32 et la grave dans une zone située au début de l'arrêt de bus (zone de freinage). Le détail du positionnement des capteurs est donné dans le schéma de la figure 13.

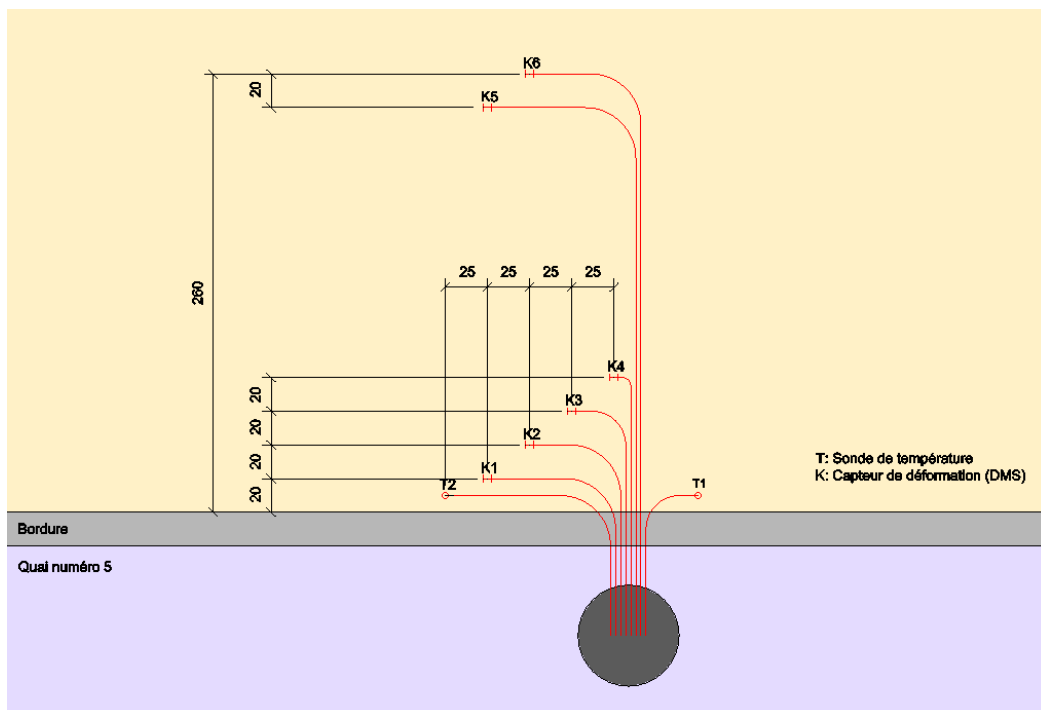


Fig. 13 Schéma de pose des capteurs DMS avec vue des chambres d'arrivée des câbles à la Chaux-de-Fonds

4 capteurs sont posés sur la trace de roue droite et, 2 capteurs sont posés sur la trace de la roue gauche, ce qui donne un total de 6 capteurs DMS.

2 capteurs de température de type Pt-100 ont également été placés à l'interface ACT/Grave.

3.2.7 Construction

La couche en ACT 32 a été posée le 4.9.2014 avec l'utilisation d'une finisseuse, y compris dans la zone des capteurs.



Fig. 14 Pose de la couche bitumineuse en ACT 32 avec vue sur la chambre d'arrivée des câbles des capteurs DMS

Le compactage a été mené à l'aide d'un rouleau mixte 4t, un rouleau à pneu 24t puis un rouleau lisse de 14t.



Fig. 15 Compactage de la couche en ACT 32

La pose des couches suivantes n'a pas fait l'objet de suivi particulier dans le cadre du projet de recherche.

3.3 Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne

3.3.1 Choix de la structure

Historique

La ville de Lausanne, avec son réseau de transport public dense, est confrontée non seulement au phénomène d'orniérage mais également à la problématique de réfection rapide des arrêts de bus, particulièrement dans les secteurs avec un trafic très chargé.

La ville de Lausanne avait déjà entamé des expérimentations en interne afin d'évaluer le potentiel de mise en place de couche en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) sur des surfaces d'arrêts de bus.

Le BFUP est un béton de ciment qui se caractérise par une granularité fine, un rapport eau/ciment particulièrement bas ($E/C \cong 0.2$) et l'incorporation de fibres métalliques avec un dosage volumique de l'ordre de 3%. Le BFUP se distingue d'un béton standard par des résistances à la compression et à la traction très élevées, et une excellente ductilité apportée par le dosage élevé en fibres métalliques.

Les deux expériences réalisées à Lausanne avec ce matériau concernaient la préfabrication dans un atelier de plaques en BFUP qui sont ensuite posées par collage sur la surface d'un arrêt de bus après fraisage. L'intérêt de cette solution est de pouvoir réaliser tout le processus in situ de nuit et éviter ainsi l'interruption du service.

La technique de préfabrication en atelier s'est heurtée à la difficulté de garantir le collage parfait entre les dalles et leur support, et le recours à des volumes conséquents de produits de scellement. Les éléments posés ont vite montré, soit une fissuration dans la masse, soit un battement des dalles à chaque passage d'essieu. La technique de préfabrication en atelier a donc été abandonnée.

Traitement de la surface

Les caractéristiques de surface du BFUP sont insuffisantes par rapport à ce qui est exigé d'une surface routière. En effet, comme le BFUP ne peut être texturé (par balayage ou rainurage), la surface lisse présente une adhérence insuffisante. De plus, les fibres métalliques du BFUP émergent à la surface, ce qui favorise leur corrosion et rend la surface dangereuse en cas de chute de cyclistes notamment.

La solution du gravillonnage a été retenue pour recouvrir la surface du BFUP. L'intérêt par rapport à un recouvrement avec un enrobé bitumineux est de rester dans la philosophie de la couche rigide en surface.

Le gravillonnage sur béton frais n'était pas possible dans le cadre du projet car le matériel d'épandage n'était pas disponible en Suisse et à cause du risque important pour la maîtrise de l'enchâssement des granulats.

Afin de minimiser les risques dans le cadre de ce projet préliminaire, une solution éprouvée de gravillonnage sur support rigide a été retenue. Il s'agit d'un procédé d'entreprise qui consiste à appliquer une résine époxy sur la surface du BFUP grenillée au préalable, puis de procéder à un épandage d'un gravillon dur à valeur PSV élevée (bauxite calcinée).

La structure proposée est prévue comme solution de réfection sur des chaussées existantes.

Etant donné le caractère expérimental du matériau BFUP, il a été décidé en accord avec la ville de Lausanne de construire une structure complète apte à supporter la charge de trafic si, dans le futur, la couche de BFUP présenterait un endommagement important et devait être remplacé.

3.3.2 Site

Le site mis à disposition par la ville de Lausanne est l'arrêt de bus Foyer en direction du centre. L'arrêt de bus est desservi par la ligne de bus numéro 41 et 65 avec, à terme, un projet d'extension de la ligne numéro 6.

La surface de l'arrêt est en principe réservée aux bus. En pratique, la proximité en amont d'un ilot de passage pour piétons contraint une proportion significative du trafic individuel motorisé à circuler sur un coin de la surface de l'arrêt.

La chaussée existante présentait un endommagement important (orniérage et fissures).



Fig. 16 Chaussée de l'arrêt de bus Foyer (avant réfection)

3.3.3 Trafic

La détermination du trafic de dimensionnement se base sur l'horaire prévu à partir de 2016/2017 et tient compte de la future extension de la ligne 6. L'arrêt de bus Foyer sera desservi à court terme par les véhicules suivants :

1. Trolleybus articulé à 3 axes et 18 mètres de longueur. Ce véhicule est exploité sur la ligne de bus nr. 6.
2. Autobus articulé à 3 axes et 18 mètres de longueur. Ce véhicule est exploité sur la ligne de bus nr. 41 ainsi que la ligne 65/75 aux heures de pointe.
3. Autocar à deux étages et à 3 axes avec un essieu arrière tandem. Ce véhicule d'une longueur de 13.7 mètres est exploité sur la ligne 65/75 aux heures creuses.

Les caractéristiques détaillées de ces véhicules sont données en annexe II.

Le remplissage moyen des bus est admis à 80% et permet le calcul des facteurs d'équivalence des bus.

Selon les recommandations du guide du CERTU [14] les facteurs d'équivalence sont majorés par deux facteurs de pondération : 1.3 pour tenir compte de la canalisation du trafic sur la voie et 1.2 pour considérer les situation d'arrêt des véhicules sur la surface. Les facteurs d'équivalences utilisé pour le dimensionnement sont finalement de 14.7 pour le trolleybus articulé, 9.6 pour l'autobus articulé et 8.0 pour l'autocar à 2 étages.

L'horaire communiqué par la régie des Transport Lausannois permet d'estimer le trafic de bus à 245 passage/jour toutes lignes confondues.

Le trafic de bus considéré sans accroissement annuel représente environ 92% du trafic pondéral journalier total évalué à 3'069 essieux standards 8t. La surface de l'arrêt de bus supporte ainsi un trafic à la limite inférieure de la classe T6.

3.3.4 Portance du sol

A défaut d'informations avant la construction, la portance du sol a été admise pour le dimensionnement correspondant à la classe S2.

Un essai de plaque a été réalisé à la surface de la grave de fondation à la suite de la démolition de la chaussée bitumineuse existante. La valeur ME_1 obtenue est de 59.3 MN/m² avec un ratio ME_2/ME_1 de 4.23.

La grave de fondation en place peut être considérée de qualité moyenne et correspond à ce qui peut être rencontré sur des couches de tout-venant mise en place avant l'introduction des normes actuelles. La classe de portance S2 semble ainsi valable sur la base du résultat de cet essai de plaque.

3.3.5 Conception et dimensionnement

Il n'existe pas actuellement de méthodes de dimensionnement de chaussées routières avec une couche de roulement en BFUP sur une structure bitumineuse.

Dans le cadre de ce projet nous admettons que la structure fonctionnera comme une structure monolithique grâce à un collage parfait entre le BFUP et les couches bitumineuses. Cette hypothèse implique que la sollicitation maximale sera localisée au bas de la couche bitumineuse et non pas au niveau de la couche de roulement, la couche de BFUP apportant une contribution structurelle par son module de rigidité très élevé (45'000 MPa) avec une meilleure diffusion de la charge en surface.

Deux variantes de structures sont considérées pour la chaussée :

- Variante 1 : BFUP (40 mm) / AC EME 22 C1 / AC T 22
- Variante 2 : BFUP (40 mm) / AC EME 22 C1 / AC EME 22 C2

Le dimensionnement est réalisé selon la méthode française avec une durée de service de 20 ans, ce qui aboutit à un trafic pondéral total $W_{20} = 22.4 \cdot 10^6$ ESAL 8t, ou encore pour la méthode française un $NE_{20} = 3.5 \cdot 10^6$ ESAL 13t.

Le sollicitation admissible est une déformation de traction maximale de $72 \cdot 10^{-6}$ dans la couche AC T 22, et de $78 \cdot 10^{-6}$ dans la couche AC EME 22 C2.

Les épaisseurs minimales des couches pour les variantes 1 et 2 sont données au tableau 1.

Tab. 1 Dimensionnement de la structure de l'arrêt Foyer

Structure	Épaisseur (mm)				
	BFUP	AC EME 22 C1	AC T 22	AC EME 22 C2	Grave
Variante 1	40	80	100	-	450
		90	90		
		100	80		
Variante 2	40	80	-	80	450

La structure de la variante 2 correspond à des épaisseurs des couche en AC EME à la limite constructive minimale selon les normes. La structure de la variante 2 est ainsi sous-exploitée par rapport à son potentiel réel. On lui préférera la variante 1 qui présente en plus l'avantage de permettre une pose de l'enrobé plus aisée au fond de la structure fraisée avec un matériau AC T 22 plus maniable que l'AC EME 22 C2.

La structure finale retenue à Lausanne comprend les couches suivantes :

- BFUP : 40 mm
- AC EME 22 C1 : 100 mm
- AC T 22 : 80 mm
- Grave : > 450 mm

Au vu du caractère expérimental de la couche en BFUP, l'épaisseur de la couche en AC EME C1 a été portée à 120 mm pour disposer, en cas de dégradation prématurée du BFUP, d'une épaisseur de structure totale suffisante.

3.3.6 Instrumentation

Les capteurs de déformation (DMS) constituent l'essentiel des capteurs posés dans la masse de la structure de chaussée.

Les capteurs ont été installés dans 2 zones mécaniquement importantes situées au début de l'arrêt de bus (zone de freinage) à 2 profondeurs. Le détail du positionnement des capteurs est donné dans le schéma de la figure 17.

Dans chaque zone, 2 capteurs sont placés à l'interface ACT/Grave et 3 capteurs à l'interface BFUP/AC EME, ce qui donne un total de 10 capteurs DMS.

Des capteurs de température de type Pt-100 ont été placés à l'interface ACT/Grave et BFUP/AC EME.

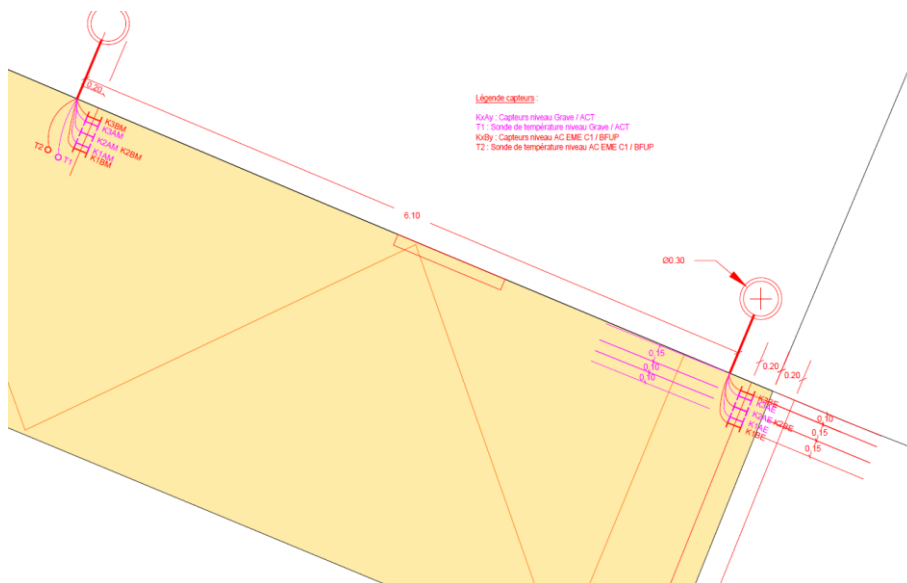


Fig. 17 Schéma de pose des capteurs DMS avec vue des chambres d'arrivée des câbles à Lausanne

3.3.7 Construction

La construction de l'arrêt de bus Foyer s'est déroulée sur 3 semaines entre le 27 juillet et le 21 août 2015.

En raison d'une profondeur de structure sous-estimée et très variable, la structure existante a été dégrappée sur une profondeur de 30 cm au lieu des 26 cm prévus initialement dans le projet. Le surépaisseur à combler a nécessité ainsi la pose de deux couches en ACT 22 au lieu d'une seule couche.

La pose des 3 couches bitumineuses a été réalisée avec une finisseuse sur toute la longueur à l'exception des extrémités posées à la main.

La maîtrise du nivellement lors de la pose de la première couche en ACT 22 S étant insuffisante, celle-ci présente une épaisseur comprise entre 72 et 105 mm, bien supérieure aux 65 mm attendus. Cet élément a nécessité une adaptation du projet avec la pose de la deuxième couche en ACT 22 S avec l'épaisseur minimale recommandée par la norme (65 mm), ce qui se traduit par la pose d'une couche en AC EME 22 C1 d'une épaisseur moyenne de 90 mm au lieu des 120 mm du projet initial. Cette modification n'affecte pas la validité du dimensionnement précédent.



Fig. 18 Pose de la couche bitumineuse en ACT 22 avec vue sur la chambre d'arrivée des câbles des capteurs DMS

Les couches en AC T 22 sont dans l'ensemble conformes aux normes avec seulement 1 carotte sur 6 légèrement sous-compactée.

La couche en AC EME 22 C1 est vraisemblablement sous-compactée avec une compacité moyenne de 98.1% (valeur isolée à 96.4%) et des vides moyens de 7.7% (valeur isolée à 9.3%). Ce sous compactage devrait se traduire par un module de rigidité plus faible que les 16'200 MPa annoncés dans le rapport d'épreuve de formulation. Cette valeur est néanmoins assez élevée par rapport à la valeur de 11'000 MPa exigée par la norme ce qui a priori ne met pas en défaut le dimensionnement de la structure.

Le collage à l'interface AC EME 22 C1 et le BFUP étant un élément déterminant pour garantir la pérennité de la chaussée, deux solutions de traitement de surface ont été testées :

- Nettoyage à très haute pression (700 bars) avec le système Rotoplast® (balayeuse laveuse).
- Micro-fraisage sur une profondeur d'environ 5 à 10 mm.

Le premier procédé testé bien que présentant un intérêt économique certain s'est avéré insuffisant pour éliminer le film du liant dur en surface. Le micro-fraisage s'est avéré plus concluant, avec une surface de granulats exempte de liant et une texture satisfaisante.



Fig. 19 Aspect de surface au sommet de la couche en AC EME 22 C1 après le micro-fraisage

La pose du BFUP de la sorte UA (selon fiche technique LafargeHolcim) a eu lieu par temps ensoleillé avec l'installation d'un malaxeur et une production sur le chantier avec un rendement de 500~700 kg toutes les 30 minutes.

La surface du support est mouillée avant le déversement au dumper du BFUP frais. La gâchée est ensuite étalée au râteau puis talochée si nécessaire à la main.

La pente du site de l'ordre de 4.5% s'est avérée assez importante pour constater un écoulement gravitationnel certes lent mais existant de la pâte de BFUP. Les ouvriers sur le chantier ont corrigé ce phénomène au râteau jusqu'à ce que la consistance du béton frais soit suffisante. Cet aspect devrait être mieux maîtrisé lors de chantiers futurs, car il est vraisemblablement la cause de la qualité moyenne de l'uni longitudinal de la surface du BFUP. Les bosses visible à la surface du BFUP ont été éliminées avec le passage d'une raboteuse de petite largeur.

La cure du BFUP est assurée par un recouvrement rapide de la surface par un film plastique après aspersion d'un produit de cure.

Le traitement par jet d'eau à haute pression a été testé pour texturer la surface du BFUP durci, mais le procédé s'est avéré insuffisant. La surface du BFUP a donc été texturée par un grenailage avec des billes métalliques qui en plus de garantir une certaine rugosité de la surface favorise des longueurs de fibres suffisante et favorable à un bon collage avec la résine époxy.

Le gravillonnage de la surface du BFUP a eu lieu 3 jours après le grenailage. L'humidité en surface du support doit être inférieure au seuil de 3% afin de garantir la qualité du collage. La pose de la résine époxy est précédée de l'application d'un primer d'encollage prescrit par le fournisseur. Le gravillonnage est réalisé à la main avec une évacuation du refus après le durcissement de la résine.



Fig. 20 Gravillonnage de la surface après pose du primer de la résine époxy

Le traitement des joints entre la nouvelle chaussée et la chaussée existante consiste à appliquer :

- un enduit d'accrochage à base de bitume modifié aux polymères au niveau de la couche en AC EME 22 C1,
- un produit de scellement à base de bitume modifié aux polymère coulé à chaud au niveau du joint entre le BFUP et la chaussée existante, nettoyé au préalable à l'air comprimé et chauffé au chalumeau.



Fig. 21 Chaussée de l'arrêt de bus Foyer après réfection

3.4 Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich

3.4.1 Choix de la structure

La ville de Zurich dispose d'un réseau de transport public très développé avec la première exploitation en Suisse des Trolleybus à double articulation. Ces véhicules, désignés en France et en Romandie par Bus à Haut Niveau de Service (BHNS), comprennent 4 axes et une longueur totale de 24.7 mètres.

La ville de Zurich a porté son choix sur la structure en béton armé continu (BAC) posé sur une couche de fondation en ACT 22. La dalle en béton est ensuite recouverte par un enrobé bitumineux afin de satisfaire une exigence de la Ville par rapport à la réduction du bruit de roulement.

L'innovation de la structure proposée est de tirer profit des atouts de chaque type de matériau : la résistance du béton à la déformation permanente en surface, et la résistance de l'enrobé bitumineux aux charges cycliques (fatigue) en bas de la structure.

La durabilité de cette structure composite dépend de son aptitude à fonctionner mécaniquement comme un massif monolithique. Ceci est assuré par la garantie d'un collage performant et durable de l'interface enrobé/béton grâce à un traitement adéquat de la surface.

Le matériau de la couche de roulement souhaité par la ville de Zurich est un PMA 8, soit un asphalte coulé 0/8 phonoabsorbant, avec un bitume modifié aux polymères. Ce matériau a été retenu pour ses qualités phoniques et son aptitude à coller parfaitement sur un support en béton, qualité propre aux asphaltes coulés.

3.4.2 Site

Le site mis à disposition par la ville de Zürich est l'arrêt de bus SBB-Werkstätte en direction de Schlieren. L'arrêt de bus est desservi par la ligne de bus numéro 31 et sa surface de circulation est partagée avec le trafic individuel motorisé.

La chaussée existante présentait un orniérage important avec quelques réparations sur le bord droit.



Fig. 22 Chaussée de l'arrêt de bus SBB - Werkstätte avant réfection

3.4.3 Trafic

La ligne de bus nr. 31 est exploitée avec deux types de véhicules dont les caractéristiques sont données ci-dessous:

- a. Bus articulé : Trolleybus avec articulation simple, 3 axes et une longueur totale de 18.7 m,
- b. Bus à double articulation : Trolleybus avec articulation double, 4 axes et une longueur totale de 24.7 m.

Les caractéristiques détaillées de ces véhicules sont données en annexe II.

Le remplissage moyen des véhicules est estimé en 2001 par la ville à 65%. Pour le calcul du trafic pondéral équivalent, un remplissage à 80% est admis pour 2015.

En l'absence d'informations plus précises, la répartition des bus selon l'horaire de la ligne nr. 31 est établie sur la base des hypothèses suivantes :

- Les heures creuses sont assurées exclusivement avec le bus articulé (3 axes) et les heures de pointe avec le bus à double articulation (4 axes)
- L'horaire de pointe est admis comme suit :
 - En semaine (lundi – vendredi) : de 6h00 à 20h00
 - Samedi : de 10h00 à 20h00
 - Dimanche et jours fériés : horaire heures creuses uniquement

Avec cette décomposition, le nombre de passages de bus est donné par véhicule et par jour dans le tableau 2.

Tab. 2 Nombre de passages de bus sur l'arrêt SBB Werkstätte

Période	Véhicule	Lun – Ven	Sam	Dim + fériés
Heures creuses	Bus articulé	33	57	108
Heures de pointe	Bus à double articulation	114	80	-

Les données du trafic individuel motorisé sont obtenues du système d'information géographique du canton de Zürich. La chaussée supporte un trafic de 6524 véhicules dans la direction Schlieren dont 2.8% de poids lourds. Le taux d'accroissement annuel du trafic est admis égal à 2%.

3.4.4 Portance du sol

Selon la norme NF P 98-086 [5], le choix d'une structure de type BAC sur ACT nécessite une classe de portance du sol au minimum S3.

Avec des valeurs d'essai de plaque M_{E1} de 158.0 et 114.4 MN/m² et un ratio M_{E2}/M_{E1} compris entre 1.7 et 1.8, la portance est considérée comme élevée et correspond à une classe S4 selon la norme SN 640 324.

3.4.5 Conception et dimensionnement

Les principes de conception de la chaussée proposés et mis en œuvre pour la structure de Zurich sont les suivants :

1. Transition douce de la rigidité structurelle entre la voie courante et la plate-forme de l'arrêt de bus.
2. Bon collage entre toutes les couches bitumineuses et la dalle béton par :
 - a. un micro-fraisage de la couche d'ACT 22,
 - b. un grenailage de la surface de la dalle béton,

La transition douce de la rigidité structurelle est obtenue par la construction d'une dalle de transition de 2 m de long avec un élément en béton non-armé coulé sur place et présentant une rigidité progressive grâce à une épaisseur variant linéairement sur sa longueur (figure 23). La transmission des efforts entre les deux dalles de transition et la plate-forme centrale en béton armé continu est assurée par la mise en place de goujons Ø25 mm espacés de 500 mm, selon les recommandations de la norme SN 640 461.

Compte tenu de l'importance et de la complexité de la superstructure à construire, le dimensionnement de la chaussée est réalisé pour une durée de service de 30 ans.

Le trafic pondéral équivalent est calculée selon les hypothèses décrites plus haut dans la section du trafic et aboutit à un $W_{30} = 22'100'000$ essieux standards 8t, soit l'équivalent de 3'500'000 essieux standards 13t. Le détail du calcul est donné en annexe III.

Le dimensionnement selon la norme suisse SN 640 324 de la structure étudiée est déterminé sur la base de la fiche du type de structure nr. 16.

Le rapport OFROU nr. 1180 sur les structures mixtes [15], au chapitre 7.4.1, admet pour le dimensionnement que la couche bitumineuse en surface au-dessus d'une couche de

base en BAC n'a aucun rôle structurel. Il recommande de choisir une épaisseur de la dalle en BAC égale à celle préconisée pour les structures de dalles béton goudonnées (chapitre 7.4.3). Cette recommandation, introduite en 2010 dans la nouvelle structure type nr. 16 de la norme SN 640 324, a pour conséquence l'obtention de superstructures surdimensionnées, et ne présentant aucun avantage économique par rapport à de simples dalles avec joints.

Le dimensionnement de la structure composite de la chaussée de Zürich n'est pas une démarche triviale à cause de la complexité des modes d'endommagement en présence. La méthode de dimensionnement retenue dans ce projet est la nouvelle méthode française [5] qui préconise un calcul analytique considérant un fonctionnement mécanique de la structure en deux phases :

Phase 1 : Les couches BAC et ACT 22 sont solidaires (collage parfait entre les couches) pour une durée de service de 15 ans.

Phase 2 : Le BAC est ensuite considéré comme décollé de son support bitumineux (interface glissante) pour le reste de la durée de vie.

Pour les deux phases, le niveau de contrainte ou de déformation est calculé aux points critiques de la structure, soit le bas de la couche ACT 22 (déformation) et le bas de la couche de BAC (contrainte).

Le dimensionnement consiste à procéder par itération et déterminer l'épaisseur minimale du BAC qui permet d'atteindre le nombre d'essieux standards définis dans l'analyse de trafic. L'épaisseur de la couche d'ACT 22 est fixée à 80 mm et correspond à l'épaisseur nominale de pose pour ce genre de matériau.

La note de calcul de dimensionnement détaillée est reproduite dans l'annexe III.

Le passage des valeurs de contrainte / déformation au nombre d'essieux standards se fait par le biais de lois de fatigues dont les paramètres sont strictement définis dans la méthode française.

Le calcul de dimensionnement itératif aboutit à une épaisseur minimale du BAC de 140 mm qui permet de garantir le passage du nombre d'essieux standards 13t définis précédemment, soit $NE = 3.5 \cdot 10^6$ ESAL 13t.

Cette épaisseur assez faible selon les normes et la pratique en Suisse est tout à fait acceptable en France par exemple. La réalisation d'une couche en béton armé continu avec une épaisseur de 140 mm nécessite un soin particulier lors des travaux, en particulier le positionnement à mi-hauteur de l'armature longitudinale.

L'épaisseur finale retenue pour la couche en BAC est de 180mm. Cette adaptation de l'épaisseur est justifiée par les éléments suivants :

- le respect de l'épaisseur d'enrobage minimum des armatures selon la norme SN 640 461,
- la garantie d'une marge de sécurité pour la mise en place d'une solution expérimentale en Suisse.

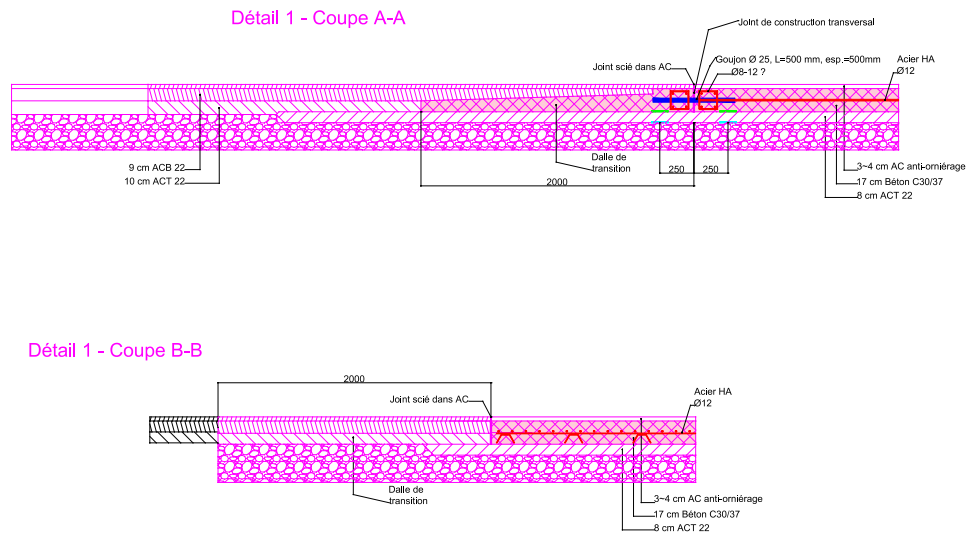


Fig. 23 Structure de la chaussée de l'arrêt de bus SBB - Werkstätte

La structure finale construite à Zürich comprend les couches suivantes :

- PMA 8 : 40 mm
- Béton armé continu : 180 mm (épaisseur minimale nécessaire : 140 mm)
- ACT 22 : 80 mm
- Grave : > 400 mm

La surépaisseur de 40 mm du BAC (180 mm au lieu de 140 mm selon le dimensionnement) permet à la structure définitive de supporter un trafic théorique de 250'000'000 essieux standards 13t, ce qui correspond à une classe de trafic supérieure à la classe T6 suisse. Cette performance théorique est à nuancer car le comportement aux bords doit encore être validé.

Il faut rappeler également que la durée de vie calculée concerne la fatigue mécanique des couches de base (béton et ACT 22). La couche de surface supportant des charges importantes subira a priori des dommages superficiels comme l'orniérage qui représentent des problématiques spécifiques à la conception des matériaux et non au dimensionnement.

3.4.6 Instrumentation

Les capteurs de déformation (DMS) constituent l'essentiel des capteurs posés dans la masse de la structure de chaussée.

Les capteurs ont été installés dans 3 zones mécaniquement importantes situées au début de l'arrêt de bus (zone de freinage) à 2 profondeurs. Le détail du positionnement des capteurs est donné dans la figure 24.

Dans chaque zone, 2 capteurs sont placés à l'interface ACT/Grave et 3 capteurs à l'interface Béton/ACT, ce qui donne un total de 15 capteurs DMS.

Deux capteurs de température de type Pt-100 ont été placés à l'interface Béton/ACT.

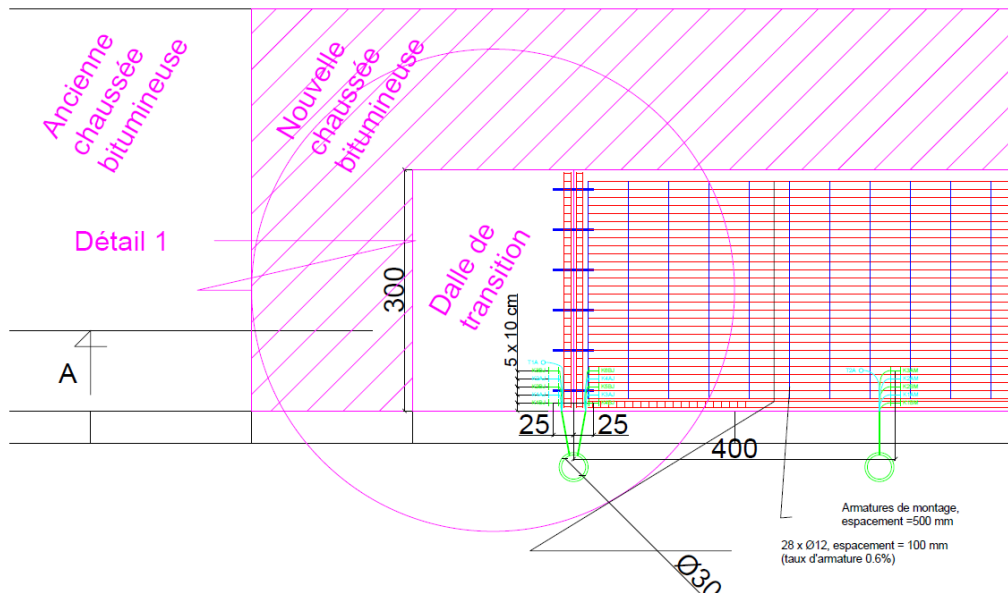


Fig. 24 Vue en plan de la structure et position des capteurs sur l'arrêt de bus SBB – Werkstätte

3.4.7 Construction

La construction de l'arrêt de bus de SBB-Werkstätte s'est déroulée sur trois semaines à partir du 26 octobre 2015.

Pour des raisons de gestion de trafic, la première phase des travaux a concerné la construction de la surface de l'arrêt de bus pendant les deux premières semaines. La deuxième phase réalisée pendant la troisième semaine s'est occupée de la pose de l'enrobé bitumineux avant et après l'arrêt de bus et, dans le sens de la longueur, sur une bande latérale large de 2 m.



Fig. 25 Pose de la couche bitumineuse en ACT 22 H avec en avant plan les capteurs DMS

La couche bitumineuse en ACT 22 H a été posée à la main sur toute la surface. Le compactage a été réalisé par un rouleau mixte de 2.5 t et un rouleau à pneu de 16 t.

Les propriétés volumétriques de la couche bitumineuse sont conformes aux exigences normatives avec notamment des valeurs moyennes des vides en place de 6.5%, proche de la limites supérieure des exigences, et un degré de compactage de 99%.



Fig. 26 Vue de l'armature et goujons au bord de la couche en béton armé continu



Fig. 27 Pose de la couche en béton armé continu avec mise en place par vibration du béton

La partie en BAC comportait dans les plans d'exécution des cadres d'armatures sur le bord transversal et le bord longitudinal. Ces cadres d'armatures n'ont pas été mis en place par l'entreprise lors de la construction.

L'exécution du grenailage de la surface bitumineuse sous le béton pour garantir une bonne liaison entre l'enrobé bitumineux et le béton a été confirmée par le chef de projet du chantier. L'observation de l'état de surface de la couche bitumineuse ne permet pas de valider cette affirmation, l'aspect de l'enrobé suggérant une élimination insuffisante du film de bitume de l'enrobé AC T.

La pose du BAC a été réalisée avec une vibration à l'aiguille et à la poutre. La finition en surface des bords longitudinaux a été faite par un talochage à la main.



Fig. 28 Chaussée de l'arrêt de bus SBB – Werkstätte après réfection

4 Mesures sur les structures expérimentales

Le comportement mécanique initial des structures expérimentales est évalué dans le projet par la réalisation d'une campagne de mesures le plus tôt possible après la construction.

Une campagne comprend systématiquement les mesures suivantes :

- Mesure des déformations dans la structure (capteurs DMS) sous une charge de trafic réelle avec pesage des charges par essieu des bus et mesure des températures ;
- Mesure de la portance avec le déflectomètre à masse tombante (HWD) et détermination des déflexions maximales, de la rigidité des couches et le cas échéant la qualité du transfert de charge dans la zone de transition.

4.1 Chaussée bitumineuse – Ville de la Chaux-de-Fonds

4.1.1 Conditions générales

La campagne de mesure des déformations sur la structure de la Chaux-de-Fonds s'est déroulée le 16 juillet 2015, soit 10 mois après la fin de la construction.

Les passages de bus ont été enregistrés pendant l'heure de pointe entre 9h15 et 12h16. Le jour de mesure étant très ensoleillé, la température dans la structure a augmenté continuellement à la base de la couche ACT 32 (-220 mm) pour passer de 23°C à 29°C.

Trois jauges de déformation sur les six posées sont hors service le jour de la campagne de mesure. Les trois jauges exploitables sont réparties entre la trace de roue droite (2 jauges) et la trace de roue gauche.

L'emplacement des jauges correspond à une zone de circulation où les bus manœuvrent pour s'aligner avec l'axe du quai. La conséquence de cette situation est que la position latérale de la roue présente une certaine variabilité, et l'amplitude maximale ne sera pas enregistrée à chaque passage par le même capteur.

4.1.2 Caractéristiques des véhicules

Les bus mesurés lors de la campagne sont pour l'essentiel des Minibus à 2 axes et (Mercedes-Benz 312 D) et des Midibus à 2 axes. Leurs caractéristiques principales (charges, vitesse, type et heure de passage) sont données au tableau 4.

Tab. 3 Caractéristiques des bus pendant la campagne de mesure à la Chaux-de-Fonds

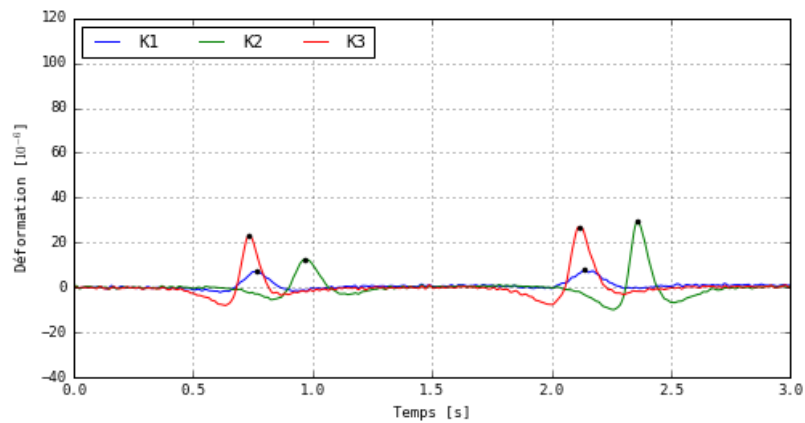
Nr. Passage	Nr. ligne	Heure	Charge axe 1 [kg]	Charge axe 2 [kg]	Vitesse [km/h]	Remarque
1	310	9h15	1300	3200	~6	
2	312	9h25	800	900	~6	
3	311	9h35	1250	3150	~6	
4	310	9h43			~6	Problème mesure charge
5	311	10h08	850	1150	~6	
6	310	10h13	1150	3150	~6	
7	312	10h28	800	1050	~6	
8	311	10h36	1250	3100	~6	Problème mesure déform.
9	310	10h42	800	1050	~6	
10	311	11h05	900	1100	~6	
11	310	11h13	1350	3450	~6	

12	312	11h25	850	1100	~6
13	311	11h36	1350	3100	~6
14	312	11h59	1350	3200	~6
15	310	12h16	1300	3300	~6

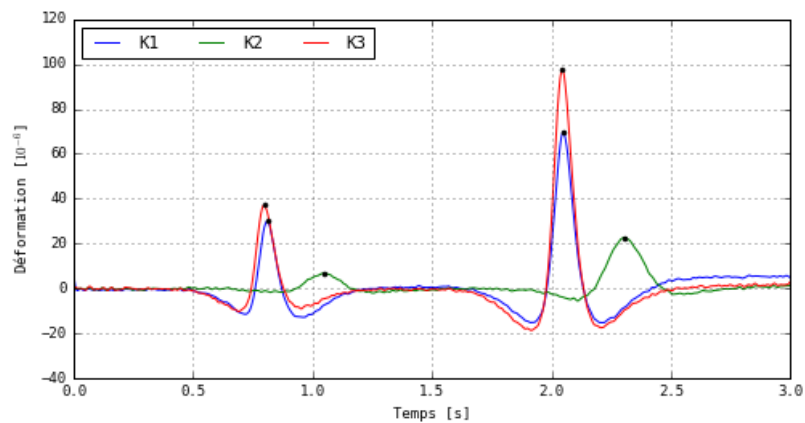
4.1.3 Sollicitations types et amplitudes maximales

Nous rappelons que les déformations dans la structure sont mesurées au bas de la couche bitumineuse en ACT 32 (niveau = -220 mm), sur la trace de roue droite et la trace de roue gauche.

Les déformations mesurées au passage de bus à 2 axes sont illustrées dans la figure 29.



(a)



(b)

Fig. 29 Exemple de signaux de mesures de déformations pour la structure de la Chaussée-Fonds pour un Minibus (a) et un Midibus (b)

Les déformations maximales sont des déformations de traction (valeurs positives) typiques des chaussées entièrement bitumineuses. L'amplitude des pics est proportionnelle à la valeur de la charge (Fig. 29).

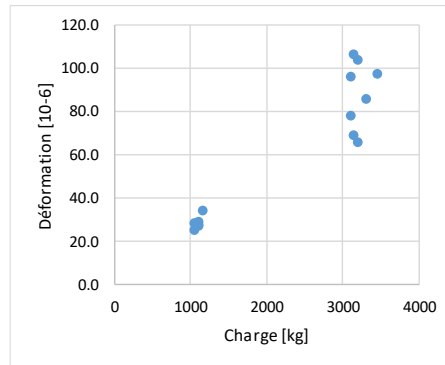


Fig. 30 Amplitudes maximales des déformations en fonction de la charge

La déformation maximale mesurée est de $80 \cdot 10^{-6}$ pour un essieu jumelé de 6t (3000 kg sur chaque roue jumelée) , soit proportionnellement une déformation de $173.3 \cdot 10^{-6}$ pour un essieu jumelé de 13t.

La température dans les matériaux bitumineux relativement élevée et variable pendant la réalisation de la campagne, doit être considérée pour corriger les amplitudes des déformations à une température de référence.

Correction de la température

La correction de l'effet de température sur l'amplitude de la déformation consiste à déterminer le ratio entre les déformations de la structure calculées pour les situations suivantes :

- température de référence de 15°C constante dans toutes les couches bitumineuses,
- gradient de température effectif dans les couches bitumineuses, mesuré le jour de la mesure.

La température mesurée le 15 juillet 2015 au bas des couches bitumineuses (-220 mm) est de 28°C . La température mesurée en surface est de 50°C . En l'absence de capteurs de température à des profondeurs intermédiaires, la variation de la température est admise linéaire entre les deux extrémités. Le calcul multilayer est réalisé sur un modèle avec des couches bitumineuses subdivisées en sous-couches de 30 à 40 mm. Le module des couches bitumineuses varie de 265 à 2489 MPa, lorsque la température passe de 50°C à 28°C . Le module de l'enrobé bitumineux est déterminé par interpolation par rapport aux modules mesurés en laboratoire sur un enrobé ACT 22 avec un liant 50/70.

Les déformations maximales de traction calculées pour un essieu chargé à 13t sont de $87.7 \cdot 10^{-6}$ pour le cas de référence (température constante de 15°C) et $169.2 \cdot 10^{-6}$ pour le cas avec prise en compte du gradient de température du jour de la mesure. Le ratio entre les deux déformations est de 1.93.

Comme indiqué plus haut, la déformation mesurée pour un essieu jumelé de 13 t est de $173.3 \cdot 10^{-6}$. L'application du ratio de correction précédent aboutit à une déformation mesurée de $89.8 \cdot 10^{-6}$ à 15°C . Cette valeur est à comparer avec la valeur calculée théorique de dimensionnement qui est de $87.7 \cdot 10^{-6}$. L'écart entre les deux valeurs est faible (2.4%) malgré la correction importante appliquée, ce qui démontre une bonne correspondance entre la valeur calculée utilisée pour le dimensionnement, et la déformation réelle de la chaussée.

4.1.4 Mesure de la portance avec le HWD

La portance de la structure de chaussée à la Chaux-de-Fonds a été évaluée à l'aide de l'appareil HWD le 30 septembre 2015 entre 10h et 11h30. La température des couches bitumineuses lors des mesures est comprise entre 9 et 12°C.

La structure de chaussée modélisée pour le calcul inverse comprend les couches suivantes :

- 220 mm de couche bitumineuse (AC 11 N PmB +AC B 16 S +ACT 32),
- 530 mm de grave de fondation,
- Sol avec épaisseur infinie.

Les déflexions maximales, illustrées sur les figures 31 et 32 pour respectivement les quais n°2 et n°5, présentent des valeurs assez faibles synonymes d'une rigidité satisfaisante de la structure. La comparaison des déflexions entre traces de roues montre des résultats assez proches particulièrement pour le quai n°2.

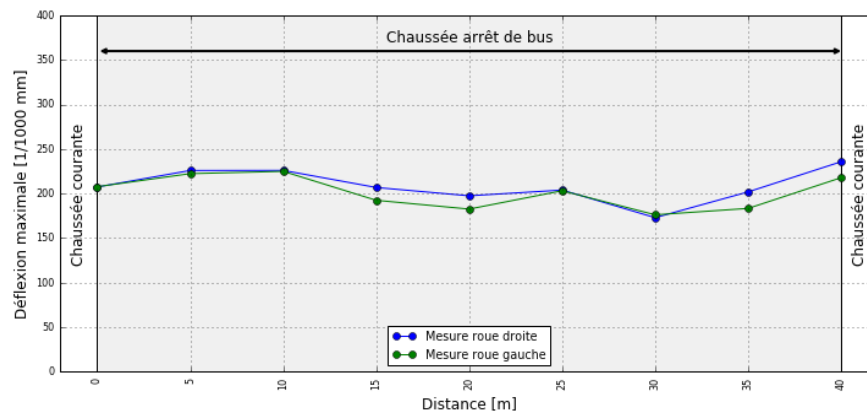


Fig. 31 Déflexions maximales sur l'arrêt de bus de La Chaux-de-Fonds – Quai n°2

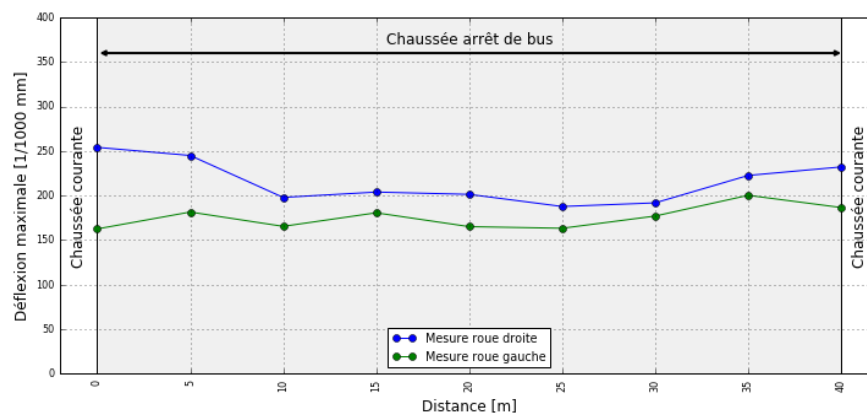


Fig. 32 Déflexions maximales sur l'arrêt de bus de La Chaux-de-Fonds – Quai n°5

Les modules des couches de la structure de la Chaux-de-Fonds sont déterminés par calcul inverse et représentés sur les figures 33 et 34 pour respectivement les quais n°2 et n°5.

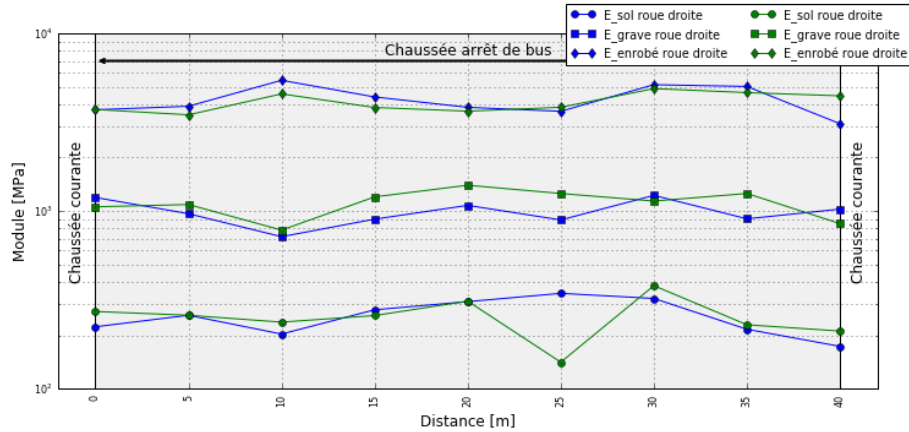


Fig. 33 Modules de rigidité sur l'arrêt de bus de la Chaux-de-Fonds – Quai n°2

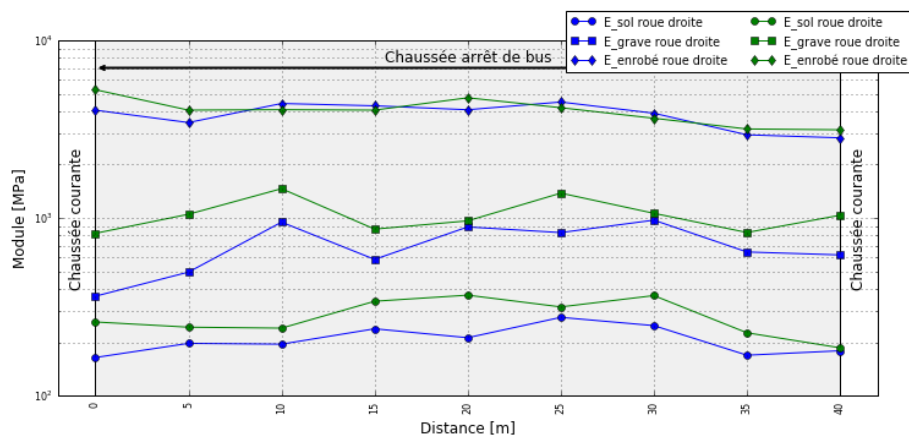


Fig. 34 Modules de rigidité sur l'arrêt de bus de la Chaux-de-Fonds – Quai n°5

Les modules obtenus pour le sol sont compris entre 140 et 380 MPa, avec une moyenne de 260 MPa et l'essentiel des valeurs sont supérieures à 200 MPa. Il s'agit de valeurs satisfaisantes pour un sol de classe S3.

Les modules obtenus pour la couche de grave sont compris entre 360 et 1'400 MPa. Ces valeurs sont bonnes voire très élevée.

Le module élastique des couches bitumineuses varie entre 2'800 et 5'400 MPa à 25°C. Ces valeurs sont jugées bonnes avec une variabilité satisfaisante par rapport à ce qui est obtenu habituellement avec des mesures HWD.

4.2 Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne

4.2.1 Conditions générales

La campagne de mesure des déformations sur la structure de Lausanne s'est déroulée le 30 septembre 2015, soit 40 jours après la fin de la construction.

Les déformations au passage des bus ont été enregistrées pendant l'heure de pointe entre 7h30 et 9h15. La température dans la structure, relativement stable, est de 20°C à la base de la couche ACT 22 S (-280 mm) et de 15°C à la base de la couche BFUP (-40 mm).

4.2.2 Caractéristiques des véhicules

Les bus mesurés lors de la campagne sont pour l'essentiel des véhicules articulés à 3 axes. Leurs caractéristiques principales (charges, vitesse, type et heure de passage) sont données au tableau 4.

Tab. 4 Caractéristiques des bus pendant la campagne de mesure à Lausanne

Nr. Passage	Nr. ligne	Heure	Charge axe 1 [kg]	Charge axe 2 [kg]	Charge axe 3 [kg]	Vitesse [km/h]	Remarque
0	-	7h40	2400	1850	4450	7.8	
1	-	7h56	2350	2050	4950	6.8	
2	41	8h03	2300	2100	4800	4.6	
3	41	8h11	2600	1950	4650	6.5	
4	65	8h12	2650	1950	4600	4.0	
5	41	8h17	2600	2000	4400	5.9	
6	41	8h25	2550	1850	4500	5.3	
7	41	8h36	2000	2000	4950	8.5	
8	41	8h46	2250	2000	4900	4.0	
9	65	8h47	2650	4450	3050	4.0	Bus à 2 étages
10	41	8h56	2600	2200	4250	6.5	
11	41	9h06	2600	1750	4100	6.1	
12	41	9h16	2350	2050	4800	9.1	

4.2.3 Sollicitations types et amplitudes maximales

Nous rappelons que les déformations dans la structure sont mesurées au bas de la couche bitumineuse en ACT 22 S (niveau = -280 mm), et au bas de la couche en BFUP (niveau = -40 mm), et ce dans deux zones, soit le bord et le milieu de la structure.

Les déformations mesurées au passage d'un bus articulé à 3 axes sont illustrées dans la figure 35.

Les nomenclatures des capteurs correspondent à ce qui suit :

- K1BM, K2BM, K3BM : Capteurs au bas de la dalle BFUP (-40 mm) et au milieu de la structure ;
- K1BE, K2BE, K3BE : Capteurs au bas de la dalle BFUP (-40 mm) et au bord de la structure ;
- K1AM, K2AM, K3AM : Capteurs au bas de la couche en ACT (-280 mm) et au milieu de la structure ;
- K1AE, K2AE, K3AE : Capteurs au bas de la couche en ACT (-280 mm) et au bord de la structure.

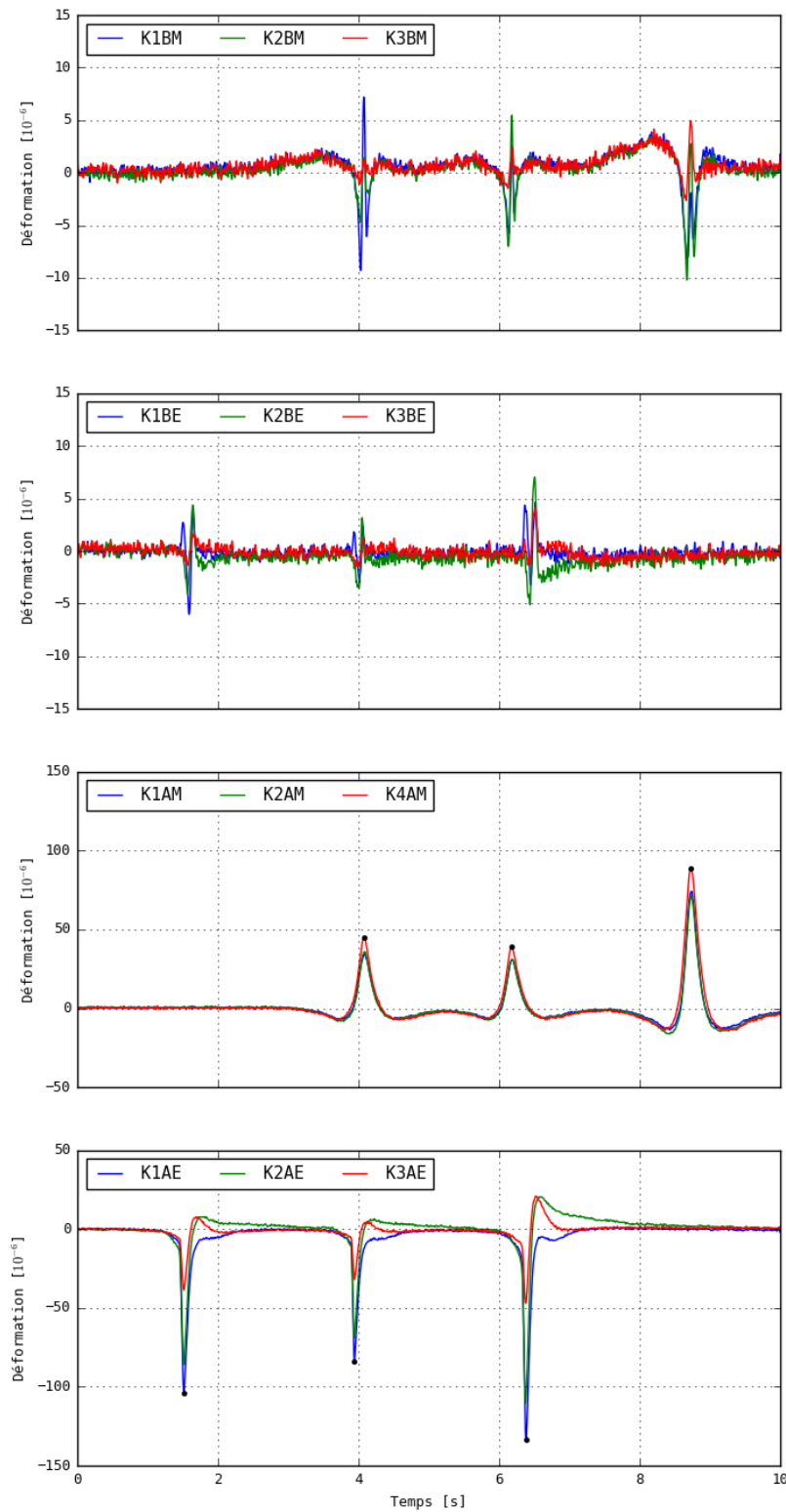


Fig. 35 Exemple de signaux de mesures de déformations pour la structure de Lausanne

Nous pouvons observer que les déformations mesurées à l'interface BFUP / AC EME 22 C1 présentent des amplitudes assez faibles en compression ou en traction avec une amplitude maximale de $15 \cdot 10^{-6}$. Les amplitudes de traction au milieu (jauges K1BM) sont généralement plus élevées que celles mesurées au bord (jauges K1BE), quel que soit la charge et le type de roue.

L'amplitude de la déformation au bas du BFUP varie entre +/- $15 \cdot 10^{-6}$ et correspond à une contrainte maximale (compression ou traction) de l'ordre de 0.675 MPa.

Les déformations mesurées à l'interface ACT 22 / Grave présentent systématiquement des pics de traction au milieu de la structure (jauges KiAM) et des pics de compression au bord de la structure (jauges KiAE).

Les amplitudes maximales des déformations sont données pour tous les passages et toutes les configurations dans la figure 36 pour les roues simples et la figure 37 pour les roues jumelées.

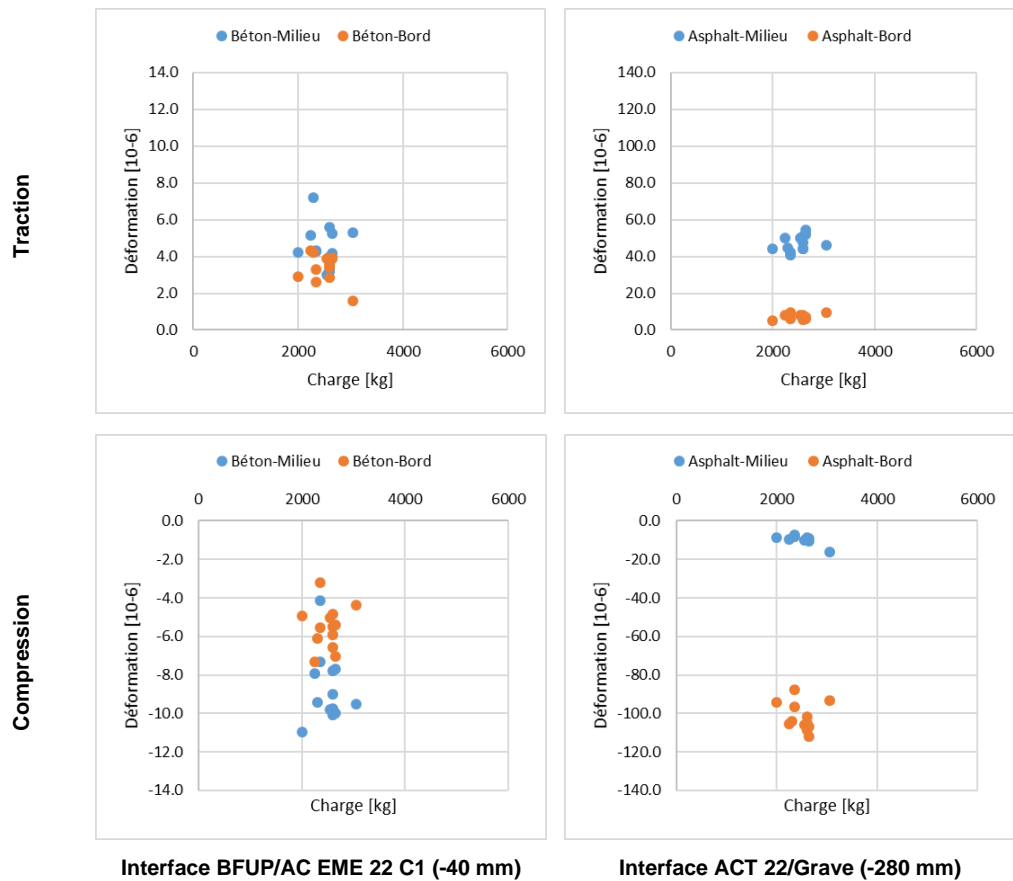


Fig. 36 Amplitudes maximales des déformations en fonction de la charge pour les roues simples

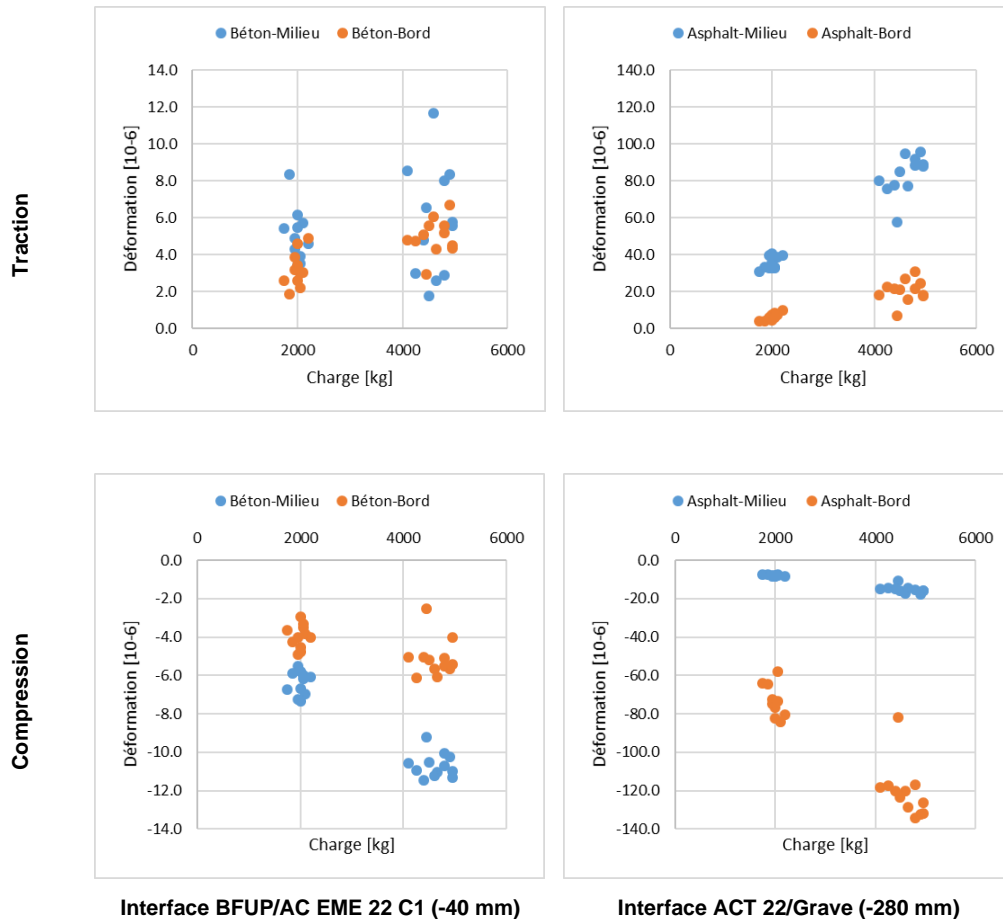


Fig. 37 Amplitudes maximales des déformations en fonction de la charge pour les roues jumelées

Une bonne linéarité existe entre la charge et l'amplitude de la déformation mesurée.

La déformation maximale de traction mesurée pour une charge d'essieu de 10t est d'environ $100 \cdot 10^{-6}$. En extrapolant à la charge de l'essieu standard français de 13t, cette déformation sera de l'ordre de $130 \cdot 10^{-6}$. La température dans la couche en ACT est de 20°C , nécessite une correction de son effet sur la déformation. Cette correction linéaire à la température de référence de 15°C donne une déformation de traction maximale de $94 \cdot 10^{-6}$, soit une sollicitation supérieure à la valeur obtenue par le calcul du modèle mécanique ($72 \cdot 10^{-6}$) du chapitre 3.3.5.

La différence entre la valeur théorique et la valeur mesurée illustre un écart significatif du fonctionnement mécanique par rapport aux hypothèses de calcul retenues. L'écart peut éventuellement être expliqué sur la chaussée de Lausanne par les éléments suivants :

- L'arrêt de bus présente une pente de 4.5% avec des véhicules en phase de décélération d'une intensité élevée ;
- L'absence de continuité mécanique entre la surface d'arrêt et l'ancienne chaussée en amont ;
- Un dysfonctionnement possible du capteur de déformation qui fournit l'amplitude la plus élevée.

4.2.4 Mesure de la portance avec le HWD

La portance de la structure de chaussée à Lausanne a été évaluée à l'aide de l'appareil HWD le 2 octobre 2015 entre 10h et 11h. Les températures mesurées sont stables à 16.5°C à la base de la couche ACT 22 S (-280 mm) et varient entre 15.5°C et 18.7°C à la base de la couche BFUP (-40 mm).

La structure de chaussée modélisée pour le calcul inverse comprend les couches suivantes :

- 40 mm BFUP, module fixé à 45'000 MPa,
- 245 mm de couche bitumineuse (AC EME 22 C1 +ACT 22),
- 450 mm de grave de fondation,
- Sol avec épaisseur infinie.

Le module de rigidité de la couche de BFUP n'est pas déterminé par calcul inverse en raison de son épaisseur réduite par rapport au rayon de la charge appliquée.

Les déflexions maximales, illustrées dans la figure 38, montrent des valeurs faibles et très homogènes loin des bords, indiquant une rigidité élevée de la structure. Les déflexions mesurées dans les deux traces de roue sont très proches ce qui indique une portance globale similaire entre les deux côtés.

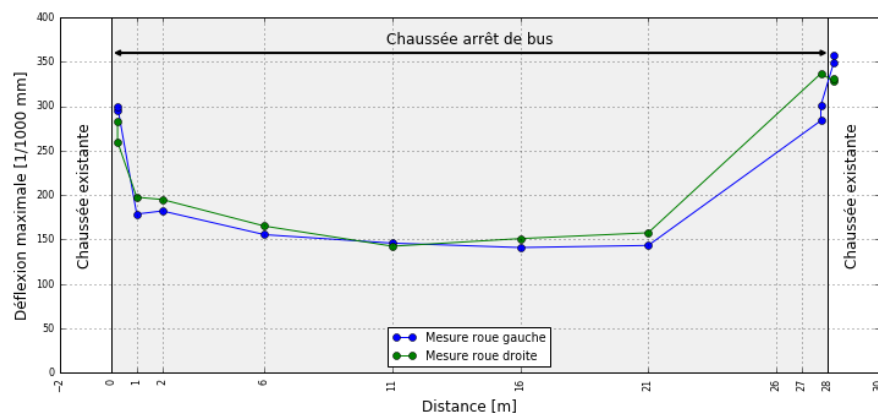


Fig. 38 Déflexions maximales sur l'arrêt de bus de Lausanne

Les modules des couches de la structure de Lausanne (à l'exception du BFUP dont le module est fixé), sont déterminés par calcul inverse et représentés sur la figure 39.

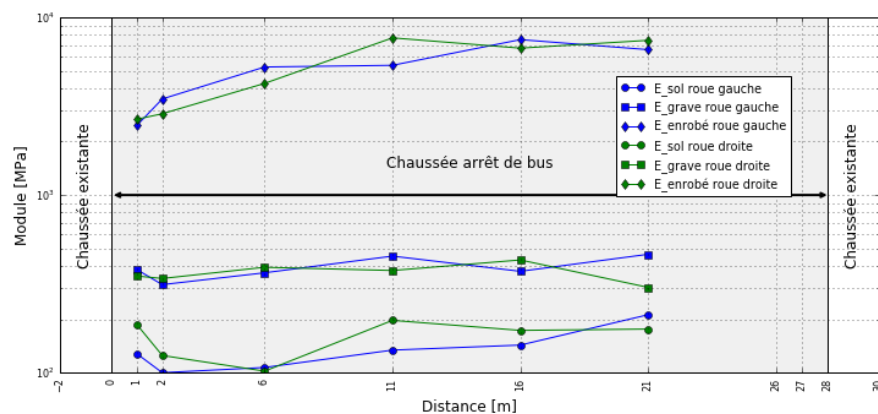


Fig. 39 Modules de rigidité sur l'arrêt de bus de Lausanne

Les modules obtenus pour le sol de fondation sont compris entre 100 et 200 MPa. Il s'agit de valeurs moyennes à bonnes confirmant un sol de classe S2 (borne supérieure) à S3.

Les modules obtenus pour la couche de grave existante sont compris entre 300 et 460 MPa. Ces valeurs sont bonnes et nuancent quelque peu la valeur de l'essai de plaque moyenne ($M_{E1}=59.3$ MN/m² avec un ratio $M_{E1}/M_{E2} = 4.23$).

Le module élastique des couches bitumineuses varie entre 2'600 et 7'500 MPa à 25°C. Ces valeurs sont représentatives du matériau dans la zone en amont mais nettement plus élevées que ce qui est attendu en aval, soit à partir du profil à 11 m depuis le bord en amont.

Nous rappelons que pour les couches bitumineuses, l'ensemble des modules élastiques obtenus présentent des valeurs élevées, situées du côté de la sécurité.

Il paraît plausible que la variabilité du module élastique des couches bitumineuses est plutôt liée à la variabilité importante dans l'épaisseur des couches posées. Cette variabilité est visible dans les épaisseurs des carottes prélevées sur les couches bitumineuses et qui fluctuent d'après les carottes prélevées entre 223 et 258 mm.

4.3 Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich

4.3.1 Conditions générales

La campagne de mesure des déformations sur la structure de Zurich s'est déroulée le 18 mai 2016, soit 6 mois après la fin de la construction. Ce délai est justifié par la fin de la construction juste avant le début de la période hivernale.

Les passages de bus ont été enregistrés entre 9h15 et 11h10. La température dans la structure, relativement stable, est de 17.2°C au bas de la couche ACT 22 S (-300 mm).

4.3.2 Caractéristiques des véhicules

Les bus mesurés lors de la campagne sont des véhicules double-articulés à 4 axes. Leurs caractéristiques principales (charges, vitesse, type et heure de passage) sont données au tableau 5.

Tab. 5 Caractéristiques des bus pendant la campagne de mesure à Zurich

Nr. Passage	Heure	Charge axe 1 [kg]	Charge axe 2 [kg]	Charge axe 3 [kg]	Charge axe 4 [kg]	Vitesse [km/h]	Remarque
1	9h15	2850	3900	4250	2600	-	
2	9h22	3100	3650	4700	3050	12.0	
3	9h33	3050	4200	4750	3350	7.5	
4	9h37	2900	3900	4850	2800	13.2	
5	9h52	2950	3500	4450	2950	7.4	
6	10h02	2750	4050	-	-	-	Erreur balance
7	10h30	2850	4000	4450	3000	9.1	
8	10h36	2850	3850	4700	2650	11.4	
9	10h43	2750	3650	4700	3100	9.2	
10	10h55	3050	4000	4450	3200	10.9	
11	10h59	3000	3350	4550	2550	8.4	
12	11h08	2800	4400	4450	3450	8.2	

4.3.3 Sollicitations types et amplitudes maximales

Nous rappelons que les déformations dans la structure sont mesurées au bas de la couche bitumineuse en ACT 22 (niveau = -300 mm) et le bas de la dalle béton (niveau = -220 mm).

Les déformations mesurées au passage d'un bus double-articulé à 4 axes sont illustrées dans la figure 40 pour les sollicitations dans la zone de la dalle de transition et la figure 41 pour la zone de la dalle principale en BAC.

Le placement des capteurs peut être consulté dans le chapitre 3.4.6. Pour rappel, la nomenclature des capteurs correspond à ce qui suit :

- K1AJ, K2AJ : Capteurs au bas de la couche ACT (-300 mm), au bord de la dalle de transition ;
- K1BJ, K2BJ, K3BJ : Capteurs au bas de la dalle de transition (-220 mm) au bord ;
- K3AJ, K4AJ : Capteurs au bas de la couche ACT (-300 mm) au bord de la dalle en BAC, proche de l'interface avec la dalle de transition ;
- K4BJ, K5BJ, K6BJ : Capteurs au bas de la dalle en BAC (-220 mm) au bord ;
- K1AM, K2AM : Capteurs au bas de la couche ACT (-300 mm) au milieu de la dalle en BAC ;
- K1BM, K2BM, K3BM : Capteurs au bas de la dalle en BAC (-220 mm) au milieu .

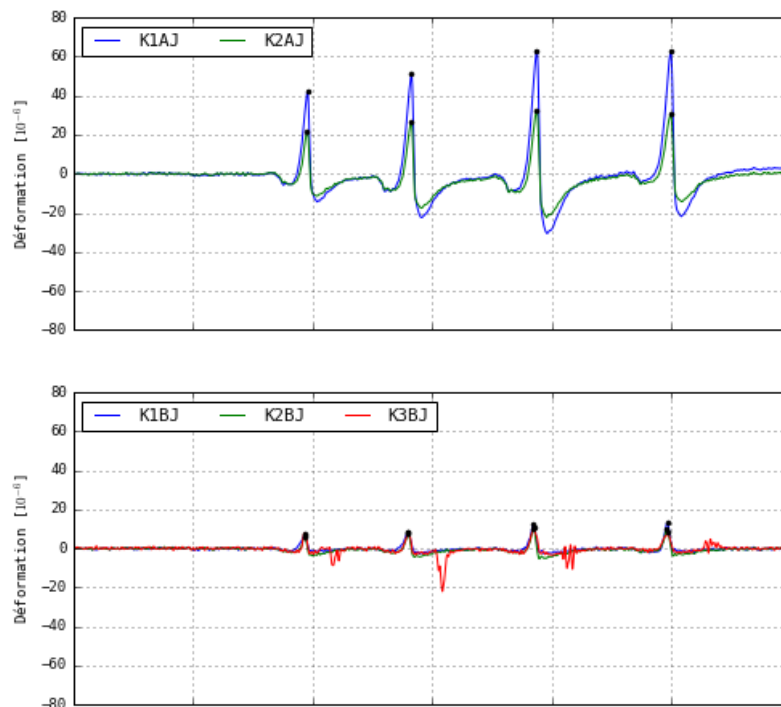


Fig. 40 Exemple de signaux de mesures de déformations dans la zone de la dalle de transition pour la structure de Zurich

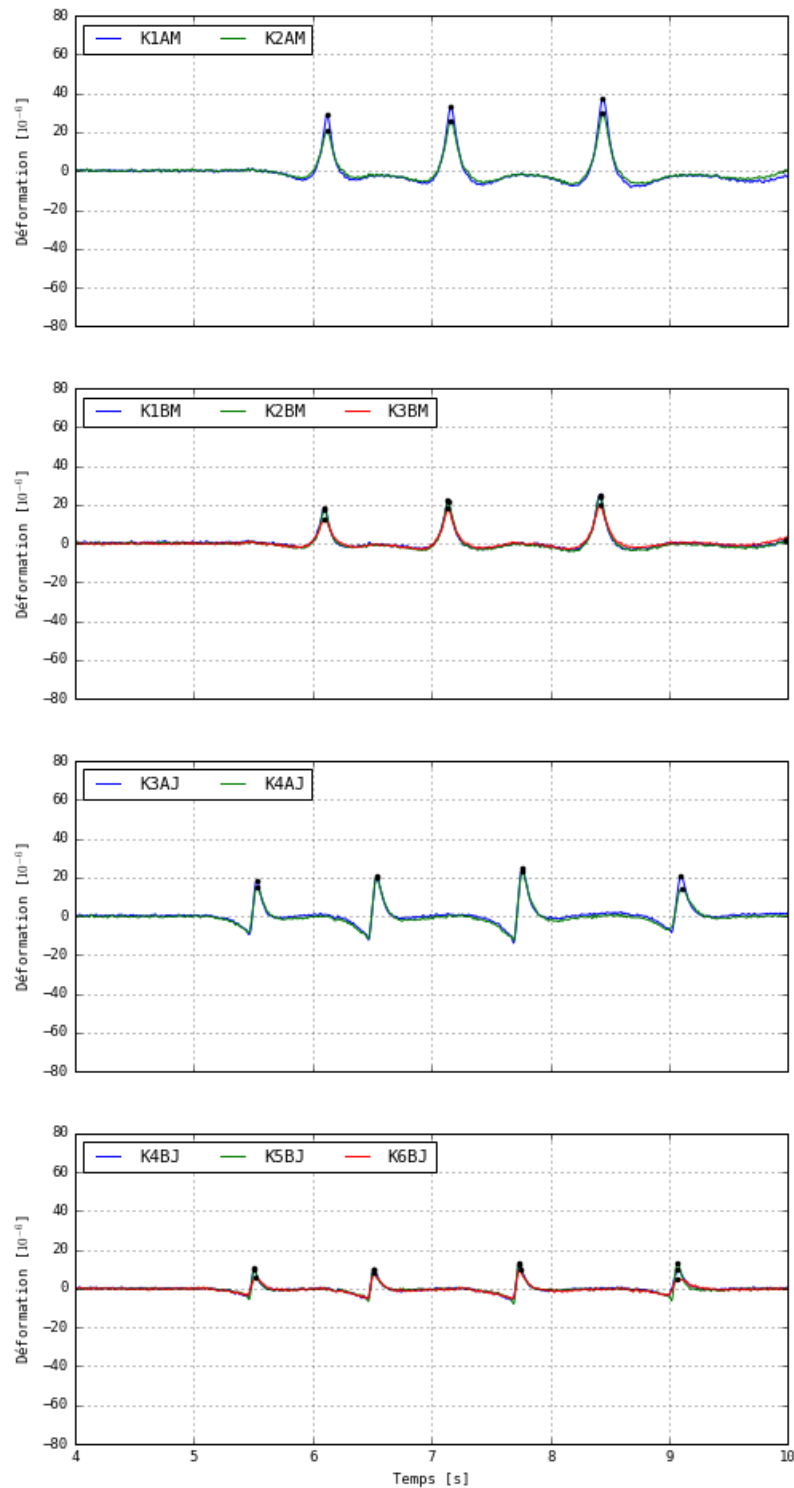


Fig. 41 Exemple de signaux de mesures de déformations dans la zone de la dalle principale pour la structure de Zurich

Les amplitudes maximales des déformations sont données pour tous les passages et toutes les configurations dans la figure 42 pour les roues simples et la figure 43 pour les roues jumelées.

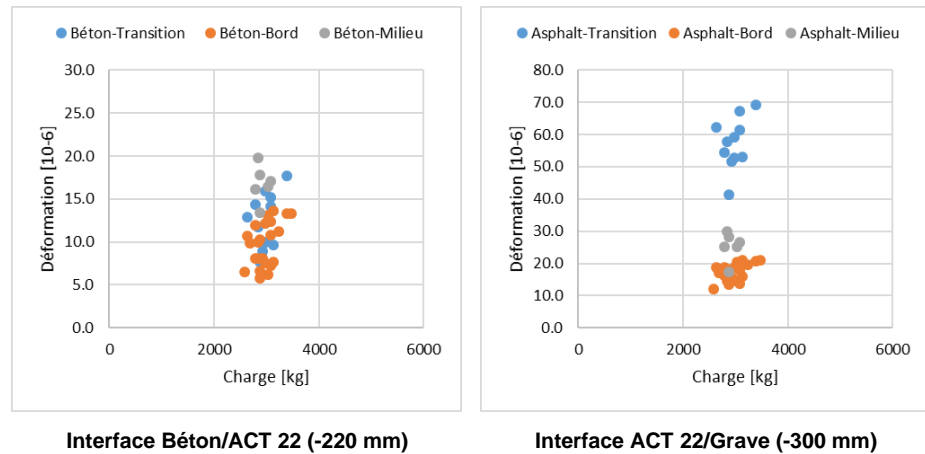


Fig. 42 Amplitudes maximales des déformations en fonction de la charge pour les roues simples

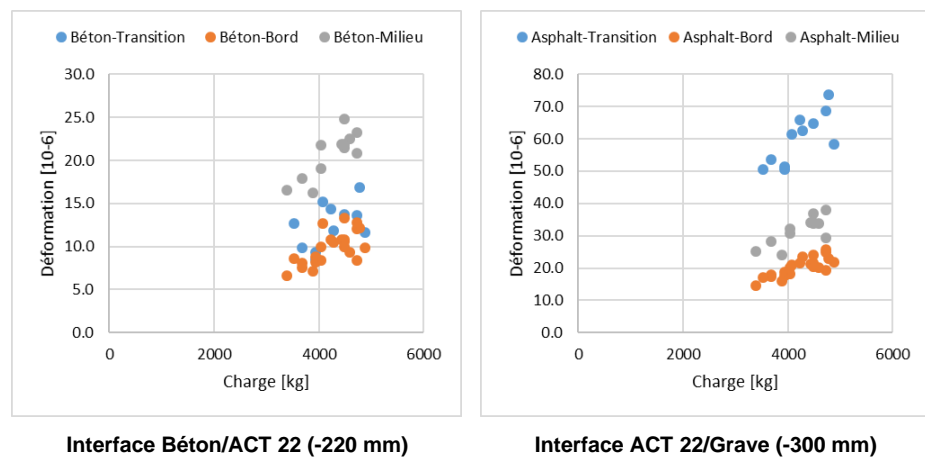


Fig. 43 Amplitudes maximales des déformations en fonction de la charge pour les roues jumelées

Les déformations maximales sont des déformations de traction (valeurs positives) observées sous la couche bitumineuse de la dalle de transition avec des amplitudes comprises entre 50 et 75 10^{-6} . Les déformations mesurées au bord et au milieu de la dalle en BAC sont nettement plus faibles avec des amplitudes comprises entre 12 et 40 10^{-6} . L'amplitude de déformation, plus élevée sous la dalle de transition, s'explique par son épaisseur et sa rigidité moins importantes que la zone en BAC.

La déformation mesurée au milieu de la dalle, normalisée à la charge d'essieu de 13 tonne est de 32.5 10^{-6} . Cette valeur est très proche de la déformation théorique calculée pour la structure soit 34.6 10^{-6} . Le résultat correspond à la structure modélisée avec un collage parfait entre la dalle béton et la couche bitumineuse, et cette configuration semble être confirmée par la mesure.

Les déformations de traction dans le béton sont maximales toujours au niveau de la dalle en BAC avec une amplitude de 25 10^{-6} à 10t, ce qui correspond à des contraintes de traction 0.75 MPa à la même charge. Cette valeur est très faible par rapport aux valeurs admissibles typiques aux alentours de 1.8 MPa (correspondant à 10'000'000 ESAL 13t). La fatigue mécanique de la dalle béton, dans la mesure où le collage est durable, est négligeable, ce qui suggérerait une durée de vie très élevée.

La traction mesurée dans le dalle de transition est de 0.45 MPa à 10t.

4.3.4 Mesure de la portance avec le HWD

La portance de la structure de chaussée à Zurich a été évaluée à l'aide de l'appareil HWD le 31 mai 2016 vers 2h du matin. La température dans la structure, de 17°C à la surface, est très stable pendant toute l'intervention.

La mesure a été réalisée sur l'ensemble de la structure, y compris les dalles de transition et le transfert de charge entre celles-ci et la dalle en BAC. Les mesures réalisées au centre de la voie sont répétées pour les mêmes positions longitudinales sur la trace de la roue gauche.

La structure de chaussée modélisée pour le calcul inverse comprend les couches suivantes :

- Béton armé continu + PMA : 220 mm
- ACT 22 : 80 mm
- Grave + Sol : épaisseur infinie

Les déflexions maximales, illustrées dans la figure 44, amènent les observations suivantes :

- Les valeurs mesurées sont plutôt faibles et confirment la rigidité élevée de la structure ;
- Les déflexions sont un peu plus élevées au niveau des joints entre les dalles de transition et la dalle en BAC ;
- Le bord de la dalle de transition amont montre une rigidité plus élevée que le bord de dalle de transition aval ;
- Les déflexions de part et d'autre des joints est équivalente, ce qui indique que ce détail constructif assure son rôle de continuité et de transfert de la charge ;
- La rigidité sur la trace de roue gauche, plus proche du bord, est comme attendu plus faible que celle obtenue au centre de la voie avec un facteur 1.5 à 2.

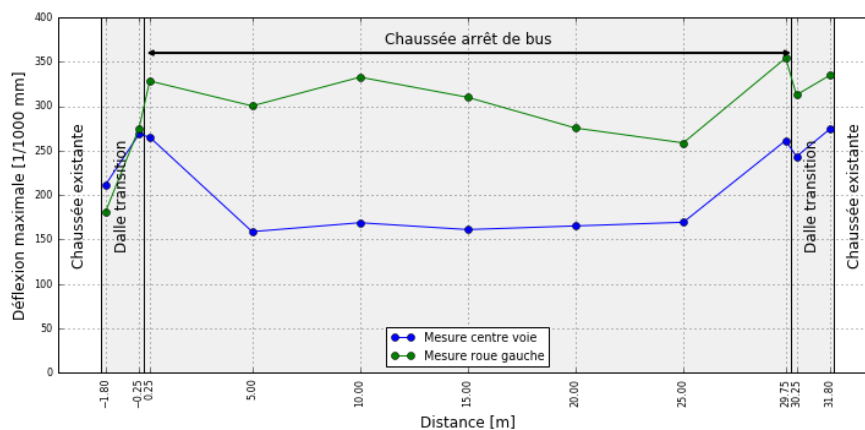


Fig. 44 Déflexions maximales sur l'arrêt de bus de Zurich

Les modules élastiques des principales couches structurales de la chaussée sont déterminés par calcul inverse au niveau de la dalle en BAC. La couche de roulement, en raison de son épaisseur faible et sa position, est regroupée dans la modélisation avec la dalle béton. Un regroupement est également réalisé entre la fondation en grave et le sol en raison de l'absence d'informations sur l'historique et la composition de ces matériaux.

Les modules de rigidité des couches regroupées sont donnés dans la figure 45.

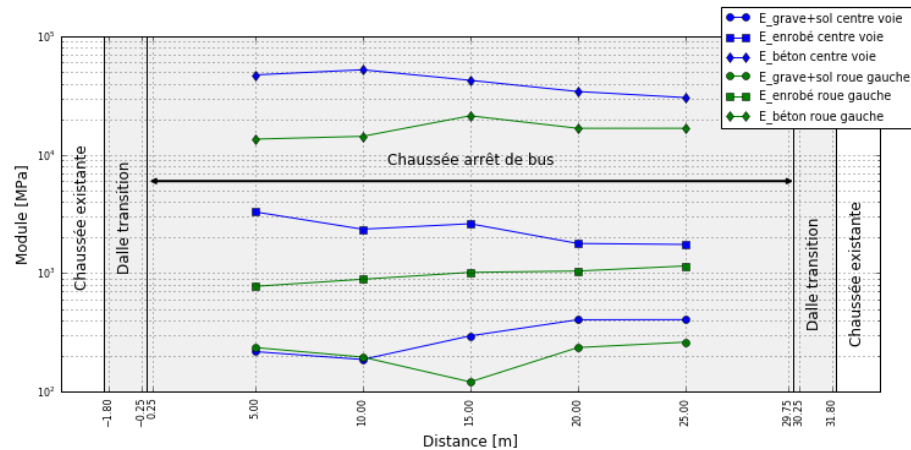


Fig. 45 Modules de rigidité sur l'arrêt de bus de Zurich

Nous précisons ici que la procédure de calcul inverse est réalisée à la limite des hypothèses retenues. La structure est en effet discontinue longitudinalement et transversalement. Les valeurs de modules élastiques les plus représentatives sont ainsi celles obtenues au centre de la voie, car la structure auscultée présente la configuration la plus continue et la moins sensible aux effets de bord.

La fondation (grave + sol) sous la dalle en BAC démontre des valeurs comprises entre 100 et 400 MPa et généralement supérieure à 200 MPa au centre de la voie. La valeur moyenne autour de 200 MPa peut être qualifiée de suffisante. Ces valeurs moyennes peuvent être expliquées par la contribution mécanique de la dalle béton qui répartit et réduit la contrainte sur la fondation, ce qui donne des modules d'élasticité apparents relativement bas car dépendant en réalité du niveau de contrainte appliqué. Nous rappelons que les essais de plaque ont donné des valeurs de portance élevées avec des valeurs M_{E1} de 114 et 158 MN/m².

Le même phénomène explique la rigidité relativement faible de la couche bitumineuse, à savoir que la dalle béton concentre les contraintes et « protège » mécaniquement les couches en dessous. Nous constatons au centre de la voie que :

- la dalle béton présente des modules de rigidité très élevés compris entre 30'000 et 50'000 MPa ;
- la couche bitumineuse présente des modules de rigidité moyens compris entre 1'800 et 3'300 MPa à 25°C.

Une modélisation de la chaussée avec considération des discontinuités et des propriétés non-linéaires des matériaux aurait induit une répartition différente des modules élastiques entre les deux couches liées. Ce genre d'analyse (par éléments finis) nécessite un investissement conséquent en temps et en ressources qui n'entre pas dans le cadre de la recherche actuelle.

Les résultats de portance HWD combinés avec ceux des capteurs de déformations indiquent que la structure présente un fonctionnement mécanique très satisfaisant et conforme aux analyses théoriques.

5 Monitoring de l'état des structures expérimentales

Le suivi de l'état des structures expérimentales a pour objectif de relever et documenter l'état en surface des chaussées et toute dégradation pouvant apparaître au jeune âge et pendant le déroulement du projet.

5.1 Chaussée bitumineuse – Ville de la Chaux-de-Fonds

La chaussée de la place de la Gare à la Chaux-de-Fonds, entièrement bitumineuse, a vu la formation dès la fin de l'été 2015 d'ornières sur les quais les plus chargés. La profondeur d'ornière après 3 années de service est de 15 mm.

Ce genre de dégradation était prévisible à court terme, notamment en raison du type d'enrobé retenu (type N) et ce malgré le recours à un liant PmB.

En dehors de l'orniérage, les surfaces de la chaussée à la Chaux-de-Fonds ne présentent pas d'autres dégradations.

5.2 Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne

La chaussée en BFUP de la ville de Lausanne présente un comportement remarquable au cours de la période de suivi (2015 à 2018).

Après deux années, le joint bitumineux entre la dalle BFUP et l'ancienne chaussée ayant commencé à s'ouvrir a été réparé. Ce genre de dégradations est assez courant aux niveaux de l'interface entre l'ancienne chaussée et une nouvelle chaussée plus rigide et épaisse. Le coefficient de dilatation thermique différent entre le BFUP et l'enrobé bitumineux contribue à accentuer ce phénomène.

La réparation des joints bitumineux fait partie de l'entretien courant de ce genre de structures avec un coût qui demeure raisonnable.

La surface de l'arrêt de bus présente toujours une texture et une adhérence très satisfaisants. L'enclassement des gravillons dans la matrice en résine est durable, à l'exception d'une surface limitée correspondant à une zone de freinage sur la trace de roue gauche. Nous constatons sur cette zone, soumise à des efforts de cisaillement très élevés (freinage des bus sur une pente de 4.5%), une perte de gravillons et des traces de rouille, ce qui suggère une usure du film de résine qui expose les fibres métalliques du BFUP à la corrosion.

La réparation des zones ponctuelles d'arrachements peut être envisagée par exemple avec un gravillonnage selon le même procédé utilisé lors de la construction après un ponçage de la zone arrachée.

En janvier 2019, la dalle BFUP s'est décollée de son support bitumineux aux extrémités de l'arrêt de bus après 3.5 années de service. Le passage des bus provoque un mouvement de battement qui annonce vraisemblablement l'aggravation du décollement et un endommagement par fissuration de la dalle BFUP. La démolition de la dalle BFUP et son remplacement par un enrobé pour couche de roulement est envisagée au cours de l'été 2019.

La qualité du collage entre le BFUP et son support bitumineux s'est avérée, malgré les précautions prises (micro-fraisage de la surface de l'AC EME C1), insuffisante pour garantir l'intégrité de la structure. La délamination entre le BFUP et l'enrobé bitumineux, qui était la dégradation redoutée pour ce type de structure, a fini par apparaître. Nous émettons l'hypothèse que cette délamination est probablement liée à la dilatation thermique différenciée entre le BFUP et la couche bitumineuse sous-jacente. L'épaisseur relativement réduite du BFUP accentue sa susceptibilité au phénomène de fléchissement

(vers le haut), également désigné chez les anglosaxons par le terme « Curling ». Le curling est généré par des gradients thermiques importants à la surface de la chaussée. Les cycles de températures combinés aux charges de trafic importantes engendrent progressivement le décollement à l'interface.

La construction d'une dalle en BFUP plus épaisse permet de réduire le phénomène de curling, néanmoins, actuellement cette option n'est a priori pas viable économiquement en raison du coût du matériau BFUP.



Fig. 46 Dégradations observées en mars 2018 sur l'arrêt de bus à Lausanne : a) ouverture du joint. b) perte de gravillon ponctuelle.

5.3 Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich

La couche de roulement de l'arrêt de Zurich présente un aspect satisfaisant entre 2015 et 2017 à l'exception d'une déformation de poussée (déformation horizontale de la surface du revêtement) ponctuelle dans la zone d'arrêt de la roue avant-droite.

Cette dégradation, visible initialement sur le marquage au sol, a été observée pour la première fois en juin 2017, soit 18 mois après la construction. En mars 2018, la dégradation s'est aggravée avec l'apparition de fissures qui annoncent la formation d'un nid-de-poule. L'initiation de ce même type de dégradation est observée également dans la zone d'arrêt de la roue arrière-droite et avec moins de gravité sur l'ensemble de la trace droite. La zone de déformation repérée en 2017 a évolué en nid-de-poule en mai 2018.

Mis à part la déformation de poussée, la chaussée de Zurich ne présente pas de dégradations structurales ni d'orniérage important dans les traces de roues (orniérage inférieur à 5 mm). Les différents joints sont dans un état excellent.



Fig. 47 Dégradations observées sur l'arrêt de bus à Zurich : a) initiation de la déformation de poussée (juin 2017), et b) aggravation de la déformation de poussée et apparition de fissures (mars 2018).

La déformation de poussée est souvent liée à un défaut de collage entre la couche de roulement et son support. Le choix par la ville de Zurich de la couche de roulement en PMA 8 était justifié par son potentiel pour une réduction de bruit et par l'aptitude reconnue des matériaux de la famille asphaltes coulés à garantir un bon collage avec la couche inférieure. Le collage, visiblement insuffisant, aurait pu être amélioré par l'application d'un primer et d'une couche d'encollage adaptée. Des résultats pertinents peuvent être consultés dans [15].

Une solution potentielle ayant fait ses preuves sur des chaussées en BAC consiste à appliquer un enduit superficiel, suivi de la pose d'une couche de roulement type AC MR 8. L'enduit superficiel assure dans ce cas un bon encollage avec le support en béton et représente un bon support pour la pose de la couche de roulement.

Ce point reste toujours en suspens et mérite des études et tests dans le futur afin de déterminer la solution de recouvrement optimale.

6 Analyse du comportement mécanique des structures expérimentales par simulations numériques

6.1 Introduction

La dégradation en surface des arrêts de bus se manifeste principalement au travers de l'orniérage et de la fissuration.

Dans les structures composites, le béton de ciment est utilisé conjointement avec l'enrobé bitumineux pour prévenir le risque de déformation permanente grâce à sa rigidité élevée. Cette caractéristique engendre généralement un risque plus élevé de formation et de propagation des fissures, qui peuvent être classées en deux catégories :

- Fissures initiées au bas de la structure et qui se propagent vers le haut ;
- Fissures initiées à la surface de la structure et qui se propagent vers le bas.

Différentes recherches proposent des modèles d'endommagement basés sur les contraintes ou les déformations agissantes dans le matériau. Les bétons de ciment et les enrobés bitumineux, à l'instar d'autres matériaux de construction, sont performants lorsqu'ils sont sollicités en compression, mais le sont nettement moins vis-à-vis des efforts de traction. Ainsi, les amplitudes des efforts de traction (contraintes ou déformations) dans les structures routières sont l'indicateur principal pour l'évaluation des risques potentiels de fissuration.

L'une des principales cause d'initiation de la dégradation des structures composites est le décollement entre le béton et la couche d'asphalte [16]. Ce phénomène peut avoir des origines différentes telles que l'initiation et la propagation horizontale des fissures au voisinage du joint transversal, ou des contraintes de cisaillement excessives entre les deux couches. L'insuffisance ou l'absence de liaison entre les couches perturberait la continuité du champ contrainte-déformation dans la structure et pourrait conduire à des contraintes et déformations de traction élevées dans la couche superficielle de la structure.

Dans ce chapitre, deux structures d'arrêt de bus qui ont été construites à Lausanne et Zurich sont analysées sous un passage de charge. De plus, l'effet de décollement et de détérioration du matériau a été analysé à l'aide d'une analyse par éléments finis en trois dimensions. La structure de la ville de La Chaux-de-Fonds ne présente pas de discontinuités constructives ou de matériaux majeures qui justifie sa modélisation par une approche éléments finis.

6.2 Hypothèses de calcul

Les modélisations par éléments finis sont conduites en introduisant progressivement de la complexité dans le modèle. Les principales hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Comportement linéaire, élastique et homogène des matériaux ;
- Charge appliquée verticale avec une intensité de 5'000 kg et une pression de 700 kPa ;
- Modélisation du sol avec une profondeur de 2 m, déterminée par une analyse préliminaire sur l'effet de la profondeur du modèle sur l'état de contrainte et déformation dans les couches proches de la surface.

La modélisation s'est limitée à des propriétés élastiques et linéaires des matériaux de la chaussée. L'évaluation des effets de la viscoélasticité ou de la plasticité sont jugés moins déterminants dans le cas présent que la considération des discontinuités, notamment des comportements non-linéaires au niveau des différentes interfaces.

Les épaisseurs des couches des structures modélisées sont données dans le tableau 6 pour la chaussée à Lausanne, et les tableaux 7 et 8 pour la chaussée à Zurich. Les modélisations ayant été réalisées avant l'exécution des travaux à Lausanne, les épaisseurs modélisées diffèrent de celles exécutées. Cependant, la différence d'épaisseur, ne change pas fondamentalement le comportement et les phénomènes mécaniques dans la zone d'intérêt proche de la surface.

Tab. 6 Caractéristiques de la structure modélisée à Lausanne

Couche	Epaisseur [mm]	Module élastique [MPa]	Coefficient de Poisson
BFUP	40	45'000	0.25
AC EME type C1	120	11'000	0.35
AC T	80	8'000	0.35
Grave supérieure	225	360	0.35
Grave inférieure	225	150	0.35
Sol	2'000	50	0.35

Tab. 7 Caractéristiques de la structure modélisée à Zurich – Partie dalle de transition

Couche	Epaisseur [mm]	Module élastique [MPa]	Coefficient de Poisson
AC	40	8'000	0.35
AC B	65 à 90	8'000	0.35
AC T	80 à 170	8'000	0.35
Béton	90 à 180	30'000	0.25
Grave supérieure	225	360	0.35
Grave inférieure	225	150	0.35
Sol	2'000	50	0.35

Tab. 8 Caractéristiques de la structure modélisée à Zurich – Partie dalle en BAC

Couche	Epaisseur [mm]	Module élastique [MPa]	Coefficient de Poisson
AC	40	8'000	0.35
AC T	80	8'000	0.35
Béton	180	30'000	0.25
Grave supérieure	225	360	0.35
Grave inférieure	225	150	0.35
Sol	2'000	50	0.35

La liste et les caractéristiques des différents modèles par éléments finis construits et analysés dans le cadre du projet sont données dans le tableau 9. Les simulations réalisées sont codées dans ce qui suit par LS-xx pour la chaussée à Lausanne et ZH-xx pour la chaussée de Zurich.

Par convention, les modèles sont orientés selon le repère suivant :

- Axe X : Sens de circulation ;
- Axe Y : Direction transversale ;
- Axe Z : Direction verticale.

Tab. 9 Caractéristiques des modèles à éléments finis

Code	Description	Charge [kg]	Interface béton/enrobé	Condition bord transversal (plan YZ)	Condition bord longitudinal (plan XZ)
LS-01	Cas de référence		Collée		
LS-02	Cas de référence		Décollée		
LS-03	Epaisseur BFUP: 20mm		Collée		
LS-04	Epaisseur BFUP: 20mm		Décollée		
LS-05*	Epaisseur BFUP: 60mm		Collée		
LS-06	Epaisseur BFUP: 60mm		Décollée		
LS-07	Collage partiel		Collage partiel		
LS-08	Enrobé dégradé (E=2'000 MPa)	5'000	Collée	Frottement	Continuité
ZH-01	Cas de référence		Collée		
ZH-02			Décollée en bas du béton		
ZH-03	Géométrie altérée		Collée		
ZH-04	Géométrie altérée		Décollée		
ZH-05			Décollée en haut du béton		

* La convergence du calcul n'est pas atteinte avec ce modèle

La condition appliquée au bord longitudinal est une condition de continuité avec des translations libres dans les directions X et Z.

Plusieurs conditions de contact sont appliquées au bord transversal. Elles seront décrites en détail dans la suite du chapitre.

6.3 Chaussée avec couche de roulement en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) – Ville de Lausanne

6.3.1 Modèle

Le maillage du modèle éléments finis de la structure de Lausanne, illustré dans la figure 48, est constitué d'éléments quadratiques avec points d'intégration réduits (Code Abaqus : C3D20R).

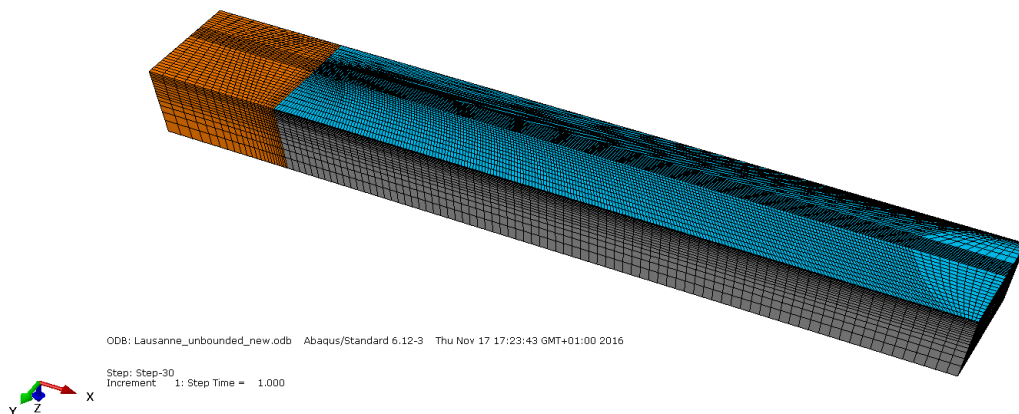


Fig. 48 Maillage du modèle éléments finis de la structure de Lausanne

La simulation est réalisée en mode quasi-statique avec un chargement mobile le long de l'axe X selon le schéma de la figure 49. Le calcul est réalisé pour 30 positions longitudinales de la charge, avec un pas de 30 cm et avec les trois premières positions appliquées sur l'ancienne chaussée.

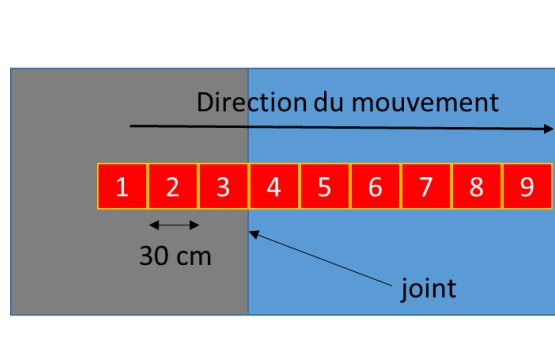


Fig. 49 Schéma de modélisation de l'empreinte de la charge mobile

6.3.2 Lois de contact

La liste et les paramètres des différentes lois de contact appliquées dans les modélisations de la structure de Lausanne sont donnés dans le tableau 10. L'utilisation des lois dans les différentes simulations est décrite dans le tableau 11.

La loi de frottement rugueux (« Rough » friction formulation) correspond à un coefficient de frottement infini imposé dans le contact entre deux parties du modèle séparées par une discontinuité (par exemple un joint transversal). Le frottement rugueux est similaire mécaniquement à un collage parfait entre les couches.

La loi de frottement par pénalité (« Penalty » friction formulation) se base sur une méthode autorisant un mouvement partiel de la surface de contact contrôlé avec la valeur d'un paramètre de pénalité donné.

Le contact dur concerne la problématique de l'interaction entre deux parties du modèle dans le sens normal. Pour ce type de contact, la partie saillante n'est pas autorisée à pénétrer dans la partie poinçonnée. Le maillage au voisinage du contact n'est ainsi pas modifié. La séparation entre les deux parties en contact est cependant autorisée pendant la simulation.

Tab. 10 Liste et paramètres de contact pour les simulations à Lausanne

Modèle	Comportement tangentiel		Comportement normal	
	Lois	Coef. frottement	Type de contact	Autoriser séparation
Contact-LS-01	Pénalité	0.05	Contact « Dur »	Oui
Contact-LS-02	Pénalité	0.05	Contact « Dur »	Non
Contact-LS-03	Frottement rugueux	-	Contact « Dur »	Non

Tab. 11 Lois de contact utilisées par simulation à Lausanne

Code simulation	Interfaces - Plan YZ		Interface - Plan XY
	BFUP + AC EME / AC T	Grave sup / Grave inf / Sol	BFUP / AC EME
LS-01	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-03
LS-02	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-02
LS-03	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-03
LS-04	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-02
LS-05	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-03
LS-06	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-02
LS-07	Contact-LS-01	Contact-LS-03	Contact-LS-02 / Contact-LS-03

6.3.3 Résultats

Par convention, les efforts de traction correspondent à des valeurs positives.

L'identification des points critiques parmi les 30 positions de la charge simulées et les différentes interfaces horizontales, est réalisée par une analyse de la valeur du critère de von Mises. Lorsque appliqué dans le domaine élastique, le critère de von Mises est considéré en mécanique comme un indicateur relatif utilisé pour prédire le lieu de rupture ou de la sollicitation la plus défavorable dans la structure analysée.

Les points critiques identifiés sont les suivants :

- bas de la couche ACT,
- bas de la couche BFUP,
- sommet de la structure (surface du BFUP).

Déformation horizontale au bas de la couche bitumineuse

Les sollicitations pour l'ensemble des simulations sont représentées dans la figure 50.

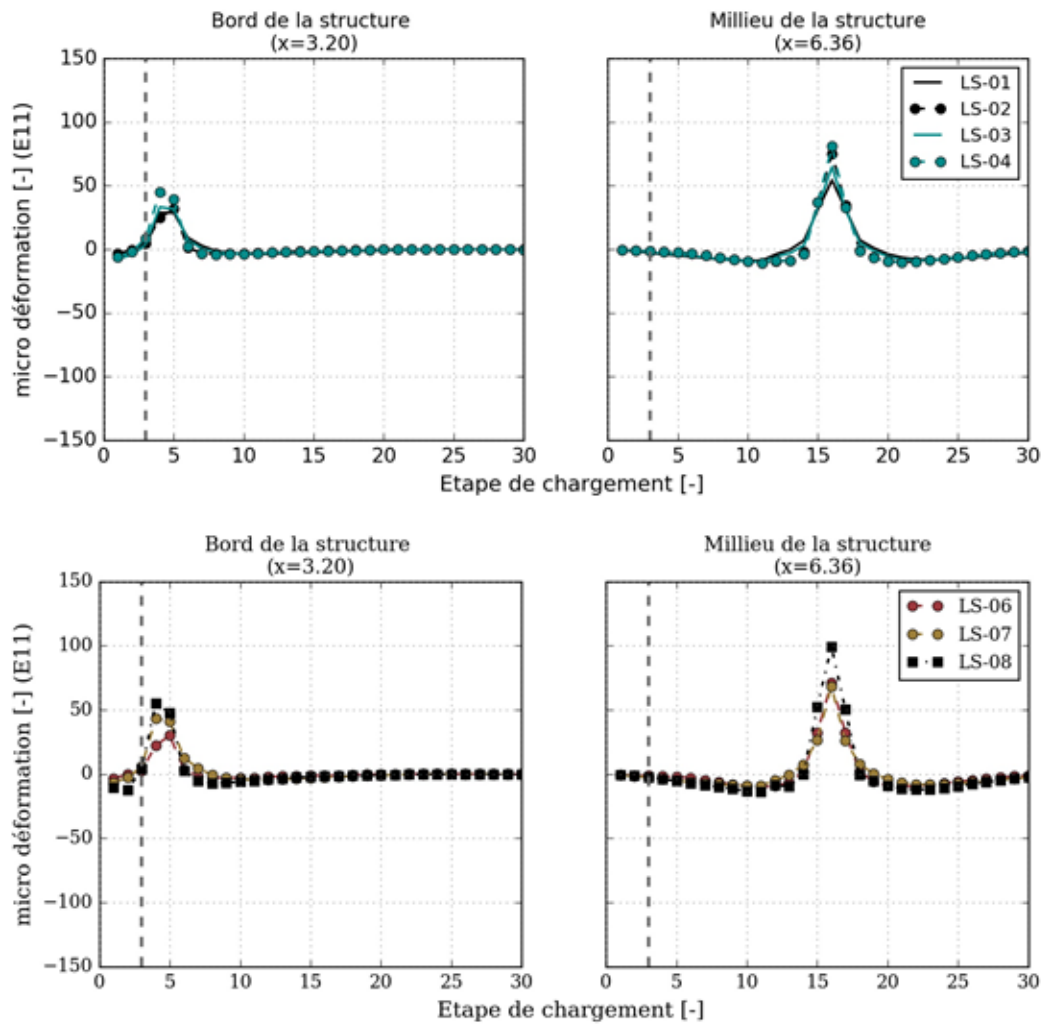


Fig. 50 Déformations horizontales au bas de la couche ACT à Lausanne

Les principales observations sont les suivantes :

- L'amplitude maximale est au milieu de la dalle ;
- Le décollement entre le BFUP et l'enrobé engendre une augmentation de 60% de la sollicitation maximale ;
- La variation de l'épaisseur du BFUP (+/- 20 mm) a un effet plus modéré sur la sollicitation maximale ;
- L'amplitude de sollicitation la plus élevée correspond à la simulation avec des propriétés dégradées de la couche bitumineuse ;
- Les amplitudes déterminées au milieu de la dalle sont équivalentes entre les calculs éléments finis et multilayer (calcul de dimensionnement).

Contrainte horizontale au bas de la couche BFUP

Les sollicitations pour l'ensemble des simulations sont représentées dans la figure 51.

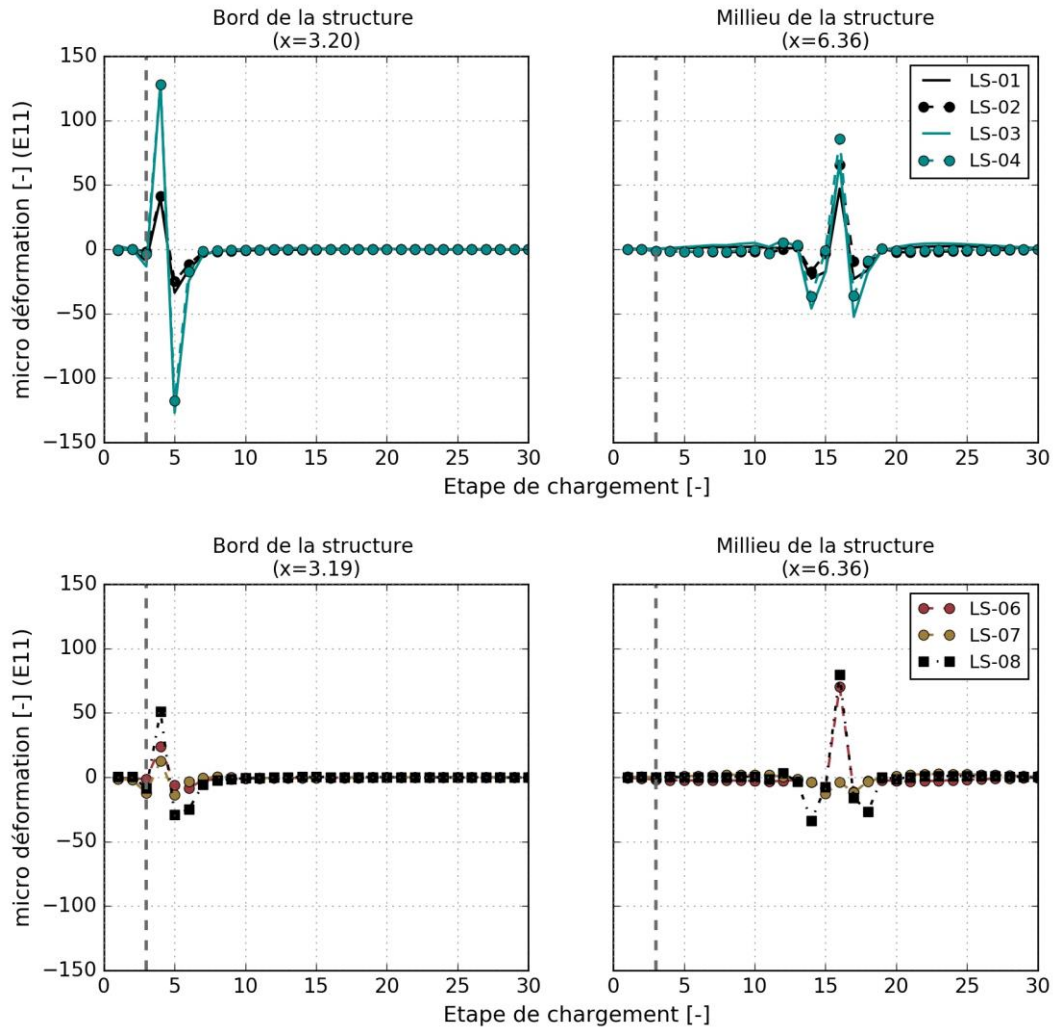


Fig. 51 Déformation horizontale au bas de la couche BFUP à Lausanne

Les principales observations sont les suivantes :

- L'amplitude maximale est au bord de la dalle ;
- Le décollement entre le BFUP et l'enrobé ne modifie pas la valeur de la sollicitation maximale ;
- La diminution de l'épaisseur du BFUP a un effet très significatif sur la sollicitation maximale. Lorsque l'épaisseur du BFUP passe de 40 à 20 mm, la sollicitation (contrainte ou déformation) augmente de 250%.

Pour une épaisseur de BFUP de 40 mm (structure de référence), la sollicitation maximale en traction au bord est une déformation de $50 \cdot 10^{-6}$, correspondant à une contrainte de 2.25 MPa. Rapportée à la résistance élastique en traction typique de 7 MPa, le matériau est sollicité avec une valeur caractéristique S de 32%.

La détermination des lois de fatigue S-N pour le matériau BFUP est une démarche récente du MCS (laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages) de l'EPFL [17]. Nous pouvons cependant se baser sur les premiers résultats obtenus qui, pour un ratio de contrainte de l'ordre de 32%, prédisent un nombre de cycles supérieur à 100 millions, soit un domaine de sollicitation qui n'est pas exploré expérimentalement à

l'heure actuelle. La limite de résilience est identifiée provisoirement par les travaux du MCS à des valeurs de S de l'ordre de 70%.

En suivant la même démarche pour la structure avec une épaisseur de BFUP de 20 mm, la sollicitation maximale est une déformation de $128 \cdot 10^{-6}$, correspondant à une contrainte de 5.76 MPa. Rapportée à la résistance élastique en traction typique de 7 MPa, le matériau est sollicité avec une valeur caractéristique S de 82%.

En se basant sur la courbe S-N déterminée par le MCS, on peut prédire que la couche BFUP avec une épaisseur de 20 mm atteindra sa durée de vie en fatigue au bout de 10^6 cycles, ce qui représente une valeur très faible correspondant à une durée de service de 2 années à Lausanne.

Ce résultat démontre l'importance de maîtriser l'épaisseur minimale du BFUP en tout point de la structure de chaussée compte tenu des risques critiques sur la durabilité d'une épaisseur insuffisante.

Contraintes horizontales au sommet de la couche BFUP

Les sollicitations au sommet du BFUP sont identiques à celles observées au bas de cette couche avec une inversion de signe. Les sollicitations maximales sont toujours observées au bord de la dalle et les observations faites dans la sections précédente s'appliquent de la même manière au sommet de la couche en BFUP.

6.4 Chaussée en Béton Armé Continu (BAC) sur ACT 22 – Ville de Zurich

6.4.1 Modèle

Le modèle de la structure de Zurich se compose de 3 parties en contact les unes avec les autres par leur limites transversales (plan YZ) :

- La chaussée bitumineuse existante ;
- La dalle de transition ;
- La structure composite centrale (dalle BAC).

Le maillage du modèle éléments finis de la structure de Zurich, illustré dans la figure 52, est constitué d'éléments quadratiques avec points d'intégration réduits (Code Abaqus : C3D20R).

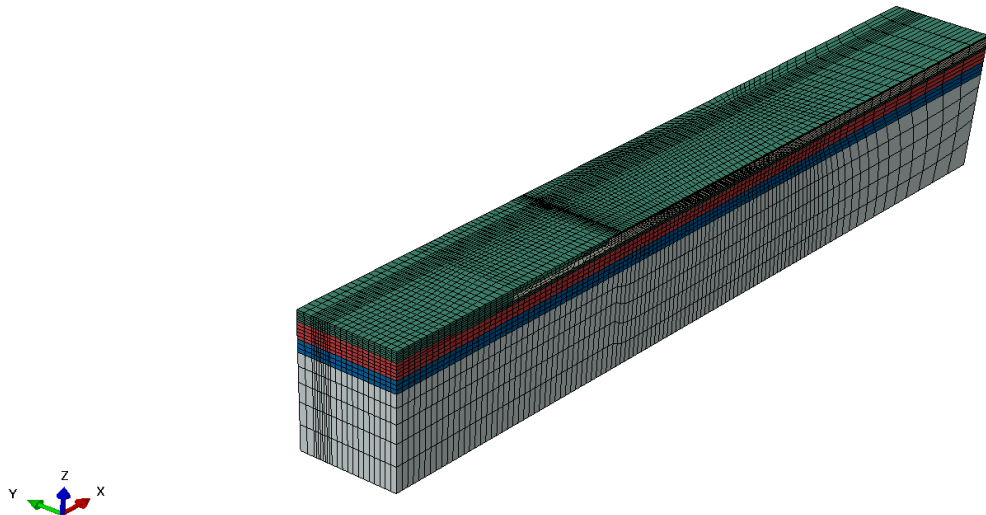


Fig. 52 Maillage du modèle éléments finis de la structure de Zurich

6.4.2 Lois de contact

La liste et les paramètres des différentes lois de contact appliquées dans les modélisations de la structure de Zurich sont donnés dans le tableau 12. L'utilisation des lois dans les différentes simulations est décrite dans le tableau 13.

Le contact avec rigidité finie (valeur de 30 GPa retenue pour les simulation) autorise la pénétration des parties saillantes du modèle et une adaptation en conséquence du maillage de la partie pénétrée. Ce type de contact autorise la séparation entre les deux partie pendant la simulation.

Tab. 12 Liste et paramètres de contact pour les simulations à Zurich

Modèle	Comportement tangentiel		Comportement normal	
	Lois	Coef. frottement	Type de contact	Autoriser séparation
Contact-ZH-01	Glissant	-	Contact « Dur »	Oui
Contact-ZH-02	Pénalité	0.05	Contact « Dur »	Non
Contact-ZH-03	Frottement rugueux	-	Contact « Dur »	Non
Contact-ZH-04	Frottement rugueux	-	Contact avec rigidité = 30 GPa	Oui

Tab. 13 Lois de contact utilisées par simulation à Zurich

Code simulation	Plan YZ			Plan XY (horizontal)	
	AC / ACB / AC T	Béton	Grave sup / Grave inf / Sol	AC / Béton	Béton / ACT
ZH-01	Contact-ZH-01	Contact-ZH-04	Contact-ZH-03	Contact-ZH-03	Contact-LS-03
ZH-02	Contact-ZH-01	Contact-ZH-04	Contact-ZH-03	Contact-ZH-03	Contact-LS-02
ZH-03	Contact-ZH-01	Contact-ZH-04	Contact-ZH-03	Contact-ZH-03	Contact-LS-03
ZH-04	Contact-ZH-01	Contact-ZH-04	Contact-ZH-03	Contact-ZH-03	Contact-LS-02
ZH-05	Contact-ZH-01	Contact-ZH-04	Contact-ZH-03	Contact-ZH-02	Contact-LS-03

6.4.3 Résultats

Par convention, les efforts de traction correspondent à des valeurs positives.

L'identification des points critiques parmi les 20 positions de la charge simulées et les différentes interfaces horizontales, est réalisée par une analyse de la valeur du critère de von Mises.

Les interfaces horizontales critiques identifiées correspondent aux niveaux suivants :

- bas de la couche AC T,
- bas de la dalle béton,
- sommet de la dalle béton,
- sommet de la structure (surface du PMA).

Les zones critiques sont identifiées longitudinalement au profils suivants :

- 0.1 m du joint transversal du côté de la dalle de transition,
- 0.1 m du joint transversal du côté de la dalle en BAC,
- à partir de 2.5 m du joint transversal (milieu de la structure).

Déformation horizontale au bas de la couche bitumineuse

Les sollicitations pour l'ensemble des simulations sont représentées dans la figure 53.

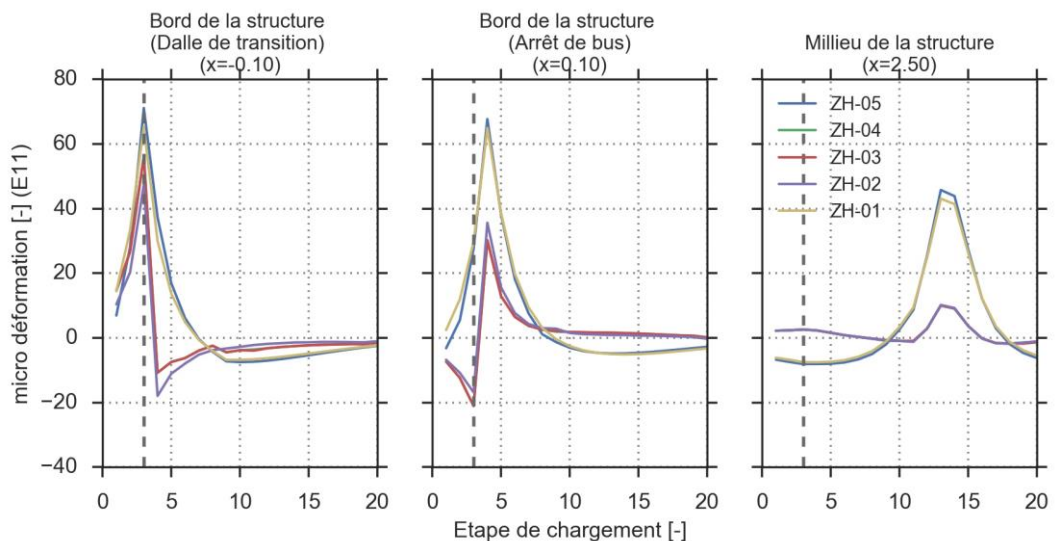


Fig. 53 Déformations horizontales au bas de la couche ACT à Zurich

Les principales observations sont les suivantes :

- L'amplitude maximale de traction est localisée de part et d'autre du joint transversal entre la dalle de transition et la dalle en BAC ;
- Le décollement entre le béton et la couche en ACT engendre une diminution de la sollicitation maximale ;
- Les amplitudes déterminées au bord de la dalle au niveau de la dalle de transition sont équivalentes entre les mesures et les calculs éléments finis ;
- Les amplitudes déterminées au milieu de la dalle sont équivalentes entre les mesures, les calculs éléments finis et les calculs multilayer (voir chapitre dimensionnement).

Contrainte horizontale au bas de la couche en béton

Les sollicitations pour l'ensemble des simulations sont représentées dans la figure 54.

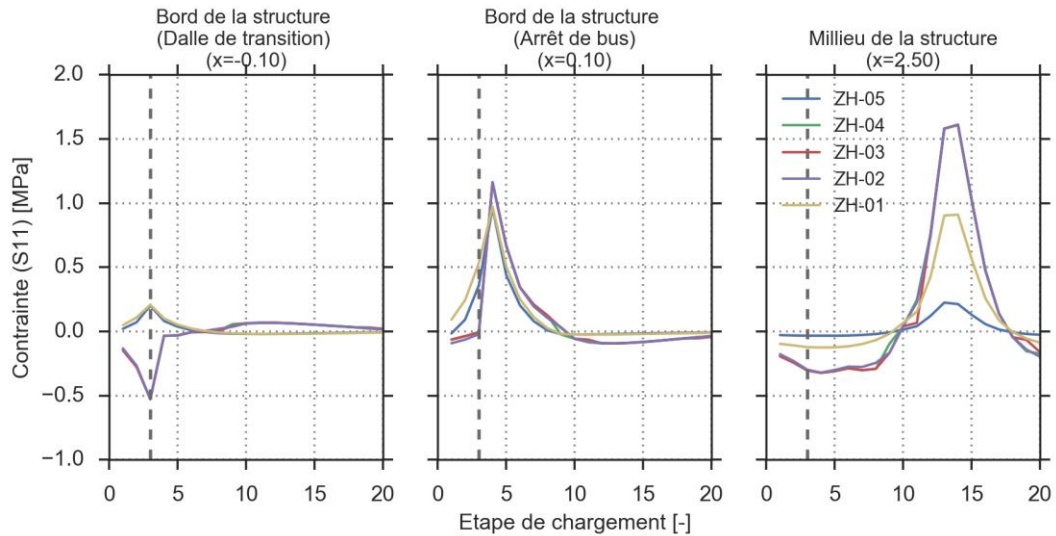


Fig. 54 Contraintes horizontales au bas de la couche en béton à Zurich

Les principales observations sont les suivantes :

- L'amplitude maximale est au bord de la dalle en BAC avec des valeurs comprises entre 1.0 et 1.2 MPa ;
- Le décollement entre le béton et l'ACT est la seule situation où la sollicitation maximale est observée au milieu de la dalle avec des amplitudes calculées de 1.6 MPa, contre 0.9 MPa avant décollement.

Les mesures avaient montré que les contraintes de traction maximales ont été observées au niveau de la dalle en BAC avec une valeur de 0.75 MPa pour une charge à 10t. Cette sollicitation est inférieure à celles déterminées par calcul par éléments finis (1.00 à 1.20 MPa) pour la même charge.

La traction mesurée au bord de la dalle de transition est de 0.42 MPa pour une charge de 10t. Cette valeur est très faible par rapport à la valeur calculée par éléments finis (0.9 MPa).

Déformation horizontale au sommet de la couche de roulement

Les sollicitations pour l'ensemble des simulations sont représentées dans la figure 55.

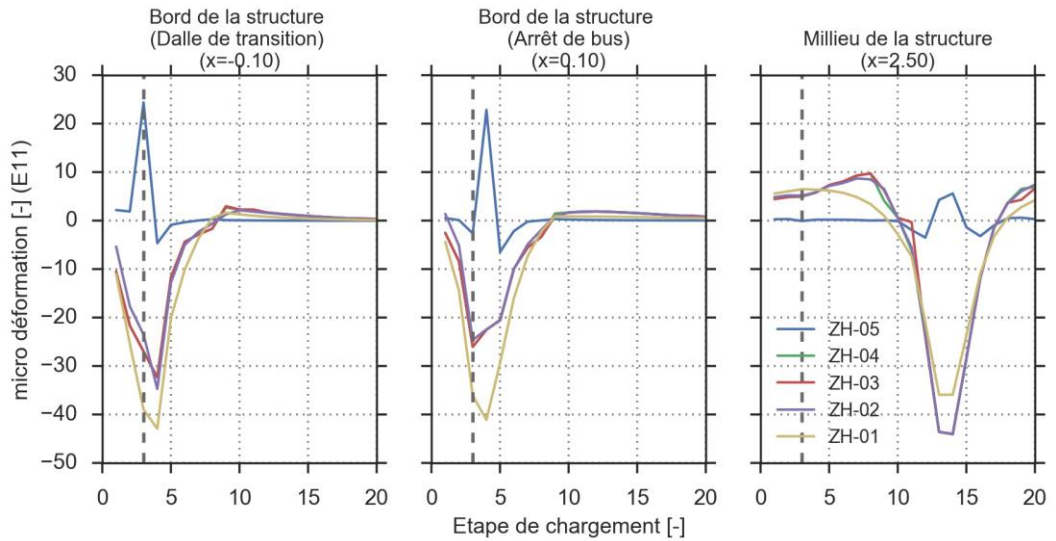


Fig. 55 Déformation horizontale au sommet de la couche de roulement à Zurich

Le sommet de la couche de roulement est sollicité généralement en compression tant que la couche de roulement demeure collée avec la couche en béton. Le décollement engendre des pics de traction mais dont l'amplitude reste assez faible ($25 \cdot 10^{-6}$). Cependant ces pics de traction, combinés avec les sollicitations générées par les efforts de cisaillement (freinage des bus) peuvent engendrer des déformations en traction importantes au niveau de la couche de roulement en PMA 8. Les efforts de cisaillement n'ayant pas été considérés dans les simulations réalisées, il n'est pas possible de donner des valeurs numériques pour l'effet combiné du décollement et du cisaillement.

7 Conception des chaussées

Le présent chapitre rassemble les recommandations proposées au planificateur lors des différentes étapes de conception et de dimensionnement des chaussées pour arrêt et voies de bus.

Les recommandations concernent notamment la détermination de la charge de trafic, le choix de la famille de structure, le choix de la couche de roulement, et finalement la conception de la zone de transition.

7.1 Trafic

7.1.1 Rappel des recommandations de la norme actuelle (SN 640 320)

La considération du trafic pour la conception et le dimensionnement des chaussées pour arrêts et voies de bus est définie actuellement selon la norme SN 640 320.

Dans le cas spécifique de voies et arrêts de bus, la norme SN 640 320 préconise de déterminer le trafic pondéral équivalent selon la procédure dite « de base » décrite au chiffre 19. La procédure de base considère, pour le calcul du trafic pondéral équivalent, la charge de chaque essieu et sa conversion en essieux standards de 8t (ESAL) à l'aide du tableau 2 de la norme tiré du guide de dimensionnement AASHTO.

L'estimation du trafic pondéral équivalent basée sur la répartition du trafic en classes de véhicules lourds (chiffre 20), n'est pas recommandée pour les voies et arrêts de bus, car les facteurs d'équivalence proposés sont des valeurs moyennes non représentatives de l'agressivité réelle des bus sur la chaussée avec des conditions de chargement locales. Les facteurs d'équivalence peuvent varier, selon les véhicules utilisés et leur taux d'occupation par un ratio allant jusqu'à 3 entre les valeurs extrêmes.

7.1.2 Procédure de calcul proposée selon les caractéristiques de la flotte de bus

Facteurs d'équivalences

L'agressivité des essieux des véhicules n'est pas linéaire par rapport à la charge. La loi de puissance $\alpha=4$ est généralement admise par les spécialistes en dimensionnement et est notamment à l'origine du tableau 2 de la norme SN 640 320. Le facteur d'équivalence issu du tableau peut être calculé avec la formule suivante :

$$k_i = \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha$$

Avec :

P_i : Charge de l'essieu i .

P_{ref} : Charge de l'essieu standard équivalent = 8.16t en Suisse.

α : Puissance dépendant du type de structure, généralement égale à 4.

La valeur du paramètre α dépend de la rigidité de la structure. Les régressions faites sur les facteurs donnés dans le tableau 2 de la SN 640 320 aboutissent à une valeur de 3.86 pour les chaussées souples et semi-rigides, et une valeur de 4.30 pour les chaussées rigides et composites.

Des formules plus récentes (formule d'Eisenmann) recommandent des valeurs similaires pour les chaussées souples et semi-rigides, mais proposent des valeurs beaucoup plus élevées pour les chaussées rigides autour de 12.

Une valeur de puissance élevée a pour conséquence que le facteur d'équivalence atteint des valeurs très élevées lorsque la charge par essieu est nettement supérieure à la charge de référence de 8.16 t. Compte tenu de l'origine expérimentale des différentes formules, nous proposons de se baser par défaut sur les facteurs définis dans le tableau 2 de la SN 640 320. Une vérification du facteur d'équivalence par calcul structural est cependant recommandée pour les chaussées rigides.

La détermination des facteurs d'équivalence des véhicules doit considérer les paramètres déterminants suivants :

- Charges nominales des essieux par véhicules (charges à vide et charges maximales) documentées dans les permis de circulation ou les formulaire n°13.20.
- Occupation ou taux de remplissage des bus, donnée disponible auprès des compagnies de transports publics.

Concernant le taux de remplissage des bus, il est utile de distinguer deux bases de calcul :

- par rapport à la charge utile maximale ;
- par rapport à la norme d'occupation de l'espace.

La charge utile maximale est donnée dans les formulaire n°13.20 des véhicules. Elle correspond à peu près au nombre total de places (assises + debout) multiplié par un poids moyen du passager de 70 kg. La charge utile maximale correspond également à une occupation de 8 personnes au mètre carré.

La norme d'occupation de l'espace dans les véhicules de transport public permet au gestionnaire de dimensionner son offre par rapport à la demande. La norme prévoit une occupation acceptable de l'espace de l'ordre de 2 à 4 personnes au mètre carré. En admettant toujours le poids moyen du passager de 70 kg, il est possible de déterminer la charge utile à considérer.

La charge par essieu est interpolée linéairement entre la charge à vide et la charge maximale avec la valeur du taux d'occupation.

Le facteur d'équivalence pour un véhicule représentatif de la flotte est calculé en sommant les facteurs d'équivalence de chaque essieu :

$$k_j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha$$

$$P_i = \beta \cdot (P_{i,max} - P_{i,vide}) + P_{i,vide}$$

Avec :

n: nombre d'essieux du véhicule.

$P_{i,max}$: Charge maximale de l'essieu (i).

$P_{i,vide}$: Charge à vide de l'essieu (i).

β : Taux d'occupation du véhicule.

La non-linéarité de la formule précédente par rapport à la charge fait que les charges élevées contribuent plus à l'endommagement total que les charges faibles. Le calcul avec un taux d'occupation basé sur la fréquentation moyenne journalière aura tendance à sous-estimer le dommage moyen réel.

L'approche la plus satisfaisante est de décomposer la journée en périodes de fréquentation représentatives (périodes de pointe, périodes creuses, etc.), puis de calculer le facteur d'équivalence par période. Le facteur d'équivalence moyen sera la moyenne pondérée par la durée des périodes considérées.

A défaut de faire une analyse par période de fréquentation, nous recommandons de calculer le facteur d'équivalence avec une charge utile égale à 80% de la charge utile maximale.

Pondération des facteurs d'équivalence

L'endommagement de la chaussée pour les voies et arrêts de bus est plus important en raison de la canalisation du trafic et de la vitesse réduite au niveau de l'arrêt de bus.

Le trafic sur une surface d'arrêt de bus est systématiquement canalisé car les bus circulent au plus près de la bordure du quai, peu importe la largeur de voie disponible. En dehors des arrêts de bus, la position latérale du bus dans la voie dépend dans une certaine mesure de sa largeur.

Les facteurs d'équivalence calculés précédemment seront multipliés par les coefficients de majoration suivants :

- 2.0 pour les arrêts de bus ;
- 1.6 pour les voies de bus avec largeur ≤ 3 m ;
- 1.3 pour les voies de bus avec largeur > 3 m.

Variation du trafic dans le temps

La circulation des véhicules de transport public étant planifiée très en amont, la considération d'un taux d'accroissement annuel du trafic n'a pas de sens.

Le planificateur doit le cas échéant considérer des adaptations majeures dans les conditions d'exploitation comme par exemple :

- introduction de nouvelles lignes,
- augmentation significative des cadences,
- augmentation significative de la fréquentation,
- changements dans le parc de véhicules.

Lorsque la voie de bus est partagée avec le trafic individuel motorisé, la contribution de ce dernier sera ajoutée au trafic pondéral équivalent des bus. Le trafic pondéral du trafic individuel motorisé sera déterminé de manière classique selon la SN 640 320 avec considération cette fois d'un taux d'accroissement annuel représentatif issu des études de trafic.

7.2 Choix de la structure

Le choix du type de structure pour arrêts de bus dépend de paramètres fortement liés au contexte urbain auquel est destiné ce genre d'infrastructures. Le tableau 14 récapitule les avantages et inconvénients de chaque type de structure par rapport aux critères de choix jugés déterminants.

Tab. 14 Type de structures pour arrêts de bus avec évaluation des critères de choix déterminants

Type de structure	Trafic	Durée de vie	Coût de constr.	Délais de constr.	Réparation	Accès aux réseaux souterrains
Bitumineuse	T3, T4, T5	-	+	+	++	+
Rigide	T5, T6	+	-	-	-	-
Mixte	Très élevé	++	-	-	-	-

++ : très favorable / + : favorable / - : peu favorable

7.3 Choix de la couche de roulement

Selon le type de structure retenu, un choix défini de types de couche de roulement s'offre au planificateur. Le tableau 15 récapitule les couches de roulements avec une évaluation de leur performance par rapport à des critères jugés déterminants.

Tab. 15 Type de couches de roulement pour arrêts de bus avec évaluation des critères de choix déterminants

Couche de roulement	Type de structure	Trafic	Durée de vie	Orniérage	Bruit	Réparation
AC 8/ AC 11 type S, H	Bitumineuse	<T4	-	-	=	++
AC MR 8	Bitumineuse	<T4, T4, T5	-	=	+	+
Produit d'entreprise*	Bitumineuse	T4, T5	=	=, +	=	+
Enrobé percolé	Mixte	T4, T5	=	+	=	-
Whitetopping / BCMC	Mixte	T4, T5	=	++	-	-
AC MR 8	Rigide/Mixte	T5, T6, >T6	-	+	+	=
Béton	Rigide	T5, T6	+	++	-	-
Béton armé continu	Rigide	T6, >T6	++	++	-	-

++ : très favorable / + : favorable / = : moyen / - : peu favorable

* : La performance mécanique dépend du produit d'entreprise

7.4 Conception de la zone de transition

La zone de transition entre la chaussée de l'arrêt de bus et la voie adjacente est souvent sujette à des dégradations localisées liées principalement à la différence de rigidité entre les deux structures. La durabilité de la zone de transition peut être améliorée par toute mesure visant une variation progressive de la rigidité de la structure. Nous distinguons dans ce cas deux situations pour les travaux :

- Réfection simultanée de l'arrêt de bus et de la zone de transition
- Réfection de la surface de l'arrêt de bus uniquement

7.4.1 Réfection simultanée de l'arrêt de bus et de la zone de transition

La réfection de la zone de transition en même temps que l'arrêt de bus est la situation la plus favorable pour garantir la durabilité de la chaussée avec un minimum d'interventions ultérieures d'entretien courant.

La zone de transition sera d'une longueur minimale de 1 à 2 m permettant une mise en place et un compactage adéquats des matériaux granulaires et bitumineux dans cette zone.

La structure de l'arrêt de bus est en principe plus rigide et plus épaisse que la chaussée adjacente. La variation progressive de la rigidité est obtenue avec les mesures constructives proposées ci-dessous pour les chaussées rigides ou bitumineuses.

Dans le cas d'une chaussée d'arrêt de bus rigide, les étapes de construction sont les suivantes (Fig. 56) :

1. La couche de fondation en matériaux non liés et la couche bitumineuse la plus profonde seront posées lors de la même phase sur toute la longueur et la largeur de la zone de transition et la surface de l'arrêt de bus ;
2. Les couches bitumineuses restantes de la zone de transition à l'exception de la couche de roulement, seront posées avant la structure de l'arrêt de bus. Ces couches seront ensuite sciées au niveau du joint délimitant la surface de l'arrêt de bus ;
3. La dalle béton de l'arrêt de bus sera coulée au contact des joints sciés ;
4. La couche de roulement de la zone de transition sera posée après la réalisation de la dalle. Un joint bitumineux sera coulé dans une rainure fraisée dans la couche de roulement de la zone de transition ;
5. Dans le cas d'un recouvrement d'une dalle en béton par un revêtement bitumineux, la couche de roulement de l'arrêt de bus sera posée après la couche de roulement de la zone de transition. Un joint bitumineux pour couche de roulement (par exemple bandes préformées) sera mis en place.

Il est en outre fortement recommandé pour le planificateur de respecter les dispositions constructives relatives aux chaussées en béton disponibles dans [25] et [3].

Dans le cas d'une chaussée d'arrêt de bitumineuses, les étapes de construction sont les suivantes (Fig. 57) :

1. La couche de fondation en matériaux non liés et la couche bitumineuse la plus profonde seront posées lors de la même phase sur toute la longueur et la largeur de la zone de transition et la surface de l'arrêt de bus ;
- 2+3. Les couches de base bitumineuses sur et hors de la surface de l'arrêt sont posées. La couche d'enrobé la moins maniable sera idéalement posée et compactée en premier puis sciée aux limites de l'arrêt de bus. Un enduit d'encollage bitumineux est appliqué sur le joint de reprise ;
- 4+5. Les couches de liaison bitumineuses sur et hors de la surface de l'arrêt sont posées. La couche d'enrobé la moins maniable sera idéalement posée et compactée en premier puis sciée aux limites de l'arrêt de bus. Un enduit d'encollage bitumineux est appliqué sur le joint de reprise ;
- 6+7. La couche de roulement de l'arrêt de bus sera posée après la couche de roulement de la zone de transition. Un joint bitumineux pour couche de roulement (par exemple bandes préformées) sera mis en place.

En fonction des projets, le même matériau bitumineux peut être utilisé pour la zone de l'arrêt de bus et la zone de transition pour les couches de base, de liaison ou de roulement.

La couche de roulement unique reposant sur des couches de liaison de rigidité différentes sera idéalement sciée au droit de la discontinuité et la rainure obturée avec un joint bitumineux coulé à chaud.

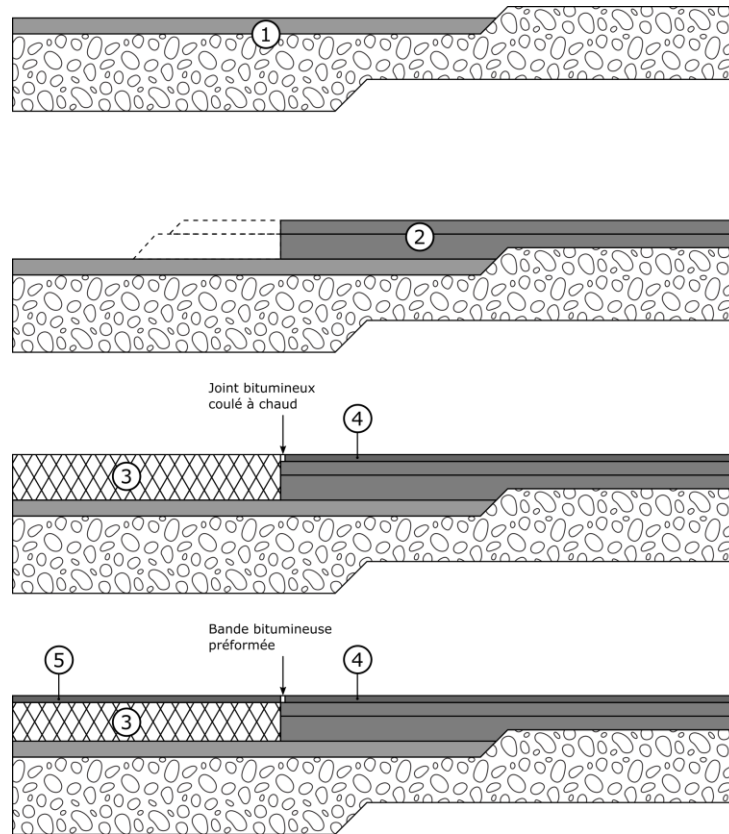


Fig. 56 Zone de transition recommandée pour une chaussée d'arrêt de bus rigide

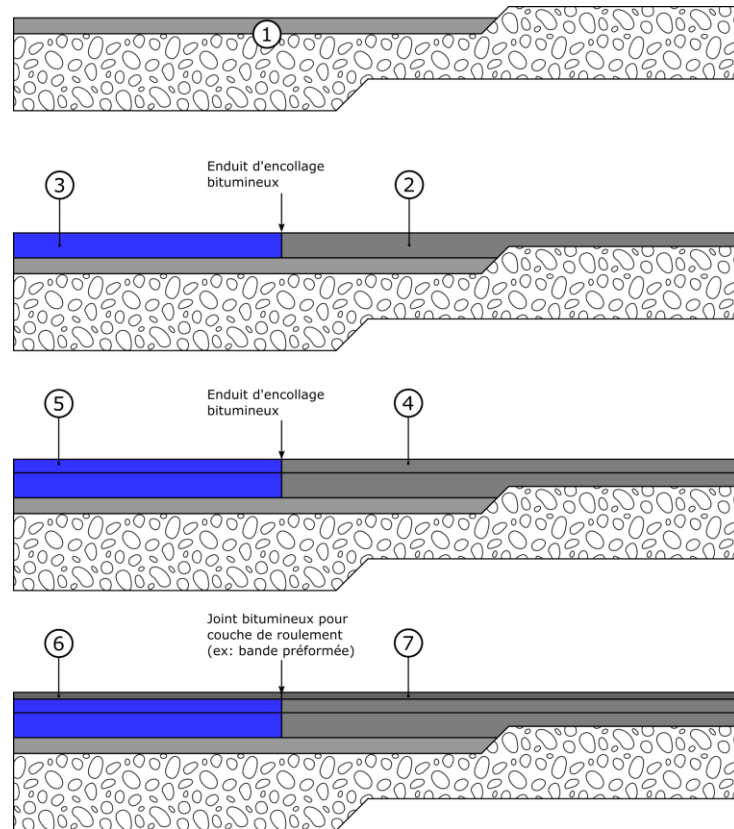


Fig. 57 Zone de transition recommandée pour une chaussée d'arrêt de bus bitumineuse

7.4.2 Réfection de la surface de l'arrêt de bus uniquement

Parfois, les contraintes de construction en milieu urbain ne permettent pas la mise en œuvre des zones de transition. Il y a lieu de tenir compte des mesures constructives suivantes :

- Dans le cas d'une reconstruction totale de la superstructure de la chaussée, la mise en place et le compactage de la grave de fondation et la couche bitumineuse la plus profonde ne sont pas réalisés de manière optimale aux bords ;
- La couche bitumineuse la plus profonde sera en principe un enrobé standard AC T assez maniable pour une pose partiellement ou entièrement à la main. On évitera pour cette couche les enrobés peu maniables (enrobés à module élevés, tièdes ou avec liant PmB) ;
- Les joints transversaux et longitudinaux seront traités de manière standard avec des enduits d'encollage bitumineux ;
- Dans le cas de structures d'arrêt de bus rigides (dalles béton), un joint bitumineux sera coulé dans une rainure fraisée dans la couche de roulement de la chaussée existante ;
- Dans le cas de structures d'arrêt de bus bitumineuses, un joint bitumineux pour couche de roulement (par exemple bandes préformées) sera mis en place ;
- Dans le cas d'un recouvrement d'une dalle en béton par un revêtement bitumineux, la même procédure retenue pour une structure d'arrêt de bus bitumineuse sera appliquée.

8 Conclusions

La conception et le dimensionnement des chaussées pour voies et arrêts de bus est une tâche du planificateur pour laquelle les normes actuelles donnent les principes généraux mais pas une démarche pratique détaillée pour couvrir les aspects importants de la problématique.

L'approche voulue pour ce projet se veut très pratique au travers de l'analyse des différentes expériences nationales et internationales sur les surfaces à fortes sollicitations (essentiellement des arrêts de bus) qui peuvent être qualifiées de réussies en terme de durabilité mécanique rapportée au coût global de mise en œuvre. Cette démarche de recensement des « Success stories » s'est imposée en raison de la diversité des techniques applicables et la nécessité d'avoir un recul suffisant sur ces techniques.

Le recensement des expériences internationales s'est fait au travers d'une revue de littérature internationales. La récolte des expériences nationales s'est faite à la suite de contacts directs avec les villes partenaires du projet (La Chaux-de-Fonds, Lausanne et Zurich), ainsi que l'organisation d'une enquête auprès d'un panel de villes et communes suite à la distribution d'un questionnaire.

Les expériences positives récoltées ont permis de cibler trois structures de chaussées prometteuses proposées aux villes partenaires pour leur construction et leur suivi pendant toute la durée du projet. Les villes partenaires ont participé à l'affinage de la conception des structures expérimentales pour tenir compte de leur contraintes locales (climat, particularités d'exploitation, réduction du bruit de roulement) et explorer le potentiel de matériaux et techniques de construction innovants.

Les sections expérimentales retenues sont les suivantes :

- Ville de La Chaux-de-Fonds : Structure entièrement bitumineuse avec couche de roulement en liant PmB. La couche de roulement bitumineuse est imposée par le climat du site engendrant un service hivernal intense.
- Ville de Lausanne : Couche de roulement en BFUP sur une couche de liaison en AC EME. La ville de Lausanne ambitionne d'appliquer cette technique sur les secteurs stratégiques de son réseau et disposer ainsi d'une surface avec une durée de vie très élevée.
- Ville de Zurich : Structure composite avec une couche en béton armé continu parfaitement collée sur une couche bitumineuse en AC T. La liaison entre la dalle principale et la chaussée existante est assurée par la mise en œuvre d'une dalle de transition de 2 m de longueur et avec une épaisseur progressive. La ville de Zurich a profité du projet pour tester le potentiel d'un recouvrement de la dalle par un revêtement peu bruyant de type PMA 8. Il s'agit d'un asphalte coulé avec une courbe granulométrique discontinue et un liant PmB.

En raison des limitations de la méthode de dimensionnement suisse, le dimensionnement des chaussées à Lausanne et à Zurich a été réalisé avec des méthodes analytiques. Ces méthodes sont plus adaptées au fonctionnement mécanique des chaussées composites et autorisent l'utilisation rationnelle de nouveaux matériaux.

Les sections expérimentales, construites en 2014 et 2015, ont bénéficié de la mise en place de capteurs de déformation afin de valider leur comportement mécanique par rapport aux hypothèses initiales.

Le suivi de chaque section expérimentale comprend les investigations suivantes :

- Mesure des déformations de la structure sous trafic réel (passage de bus) avec pesage simultané des essieux des bus ;
- Mesure de la capacité portante de la structure avec le déflectomètre à masse tombante (HWD) ;
- Surveillance de l'état de surface de la chaussée pendant la durée du projet.

La campagne de mesure des déformations et de la portance sur la chaussée de La Chaux-de-Fonds a montré que cette structure bénéficie d'une fondation avec portance élevée et une durée de vie en fatigue des couches profondes conforme au dimensionnement.

La couche de roulement de la structure de La Chaux-de-Fonds a vu la formation d'un orniérage dont les causes restent à investiguer. Ce constat démontre clairement l'importance d'opter pour des matériaux plus résistants à l'orniérage même si le climat du site est particulièrement rigoureux.

La campagne de mesure HWD sur la chaussée de Lausanne a montré que cette structure présente une portance élevée. Les déformations mesurées sont en revanche un peu plus importantes que celles obtenus par le calcul de dimensionnement. Les causes de cet écart restent à identifier parmi les hypothèses émises (situation en pente, discontinuités dans la structure, capteur défectueux).

La couche de roulement en BFUP sur la chaussée de Lausanne a démontré un comportement satisfaisant sur un site très exigeant (arrêt en pente de 4,5% avec des efforts de freinage très intenses). Un entretien du joint a été nécessaire et quelques arrachements localisés ont été observés dans le gravillonnage. La structure expérimentale en BFUP a présenté un décollement de son support bitumineux après 3.5 années de service. La problématique de la durabilité du collage doit être résolue avant d'envisager la réalisation à plus grande échelle de chaussées avec couche de roulement en BFUP.

La campagne de mesure des déformations et de la portance sur la chaussée de Zurich a montré que cette structure bénéficie d'une portance élevée et des déformations dans les différentes parties de la structure conformes aux valeurs obtenues dans le calcul de dimensionnement. Cette structure a un potentiel de durée de vie très élevé.

La couche de roulement en PMA 8 sur la chaussée de Zurich a subi une dégradation prématurée (déformation de poussée) sur la trace de roue droite. Cette pathologie est généralement liée à un défaut de collage de la couche avec la surface supérieure du béton et ne met pas en cause le fonctionnement mécanique des couches structurelles. La structure de la chaussée de Zurich ne présente pas de dégradations autre que la déformation de poussée.

De par les discontinuités qui les caractérisent, les structures de Lausanne et de Zurich ont été modélisées par la méthode des éléments finis afin d'identifier leur zones critiques et évaluer leur durée de vie.

Pour la structure de Lausanne, l'analyse par éléments finis a mis en évidence l'importance de garantir une épaisseur minimale du BFUP de 40 mm.

Dans le cas de la structure de Zurich, les calculs par éléments finis ont confirmé les valeurs des contraintes et déformations mesurées avec les capteurs. L'importance du collage entre le béton armé continu et les couches bitumineuses est également confirmé.

Des recommandations sur la conception des voies et arrêts de bus sont données. Elles portent essentiellement sur les principes de détermination du trafic pondéral équivalent, le choix des structures et des couches de roulement en fonction de critères jugés déterminants. Enfin, des recommandations pour le traitement des zones de transition sont proposées.

Les recommandations pour la détermination du trafic pondéral équivalent pourraient être intégrées dans une mise à jour de la norme SN 640 320. Les recommandations relatives au choix des structures, des couches de roulement et la conception des zones de transition compléteront la norme SN 640 324 ou un futur guide pour la conception des arrêts et voies de bus.

Annexes

I	Récapitulatif des expériences nationales.....	103
I.1	Introduction.....	103
I.2	Dégradations et type de structures.....	103
I.3	Dégradations en fonction de la couche de base pour les structures bitumineuses.....	104
I.4	Dégradations en fonction du type de couche de roulement pour les structures bitumineuses.....	104
I.5	Relation entre les dégradations et la durée d'utilisation.....	105
I.6	Relation entre les dégradations et la classe de trafic.....	105
I.7	Conclusion.....	105
I.8	Synthèse des objets sélectionnés.....	107
II	Caractéristiques des bus pour le calcul du trafic de dimensionnement	108
II.1	Structure de La Chaux-de-Fonds.....	108
II.2	Structure de Lausanne.....	109
II.3	Structure de Zurich.....	110
III	Note de calcul pour la conception et le dimensionnement de la structure de Zurich	111
III.1	Principe de fonctionnement mécanique.....	111
III.2	Structure type retenue.....	111
III.3	Trafic.....	111
III.3.1	Hypothèses générales.....	111
III.3.2	Calcul du trafic pondéral selon la méthode française.....	113
III.3.3	Calcul du trafic pondéral selon la méthode suisse.....	114
III.4	Dimensionnement.....	116
III.4.1	Trafic retenu pour le dimensionnement selon la méthode française.....	116
III.4.2	Dimensionnement selon la norme SN 640 324.....	116
III.4.3	Dimensionnement selon la méthode française.....	116

I Récapitulatif des expériences nationales

I.1 Introduction

La récolte des expériences nationales s'est faite en 2016 au travers d'une enquête réalisée auprès des principales communes et villes suisses afin d'obtenir un retour d'expériences avec les différents types de structure de chaussée utilisés pour la construction des arrêts de bus. Le questionnaire distribué est reproduit au chapitre 2.1. Les renseignements demandés sont rappelés ci-après :

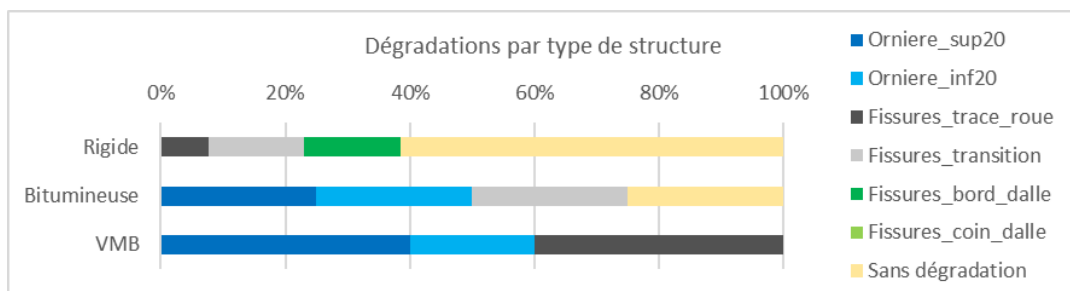
- Localisation : commune, nom de l'arrêt.
- Année de construction.
- Type de structure : rigide (béton) ou souple (enrobés bitumineux). Composition et épaisseur de la couche de roulement et la couche de base. Type de fondation.
- Classe de trafic. Nombre de bus par jour.
- Type de dégradations relevées : orniérage supérieur ou inférieur à 20mm, fissures sous la trace des routes, fissures dans la zone de transition (entre la chaussée hors-arrêt et la chaussée renforcée), fissures sur le bord ou les coins de la dalle (seulement pour les arrêts en béton).

Bien que les retours d'information obtenus sont intéressants et vraisemblablement représentatifs de ce qui se fait en Suisse, le nombre de réponses est relativement modeste, avec un total de 35 arrêts de bus documentés.

Les données d'enquête obtenues sont analysées dans la suite de ce chapitre. Les résultats présentés doivent cependant être considérés avec précaution en raison de la taille réduite de l'échantillon de données.

I.2 Dégradations et type de structures

Les familles de dégradations sont agrégées par type de structure dans la figure suivante :

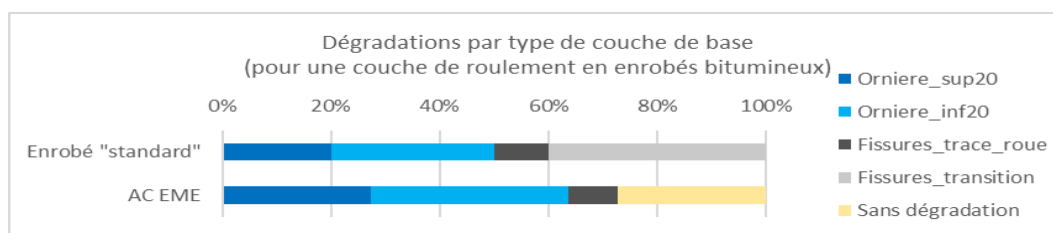


Un premier constat à partir des données obtenues est que les structures rigides présentent moins de dégradations que les souples (60% de structures rigides sans dégradations contre 20% pour les structures souples). Sur les structures rigides les dégradations les plus fréquentes sont les fissurations dans les zones de transition et sur le bord de la dalle ; sur les structures bitumineuses le 50% des dégradations correspond à des ornières et 20% à de la fissuration dans la zone de transition. Les structures avec une couche de roulement en VMB (enrobé percolé) présentent toutes des dégradations, dont 60% correspondent à des phénomènes d'orniérage et le 40% restant à des fissures sous la trace des roues.

Parmi les arrêts de bus rigides se trouvent deux arrêts construits en béton renforcé avec des fibres métalliques. Ces deux arrêts de bus ont des sollicitations importantes avec du trafic lourd et très lourd, et ont un âge compris entre 12 et 14 ans. Pourtant, au moment de l'enquête la surface de roulement ne présentait pas de dégradations.

I.3 Dégradations en fonction de la couche de base pour les structures bitumineuses

Les familles de dégradations sont agrégées par type de couche de base dans la figure suivante :



Dans le cas des structures bitumineuses nous avons séparé celles avec une couche de base en enrobés dits standards et celles en enrobé à module élevé AC EME. Nous constatons que 30% des arrêts de bus en AC EME ne présentent pas de défauts, contre la totalité pour les enrobés standards. Dans le cas des AC EME la majorité des dégradations correspond à de l'orniérage, et seulement 10% correspond à des fissurations sous la trace des roues. Pour les couches de base en enrobés standards les dégradations par orniérage représentent la moitié des défauts, le 40% correspond à des fissures sur la zone de transition et le solde à des fissures sous la trace des roues. Les structures avec une couche de base en enrobés standards sont plus sensibles à l'apparition de fissures.

I.4 Dégradations en fonction du type de couche de roulement pour les structures bitumineuses

Parmi les arrêts de bus relevés plusieurs sortes de couches de roulement ont été répertoriées. Ci-dessous nous avons fait une brève analyse en fonction de sa nature.

Enrobés macro-rugueux : Trois arrêts de bus ont des couches de roulement en AC MR : deux en AC MR 11 (4 et 11 ans) et une en AC MR 8 (4 ans). Celui en AC MR 8 présente des ornières de profondeur inférieures à 20mm. L'arrêt en AC MR 11 d'un âge de 11 ans présente des ornières de profondeur supérieure aux 20mm. Les informations ne sont pas suffisantes pour en déduire un rapport entre l'âge la sorte des enrobés macro-rugueux et la dégradation.

Gravillonnages en surface. Ces arrêts de bus, dont l'âge est compris entre 13 et 21 ans et avec des charges de trafic lourdes (T4 et T5), ne présentent que des fissurations sur la zone de transition. Les gravillonnages sont posés sur une couche d'AC T 32.

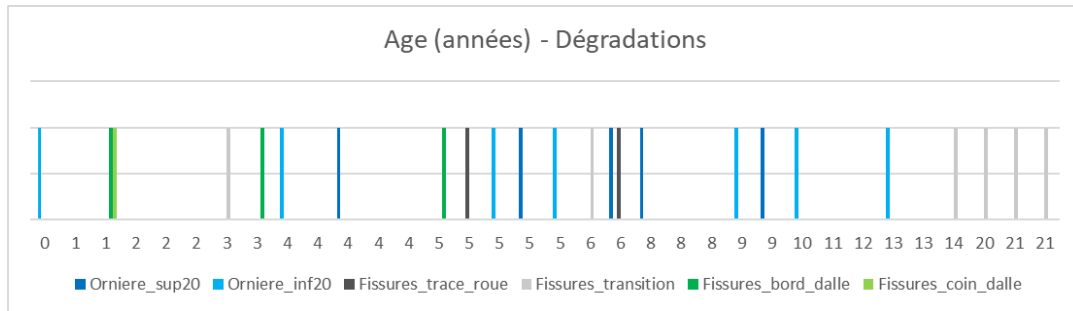
Enrobés percolés (VMB) : quatre arrêts de bus avec une couche de roulement en enrobés percolés ont été relevés sur les communes de Lausanne et Ecublens, avec des âges compris entre 5 et 8 ans, et des classes de trafic T4 et T5. D'une manière générale ces arrêts présentent des dégradations sous forme d'orniérage avec diverses gravités et de la fissuration sous les traces des roues. Les données récoltées indiquent une augmentation de la profondeur des ornières avec les années d'utilisation. Les structures analysées présentent toutes des dégradations, dont 60% correspondent à des phénomènes d'orniérage et le 40% restant à des fissures sous la trace des roues.

Produits d'entreprise anti-orniérants : Certaines entreprises proposent des produits spécifiques pour des hautes sollicitations, comme par exemple le Saparof 0/16 (de l'entreprise Implenia) ou les Colao PE 11 et le Multicol 0/16 (de l'entreprise Colas). Ces produits se caractérisent par l'utilisation de liants fortement modifiés et une granulométrie optimisée pour réduire les déformations par orniérage sous des charges de trafic importantes. Pour des classes des sollicitations de trafic entre T4 et T5, les arrêts analysés présentent une palette de comportement très étendue allant de l'orniérage faible à important. La performance de ces produits n'est pas forcément corrélée avec

l'âge, la dégradation étant plus importante sur les arrêts de bus plus jeunes. Pour une sollicitation et âge similaires, ces produits présentent un comportement tantôt meilleur et tantôt moins bon que d'autres produits normés de type AC EME.

I.5 Relation entre les dégradations et la durée d'utilisation

Si on analyse le type de dégradations relevées en fonction de l'âge, on constate que l'apparition des ornières (dégradation propre aux structures en enrobés bitumineux) se distribue de façon homogène sur la durée de vie des arrêts de bus. Aucune relation ne peut être établie entre la durée d'utilisation et l'apparition ou la profondeur des ornières.

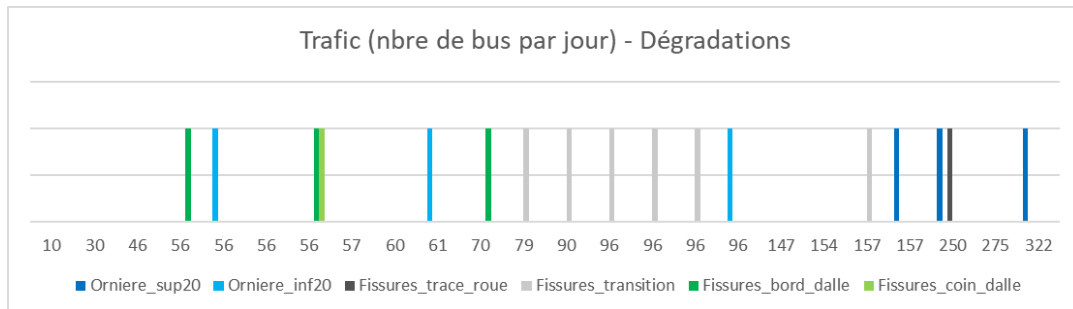


Les fissures sous les traces des roues apparaissent à partir de 5 ans.

Les fissures sur les zones de transition sont relevées à tous les âges, mais de façon prédominante sur des structures d'un âge supérieur à 14 ans.

I.6 Relation entre les dégradations et la classe de trafic

Sur la distribution des dégradations en fonction de la charge de trafic on constate un rapport entre la profondeur des ornières et les sollicitations : les ornières dépassent les 20mm de profondeur pour une charge de trafic supérieure aux 150 bus par jour.



Les fissures sur les zones de transition apparaissent à partir de 70 bus par jour.

Les fissures sur les bords et les coins des dalles sont constatées sur des arrêts dont la circulation journalière de bus est inférieure aux 70 unités ; en revanche aucune relation logique n'a pu être établie entre la charge de trafic et l'apparition de ce type de dégradations.

I.7 Conclusion

A partir des relevés obtenus, nous pouvons conclure qu'en règle générale les structures rigides présentent moins de dégradations que les structures bitumineuses. D'une manière générale, le phénomène de dégradation le plus répandu sur les structures bitumineuses est l'orniérage, pour lequel nous avons pu établir une relation entre la charge de trafic et la profondeur des ornières.

Dans le cas des structures rigides, l'utilisation de bétons renforcés avec des fibres métalliques apporte une amélioration par rapport à l'apparition de dégradations dans la chaussée.

Dans le cas des structures bitumineuses, la différence principale entre l'utilisation d'une couche de base en enrobés AC EME ou pas est la réduction de la fissuration de la couche de roulement. Les phénomènes d'orniérage se reproduisent avec des taux similaires dans l'échantillon analysé. Les produits dits « spéciaux » (enrobés percolés ou produits d'entreprise anti-orniérants) présentent des comportements très variables, allant d'un comportement moins bon que les enrobés standards à un comportement nettement supérieur. La qualité de l'exécution est visiblement un facteur déterminant pour ce genre de produits.

Les conclusions de cette enquête peuvent difficilement être extrapolées pour d'autres études à cause du nombre limité de données disponibles pour notre recherche.

I.8 Synthèse des objets sélectionnés

La liste des objets retenus à la suite de l'enquête sur les expériences nationales est donnée succinctement dans le tableau suivant. La localisation exacte des sites et les noms des produits d'entreprise ont été masqués.

Numéro	Organisation	Année construction	Age	Type structure	Couche1	Commentaire couche 1	Couche2	Commentaire couche2	Trafic	Nb_bus	Orniere_sup20	Orniere_inf20	Fissures_trace_roue	Fissures_transition	Fissures_bord_dalle	Fissures_coin_dalle
1	Stadt Lenzburg	2006	10	Bitumineuse	Enrobé		Enrobé		<T4	250	X					
2	Stadt Lenzburg	2002	14	Rigide	Béton	Béton avec fibres métalliques			<T4	30						
3	Commune d'Ecublens	2012	4	Rigide	Béton					56					X	
4	Commune d'Ecublens	2012	4	Bitumineuse	Enrobé		AC EME			56			X			
5	Commune d'Ecublens	2007	9	Mixte/Autre	Pavés		Béton			56						
6	Commune d'Ecublens	2013	3	Bitumineuse	Enrobé		AC EME			56						
7	Commune d'Ecublens	2014	2	Mixte/Autre	Autre	BGMC	Enrobé	Existant		57					X	X
8	Commune d'Ecublens	2015	1	Bitumineuse	Enrobé		AC EME		T4	70		X				
9	kanton St-Gallen	2005	11	Bitumineuse	Enrobé	AC NR 11	Enrobé		T4			X				
10	kanton St-Gallen	2010	6	Bitumineuse	Enrobé	AC 8 S	Enrobé		T4			X				
11	kanton St-Gallen	2015	1	Rigide	Béton		Enrobé		T4	60						
12	kanton St-Gallen	2014	2	Rigide	Béton		Enrobé		<T4	10						
13	kanton St-Gallen	2014	2	Rigide	Béton		Enrobé		T4	60						
14	kanton St-Gallen	2016	0	Rigide	Béton		Enrobé		T4	61			X			
15	Stadt Chur	2010	6	Rigide	Béton		Enrobé		<T4	90				X		
16	Stadt Chur	2013	3	Bitumineuse	Enrobé		Enrobé		<T4	96				X		
17	Stadt Zürich	2012	4	Rigide	Béton		Enrobé	ACT	T4	46						
18	Stadt Zürich	2004	12	Rigide	Béton	avec fibre			T5	154						
19	Stadt Zürich	1996	20	Rigide	Béton				T5	157				X		
20	Stadt Zürich	2003	13	Rigide	Béton				T5	157						
21	Stadt Zürich	2011	5	Rigide	Béton		Béton	Ouvrage d'art	T6	322						
22	Stadt Zürich	2011	5	Rigide	Béton	Eléments préfabriqués	Autre	Couche granulaire spéciale	<T4	79					X	
23	Stadt Zürich	1995	21	Mixte/Autre	Enrobé	Traitement de surface, AC T 32	Enrobé	ACT 32	T5	96				X		
24	Stadt Zürich	1995	21	Bitumineuse	Enrobé	Gravillonnage, AC T 32	Enrobé	ACT 32	T5	96				X		
25	Stadt Zürich	1995	21	Bitumineuse	Enrobé	Splitasphalt, AC T 32	Enrobé	ACT 32	T5	96				X		
26	Stadt Zürich	2003	13	Bitumineuse	Enrobé	Gravillonnage, AC T 32	Enrobé	ACT 32	T4	147		X				
27	Ville de Renens	2008	8	Mixte/Autre	Enrobé	VMB	Enrobé		T5	275		X				
28	Ville de Lausanne	2008	8	Mixte/Autre	Enrobé	VMB	AC EME		T5			X				
29	Ville de Lausanne	2007	9	Mixte/Autre	Enrobé	VMB	AC EME		T5			X				
30	Ville de Lausanne	2011	5	Mixte/Autre	Enrobé	VMB	AC EME		T4				X			
31	Ville de Lausanne	2011	5	Bitumineuse	Enrobé	Produit entreprise	AC EME		T5				X			
32	Ville de Lausanne	2011	5	Bitumineuse	Enrobé	Produit entreprise	AC EME		T5				X			
33	Ville de Lausanne	2008	8	Bitumineuse	Enrobé	Produit entreprise	AC EME		T4							
34	Ville de Lausanne	2012	4	Bitumineuse	Enrobé	AC NR 8	AC EME		T4							X
35	Ville de Lausanne	2012	4	Bitumineuse	Enrobé	AC NR 11	AC EME		<T4							

II Caractéristiques des bus pour le calcul du trafic de dimensionnement

II.1 Structure de La Chaux-de-Fonds

Dimensionnement Place de la Gare de la Chaux-de-Fonds

Caractéristiques des bus Remplissage moyen 80%

Marque / Type	Poids à vide [kg]	Charge utile [kg]	Poids total max [kg]	Essieu 1			Essieu 2			Essieu 3			Essieu 4			
				Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%	
Ab	12'430	5'570	18'400	4'100	6'340	6'900	8'330	10'866	11'500							
Aba	16'860	11'140	28'000	4'450	6'490	7'000	3'600	8'320	9'500	8'810	10'962	11'500				
Hba	18'020	9'980	28'600	4'400	6'560	7'100	4'640	8'928	10'000	8'980	10'996	11'500				
Mnu	3'855	1'795	5'800	1'620	1'924	2'000	2'235	3'487	3'800							
Mdu	10'660	7'140	17'800	2'770	5'594	6'300	7'890	10'778	11'500							

II.2 Structure de Lausanne

Dimensionnement arrêt Foyer à Lausanne												
Caractéristiques des bus												
Marque / Type	Poids à vide [kg]	Charge utile [kg]	Poids total max [kg]	Remplissage moyen 80%								
				Essieu 1		Essieu 2		Essieu 3		Essieu 4		
				Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%
1_TBA44	20'140	11'460	31'600	5'370	7'074	7'500	5'720	10'344	11'500	9'050	11'890	12'600
2_TBA45	19'660	11'085	30'745	5'590	6'914	7'245	5'710	10'342	11'500	8'360	11'272	12'000
3_ABA32	17'640	11'605	29'245	4'760	6'748	7'245	3'500	8'700	10'000	9'380	11'476	12'000
4_ABD34	17'720	8'540	26'260	4'260	6'756	7'380	7'980	10'796	11'500	5'480	7'000	7'380

II.3 Structure de Zurich

Dimensionnement arrêt SBB Werkstätte

Caractéristiques des bus Remplissage moyen 80% --> 70% selon comptages ZH de 2001

Marque / Type	Poids à vide [kg]	Charge utile [kg]	Poids total max [kg]	Essieu 1			Essieu 2			Essieu 3			Essieu 4					
				Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%	Vide	Charge 80%	Charge 100%			
1_Gelenktrrolleybus	19'035	10'200	29'235	5'434	7'032	7'432	5'202	8'542	9'377	8'399	11'621	12'426						
2_Doppelgelenktrrolleybus	24'556	12'920	37'476	5'459	7'091	7'499	6'226	9'520	10'343	6'891	10'187	11'011	5'980	8'094	8'623			

III Note de calcul pour la conception et le dimensionnement de la structure de Zurich

III.1 Principe de fonctionnement mécanique

La chaussée mixte ou composite est un revêtement béton, éventuellement armé, mis en œuvre sur un enrobé bitumineux de type ACT et recouvert dans certains cas par un enrobé bitumineux mince.

Le mélange de ces différentes techniques permet de tirer profit des avantages de chaque matériau à l'endroit où il est utilisé :

- Béton : rigidité en surface et répartition des charges
- Enrobé bitumineux : souplesse et résistance à la fissuration

La durabilité élevée de ce type de structure est liée à la considération de deux nouvelles hypothèses mécaniques :

1. la prise en compte d'un collage à l'interface Béton/ACT
2. la continuité des dalles en béton armé continu. Ceci permet de réduire les épaisseurs ou augmenter la durée de vie par rapport aux dalles béton avec des discontinuités (dalles avec et sans joints goujonnés)

Le respect de ces hypothèses passe par des dispositions constructives décrites plus loin.

Le collage à l'interface Béton/ACT permet de faire participer l'enrobé bitumineux au fonctionnement mécanique de la structure au lieu de servir uniquement de couche de fondation améliorée.

III.2 Structure type retenue

L'arrêt de bus de SBB Werkstätte a une largeur de 3 m et une longueur totale de 30 m qui est décomposée en 3 parties :

- partie centrale de 26 m avec une structure de dalle en béton armé continu
- deux parties aux extrémités de 2 m de long chacune avec une structure de dalle béton goujonnée à la partie centrale. Ces deux parties représentent des dalles de transition qui isolent la chaussée existante de la dilatation thermique de la structure en béton armé continu.

Les 3 parties reposent sur une couche de 8 cm en ACT 22 et sont recouvertes par une couche bitumineuse résistante à l'orniérage d'au minimum 30 mm d'épaisseur. Il est recommandé de réaliser un sciage dans la couche de roulement bitumineuse au droit des deux joints de dalle, sciage qui sera comblé par un produit de scellement bitumineux.

III.3 Trafic

III.3.1 Hypothèses générales

L'arrêt de bus SBB Werkstätte à Zürich supporte un trafic combiné :

- Les véhicules de transport public (TP) de la ligne nr. 31

- Le trafic individuel motorisé (TIM)

La ligne de bus nr. 31 est exploitée avec deux types de véhicules dont les caractéristiques sont données ci-dessous :

1. Bus articulé (Gelenktrolleybus) : Trolleybus avec articulation simple, 3 axes et une longueur totale de 18.7 m
2. Bus à double articulation (Doppelgelenktrolleybus) : Trolleybus avec articulation double, 4 axes et une longueur totale de 24.7 m

Remplissage moyen des bus

Le remplissage moyen des véhicules est estimé par la ville à 65% en 2001. Pour le calcul du trafic pondéral, un remplissage actuel de 80% est admis en 2015.

Répartition des bus selon l'horaire

En l'absence d'informations plus précises, la répartition des bus selon l'horaire de la ligne nr. 31 est établie sur la base des hypothèses suivantes :

- Les heures creuses (HC) assurées exclusivement avec le « Gelenktrolleybus », les heures de pointe (HP) sont assurées exclusivement avec le « Doppelgelenktrolleybus »
- L'horaire de pointe est admis comme suit :
 - En semaine (lundi – vendredi) : de 6h00 à 20h00
 - Samedi : de 10h00 à 20h00
 - Dimanche : horaire heures creuses uniquement

Avec cette décomposition, le nombre de passages de bus est donné par véhicule et par jour dans le tableau suivant :

Période	Véhicule	Lun - Ven	Sam	Dim + fériés
Heures creuses	Gelenktrolleybus	33	57	108
Heure de pointe	Doppelgelenktrolleybus	114	80	-

Effet de la canalisation du trafic et de la zone d'arrêt

Selon la recommandation du guide du CERTU, nous appliquons au trafic pondéral deux facteurs de majoration :

- Facteur de trafic canalisé : 1.65
- Facteur d'arrêt de bus (zone de freinage et circulation à basse vitesse) : 1.2

Ces facteurs sont obtenus par modélisation des structures et comparaison du dommage calculé par la loi de Miner pour chaque cas. La considération de ces deux facteurs conduit à majorer le trafic pondéral par 1.98.

Croissance du trafic

Pour le calcul de dimensionnement, la croissance du trafic est admise comme suit :

- Trafic de transports public (TP) considéré sans accroissement ;
- Trafic individuel motorisé (TIM) considéré avec un accroissement géométrique annuel de 2%.

Portance de la fondation

Selon la norme française NF P 98-086, le choix d'une structure de type BAC sur ACT nécessite une classe de portance du sol au minimum S3.

Durée de service

Compte tenu de l'importance et de la complexité de la superstructure à construire, nous fixons comme objectif de dimensionner notre chaussée pour une durée de 30 ans.

III.3.2 Calcul du trafic pondéral selon la méthode française

La détermination du trafic pondéral dans la méthode française passe par le calcul du Coefficient d'Agressivité Moyen (CAM) qui est l'équivalent en ESAL 13t du facteur d'équivalence k de la norme SN 640 320.

Le CAM est calculé avec la formule suivante :

$$CAM = f_{cana} \sum k_i \left(\frac{P_i}{13} \right)^\alpha$$

Où :

- P_i est la charge de l'essieu i en tonnes,
- k_i représente le coefficient du type de l'essieu (simple, tandem ou tridem),
- f_{cana} facteur de canalisation du trafic
- α représente la puissance : 5 pour une chaussée souple et 12 pour une chaussée rigide.

Le CAM est calculé pour un remplissage moyen des bus de 80%, $k_i = 1$ (essieu simple), $f_{cana} = 1.98$ (trafic fortement canalisé sur arrêt de bus) et $\alpha = 12$ (chaussée rigide). Les valeurs du CAM obtenues sont les suivantes :

- Gelenktrolleybus : CAM = 0.51
- Doppelgelenktrolleybus : CAM = 0.16

Ce résultat étonnant (le Gelenktrolleybus est 3 fois plus dommageable que le Doppelgelenktrolleybus) s'explique par la charge élevée du 3ème essieu du Gelenktrolleybus ainsi que la puissance 12 préconisée par la méthode française.

Le nombre d'essieux standards ESAL 13t (équivalent du W_n de la norme suisse SN 640 320) est donnée par la formule suivante :

$$NE = MJA \times 365 \times C \times CAM$$

$$C = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Avec :

- *MJA* : Moyenne journalière annuelle du trafic en nombre de véhicules poids lourds (équivalent TJM/DTV multiplié par le taux de PL)
- *r* : Coefficient d'accroissement géométrique du trafic
- *n* : Nombre d'année ou durée de service
- *C* : facteur de cumul

Trafic de transport public (TP)

Le trafic TP est considéré sans accroissement annuel. Le nombre d'essieux standards est déterminé sur la base des nombres de bus et des coefficients CAM calculés plus haut pour les deux types de véhicules.

$$NE_{TP} = 30 \times \left[(365 - 52) \times (33 \times 0.51 + 114 \times 0.16) + \left(\frac{52}{2}\right) \times (57 \times 0.51 + 80 \times 0.16) + \left(\frac{52}{2}\right) \times (108 \times 0.51) \right]$$

$$NE_{TP} = 268'235$$

Trafic individuel motorisé (TIM)

Le trafic journalier moyen est obtenu à partir du modèle de trafic du site web GIS du canton de Zurich. Le TJM au niveau de l'arrêt SBB Werkstätte direction Schlieren est de 6'524 avec un taux de poids lourds de 2.8%.

Pour cette catégorie de routes (voie principale à trafic lourd), la norme de dimensionnement française préconise un CAM de 0.4, ce qui correspond à un coefficient d'équivalence *k* moyen selon la SN 640 320 d'environ 2.5 (ESAL 8 t).

$$C = \frac{(1 + 2\%)^{30} - 1}{2\%} = 40.568$$

$$NE_{TIM} = (6'524 \times 2.8\%) \times 365 \times 40.568 \times 0.4$$

$$NE_{TIM} = 1'081'955$$

Le nombre d'essieu standard équivalent 13t total :

$$NE_{TOTAL} = NE_{TP} + NE_{TIM} = 1'484'308$$

Le trafic de notre chaussée correspond à une classe T2- selon la norme française et une classe T4 selon la norme suisse.

Nous constatons qu'avec la méthode française, le trafic public représente 27% du trafic pondéral sur la section considérée.

III.3.3 Calcul du trafic pondéral selon la méthode suisse

Le facteur d'équivalence de chaque bus est calculé avec les facteurs d'équivalence de chaque essieu donnés dans le tableau 2 de la norme SN 640 324.

Le remplissage des bus admis pour le calcul est toujours de 80% et le coefficient de canalisation du trafic $f_{cana} = 1.98$ (facteur proposé par le guide du CERTU). Les facteurs d'équivalence obtenus sont les suivants :

- Gelenktrolleybus : $k = 12.13$
- Doppelgelenktrolleybus : $k = 11.61$

Le trafic pondéral total est calculé pour la même durée de service (30 ans) et avec les mêmes hypothèses d'accroissement du trafic que pour le calcul selon la méthode française.

Trafic de transport public (TP)

Le trafic TP est considéré sans accroissement annuel. Le trafic pondéral équivalent journalier de l'année de mesure TF_0 est déterminé sur la base du nombre de bus et des facteurs d'équivalence calculés plus haut pour les deux types de véhicules.

$$TF_{0,TP} = \frac{(365 - 52) \times (33 \times 12.13 + 114 \times 11.61) + \left(\frac{52}{2}\right) \times (57 \times 12.13 + 80 \times 11.61) + \left(\frac{52}{2}\right) \times (108 \times 12.13)}{365}$$

$$TF_{0,TP} = 1'687$$

Trafic individuel motorisé (TIM)

Nous reprenons les mêmes données de trafic considérées pour le calcul selon la méthode française et admettons le facteur d'équivalence pour routes principales $k = 1.5$ (Tableau 5 de la norme SN 640 320).

$$TF_{0,TIM} = TJM \times \% PL \times k$$

$$TF_{0,TIM} = 6'524 \times 2.8\% \times 1.5 = 274$$

Trafic pondéral équivalent journalier

$$TF_n = TF_{0,TP} + \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot n} \cdot TF_{0,TIM}$$

$$TF_n = 2'058$$

Le trafic de notre chaussée correspond à une classe T5.

Nous constatons également qu'avec la méthode suisse, le trafic public représente 82% du trafic pondéral sur la section considérée.

Trafic pondéral équivalent total

$$W_{30} = 365 \times n \times TF_n$$

$$W_{30} = 22'534'098$$

Pour les besoins du dimensionnement qui sera réalisé plus loin, nous calculons également la valeur de trafic pondéral équivalent à 15 ans :

$$W_{15} = 10'967'948$$

W_{30} et W_{15} sont convertis en ESAL 13t avec la loi de puissance ($\alpha = 4$), ce qui revient à diviser les W par le facteur 6.44. Nous obtenons ainsi :

$$NE_{30} = 3'499'084$$

$$NE_{15} = 1'703'098$$

III.4 Dimensionnement

III.4.1 Trafic retenu pour le dimensionnement selon la méthode française

Le trafic pondéral équivalent total obtenu par la méthode suisse est 2.3 fois supérieur à celui obtenu avec la méthode française.

Nous retenons pour le dimensionnement selon la méthode française le trafic pondéral suisse pour deux raisons :

- rester du côté de la sécurité
- à cause de doutes sur la validité de la formule de calcul du CAM pour le contexte suisse. En effet, cette formule se base sur un essieu de référence de 13t qui est commun sur les routes françaises mais interdit en suisse. La puissance $\alpha = 12$ est également assez éloignée de ce qui est admis en suisse ($\alpha = 4$).

III.4.2 Dimensionnement selon la norme SN 640 324

Le dimensionnement selon la norme suisse SN 640 324 se base sur la fiche du type de structure nr. 16. Avec une classe de trafic T5 et un sol de classe S3, nous aboutissons aux épaisseurs suivantes :

- Béton Armé Continu : 200 mm
- ACT : 80 mm
- Grave : 150 mm

Le rapport OFROU nr. 1180 sur les structures mixtes admet pour le dimensionnement que la couche bitumineuse en surface au-dessus d'une couche de base en béton armé continu n'a aucun rôle structurel (chapitre 7.4.1). Il recommande également de choisir une épaisseur de la dalle en béton armé continu égale à celle préconisée pour les structures de dalles béton goujonnées (chapitre 7.4.3). Cette recommandation provisoire a été introduite en 2010 dans la norme SN 640 324 avec la structure type nr. 16.

Pour finir, la structure dimensionnée selon la norme SN 640 324 sera :

- 30 à 40 mm AC / AC MR
- Béton Armé Continu : 200 mm
- ACT : 80 mm
- Grave : 150 mm

III.4.3 Dimensionnement selon la méthode française

La nouvelle norme de dimensionnement analytique française décrit une méthode de calcul avec un logiciel multicouche qui tient compte du fonctionnement mécanique complexe d'une structure composite ou mixte.

Le principe de base du dimensionnement est reproduit ci-dessous à partir du chapitre 8.8.2 de la norme française [5] :

Le dimensionnement de la structure BAC sur grave bitume de classe 3 est réalisé en deux phases successives : pendant les 15 premières années, le BAC est considéré collé sur la couche de grave bitume de classe 3 ; le BAC est ensuite considéré glissant sur son support pendant le reste de la durée de vie retenue.

Pour chacune des deux phases de fonctionnement, la sollicitation à la base de la couche de fondation en grave bitume de classe 3 (déformation) et celle à la base du BAC (contrainte) sont calculées par le modèle de Burmister. Pour chacune des couches (fondation et base), le nombre de passages de poids lourds est alors déterminé pour chacune des phases de calcul à partir des sollicitations calculées, par inversion de la loi de fatigue propre à chaque matériau (Équation 1 et Équation 2) et converti en nombre de poids lourds (Équation 17). La somme de ces nombres de passage issus des deux phases de calcul conduit au nombre total de passages de poids lourds admissibles par chacune des deux couches (base et fondation) pour la structure considérée.

Le calcul est conduit par itération sur l'épaisseur de BAC jusqu'à ce que le nombre total de poids lourds admissibles soit supérieur ou égal, pour chacune des deux couches (base et fondation), au nombre de poids lourds correspondant aux hypothèses retenues (trafic journalier, durée de calcul et taux de croissance).

Dans tous les cas, il convient de vérifier que la durée de vie de la phase 1, est au moins supérieure ou égale à 15 ans.

Avec : BAC = Béton Armé Continu, Grave bitume de classe 3 = ACT suisse

Le calcul analytique ne considère pas les discontinuités présentes dans les dalles béton, et ne permet donc pas de déterminer directement les sollicitations critiques dans le béton qui sont en général obtenues près du bord de la dalle. Pour remédier à cette limitation, la méthode française propose d'appliquer un coefficient de discontinuité (k_d) qui permet de minorer de 7% la contrainte admissible dans la couche en BAC.

Nous reportons dans le tableau ci-dessous le nombre d'essieux équivalents 13t que peut supporter la structure avec une épaisseur du BAC qui varie entre 120 et 180 mm.

	Phase 1 : Interface BAC/ACT collée	Phase 2: Interface BAC/ACT glissante	
Couche critique	ACT	BAC	
Épaisseur BAC (mm)	NE (Phase 1)	NE (Phase 2)	NE (combiné)
120	23'345'942	366'598	2'066'598
130	34'238'077	1'159'735	2'859'735
140	49'594'416	3'638'368	5'338'368
150	70'576'558	11'126'651	12'826'651
160	100'578'298	33'702'846	35'402'846
170	141'370'218	92'614'406	94'314'406
180	195'033'523	247'672'940	249'372'940

Le calcul de dimensionnement itératif aboutit à une épaisseur minimale du béton armé continu de 140 mm qui permet de garantir le passage du nombre d'essieux standards 13t

définis au paragraphe III.3, soit $NE = 3.5 \cdot 10^6$ ESAL 13t. Cette épaisseur est supérieure au minimum recommandé par la méthode française qui est de 120 mm.

L'épaisseur de la dalle béton devra être augmentée pour satisfaire les dispositions constructives suisses liées essentiellement aux armatures des bords (enrobage minimum des armatures). En accord avec la ville de Zurich, l'épaisseur de la dalle béton a été portée à 180 mm pour garantir un bon enrobage des armatures et mitiger le risque lié à la nature expérimentale de ce genre de structures en Suisse.

La structure de chaussée finale est la suivante :

- 30 à 40 mm AC / AC MR
- Béton Armé Continu : 180 mm
- ACT : 80 mm
- Grave : 150 mm

Glossaire

Terme	Signification
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC EME	Enrobé à module élevé <i>Mischgut mit hohem Modul</i>
BAC	Dalle en béton armé continu <i>Durchgehenden bewehrte Betonplatte</i>
BFUP UHFB	Béton fibré ultra performant <i>Ultrahochleistungsfaserbeton</i>
BRRC	Centre de recherche routière belge <i>Belgisches Strassenforschungszentrum</i>
CERTU	Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme (France)
DMS	Jauge de déformation Dehnungsmessstreifen
ESAL	Essieu standard équivalent / Equivalent Standard/Single Axle Load <i>Äquivalente Achslast (Normachse)</i>
SN	Normes suisses (SN)
VMB	Béton bitumineux percolé <i>Vermörtelungsbeläge</i>

Bibliographie

Instructions et directives de l'OFROU

Normes

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Décembre 2014), « **Couches de surface en béton pour zones de circulation – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place** », SN 640 461.
- [4] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Février 2009), « **Couches de surface en béton – Conception, exigences, exécution et mise ne œuvre** », SN 640 461b.
- [5] Norme française NF P 98-086, « **Dimensionnement des structures de chaussées routières** », octobre 2011.
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, «**Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen- RStO 12**», Ausgabe 2012.
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, «**Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht - RDO Asphalt 09**», Ausgabe 2009.
- [8] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (Août 2003), « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Mode opératoire pour le relevé d'état avec le catalogue des dégradation** », SN 640 925b.

Documentation

- [9] J. Perret (2003), « **Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic** », thèse de doctorat No. 2786, LAVOC, ENAC – EPFL, Lausanne.
- [10] Service d'études sur les transports et leurs aménagements SETRA, «**Structures Béton Armé Continu sur Grave Bitume – Note conclusive** », Mars 2011.
- [11] Centre d'information sur le ciment et ses applications CIMBÉTON. Guide n° T65, Tome 1, «**Structures neuves en BAC collé sur GB – Guide de dimensionnement** », Février 2009.
- [12] Centre d'information sur le ciment et ses applications CIMBÉTON. Guide n° T60, Tome 1, «**Le Béton de Ciment Mince Collé BCMC** », Décembre 2004.
- [13] Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité IDRRIM. Guide technique «**Carrefour et giratoires en béton** », Mars 2015.
- [14] CERTU «**Chaussées bus – Choix des matériaux et dimensionnement structurel** », Mars 2015.
- [15] Mandat de recherche VSS 2001/501 « **Kombinierte Beläge – Belagsüberzüge auf Betondecken, Kompositbeläge** », Juin 2007.
- [16] B. Pouteau (2004), «**Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussée** », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, décembre 2004.
- [17] T. Makita (2014), « **Fatigue behaviour of UHPFRC and R-UHPFRC – RC composite members** », thèse de doctorat N°6068, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [18] National Cooperative Highway Research Program NCHRP, « **Thin and Ultra-Thin Whitetopping** », NCHRP Synthesis nr. 338, Transportation Research Board 2004.
- [19] Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières, Paris, 1991.
- [20] A. Mateos, J. Harvey, J.C. Paniagua, F. Paniagua (2015), « **Development of Improved Guidelines and Designs for Thin Whitetopping: Literature Review** », University of California Pavement Research Center.
- [21] National Cooperative Highway Research Program (2004). « **AASHTO Mechanistic- Empirical Design Guide** » NCHRP Project 1-37a, Transportation Research Board, Washington, DC.

-
- [22] S. A. Newbolds and J. Olek (2008). «**Evaluation of Performance and Design of Ultra-Thin Whitetopping (Bonded Concrete Resurfacing) Using Large Scale Accelerated Pavement Testing** », Purdue University
-
- [23] Mandat de recherche VSS 12/98, « **Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux** », Août 2004.
-
- [24] L. Francken, «**Permanent deformation law of bituminous road mixes in repeated triaxial compression** », Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1977.
-
- [25] M. Keller, R. Werner, «**Guide pratique des routes en béton** », Holcim SA, Edition 2004.
-

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 : 25.06.2019 / 23.09.2019 / 16.10.2019

Données de base

Projet N° : VSS 2013/502

Titre du projet : Conception des arrêts de bus

Echéance effective : 30.06.2019

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche s'est occupé de combler les lacunes existantes dans la conception et le dimensionnement de structures de chaussées destinées à supporter la circulation des bus.

L'approche pratique voulue pour ce projet s'est basée sur la revue et l'évaluation des différentes expériences nationales et internationales sur les surfaces à fortes sollicitations. Il s'agit essentiellement de structures pour arrêts de bus qui peuvent être qualifiées avec un recul suffisant de réussies en terme de durabilité mécanique par rapport au coût global de mise en œuvre.

La récolte des pratiques nationales a été complétée par la distribution d'un questionnaire distribué aux principales villes et communes suisses.

Les expériences positives ou prometteuses ont permis de sélectionner trois types de structures de chaussées à construire pendant le projet :

1. Structure bitumineuse standard avec couche de roulement et de liaison avec liant PmB,
2. Couche de roulement en béton fibré ultra performant BFUP avec gravillonnage,
3. Structure composite en béton armé continu sur un support en enrobé bitumineux. La dalle en béton a été recouverte avec un enrobé peu bruyant de type PMA 8 testé par la ville partenaire.

Trois villes partenaires ont mis à disposition des sections pour construire et instrumenter chacune une des structures proposées et suivre son comportement sur une durée de 3 ans. Une campagne de mesure par section est réalisée juste après la construction pour mesurer les propriétés mécaniques des chaussées et valider les hypothèses de conception.

Chaque campagne comprend la mesure sous trafic réel des déformations de capteurs dans la chaussée, et une caractérisation de la capacité portante avec le deflectomètre à masse tombante HWD.

Le comportement mécanique des structures 2 et 3 a été évalué avec les méthodes analytiques de type multilayer et éléments finis, ce qui a permis d'identifier les zones mécaniques critiques de ces structures.

En général, les déformations calculées sont confirmées par les valeurs mesurées à l'exception de la structure en BFUP avec des déformations mesurées plus importantes.

La structure 1 (bitumineuse) a vu la formation d'un orniérage significatif, ce qui illustre l'importance de choisir des matériaux résistants à l'orniérage même dans le cas de climat hivernal sévère.

La structure 2 (BFUP) a démontré un comportement satisfaisant sur 3.5 ans avant le décollement de la couche de BFUP de son support bitumineux.

La structure 3 (béton armé continu sur enrobé bitumineux) démontre le potentiel de durabilité structurelle le plus important.

La couche de roulement bitumineuse qui recouvre le béton armé continu a subi une dégradation prématurée (déformation de poussée) sur la trace de roue droite. Cette dégradation est liée a priori à un défaut de collage avec la surface supérieure du béton, et ne met pas en cause le fonctionnement mécanique des couches structurelles. La problématique du collage entre la dalle béton et la couche de roulement bitumineuse demeure une problématique en suspens.

Des recommandations sur la conception des voies et arrêts de bus sont données. Elles portent essentiellement sur les principes de détermination du trafic pondéral équivalent, le choix des structures et des couches de roulement en fonction de critères jugés déterminants. Finalement, des recommandations pour le traitement des zones de transition sont proposées. Les recommandations peuvent servir de base à la mise à jour des normes SN 640 320, SN 640 324, et SN 640 461.

Atteinte des objectifs :

L'objectif principal du projet, à savoir la proposition de recommandations pour la conception des chaussées pour arrêts et voies de bus est atteint.

Ces recommandations peuvent être mise en application après une intégration dans les normes SN 640 320, SN 640 324 et SN 640 461, ou dans un guide de bonnes pratiques pour chaussées pour arrêts et voies de bus.

Déductions et recommandations :

Les résultats du projet peuvent être résumés dans les recommandations principales suivantes:

- 1) Importance d'une évaluation complète de la charge de trafic par:
 - 1.a) Qualification des facteurs d'équivalence moyens des véhicules en fonction de leur configuration et de leur taux de remplissage moyen, selon les formules proposées dans le rapport.
 - 1.b) Les facteurs d'équivalence seront déterminés en décomposant si nécessaire la journée en périodes de fréquentation représentatives (périodes de pointe et périodes creuses).
 - 1.c) Majoration des facteurs d'équivalence par des coefficients dépendants de la largeur de la voie et de la vitesse de circulation (distinction entre l'arrêt et la voie de bus).
- 3) Choix de la structure de chaussée et du type de couche de roulement selon des critères déterminants (classe de trafic, coût et délai de construction, facilité de réparation, présence de réseaux souterrains, problématique du bruit routier, etc.).
- 4) Proposition d'étapes de construction permettant un traitement optimal des zones de transition dans le cas de chaussées rigides ou souples, et dans le cas de la réfection de la surface de l'arrêt de bus uniquement (sans zones de transition).

Publications :

Aucune

Chef/cheffe de projet :

Nom : Ould Henia

Prénom : Mehdi

Service, entreprise, institut : Nibuxs Sàrl

Signature du chef/de la cheffe de projet :





Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Die Forschungsziele wurden im wesentlichen erreicht. Die Mischung aus Erfahrungen aus der Praxis, theoretischen Analysemethoden und der Forschung an drei konkreten Objekten hat zu einer Vielzahl an interessanten Erkenntnissen geführt.

Da von jeder Konstruktionsweise nur ein Testfeld zu Verfügung stand, war es besonders wichtig, zwischen objektspezifischem Verhalten und der generellen Eignung einer Konstruktionsweise zu unterscheiden. So konnte zum Beispiel aufgezeigt werden, dass ein beim konkreten Objekt festgestellter mangelnder Schichtverbund nicht zwingend die ganze Konstruktionsweise in Frage stellen muss. Vielmehr ergaben sich so auch praxisdienliche Hinweise, worauf beim Bau speziell geachtet werden muss.

Mise en oeuvre :

Für die Praxis bietet der Forschungsbericht einen Überblick über bewährte Konstruktionsweisen, wie sie im In- und Ausland eingesetzt werden. Der Forschungsbericht bietet Ansätze zur gezielten Evaluation der prognostizierten Verkehrsbelastung einer Bushaltestelle. Die Forschung gibt Hinweise, worauf bei einer baulichen Umsetzung der getesteten Konstruktionsweisen besonders geachtet werden muss.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Mit Teststrecken, die andere Konstruktionsweisen berücksichtigen, könnten zusätzliche Lösungsansätze genauer geprüft werden. Mit Teststrecken, die ähnliche oder die gleichen Konstruktionsweisen berücksichtigen, wie diejenigen beim Forschungsprojekt, könnten die gefundenen Erkenntnisse weiter plausibilisiert und verfeinert werden.

Influence sur les normes :

Erkenntnisse aus der Forschung können bei den folgenden Normen berücksichtigt werden: SN 640 320, SN 640 324 und SN 640 461. Es liegt bei den zuständigen NFKs, ob sie das als zweckdienlich erachten. Es ist auch denkbar, die Forschungsergebnisse für eine Art Handbuch zu nutzen, das auch baupraktische Hinweise liefert.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : *Horat* Prénom : *Martin*

Service, entreprise, institut : *Stadt Zürich, Tiefbauamt*

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

[Signature]

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur notre site www.astra.admin.ch (Services --> Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).