



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

Capacités utilisées des giratoires en situation saturée

Leistungsfähigkeit stark belasteter Kreisel

Capacity of roundabouts under congested situations
Capacità utilizzate nelle rotatorie in situazioni sature

Transitec Ingénieurs-Conseils SA
Christian Hänggi
Timothée Vincent
Eva Vontobel
Justine Menu

**Projet de recherche VSS 2018/231 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Mai 2023

1748

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

Capacités utilisées des giratoires en situation saturée

Leistungsfähigkeit stark belasteter Kreisel

Capacity of roundabouts under congested situations
Capacità utilizzate nelle rotatorie in situazioni sature

Transitec Ingénieurs-Conseils SA
Christian Hänggi
Timothée Vincent
Eva Vontobel
Justine Menu

**Projet de recherche VSS 2018/231 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Mai 2023

1748

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Gestion de projet

Christian Hänggi
Timothée Vincent

Collaboratrices

Eva Vontobel
Justine Menu

Commission de suivi

Président

David Cuttelod

Membres

Lorenza Passardi Gianola
Roman Zürcher
Alain Broye
Mariano Franco
Carsten Hagedorn
Micaël Tille
Emanuele Giovannacci

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> .

Sommaire

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	11
Summary	15
1 Introduction	19
1.1 Contexte	19
1.1.1 L'évolution des besoins	19
1.1.2 L'intérêt maintenu pour le calcul de capacités	20
1.1.3 Problématiques en lien avec les méthodes actuelles	20
1.2 Buts du projet de recherche	21
1.3 Limites du projet de recherche	21
1.4 Déroulement du projet de recherche	22
1.5 Structure du rapport de recherche	24
PARTIE A - Vision globale	25
2 Diagnostic de la méthodologie actuelle	27
2.1 Description de la méthodologie la plus classique	27
2.2 Evaluation des pratiques actuelles	29
2.2.1 Une méthodologie simple et bien diffusée	29
2.2.2 Un champ d'application limité	29
2.2.3 Un focus inadapté	30
2.2.4 Des analyses volatiles, qui manquent de calibrage avec le terrain	33
2.2.5 Des résultats parfois peu parlants	35
2.3 Synthèse des besoins d'amélioration	36
3 Nouvelle méthodologie proposée	37
3.1 Une méthodologie générale et trois méthodes de calcul	37
3.2 Les différentes étapes de la méthodologie	37
3.2.1 Etape 1 : compréhension du cas d'étude et définition du protocole	38
3.2.2 Etape 2 : collecte des données et calculs	39
3.2.3 Etape 3 : calibrage	40
3.2.4 Etape 4 : interprétation	40
3.3 La prise en compte de la saturation dans la méthodologie	40
3.4 Application aux situations futures projetées	41
PARTIE B - Approfondissements thématiques	43
4 Etape 1 – Définir le cadre spatio-temporel des analyses	45
4.1 Espace : périmètre d'analyse	45
4.2 Temps : période analysée et résolution	47
4.3 Influence de la multimodalité	53
4.4 Trafic déterminant	54
4.4.1 Comparaison entre demande satisfaite et demande exprimée	54
4.4.2 Vision par branche et vision par voie	55
4.4.3 L'influence du flux sortant	56
5 Etape 2a – Recueillir les données de base nécessaires aux analyses	59
5.1 Définir le protocole expérimental	59
5.2 Effectuer le traitement logiciel	60

6	Etape 2b - Tenir compte des facteurs de congestion externes au giratoire	63
6.1	Influence des piétons	63
6.2	Influence des carrefours en aval : les situations avec blocage de l'anneau	64
7	Etape 2c – Produire les estimations de capacités.....	67
7.1	Capacité utilisée : définition	67
7.2	Méthodes empiriques par régression.....	67
7.2.1	Les limites d'applicabilité.....	69
7.2.2	Conclusions	71
7.3	La théorie de « gap acceptance »	71
7.3.1	La charge de trafic à l'anneau et la répartition des créneaux	72
7.3.2	Critical gap	73
7.3.3	Follow-up time	75
7.3.4	Les points forts de la théorie	76
7.3.5	Les faiblesses de la théorie.....	76
7.3.6	Conclusions	76
7.4	La simulation	77
7.4.1	Les points forts de la simulation.....	77
7.4.2	Les faiblesses de la simulation	77
7.4.3	Conclusions	77
7.5	Méthode déterministe.....	77
7.5.1	Les points forts de la théorie	78
7.5.2	Les faiblesses de la théorie.....	79
7.5.3	Conclusions	79
7.6	Le rôle de la vitesse	79
8	Etape 2d – Produire les indicateurs pertinents.....	81
8.1	Temps d'attente et files d'attente	81
8.1.1	Définition et estimation d'une file d'attente	81
8.2	Temps d'attente et temps de parcours	83
8.3	Densité de trafic	85
9	Etape 3 – Calibrer les analyses théoriques sur la base des relevés de terrain.....	87
	PARTIE C - Synthèse, conclusions et suites à donner	89
10	Synthèse	91
11	Conclusions et recommandations	92
11.1	Revue des buts du projet de recherche et conclusions	92
11.2	Recommandations pour aller vers un projet de norme	94
12	Recherches restant à mener	95
17	Glossaire	181
18	Bibliographie	183
19	Clôture du projet	185

Résumé

Problématique et buts de la recherche

Une grande partie des outils d'estimation de capacité utilisée des carrefours a été développée à partir des années 80-90, en plein essor du trafic automobile et à l'époque des grandes infrastructures routières. Jusqu'à récemment, les études prévoyaient des charges de trafic de dimensionnement futures, sur la base des taux d'accroissement observés dans le passé. Et il s'agissait alors d'estimer si les carrefours disposaient ou non de réserves de capacité pour « écouler le trafic ». Ce verdict était au cœur de nombreux arbitrages concernant les infrastructures et a pu conduire, en général, à élargir les infrastructures routières pour en assurer un bon écoulement, même en heure de pointe.

Depuis lors, les villes suisses ont connu une importante croissance et la planification des transports se fait désormais selon des modalités d'accessibilité multimodale. Il arrive régulièrement que les périodes de pointe durent plusieurs heures dans les grandes agglomérations, notamment avec une fusion des hyperpointes scolaires, pendulaires et commerciales. Alors que les requalifications de l'espace routier diminuent de plus en plus régulièrement les capacités en ville, certains projets autoroutiers continuent sur leur lancée, ce qui crée d'importants contrastes de capacité aux entrées de ville. Les plans climats (dont beaucoup sont encore en cours d'élaboration) visent une diminution importante du trafic routier, ce qui génère déjà l'arrêt de certains projets routiers.

En conséquence, il est à prévoir que de nombreuses situations de saturation / congestion du trafic se produisent de plus en plus régulièrement. Alors que l'ingénierie du trafic se consacrait principalement à son bon écoulement, les outils développés à l'époque ne permettent pas de bien satisfaire aux nouveaux besoins, qui sont de développer une ingénierie de gestion de la congestion.

Un besoin particulier a été identifié pour les giratoires en situation saturée, car contrairement aux carrefours à feux, les files d'attente ne sont pas maîtrisées dans les giratoires. Ainsi, une analyse critique des avantages et inconvénients des calculs de capacité pour les giratoires a été initiée et de nombreuses lacunes sont apparues. De nombreux cas d'étude ont permis de relever le besoin de nouvelles méthodes plus polyvalentes pour les giratoires en situation saturée.

Le présent projet de recherche a été entrepris au début de l'année 2019, juste avant l'épidémie de coronavirus. Les buts du projet de recherche sont les suivants :

- Dresser un diagnostic des forces et faiblesses des méthodes actuelles ;
- Identifier les particularités des situations saturées qui font qu'une réflexion classique n'est plus valable ;
- Explorer de nouvelles méthodes pour évaluer la capacité d'écoulement et générer des indicateurs descriptifs du fonctionnement des giratoires. Cette méthode devrait être applicable à un grand nombre de carrefours et d'états de trafic ;
- Tester ces méthodes sur le terrain et en tirer des enseignements ;
- Fournir une méthodologie adaptée aux situations saturées, permettant d'aller vers la concrétisation d'un projet de norme lors de prochaines étapes.

Contexte technologique et investigations menées

Cette attitude d'ouverture et d'exploration n'aurait sans doute pas été fructueuse sans les apports des nouvelles technologies de traitement vidéo automatisée par des logiciels. Rappelons ici que les capacités de traitement vidéo ont été fortement décuplées par le machine-learning, la croissance des puissances informatiques. Mais aussi pour répondre aux attentes de puissantes compagnies en termes de sécurité (par exemple dans les aéroports) ou pour le développement des véhicules autonomes.

Ainsi, le traitement automatisé des vidéos a rendu crédible un déploiement important de caméras sur le terrain pour produire des diagnostics enrichis, avec détection et chronométrage véhicule par véhicule. Les données produites sont très riches, très lourdes aussi, ce qui implique des capacités de traitement de type « big data ». Grâce à une combinaison de compétences humaines et de moyens informatiques, le projet de recherche a pu collecter et traiter de telles données pour quatre cas d'études à Brig (VS), Bulle (FR), Belp (BE) et Bussigny (VD).

Les investigations menées ont permis de mesurer les flux écoulés, les flux souhaitant s'écouler, les remontées de files d'attente, les vitesses et densités de trafic, les temps de parcours, les créneaux inter véhiculaires entre les véhicules de l'anneau, etc. A partir de ces données, le projet de recherche s'est attaché à explorer les méthodes « gap acceptance », qui considèrent les créneaux inter véhiculaire du flux prioritaire comme étant « l'offre disponible » pour l'insertion. Ces méthodes sont méconnues en Suisse alors qu'elles bénéficient d'un solide socle littéraire scientifique.

Ainsi, les investigations menées ont permis d'interroger :

- La méthodologie générale, c'est-à-dire la façon dont s'organise une étude de cas ;
- Les méthodes de calculs, avec la mise à l'essai des méthodes « gap acceptance » mais également l'élaboration d'une méthode inédite et empirique, nommée « méthode déterministe » ;
- La façon de standardiser les paramètres ou de les obtenir pour le cas d'étude spécifique ;
- La façon de produire des résultats théoriques et de les comparer avec les valeurs mesurables sur le terrain ;
- La façon de présenter les résultats théoriques en fournissant plusieurs indicateurs, sur une large plage de temps et de façon dynamique, mais également en fournissant un indicateur de sensibilité.

Principales conclusions

Les conclusions du projet de recherche, listées ci-dessous, permettent d'avancer clairement vers une autre pratique des études de trafic dans les situations saturées :

- Avant d'aller compter les charges de trafic sur le terrain, il faut se renseigner sur l'état de trafic, identifier les caractéristiques du réseau routier à proximité et la présence éventuelle de carrefours générant des files pouvant refouler dans le giratoire étudié. Cela permet de cerner correctement le périmètre d'analyse ;
- Mais surtout, il faut se questionner sur les buts de l'étude et les indicateurs que l'on souhaite produire et le niveau de précision attendu. En effet, le protocole expérimental devra être adapté en conséquence ;
- Les flux doivent être mesurés de manière à garder l'information de la répartition modale, garder toutes les heures de comptages du début à la fin de la période de pointe et garder une bonne résolution temporelle à 5' ou à 15' ;
- Avant de transformer les flux multimodaux en unités-véhicules par heure, il est bon de veiller au comportement sur le terrain des différents types de véhicules ;
- Il est préférable d'utiliser plusieurs méthodes de calculs et de les comparer : des méthodes par régression (TEA, VSS) et les méthodes « gap acceptance » basées sur les modèles américains et allemands. Dans tous les cas, il est préférable de faire varier les paramètres d'entrée d'environ 10% dans un sens et dans l'autre pour voir l'effet sur le résultat et éviter de donner une fausse impression de précision (analyse de sensibilité) ;
- Si l'étude est très exigeante en termes de précision, il peut être utile de déterminer les paramètres locaux : la courbe de régression de la branche pour les méthodes TEA et VSS, ou les paramètres locaux du « critical gap » et du « follow-up time » pour les méthodes par créneau d'insertion ;
- De même, il est souvent très utile de comparer les résultats des remontées de files d'attente ou des temps d'attente avec les mesures sur le terrain, pour vérifier que les méthodes de calculs soient fidèles ;

- Lorsqu'une congestion dans l'anneau se produit à cause d'un refoulement en aval, ces épisodes doivent être détectés ou anticipés car les méthodes de calculs classiques sont alors invalides. Il faut alors considérer que la capacité est nulle ou qu'une capacité « de courtoisie » permet tout de même aux véhicules en insertion de passer entre deux véhicules à l'arrêt dans l'anneau ;
- Pour les giratoires à deux voies dans l'anneau ou deux voies en entrée, il est très utile de compter les flux et de produire un calcul de capacité pour chacune des voies, puis de vérifier si les remontées de files de l'une gênent l'autre ou pas. En effet, les longueurs de présélections ne sont pas questionnées dans les méthodes actuelles mais elles peuvent faire l'objet d'un dimensionnement.

Besoins supplémentaires de recherche

Pour aller vers une large utilisation des méthodes « gap acceptance » en Suisse, il est nécessaire de procéder à une campagne de mesures qui pourra ensuite fournir des valeurs standards pour les paramètres-clés. Certaines incertitudes qui n'ont pas pu être approfondies dans cette recherche devront également être levées. En particulier, les sujets suivants doivent être approfondis : l'influence de la vitesse dans l'anneau ainsi que le lien entre géométrie et vitesse des véhicules, l'effet du flux sortant, la part du flux intérieur à considérer dans les giratoires à deux voies dans l'anneau.

La vitesse des véhicules prioritaires dans l'anneau semble avoir un effet sur la durée des créneaux qui seront acceptés ou refusés. En effet, une marge de sécurité doit être prise si les véhicules prioritaires roulent plus vite. Même si cet effet est connu et documenté pour les céder-le-passage, il n'est pas considéré pour les giratoires. Pourtant, le potentiel semble important pour accroître les capacités d'écoulement grâce à une réduction de vitesse. Il est donc important de mieux étudier ce facteur d'influence.

Quant au flux gênant, il semble pouvoir aider l'insertion des véhicules dans certaines situations saturées. En effet, selon la répartition des charges dans l'anneau, le flux sortant peut gêner le flux qui est gênant pour l'insertion. Ce faisant, il aide l'insertion. Ce phénomène mérite d'être mieux décrit et nous incite à considérer les flux dans un giratoire selon leur provenance et pas uniquement selon qu'ils circulent dans l'anneau ou qu'ils sortent. A l'inverse, si les vitesses sont élevées, il se peut que le flux sortant soit confondu par les automobilistes en insertion avec un flux qui pourrait continuer à circuler dans l'anneau. Cet effet pourrait être renforcé par la non-utilisation du clignotant par les véhicules sortants. Il apparaît nécessaire de réinterroger les effets du flux gênant avec plus de nuance et grâce aux méthodes gap acceptance et au traitement vidéo.

Enfin, les estimations de capacités utilisées dans les giratoire à deux voies dans l'anneau peuvent être approfondies grâce aux analyses vidéos. En effet, il est possible de procéder à des observations et d'en sortir des statistiques pour savoir plus précisément dans quels cas le flux intérieur est totalement, partiellement ou pas du tout gênant pour les flux en insertion. Cela permettrait d'affiner notre compréhension des modèles de capacité.

Prise de recul

Il peut sembler peu utile de vouloir développer une approche théorique très précise basée sur une compréhension fine des comportements des usagers. En effet, il arrive souvent que les spécialistes doivent utiliser les outils de capacité utilisée pour faire des évaluations sommaires appliquées à des situations futures contenant des hypothèses très incertaines. Il serait donc peu cohérent de vouloir disposer d'analyses très précises.

Néanmoins, dans certains cas actuels, des giratoires sont soumis à d'importantes contraintes et on dispose d'une base suffisante pour établir un diagnostic solide. Une meilleure appréciation peut permettre d'éviter de construire des infrastructures onéreuses telles que des passages inférieurs, si on dispose de tous les leviers pour optimiser leur fonctionnement.

Zusammenfassung

Problemstellung und Ziele der Forschung

Ein Großteil der Werkzeuge zur Abschätzung der genutzten Kapazität von Knotenpunkten wurde in den 80er und 90er Jahren entwickelt, als der Autoverkehr boomte und große Straßeninfrastrukturen entstanden. Bis vor kurzem wurden in den Studien zukünftige Bemessungsverkehrslasten auf der Grundlage der in der Vergangenheit beobachteten Zuwachsraten prognostiziert. Und dann ging es darum, abzuschätzen, ob die Kreuzungen über Kapazitätsreserven verfügten, um den Verkehr "abzuwickeln" oder nicht. Dieses Urteil stand im Mittelpunkt vieler Infrastrukturentscheidungen und konnte im Allgemeinen dazu führen, dass die Straßeninfrastruktur ausgebaut wurde, um einen reibungslosen Verkehrsfluss auch in der Hauptverkehrszeit zu gewährleisten.

Seitdem sind die Schweizer Städte stark gewachsen, und bei der Verkehrsplanung wird nun auf eine multimodale Erreichbarkeit geachtet. Es kommt regelmäßig vor, dass die Spitzenzeiten in den großen Ballungsräumen mehrere Stunden dauern, insbesondere bei einer Verschmelzung der Hyperspitzen von Schul-, Pendler- und Geschäftsverkehr. Während die Neuqualifizierung des Straßenraums die Kapazitäten in den Städten immer regelmäßiger verringert, setzen einige Autobahnprojekte ihren Weg fort, was zu erheblichen Kapazitätskontrasten an den Stadteingängen führt. Die Klimaschutzpläne (von denen viele noch in Arbeit sind) zielen auf eine deutliche Verringerung des Straßenverkehrs ab, was bereits dazu führt, dass einige Straßenbauprojekte gestoppt werden.

Infolgedessen ist damit zu rechnen, dass es immer regelmäßiger zu zahlreichen Überlastungs-/Stauungssituationen kommt. Während sich die Verkehrstechnik hauptsächlich mit dem reibungslosen Ablauf des Verkehrs beschäftigt, können die damals entwickelten Werkzeuge den neuen Bedarf, nämlich die Entwicklung einer Technik für das Staumanagement, nicht gut erfüllen.

Ein besonderer Bedarf wurde für Kreisverkehre in überlasteten Situationen festgestellt, da im Gegensatz zu Ampelkreuzungen die Warteschlangen in Kreisverkehren nicht beherrscht werden. So wurde eine kritische Analyse der Vor- und Nachteile von Kapazitätsberechnungen für Kreisverkehre eingeleitet, bei der zahlreiche Lücken zutage traten. Zahlreiche Fallstudien haben den Bedarf an neuen, vielseitigeren Methoden für Kreisverkehre in überlasteten Situationen aufgezeigt.

Vor diesem Hintergrund wurde das vorliegende Forschungsprojekt Anfang 2019, kurz vor dem Ausbruch des Coronavirus, in Angriff genommen. Die Ziele des Forschungsprojekts sind folgende:

- Eine Diagnose der Stärken und Schwächen der aktuellen Methoden erstellen ;
- Ermittlung der Besonderheiten gesättigter Situationen, die dazu führen, dass herkömmliche Überlegungen nicht mehr greifen ;
- Neue Methoden zur Bewertung der Abflusskapazität und zur Generierung von beschreibenden Indikatoren für die Funktionsweise von Kreisverkehren erforschen. Diese Methode sollte auf eine Vielzahl von Knotenpunkten und Verkehrszuständen (flüssig / überlastet) anwendbar sein;
- Diese Methoden in der Praxis testen und zahlreiche Erkenntnisse daraus ziehen ;
- Bereitstellung einer für überlastete Situationen geeigneten Methode, die es ermöglicht, in den nächsten Schritten auf die Konkretisierung eines Normprojekts hinzuarbeiten.
- Technischer Hintergrund und durchgeführte Untersuchungen
- Diese offene und erforschende Haltung wäre ohne den Beitrag der neuen Technologien zur automatisierten Videobearbeitung durch Software wahrscheinlich nicht erfolgreich gewesen. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass die Kapazitäten der Videoverarbeitung durch Machine Learning, das Wachstum

der Computerleistung, stark verzehnfacht wurden. Aber auch, um die Erwartungen mächtiger Unternehmen in Bezug auf die Sicherheit (z. B. auf Flughäfen) oder die Entwicklung autonomer Fahrzeuge zu erfüllen.

So hat die automatisierte Videoverarbeitung einen umfangreichen Einsatz von Kameras vor Ort glaubwürdig gemacht, um angereicherte Diagnosen zu erstellen, mit Erkennung und Zeitmessung von Fahrzeug zu Fahrzeug. Die erzeugten Daten sind sehr reichhaltig, aber auch sehr schwerfällig, was die Verarbeitung von "Big Data" voraussetzt. Dank einer Kombination aus menschlichen Kompetenzen und Informatikmitteln konnte das Forschungsprojekt solche Daten für vier Fallstudien in Brig (VS), Bulle (FR), Belp (BE) und Bussigny (VD) sammeln und verarbeiten.

Die durchgeführten Untersuchungen ermöglichten es, von Fall zu Fall die abfließenden Ströme, die Ströme, die abfließen wollen, die Aufwärtsbewegungen der Warteschlangen, die Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten, die Fahrzeiten, die Slots zwischen den Fahrzeugen des Rings usw. zu messen. Ausgehend von diesen Daten konzentrierte sich das Forschungsprojekt auf die Erforschung von "Gap Acceptance"-Methoden, bei denen die Inter-Vehicle Slots des vorrangigen Verkehrsstroms als "verfügbares Angebot" für die Einfädelung betrachtet werden. Diese Methoden sind in der Schweiz wenig bekannt, obwohl sie auf einer soliden wissenschaftlichen Literaturgrundlage beruhen und in zahlreichen Ländern angewandt werden.

So wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen folgende Fragen gestellt:

- Die allgemeine Methodik, d.h. die Art und Weise, wie eine Fallstudie organisiert wird ;
- Die Berechnungsmethoden, wobei die "gap acceptance"-Methode getestet wurde, aber auch die Entwicklung einer neuen, empirischen Methode, die als "deterministische Methode" bezeichnet wird;
- Die Art und Weise, wie man Parameter standardisiert oder sie für die spezifische Fallstudie erhält ;
- Die Art und Weise, wie man theoretische Ergebnisse erzeugt und sie mit den messbaren Werten im Feld vergleicht ;
- Die Art und Weise, wie die theoretischen Ergebnisse dargestellt werden, indem mehrere Indikatoren, über einen großen Zeitbereich und dynamisch, aber auch mit einem Sensitivitätsindikator geliefert werden.

Wichtigste Schlussfolgerungen

Die Schlussfolgerungen des Forschungsprojekts ermöglichen klare Fortschritte in Richtung einer anderen Praxis von Verkehrsstudien in gesättigten Situationen. Diese werden im Folgenden aufgelistet:

- Bevor man die Verkehrsbelastung vor Ort zählen geht, sollte man sich über den Verkehrszustand informieren, ein eventuell komplexes "Straßensystem" mit Rückstau von einem Konfliktpunkt zum anderen identifizieren ;
- Vor allem aber muss man sich fragen, was die Ziele der Studie sind, welche Indikatoren man produzieren möchte und welcher Grad an Genauigkeit erwartet wird. In der Tat muss das Versuchsprotokoll entsprechend angepasst werden;
- Die Verkehrsströme müssen reichhaltig gemessen werden, d. h. man muss die Informationen über den Modal Split beibehalten, alle Zählzeiten vom Beginn bis zum Ende der Spitzenzeit beibehalten und eine gute zeitliche Auflösung von 5' oder 15' beibehalten;
- Bevor man multimodale Verkehrsströme in Fahrzeugeinheiten pro Stunde umwandelt, sollte man auf das Verhalten der verschiedenen Fahrzeugtypen vor Ort achten ;
- Es ist besser, mehrere Berechnungsmethoden zu verwenden und sie zu vergleichen: TEA, VSS und die "gap acceptance"-Methoden des amerikanischen HCM oder des deutschen HBS. In jedem Fall ist es besser, die Eingabeparameter

- um etwa 10% hin und her zu variieren, um die Auswirkungen auf das Ergebnis zu sehen und einen falschen Eindruck von Genauigkeit zu vermeiden ;
- Wenn die Studie sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit stellt, kann es hilfreich sein, die lokalen Parameter zu bestimmen: die Regressionskurve des Zweigs bei TEA- und VSS-Methoden oder die lokalen Parameter des "critical gap" und der "follow-up time" bei Slot-in-Methoden ;
- Ebenso ist es oft sehr hilfreich, die Ergebnisse der Eskalationen von Warteschlangen oder Wartezeiten mit den Messungen vor Ort zu vergleichen, um zu überprüfen, ob die Berechnungsmethoden getreu sind ;
- Wenn ein Engpass im Ring aufgrund von Rückstau im Downstream auftritt, müssen diese Episoden erkannt oder antizipiert werden, da die herkömmlichen Berechnungsmethoden dann ungültig sind. In diesem Fall muss davon ausgegangen werden, dass die Kapazität Null ist oder dass eine "Höflichkeitskapazität" es einfädelnden Fahrzeugen dennoch ermöglicht, zwischen zwei im Ring stehenden Fahrzeugen hindurchzufahren;
- Bei Kreisverkehren mit zwei Spuren im Ring oder zwei Spuren in der Einfahrt ist es sehr nützlich, die Verkehrsströme zu zählen und eine Kapazitätsberechnung für jede der Spuren zu erstellen und dann zu prüfen, ob die Aufwärtsspur der einen Spur die andere behindert oder nicht. Die Länge der Vorauswahlen wird in den aktuellen Methoden nicht hinterfragt, kann aber Gegenstand einer Dimensionierung sein.

Zusätzlicher Forschungsbedarf

Um in Richtung einer breiten Anwendung der "Gap Acceptance"-Methoden in der Schweiz zu gehen, scheint es notwendig, eine Messkampagne durchzuführen, die dann Standardwerte für die Schlüsselparameter liefern könnte. Es scheint auch notwendig, dass einige Unsicherheiten beseitigt werden, die in dieser Forschung nicht vertieft werden konnten.

Insbesondere sollten die folgenden Themen vertieft werden: der Einfluss der Geschwindigkeit im Ring, die Wirkung des ausgehenden Verkehrsflusses, der Anteil des inneren Verkehrsflusses, der bei zweispurigen Kreisverkehren im Ring zu berücksichtigen ist.

Die Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge im Ring scheint einen Einfluss auf die Dauer der Slots zu haben, die akzeptiert oder abgelehnt werden. In der Tat muss ein Sicherheitsabstand eingehalten werden, wenn die bevorrechtigten Fahrzeuge schneller fahren. Obwohl dieser Effekt bei Vorfahrtsregelungen bekannt und dokumentiert ist, wird er bei Kreisverkehren nicht berücksichtigt. Dabei scheint das Potenzial groß zu sein, die Abflusskapazität durch eine Geschwindigkeitsreduzierung zu erhöhen. Es scheint daher wichtig, diesen Einflussfaktor besser zu untersuchen.

Was den störenden Verkehrsfluss betrifft, so scheint er in bestimmten überlasteten Situationen das Einfädeln von Fahrzeugen unterstützen zu können. Denn je nach der Lastverteilung im Ring kann der abfließende Strom den Strom behindern, der für das Einfädeln hinderlich ist. Dadurch unterstützt er das Einfädeln. Dieses Phänomen sollte besser beschrieben werden und uns dazu veranlassen, die Verkehrsströme in einem Kreisverkehr nach ihrer Herkunft zu betrachten und nicht nur danach, ob sie in den Ring hinein oder aus dem Ring heraus fließen. Umgekehrt kann es bei hohen Geschwindigkeiten vorkommen, dass der ausfahrende Strom von den einfahrenden Autofahrern mit einem Strom verwechselt wird, der möglicherweise weiterhin im Ring fließt. Wir halten es für notwendig, die Auswirkungen des störenden Verkehrsflusses mit mehr Nuancen und mithilfe von Gap-Acceptance-Methoden und Videoverarbeitung erneut zu hinterfragen.

Schließlich können die Kapazitätsschätzungen, die in zweispurigen Kreisverkehren im Ring verwendet werden, mithilfe von Videoanalysen vertieft werden. Tatsächlich wäre es möglich, Beobachtungen zu machen und daraus Statistiken zu erstellen, um genauer zu wissen, in welchen Fällen der innere Strom ganz, teilweise oder gar nicht für die

einmündenden Ströme hinderlich ist. Dies würde unser Verständnis von Kapazitätsmodellen verfeinern.

Einen Schritt zurücktreten

Es mag wenig hilfreich erscheinen, einen sehr genauen theoretischen Ansatz entwickeln zu wollen, der auf einem genauen Verständnis des Nutzerverhaltens beruht. Tatsächlich kommt es häufig vor, dass Spezialisten die verwendeten Fähigkeitsinstrumente verwenden müssen, um summarische Bewertungen vorzunehmen, die auf zukünftige Situationen angewendet werden, die sehr unsichere Annahmen enthalten. Es wäre daher wenig konsequent, wenn man über sehr genaue Analysen verfügen wollte.

In einigen aktuellen Fällen sind Kreisverkehre jedoch erheblichen Belastungen ausgesetzt, und es gibt eine ausreichende Grundlage für eine solide Diagnose. Eine bessere Einschätzung kann dazu beitragen, den Bau teurer Infrastrukturen wie Unterführungen zu vermeiden, wenn man alle Hebel in der Hand hat, um ihre Funktionsweise zu optimieren.

Summary

Problem and research goals

Many of the tools used to estimate the capacity of junctions were developed in the 1980s and 1990s, during the boom in car traffic and the era of major road infrastructure. Until recently, the studies predicted future traffic loads based on the growth rates observed in the past. The aim then was to estimate whether or not junctions had the capacity reserves to "handle the traffic". This verdict was at the heart of many infrastructure trade-offs and generally led to the widening of road infrastructure to ensure good traffic flow, even during peak hours.

Since then, Swiss cities have grown significantly and transport planning is now based on multimodal accessibility. In large agglomerations, peak periods regularly last several hours, especially when school, commuter and commercial traffic merge. While road redesigns are increasingly reducing capacity in cities, some motorway projects are continuing to do so, creating significant capacity contrasts at city entrances. Climate plans (many of which are still being developed) aim for a significant reduction in road traffic, which is already causing some road projects to be halted.

As a result, it is to be expected that many situations of traffic saturation/congestion will occur more and more regularly. While traffic engineering used to focus on traffic flow, the tools developed at the time do not adequately address the new need to develop congestion management engineering.

A particular need was identified for roundabouts in a saturated situation, because unlike traffic light junctions, queues are not controlled in roundabouts. Thus, a critical analysis of the advantages and disadvantages of capacity calculations for roundabouts was initiated and many shortcomings were identified. Numerous case studies have shown the need for new, more versatile methods for roundabouts in saturated situations.

It is in this context that the present research project was undertaken in early 2019, just before the coronavirus outbreak. The aims of the research project are as follows:

- To diagnose the strengths and weaknesses of current methods;
- To identify the particularities of saturated situations that make conventional thinking no longer valid;
- To explore new methods to evaluate the flow capacity and generate descriptive indicators of the functioning of roundabouts. This method should be applicable to a large number of junctions and traffic states (fluid / congested);
- To test these methods in the field and draw many lessons from them;
- To provide a methodology adapted to congested situations, allowing the next steps to be taken towards the realisation of a draft standard.

Technological context and investigations carried out

This attitude of openness and exploration would undoubtedly not have been fruitful without the contribution of new technologies for automated video processing by software. Let us recall here that video processing capacities have been greatly increased by machine-learning and the growth in computing power. But also to meet the expectations of powerful companies in terms of security (for example in airports) or for the development of autonomous vehicles.

For example, automated video processing has made it credible to deploy large numbers of cameras in the field to produce enriched diagnosis, with detection and timing of each vehicle. The data produced is very rich, and also very heavy, which implies "big data" processing capabilities. Thanks to a combination of human skills and IT resources, the

research project was able to collect and process such data for four case studies in Brig (VS), Bulle (FR), Belp (BE) and Bussigny (VD).

The investigations carried out have made it possible to measure, from case to case, the flows that have taken place, the flows that wish to take place, the back-ups of queues, the speeds and densities of traffic, the journey times, the inter-vehicular slots between the vehicles in the ring, etc. Based on these data, the research project explored gap acceptance methods, which consider the inter-vehicular slots of the priority flow as the "available supply" for the insertion. These methods are not well known in Switzerland, although they have a solid scientific literature base and are used in many countries.

Thus, the investigations carried out have made it possible to question :

- The general methodology, i.e. the way in which a case study is organised;
- The calculation methods, with the testing of gap acceptance methods but also the development of a new empirical method, called "deterministic method";
- How to standardise the parameters or obtain them for the specific case study;
- How to produce theoretical results and compare them with measurable values in the field;
- How to present the theoretical results by providing several indicators, over a wide time range and in a dynamic way, but also by providing a sensitivity indicator.

Main conclusions

The conclusions of the research project clearly point towards a different practice of traffic studies in saturated situations. These are listed below:

- Before counting traffic loads in the field, it is necessary to find out about the traffic situation, to identify a possible complex "road system" with backups from one conflict point to another;
- But above all, it is necessary to question the aims of the study and the indicators that we wish to produce and the level of precision expected. Indeed, the experimental protocol will have to be adapted accordingly;
- The flows must be measured in a rich manner, i.e. the information on the modal split must be kept, all the counting times must be kept from the beginning to the end of the peak period and a good temporal resolution must be maintained at 5' or 15';
- Before transforming multimodal flows into vehicle units per hour, it is good to pay attention to the field behaviour of the different vehicle types;
- It is preferable to use several calculation methods and to compare them: TEA, VSS and the gap acceptance methods of the American HCM or the German HBS. In all cases, it is best to vary the input parameters by about 10% in either direction to see the effect on the result and to avoid giving a false impression of accuracy;
- If the study is very demanding in terms of accuracy, it may be useful to determine the local parameters: the branch regression curve for TEA and VSS methods, or the local parameters of the critical gap and follow-up time for gap acceptance methods;
- Similarly, it is often very useful to compare the results of queue feedback or waiting times with field measurements, to check that the calculation methods are reliable;
- When congestion in the ring occurs due to a backflow downstream, these episodes must be detected or anticipated as the classical calculation methods are then invalid. It is then necessary to consider that the capacity is zero or that a "courtesy" capacity still allows inserting vehicles to pass between two vehicles stopped in the ring;
- For roundabouts with two lanes in the ring or two lanes at the entrance, it is very useful to count the flows and produce a capacity calculation for each of the lanes, and then check whether or not the back-ups of one of the lanes hinder the other. Indeed, the length of preselection is not questioned in the current methods but it can be dimensioned.

Additional research needs

In order to move towards a wide use of gap acceptance methods in Switzerland, it seems necessary to carry out a measurement campaign which could then provide standard values for the key parameters. It also seems necessary that some uncertainties are removed, which could not be investigated in this research.

In particular, the following topics should be investigated further: the influence of the speed in the ring, the effect of the outgoing flow, the share of the internal flow to be considered in two-lane roundabouts in the ring.

The speed of priority vehicles in the ring seems to have an effect on the duration of the slots that will be accepted or refused. Indeed, a safety margin has to be taken if priority vehicles drive faster. Although this effect is known and documented for yield signs, it is not considered for roundabouts. However, there seems to be a great potential to increase the flow capacity through speed reduction. It therefore seems important to better study this influencing factor.

As for the obstructed flow, it seems to be able to help the insertion of vehicles in certain saturated situations. Indeed, depending on the distribution of loads in the ring, the outgoing flow can hinder the flow that is hindering insertion. In doing so, it helps insertion. This phenomenon deserves to be better described and should encourage us to consider the flows in a roundabout according to their origin and not only according to whether they circulate in the ring or whether they exit. On the other hand, if speeds are high, it is possible that the outgoing flow is confused by inserting motorists with a flow that could continue to circulate in the ring. It seems to us necessary to re-interview the effects of the obstructing flow with more nuance and thanks to gap acceptance methods and video processing.

Finally, the capacity estimates used in the two-lane roundabouts in the ring can be deepened thanks to video analysis. Indeed, it would be possible to carry out observations and produce statistics to know more precisely in which cases the interior flow is totally, partially or not obstructive at all for the inserting flows. This would help refine our understanding of capacity models.

Stepping back

It may seem unhelpful to develop a very precise theoretical approach based on a detailed understanding of user behavior. Indeed, it is often the case that specialists have to use capacity tools to make summary assessments applied to future situations containing very uncertain assumptions. It would therefore be inconsistent to have very precise analyses.

Nevertheless, in some current cases, roundabouts are subject to significant constraints and there is a sufficient basis to make a sound diagnosis. A better assessment may help to avoid the construction of costly infrastructure such as underpasses, if all the levers are available to optimize their operation.

1 Introduction

1.1 Contexte

1.1.1 L'évolution des besoins

Le dimensionnement des routes et des carrefours fait l'objet d'études d'ingénierie depuis le 20^{ème} siècle. Avec l'avènement de la voiture individuelle et l'augmentation du trafic routier à partir des années 50, des problématiques de circulation apparaissent. Considérées comme un frein pour le développement économique, on cherche alors à optimiser le débit des véhicules tout en laissant le flux s'écouler librement et en sécurité. **Les calculs de capacité permettent alors de dimensionner les carrefours dans cette optique d'écoulement facilité du trafic et de débit maximum.**

Ce souhait de fluidité et de débit a conduit à augmenter les capacités routières, et par un phénomène d'induction, le trafic a augmenté progressivement, atteignant chaque fois un nouvel état de congestion. Les tendances actuelles visent plutôt une diminution du trafic routier afin de réduire les nuisances associées (bruit, pollution, qualité de l'espace public). **L'objectif de faire passer le plus de véhicules possibles en augmentant la capacité d'un carrefour n'est plus compatible avec ces enjeux.** Il n'est pas non plus compatible avec l'espace urbain à disposition et avec les perspectives d'approvisionnement en énergie primaire. **En revanche, la recherche de fluidité perdure notamment dans les situations où les transports publics sont mixés avec la circulation générale.**

Ainsi, la mobilité est pensée de manière multimodale et systémique en tenant compte de tous les moyens de déplacement et de leurs externalités. Les récents Plans Climats (apparus au cours de ce projet de recherche) affichent des objectifs drastiques de réduction des kilomètres parcourus en voiture. Que ce soit via ces plans climat ou via de grands projets de requalification ou d'introduction de transports publics en site propre, **les ingénieurs en transports doivent régulièrement faire face à des situations saturées ou appelées à être saturées.**

Or **les outils développés dans le passé ne sont pas valables en situation saturée**, comme leurs concepteurs le précisent. Or, à défaut d'autres solutions, ces outils continuent à être appliqués tels quels. Un nouveau domaine apparaît alors au XXI^{ème} siècle : celui de l'ingénierie de la gestion de la congestion automobile et du report modal, par opposition à l'ingénierie du XX^{ème} siècle, centrée sur l'écoulement et la fluidité du trafic automobile.

Dans cette nouvelle approche, **la réserve de capacité pour écouler du trafic n'est plus l'élément central. Il s'agit plutôt de comprendre quels vont être les impacts d'un carrefour saturé sur les réseaux alentour** : remontées de files d'attente dans des carrefours-clés en amont, diminution de vitesse commerciale des bus éventuellement pris dans ces remontées, etc. Cette évaluation est très riche car une saturation génère toujours à la fois des gênes ou des complications à certains endroits, mais également des bénéfices à d'autres endroits, puisque le flux qui s'écoule est contraint.

En outre, il n'est plus possible de restreindre les analyses à un critère trop binaire « ça fonctionne » si la capacité utilisée (CU) est inférieure à 100% ou « ça ne fonctionne pas » si elle dépasse trop cette valeur, considérée dans le passé comme une limite. Les observations montrent qu'un giratoire ayant une CU supérieure à 100% peut fonctionner dans les faits. En outre, cette limite de 100% est finalement arbitraire car elle est basée sur l'heure : une saturation à 105% pendant une heure peut correspondre à une valeur de 90% sur 90 minutes. Cela dépend donc du point de vue que l'on se donne et de ce qui est considéré comme acceptable. Les ingénieurs ont donc besoin de pouvoir caractériser « comment cela fonctionne » à l'échelle de toute la période de pointe.

1.1.2 L'intérêt maintenu pour le calcul de capacités

Malgré cela, la notion de capacité utilisée reste centrale dans la littérature et dans toutes les formules utilisées pour les files d'attente ou les temps de parcours. Le présent projet de recherche vise donc à fournir des capacités utilisées plus justes, étalonnées et dynamiques, ainsi qu'à lui adjoindre d'autres indicateurs décrivant plus directement le fonctionnement des carrefours giratoires en situation saturée.

Avec un panel d'indicateurs centrés sur les flux (la demande) et les capacités d'écoulement théoriques (l'offre), les ingénieurs pourront continuer de répondre aux besoins suivants :

- évaluer et comprendre les dysfonctionnements actuels d'un carrefour ;
- estimer l'impact d'un projet (immobilier, report spatial) sur le fonctionnement d'un carrefour existant (modification de la demande) et évaluer son acceptabilité ;
- estimer le fonctionnement d'un nouveau carrefour ou d'un réaménagement sur un carrefour existant (modification de l'offre) et évaluer son acceptabilité.

1.1.3 Problématiques en lien avec les méthodes actuelles

Le calcul de capacité des carrefours giratoires peut être réalisé selon différentes méthodes qui varient d'un pays à l'autre. En Suisse, les méthodes d'estimation de la capacité utilisée ont été mises à jour par des normes VSS. Ce sont des méthodes dites « par régression », visant à identifier une « loi » à partir de données empiriques. Il existe plusieurs méthodes utilisant des formules différentes mais basées sur ce même principe : le guide suisse des giratoires, aussi appelé TEA, ainsi que la norme VSS en vigueur.

Ces formules sont utilisées de manière systématique pour les différents cas d'étude alors qu'elles ne sont pas applicables dans toutes les situations et en particulier, dans les situations saturées. Par ailleurs, elles ne tiennent pas toujours compte de certaines géométries telles que les anneaux à voies multiples, les grands diamètres ou des formes particulières. En effet, il n'y a pas assez de giratoires particuliers ou d'observations produites pour ces giratoires spécifiques, pour obtenir une courbe de régression.

Les formules, définies de manière expérimentale sont relativement peu précises car elles sont basées sur des courbes de régression devant refléter un nuage de point très dispersé. En outre, le choix des paramètres peut faire varier considérablement les résultats. Malgré cela, les méthodes ne produisent pas elles-mêmes de tests de sensibilité pour avertir l'utilisateur.trice de cette variance importante, produisant l'illusion d'une bonne précision. D'autre part, différentes formules obtenues par régression ne donneront pas les mêmes résultats de capacité utilisée.

Les résultats théoriques ne produisent pas d'indicateurs qui peuvent facilement être mesurés sur le terrain pour permettre une comparaison et un étalonnage. Ainsi, il est difficile d'établir un résultat consolidé, alliant la théorie aux observations.

Certains cas concrets amènent du doute et des difficultés d'interprétation, en particulier en situation saturée. Dans certains cas, les capacités utilisées sont relativement faibles et pourtant, d'importantes files existent sur le terrain, du moins temporairement. Cela fait donc douter quant au bienfondé de la théorie. Dans d'autres cas, la capacité utilisée dépasse 100% dans une situation actuelle, alors que tous les véhicules comptés ont été écoulés, donc cela voulait dire qu'ils pouvaient s'écouler et donc que la théorie était sous-dimensionnée par rapport à la pratique.

Au vu de ces différentes problématiques, il est difficile d'être confiant sur les résultats de capacité utilisée. S'il s'agit seulement de comparer des variantes, cela peut être utile, mais il peut arriver également que cela conduise à de mauvaises décisions en termes d'aménagement.

1.2 Buts du projet de recherche

Les buts du projet de recherche sont les suivants :

- Dresser un diagnostic des forces et faiblesses des méthodes actuelles ;
- Identifier les particularités des situations saturées qui font qu'une réflexion classique n'est plus valable ;
- Explorer de nouvelles méthodes pour évaluer la capacité d'écoulement et générer des indicateurs descriptifs du fonctionnement des giratoires. Cette méthode devrait être applicable à un grand nombre de carrefours et d'états de trafic (fluide / congestionné) ;
- Tester ces méthodes sur le terrain et en tirer de nombreux enseignements ;
- Fournir une méthodologie adaptée aux situations saturées, permettant d'aller vers la concrétisation d'un projet de norme lors de prochaines étapes.

Pour atteindre ces buts, le projet de recherche tire parti des nouvelles technologies, notamment le traitement vidéo semi-automatique. En effet, **des logiciels encore pionniers permettent de traiter de nombreuses heures de vidéo en fournissant des données précises sur chacun des véhicules de façon individuelle** : heures de passage, vitesse, type de véhicule.

Cette efficacité décuplée constitue une grande opportunité pour :

- réaliser des analyses propres à chaque carrefour, voire à chaque branche ou à chaque voie d'entrée – par opposition à des calculs standards ;
- identifier les phénomènes de ralentissement ou de blocage ;
- produire des analyses dynamiques, c'est-à-dire sur de grandes plages de temps et avec un pas de temps réduit.

1.3 Limites du projet de recherche

Le présent travail de recherche n'a pas vocation à couvrir absolument toutes les typologies possibles de giratoires mais plutôt à proposer des solutions pour les cas les plus communs non couverts aujourd'hui. Elle donne des clés pour s'adapter plus facilement au plus grand nombre de cas.

L'objectif n'est pas d'obtenir des capacités utilisées parfaitement fiables, mais plutôt d'augmenter la précision et la confiance dans les résultats, de permettre une analyse éclairée de ceux-ci, tout en étant conscient de leurs limites. Une des limites dans la précision est liée aux caméras et au traitement vidéo. Les caméras n'offrent pas toujours une résolution optimale et selon le moment de la journée et la météo, la lumière peut rendre l'image peu lisible. Cela ne facilite pas le traitement vidéo par les logiciels qui fournissent des résultats de comptage avec un certain pourcentage d'erreur.

Le travail de recherche a permis une interrogation en profondeur, ce qui implique qu'elle atteigne ses limites lorsqu'il s'agit de fournir une méthode simple et « clé en main ». La recherche n'a pas visé de produire un tableur, un abaque ou tout autre outil simple d'utilisation, qui aurait également constitué une « boîte noire ». Ainsi, certains protocoles expérimentaux ou calculs sont relativement lourds et détaillés. Pour certains types d'études, cette lourdeur pourrait être considérée comme repoussoir, mais il faut considérer que d'autres étapes seront nécessaires pour produire des outils faciles d'utilisation pour tout un chacun.

Le travail de recherche n'a pas permis d'évaluer un giratoire non existant (ex-ante) puis de confronter les estimations à la réalité (ex-post). En effet, nous nous sommes principalement concentrés sur l'évaluation de giratoires existants.

Une limite du projet de recherche a été dans le choix des cas d'étude : certains giratoires étaient moins saturés que prévu car les comptages ont dû avoir lieu pendant des périodes

« post-covid » avec moins de trafic. De même, il n'a pas été possible d'évaluer un giratoire avec d'importants flux piétons car il a fallu effectuer des choix.

Enfin, il n'a pas été possible de coordonner finement nos résultats avec ceux du projet de recherche sur les turbo-giratoires même si ces deux projets ont été menés en parallèle. Les approches étaient très différentes et cela n'avait pas été prévu.

Malgré ces limites du projet de recherche, les investigations réalisées ont permis d'atteindre les buts du projet de recherche et il apparaît clairement que d'autres recherches restent à mener.

1.4 Déroulement du projet de recherche

Le projet de recherche a démarré en janvier 2020, peu avant la mise en place des mesures sanitaires liées à l'épidémie de coronavirus. Cela a perturbé l'organisation des comptages tout comme le déroulement des séances de la commission de suivi, qui ont dû se tenir à distance en majorité.

Il nous semble utile de rappeler ici les grandes étapes du déroulement du projet :

- En première étape, une justification du projet de recherche a été faite : un cas concret a été utilisé pour montrer les limites des méthodes classiques par régression, tout en expliquant leur genèse ;
- En deuxième étape, les méthodes par « critical gaps » et l'approche systémique (voir plus loin) ont été présentées et des tests ont été réalisés sur des cas concrets, à Malley (giratoire de Provence) et Montreux (giratoire de la jonction autoroutière) ;
- En troisième étape, une liste de quatre cas d'études-cibles a été créée (voir ci-après), dans l'optique de traiter un large panel de situations. Le projet a avancé pas à pas pour produire les analyses pour chacun de ces cas d'études ;
- En quatrième étape, une méthodologie a été générée pour synthétiser les enseignements tirés de ces cas d'étude.

La structuration en quatre cas d'étude a permis de clarifier les différentes situations pouvant être rencontrées en général. Celles-ci sont représentées dans la figure ci-après et découlent d'une génération de variantes selon deux critères : le nombre de voies dans l'anneau et le fonctionnement, simple ou complexe. **Un fonctionnement est considéré comme complexe lorsqu'un blocage se produit par l'aval, entraînant une situation de congestion dans l'anneau.** Dans ces cas, les théories basées sur l'écoulement du trafic dans l'anneau ne fonctionnent plus et d'autres approches doivent être développées.

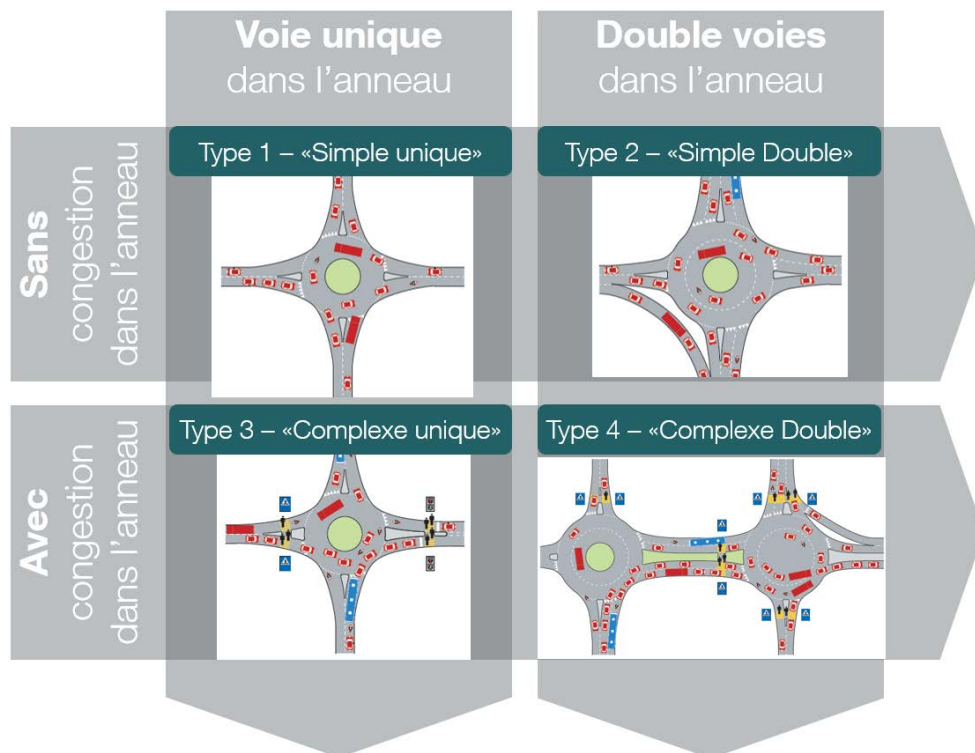


Fig. 1 Les différents cas de giratoires étudiés

Sur la base d'une recherche géographique en Suisse occidentale, visant des giratoires saturés correspondant à ces situations, les cas pratiques retenus ont été les suivants :

- **Le cas de Brig pour le type 1, c'est-à-dire un giratoire standard à une voie en entrée**, fortement saturé, présentant peu d'interactions avec les autres modes de transport ;
- **Le cas de Bulle pour le type 2, ie. un giratoire à deux voies en entrée**, fortement saturé, présentant peu d'interactions avec les autres modes de transport, permettant de bien étudier l'effet de la longueur des présélections ;
- **Le cas de Belp pour le type 3, ie. un giratoire en situation urbaine, avec une utilisation très multimodale** et en interaction avec des traversées piétonnes, pouvant générer des blocages ponctuels de l'anneau – cela n'a finalement pas été le cas le jour de nos relevés ;

Le cas de Bussigny pour le type 4, ie, un système de deux giratoires, congestionné par une file de véhicules provenant de l'aval. Un cas à Montreux a également été étudié afin d'analyser la génération de files d'attente, sur la base de vidéos de drones (provenant d'études Transitec antérieures).

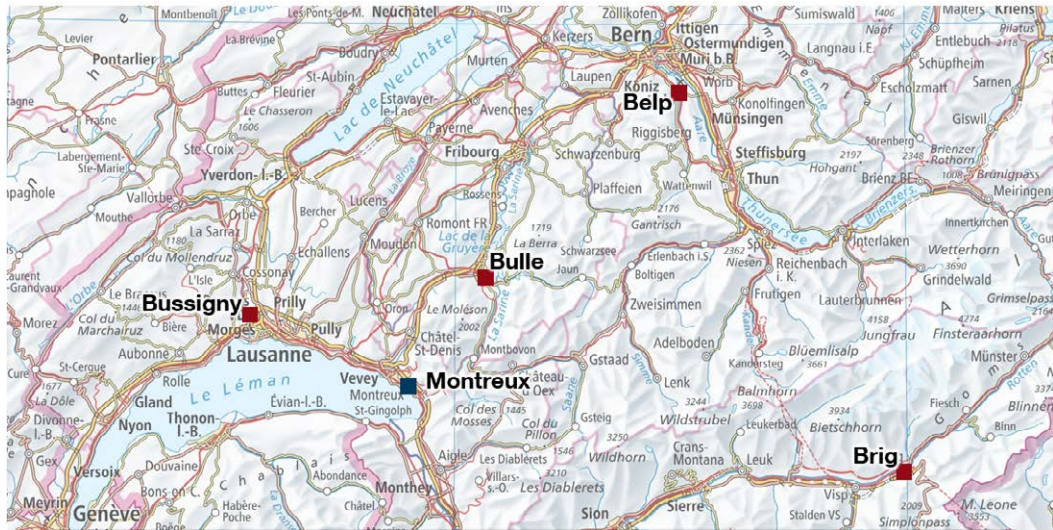


Fig. 2 Localisation des différents cas d'étude en Suisse occidentale

Le présent rapport de recherche n'a pas pour vocation de présenter les résultats détaillés de chacun des quatre cas d'étude, mais plutôt d'exposer une synthèse des enseignements obtenus et de proposer une nouvelle méthodologie. Les analyses produites pour ces cas d'étude sont toutefois très complètes et permettent de comprendre de façon concrète ce qui a été exploré. Elles sont présentées en annexe de ce rapport.

1.5 Structure du rapport de recherche

Le présent rapport de recherche est structuré en quatre parties, à savoir :

- PARTIE A : Vision globale ;
- PARTIE B : Approfondissements thématiques ;
- PARTIE C : Synthèse, conclusions et recommandations ;
- PARTIE D : Annexes.

Cette structure permettra au lecteur d'aborder les grands enjeux de la recherche avec les parties A et C, tout comme de rentrer plus dans le contenu technique avec la partie B, ou encore de creuser dans la matière produite au cours des cas d'études via la partie D.

PARTIE A - Vision globale

2 Diagnostic de la méthodologie actuelle

2.1 Description de la méthodologie la plus classique

Dans la plupart des études de circulation, la méthodologie employée est relativement simple, que ce soit pour des situations existantes ou des situations projetées. Celle-ci est illustrée ci-après et consiste à suivre les étapes décrites dans le texte qui suit la figure.

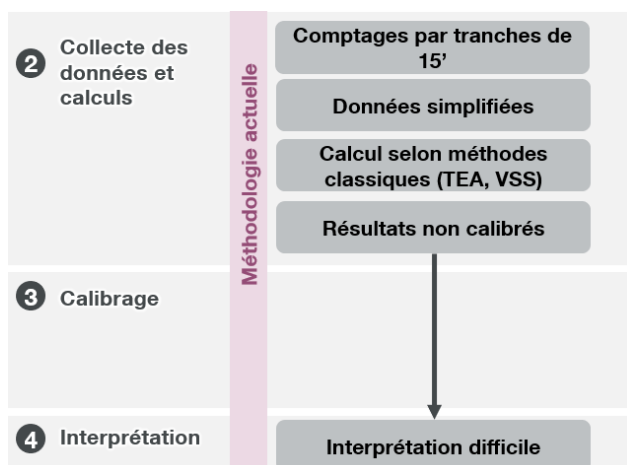


Fig. 3 Méthodologie classique pour le calcul de capacités utilisées de giratoires (8), (14)

1- Réalisation de comptages en entrée, à l'anneau et en sortie de giratoire pour obtenir des charges chaque 15 minutes.

Les comptages sont effectués pour chaque branche, souvent pendant 2 heures (ex : 16h30-18h30), par créneaux de 15 min. Ce sont en général des comptages directionnels par branche qui ne distinguent pas la répartition entre voies. Les piétons sur les traversées en entrée ou sortie peuvent également être comptés le cas échéant.

2- Détermination de l'heure de pointe et déduction de charges à l'heure de pointe

En fonction des charges aux 15 minutes obtenues sur plusieurs heures, l'heure de pointe est déterminée. Le critère est généralement d'identifier l'heure qui maximise les flux écoulés dans l'intersection, toutes branches confondues.

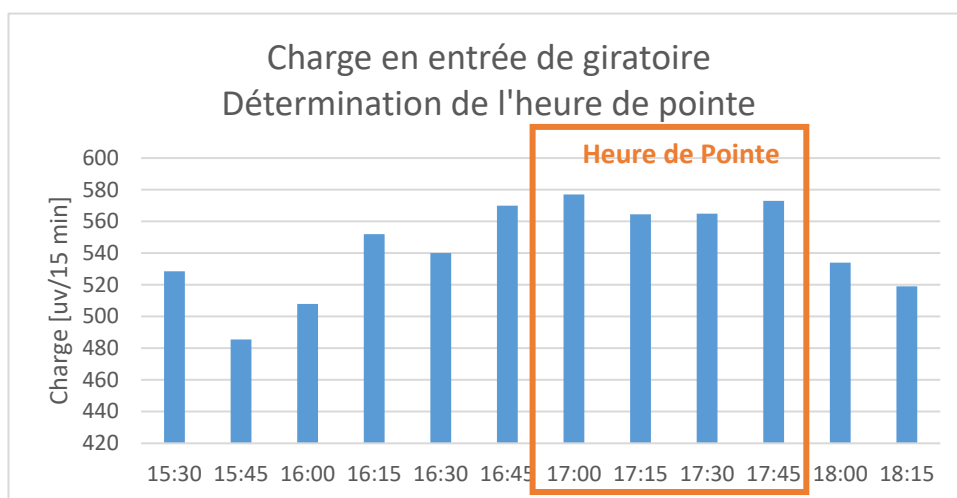


Fig. 4 Charges de trafic en fonction du temps et identification de l'heure de pointe

Une fois l'heure de pointe déterminée, seules les charges de ce créneau sont considérées et agrégées pour obtenir un plan de charge à l'heure.

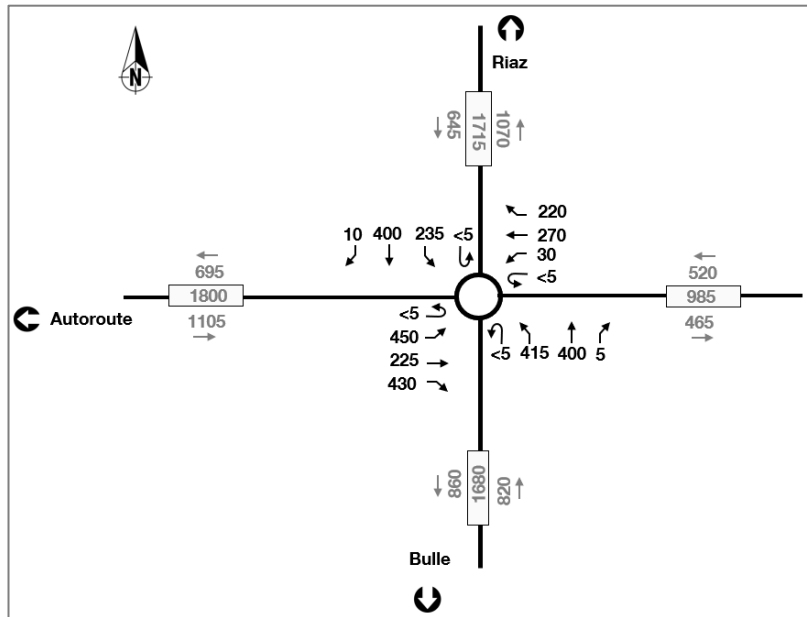


Fig. 5 Exemple de plans de charges directionnelles à l'heure de pointe (en uv/h)

3- Calcul de la capacité théorique par branche en utilisant une formule par régression (TEA ou VSS).

Une seule formule théorique est généralement utilisée (voir paragraphe 7.2 pour le détail des formules) Elle n'est pas confrontée à d'autres méthodes. Pour la TEA, les flux ne sont pas les seules données d'entrée : des paramètres sont déterminés pour décrire la configuration du giratoire : nombre de voies, distance entre les points de conflit, etc. Il est à noter que les mêmes caractéristiques ne conduiront pas toujours aux mêmes choix de paramètres selon la personne réalisant l'étude.

4- Déduction de la capacité utilisée et d'indicateurs supplémentaires selon la méthode

Les indicateurs fournis varient selon la méthode, mais toutes fournissent la capacité d'écoulement et la capacité utilisée, mais sans indiquer de taux d'erreur. Avec la VSS, on peut également obtenir des indicateurs donnant une idée du niveau de service pour l'utilisateur : temps d'attente moyen, longueur de file d'attente médiane, 95% ou 99%. Ces indicateurs ne sont pas forcément comparés à la réalité observée sur le terrain.

5- Interprétation des résultats

Les capacités utilisées sont généralement interprétées selon le modèle suivant :

- **CU < 75%** : il n'y a pas de problème. La circulation est fluide.
- **75% < CU < 85%** : de manière générale, la circulation est fluide mais des files peuvent se former ponctuellement dans les moments d'hyperpointe.
- **85% < CU < 100%** : on s'approche de la saturation. Des files sont observées de manière récurrente mais le trafic parvient tout de même à s'écouler sur l'heure.
- **> 100%** : la situation est saturée : la demande ne peut s'écouler sur l'heure. Des files d'attente conséquentes sont observées et il reste des files à la fin de l'heure.

Ces interprétations sont assez théoriques et ne correspondent pas toujours à ce qui peut être observé sur le terrain. En particulier, dans les cas où la CU calculée est supérieure à 100%, les observations de terrain montrent régulièrement que la situation n'est pas aussi problématique qu'attendu. Les seuils critiques considérés perdent alors de leur sens. Par ailleurs, le résultat obtenu par calcul théorique comporte des incertitudes. Finalement, il est assez difficile de dire si la situation est réellement problématique.

2.2 Evaluation des pratiques actuelles

L'analyse des pratiques actuelles les plus répandues permet de révéler des problématiques aussi bien au niveau de la démarche que dans l'interprétation des résultats, mais également des limitations dans les méthodes de calcul utilisées. Ces points forts et faibles peuvent être regroupés en cinq grandes catégories.

2.2.1 Une méthodologie simple et bien diffusée

Plusieurs avantages peuvent être signalés à propos des méthodes classiques, à savoir :

- Leur simplicité d'utilisation ;
- Leur diffusion large : elles sont utilisées de manière assez similaire dans toute la Suisse, donc elles peuvent faire foi ;
- Le fait qu'elles soient issues de campagnes de mesures en Suisse : elles sont globalement adaptées au contexte local, même si de grandes disparités peuvent exister entre le milieu urbain et le milieu rural, ou entre cantons ;

En revanche, les méthodes classiques présentent quatre limitations principales, en particulier en situation saturée, à savoir : leur champ d'application limité, leur focus trop restreint, le manque de calibrage avec le terrain et des indicateurs peu expressifs de la réalité des phénomènes. Ces limitations sont décrites ci-après.

2.2.2 Un champ d'application limité

Les méthodes classiques ne sont pas applicables à tous les giratoires. Elles ont été définies à l'aide de cas simples, souvent situés hors des localités, ce qui ne reflète qu'une partie des cas d'étude rencontrés. De nombreux giratoires se situent dans des contextes urbains avec de la congestion aux heures de pointe et potentiellement des impacts de carrefours voisins. Les configurations sont parfois loin du cas simple d'un giratoire à 4 branches avec une voie de circulation. Ainsi, on peut rencontrer des double-giratoires, des contrôles d'accès par feux, de très grands giratoires, des giratoires percés, giratoires cacahouètes, etc.

Pour obtenir des résultats fiables, le cas de giratoire étudié doit être similaire aux cas utilisés pour construire la courbe de régression. Donc **dans les cas particuliers, les méthodes par régression ne devraient pas être appliquées**, à moins que des données brutes sur de tels giratoires aient été recueillies pour définir des courbes de régression spécifiques. En l'état, ce n'est pas le cas.

Mais par manque d'alternative, elles sont appliquées malgré tout, ce qui pose un problème de fiabilité des résultats. Un inventaire réalisé dans les villes de Berne et de Bulle montre que seulement quelques giratoires satisfont les conditions imposées par les méthodes actuelles : 3 sur 22 à Berne et 13 sur 20 à Bulle. En fait, ces méthodes considèrent des cas simples et standards, ce qui correspond à un milieu périurbain ou rural, avec des giratoires issus de géométries standardisés.

Mais en milieu urbain, la simplicité est rare, les géométries sont plus contraintes, les interactions sont plus denses. **En ville, il manque des méthodes capables de prendre en compte les situations complexes**. Car même si un giratoire en ville n'est pas toujours très appréciable, notamment à cause de l'accidentologie pour les cyclistes, il y a encore beaucoup de giratoires urbains et beaucoup sont en construction dans le cadre de projets de bus à haut niveau de service.

Un premier besoin d'amélioration est donc de développer des méthodes capables de s'adapter au maximum de situations possibles : des méthodes polyvalentes.



Berne, Eigerplatz, giratoire traversé par les voies de tram



Villars/Glâne (FR), double giratoire de Belle-Croix



Meyrin (GE), giratoire avec feux dans l'anneau



Lausanne, giratoire de la Maladière, très grand diamètre d'environ 100 m

Fig. 6 Exemples de giratoires très spécifiques

2.2.3 Un focus inadapté

Avec les méthodes actuelles, certaines simplifications sont systématiquement effectuées, dans la manière d'acquérir et de traiter les données de trafic. Le fait de restreindre les valeurs des comptages à la valeur horaire correspondant aux flux les plus élevés est un véritable problème. En effet, cela empêche l'ingénieur.e de regarder le phénomène de période de pointe dans son entier : on perd une partie importante de l'information. En outre, les façons de choisir l'heure de pointe est de générer les unités-véhicules sont discutables.

- **Diagnostic des insuffisances en termes d'agrégation multimodale :**
 - La norme VSS 40 024a (8) précise la façon de créer les unités-véhicules. Deux types de poids-lourds peuvent être considérés pour mieux représenter le temps que ces véhicules utilisent. Un bus articulé ne doit pas compter pour seulement 2 unités-véhicules car il mesure 18 mètres de long et demande un grand effort au démarrage pour s'insérer dans l'anneau. Il a donc besoin d'un important créneau, bien plus que deux voitures de 5 mètres chacune, beaucoup plus légères et rapides. Dans les cas où il y a beaucoup de bus articulés, cette pondération peut faire une grande différence ;

- En outre, la pente mériterait d'être prise en compte dans certaines situations avec des giratoires en dévers. Il est en effet plus facile de s'insérer en descente qu'en montée ;
 - Si les bus ou les vélos disposent de voies dédiées jusqu'à l'anneau, ils devraient être sortis des flux en approche car ils ne contribuent pas pareil aux files d'attente. En revanche, ils circulent dans l'anneau et comptent alors parmi les autres véhicules gênants pour l'insertion.
- ⇒ **Des propositions sont faites au chapitre 4.3 pour mieux intégrer les charges multimodales.**
- **Diagnostic des insuffisances en termes de focus temporel :**
 - **Une heure de pointe trop restrictive :** à l'époque, les périodes de pointe en Suisse n'étaient pas forcément plus longues qu'une heure. Mais désormais, en situation saturée que l'on retrouve dans les grandes villes, les périodes de pointe peuvent s'étaler sur plusieurs heures. Ainsi, le fait de restreindre l'analyse à une seule heure empêche de détecter certains phénomènes, tout comme il empêche de comprendre ce qui s'est passé avant l'heure de pointe. Pour respecter l'esprit de l'époque, il faut commencer l'analyse en heure creuse et la terminer en heure creuse, de façon à voir l'entier du phénomène. Dans certains cas, il y a plusieurs petits phénomènes de pointe qui se succèdent dans une large période saturée ;
 - **Un choix de l'heure de pointe qui n'utilise pas le bon critère :** pour choisir l'heure de pointe, on choisit en général le moment qui écoule le maximum de flux. Or en situation saturée, lorsque cela sature ou qu'il y a de la congestion, les flux diminuent souvent à cause de la gêne pour écouler le trafic. Le « moment des plus gros problèmes » n'est donc pas le moment des flux les plus importants ;
 - **Une vision statique qui empêche de comprendre ce qui se passe :** avec des charges ramenées à l'heure, on obtient une vision très statique et moyennée du fonctionnement pendant toute l'heure de pointe, alors qu'en réalité des fluctuations peuvent se produire. Une saturation très forte à 120% puis compensée par une période à 80% donnera une moyenne horaire de 100%, mais le pic ne sera pas détectable. Or ce phénomène serait très différent d'une heure de pointe à 100% de façon constante, pourtant la moyenne horaire donne le même résultat. Il s'agit donc d'un résultat « brouillé » qui ne nous renseigne pas assez bien sur ce qui se passe.

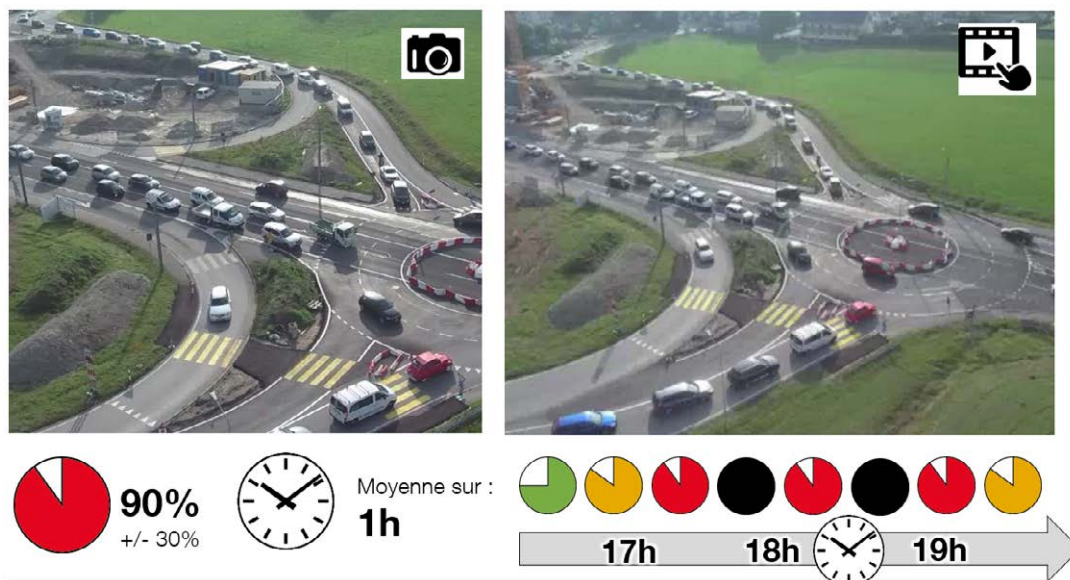


Fig. 7 Comparaison de la capacité utilisée moyenne sur 1h et par tranches de 15 min.

Ainsi, la méthode actuelle permet d'offrir l'équivalent d'une « photo en pause longue » d'un phénomène dynamique. Il ne s'agit ni d'une série de photos en rafales, ni d'une vidéo.

- **Diagnostic des insuffisances en termes de focus spatial (périmètre d'analyse) :**
 - **Un focus trop centré sur le giratoire étudié :** les charges de trafic sont analysées pour le giratoire objet de l'étude mais les carrefours et l'environnement voisin ne sont pas toujours pris en compte. De cette façon, il est difficile de détecter l'origine d'éventuelles problèmes d'interaction avec le contexte. Or en situation saturée, les remontées de files peuvent vite remonter jusque dans les carrefours voisins, générant des problèmes en cascade. Réciproquement, la saturation d'un carrefour génère un plafonnement de la charge en aval, qui peut soulager un autre point de conflit.

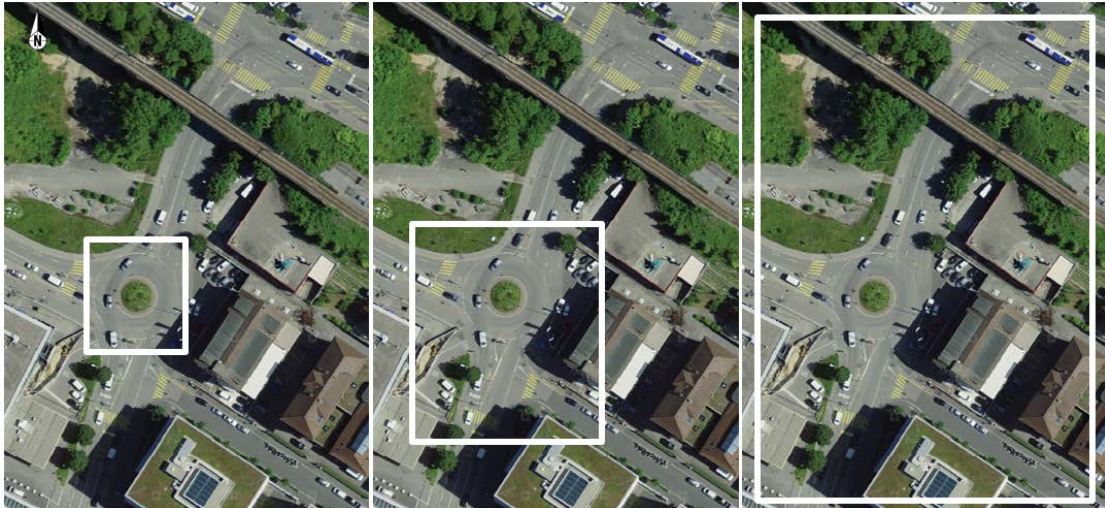


Fig. 8 Adaptation du focus spatial – giratoire du Viaduc, Malley

- **Une évaluation de la demande trop locale :** les véhicules comptés sont ceux qui entrent dans le giratoire donc ceux qui parviennent à s'insérer. Mais en situation saturée, il peut rester des files d'attente non écoulées en fin de période. Si on ne compte que les files écoulées, cette demande exprimée semble invisible et on ne se rend pas compte dans les calculs qu'une partie de la demande n'a pas été satisfaite.
Il serait plus logique de calculer la capacité utilisée sur la base d'une **demande exprimée en amont du giratoire** plutôt que sur la base de la demande satisfaite.
- **Une évaluation de la branche au lieu d'une évaluation voie par voie :** lorsqu'il y a deux voies en entrée, les comptages sont réalisés pour la totalité d'une branche et les formules ne distinguent pas les charges pour chacune des voies. Or les conditions d'écoulement ne sont pas toujours les mêmes pour la voie de gauche ou celle de droite. En particulier en situation saturée : il peut arriver que la voie de droite soit congestionnée alors que la voie de gauche peut s'écouler. Il peut aussi arriver que la remontée de file de l'une bloque l'écoulement de l'autre, si les présélections sont courtes. Il y a donc matière à effectuer un calcul pour chacune, de manière indépendante, tout en cherchant si l'une est dépendante de l'autre.

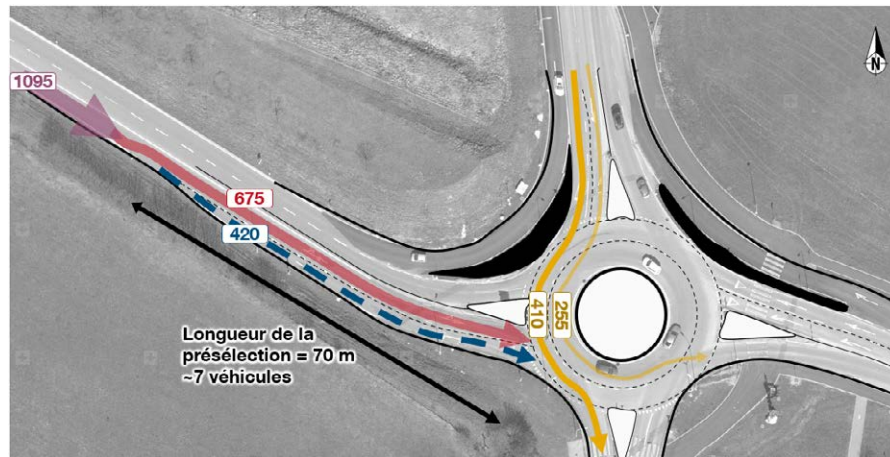


Fig. 9 Blocage d'une file sur l'autre

En conclusion, les méthodes actuelles tendent à trop simplifier le système étudié alors qu'en milieu urbain, les situations sont généralement complexes. Cette simplification conduit à une perte d'information qui empêche une bonne compréhension du fonctionnement d'un giratoire et de son environnement.

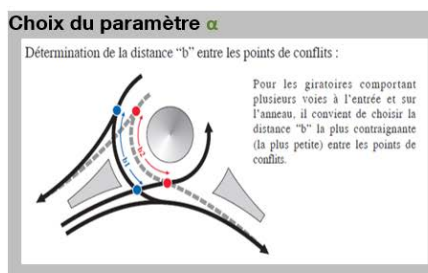
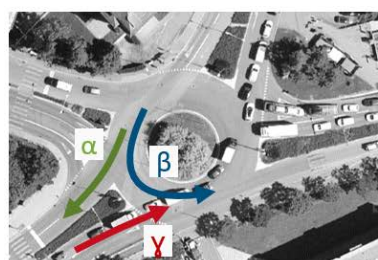
Un deuxième besoin d'amélioration sera d'avoir un point de vue spatio-temporel plus large et plus précis à la fois, pour mieux comprendre les phénomènes.

2.2.4 Des analyses volatiles, qui manquent de calibrage avec le terrain

Quel que soit le giratoire étudié, la même méthodologie est généralement suivie. Cependant, il n'est pas toujours évident d'être confiant dans le résultat et l'applicabilité du calcul.

Les formules sont certes paramétrables, mais il est difficile d'être sûr du choix des valeurs des paramètres si un calibrage n'a pas lieu pour comparer avec la réalité sur le terrain. En outre, les variations dans le choix des paramètres influencent de façon très sensible les résultats. Par exemple, si on prend la méthode TEA :

- Le paramètre β dépend de la distance curviligne entre les points de conflits.** La mesure de cette distance peut donner des résultats assez variables car la position des points de conflit dépend d'une part de l'appréciation de chacun et d'autre part de la vitesse des véhicules qu'il n'est pas facile d'estimer. S'ajoutent à cela des imprécisions de mesure. Le paramètre β est ensuite obtenu à partir d'abaques donnant β en fonction de la distance curviligne. Il existe 3 courbes selon la vitesse des véhicules et le flux sortant (faible, élevée, intermédiaire). Le choix entre ces 3 courbes n'est pas évident car l'évaluation de la vitesse est assez imprécise. Ces problématiques d'évaluation, déjà rencontrées dans des cas simples sont encore plus présentes pour les giratoires larges ou à plusieurs voies d'entrée. En effet, la distance curviligne n'est pas la même pour la voie de gauche et la voie de droite. Il est recommandé de prendre la valeur la plus contraignante mais on calcule alors une capacité trop faible pour la voie de droite, vu qu'il n'y a pas un calcul pour chaque voie mais un seul calcul pour la branche ;
- Pour les paramètres α et γ , une fourchette de valeurs est proposée selon le nombre de voies.** Les valeurs dépendent de la répartition des flux entre les voies. Pour γ , cette répartition est généralement faite à partir du positionnement théorique des véhicules selon leur direction (véhicules tournant à gauche positionnés sur la voie de gauche). Cependant, le comportement des conducteurs peut être bien différent. Il est donc utile d'observer et de mesurer la répartition entre les voies sur le terrain.



Choix du paramètre β en fonction du nombre de voies sur l'anneau

1 voie $\Rightarrow \beta = 0.9 \text{ à } 1$

2 voies $\Rightarrow \beta = 0.6 \text{ à } 0.8$

3 voies $\Rightarrow \beta = 0.5 \text{ à } 0.6$

Choix du paramètre γ en fonction du nombre de voies à l'entrée

1 voie $\Rightarrow \gamma = 1$

2 voies $\Rightarrow \gamma = 0.6 \text{ à } 0.7$

3 voies $\Rightarrow \gamma = 0.5$

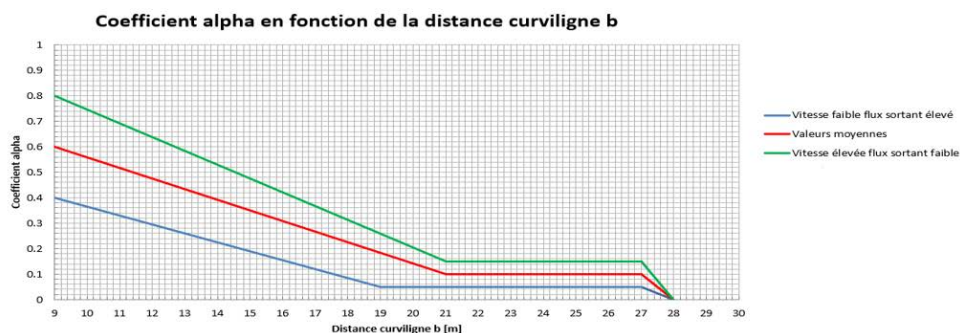


Fig. 10 Choix des paramètres α , β , γ pour la méthode TEA

Le choix des valeurs est donc peu précis, mais ce n'est pas le vrai problème. Le problème provient du fait que cela a une influence très notable sur les résultats et qu'aucune variabilité n'est fournie d'emblée par la méthode. Cela donne donc l'illusion d'une précision. Dans l'exemple ci-dessous, plusieurs calculs de capacité utilisée ont été effectués pour une même branche de giratoire, en faisant varier les valeurs des trois paramètres :

- La distance curviligne entre les points de conflit a été estimée par différentes personnes, conduisant à des valeurs variant entre 12 et 17 m.
- Les valeurs de α ont été déduites à partir de ces différentes distances curvilignes, puis en utilisant les différentes courbes de l'abaque.
- Plusieurs valeurs de γ et β ont été choisies dans la fourchette correspondant au nombre de voies du giratoire.

Tab. 1 Sensibilité des calculs de capacité utilisée avec TEA selon le choix des paramètres

Différentes versions du calcul de capacité utilisée en faisant varier les paramètres	V0	V1	V2	V3	V4	V5
Distance curviligne entre les points de conflit	17 m	12 m	17 m	17m	17m	17m
alpha	0.26	0.47	0.37	0.12	0.26	0.26
beta	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7
gamma	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.6
TCUe	85%	113%	97%	72%	91%	78%

On constate que des choix différents dans les valeurs des paramètres peuvent conduire à des valeurs de capacités utilisées assez éloignées et à des conclusions très différentes sur le fonctionnement d'un giratoire :

- La comparaison entre V0 et V1 montre que le changement d'abscisse curviligne influence grandement la prise en compte du flux gênant, faisant varier la capacité utilisée entre 85% et 115%. C'est une variabilité énorme qui change complètement les résultats ;

- La comparaison entre V2 et V3 montre qu'à abscisse curviligne égale, si on prend le haut ou le bas de la fourchette pour le paramètre α , cela change la capacité utilisée de façon également très significative ;
- Enfin, entre V4 et V5, tous les paramètres de prise en compte du flux sortant sont égaux, mais c'est une variation assez fine des paramètres sur le nombre de voies qui entraîne une variation de la capacité utilisée entre 80% et 90%.

Cette analyse de sensibilité est utile pour avoir une idée du facteur de confiance concernant la valeur de la CU. Dans un premier temps, on constate de fortes variations, puis dans un second temps, il s'agit de savoir quelle est l'estimation la plus précise et la plus fiable. Pour le savoir, il est nécessaire d'avoir des critères et des **éléments de comparaison** :

- **Comparaison avec la réalité mesurée ou observée sur le terrain** afin de pouvoir adapter les calculs et effectuer un calibrage. Cela suppose de pouvoir mesurer une grandeur sur le terrain et de la comparer avec la même grandeur théorique. Par exemple, cela peut être de comparer les files d'attente ou les temps de parcours ;
- **Comparaison avec d'autres méthodes de calculs disponibles.** Le fait de systématiquement comparer les résultats de plusieurs méthodes par régression permettrait d'avoir une meilleure idée de la précision de la capacité utilisée et de nuancer l'interprétation. Cela étant, cela ne garantit pas une bonne description de la réalité du terrain.

Un troisième besoin d'amélioration sera de renforcer la confiance dans les résultats grâce à un paramétrage ou calibrage issu d'une comparaison avec le terrain. En outre, les résultats devront être fournis avec un indice de confiance ou un test de sensibilité.

2.2.5 Des résultats parfois peu parlants

Dans la plupart des études, on ne s'intéresse pas directement à la réserve de capacité mais au fonctionnement du giratoire. Plus que la valeur de CU, ce sont donc les conséquences sur le trafic et les usagers qui vont être intéressantes et surtout plus parlantes. Un usager sera impacté négativement si son **temps d'attente** au carrefour est long en raison de **ralentissements**, de **files d'attente** ou de blocages. Cela aura impact sur son temps de trajet total et sur sa perception du trajet (blocage, impatience...). La notion de **niveau de service** permet d'englober ces différents critères en un seul indicateur catégorisé. Mais le niveau de service peut-il se mesurer sur le terrain pour effectuer un calibrage ?

Un autre aspect parlant est de savoir si les problématiques générées par le carrefour vont rester très locales ou bien vont avoir des impacts sur d'autres carrefours à proximité. L'estimation de **files d'attente** dans ce cas est plus parlante que la capacité utilisée car elle donne une indication sur l'étendue spatiale du phénomène.

Enfin, quitte à étudier la capacité d'écoulement, il faut étudier celle du système en entier. Or **la capacité utilisée au point d'entrée n'est pas toujours l'indicateur pertinent lorsque le flux est bloqué en amont ou en aval pour des raisons externes au giratoire.**

Dans ces cas-là, la capacité utilisée sera basse alors qu'il y a un problème de circulation. Ce problème se caractérise par une **vitesse très basse** voire nulle des véhicules, et un **trafic plus dense**, mais la CU au point d'entrée ne permet pas de le constater. En effet, en situation saturée, **le point de conflit déterminant n'est pas toujours l'entrée dans le giratoire.**

Pour avoir une vision plus complète et mieux décrire les phénomènes, **le dernier besoin d'amélioration sera donc de développer des indicateurs parlants et comparables avec le terrain**, tels que :

- la longueur des files d'attentes;
- la vitesse des véhicules et son évolution au cours du temps;
- la densité de trafic;
- les temps de parcours ou les temps d'attente à l'insertion.

2.3 Synthèse des besoins d'amélioration

Les points faibles des pratiques actuelles révèlent quatre besoins principaux à prendre en compte pour proposer une nouvelle méthodologie. Ceux-ci sont illustrés à la figure suivante.

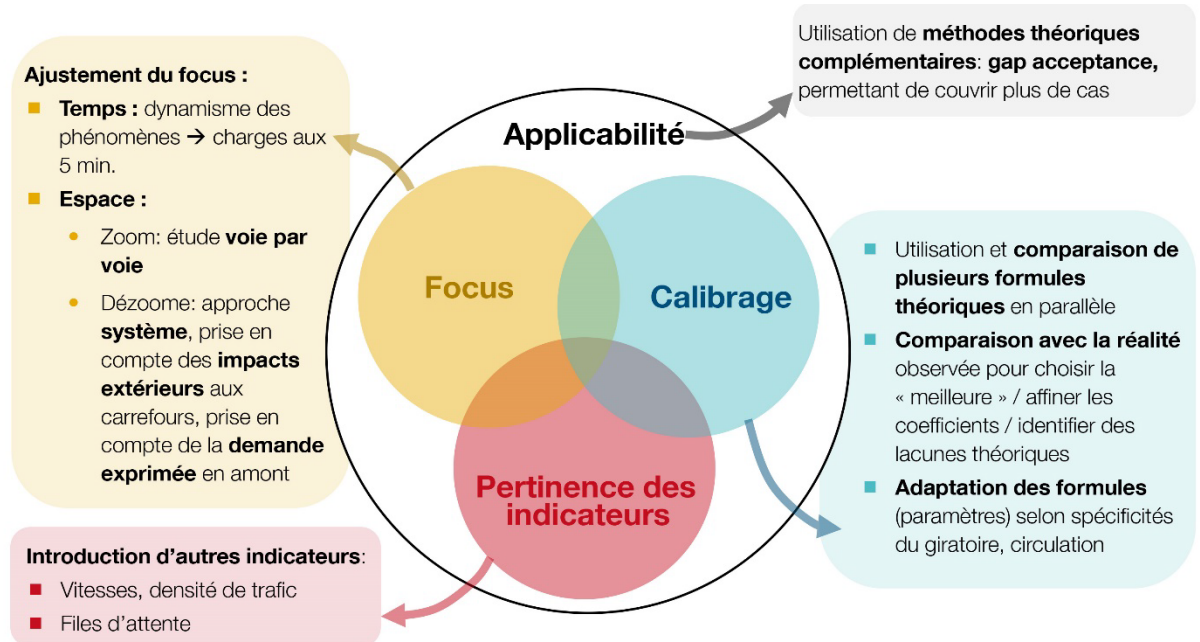


Fig. 11 Synthèse graphique des besoins d'amélioration pour l'évaluation des giratoires en situation saturée

En résumé, les méthodes classiques ne fournissent pas de résultats fiables et pertinents dans des situations urbaines complexes et saturées. Le besoin d'amélioration général est :

1. D'améliorer la polyvalence des méthodes ;
2. D'étendre le cadre d'analyse pour être capable de décrire l'ensemble du phénomène de manière dynamique et en identifiant les points de conflit déterminants et les interactions entre carrefours ;
3. De fournir des indicateurs pertinents, parlants, comparables avec le terrain ;
4. De vérifier la crédibilité des résultats grâce à l'étalonnage avec le terrain et de préciser l'intervalle de confiance dans les valeurs fournies.

3 Nouvelle méthodologie proposée

L'objectif de cette partie est de présenter une nouvelle démarche et des méthodes de calcul alternatives qui peuvent être appliquées en Suisse. Ces propositions sont issues des expérimentations faites sur les quatre cas d'étude au cours du présent projet de recherche. Ces propositions sont avant tout applicables à des giratoires existants et des situations actuelles mais certaines bonnes pratiques et méthodes de calcul seront également pertinentes pour des cas futurs (voir paragraphe 3.4).

Le cas de la micro-simulation n'a pas été traité par le présent projet de recherche et mérite d'être approfondi ultérieurement.

3.1 Une méthodologie générale et trois méthodes de calcul

Il est important de distinguer deux niveaux très différents lorsqu'on parle de méthodologies ou de méthodes :

- **La méthodologie générale** : c'est la façon de procéder aux comptages, calculs et au calibrage, c'est-à-dire l'ordre dans lequel faire les choses, les questions auxquelles répondre successivement. Cette méthodologie générale peut s'appliquer indépendamment de la méthode de calcul ;
- **Les méthodes de calcul** : ce sont les formules mathématiques issues des théories qui ont été appliquées. On en distingue trois principales (voir chapitre 7) : les méthodes par régression, les méthodes « critical gaps » et la méthode déterministe, développée pendant ce projet de recherche.

Dans le présent chapitre, on se concentre principalement sur la méthodologie générale, qui est décomposée en plusieurs étapes. Les méthodes de calculs sont décrites à la partie 7.

3.2 Les différentes étapes de la méthodologie

La nouvelle méthodologie proposée apporte plusieurs différences notables par rapport aux méthodes classiques. Celles-ci sont illustrées à la figure suivante et décrite ci-après :

- La première étape, pour la méthode classique, est de collecter les données de comptages. Mais si les données collectées sont insuffisantes, cela risque de contraindre les analyses et de ne pas permettre d'atteindre les bus de l'étude. La nouvelle méthodologie propose d'étudier les spécificités du cas d'étude et de définir les indicateurs à produire en première étape. Ce n'est qu'à partir de cette réflexion que l'on peut établir le protocole expérimental à la bonne échelle.
- Dans la méthodologie classique, les données brutes de comptage sont simplifiées très tôt. Dans la nouvelle méthodologie, elles ne sont que transformées en unités-véhicules en tenant compte de la pente et des voies bus/cycles. Mais les comptages sont maintenus chaque 5 ou 15 minutes et sur une longue plage de temps.
- Dans la méthodologie classique, les résultats sont produits et l'interprétation doit commencer, sans savoir si les résultats sont proches de la réalité. Avec la nouvelle méthodologie, une nouvelle étape de calibrage permet d'identifier la méthode de calcul la plus pertinente en comparant différentes théories à la réalité.

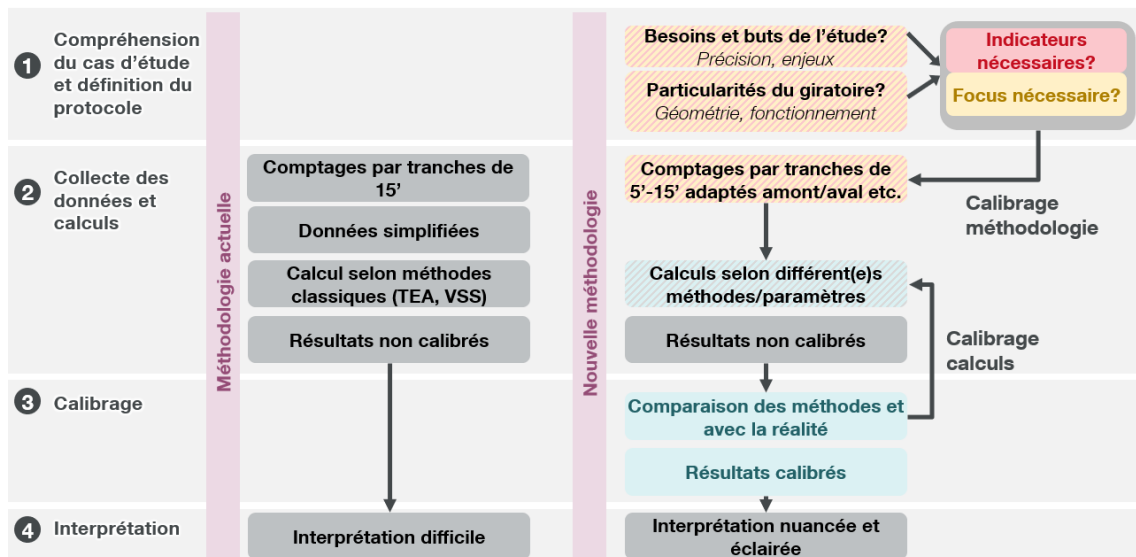


Fig. 12 Nouvelle méthodologie proposée pour le calcul de capacité utilisée

Chacune des étapes est décrite plus en détails dans les parties suivantes.

3.2.1 Etape 1 : compréhension du cas d'étude et définition du protocole

Cette étape est fondamentale afin de réaliser des mesures et des calculs adaptés à la situation. L'objectif est de comprendre le contexte afin de définir un protocole de mesures et d'étude, en passant par les analyses suivantes :

1. Identifier les besoins et les buts de l'étude

L'idée est d'évaluer les enjeux et les objectifs de l'étude afin d'estimer le niveau de précision nécessaire en termes de calculs de CU, mais aussi de définir les indicateurs les plus pertinents pour satisfaire les objectifs. Les questions suivantes peuvent être abordées (liste non exhaustive) :

- L'étude porte-t-elle sur un giratoire existant ou projeté ? Quel est l'horizon du projet étudié ?
- Dans quelle phase de projet s'inscrit l'étude ? Planification à large échelle, étude de faisabilité, avant-projet...
- Quelle est l'échelle du périmètre à l'étude ? Le carrefour, quelques rues, un quartier, une ville...
- Quel est l'objectif premier de l'étude ? résoudre une problématique de congestion, améliorer des temps de parcours TP, évaluer les impacts d'un projet externe (immobilier, piétonisation...), insertion de transports public en site propre, insertion d'aménagements modes doux....
- Pourquoi a-t-on besoin d'évaluer la capacité utilisée ? Pour choisir la meilleure variante d'aménagement ? Pour évaluer les impacts d'une génération de trafic sur un carrefour ?
- Existe-t-il des marges de manœuvre si la situation s'avère saturée ? En termes d'aménagement du carrefour ? En termes de réduction du trafic ?

2. Quelles sont les particularités du giratoire étudié (existant ou projeté) ?

Le but de cette question est d'évaluer la complexité de la situation, d'adapter le focus et de choisir les méthodes de comptage et de calcul adaptées. Les questions principales à se poser sont les suivantes :

- **Le giratoire est-il isolé ?**

- **Quelle est la configuration du giratoire ?** nombre de voies à l'anneau et en entrée, présence d'un bypass, diamètre, forme du giratoire, présence de passages piétons en entrée et sortie, carrefour isolé ou faisant partie d'un système ;
- **Comment se répartissent les flux dans le giratoire** (charges directionnelles, utilisation de l'anneau intérieure ou surtout extérieur, répartition entre les voies) ?
- **Quel est le fonctionnement du giratoire** (fluidité, saturation aux heures de pointe, création de files d'attente, refoulement d'un carrefour voisin) ?
- Quels types de véhicules circulent (camions, vélos...) ?
- **Quels sont les points de conflit et lequel semblent déterminants ?**
- **Est-ce que la vitesse est particulièrement haute ou basse dans l'anneau ?**

Pour l'étude du fonctionnement, il est recommandé de se baser sur des observations de terrain, sur Google trafic et sur des retours éventuels de la commune ou d'usagers. On pourra compléter ces informations par des données d'accidentologie.

3. Définition du focus et choix des indicateurs

Selon la situation et les buts de l'étude, il faut déjà choisir les indicateurs que l'on souhaite produire pour être sûr.e.s d'aller collecter les données de bases nécessaires, comme indiqué dans le tableau ci-dessous. Une partie de ces données (en italique) sont à collecter non pas pour produire l'indicateur (via un calcul et une formule) mais pour pouvoir faire le calibrage avec le terrain.

Tab. 2 Tableau des données à collecter en fonction des indicateurs à produire

Indicateur à produire	Données à collecter en situation simple (sans congestion de l'anneau)	Données supplémentaires à collecter en situation complexe avec refoulement depuis l'aval
Capacités d'écoulement	- Flux dans l'anneau chaque 5 ou 15 minutes ; - Si étude approfondie : - Chronométrage des créneaux (ou gaps) des véhicules dans l'anneau ; - Détection des gaps acceptés ou refusés par les véhicules en insertion ; - Vitesse des véhicules dans l'anneau ;	- Pour chaque pas de temps, chronométrage du nombre de minutes avec blocage de l'anneau en face de chaque voie d'insertion ; - Nombre de véhicules par voie qui arrivent à s'écouler même en période de blocage de l'anneau.
Capacités utilisées (à mesurer en plus que la ligne précédente)	- Demande exprimée en amont - Demande satisfaite à l'insertion dans l'anneau	
Files d'attentes	- Vidéos à plusieurs points en amont de l'insertion, permettant d'évaluer visuellement la remontée de file ;	
Temps de parcours	- Suivi et chronométrage de véhicules, soit via drone, soit via plusieurs caméras successives positionnées sur les branches ;	
Densités de trafic	- Vitesses des véhicules en différents points, soit via suivi de véhicules entre deux points, soit via caméra en un point - Si étude approfondie : - Dans le cas d'un giratoire à plusieurs voies d'entrée : possibilité de mesurer la vitesse par voie.	

Sur la base des données à collecter, il faut alors définir le focus spatio-temporel et les flux à collecter. Il s'agit d'identifier l'ensemble du système routier impliqué par la période de pointe et de le diagnostiquer en son entier, ce qui amène parfois une multiplicité de points de comptages et d'observations. Cette complexité est nécessaire pour ne pas manquer l'identification du point de conflit déterminant.

3.2.2 Etape 2 : collecte des données et calculs

Cette étape découle directement des besoins déterminés à l'étape précédente.

Pour le traitement des vidéos, il n'est pas nécessaire d'utiliser un logiciel de traitement vidéo (type Logiroad) si les analyses restent simples et que des paramètres standards sont utilisés. En revanche, si la situation est complexe, ou que les vitesses doivent être mesurées, ou que des paramètres locaux doivent être produits, alors un tel logiciel s'avère nécessaire.

Ce n'est qu'alors que les données brutes des vidéos pourront être transcrites en données brutes chiffrées puis en données simplifiées grâce à un traitement informatique. S'il n'y a pas de traitement vidéo, on obtient directement des données simplifiées.

A partir de ces données simplifiées, les calculs peuvent être effectués selon différentes méthodes de calcul. Il est recommandé de toujours utiliser plusieurs méthodes de calcul et en particulier au moins une méthode par régression et une méthode type « critical gap ». Dans certains cas complexes, s'il y a des périodes de blocage de l'anneau, il faut combiner plusieurs calculs selon la situation fluide / congestionnée.

3.2.3 Etape 3 : calibrage

L'objectif de cette étape est de vérifier la pertinence des résultats, de sélectionner la ou les méthode(s) de calcul « les plus justes » et d'adapter certains paramètres de calcul si besoin.

Dans un premier temps, les méthodes peuvent déjà être comparées entre elles pour voir si les résultats sont homogènes et pour identifier celles qui indiquent une saturation.

Ces résultats sont ensuite confrontés à la réalité du terrain par observations vidéo. Il est ainsi possible de vérifier si des moments de saturation théorique correspondent à des phénomènes cohérents dans la réalité (files d'attente, ralentissements). On peut aussi comparer la longueur des files calculées avec la longueur des files observées.

Cette étape permet déjà d'**écarter certaines théories** (ou valeurs de paramètres) qui ne correspondent pas du tout à la réalité. Elle permet aussi d'**identifier un besoin d'indicateurs additionnels**. Par exemple, si la capacité utilisée est basse mais que le comportement observé montre une saturation, cela peut signifier que la charge ne parvient pas à s'écouler et qu'une analyse des vitesses (en approche, en sortie et dans le giratoire) serait plus pertinente.

Dans l'idéal, l'objectif est d'obtenir des résultats qui correspondent aux observations sur toute la plage horaire étudiée.

3.2.4 Etape 4 : interprétation

L'interprétation se fait sur la base de différents résultats. Cela permet d'apporter de la nuance dans la conclusion et en même temps d'être plus confiant par rapport aux résultats.

Le fait d'étudier le fonctionnement sur une période longue et de manière dynamique permet d'avoir une interprétation plus juste :

- Cela permet de mieux cibler le moment où une problématique va apparaître ainsi que sa durée. En effet, un phénomène ponctuel n'aura pas les mêmes conséquences qu'un phénomène long.
- Cela permet d'analyser les variations de fonctionnement au cours du temps. Ainsi, même si des doutes persistent concernant les valeurs absolues, il est tout de même possible de dire si la situation se dégrade ou s'améliore et dans quelles proportions.

3.3 La prise en compte de la saturation dans la méthodologie

Cette méthodologie générale a été développée de façon à mieux prendre en compte les situations saturées, pour les raisons suivantes :

- En situation saturée, il n'y a pas d'heure de pointe très claire mais une longue période de pointe, au cours de laquelle des flux plus bas peuvent apparaître lorsque le trafic est trop paralysé. Le fait de décrire toute la période de pointe permet de bien appréhender tout cela ;
- En situation saturée, ce n'est pas forcément l'insertion dans l'anneau qui est déterminante. Le fait d'avoir une réflexion plus large sur le réseau routier alentour permet de mieux cerner l'origine de la saturation et de réfléchir à une échelle plus pertinente (adaptation du périmètre d'analyse) ;
- S'il y a du blocage dans l'anneau, la méthodologie proposée invite à identifier ce blocage dès le début et à le prendre en compte dans les calculs. Pour cela, la méthodologie invite à relever sur le terrain ces épisodes de blocage ainsi que les comportements des usagers pendant le blocage ;
- La méthodologie inclut la production d'indicateurs très utiles en situation saturée, tel que la densité de trafic. En effet, lorsque le flux ne s'écoule pas bien, il n'est pas possible, uniquement en le comptant, de savoir si c'est parce qu'il est paralysé ou qu'il n'y a plus beaucoup de véhicules. Seule l'évaluation de la densité de trafic (via l'intermédiaire de la mesure des vitesses) permet de produire un véritable diagnostic (voir annexe 15 sur Bussigny).

3.4 Application aux situations futures projetées

Les étapes décrites précédemment sont tout à fait adaptées à l'étude d'une situation actuelle ou l'on peut effectuer une comparaison avec la réalité du terrain. Mais comment procède-t-on alors pour l'étude d'une situation future ?

En général, **l'évaluation d'une situation future ne peut se faire qu'en utilisant une théorie et en faisant l'hypothèse que cette théorie s'appliquera avec justesse dans les situations futures.** Dans le cadre du présent projet de recherche, nous nous sommes concentrés sur des situations actuelles, car la première étape était d'abord de renforcer les théories. En effet, si nos méthodes de calculs ne permettent pas de représenter fidèlement une situation réelle existante et compréhensible, comment peut-on s'appuyer dessus pour évaluer une situation future ? Une première étape empirique paraissait nécessaire.

Néanmoins, il est maintenant possible de se projeter vers l'application de cette nouvelle méthodologie pour des situations futures. Il peut s'agir de plusieurs cas.

Tab. 3 Tableau des scénarios d'évolution en termes de complexité

Scénarios d'évolution en termes de complexité (blocage ou non de l'anneau)		Situation après	
		Situation simple	Situation complexe
Situation avant	Situation simple	Il n'y avait pas de saturation de l'anneau avant et on peut estimer qu'il n'y en aura pas non plus après → les calculs restent les mêmes	Il n'y avait pas de saturation de l'anneau avant et on peut estimer qu'il y en aura après → les calculs doivent être adaptés
	Situation complexe	Il y avait de la saturation dans l'anneau avant mais on pense la résoudre après → les calculs sont simplifiés, le trafic s'écoulera mieux mais cela risque de générer d'autres blocages	La situation après restera avec de la congestion dans l'anneau → les calculs peuvent rester similaires mais il faut peut-être adapter les durées de blocage.

Tab. 4 Tableau des scénarios d'évolution offre-demande

Scénarios possibles d'évolution offre-demande		Modification de l'offre		
		Giratoire inchangé	Giratoire adapté	Giratoire créé
Modification de la demande	Demande égale	Statu quo		
	Demande augmentée	S'appuyer sur un bon diagnostic du giratoire actuel	S'appuyer sur un bon audit du giratoire actuel	S'appuyer sur des théories vérifiées sur de nombreux giratoires
	Demande diminuée			

Application pratique : recommandations applicables pour l'étude d'un cas futur :

Toutes les recommandations proposées dans ce projet de recherche ne s'appliquent pas toutes aux cas futurs, mais certaines bonnes pratiques peuvent tout de même être utilisées :

- **La méthodologie générale** proposée peut être suivie dans tous les cas en « éliminant » les étapes non réalisables s'il n'existe pas de giratoire actuel, à savoir les phases de comptages et de calibrage ne sont pas possibles ;
- **Différents indicateurs** peuvent être choisis pour l'étude d'un cas futur (capacité utilisée, longueur de files d'attente) tant que **ceux-ci peuvent être basés sur des estimations et non sur des mesures**. L'utilisation d'indicateurs basés sur la mesure des vitesses (densité de trafic) ou la mesure des gaps (capacité utilisée déterministe n'est pas applicable.
- Il est important de choisir **le bon focus spatial** même pour un cas futur. En effet, l'impact de carrefours à proximité ou la prise en compte des charges en amont du giratoire est réalisable.
- Pour le focus temporel, **il sera plus compliqué de produire une estimation de charges dynamiques** pour un cas futur. Cela étant, s'il existe des comptages dynamiques pour l'état actuel et que les adaptations sont minimales, il reste possible de produire des calculs dynamiques pour l'état futur ;
- Même pour un cas futur, il est recommandé de **réaliser les calculs de capacité utilisée en utilisant différentes méthodes de calcul** (différentes formules par régression et des formules de type « gap acceptance »). Pour chaque formule, il est également préconisé de **réaliser une étude de sensibilité en faisant varier les valeurs des paramètres**.
- Dans le cas d'un giratoire futur à plusieurs voies d'entrée, il est possible de **réaliser les calculs de capacité utilisée ou de files d'attente par voie** en se basant sur une estimation de la répartition.
- La phase de calibrage basée sur une comparaison avec la réalité n'est pas possible. En revanche, l'étude d'un cas futur est toujours précédée par une **analyse de la situation actuelle pour laquelle la phase de calibrage est possible, si le giratoire existe déjà**. Celle-ci permet de sélectionner des formules et paramètres adaptés. Si l'état futur n'est pas lié à un changement du giratoire mais plutôt à un changement de trafic, alors il sera possible de réutiliser directement les formules sélectionnées lors de l'analyse de la situation actuelle.
- La micro-simulation dynamique peut être utilisée pour les cas futurs mais elle sera d'autant plus pertinente si une étape de calibrage aura été réalisée.

PARTIE B - Approfondissements thématiques

4 Etape 1 – Définir le cadre spatio-temporel des analyses

Avant d'étudier les différentes formules permettant d'évaluer les capacités d'écoulement ou les effets du fonctionnement, ce chapitre présente le cadrage spatio-temporel des analyses. De quels flux parle-t-on et à quelle échelle devons-nous les analyser ?

Pour ces différents sujets, l'état de l'art est présenté et discuté sur la base des résultats de la recherche. Des conclusions et des recommandations applicables (en **surligné bleu** dans chaque paragraphe) à des cas d'études sont également fournies.

4.1 Espace : périmètre d'analyse

Dans chaque analyse, indépendamment du sujet, la question de la délimitation spatiale se pose dès le départ. **Quel périmètre doit être considéré pour pouvoir tirer les bonnes conclusions ?** Si l'angle de réflexion d'une analyse est trop étroit, des facteurs d'influence importants peuvent être oubliés. D'un autre côté, si l'on prend en compte un périmètre trop large, on perd souvent la focalisation sur l'essentiel.

Tab. 5 Tableau de synthèse de la littérature : périmètre d'analyse

Source	Pays	Message clé
(8) VSS - 40 024a	Suisse	La norme s'applique aux giratoires qui fonctionnent d'une manière indépendante. La distance par rapport aux carrefours voisins est telle qu'elle permet d'éviter une éventuelle influence. La procédure décrite dans la norme s'applique à chaque entrée/sortie du giratoire avec une vision très locale du fonctionnement de celui-ci.
(14) TEA 1991	Suisse	Du fait de la priorité à l'anneau, un giratoire peut être assimilé à une succession de carrefours en T. Pour vérifier qu'un giratoire écoule la demande, la capacité d'entrée de chaque branche est évaluée (vision locale).
(13) FGSV – HBS 2015	Allemagne	Aucune information sur le périmètre à considérer n'est donnée. Les formules sont appliquées séparément pour chaque branche du giratoire (entrée et sortie) avec une vision très locale du fonctionnement de celui-ci.
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	Les processus de calcul se concentrent sur le giratoire en tant que système isolé, avec une vision locale. Cependant, si celui-ci fait partie d'un réseau, il peut être perturbé par des influences extérieures.

Actuellement, les normes et guides se focalisent sur une vision très locale. Seul le giratoire, (voire une branche de giratoire) en tant qu'élément isolé et indépendant est analysé. Dans ce schéma, l'analyse est divisée en différentes sous-analyses, toujours focalisées sur un point de conflit : généralement les entrées des différentes branches du giratoires et parfois également les sorties. Les calculs sont effectués et interprétés indépendamment des interactions possibles entre les branches. En dehors des entrées, les autres points de conflit pouvant exercer une influence sur le fonctionnement du giratoire sont rarement pris en compte. Seuls les passages piétons sont considérés comme de possibles facteurs d'influence, mais pas comme des points de conflit en soi.

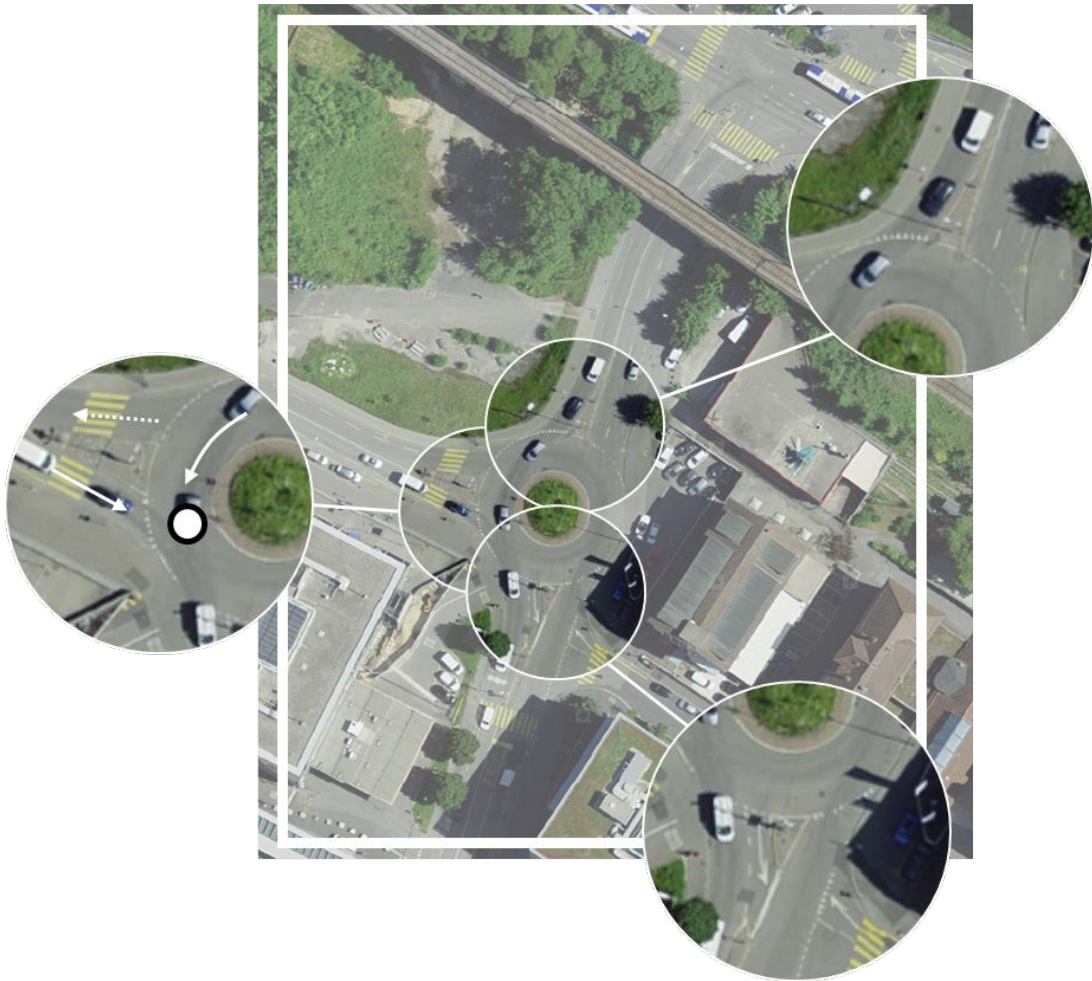


Fig. 13 Points de focalisation des méthodes et normes actuelles : les points de conflit en entrées et sorties de giratoire

Les quatre études de cas réalisées montrent que dans un milieu urbain, un giratoire en tant que partie du réseau routier, est rarement un élément complètement indépendant. Des carrefours à proximité, des passages piétons, des arrêts de bus ou encore un changement de nombre de voies de circulation peuvent avoir une influence sur le giratoire.

Si l'on prend un peu de recul par rapport à la vision très locale du giratoire, on peut constater que le point de conflit à l'insertion (le plus souvent considéré) n'est pas un point isolé, mais fait partie d'une succession de différents points de conflit. Cela signifie qu'il n'est pas nécessairement déterminant pour le fonctionnement du giratoire. Lors des études de cas, les influences suivantes, potentiellement pertinentes, ont pu être observées en dehors du point de conflit à l'insertion :

- des points de conflit en amont du giratoire :
 - des voies de présélection trop courtes qui débordent et bloquent la demande d'une autre voie d'entrée ;
 - une demande plus importante que l'offre à l'insertion, générant une file d'attente qui elle-même restreint la demande ;
 - une gêne de courte durée due à un passage piéton.
- des points de conflit en aval du giratoire :
 - refoulement d'une file générée par un carrefour voisin et blocage du flux étudié ;
 - refoulement d'une file dans le giratoire, perpendiculairement au flux. Le flux n'est bloqué que partiellement car la courtoisie lui permet de s'écouler progressivement ;
 - gêne de courte durée due à un passage piéton ou à un arrêt de bus ;

- refoulement d'une file générée par un carrefour voisin mais n'ayant pas encore atteint l'anneau. Cela provoque un ralentissement en sortie de giratoire et donc une réduction de la capacité de sortie.

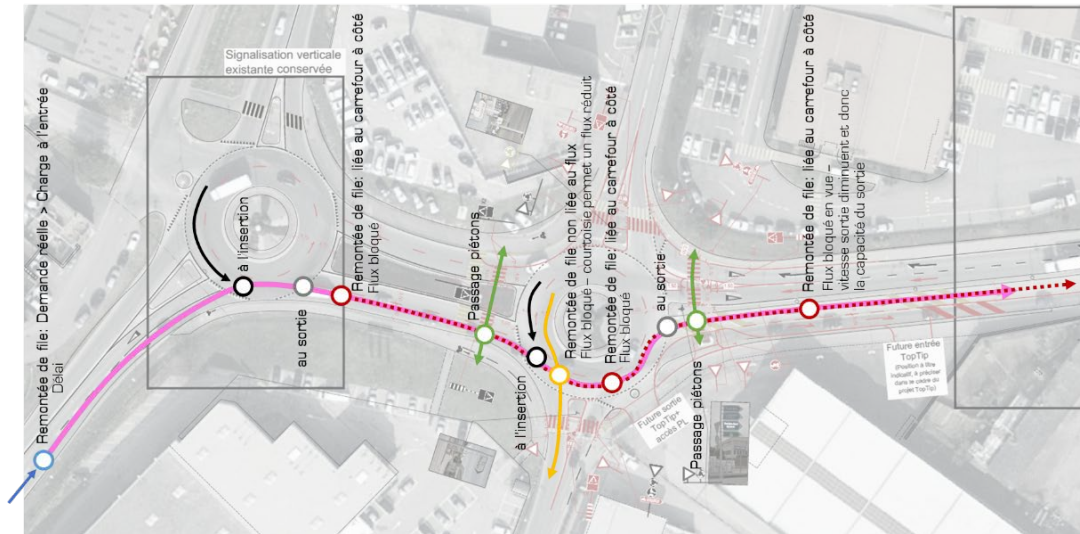


Fig. 14 Les différents types de points de conflit pouvant influencer le fonctionnement d'un giratoire

Tous ces points de conflit peuvent avoir une influence sur la performance d'un giratoire. Ils peuvent avoir un effet bloquant sur une ou plusieurs branches, réduisant ainsi la capacité réelle. Ils peuvent également avoir un effet positif en bloquant un flux gênant et en aidant ainsi un flux ayant du mal à s'écouler.

En général, une vision plus large est nécessaire au début d'une analyse pour s'assurer que les mécanismes d'interaction avec les alentours sont connus et compris.

4.2 Temps : période analysée et résolution

Un autre aspect fondamental à prendre en compte dans toute étude est la période d'analyse considérée. **Quelle est la période d'analyse déterminante ? Et quel « pas de temps » doit être considéré ?** Ce choix peut varier en fonction de la situation et du contexte qui influencent les conditions de trafic.

Tab. 6 Tableau de synthèse de la littérature : période analysée et résolution

Source	Pays	Message clé
(8) VSS - 40 024a	Suisse	En règle générale, on effectue le dimensionnement [...] sur la base des débits horaires [...]. Comme débits déterminants, on considère avant tout les valeurs suivantes : - moyenne des heures de pointe du soir en % du TJM; - trafic déterminant calculé selon la norme 40 016. Pour les giratoires proches de leur limite de capacité, très sensibles aux fluctuations des charges, on peut utiliser les charges au quart d'heure.
(10) VSS – 40 016a	Suisse	On détermine le trafic de l'horaire déterminant (THD) à partir du trafic journalier moyen (TJM). Les valeurs indicatives pour le THD sont déduites de la 30 ^{ième} et de la 100 ^{ième} heure exprimés en % du TJM en distinguant six motifs de transport différents.
(14) TEA 1991	Suisse	Pas de spécification. Le guide des giratoires suisses renvoie à la norme en vigueur (état 1992) pour les débits déterminants. Il s'agissait des débits horaires.
(13) FGSV – HBS 2015	Allemagne	Sauf dispositions contraires, les procédures sont généralement basées sur un intervalle d'une heure. Des exceptions sont possibles. Toutefois, plus l'intervalle de comptage est petit, plus les valeurs fluctuent. Les grands intervalles ne permettent pas de saisir correctement les valeurs de pointe.
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	L'analyse est normalement conçue pour l'heure de pointe. Si nécessaire, l'analyse peut également être effectuée pour le quart d'heure de pointe.

Le cas général des différentes normes vise une analyse sur la base des débits horaires pour l'heure de pointe. Les différents guides définissent une procédure spécifique pour la détermination de l'heure de pointe déterminante.

Discussion sur la base des résultats de la recherche :

Pour les quatre études de cas, des périodes d'analyse plus longues (4h) et des résolutions plus fines (1h, 15 min, 5 min) ont été choisies afin d'obtenir une comparaison avec la méthode standard. Les enseignements tirés de ce test portent sur différents aspects :

- **les phénomènes d'hyperpointes** : plus la résolution choisie est fine, plus les fluctuations vers le haut (hyperpointes) et vers le bas sont visibles.
 - avec une résolution de 5 minutes, les informations essentielles risquent d'être perdues dans le bruit de fond. En revanche des hyperpointes qui ne sont pas visibles dans les autres résolutions peuvent être clairement mises en évidence;
 - avec une résolution de 15 minutes, le bruit diminue nettement, le graphique devient plus lisible et les hyperpointes d'une longueur de 10 à 15 minutes restent visibles;
 - avec une résolution d'une heure, les grandes tendances sont clairement visibles à condition de compter pendant trois à quatre heures. Mais on risque de ne pas identifier des pics ponctuels pouvant avoir des effets très visibles sur le terrain.

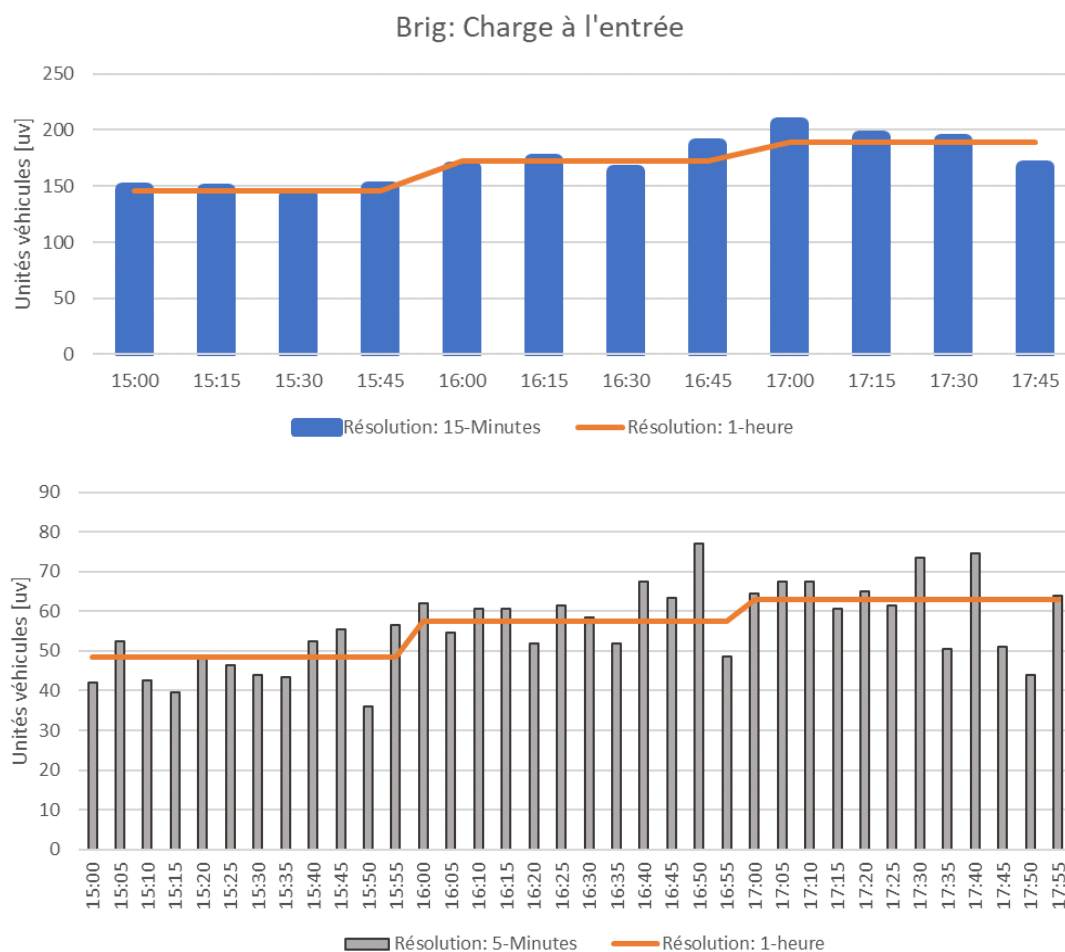


Fig. 15 Des hyperpoints visibles à Brig via des données à 5 minutes

la période de pointe : avec la croissance démographique et les réseaux fortement sollicités en milieu urbain, on observe de plus en plus un étalement et un lissage des périodes de pointe. En effet, afin d'éviter les bouchons, les personnes adaptent leurs horaires pour partir en dehors des heures de pointes « classiques ». Le deuxième graphique de la figure 22 montre cet effet en comparant les pics de capacité utilisée obtenus si les personnes choisissent leurs heures de trajet sans chercher à éviter le trafic (courbe bleue) avec les pics de capacité utilisés « étalés et plus faibles » obtenus en réalité (courbe rouge). Ainsi, les charges de trafic déterminantes ne sont plus observées seulement pendant une heure donnée, mais parfois pendant une période plus étendue (comme observé dans l'exemple de Bulle).

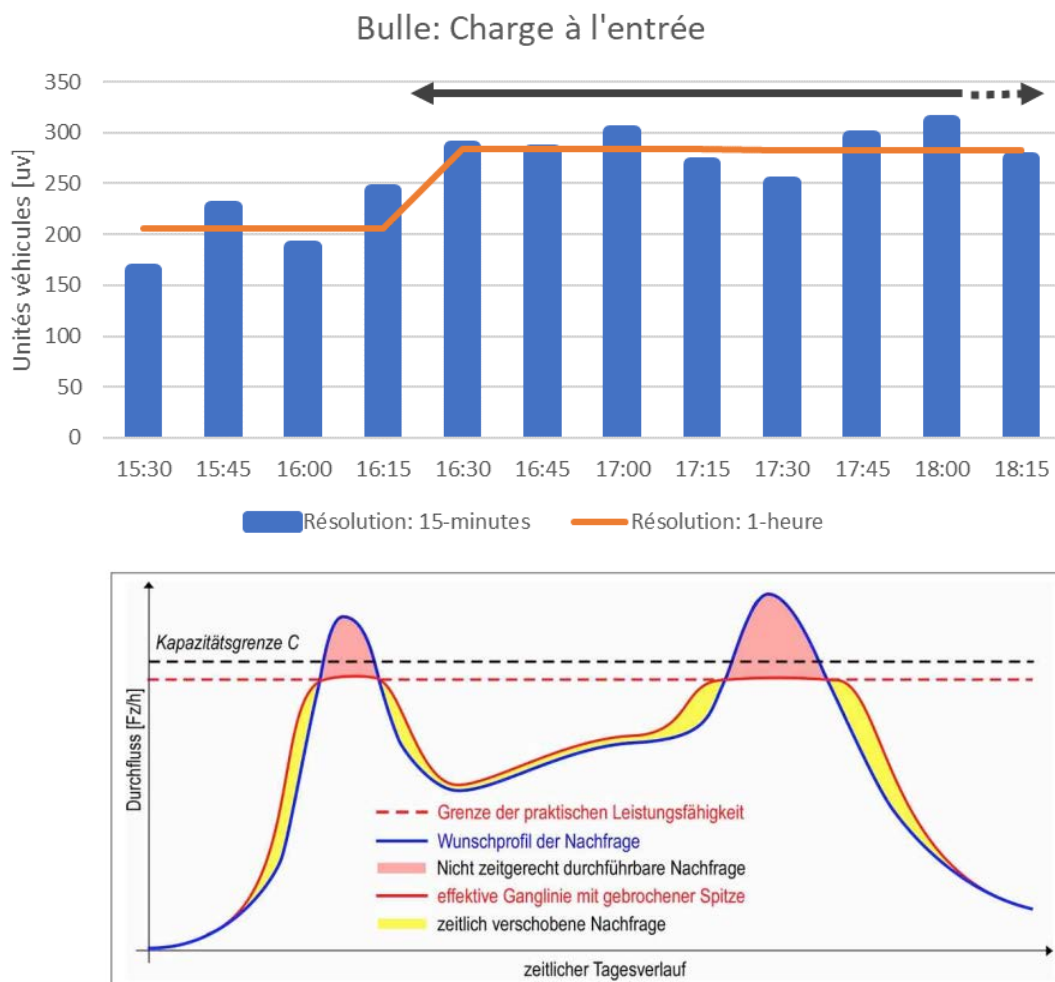
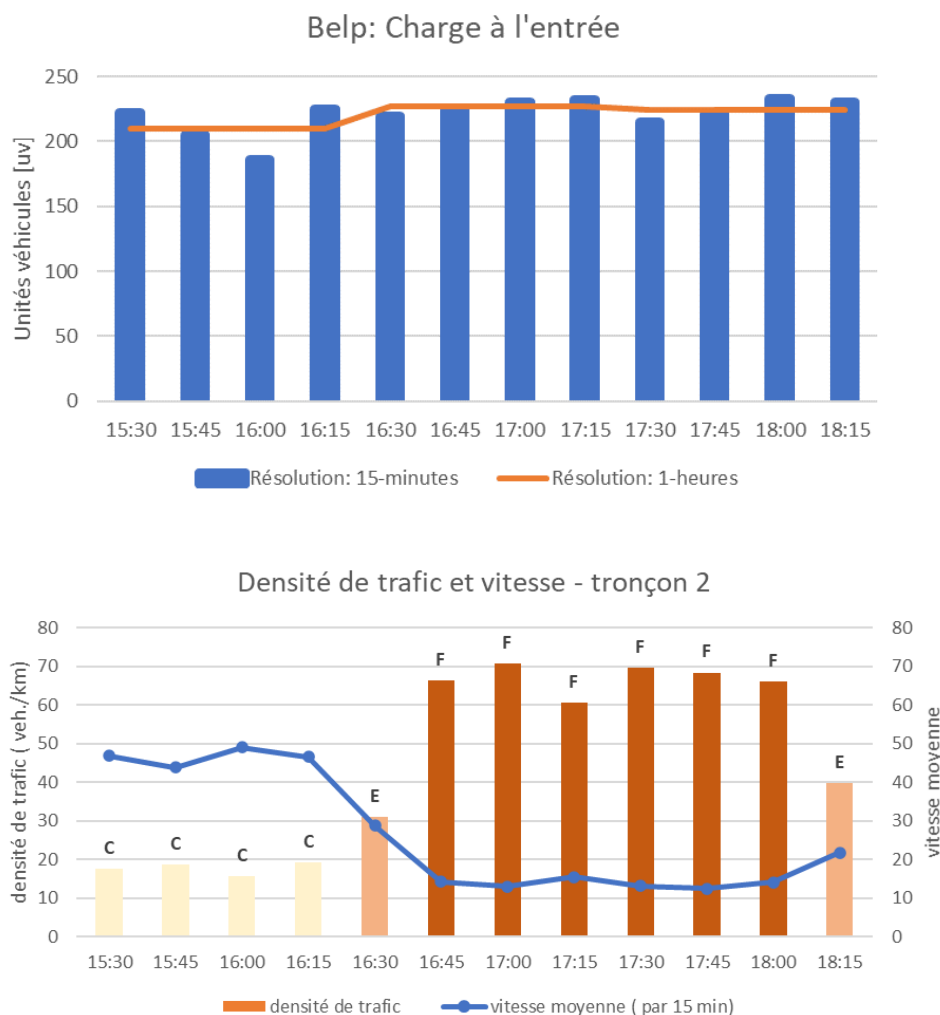


Abb. 9 Prinzip des Brechens von Spitzen

Fig. 16 Des périodes de pointe longues car la saturation écrête les pics (Illustration du principe (8))

- **les indicateurs à considérer pour la détermination de la période déterminante :** la charge de trafic en soi ne dit rien sur la fluidité du trafic et le niveau de service. La même charge peut apparaître dans un contexte totalement fluide et dans un système congestionné.

L'exemple de Belp montre que si l'on se rapproche du point de basculement entre l'état de trafic fluide et l'état de trafic "perturbé", il n'est plus possible de déterminer la période déterminante sur la base des volumes de trafic. Les chiffres du trafic sur la branche du giratoire restent constants pendant toute la période de comptage (4 h) et conduisent à des capacités constantes dans le calcul théorique. Les densités de trafic observables changent cependant fortement.

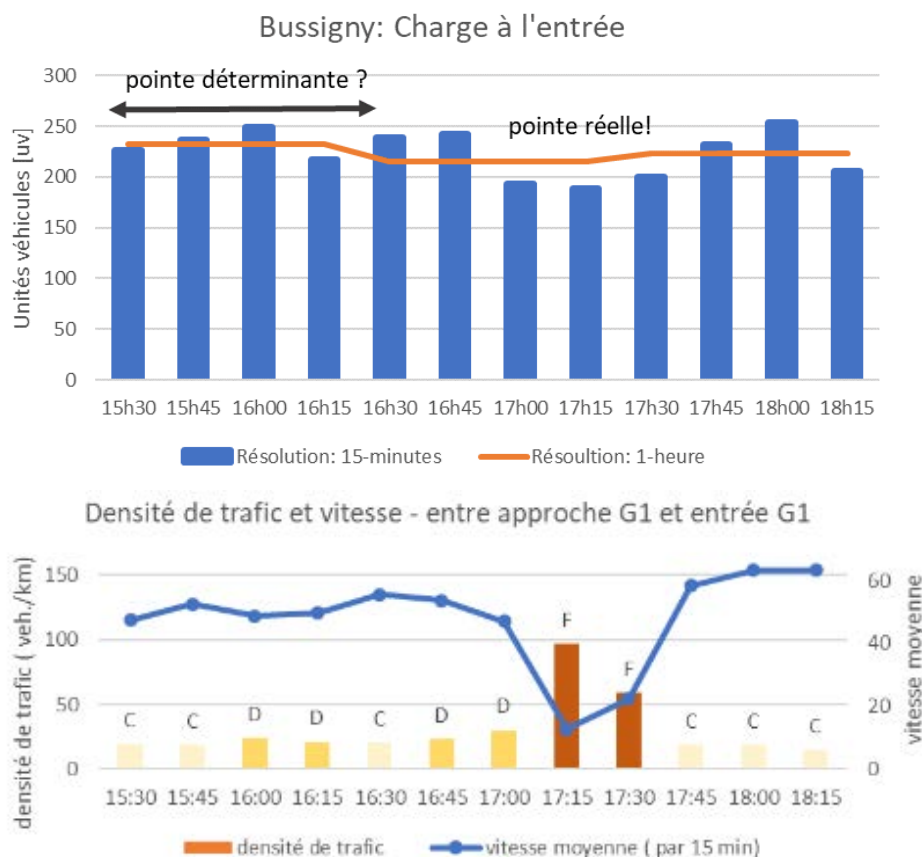


Note : les lettres A à F désignent des niveaux de service (voir §15.3.3)



Fig. 17 Cas d'étude de Belp – Variations de la charge en entrée et de la densité de trafic – Comparaison avec les files observées sur le terrain

- une définition erronée de l'heure de pointe** : l'heure de pointe est actuellement déterminée par la charge de trafic au giratoire. Cela signifie que l'heure où le trafic est le plus important est considérée comme l'heure de pointe déterminante. Cette hypothèse de base n'est pas valable dans toutes les situations. Si le système est près d'une situation saturée, c'est-à-dire lorsqu'il passe d'un état de fluidité à un état de trafic perturbé, le volume de trafic peut diminuer alors que la situation peut toujours être considérée comme perturbée en termes d'impact sur le terrain. Cet effet peut être observé dans l'exemple de Bussigny. La définition de l'heure de pointe est erronée si l'on ne considère que la charge comptée. On obtient une pointe qui se situe en dehors de la pointe observable sur terrain.



Note : les lettres A à F désignent des niveaux de service (voir §15.3.3)

Fig. 18 Cas d'étude de Bussigny – Détermination de la période de pointe en fonction de la charge de trafic en entrée – Différences observées avec le pic de densité de trafic

La période d'analyse considérée doit être adaptée au contexte. Cela signifie que dans une première étape, **il faut décider de la durée déterminante et de la résolution souhaitée en fonction de la situation observée sur le terrain.**

- Comme résolution de base, il est recommandé de considérer des intervalles de 15 minutes.
- La durée de l'analyse devrait au moins être d'une heure, mais elle doit être choisie selon le contexte.

4.3 Influence de la multimodalité

Tab. 7 Tableau de synthèse de la littérature : influence de la multimodalité

Source	Pays	Message clé
(8) VSS - 40 024a	Suisse	L'écart de l'état réel par rapport à l'état de référence sont pris en considération comme suit : On tient compte des catégories de véhicules (vélo, moto, voiture, poids lourd, remorque) en convertissant chacune d'elles en uv (unités véhicules – moyen d'équivalents voitures). Les unités de véhicules sont adaptées en fonction de la déclivité qui influence la capacité d'accélération à l'entrée. Dans la zone d'entrée on tient compte de l'influence de la déclivité de -4% à 4%, pour l'anneau on applique les valeurs pour une déclivité de 0%. Vélo : 0.5 uv (indépendamment de la déclivité) Moto : 0.3 - 0.7 uv (-4% à 4%) Voiture : 0.8 – 1.4 uv (-4% à 4%) PL : 1 – 3 uv (-4% à 4%) TR : 1.2 – 6 uv (-4% à 4%)
(15) TEA 1991	Suisse	Les débits de trafic sont convertis en unités véhicules avec les recommandations suivantes : - Deux-roues légers en entrée : 0.2 uv - Deux-roues légers sur l'anneau : 0.8 uv Si le nombre est faible, il est suggéré d'utiliser un seul coefficient d'équivalence entre 0.3 à 0.5 uv. - Les véhicules lourds : 2 uv
(14) HBS 2015	Allemagne	Afin de tenir compte des différences entre les différentes catégories de véhicules (par exemple la capacité d'accélération), les débits sont convertis en unités de véhicules : Vélo : 0.5 uv Voiture / Moto : 1 uv PL : 1.5 uv TR : 2 uv
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	Deux catégories de véhicules sont distinguées : les véhicules normaux et les poids lourds. Le volume de trafic est converti en unités de véhicules à l'aide de la formule suivante : $Q(uv) = Q * (1 + P_{PL}(2 - 1))$ Q = volume de trafic P_{PL} = part de poids lourd

Tous les manuels utilisent une agrégation plus ou moins détaillée en unités de véhicules. Si certaines catégories de véhicules ne sont pas connues, les méthodes peuvent souvent être appliquées de manière simplifiée. L'influence de la multimodalité et l'utilisation des unités véhicules n'ont pas été étudiées et remises en question.

Cependant, les considérations suivantes ont été faites :

- L'effet des pentes et la différence entre les poids-lourds courts ou longs gagnerait à être utilisés pour le calcul de la capacité des giratoires, comme recommandé par la norme VSS 40 214a ;
- Si les bus ou les cycles disposent de voies permettant le dépassement, il est recommandé de le considérer dans la réflexion, car ils ne participeront pas aux files d'attente des voitures → la formule des files d'attentes devrait donc être adaptée ou le calcul de la file devrait être répercuté sur plusieurs voies en parallèle et pas sur une seule voie ;

- La capacité n'est actuellement indiquée qu'en unités de véhicules. Pour alimenter une discussion sur une meilleure utilisation de l'espace routier, une indication en personnes transportées pourrait également être envisagée. Cela permettrait de montrer les possibilités d'amélioration en cas de changement modal.

4.4 Trafic déterminant

Le paramètre principal d'une analyse est la charge de trafic. **Mais quelle charge de trafic faut-il prendre en compte ? Et comment la définir ?**

Tab. 8 Tableau de synthèse de la littérature : charges de trafic déterminantes

Source	Pays	Message clé
(10) VSS – 40 016a	Suisse	Le trafic déterminant se rapporte soit à l'état actuel soit à un état futur, selon le genre de problème à résoudre. Pour dimensionner des carrefours, on doit tenir compte du trafic directionnel déterminant sur la base des débits horaires.
(9) VSS – 40 002	Suisse	Pour déterminer le trafic déterminant (état actuel), les comptages se déroulent, selon les particularités locales sur de courtes tranches, en général de 15 minutes. Les emplacements des postes seront choisis de manière à éviter si possible, toute l'influence extérieure, pour éviter par exemple des superpositions de trafic.
(8) VSS – 40 024a	Suisse	Pour les infrastructures existantes, on se référera autant que possible aux résultats des recensements de circulation. Les débits de circulations futurs peuvent être estimés à l'aide de modélisation. Pour le dimensionnement, les débits de circulation de tous les courants directionnels du carrefour doivent être indiqués. Chaque courant directionnel est converti en unités de véhicules particuliers uvp. Les courants directionnels sont reportés sur les voies de circulation. Les débits déterminants sont toujours lus au droit d'une entrée pour la charge gênante à l'anneau, aux entrées, ainsi qu'aux sorties.
(14) TEA 1991	Suisse	La méthode distingue trois flux de trafic : le flux circulant, le trafic entrant et le trafic sortant. En outre, un flux gênant est défini, en tenant compte non seulement du flux circulant, mais aussi du flux sortant. On part donc du principe que le flux sortant est une crainte pour la véhicule entrant (tant que la distance entre la sortie et l'entrée n'est pas trop grande).
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	Le trafic déterminant est défini comme le trafic entrant, le trafic circulant (gênant) et le trafic sortant par branche de giratoire. Les charges sont adaptées pour la période de pointe et converties en unités de véhicules particuliers.

4.4.1 Comparaison entre demande satisfaite et demande exprimée

Selon les directives courantes, les charges actuelles considérées (comptées classiquement) sont celles qui se sont écoulées, c'est-à-dire **la demande satisfaite**. Cela signifie que pour un état actuel, le giratoire peut être utilisé au maximum à 100% si la théorie est juste. Une surcharge n'est pas possible avec cette définition du trafic déterminant.

Si une file d'attente perdure à la fin d'une période d'analyse, elle peut être considérée comme une demande supplémentaire liée à cette même période mais qui n'a pas pu être traitée. Pour ne pas tirer de conclusions erronées par rapport à la situation de départ,

cette demande supplémentaire devrait en fait être prise en compte. Cela permet de mettre en évidence les périodes de surcharge à l'état actuel.

La demande exprimée peut donc être définie comme la somme de la demande satisfaite et de la demande supplémentaire. Il s'agit de la demande réelle pendant la période considérée.

Discussions sur la base des résultats de la recherche :

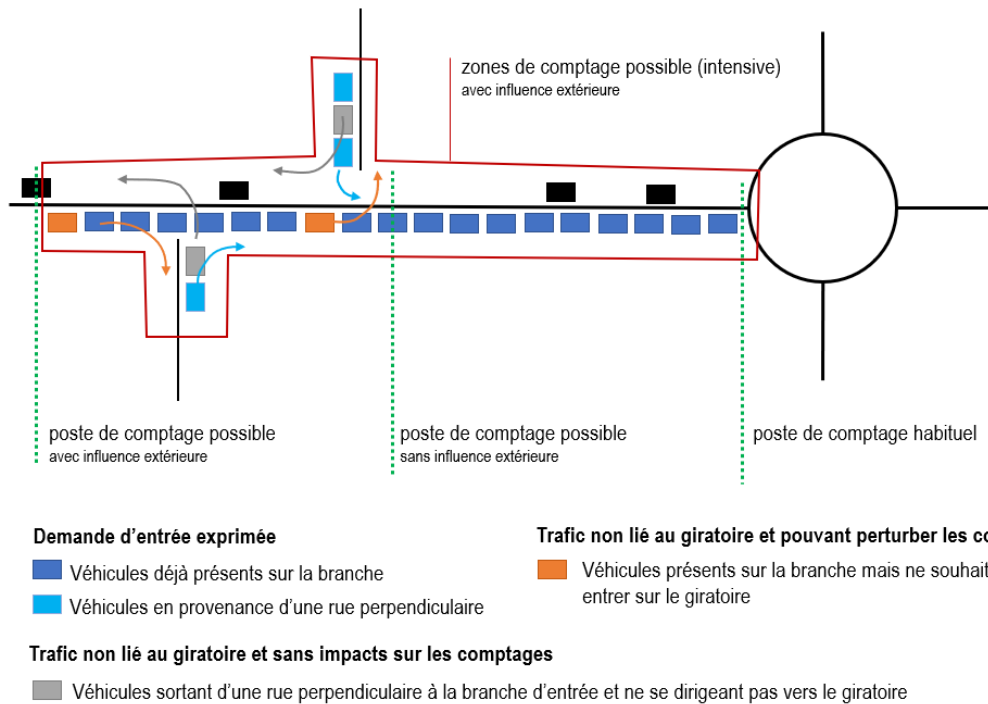


Fig. 19 Positionnement possible des caméras en fonction de la demande exprimée et du trafic non lié au giratoire étudié

Ainsi, **il est recommandé de toujours veiller à disposer un point de comptage le plus en amont de la branche possible, sans toutefois faire exploser la complexité des relevés.** En outre, il est recommandé de toujours veiller à l'état du trafic au début et à la fin de la période considérée.

Dans certains cas, la différence entre la demande exprimée en amont et la demande satisfaite à l'entrée du giratoire sera minime (si la situation est fluide à la fin de la période). Dans d'autres cas, les files d'attente remonteront bien au-delà du point de comptage de la demande exprimée en amont → il s'agit alors d'évaluer l'opportunité de placer un point de comptage encore plus en amont ou de veiller – plus simplement – à rajouter une demande supplémentaire estimée. Dans la plupart des cas, **le point de comptage en amont permettra d'obtenir une meilleure estimation de la demande exprimée, mais aussi d'avoir un point de vue sur l'état du trafic sur la branche.**

4.4.2 Vision par branche et vision par voie

La norme indique que les charges de trafic directionnelles déterminantes doivent être prises en compte, mais ce n'est pas toujours le cas actuellement. Pour les entrées à deux voies, la totalité de la branche est aujourd'hui considérée. Selon les recherches (1), (4), cette simplification est possible si la charge est répartie de manière uniforme. Si ce n'est pas le cas, des erreurs importantes peuvent survenir dans le calcul de la capacité. La capacité d'écoulement de la branche est alors plutôt surestimée.

Discussions sur la base des résultats de la recherche :

Pour les cas d'études (Bulle), la charge de trafic a été enregistrée par voie d'entrée. Cela nous a permis d'effectuer les calculs de capacité et de files voie par voie et de tirer ainsi de précieuses conclusions sur la longueur nécessaire des voies de présélections. Les observations et les conclusions suivantes ont pu être tirées :

- la répartition des volumes de trafic n'est uniforme que dans certains cas de giratoires et pas pour toutes les branches. Dans de nombreux cas, il existe une voie plus chargée en fonction des directions où la circulation est privilégiée. Cela peut aller jusqu'à ce qu'une seule voie soit utilisée à certaines heures (Bussigny).
- dans les cas de charges déséquilibrées entre voies, la branche peut ne pas être surchargée alors que l'une des voies l'est. Cela peut conduire à un blocage d'une voie sur l'autre dans le cas de voies de présélection courtes.

Ainsi, il est à retenir que **le comptage du volume de trafic par voie d'entrée devrait être obligatoire pour les giratoires à deux voies afin d'évaluer si une simplification du calcul est autorisée**. En général, il faut envisager un calcul voie par voie. Si les données relatives à la répartition manquent, il convient de faire une hypothèse correspondante sur la base des observations sur place et des relations de circulation.

4.4.3 L'influence du flux sortant

Actuellement, la littérature ne conclut pas sur l'influence déterminante du flux sortant sur la capacité du giratoire. Alors que la norme actuelle ne tient pas compte du flux sortant pour le calcul de la capacité, la méthode TEA part du principe que celui-ci a un effet gênant. Des recherches plus récentes suggèrent que le flux sortant peut avoir une influence positive sur la capacité d'entrée en créant des possibilités pour le véhicule entrant de s'insérer (6). D'autres recherches montrent que le flux sortant peut être aussi bien perturbateur qu'utile, en fonction du contexte et de la répartition du flux de circulation (3).

Discussions sur la base des résultats de la recherche :

Sur la base de la littérature, l'hypothèse suivante a été formulée : le flux sortant peut être plutôt aidant ou plutôt gênant selon la compacité du giratoire et la répartition des charges entre les branches par origine-destination :

- **flux plutôt aidant** : lorsque le giratoire est compacte, le véhicule en insertion (en gris ci-dessous) est gêné par le flux circulant (en rouge). Si le flux sortant (en bleu) est important, il bloque l'entrée liée au flux gênant. L'insertion est donc facilitée et les gaps sont allongés. On fait l'hypothèse que cet effet aidant du flux sortant devrait être plus significatif en situation saturée;

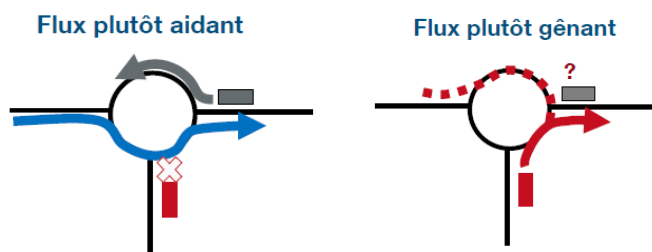


Fig. 20 Comparaison entre un flux sortant aidant et un flux sortant gênant

- **flux plutôt gênant** : lorsque le giratoire est compacte et qu'il y a une ambiguïté sur la destination du véhicule dans l'anneau (en rouge), il se peut que le véhicule entrant (en gris) refuse des créneaux qui auraient pu sembler attractifs.

Dans l'exemple de Brig, il a été possible de percevoir une différence assez significative dans la difficulté/facilité pour les véhicules entrants de s'insérer, en fonction de l'origine du flux sortant. Cela semble confirmer que le flux sortant ne doit pas être considéré de façon univoque. Certains véhicules sortants semblent favorables à l'insertion tandis que d'autres sont défavorables.

En outre, les résultats montrent une alternance des deux effets :

- un effet aidant quand le flux circulant est bloqué. Les gaps sont alors plus longs, ce qui facilite l'insertion;
- un effet gênant lorsque la branche orthogonale - qui avait été mise en attente - se libère. Les gaps sont alors plus courts, comme dans un convoi, ce qui entraîne une phase avec un trafic gênant élevé formant une obstruction.

D'autres éléments peuvent avoir une influence sur la gêne exercée par le flux sortant tels que l'utilisation ou non du clignotant par les véhicules sortant de l'anneau (la non-utilisation du clignotant créant une ambiguïté sur la direction du véhicule) ou la taille du giratoire (un grand diamètre permettant au véhicule entrant de mieux cerner la trajectoire du véhicule dans l'anneau). Des travaux de recherche dédiés sont nécessaires afin de déterminer l'impact de ces facteurs sur le caractère gênant du flux circulant.

Ainsi, il est à retenir que des recherches plus approfondies seraient utiles afin d'identifier clairement le lien entre les flux sortants et la capacité utilisée. En effet, si le flux sortant est considéré comme gênant, les calculs de capacité sont sous-estimés et cela génère un pessimisme non fondé. En situation saturée, c'est parfois uniquement grâce au flux sortant que le flux en insertion parvient à s'écouler. Dans ces cas, une hausse du flux sortant pour aider à écouler la branche. Toutes ces investigations doivent être approfondies.

5 Etape 2a – Recueillir les données de base nécessaires aux analyses

5.1 Définir le protocole expérimental

La première étape d'une étude consiste à récolter des données de trafic brutes sur le terrain, principalement sous forme de vidéos aux abords du carrefour étudié.

Le protocole expérimental permet de définir clairement les conditions de ces mesures, à savoir :

- De combien de caméras a-t-on besoin et où les positionner ?
- Quand l'acquisition des vidéos doit-elle être réalisée et pendant combien de temps ?
- A-t-on besoin de réaliser d'autres types de mesures (ex : vitesse) ?

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de réaliser des observations sur le terrain en période de pointe afin de comprendre le fonctionnement actuel du carrefour. Les périodes de pointe se situent généralement entre 6h et 8h le matin et entre 16h30 et 18h30 le soir mais cela peut être sur une période plus étendue. Pour bien l'identifier, il est possible de récupérer les données de Google trafic pour visualiser les ralentissements en approche du giratoire. Cela peut être fait en complément des observations de terrain ou en solution alternative. **Il s'agit alors d'effectuer les observations au moins une heure avant et une heure après la période la plus saturée.**

En cas de congestion et en particulier en cas de blocage du carrefour, il est recommandé d'observer le fonctionnement des carrefours avoisinant le carrefour étudié, surtout en situation urbaine.

Les observations possibles et les conséquences sur le positionnement des caméras sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Observations liées au fonctionnement du carrefour	Conséquences sur le positionnement des caméras	Autres mesures nécessaires	Pour plus d'informations
Fluidité du trafic, pas de remontées de files.	Positionnement des caméras en entrée de giratoire seulement.		
Saturation, remontées de file depuis le giratoire	Positionnement des caméras en entrée et en amont du giratoire. Les caméras positionnées en amont doivent pouvoir visualiser toute la file, au maximum de sa longueur. Si des carrefours sont présents entre la position de la caméra amont et l'entrée du giratoire, il est recommandé de placer des caméras aux intersections afin d'identifier les véhicules qui entrent et sortent de la branche du giratoire.		§4.1. Espace, périmètre d'analyse §4.4.1. Comparaison entre demande satisfaite et demande exprimée
Blocage du giratoire dû à la remontée de file liée à un autre conflit en aval	Positionnement des caméras en aval pour visualiser cette remontée de file « externe »	Mesure des vitesses des véhicules en différents points du flux bloqué	§4.1. Espace, périmètre d'analyse §6.2. Influence des carrefours en aval : les

	Eventuellement, positionnement de caméras au niveau du carrefour à l'origine de la file.	situations de blocage à l'anneau
Présence de passages piétons en entrée ou sortie de giratoire avec des flux piétons importants	Positionnement de caméras au niveau des traversées piétonnes de façon à voir les piétons et vélos qui traversent.	§4.1. Espace, périmètre d'analyse 6.1. Influence des piétons
Blocage d'une file sur l'autre dans le cas d'un giratoire à plusieurs voies d'entrée.	Positionnement des caméras à l'entrée de façon à distinguer les véhicules se positionnant sur les différentes voies.	§4.1. Espace, périmètre d'analyse §4.4.2 Vision branche et vision voie

5.2 Effectuer le traitement logiciel

Le traitement des données issues des vidéos se fait principalement en trois étapes, comme illustré sur le schéma ci-après.

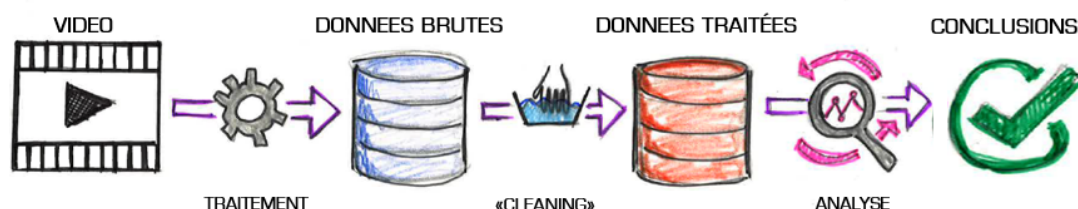


Fig. 21 Processus de traitement données brutes

Etape 1 - Traitement : les données vidéos sont traitées par des algorithmes qui identifient automatiquement différentes classes de véhicules et leur affecte un centroïde. Ce point est suivi avec un horodatage, un type de véhicule et une vitesse. Il est possible de définir des lignes géométriques virtuelles dans la vidéo et d'interroger le logiciel pour savoir à quelle heure et avec quelle vitesse chacun des centroïdes intersecte la ligne.

Ainsi, il est possible d'obtenir les matrices Origine-Destination entre les branches d'entrées et les branches de sortie du giratoire. Il est également possible de savoir combien de temps une voiture met entre le moment où elle arrive en position d'insertion et le moment où elle s'insère effectivement dans l'anneau. Dans notre cas, les recherches ont porté sur :

- Enregistrement des volumes de trafic et de leur distribution dans le giratoire (charges directionnelles) ;
- Enregistrement des heures d'arrivée à l'entrée du giratoire puis à l'insertion dans l'anneau ;
- Enregistrement des temps intervéhiculaires entre les véhicules circulant dans l'anneau ;
- Le cas échéant, enregistrement des vitesses dans l'anneau ou en approche.

Etape 2 – « Cleaning » : les données fournies par le logiciel de traitement vidéo sont encore dans un format lourd et l'étape 2 consiste à traiter ces données avec un code Python pour les transformer entre données plus faciles à traiter dans Excel. En outre, le codage Python permet de confronter les données entre elles, ce qui permet également d'obtenir les informations suivantes :

- Pour tous les créneaux intervéhiculaires, il est possible de savoir si le créneau a été utilisé ou refusé, combien de véhicules ont pu s'insérer et à quel moment ;

- Il est également possible de savoir si le créneau a été utilisé mais qu'une grande partie du créneau restait disponible pour une utilisation par un autre véhicule.
- Comme chaque véhicule est identifié dans le champ visuel de la vidéo, il est possible de poser une caméra sur la branche pour connaître son temps de parcours entre deux lignes virtuelles. Il est donc possible de définir sa vitesse moyenne entre deux points.

Etape 3 - Analyse : ces données traitées peuvent alors être utilisées comme base pour l'analyse :

- Avec les créneaux acceptés ou refusés, et leur durée, on peut déterminer les facteurs « critical gaps » et « follow-up times » de la méthode critical gap (voir partie 7).
- Avec les flux comptés et les vitesses moyennes, il est possible de définir des densités de trafic par tronçon.

6 Etape 2b - Tenir compte des facteurs de congestion externes au giratoire

6.1 Influence des piétons

En milieu urbain, il existe souvent des passages piétons à chaque branche d'un giratoire, qui permettent aux piétons du système de traverser le carrefour. Ces derniers peuvent influencer la performance du giratoire. **Mais quelle est l'influence de la mobilité piétonne et comment la prendre en compte ?**

Tab. 9 Tableau de synthèse de la littérature : influence des piétons

Source	Pays	Message pertinent
(8) VSS - 640 024a	Suisse	Les piétons qui traversent peuvent porter atteinte à la capacité. Dans l'entrée, l'influence diminue avec l'augmentation des débits de circulation dans le giratoire. En sortie, l'effet est renforcé de manière linéaire avec l'augmentation du volume de trafic piétons. Celui-ci peut avoir un effet de blocage sur la sortie et ce peut influencer en effet cascade l'entrée. Ces interactions ne sont pas prise en compte et nécessite une simulation. L'influence sur la capacité en entrée ou sortie sont prise en compte à partir de 50 - 100 piétons/h avec un facteur de correction.
(4) ETHZ 2004 (VSS 1998/076)	Suisse	Une influence sur la capacité d'entrée est visible déjà pour des petits flux piétons. L'influence diminue cependant avec l'augmentation de la charge gênant à l'anneau, car les véhicules doivent de toute façon attendre avant d'entrer dans le giratoire.
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	Les piétons qui traversent peut réduire la capacité d'entrée si le nombre de piétons présents est suffisant (à partir de 25 – 50 piétons/h). En cas de flux gênant importants, les piétons passent généralement entre les véhicules en file d'attente, l'impact sur la capacité est donc négligeable.

Les normes et directives actuelles partent du principe qu'il existe une influence du trafic piétons sur la performance d'une giratoire (entrée et sortie). L'effet des piétons sur les flux en sortie doit toujours être pris en compte, car ils risqueraient de générer une congestion dans l'anneau, ce qui pourrait complètement modifier le fonctionnement même du giratoire. Il y a quasiment aucune analyse scientifique sur l'effet des piétons en sortie des giratoires.

Toutefois, plusieurs publications traitent de l'influence des passages pour piétons en entrée des giratoires. Celle-ci est forte si :

- Les charges de trafic dans l'anneau sont relativement faibles et que les flux de piétons sont élevés ;
- Que la longueur de stockage entre l'anneau et le passage pour piétons est faible. En effet, si trois véhicules environ peuvent se stocker au céder-le-passage, l'insertion dans le giratoire reste opérationnel pendant le temps de traversée d'un petit groupe de piétons.

Dans le cadre de cette recherche, l'effet des piétons n'a pas été approfondi en raison des volumes de trafic piétonnier plutôt faibles à tous les giratoires observés. En revanche, les phénomènes de refoulement observés au giratoire de Provence et à Bussigny nous ont permis de développer de nouvelles méthodes qui pourront servir en cas de forte traversée piétonne en aval.

6.2 Influence des carrefours en aval : les situations avec blocage de l'anneau

Lorsqu'un conflit en aval génère des files d'attente dans le giratoire, on parle de congestion dans l'anneau ou de « situation complexe ». Dans ces cas-là, toutes les théories connues (régression, critical gap) sont invalides pour les zones congestionnées de l'anneau. Il est donc essentiel que les données de base permettent de détecter de tels épisodes de congestion pour les traiter à part.

Il y a plusieurs façons dont un anneau peut être congestionné et cela peut affecter certains flux mais pas d'autres. Deux remarques préliminaires doivent être faites :

- Une congestion dans l'anneau va gêner et bloquer certains flux. Ce faisant, les flux bloqués ne vont plus gêner certains autres flux. Une congestion va donc aider d'une part et gêner d'autre part ;
- Une congestion dans l'anneau doit être évaluée du point de vue des autres flux, qu'elle aide ou qu'elle gêne.

Dans le graphique ci-dessous, une première tentative de classification des types de congestion est esquissée. La congestion est créée par la traversée piétonne verte située en aval. Le flux congestionné est en violet, tandis qu'on évalue la gêne sur le flux en rouge.

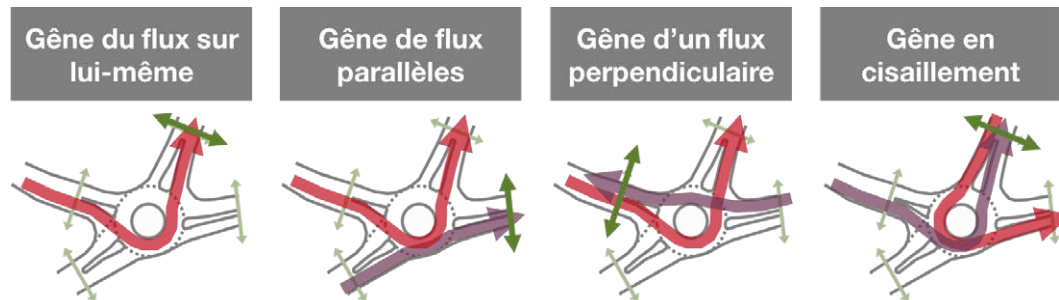


Fig. 22 Classification des différents types de congestion dans l'anneau

Cas 1 : on prend pour exemple que le flux congestionné déterminant vient de l'ouest et va vers le nord. Le flux se gêne donc lui-même. Cela correspond à l'adage « vous n'êtes pas dans les bouchons, c'est vous qui êtes le bouchon ». Dans ce cas, la capacité d'écoulement à l'entrée dans l'anneau est directement influencée par la capacité d'écoulement à la traversée piétonne, qui doit être répartie entre les différents flux qui y convergent.

Cas 2 : le flux en rouge est bloqué, mais le flux en violet est tangent. Plusieurs cas de figure sont possibles : si l'anneau est étroit ou que les véhicules du flux sont trop larges, le flux violet est bloqué. Ainsi, une saturation se crée sur la branche sud. A l'inverse, si l'anneau est large et que le flux en violet peut s'écouler sans problème, il n'y a pas de gêne directe.

Cas 3 : le flux en rouge est un obstacle pour le flux violet, perpendiculaire. Mais si les usagers du flux bloqué sont courtois et respectent les règles de circulation, ils laissent un passage et le flux violet peut s'écouler. Il est même possible que ponctuellement, le flux violet s'écoule mieux que si flux rouge était fluide (et prioritaire). Dans le cas de Malley, cette capacité d'écoulement « de courtoisie » a été évaluée via des comptages. Il faut toutefois signaler que ce genre de situations est accidentogène, notamment pour les cyclistes qui ne sont pas très visibles au milieu des carrosseries des voitures relativement hautes.

Cas 4 : dans le cas en cisaillement, le flux violet souhaite ne longe mais le flux bloqué, il ne le croise pas, mais il doit le cisailier. C'est une manœuvre difficile à effectuer et la gêne sera forte.

Il est à retenir qu'une saturation en aval d'un giratoire va générer un blocage dans l'anneau, qui va générer en cascade plusieurs autres points de conflits. Ces points de conflits pourront générer à leur tour des saturations. Dans le cas d'une situation actuelle, il est essentiel

d'effectuer des relevés de terrain, à objectiver par des relevés de densité. Dans le cas d'une situation projetée, une analyse manuelle est possible mais il devient pertinent de faire recours à la micro-simulation dynamique. Si ces situations deviennent récurrentes, on peut se poser la question de la pertinence d'un giratoire, qui ne permet pas bien de gérer les files d'attentes.

7 Etape 2c – Produire les estimations de capacités

L'évaluation de la capacité des giratoires a fait l'objet de nombreuses recherches nationales et internationales. Différentes méthodes, pouvant être classées en trois catégories, ont ainsi été définies :

- **les méthodes empiriques par régression** (toutes les méthodes actuellement utilisées en Suisse sont basées sur ce principe);
- **la théorie « gap acceptance »** qui se focalise sur le comportement des automobilistes et utilise un modèle de calcul déterministe;
- **l'analyse par simulation.**

Les trois catégories ont leurs avantages et leurs inconvénients, ce qui explique qu'elles soient toutes utilisées actuellement au niveau international. En complément des trois méthodes principales, **une méthode déterministe** a également été développée dans le cadre de cette recherche.

Dans les sous-chapitres suivants, les trois catégories principales ainsi que la méthode déterministe sont brièvement présentées. Leurs forces et faiblesses sont recensées en se basant sur la littérature et les résultats des cas d'étude.

7.1 Capacité utilisée : définition

La capacité utilisée correspond au rapport entre une demande (la charge de véhicules souhaitant s'insérer dans le giratoire) et une offre (la charge que le giratoire peut théoriquement écouler i.e. la capacité d'écoulement).

$$CU (\%) = \frac{\text{Charge réelle mesurée (demande)}}{\text{Charge maximale théorique pouvant être écoulee (offre)}}$$

Si la capacité utilisée est inférieure à 100%, cela signifie qu'une réserve de capacité est disponible et que la demande peut théoriquement encore augmenter.

Un résultat de capacité utilisée est toujours relié à une période donnée. On compare la charge écoulee sur cette période avec la charge théoriquement écoulable sur cette même période. La valeur obtenue est donc une valeur moyenne. Si la capacité utilisée est égale à 100% pour 60 minutes, elle sera peut-être à 80% sur 10 minutes de cette même période et à 120% pendant 10 autres minutes.

Pour bien voir ces fluctuations, il est recommandé d'afficher la capacité d'écoulement théorique dans le temps ainsi que la demande exprimée dans le temps. A partir du ratio entre ces deux valeurs, on peut déduire la capacité utilisée dans le temps. Il est important de ne pas tout de suite exprimer la CU mais de garder en vue le numérateur et le dénominateur, pour s'en faire une meilleure idée.

7.2 Méthodes empiriques par régression

Les méthodes de calcul par régression sont basées sur des courbes de tendance obtenues empiriquement et exprimant la demande à l'entrée du giratoire (Q_E) en fonction de la charge de trafic à l'anneau (Q_A). Ces courbes sont obtenues de la manière suivante : les volumes de trafic sur l'anneau (incluant parfois le flux sortant Q_S) et sur l'entrée du giratoire sont mesurés simultanément, dans différentes conditions de trafic. Les données représentées par un nuage de points sont ensuite soumises à une analyse de régression afin de trouver la meilleure formule les reliant.

Ces courbes ont été établies pour différents types de giratoires : giratoires simples avec une voie à l'entrée et à l'anneau, giratoires avec deux voies à l'entrée et deux voies à

l'anneau... Les principaux facteurs d'influence géométrique pris en compte pour déterminer les courbes de régression et, en partie, dans les formules qui en résultent, sont les suivants :

- le diamètre;
- la largeur de l'entrée;
- la distance entre l'entrée et la sortie;
- le nombre de voies de circulation dans le giratoire et au niveau des entrées.

Le tableau ci-dessous présente brièvement les méthodes par régression les plus courantes en Suisse. Toutes ces formules expriment la capacité d'écoulement théorique (C_E) pour une heure.

Tab. 10 Tableau de synthèse de la littérature : méthodes basées sur des courbes de tendance par régression – formules pour le calcul de la capacité utilisée

Pays	Auteur	Années	Formules	Remarque
Suisse	VSS	1992 / 2004	$C_E = 1141 - 0.578 \times Q_A$ $CU = Q_E / C_E$	(19) Emch/Berger (1990), révisé par (4) ETHZ (2004). Focus sur les giratoires simples avec une voie à l'anneau ou une voie large compatible pour deux véhicules.
Suisse	TEA	1992	$C_E = 1500 - 8/9 \times (\beta Q_A + \alpha Q_S)$ $CU = \gamma Q_E / C_E$ α = coefficient en fonction de la distance curviligne entre sortie et point de conflit d'entrée β = facteur de réduction selon le nombre de voies sur l'anneau γ = facteur de répartition selon le nombre de voies à l'entrée	Guide Suisse des Giratoires (16) : recommandé pour des situations urbaines et péri-urbaines. Formule basée sur des paramètres liés à la configuration du giratoire et aux vitesses pratiquées.
Suisse	ETHZ, IVT 2009		$C_E = 1636 \times e^{(-0.0006 \times Q_A)}$ $CU = Q_E / C_E$	Formules développées par (5) l'ETH Zurich afin de prendre en compte les cas de double-voies à l'anneau.

D'autres méthodes par régression ont été développées dans d'autres pays comme la méthode de Kimber utilisée en Angleterre. En France, le logiciel Girabase développé par le CEREMA est également basé sur des méthodes par régression. Sa base de données importante permet de distinguer les situations rurales ou urbaines, ainsi que plusieurs types de géométries.

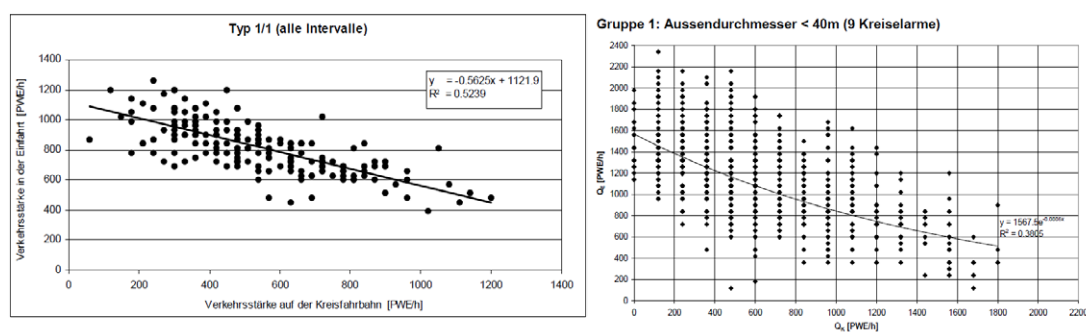


Fig. 23 Courbes de tendances pour des giratoires simples (gauche) et avec deux voies à l'anneau (droite) – Sources : ETHZ / VSS 2004 et ETHZ / VSS 2009

Les différentes lois ne sont applicables qu'aux types de giratoires et aux conditions de trafic pour lesquels les mesures ont été réalisées. Elles ont généralement été obtenues en étudiant des cas réels relativement simples et en nombre limité. Ainsi, certaines géométries telles que les grands diamètres ou les formes ovales ne sont pas prises en compte. Les voies multiples à l'anneau ou en entrée ne sont pas gérées par toutes les méthodes. Enfin les situations de saturation, de blocage de l'anneau ou de refoulement d'un carrefour voisin ne sont couvertes par aucune des méthodes. Le tableau ci-dessous résume les cas d'application des formules selon les méthodes.

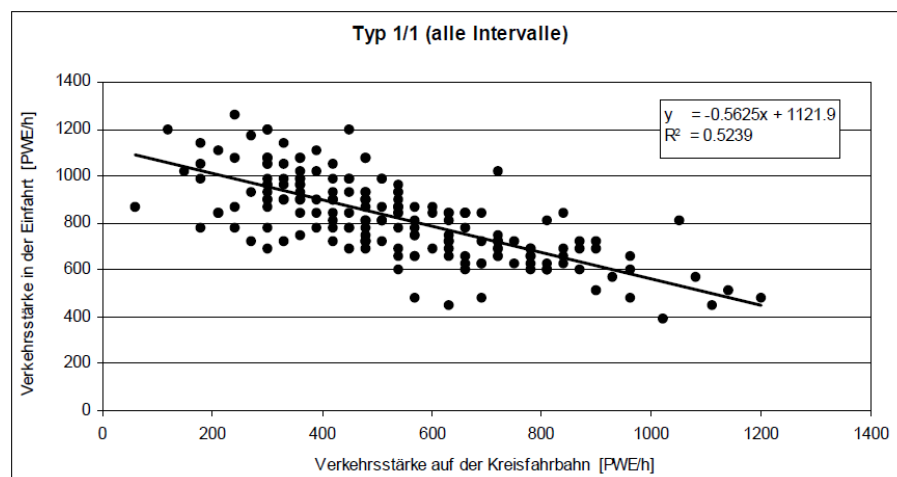
Tab. 11 Limites d'application des méthodes par régression

Applicabilité	VSS	TEA	ETHZ 2009
Diamètre	26 à 40 m	22-35 m	30-60 m
Formes particulières (difformées, ovales très prononcés...)	X	X	X
Voies multiples dans l'anneau	X	OUI	OUI
Plusieurs voies d'entrée	OUI	OUI	OUI
Plusieurs voies de sortie	OUI	?	?
Accès régulé (carrefour ou passage piétons régulé à proximité)	X	X	X
Infrastructure de transport public ou modes actifs			
Exemples : arrêt de bus à proximité, ligne de tram traversant le giratoire, entrées/sorties spéciales pour les vélos	X	X	X
Situations saturées / congestionnées	X	X	X

7.2.1 Les limites d'applicabilité

Des résultats sensibles

Les courbes de régression ont été obtenues à partir d'un nombre limité de données, qui peuvent présenter des différences relativement importantes pour une même méthode si l'on considère les écarts visibles entre les points et la courbe.

**Fig. 24** Régression à partir d'un nuage de points (ETHZ / VSS 2004)

Ces courbes ne modélisent donc pas parfaitement la réalité. Elles sont assez approximatives et représentent plutôt une tendance. Comme indiqué dans la figure ci-dessus, le coefficient de corrélation R^2 est très éloigné de 1, ce qui montre que l'aptitude du nuage de points à être représenté par une courbe est très limitée. Le nuage de points s'étend sur des valeurs situées à +/- 20% autour de la courbe. Cette variabilité mériterait d'être affichée clairement dans la formule de la capacité utilisée qui est déduite de cette analyse mais les normes ne la mentionnent pas et les usagers n'ont pas directement accès à cette étape méthodologique.

Par ailleurs, le choix des paramètres d'entrée (α , β et γ de la méthode TEA par exemple) peut également provoquer des variations importantes de résultats. Le résultat d'une analyse par TEA (exemple d'une branche du giratoire à Malley, Lausanne) peut donner des différences de +/-30% selon les valeurs choisies pour les paramètres. Il est donc difficile de savoir si un résultat de capacité utilisée est pertinent.

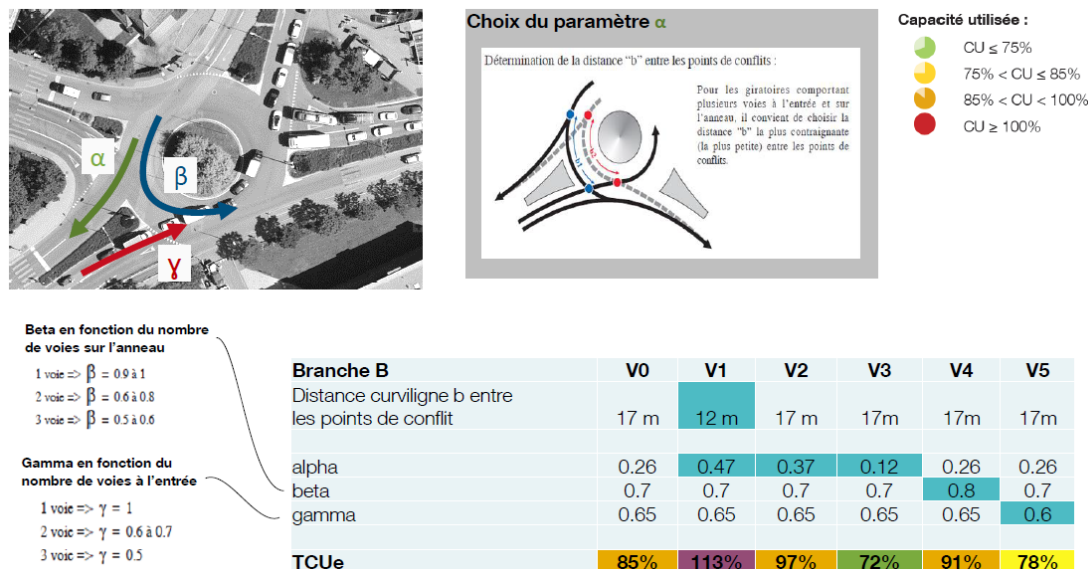


Fig. 25 Sensibilité de la méthode de calcul TEA en fonction des valeurs des paramètres α , β et γ

La conclusion principale de cette analyse est que la réserve de capacité ne donne pas d'indication directe sur le fonctionnement et les phénomènes visibles. L'interprétation est donc difficile.

Des résultats difficilement comparables

Les recherches VSS 1998/076 avaient déjà constaté les limites des méthodes par régression, principalement en raison de la grande incertitude des résultats en situation saturée avec une large fourchette de résultats possibles en fonction des méthodes.

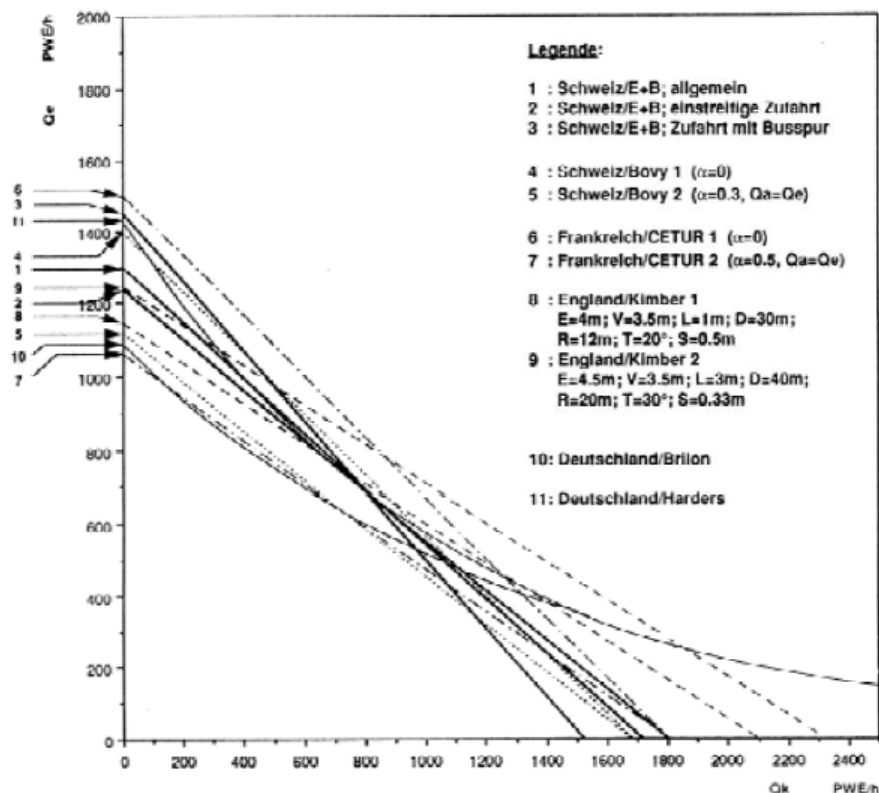


Fig. 26 Superposition des courbes de régression selon les pays, les géométries et les configurations de giratoires

Bon nombre de pays européens ont produit leurs propres abaques, à partir des données empiriques de leurs pays. Les différences entre les méthodes sont importantes, spécialement dans les zones limites, c'est-à-dire pour des charges à l'anneau et à l'entrée très basses ou très élevées. La grande dispersion dans les zones limites s'explique probablement par un volume de données à disposition plus faible. Il est donc difficile de conclure s'il existe réellement des différences régionales en utilisant cette base.

7.2.2 Conclusions

Les méthodes empiriques basées sur la régression atteignent leurs limites. Elles permettent une évaluation rapide et fiable de la capacité dans les situations simples et comparables. Mais c'est surtout dans les régions urbaines, où la charge de trafic est importante et où les infrastructures et les facteurs d'influence sont différents, que des méthodes plus flexibles sont nécessaires.

D'autre part, il est nécessaire de pouvoir mieux comparer les résultats avec la réalité. Pour cela, il faut d'une part des indicateurs solides et d'autre part des méthodes plus proches du comportement des automobilistes.

7.3 La théorie de « gap acceptance »

La théorie « gap acceptance » est basée sur le comportement de l'automobiliste, en le décrivant dans un modèle de calcul déterministe. La théorie part du principe que la répartition des créneaux entre les véhicules roulants dans l'anneau du giratoire (nombre, durée) est déterminante pour la capacité. Un créneau est défini comme l'espace libre entre deux véhicules dans l'anneau, qui peut être utilisé (si suffisamment long) pour entrer dans le giratoire. La méthode se place ainsi du point de vue microscopique d'un automobiliste qui veut

entrer le giratoire et doit décider s'il utilise l'intervalle disponible ou s'il attend pour un prochain créneau.

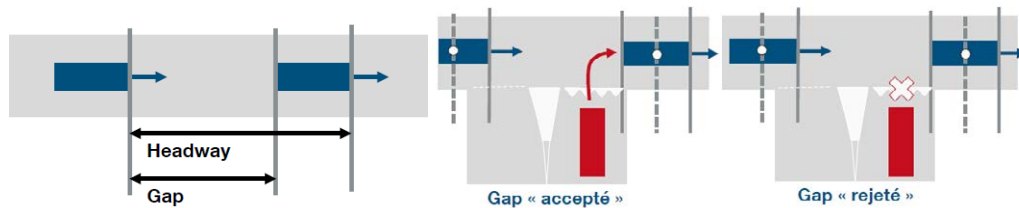


Fig. 27 Illustration des gaps impliqués dans la théorie « gap acceptance »

Les formules et méthodes existantes s'appuient, pour calculer la capacité principalement sur les paramètres suivants :

- la **charge de trafic dans l'anneau** du giratoire (Q_A) en tant que valeur associée à la répartition des créneaux du giratoire;
- la valeur du « **critical gap** » - l'écart de temps critique (t_{cr}) pour entrer le giratoire;
- la valeur du « **follow-up-time** » - le temps nécessaire (t_f) pour qu'un véhicule suiveur puisse entrer dans le giratoire à la suite d'un autre véhicule et ce dans le même créneau que ce dernier.

Les paramètres sont décrits un peu plus en détail dans les chapitres suivants et mis en relation avec les résultats observés de la recherche.

Le tableau ci-dessous présente brièvement deux méthodes « gap acceptance ». Les formules s'appuient sur la même base exponentielle, avec des différences mineures. Les formules expriment la capacité d'écoulement (C_E) pour une heure. Pour des périodes plus courtes, la charge Q_A et l'heure de référence (3600 secondes) doivent être adaptée en conséquence :

Tab. 12 Tableau de synthèse de la littérature : méthodes basées sur la théorie « gap acceptance » – formules pour le calcul de la capacité utilisée

Pays	Auteur	Années	Formules	Remarque
Allemagne	HBS	2015	$C_E = \left(1 - \frac{t_{min} * Q_A}{3600}\right) * \frac{3600}{t_{min}} * e^{-\frac{Q_A}{3600} * (t_{cr} - \frac{t_f}{2} - t_{min})}$ $CU = Q_E / C_E$ t_{min} = minimal gap	Basé sur une idée de Tanner (1997), révisé par Brilon et Wu (2001) et encore Wu (2014).
USA	HCM	2010	$C_E = f_{lourd} * f_p * \frac{3600}{t_f} * e^{-\frac{Q_A}{3600} * (t_{cr} - \frac{t_f}{2})}$ $CU = Q_E / C_E$ f_{lourd} = facteur réduction poids lourd f_p = facteur réduction piétons	Avec une possibilité intégrée d'appliquer des facteurs de réduction sur la base de la proportion de poids lourds et de piétons.

7.3.1 La charge de trafic à l'anneau et la répartition des créneaux

Le nombre total des créneaux inter-véhiculaires est directement lié à la charge de trafic dans l'anneau du giratoire (nombre total des créneaux = $Q_A - 1$). Dans certaines situations, il peut être judicieux d'inclure également une partie du trafic sortant. En effet, selon la situation, il est difficile pour l'automobiliste entrant de faire la différence entre ce flux sortant et le trafic restant dans le giratoire. Le flux sortant est perçu comme faisant partie de la charge à l'anneau (3).

Les intervalles de temps dans l'anneau d'un giratoire suivent une distribution log-normale (5). La distribution log-normale présente une obliquité vers la droite par rapport à une distribution normale, c'est-à-dire qu'il y a plus de créneaux courts que de créneaux longs. Cette répartition a pu être observée dans notre cas d'étude (figures 41 ci-après).

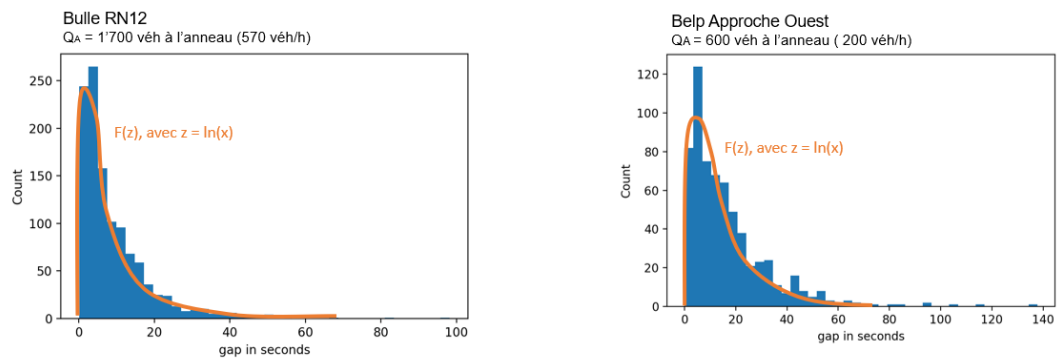


Fig. 28 Distribution des gaps pour les cas d'étude de Bulle et de Belp

Grâce à cette relation, la répartition créneau peut être expliqué mathématiquement à l'aide de la charge sur l'anneau.

7.3.2 Critical gap

La valeur du « critical gap » correspond au créneau minimal pouvant être accepté – c'est-à-dire que si le créneau est inférieur à cette valeur, l'automobiliste moyen a tendance à attendre un créneau plus long et que si le créneau est égal ou plus long, l'automobiliste entre dans la giratoire. Cette valeur ne peut pas être observée directement. Il s'agit d'une valeur théorique qui est fortement liée à une décision personnelle. La valeur est déterminée soit par une comparaison graphique de tous les créneaux acceptés par rapport à tous les créneaux refusés (méthode graphique), soit par une approximation avec la méthode maximum-likelihood. Cela signifie que des intervalles plus courts que le « critical gap » sont tout de même utilisés par une partie des automobilistes (les plus réactifs, ceux prenant plus de risques).

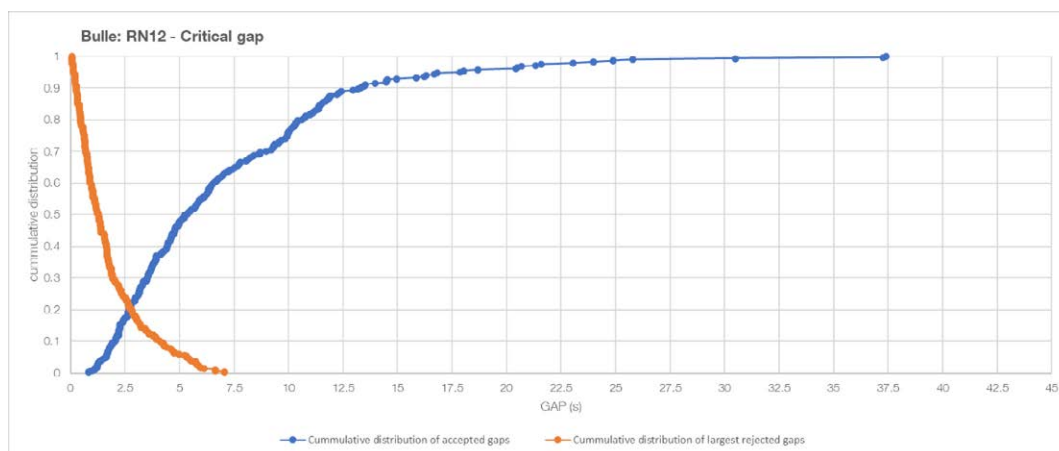


Fig. 29 Détermination graphique du « critical gap » basée sur la mesure des gaps acceptés et rejetés

La valeur du « critical gap » peut varier en fonction du contexte à cause des différences régionales et culturelles dans le comportement des automobilistes, des variations de vitesses pratiquées dans le giratoire et du nombre de voies présentes. Sur un giratoire, les différentes branches et même les différentes voies d'une même branche peuvent présenter des valeurs différentes.

Voici un aperçu de valeurs possibles du critical gap comprenant les valeurs standards tirées des méthodes HBS/HCM et des valeurs mesurées pour les cas d'étude.

Tab. 13 Inventaire de valeurs du « critical gap » pour les giratoires à une ou deux voies dans l'anneau : valeurs standard tirées de la littérature et valeurs mesurées sur les cas d'étude

	Valeurs possibles du critical gap (secondes)	
	Une voie à l'anneau	Deux voies à l'anneau
HCM 2010	5.19	5.19 (voie de droite) 4.18 (voie de gauche)
HBS 2015 (D = 26 m)	4.18	Non disponible
HBS 2015 (D = 40 m)	4.07	Non disponible
HBS 2001	Non disponible	4.07
<i>Belp. Approche Ouest</i>	4.16	Non applicable
<i>Belp. Approche Est</i>	3.85	Non applicable
<i>Brig Approche Est</i>	2.72	Non applicable
Bulle, RN 12 (voie droite)	Non applicable	4.16
Bulle, RN 12 (voie gauche)	Non applicable	3.85
Bulle, Approche Sud (voie droite)	Non applicable	2.72
Bulle, Approche Sud (voie gauche)	Non applicable	2.92

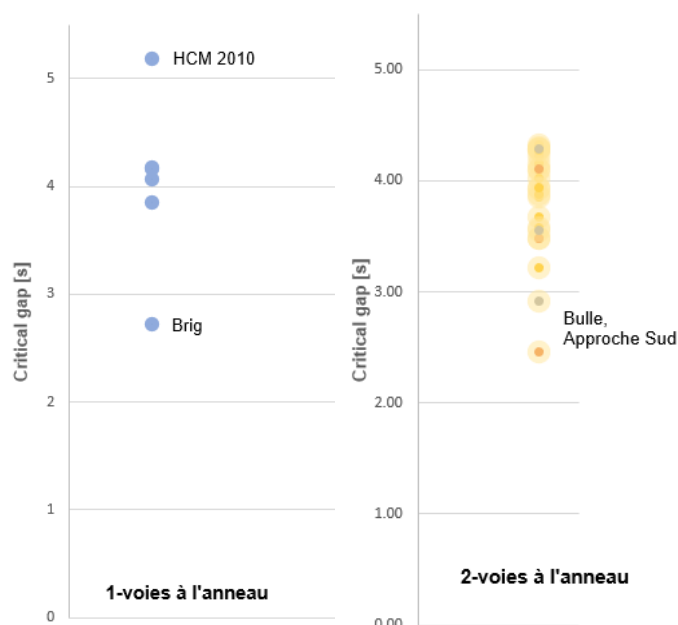


Fig. 30 Représentation graphique des variations de valeurs du « critical gap »

Les valeurs standard des méthodes HCM et HBS sont parfois très différentes (différence de 1.5 secondes). Cela pourrait s'expliquer par les différences régionales entre les Etats-Unis (plus de gros véhicules lourds) et l'Allemagne. Les valeurs de nos cas d'études ont tendance à être plus proches de celles du HBS, même si elles sont parfois plus basses. En raison du nombre limité de données, il est difficile de dire s'il s'agit d'une tendance générale pour la Suisse ou seulement pour les cas d'études considérés. En tout cas, les valeurs de critical gap des cas d'études des recherches de la VSS et de l'ETHZ datant de 2004 et 2009 étaient déjà tendanciuellement plus basse que les valeurs de l'HBS.

7.3.3 Follow-up time

Si un créneau / intervalle dans l'anneau est suffisamment long, plusieurs véhicules à la suite peuvent s'y insérer. Si un créneau a été utilisé par un premier véhicule, le « follow-up time » correspond au temps nécessaire pour qu'un autre véhicule « suiveur » entre dans le giratoire en utilisant le même créneau.

Le « follow-up time » suit également une distribution log-normale. Les méthodes existantes ont déterminé des valeurs standards pour ce paramètre.

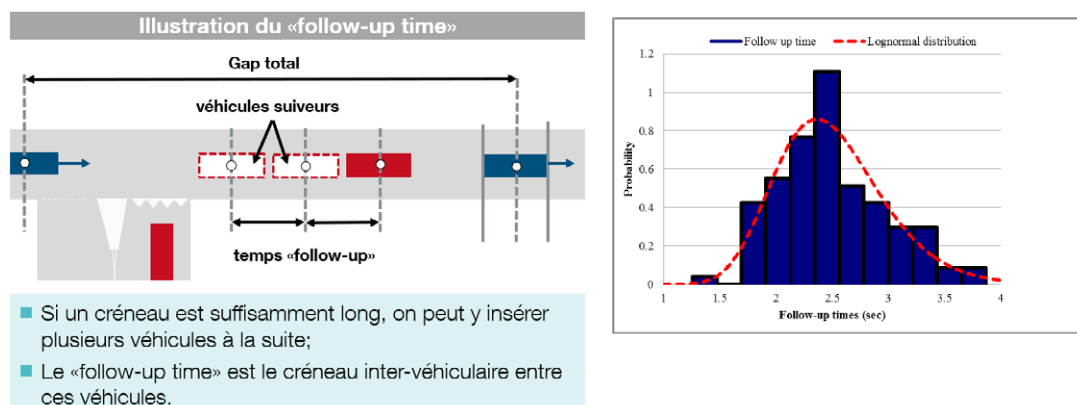


Fig. 31 Illustration de la notion de « follow-up time » et distribution usuelle des valeurs pour une entrée de giratoire

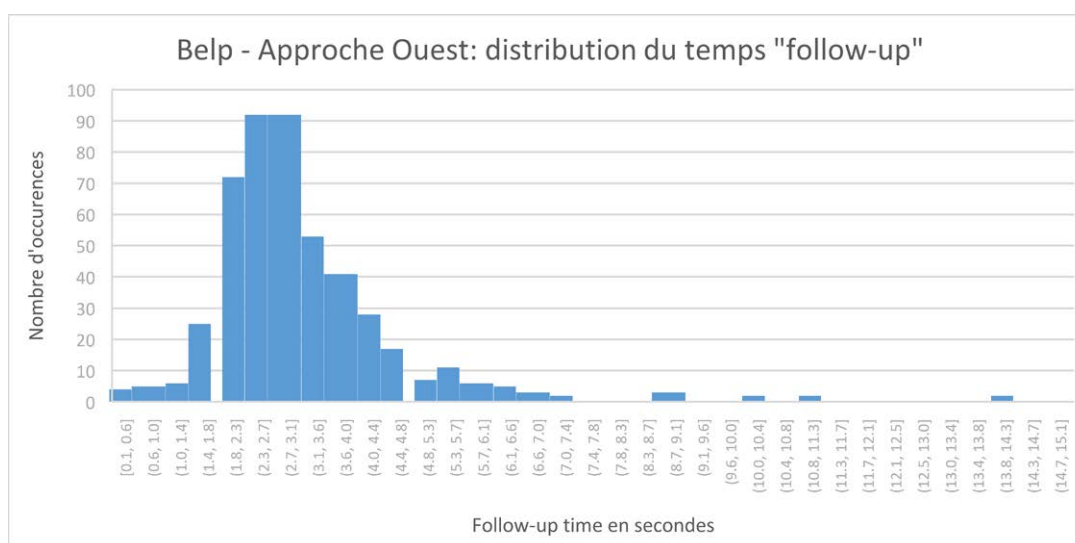


Fig. 32 Cas d'étude Belp – Distribution des valeurs de follow-up time

Tab. 14 Inventaire de valeurs du « follow-up time » : valeurs standard tirées de la littérature et valeurs mesurées sur les cas d'étude

Méthodes / Cas d'étude	Tf [s]
HCM 2010	3.2
HBS 2015	2.9
Brig, Approche Est	3.2
Belp, Approche Ouest	2.9
Belp, Approche Est	3.0
Bulle, RN12 (Voie de droite)	3.2
Bulle, RN12 (Voie de gauche)	2.7
Bulle, Approche Sud (Voie Droite)	2.7
Bulle, Approche Sud (Voie Gauche)	3.3

Les valeurs par défaut des méthodes HCM et HBS sont très proches des valeurs observées dans les cas d'étude de la présente recherche. La fourchette est entre 2.7 et 3.3 s.

7.3.4 Les points forts de la théorie

- Une approche bien documentée et testée pour déterminer les capacités du point de vue de l'automobiliste
- Facile et rapide à utiliser avec des valeurs standard
- Proche de la réalité, adaptable à un contexte donné et calibrable (en fonction de la répartition des modes, des vitesses, du flux gênant ou d'un contexte particulier)
- Indépendamment d'un type de giratoire ou d'une conception particulière

7.3.5 Les faiblesses de la théorie

Pas de valeurs type pour le contexte suisse

Il n'existe pas encore de valeurs « type » pour le contexte suisse. Les valeurs de la méthode allemande sont les plus proches des valeurs observées dans les résultats de notre recherche, mais elles restent néanmoins plus élevées en moyenne. Il est possible de collecter nos propres valeurs standard pour la Suisse, mais cela demandera un effort important de benchmark dans les années à venir.

Sensibilité des résultats par rapport aux valeurs des paramètres

Les résultats sont sensibles aux valeurs des paramètres qui peuvent être très différentes selon l'état du trafic. En cas de faible trafic, le « critical gap » a tendance à être plus élevé, car les conducteurs ressentent moins de pression et peuvent laisser passer des créneaux utilisables. En cas de trafic important, les conducteurs essayent de saisir toutes les opportunités pour s'insérer, quitte à prendre un risque, ce qui a pour conséquence de faire baisser la valeur du « critical gap ».

En particulier, la valeur du critical gap influence plus fortement le résultat lorsque le flux gênant est élevé. En effet, les créneaux sont alors courts et la capacité à s'en saisir est déterminante. Lorsque le flux gênant est faible, c'est plutôt la valeur du follow-up time qui est la plus influente, car les gaps sont longs et la capacité les remplir est alors déterminante.

Insuffisances en cas de congestion dans l'anneau

La méthode « gap acceptance » n'est pas limitée à des types de giratoires bien spécifiques en termes de configuration et de géométrie. Cependant la condition que le trafic dans l'anneau du giratoire soit fluide perdure. La méthode ne fournit donc pas de résultats fiables dans des situations complexes où la circulation est bloquée dans le giratoire en raison de refoulements dans l'anneau.

7.3.6 Conclusions

L'introduction d'une méthode normalisée alternative par « gap acceptance » pour la Suisse est intéressante, pour les raisons suivantes :

- méthode simple, bien documentée, faisant l'objet de nombreuses recherches dans de nombreux pays voisins;
- il n'y a pas de dépendance à un type de giratoire particulier. La méthode peut donc être appliquée à un plus grand nombre des cas;
- Les paramètres permettent de réagir à différents contextes et de calibrer une analyse en conséquence.

Pour cela, il serait judicieux de définir des paramètres standard ou une fourchette de paramètres pour le contexte suisse.

7.4 La simulation

La simulation permet d'analyser et de vérifier le fonctionnement d'une situation spécifique. Elle s'appuie sur différents modèles micro-dynamiques d'écoulement du trafic. Les différents véhicules sont décrits avec les paramètres de mouvement et de comportement correspondant au modèle. Pour obtenir des résultats de simulation valables, il est nécessaire de connaître les facteurs d'influence pertinents qui ont un impact sur l'écoulement du trafic (par exemple l'aménagement).

Les modèles les plus connus sont les suivants :

- PTV VISSIM (Allemagne, 2004);
- Aimsun TSS (Espagne, 2004);
- Arcady TRL (Angleterre, 2004);
- CorSim McTrans (Etats-Unis, 2003).

7.4.1 Les points forts de la simulation

- Les méthodes de simulation permettent d'obtenir des résultats fiables dans presque toutes les conditions de trafic y compris des situations saturées. Les effets de blocage peuvent être détectés, ainsi que les impacts de carrefours voisins.
- Les résultats sont généralement pertinents et facilement comparables avec la réalité sur le terrain, en utilisant par exemple l'estimation des temps d'attente et des longueurs de files.

7.4.2 Les faiblesses de la simulation

- Pour obtenir des résultats de simulation fiables, il est nécessaire de connaître les facteurs d'influence et les paramètres liés au comportement de conduite.
- Une simulation nécessite un effort initial important pour correctement représenter les facteurs d'influence dans le cadre du modèle et pour ensuite calibrer ce modèle. La plus-value d'une simulation provient justement de l'effort de calibrage qui est fait en général, ce qui montre que l'absence de calibrage dans les calculs de capacité classiques est un défaut notable ;
- La simulation permet de connaître le fonctionnement mais ne donne pas de valeur de capacité utilisée. Un effort supplémentaire doit être fourni pour obtenir des indicateurs simples et chiffrés.
- L'utilisation des logiciels de simulation nécessite une licence qui peut être coûteuse.

7.4.3 Conclusions

- La simulation est avant tout un outil permettant d'analyser des relations de cause à effet complexes (influences entre carrefours par exemple). Pour cela, il est nécessaire de connaître le plus d'informations possible sur les facteurs pouvant influencer le fonctionnement du giratoire.
- Son utilisation serait simplifiée, et le temps de paramétrage moins long si des bases de giratoires de différentes géométries étaient fournies avec les logiciels, et si la recherche suisse fournissait des paramètres standards.

7.5 Méthode déterministe

En plus des méthodes présentées ci-dessus, une approche déterministe a été élaborée dans le cadre de cette recherche. Cette méthode est une modification de la théorie « gap acceptance ».

Grâce à des moyens techniques (vidéo et automatisation), chaque « gap » dans l'anneau de giratoire est identifié, mesuré et son statut est défini parmi les catégories suivantes :

- « vu et utilisé » ;
- « partiellement utilisé » ;
- « vu et non-utilisé » ;
- « non-vu et donc non-utilisé ».

Cela permet d'approcher, avec un système de comptabilisation des gaps classifiés, la réserve de capacité réelle comme valeur de comparaison.

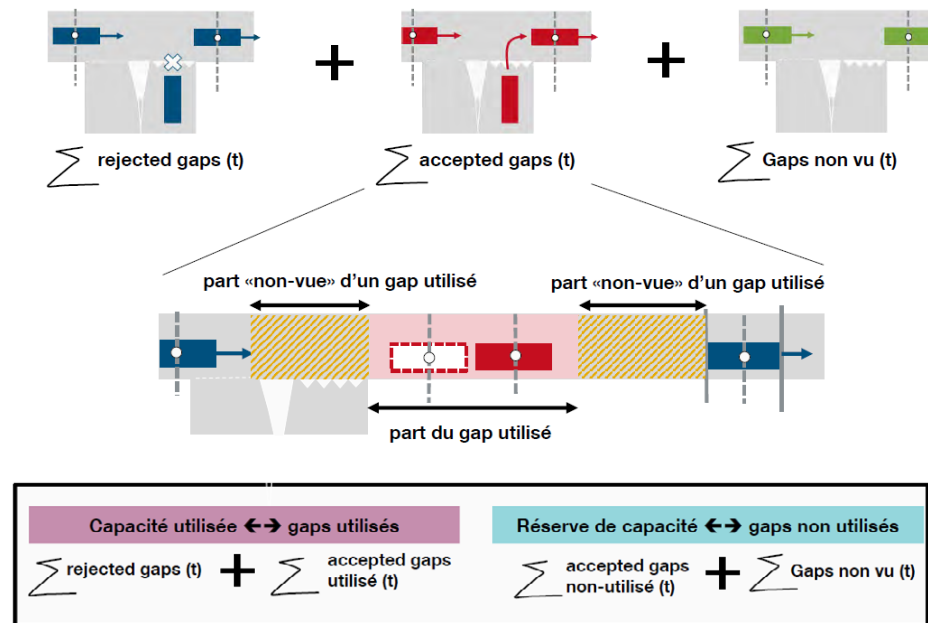


Fig. 33 Principe de la méthode déterministe pour le calcul de capacité utilisée

La capacité utilisée se compose ensuite des gaps qui ont été vus et entièrement utilisés et de ceux qui ont été vus et refusés. En effet, on peut supposer que les créneaux refusés sont trop petits pour les véhicules entrants et ne constituent donc pas à une véritable réserve de capacité. La réserve se compose donc uniquement de tous les gaps qui n'ont pas été vus et de la part des longs gaps qui n'a pas été utilisée alors qu'il existe un potentiel pour les remplir.

7.5.1 Les points forts de la théorie

- Cette méthode permet de donner une unité de temps à la réserve de capacité et d'avoir ainsi une idée de son utilisation. Avec une capacité utilisée de 90% par exemple, il reste une réserve de 6 minutes de gaps inutilisés pour une heure déterminante.

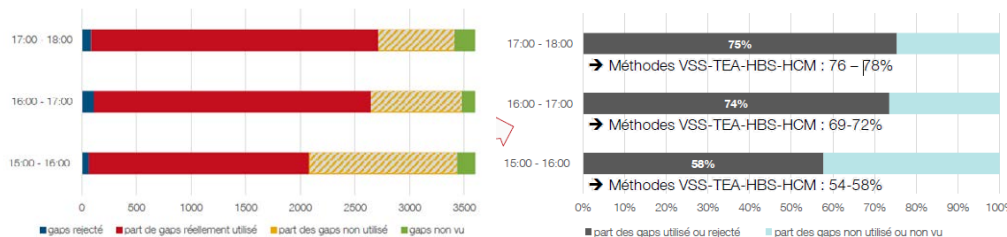


Fig. 34 Dédution de la capacité utilisée déterministe en fonction des gaps utilisés, rejetés et non vus

- Permet d'obtenir un bon ordre de grandeur, tant pour les cas simples que pour les cas plus complexes, car directement lié à la prise de décision par véhicule. Il est ainsi possible de détecter rapidement et facilement les blocages d'entrée et de les inclure dans l'analyse : s'il y a beaucoup de gaps longs, qui sont vus mais qui sont refusés, cela attire l'attention.

- Cela permet de comparer une théorie utilisant des formules mathématiques avec une méthode plus empirique, basée sur l'observation et la comptabilisation.

7.5.2 Les faiblesses de la théorie

- Une structure intensive de recueil et d'évaluation est nécessaire, basé sur un traitement vidéo par un logiciel ad hoc ;
- La part restante des gaps qui peut être utilisée en plus ne peut être déterminée que de manière expérimentale, c'est-à-dire pour les giratoires existants.

7.5.3 Conclusions

La méthode déterministe est très utile car elle est basée sur une comptabilisation directe des gaps et de leur utilisation permettant ainsi de connaître la réserve de capacité « réelle » du giratoire. Ces résultats très proches de la réalité fournissent une référence intéressante pour comparer différents calculs de capacité utilisée. En revanche, cette méthode ne peut pas être utilisée pour des cas futurs.

Pour les cas actuels, son utilisation est recommandée surtout quand un besoin d'analyse approfondie est identifié, car elle requiert un dispositif assez lourd : un relevé vidéo sur toute la période ainsi qu'un traitement spécifique à l'aide d'un logiciel afin de comptabiliser et analyser les gaps.

7.6 Le rôle de la vitesse

Un argument important en faveur des giratoires est, outre la réduction des point conflit par rapport à un carrefour traditionnel, que les vitesses sont également réduites et que le trafic est donc plus régulier et plus sûr. **Mais la vitesse a-t-elle également une influence sur la performance ?**

Tab. 15 Tableau de synthèse de la littérature : influence de la vitesse sur le fonctionnement d'un giratoire

Source	Pays	Message pertinent
(5) ETHZ 2009	Suisse	Les vitesses dans l'anneau d'un giratoire sont plus élevées dans les giratoires de grande taille (> 40 m). Cela peut avoir une influence négative sur la performance des entrées de giratoires si les débits sur l'anneau sont élevés. Il est probable qu'avec des vitesses plus faibles sur l'anneau l'insertion des véhicules serait plus facile alors qu'à des vitesses plus élevées les conducteurs sont plus prudents en raison de sécurité. Le risque d'accident augmente lorsque la vitesse est élevée sur la branche d'entrée. Il est supposé (en base d'une comparaison entre des résultats des giratoires Suisses et de l'Allemagne) que des vitesses plus faibles sur l'anneau favorisent plutôt des « critical gap » et des « temps follow-up » plus petits et renforcent ainsi la performance d'un giratoire.
(3) Ren et. al 2017	Australie	La valeur du « critical gap » est négativement corrélée avec le flux gênant plus élevé et donc une vitesse sur l'anneau plus faible.
(7) Shaik 2014	Etat-Unis	Avec des vitesses faibles, les valeurs du « critical gap » ont tendance à diminuer et donc la performance du giratoire s'améliore. Un effet positif jusqu'à 30% a été constaté.

L'influence de la vitesse est un sujet qui est généralement débattu et analysé en termes de sécurité. Cependant, dans d'autres contextes, comme la gestion du trafic sur les autoroutes, il est déjà connu qu'une réduction de la vitesse permet de fluidifier le trafic et a donc un effet positif sur la capacité.

Des études menées en Australie et aux Etats-Unis indiquent que des vitesses faibles dans les giratoires ont un effet positif sur la capacité. Des critical gaps plus courts entre deux véhicules à l'anneau d'une giratoire sont acceptés grâce aux vitesses plus faibles. Cela peut s'expliquer par le fait qu'avec des vitesses plus élevées une zone virtuelle de danger existe autour d'un véhicule et l'espace utilisable entre deux véhicules est effectivement plus petit. Cette zone se réduit avec les vitesses plus basses et le créneau utile reste donc relativement plus important.

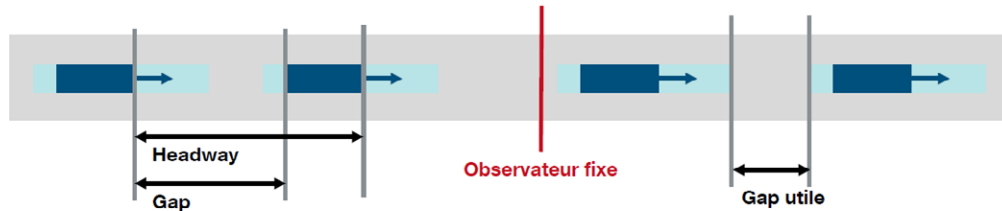


Fig. 35 Variation de la longueur du gap utilisable en fonction de la vitesse des véhicules

Les vitesses sur l'anneau et sur les branches n'ont pas été systématiquement étudiées dans l'analyse. Pour l'exemple de Belp, une analyse a toutefois été menée. En effet, d'importantes files d'attente sont observées à la fin de la période de pointe. Or les flux gênants n'augmentent pas et les estimations théoriques ne parviennent pas à expliquer de telles files. Or, précisément à cette période, les véhicules dans l'anneau sont plus rapides que pendant le reste de la période de pointe. Il semble donc que la capacité d'écoulement pourrait avoir été impactée par une vitesse plus élevée dans l'anneau. Le lien direct n'a pas été fait et il faudrait établir un protocole expérimental spécifique pour le démontrer. Mais cela semble rationnel.

Conclusion :

Les résultats de la recherche ne permettent pas de formuler des recommandations tranchées en matière de vitesse. Cependant, les résultats des études disponibles indiquent qu'en cas de problèmes de capacité dans les grands giratoires où la vitesse est élevée, le premier levier d'action pour augmenter la capacité pourrait être de modérer les vitesses dans l'anneau.

Ainsi, il est recommandé d'approfondir les recherches sur le thème de la vitesse.

8 Etape 2d – Produire les indicateurs pertinents

8.1 Temps d'attente et files d'attente

La prédiction de la longueur des files d'attente et du temps d'attente est importante dans de nombreux aspects de l'ingénierie du trafic. D'abord dans l'évaluation économique, ce sont les économies de délai qui constituent le principal avantage. Deuxièmement, dans la prévision de la distribution du trafic au sein d'un réseau, le temps de parcours, influencé par le délai aux carrefours est le facteur principal qui affecte le choix de l'itinéraire. Troisièmement, les estimations de la longueur des files d'attente sont nécessaires pour les décisions détaillées liées à la conception d'un carrefour. Enfin, le temps d'attente et les files d'attente sont des indicateurs que l'on peut estimer par la théorie et qui peuvent être comparés assez facilement avec la réalité observable sur le terrain. **Afin de réaliser cette comparaison, il faut d'abord définir ce que sont un temps d'attente et une file d'attente mais aussi comprendre comment les estimer à partir d'observations de terrain.**

8.1.1 Définition et estimation d'une file d'attente

Une file d'attente est une accumulation de véhicules en amont d'un carrefour. Contrairement à un carrefour à feux où les phases d'immobilisation et de libération des véhicules sont réglées par des phases lumineuses, pour un giratoire, la colonne reste en mouvement en permanence, à l'exception de brèves interruptions. **En raison de ce mouvement constant, il reste à déterminer à partir de quand un véhicule fait partie de la file d'attente et comment la file est définie en conséquence ?**

Etat de l'art / Littérature :

Tab. 16 Tableau de synthèse de la littérature : calcul de files d'attente selon différentes méthodes

Source	Pays	Message pertinent
(10) VSS –40 016a	Suisse	La norme traite la file d'attente de 95% et 99%. Il s'agit de la longueur en nombre véhicules qui n'est pas dépassée dans 95% resp. 99% des cas. Elle est déterminée par le taux d'occupation et est donc liée à la qualité de cette donnée. Le calcul est effectué à l'aide d'un diagramme et se base sur le HBS allemand de 2001, qui a toutefois été révisé en 2015.
(13) FGSV – HBS 2015	Allemagne	Le calcul des files d'attente de 95% et 99% pour les giratoires sont effectué selon le même principe que pour les carrefours prioritaires avec les formules suivantes : $N_{95\%} = \frac{C_E}{4} * \left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 \right)^2 + \frac{24 * Q_E}{C_E^2}} \right)$ $N_{99\%} = \frac{C_E}{4} * \left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 \right)^2 + \frac{36.8 * Q_E}{C_E^2}} \right)$ Les formules se basent sur le principe que la file d'attente a été constituée pendant la période analyser. Cela signifie qu'il n'y a pas de files déterminant au début de la période.
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	Le HCM est basé sur la même formule que le HBS 2015, à la différence que la formule est également applicable à d'autre périodes d'analyse que 1h. $N_{95\%} = \frac{C_E}{4} T * \left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_E} \right) * \frac{Q_E}{C_E}}{150T}} \right)$ T = 1 pour une analyse à 1 h / T = 0.25 pour une analyse à 15 minutes

(16) FHA – HCM 2000	Etats-Unis	Dans la version de 2000, le HCM permettait de calculer une file d'attente moyen sur la base de la règle de Little :
$N_{50\%} = Q_E * \frac{d}{3600}$ $d = \frac{3600}{C_E} + 900 T * \left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_E} \right) * \frac{Q_E}{C_E}}{450T}} \right)$		
(15) TRRL – Kimber & Hollis 1979	UK	Dans leurs recherches de 1979, Kimber et Hollis ont développé une méthode d'approximation pour calculer les longueurs des files dans différents incréments de temps et donc aussi leur variation dans le temps. Contrairement aux méthodes mentionnées précédemment la méthode tient compte de la file de base.
$N = 0.5((A^2 + B)^{\frac{1}{2}} - A$ $A = \left(1 - \frac{Q_E}{C_E} \right) C_E + 1 - N_0$ $B = 4(N_0 + Q_E)$		
(2) Daganzo, 1997 (Newell-Curve)	Etats-Unis	Newell a établi le théorème selon lequel, dans une approche déterministe, le taux d'entrée (« input ») et le taux de sortie (« output ») permettent de calculer la longueur des files pour chaque période.

Il n'existe pas de définition précise d'une file d'attente dans les théories existantes. Il est donc difficile de savoir quelle part du trafic est incluse dans un résultat de calcul de file prédisant x véhicules. S'agit-il de x véhicules qui sont tous à l'arrêt à un moment donné ou s'agit-t'il plutôt de la part des véhicules qui se dirigent vers le giratoire à une vitesse très basse ?

Les files 95% et 99% utilisées actuellement en Suisse correspondent à une valeur difficilement mesurable ou même observable sur terrain. Ce sont des indicateurs intéressants mais il est très difficile de vérifier la pertinence des résultats. Les méthodes incrémentales et déterministes plus anciennes mais plus parlantes sont quant à elles rarement utilisées.

Discussions sur la base des résultats de la recherche :

- Quand les capacités d'écoulement calculées sont fiables, alors les files calculées (moyennes ou 95%) fournissent également un nombre de véhicules assez fiable (cas de Brig). En revanche, si les résultats des calculs de capacité donnent des valeurs peu pertinentes, la longueur de file calculée sera également faussée (cas de Belp).

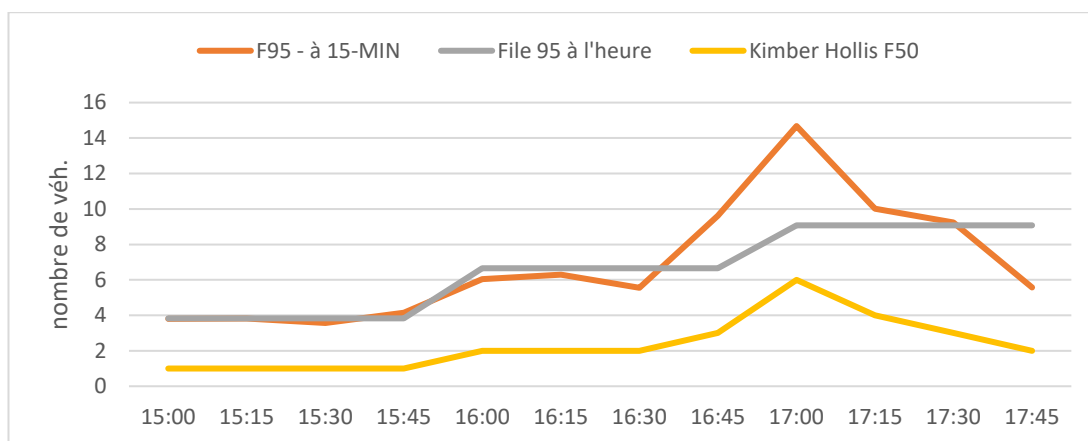


Fig. 36 Cas d'étude de Brig – Comparaison de différents calculs de file

- Les files sont normalement calculées à l'heure. Avec l'approximation de la méthode Kimber et Hollis mais aussi avec la possibilité des autres méthodes de considérer des incréments plus courts, l'indicateur peut être dynamisé.
- Les files d'attente théoriques sont exprimées en nombre de véhicules alors qu'on observe plutôt les files sur le terrain en termes de distance. Or, la conversion d'un nombre de véhicules en mètres présente des incertitudes considérables. La longueur moyenne de 6 m par véhicule, souvent utilisée pour les installations de signalisation lumineuse, n'est pas pertinente pour une file d'attente en amont d'un giratoire. Comme la file est en mouvement, on observe de plus grandes distances entre les véhicules. Cela signifie qu'il ne faut pas seulement tenir compte du gabarit des véhicules, mais aussi de la distance moyenne entre les véhicules lors de l'estimation. Dans l'exemple de Belp, les estimations basées sur des observations de terrain ont montré que l'espace moyen nécessaire par véhicule se situait plutôt entre 15 et 20 m.
- La méthode input-output permet d'évaluer un stock de véhicules indépendamment du calcul de la capacité. Elle n'a malheureusement pas pu fournir de résultats fiables en partie parce que la délimitation du système est difficile à réaliser et des intersections secondaires peuvent venir perturber le comptage. Ces petites différences de comptage entraînent finalement de grandes distorsions du stock en raison du cumul (voir le chapitre sur la demande exprimée).

Conclusion technique

Les files d'attente ne sont pas un indicateur facile à utiliser pour calibrer une estimation de capacité utilisée, car la définition de la file n'est pas claire pour un giratoire, sur le terrain. Il est difficile de savoir à partir de quand une colonne de voitures dense et en mouvement doit être considérée comme un bouchon. Le changement de perception est très subjectif.

La vitesse des véhicules semble toutefois être un bon indicateur de la formation d'une file. Avant même que la file ne soit visible sur les caméras, la vitesse moyenne diminue et la densité du trafic augmente. On peut donc faire un rapprochement entre longueur de files et densité de trafic.

8.2 Temps d'attente et temps de parcours

Le temps d'attente moyen est actuellement indiqué dans la norme comme indicateur principal du niveau de qualité du trafic d'un giratoire. Avec le traitement logiciel, il est possible de mesurer automatiquement le temps d'attente à l'insertion des différents véhicules et d'en sortir une statistique par quart d'heure, par exemple. Ainsi, il s'agit d'un paramètre pertinent pour calibrer un calcul théorique, mais à condition de pouvoir utiliser le traitement vidéo.

Voici une revue de littérature sur les temps d'attente.

Tab. 17 Tableau de synthèse de la littérature : calcul du temps d'attente selon différentes méthodes

Source	Pays	Message pertinent
(10) VSS –SN 40 016a	Suisse	La norme calcule le temps d'attente en fonction de la réserve de débit et de la capacité d'entrée. Le calcul est effectué à l'aide d'un diagramme et se base sur la formule de Kimber & Hollis, 1979.
(13) FGSV – HBS 2015	Allemagne	Le calcul des temps d'attente pour les giratoires sont effectué selon le même principe que pour les carrefours prioritaires avec les formules suivantes : $t_a = \frac{3600}{C_E} + 900 * \left(\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1 \right)^2 + \frac{8 * Q_E}{C_E^2}} \right)$
(17) FHA – HCM 2010	Etats-Unis	Le HCM est basé sur la même formule que le HBS 2015, à la différence que la formule est également applicable à d'autres périodes d'analyse que 1h. Le temps d'attente est défini comme le temps qu'un conducteur passe à décélérer

	vers une file d'attente, à faire la queue, l'attente à l'entrée et à accélérer pour sortir la file. $t_a = \frac{3600}{C_E} + 900T * \left(\frac{Q_E}{C_E} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{Q_E}{C_E} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_E}\right) * \frac{Q_E}{C_E}}{450T}}$ T = 1 pour une analyse à 1 h / T = 0.25 pour une analyse à 15 minutes Si la demande dépasse la capacité pendant une période ou plus, les résultats calculés ne sont plus exacts en raison de la présence probable d'une file d'attente au début de la période.
(15) TRRL – Kimber & Hollis 1979 UK	Dans leurs recherches de 1979, Kimber et Hollis ont développé une méthode d'approximation pour calculer les temps d'attente par incréments de temps. Contrairement aux méthodes mentionnées précédemment la méthode tient compte de la file de base. $t_a = \frac{Q_E}{C_E} + \frac{Q_E^2}{C_E} / (1 - \frac{Q_E}{C_E})$

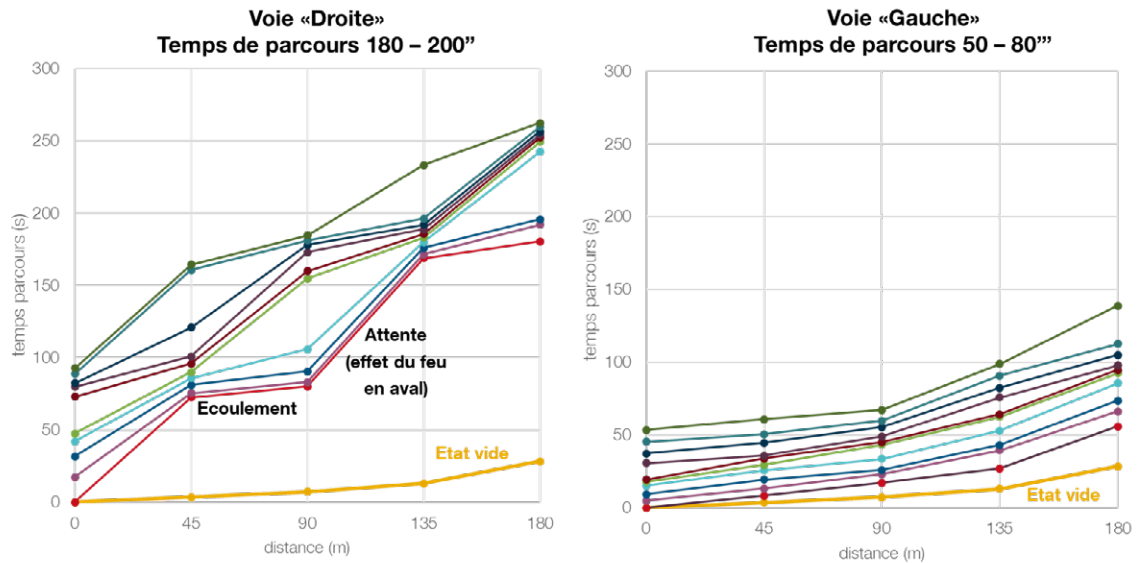
Le temps de parcours doit être mesuré entre un point en amont sur la branche et un point au niveau de l'insertion dans l'anneau. Il peut également être mesuré entre un point en amont sur la branche d'entrée et un point en aval sur la branche de sortie. Afin d'obtenir des temps comparables, il est très important de définir des points de repères précis au niveau de la route mais également au niveau du véhicule (ex : quand l'avant de la voiture atteint un repère donné, le chronomètre est déclenché).

Le temps de parcours jusqu'à l'insertion inclut le temps pour approcher de la position d'insertion, ainsi que le temps d'attente pour s'insérer au céder-le-passage. Il dépend donc beaucoup de la position dans la file d'attente. Si un véhicule arrive vingtième d'une file, à un moment où les véhicules ont de la peine à s'insérer, il devra attendre son tour et progresser assez lentement.

Les temps de parcours peuvent être mesurés par traitement pour chacun des véhicules, à l'intérieur d'un même champ de vision. Ainsi, si une remontée de file est très longue, il faut un grand champ de vision pour mesurer tout le temps de parcours. Cela impose généralement une vue par drone. Le temps de parcours est un indicateur important pour la progression des bus. Ainsi, il faut se méfier car la capacité utilisée ne reflète pas directement le temps de parcours.

Dans le cas de Montreux, illustré ci-après, des relevés manuels ont été effectués sur la base des vidéos de drone. Les graphiques des temps de parcours ont permis de montrer que :

- La voie de gauche est parcourue beaucoup plus rapidement que la voie de droite : entre 50 et 80 secondes par véhicule ;
- La voie de gauche présente une progression plus lente dans les derniers mètres ;
- La voie de droite présente des temps de parcours variables, entre 180 et 200 secondes. La progression des véhicules est très saccadée : il y a des moments pendant lesquels ils avancent et d'autres pendant lesquels ils sont quasiment à l'arrêt. C'est normal car dans ce cas, ils sont soumis à l'effet d'un refoulement provenant d'un carrefour à feux en aval. On peut donc « lire » dans les temps de parcours les effets du cycle de feux.



8.3 Densité de trafic

Dans les situations saturées, l'évaluation de la densité de trafic s'avère être une solution particulièrement pertinente. La densité de trafic sur un tronçon et pendant une période donnée est égale au ratio du débit par la vitesse moyenne. Ces deux valeurs (le débit et la vitesse moyenne) sont mesurables assez facilement par des analyses vidéo, des capteurs de terrain, voire par des relevés Google trafic.

Comme expliqué en annexe pour le cas de Bussigny, la densité de trafic renseigne sur l'état du trafic et permet d'éviter de tomber dans les pièges des situations congestionnées par l'aval. En effet, si une congestion de l'anneau s'installe, les débits diminuent. Si on ne considère que le débit sans voir l'état du trafic, on peut penser que la demande diminue. Mathématiquement, si on oublie de compter la demande exprimée (incluant le stock bloqué en amont), la capacité utilisée diminue également. On pourrait donc croire que tout va bien. Or il n'en est rien : une évaluation de la densité de trafic permet de voir clairement la paralysie du système.

En outre, dans les systèmes de carrefours connectés entre eux, il est utile d'évaluer la densité de trafic pour chaque tronçon intermédiaire. Cela permet de disposer d'un indicateur montrant d'où provient la congestion et comment elle se propage, par analogie aux « shockwaves » sur l'autoroute.

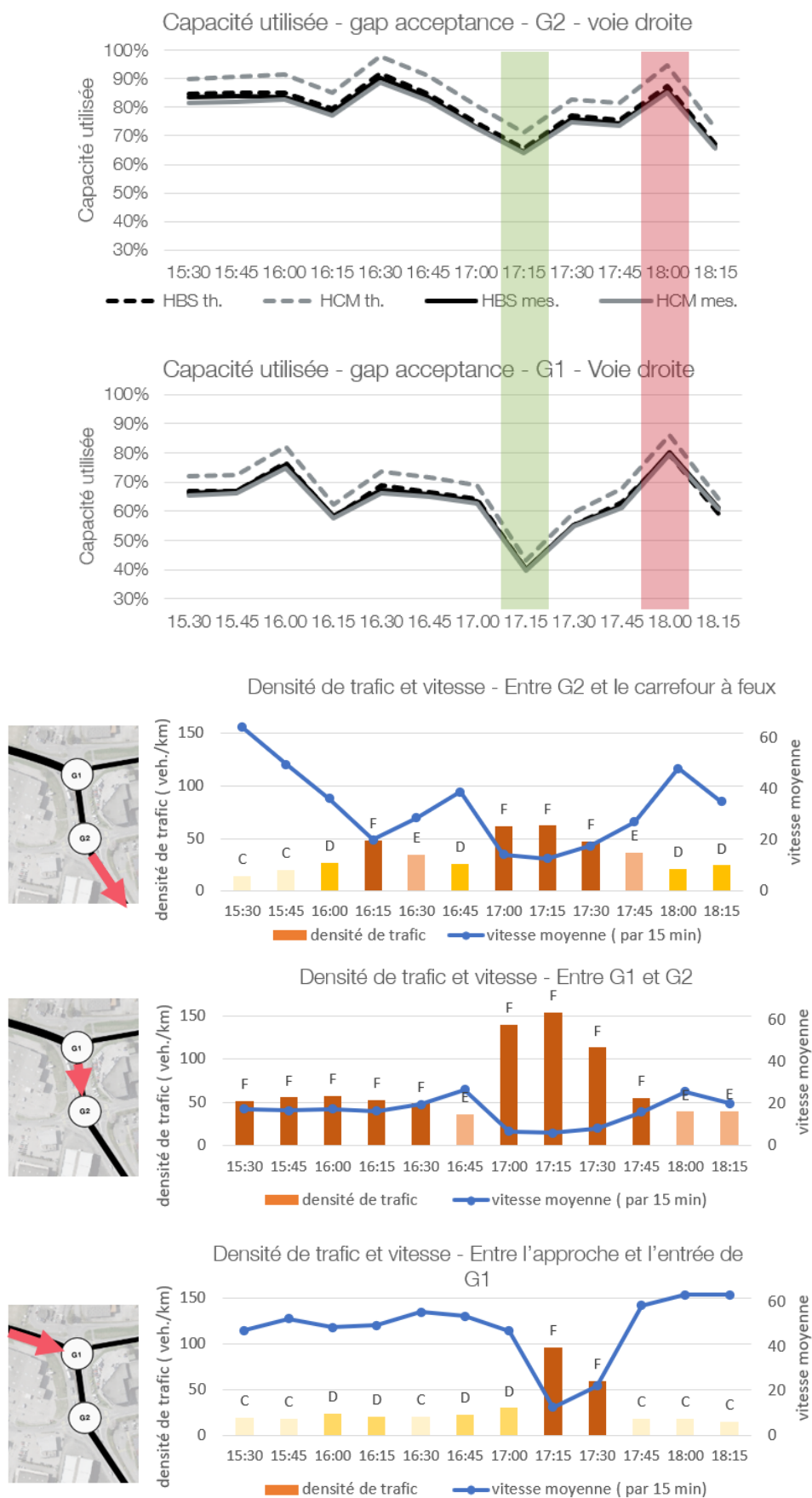


Fig. 37 Comparaison de la capacité utilisée et des densités de trafic à Bussigny

9 Etape 3 – Calibrer les analyses théoriques sur la base des relevés de terrain

L'étape du calibrage consiste à comparer les résultats théoriques avec les résultats empiriques. S'ils coïncident bien, cela va dans le sens d'une théorie étayée, qui peut être utilisée pour des situations futures avec un assez bon niveau de confiance, tant que les conditions restent proches de celles de l'état actuel.

Si les résultats théoriques ne décrivent pas bien les résultats empiriques, il y a lieu de procéder à deux types de calibrages :

- Si les évolutions dynamiques sont similaires mais que les valeurs ne sont pas assez proches, il s'agit d'ajuster les différents paramètres pour obtenir une bonne comparaison, tout en vérifiant que ces ajustements soient crédibles ;
- Si les évolutions (des densités, des temps d'attente, des files d'attente etc.) ne suivent pas les mêmes tendances dans le temps, cela indique que tous les phénomènes n'ont pas été pris en compte.
Par exemple, si les files d'attente observées croissent rapidement pendant 15 minutes alors que la théorie ne le prévoit pas du tout, il peut s'agir d'un épisode de congestion dans l'anneau avec blocage.

Cette étape de calibrage a pour but de renforcer la solidité des méthodes employées et de mieux comprendre le fonctionnement sur le terrain.

Dans le cas d'un état futur sans comparaison possible avec le terrain, l'étape de calibrage n'est pas possible.

PARTIE C - Synthèse, conclusions et suites à donner

10 Synthèse

Le projet de recherche a permis d'interroger les situations pour lesquelles les pratiques actuelles ne donnent pas satisfaction, en particulier dans des situations saturées. Les pratiques actuelles englobent deux aspects :

- des méthodes de calculs basées sur des formules mathématiques obtenues par régression ;
- une méthodologie suivie pour réaliser les comptages, agréger les données de trafic, réaliser les calculs de capacité et interpréter les résultats.

Un diagnostic des méthodologies et méthodes de calculs par régression a permis de déduire que la pratique habituelle présente des failles, à savoir : un champ d'application limité aux giratoires standards, un focus trop centré sur l'insertion dans l'anneau, une grande sensibilité et un manque de calibrage avec le terrain, ainsi que des résultats parfois peu expressifs du fonctionnement des carrefours.

Ensuite, des prototypes de nouvelles méthodes ont été testés sur les cas de Malley et Montreux, qui présentent d'importantes congestions de l'anneau et des remontées de files importantes. Cela a permis d'identifier le besoin de mesurer la demande en amont, de prendre en compte les blocages en aval via une approche « système routier » et de traiter séparément les épisodes de blocage de l'anneau.

Par la suite, une catégorisation en quatre cas d'études a été faite pour distinguer les giratoires à une ou deux voies dans l'anneau, mais également les giratoires avec congestion de l'anneau ou fluidité. Les cas de Brig, Bulle, Belp et Bussigny ont ainsi été analysés.

A chaque fois, le fonctionnement de ces carrefours a été rapidement investigués, puis l'analyse s'est focalisée sur le fonctionnement d'une ou deux branches les plus critiques. Sur la base des résultats attendus, un protocole expérimental a été défini, avec d'importants relevés vidéos, puis un traitement de ces vidéos par des logiciels spécifiques (Miovision et Logiroad).

Les traitements de données ont permis de produire des analyses inédites, véhicule par véhicule, incluant des chronométrages des gaps, des temps de parcours, des temps d'attente et de monitorer l'utilisation de tous les créneaux qui constituent « l'offre pour s'insérer » dans un giratoire. Sur la base de ces relevés, les méthodes « gap acceptance », très présentes dans la littérature mais absentes en Suisse ont été appliquées, soit avec des paramètres standards, soit avec les paramètres locaux déduits des observations.

Les calculs ont été produits de façon dynamique, pendant toute la période de pointe et avec un pas de temps relativement résolu, soit aux 5 minutes, soit aux 15 minutes près. Cela a permis d'identifier l'installation de divers phénomènes de saturation. Les résultats théoriques ont été comparés aux relevés de terrain, notamment aux remontées de files d'attente. Dans certains cas, des relevés de temps de parcours et de densité de trafic ont été produits.

Ces analyses ont permis de démontrer que les calculs classiques ne sont pas applicables dans les situations complexes, car les baisses de flux et de capacités utilisées indiquent une paralysie du système routier alors qu'une méthode classique ne pourrait détecter qu'une diminution des flux et de la saturation. L'élément clé pour faire la différence est en fait la vitesse des véhicules.

En outre, la vitesse des véhicules dans l'anneau semble avoir un effet décisif pour faciliter l'insertion des véhicules entrants, de même que le taux de saturation. Le comportement des automobilistes en insertion est plus pro-actif lorsqu'ils ont beaucoup attendu avant et que les véhicules prioritaires roulent doucement. Alors que s'ils ont peu attendu et que les véhicules prioritaires roulent vite, une plus grande prudence aboutit à un comportement en insertion plus modéré et donc une capacité d'écoulement réduite.

11 Conclusions et recommandations

11.1 Revue des buts du projet de recherche et conclusions

Les buts du projet de recherche ont été atteints dans l'ensemble. Ceux-ci sont repris ci-dessous, accompagnés des conclusions pour chacun.

But 1 : dresser un diagnostic des forces et faiblesses des pratiques actuelles

Les méthodes actuelles ont été décrites et leurs faiblesses identifiées : la méthodologie générale part des comptages pour ensuite appliquer des méthodes de calculs, mais les observations de terrain sont souvent lacunaires et trop focalisées sur une heure en particulier et sur les insertions au céder-le-passage. Ainsi, dans les situations saturées, les points de conflits déterminants ne sont pas forcément identifiés et l'ensemble de la période de pointe n'est pas appréhendée.

En outre, les méthodes de calcul par régression ne sont pas adaptées dans les situations fortement saturées et ne sont pas très polyvalentes car elles ne s'appliquent que pour les giratoires standards. Elles considèrent un comportement moyen mais ne s'appuient pas sur le point de vue des automobilistes.

Enfin, dans les situations congestionnées, il manque des méthodes applicables lorsqu'une partie de l'anneau est bloquée.

But 2 : identifier les particularités des situations saturées qui font qu'une réflexion classique n'est plus valable

Les particularités d'une situation saturée sont les suivantes :

- Les périodes de pointe sont rallongées → des observations sur une durée plus longue sont nécessaires ;
- Des hyperpointes peuvent se produire et générer des effets en cascade sur d'autres points de conflit → observations dynamiques chaque 5' ou 15' ;
- Les remontées de files générées par les giratoires peuvent remonter très loin → la mesure de la demande exprimée doit être faite en amont de la branche. En outre, pour les giratoires à deux voies en entrée, il est nécessaire d'évaluer l'éventuelle gêne d'une voie sur l'autre, car si les présélections sont trop courtes, le débit de la branche et les remontées de files ne sont pas similaires à une situation à deux voies longues ;
- Le fonctionnement du giratoire peut être perturbé par un blocage en aval → il est nécessaire de détecter ce genre de blocage et de le caractériser par des indicateurs de densité de trafic sur différents tronçons. En outre, il est nécessaire d'évaluer la capacité d'écoulement différemment lorsque l'anneau est bloqué ;
- Les paralysies peuvent entraîner des baisses de flux temporaires → il ne faut pas choisir l'heure de pointe en fonction du maximum des flux qui s'écoulent mais considérer l'entier de la période de pointe et travailler avec des indicateurs de densité de trafic ;
- Lorsqu'un flux est bloqué par un flux prioritaire très fort, tout flux qui gêne ce flux prioritaire devient un flux « ami » pour celui qui veut s'insérer. Ainsi, la capacité d'écoulement de l'un est directement liée au flux de l'autre.

But 3 : explorer de nouvelles méthodologies/méthodes de calculs pour évaluer la capacité d'écoulement et générer des indicateurs descriptifs du fonctionnement des giratoires. Cette méthode devrait être applicable à un grand nombre de carrefours et d'états de trafic (fluide / congestionné)

Le présent projet de recherche a exploré de nouvelles méthodologies pour aborder une étude en situation saturée : il s'agit avant tout de définir les indicateurs à produire, de définir le

protocole expérimental en conséquence, de garder toute la richesse des données de terrain et de procéder à une étape de calibrage. Cette méthodologie part du principe que la situation est plus complexe en situation saturée et qu'un plus grand travail d'observation et de calage est nécessaire pour définir des méthodes de calculs fiables et représentatives de la réalité.

Dans un premier temps, il s'agit de faire évoluer la manière de travailler mais pas forcément de changer les méthodes de calculs, c'est-à-dire les formules mathématiques utilisées.

Néanmoins, les progrès technologiques en termes de traitement vidéo nous ont également permis d'accéder à un diagnostic approfondi de l'utilisation de l'espace-temps dans les giratoires, grâce à une identification et un chronométrage véhicule par véhicule. Ces techniques sont très prometteuses et doivent nous encourager à envisager des projets de recherche bien plus ambitieux que ceux qui étaient possibles auparavant avec des relevés manuels.

Grâce à ces données très riches, notre projet de recherche a exploré les méthodes « gap acceptance » qui sont très prometteuses pour la Suisse. En effet, ces méthodes sont connues dans de nombreux pays et largement documentées dans la littérature. Elles présentent un atout indéniable : elles peuvent être appliquées voie par voie et représentent bien le point de vue de l'automobiliste qui cherche à s'insérer dans les créneaux libres du flux prioritaire. En outre, elles sont simples d'utilisation : il n'y a que deux paramètres clés qui sont le temps critique d'insertion (critical gap) et le temps de véhicule-suiveur (follow-up time). Ces deux paramètres permettent de dire combien de véhicules vont pouvoir s'insérer dans un créneau de temps donné entre deux véhicules prioritaires.

Enfin, le projet de recherche a défini une nouvelle méthode empirique appelée « méthode déterministe » car elle définit clairement, par l'observation et la comptabilisation des gaps, combien de réserve de capacité il existe pour un giratoire existant. Grâce au traitement logiciel, tous les gaps sont identifiés. On peut donc savoir s'ils ont été refusés ou acceptés. La réserve est constituée par les gaps « non vus » (parce que les véhicules en insertion n'étaient pas là pour les voir), ainsi que par les gaps très longs sous-utilisés (ie. qui n'ont été utilisés que par un véhicule ou deux alors que d'autres véhicules auraient pu s'y insérer).

Enfin, les nouvelles méthodes ont permis de tester la production de graphiques dynamiques d'estimation des remontées de files. Des estimations de temps de parcours ont été produites. Les densités de trafic ont été mesurées mais elles n'ont pas été produites par calcul.

But 4 : tester ces méthodes sur le terrain et en tirer de nombreux enseignements

Les méthodes citées ci-avant ont pu être testées sur 6 cas d'études en tout, dans les cantons de Berne, de Vaud, de Fribourg ainsi qu'en Valais : deux phases de prototypage avec un traitement manuel des vidéos à Malley et Montreux, puis des cas d'études largement documentés et bénéficiant de traitements logiciels des vidéos à Brig, Bulle, Belp et Bussigny. Les enseignements de ces cas d'étude ont permis d'alimenter le présent projet de recherche.

Certains enseignements ont été encourageants et ils ont alimenté les conclusions. D'autres enseignements nous ont forcé à revenir en arrière sur nos nouvelles méthodes, notamment pour le calcul de stock par méthode input-output.

Il devait s'agir d'une façon d'estimer le nombre de véhicules stockés sur un tronçon pour le comparer aux calculs de remontées de files d'attente. Mais comme le stock est calculé au fil du temps, de petites imprécisions répétitives dans les mesures génèrent petit à petit d'importantes erreurs dans l'évaluation. Par exemple, si la caméra de l'entrée dans la branche « oublie de compter » certains véhicules à cause d'un problème technique (masquage par un arbre, aveuglement par le soleil, etc.), alors les flux en sortie seront plus importants que les flux en entrée et petit à petit, le stock calculé deviendra négatif alors que cela ne correspond pas à la réalité. De même, lorsqu'il y a de petits accès privés sur les côtés, il faudrait pouvoir tous les compter pour obtenir une bonne estimation, or cela devient vite trop complexe en milieu urbain.

But 5 : fournir une méthodologie adaptée aux situations saturées, permettant d'aller vers la concrétisation d'un projet de norme lors de prochaines étapes

Il nous semble que les apports du présent projet de recherche les méthodes permettent d'envisager un projet de norme pour les années à venir, comme décrit ci-après.

11.2 Recommandations pour aller vers un projet de norme

Pour envisager la construction d'un projet de norme, il nous semble nécessaire de définir très clairement les axes de progression par rapport à la norme actuelle. En effet, les gains doivent être suffisants pour justifier l'effort à fournir. Dans le cas des giratoires en situation saturée mais plus largement des évaluations de capacité et de fonctionnement pour les carrefours en situations saturées, les axes de progression que nous identifions sont les suivants :

- Un point de vue spatio-temporel plus large ;
- Une évaluation du système-routier en son ensemble et une façon d'identifier le ou les points de conflits déterminants à différents moments de la période de pointe ;
- Des analyses dynamiques ;
- Un calibrage avec le terrain lorsque c'est possible ;
- L'utilisation systématique de plusieurs méthodes de calculs ;
- Pour chaque méthode de calculs, l'utilisation d'un test de sensibilité pour prendre du recul sur la précision des résultats ;
- L'apport d'une étape d'interprétation : est-ce que les petites variations des résultats selon les méthodes ou les tests de sensibilité vont faire changer les décisions d'aménagement et d'exploitation prises par les autorités ? Si oui, est-on suffisamment confiant dans les résultats théoriques pour faire ces choix ? Faut-il développer une micro-simulation ou une expérimentation sur le terrain pour bénéficier de meilleures connaissances avant de prendre la décision ?

Le but d'un tel projet de norme serait d'inciter les ingénieurs en transports (techniciens représentants des autorités publiques et bureaux mandataires spécialisés) à considérer les résultats des capacités utilisées avec plus de recul et à ne pas prendre systématiquement des décisions pour que celles-ci soient en-dessous de 100%.

Cela étant, notre projet de recherche a bénéficié de moyens logistiques (vidéos) et logiciels (Logiroad) qui nous ont permis de définir pour chaque voie d'entrée les paramètres-clés particuliers locaux. Or dans le cas d'une norme, les spécialistes en transports souhaiteront bénéficier de paramètres standards à choisir selon la situation. Il est possible de fournir dans une norme des paramètres « critical gap » et « follow-up time » adaptés pour la Suisse à différents types de situations. C'est ce que fait déjà le Highway Capacity Manual.

Pour développer cette base de paramètres pour la Suisse, une importante campagne est nécessaire afin d'identifier les variations des paramètres selon plusieurs facteurs d'influence :

- D'éventuelles différences régionales : soit dans les milieux urbains / extra-urbains, soit en fonction des cantons, ou autre ;
- Les valeurs pour chacun des modes : deux-roues motorisés, voitures, différents types de poids-lourds ;
- Les valeurs en montée/descente éventuellement ;
- Les valeurs en fonction de l'état de saturation, étant donné qu'il est avéré que les automobilistes sont plus enclins à s'insérer lorsque la situation est saturée ;
- Les valeurs en fonction de la vitesse dans l'anneau ;
- Les valeurs pour les voies de gauche et les voies de droite (lorsqu'il y a deux voies en entrée dans l'anneau) ;
- Etc.

12 Recherches restant à mener

Le projet de recherche a été mené dans une vision très ouverte, visant avant tout une plongée dans la recherche plus qu'une mise en application directe. Cette recherche a permis d'aborder certains sujets passionnants sans toutefois réussir à en faire le tour. Il s'agit en particulier des sujets ci-dessous.

Analyse de l'influence de la vitesse à l'anneau sur la capacité utilisée

L'étude du cas de Belp laisse supposer que la vitesse des véhicules à l'anneau pourrait exercer une influence sur la capacité d'un giratoire. Plus les véhicules roulent vite sur l'anneau, plus la capacité semble diminuer. Les créneaux libres entre les voitures, sont en effet plus difficiles à utiliser par un véhicule voulant s'insérer. Dans le cas de Belp, cette intuition semble se confirmer car les files réelles augmentent bien plus que les prédictions théoriques lorsque la vitesse à l'anneau augmente, et ce même légèrement.

Afin de confirmer cette corrélation et d'ajuster les formules de calcul de capacité en conséquence, un travail de recherche dédié sur différents giratoires est nécessaire. La vitesse à l'anneau devra pour cela être comparée à différents indicateurs en plus de la capacité utilisée : la densité de trafic, la vitesse en approche, les longueurs de files théoriques et réelles. Il s'agira également de vérifier si une faible augmentation de vitesse peut vraiment exercer une influence sur la capacité. L'influence du diamètre du giratoire sur la vitesse des véhicules à l'anneau est aussi un aspect à étudier.

À la suite de cela, une adaptation des formules de capacité ou un effet sur les facteurs « critical gaps » et « follow-up time » pourront être proposés.

Une fois la corrélation établie entre vitesse à l'anneau et capacité utilisée, il serait intéressant d'étudier les façons d'agir sur la vitesse pour influencer la capacité utilisée : adaptation de la géométrie du giratoire (diamètre), mise en place de limitations de vitesse aux heures de pointe. Une comparaison des vitesses avec et sans mesure devra pour cela être réalisée.

Analyse de l'influence du flux sortant

Il a été montré que dans certaines situations, le flux sortant permet d'offrir des gaps rallongés aux véhicules en insertion. Il y aurait donc un effet « facilitateur » grâce à la gêne créée par les flux sortants sur certains flux prioritaires et gênants pour l'insertion.

Ce phénomène n'est pas clairement identifié dans la littérature car sauf méconnaissance de notre part, la littérature considère toujours le flux gênant dans son entier, alors qu'il faudrait faire une différence entre les différentes origines des flux constituant le flux gênant total. Une nouvelle approche basée sur les origines-destinations permettrait d'enrichir la recherche et d'aboutir à des conclusions intéressantes.

Analyse de l'influence de la charge à l'anneau : part du flux gênant

Dans les giratoires à deux voies dans l'anneau, il semble raisonnable de considérer qu'une partie du flux circulant sur l'anneau intérieur ne gêne pas l'insertion de certains véhicules. Mais cela dépend beaucoup des configurations géométriques et des trajectoires des véhicules.

Cette influence ne semble pas très forte mais il faudrait le confirmer en étudiant des cas identifiés et en confrontant plusieurs hypothèses théoriques avec la réalité du comportement des automobilistes sur le terrain. Connaître quelle partie du flux à l'anneau est réellement gênante permettra d'éviter une évaluation théorique trop pessimiste.

PARTIE D - Annexes

Table des annexes

PARTIE D - Annexes	97
13	Présentation détaillée du cas de Brig 101
13.1	Présentation du cas d'étude 101
13.1.1	Situation géographique et spécificités 101
13.1.2	Charges de trafic actuelles 102
13.1.3	Objectifs de recherche pour le cas d'étude 103
13.1.4	Protocole expérimental 103
13.2	Analyses..... 104
13.2.1	Calculs de capacités utilisées pour la branche est 104
13.2.2	Estimation des files et du stock pour la branche est 110
13.2.3	Tests de sensibilité 112
13.2.4	Influence du flux sortant sur la capacité utilisée 115
13.3	Synthèse des enseignements..... 119
13.3.1	Efficacité du traitement vidéo..... 119
13.3.2	Existence de différentes méthodes utiles pour le calcul de capacité utilisée 120
13.3.3	Sensibilité des calculs de capacité utilisée 120
13.3.4	Intérêt des calculs dynamiques 121
13.3.5	Influence du flux sortant sur la capacité utilisée 121
14	Présentation détaillée du cas de Bulle 123
14.1	Présentation du cas d'étude 123
14.1.1	Situation géographique et spécificités 123
14.1.2	Plan des voies et charges de trafic actuelles..... 123
14.1.3	Objectifs de recherche pour le cas d'étude 124
14.2	Protocole expérimental 124
14.3	Analyses..... 125
14.3.1	Analyse des charges par voie pour les branches sud et ouest 125
14.3.2	Analyse détaillée du fonctionnement de la branche sud 127
14.3.3	Enseignements à retenir pour la branche sud 133
14.3.4	Analyse détaillée du fonctionnement de la branche ouest 133
14.3.5	Enseignements à retenir pour la branche ouest..... 143
14.4	Synthèse des enseignements..... 143
14.4.1	Particularités liées à l'étude d'un giratoire à plusieurs voies 143
14.4.2	Calibrage des calculs de capacité utilisée 144
15	Présentation détaillée du cas de Bussigny 145
15.1	Présentation du cas d'étude 145
15.1.1	Situation géographique et spécificités 145
15.1.2	Charges de trafic actuelles et points de conflit 145
15.1.3	Objectifs de recherche pour le cas d'étude 147
15.2	Protocole expérimental 147
15.3	Analyses..... 147
15.3.1	Analyse détaillée des charges en différents points du système 147
15.3.2	Calculs de capacité utilisée..... 151
15.3.3	Analyse des densités de trafic et des vitesses 154
15.4	Synthèse des enseignements..... 158
15.4.1	Importance d'étudier un système dans son ensemble 158
15.4.2	Indicateurs pertinents en cas d'impacts extérieurs..... 158
15.4.3	Influence de la vitesse à l'anneau sur la capacité théorique et les générations de files 159
16	Présentation détaillée du cas de Belp 161
16.1	Présentation du cas d'étude 161
16.1.1	Situation géographique et spécificités 161
16.1.2	Charges actuelles 162

16.1.3	Objectifs de recherche pour le cas d'étude	162
16.2	Protocole expérimental	163
16.3	Analyses.....	164
16.3.1	Analyse des charges dynamiques	164
16.3.2	Analyse de l'influence des piétons sur la capacité utilisée	165
16.3.3	Analyse des phénomènes en approche sur la branche ouest.....	166
16.3.4	Analyse des densités de trafic et des vitesses pour le cas de Belp	171
16.3.5	Analyse des incohérences entre files théoriques et files observées	176
16.3.6	Influence de la vitesse à l'anneau sur la capacité du giratoire	178
16.4	Synthèse des enseignements.....	179
16.4.1	Influence des traversées piétonnes sur la capacité utilisée	179
16.4.2	Utilisation du stock comme nouvel indicateur.....	179
16.4.3	Positionnement des caméras	179
16.4.4	Pertinence des calculs de files théoriques - méthode gap acceptance.....	179
17	Glossaire.....	181
18	Bibliographie	183
19	Clôture du projet	185

13 Présentation détaillée du cas de Brig

13.1 Présentation du cas d'étude

13.1.1 Situation géographique et spécificités

Le giratoire étudié est situé à Brig, à proximité du centre et à côté de l'hôpital. Il s'agit d'un giratoire « standard » à trois branches, avec une voie à l'anneau, une voie en entrée et une voie en sortie. Sa géométrie est conforme à la norme VSS 40 263.

Au niveau du fonctionnement, la circulation est chargée mais sans saturation. Peu d'interactions avec les passages piétons sont constatées et aucune avec les carrefours voisins.

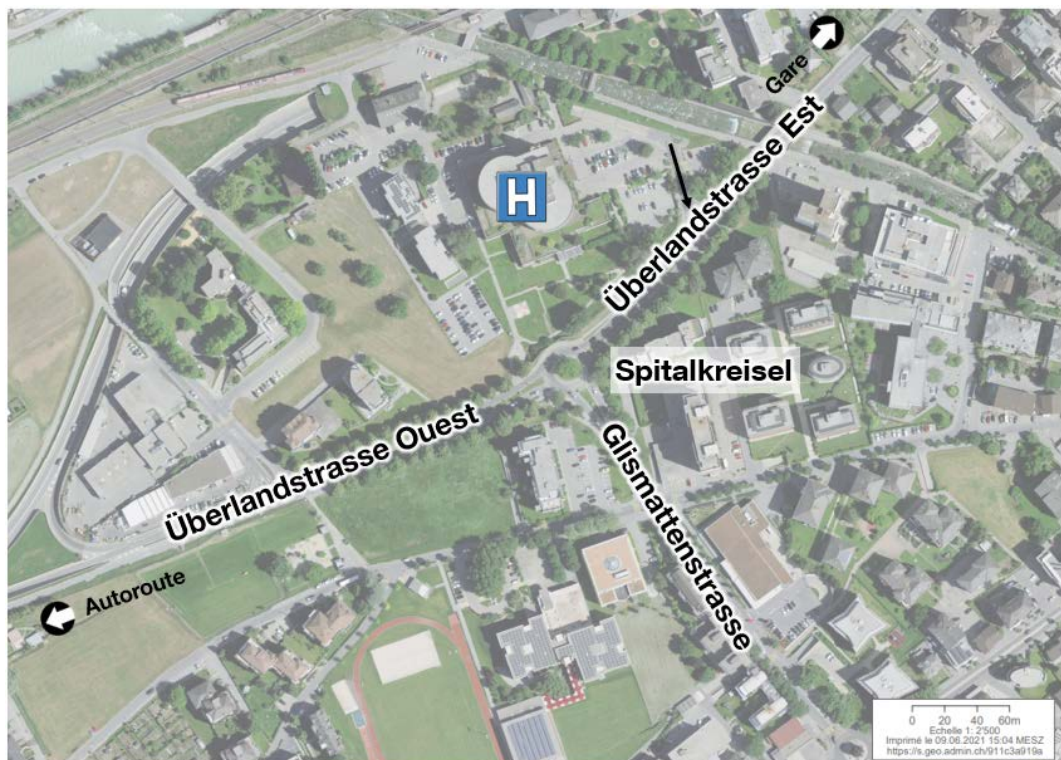


Fig. 38 Situation géographique du giratoire de l'hôpital à Brigue

13.1.2 Charges de trafic actuelles

D'après le diagramme TJM issu d'une étude Transitec précédente (Spitalweiterung - 2021), les branches les plus chargées sont Glismattenstrasse avec 16'500 véhicules/jours et Überlandstrasse côté est avec 12'900 véhicules/jour.

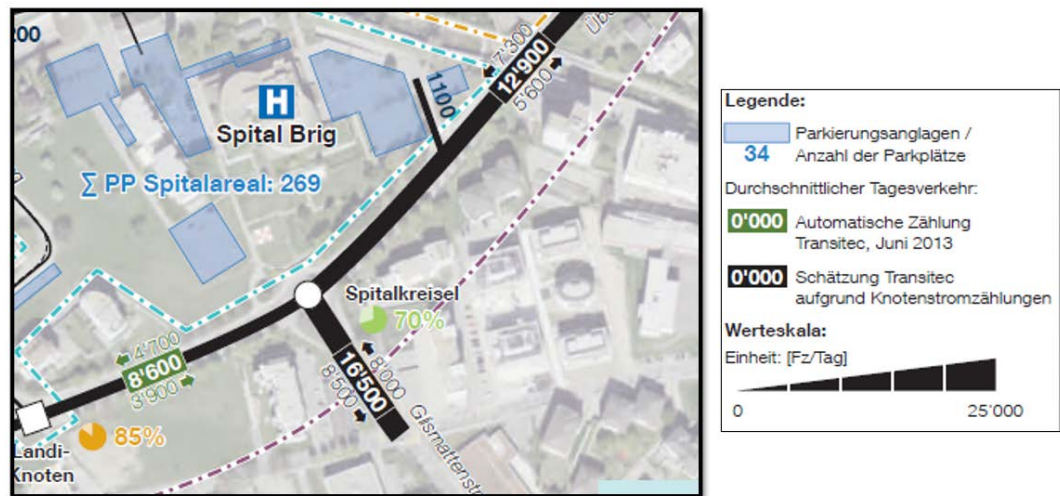


Fig. 39 Trafic journalier moyen sur les branches du giratoire de l'hôpital

A l'heure de pointe du soir, les charges sont relativement élevées, surtout sur la branche est, avec 775 véh./h arrivant en entrée de giratoire.

La répartition des véhicules motorisés montre une prédominance forte des voitures. Peu de camions et de motos sont recensés.

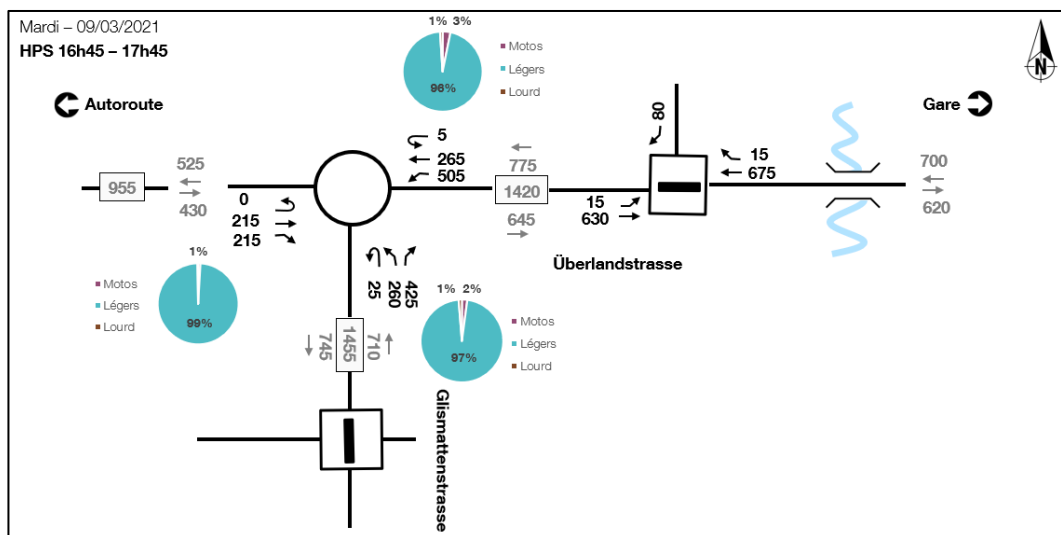


Fig. 40 Charges de trafic à l'heure de pointe du soir (uv./h)

L'analyse des charges nous renseigne sur de potentielles problématiques d'insertion des véhicules provenant de la branche est (la plus chargée). A priori, les véhicules sont principalement gênés par le flux circulant venant de la branche sud (en rouge ci-dessous), mais également par les flux sortant en provenance de l'ouest (en violet) et du sud (en bleu). L'influence de chacun de ces flux reste à déterminer.

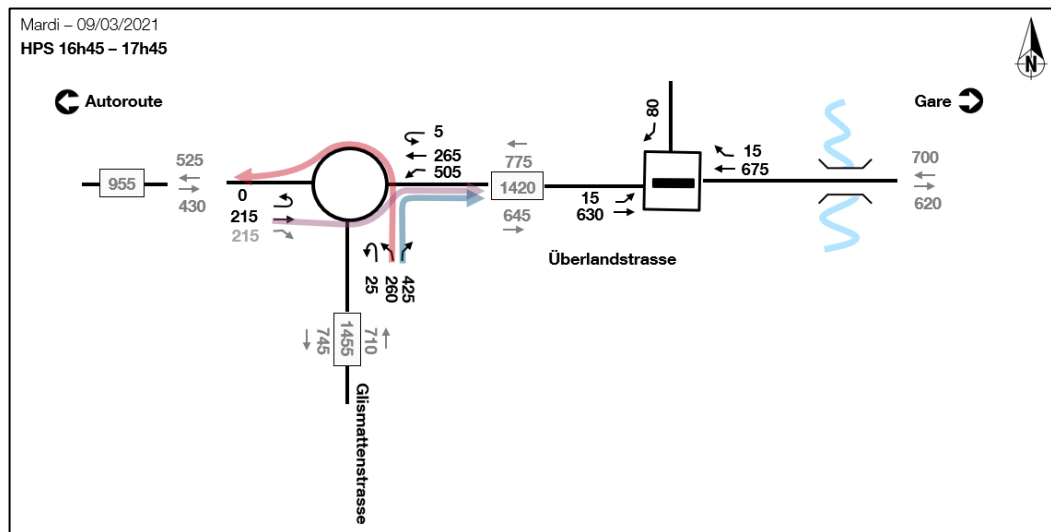


Fig. 41 Flux gênant l'insertion des véhicules depuis la branche est

13.1.3 Objectifs de recherche pour le cas d'étude

L'objectif principal de ce cas d'étude est d'expérimenter de nouvelles méthodes permettant d'évaluer le fonctionnement d'un giratoire sur un cas standard et simple :

- **utilisation de différentes méthodes de calcul de capacité utilisée** : méthodes classiques, gap acceptance, méthode déterministe;
- **étude des charges de manière dynamique** au cours de la période;
- **utilisation de la demande exprimée** pour le calcul de capacité et comparaison avec les résultats obtenus avec la demande en entrée (demande satisfaite).

Ce cas est également l'occasion d'analyser l'influence du flux sortant sur l'insertion des véhicules en entrée.

13.1.4 Protocole expérimental

L'analyse se concentre sur les branches sud et est qui sont les plus chargées.

Les données nécessaires aux analyses et calculs sont les suivantes :

- les différentes charges de trafic en présence :
 - demande réelle (en entrée de giratoire);
 - demande exprimée (en approche de giratoire);
 - charges pour les différents modes.
- les directions des véhicules;
- les créneaux inter-véhiculaires;
- les vitesses.

Afin de collecter ces données, des caméras ont été disposées en entrée et en différents points d'approche sur les branches étudiées du giratoire (sept caméras en tout). Les images ont été capturées un mardi entre 15h et 18h.

Il était initialement prévu de filmer les branches à l'aide d'un drone afin de mieux visualiser les potentielles files d'attente. Cela n'a malheureusement été possible que sur de très

courtes périodes en raison des conditions de vent le jour des relevés. Ces données n'ont donc pas pu être exploitées.

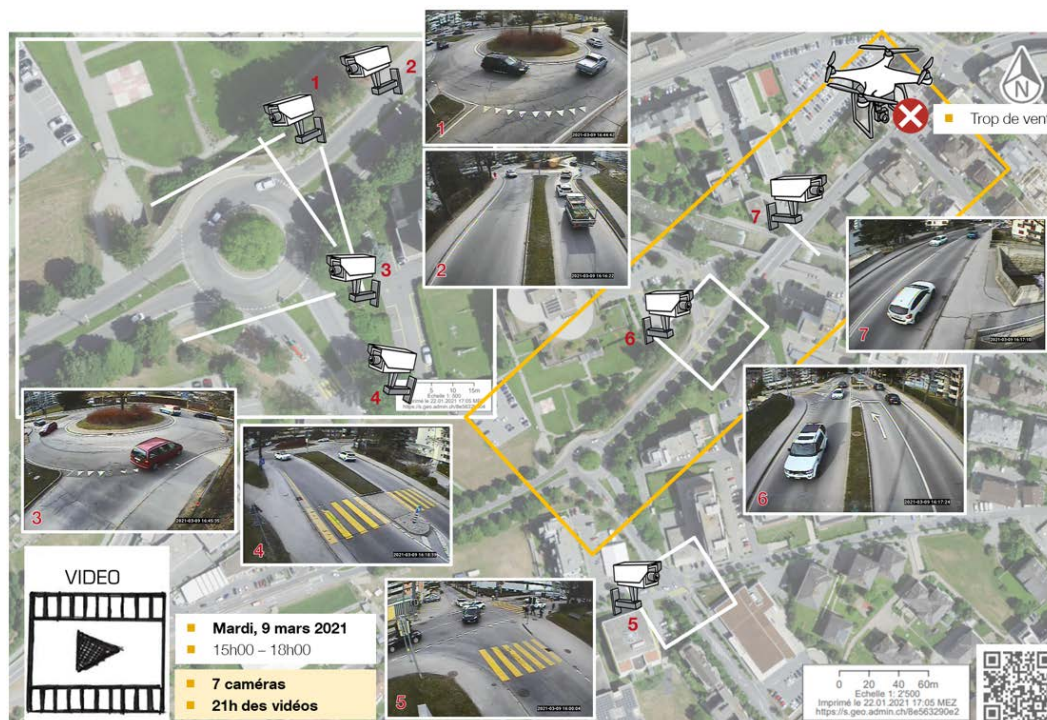


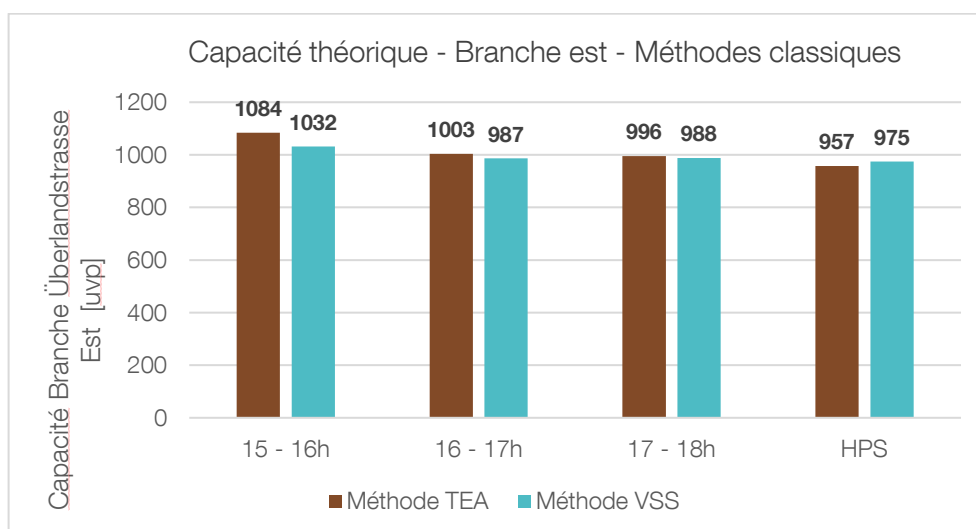
Fig. 42 Positionnement des caméras sur les branches est et sud du giratoire de l'hôpital

13.2 Analyses

13.2.1 Calculs de capacités utilisées pour la branche est

Calcul de capacité utilisée par les méthodes classiques

La capacité théorique et la capacité utilisée de la branche est ont été calculées à l'aide des méthodes classiques (TEA et VSS), en utilisant la charge en entrée de giratoire (demande satisfaite) et la charge en approche (demande exprimée). Dans toutes les analyses suivantes, l'HPS se situe entre 16h45 et 17h45.



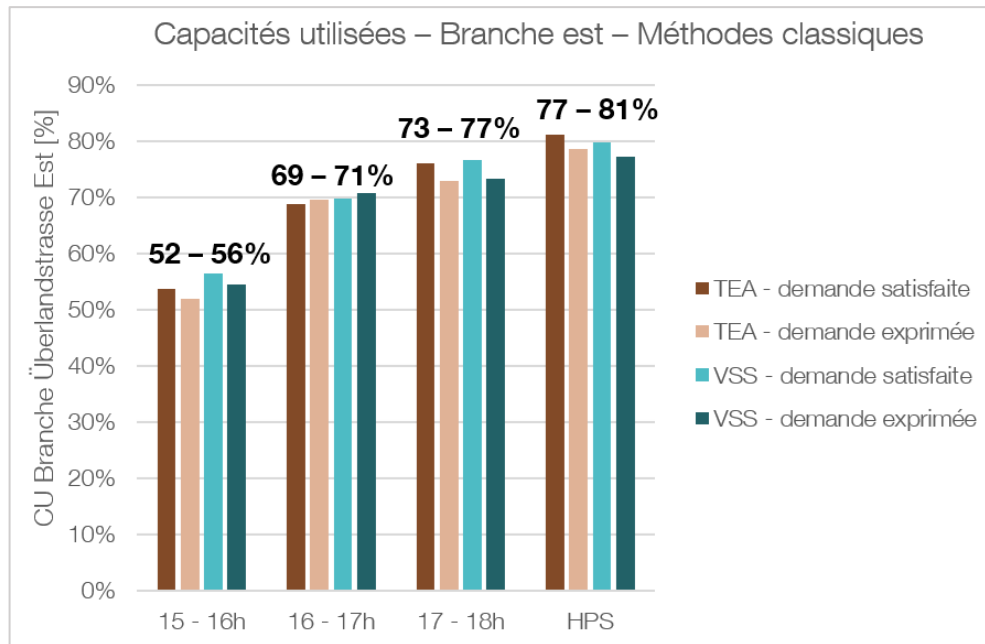


Fig. 43 Capacités théoriques et utilisées pour la branche est, obtenues à l'aide des méthodes classiques

Les méthodes classiques donnent des résultats différents mais sans grands écarts. Le giratoire ne présente pas de saturation, ce qui explique le peu de différences entre les calculs de capacité utilisée effectués avec la demande exprimée et ceux effectués avec la demande satisfaite.

Calcul de capacité utilisée par les méthodes gap acceptance

Le principe des méthodes gap acceptance, les formules utilisées ainsi que les méthodes d'obtention des paramètres sont rappelées dans le paragraphe 5.2.

Ces méthodes sont basées sur les paramètres « critical gap » et « follow-up time », dont il existe des valeurs théoriques utilisables pour les calculs. Pour cette étude, ces paramètres ont également été mesurés pour le giratoire étudié en appliquant un traitement logiciel aux vidéos enregistrées.

L'analyse de la distribution des gaps pour le giratoire donne les résultats suivants :

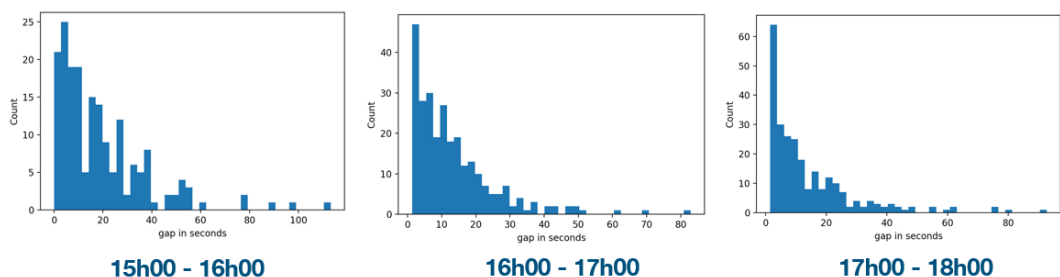


Fig. 44 Distribution des gaps entre véhicules pour les différentes heures de la période

On constate davantage de gaps entre 17h et 18h car le flux est plus élevé. En effet, un véhicule circulant correspond à un gap. En revanche, les gaps sont plus courts car il y a plus de véhicules au cours de l'heure.

L'analyse de la longueur de tous les gaps rejetés et acceptés permet d'obtenir le « critical gap » par méthode graphique (intersection des deux courbes ci-dessous). On peut aussi obtenir ce critical gap par une approximation avec la méthode maximum-likelihood.

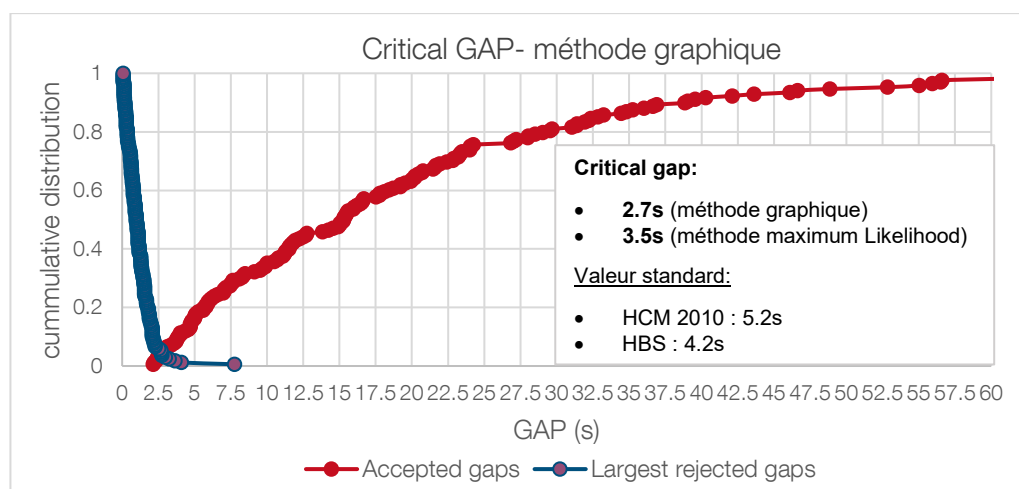


Fig. 45 Détermination du « critical gap » par méthode graphique

Le follow-up time est obtenu à l'aide de la médiane de toutes les valeurs de « follow-up time » mesurées :

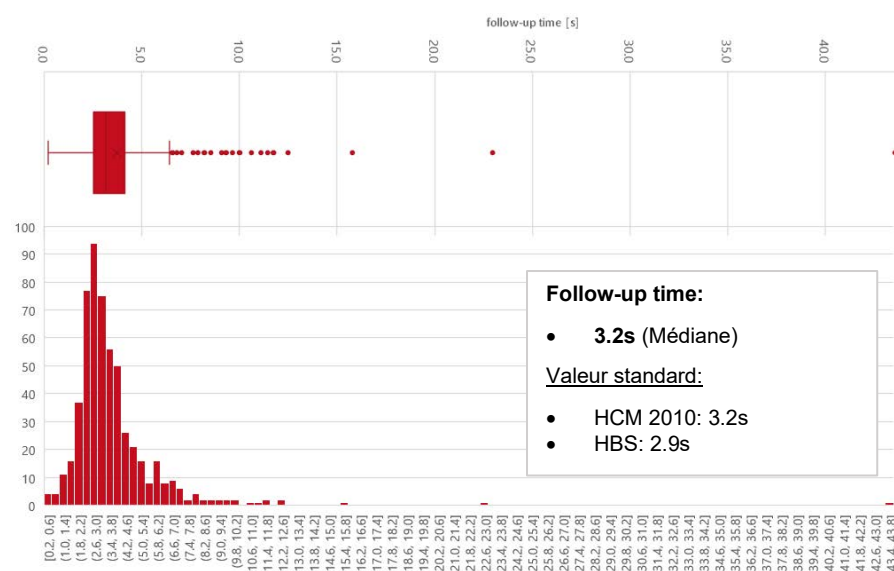


Fig. 46 Distribution des follow-up times entre 15h et 18h

Les valeurs de paramètres mesurées retenues pour la suite des calculs sont 3.5 secondes pour le « critical gap » et 3.2 secondes pour le « follow-up time ».

Les capacités théoriques et capacités utilisées calculées à l'heure avec les méthodes gap acceptance (paramètres issus des mesures) donnent les résultats suivants qui sont comparés aux méthodes classiques :

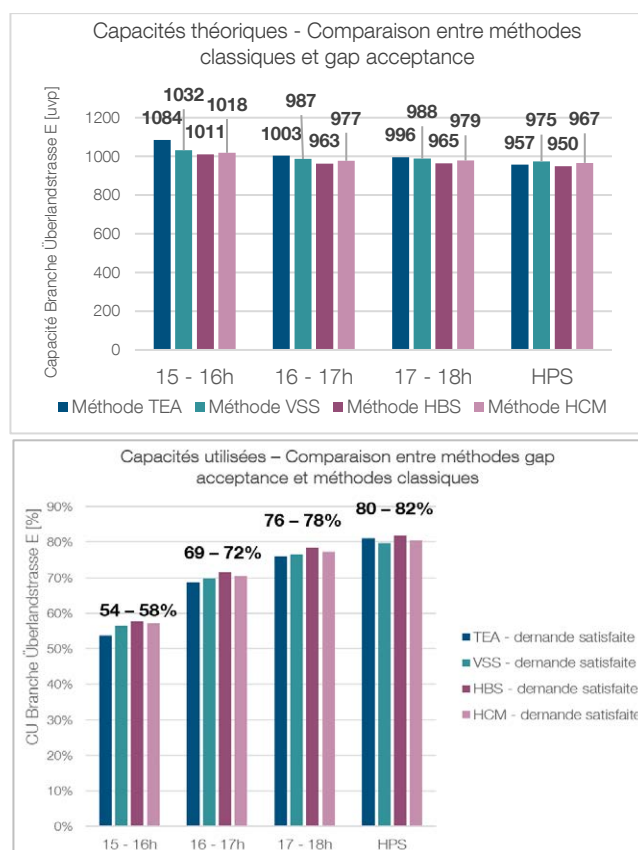


Fig. 47 Capacités théoriques et utilisées – Comparaison des méthodes classiques et gap acceptance avec paramètres mesurés

Dans ce cas, les méthodes « critical gap » permettent de retrouver des résultats relativement proches des méthodes « par régression », avec environ 80% de capacité utilisée à l'HPS. Les deux méthodes HBS et HCM donnent des résultats très proches. Ces faibles différences sont certainement dues au fait que le giratoire est peu saturé.

Il est également intéressant de présenter les résultats en comparant l'offre (capacité théorique) et la demande (charge à l'entrée) en fonction du temps, en plus de la capacité utilisée.

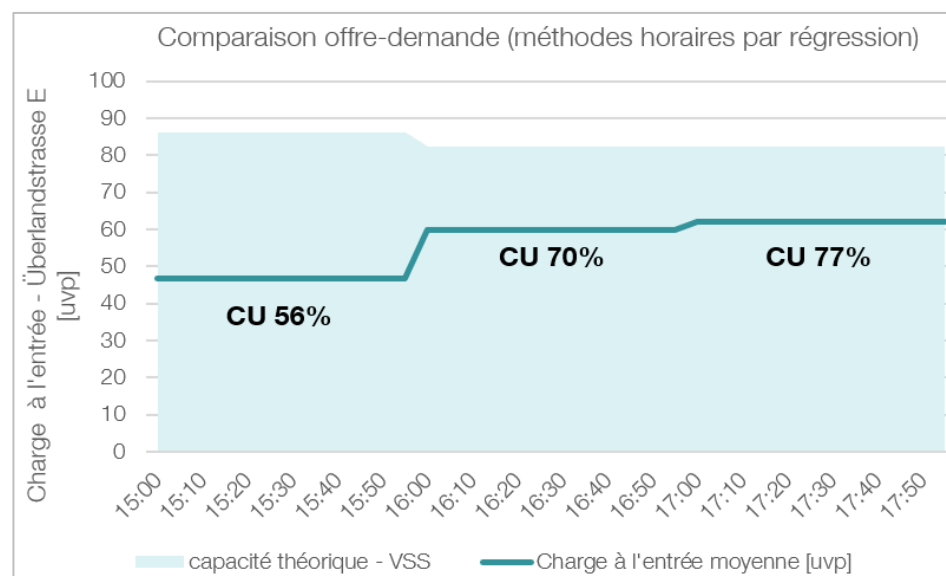


Fig. 48 Capacité théorique à l'heure avec la méthode VSS – Comparaison avec la charge à l'entrée

L'exemple ci-dessus présente des résultats à l'heure qui ne permettent pas de révéler certains phénomènes plus ponctuels. Des calculs avec une granularité plus fine peuvent être réalisés afin de révéler ces phénomènes comme illustré dans l'exemple ci-dessous. La méthode gap acceptance est alors utilisée car plus adaptée à des calculs dynamiques.

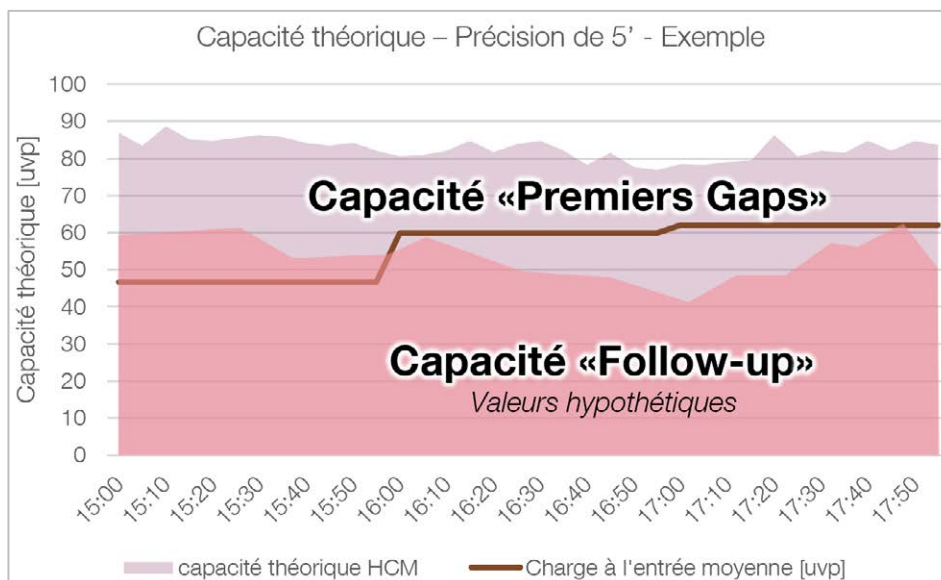
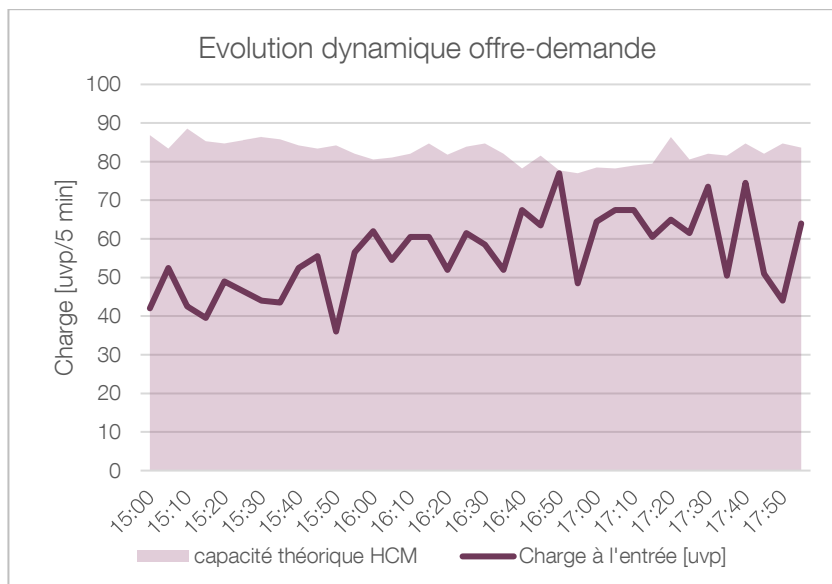


Fig. 49 Part des « premier gaps » et des gaps « follow-up » dans la capacité totale

Il serait également intéressant de montrer quelle part de la capacité est liée à des insertions seules ou à des véhicules en follow-up. En effet, si l'observation permet de montrer que la part de gaps compatibles avec des « follow-ups » est très faible, cela donne des indications sur le niveau de saturation de la branche.

Les calculs de capacité théorique et de capacité utilisée dynamiques pour le cas de Brig donnent les résultats suivants :



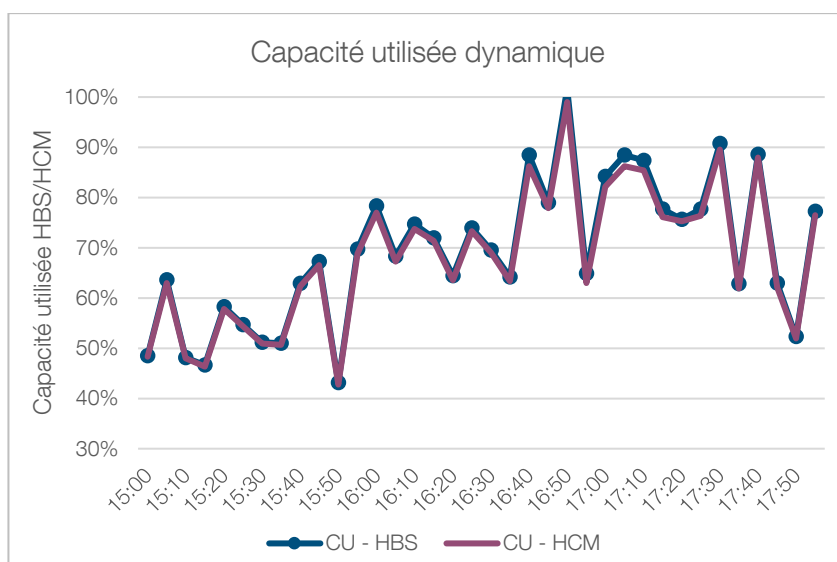


Fig. 50 Capacités théoriques et utilisées dynamiques – Méthodes « gap acceptance »

Même si les capacités utilisées horaires sont relativement faibles (entre 70 et 80%), l'évolution dynamique permet de montrer des hyperpointes avoisinant les 100%. De manière générale, la capacité utilisée dynamique n'est pas du tout constante à Brig.

Ces hyperpointes peuvent engendrer des pics de files d'attente, qui eux-mêmes peuvent générer des effets en cascade sur d'autres carrefours. Ces phénomènes ne peuvent pas être détectés avec des calculs à l'heure. Ainsi, les analyses dynamiques peuvent permettre de mieux expliquer les files observables sur le terrain et d'identifier des pics liés à des phénomènes ponctuels (par exemple une sortie de parking d'un collège à la fin des cours).

Calcul de capacité utilisée par la méthode déterministe

Cette méthode consiste à comptabiliser tous les gaps et leur utilisation au cours du temps pour le cas étudié, puis à transformer ces gaps en capacité d'écoulement gap par gap. On obtient donc une image directe de la capacité et de son utilisation (capacité utilisée « réelle »). Il est donc possible de valider les résultats théoriques précédents en les comparant aux résultats de la méthode déterministe.

Il est important de noter que l'évaluation des gaps nécessite un relevé vidéo et un traitement par logiciel. La méthode ne fonctionne donc que pour des situations actuelles.

Les principes de la méthode déterministe sont présentés en détails au paragraphe 5.4.

Pour le cas de Brig, les gaps ont été comptabilisés et chronométrés à l'aide du Logiciel Logiroad. Le Logiciel détecte également l'utilisation des gaps : gap accepté ou refusé, nombre de véhicules qui s'insèrent pour chaque gap. On peut donc classer les gaps en quatre catégories, permettant d'obtenir la part de « ressource en gaps » utilisée et celle restant disponible.

La capacité utilisée est directement déduite des parts de gaps par catégorie.

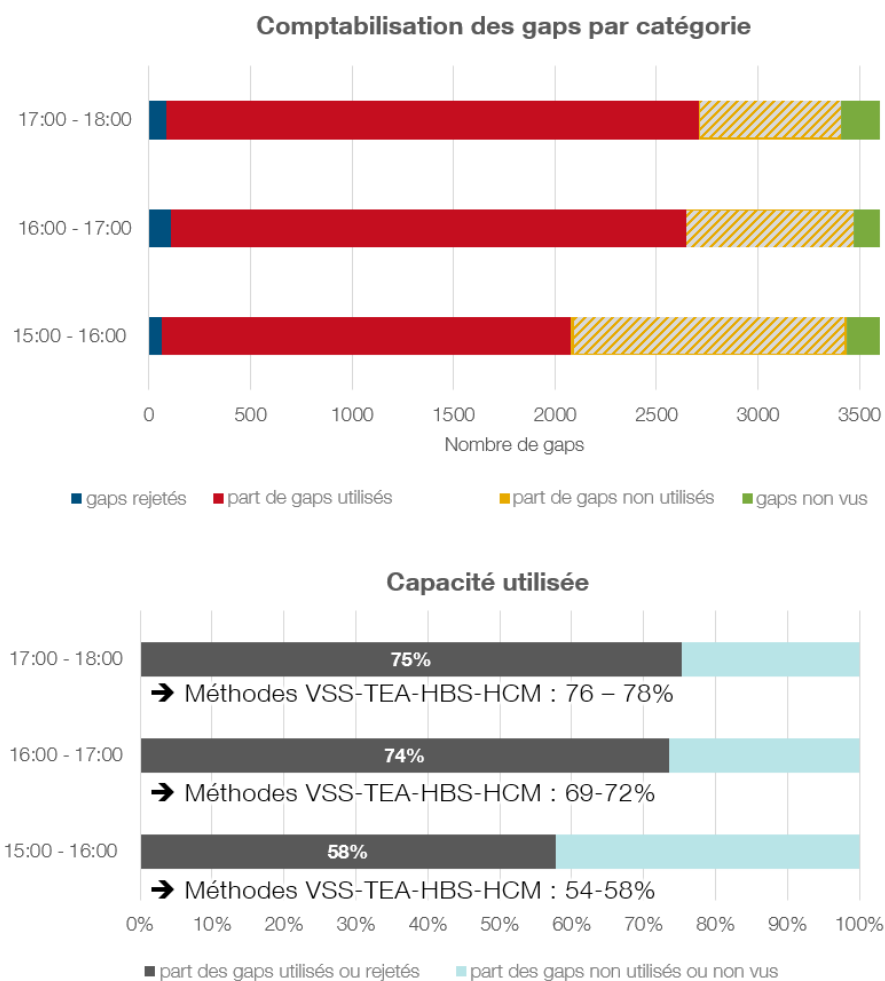


Fig. 51 Dédution de la capacité utilisée à partir de la répartition des gaps – Méthode déterministe

L'estimation de la capacité utilisée par la classification des gaps donne des valeurs similaires aux capacités utilisées obtenues par les méthodes « gap acceptance » et VSS/TEA. Les résultats théoriques sont donc validés ce qui signifie que le paramétrage choisi est pertinent.

13.2.2 Estimation des files et du stock pour la branche est

Les files d'attente 95%¹ à l'heure ont été estimées grâce à la méthode VSS mais en utilisant des capacités obtenues selon différentes méthodes (VSS, TEA, HCM, HBS).

¹ Voir paragraphe 7.1.1 pour les définitions et méthodes d'estimation des files d'attente.

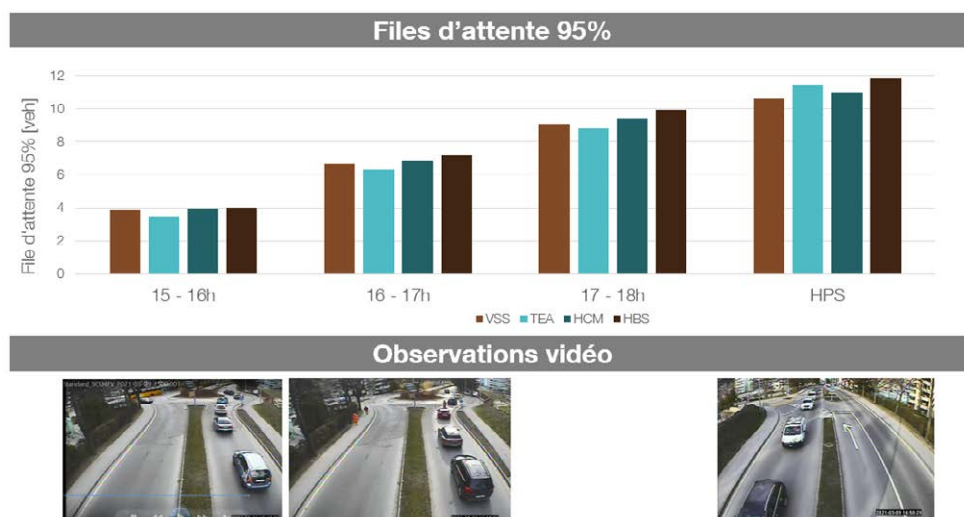


Fig. 52 Files d'attente 95% à l'heure et comparaison avec les observations vidéo

La comparaison entre théorie et réalité observée donne les résultats suivants :

- entre 15h et 16h, 4 véhicules maximum sont observés, ce qui montre une bonne cohérence entre théorie et réalité;
- entre 16h et 17h, plus de 4 véhicules sont observés au pic mais il n'est pas possible d'estimer leur nombre exact en raison du champ de vision restreint et de l'impossibilité d'un visionnage par drone (trop de vent);
- à l'HPS (16h45-17h45), les files observées remontent jusqu'au carrefour en amont situé à 130m. Si l'on considère que la distance moyenne entre véhicules est de 12 à 15 m à vitesse réduite, la file doit contenir entre 9 et 11 véhicules. L'estimation théorique est donc proche de la réalité.

Les files horaires ont ensuite été comparées au stock. Pour rappel, l'estimation du stock sur la branche entre deux points correspond à la différence entre l'input (en amont) et l'output (en aval) qui se trouve ici à l'entrée du giratoire. Cet indicateur permet de pallier l'absence d'un comptage par drone.

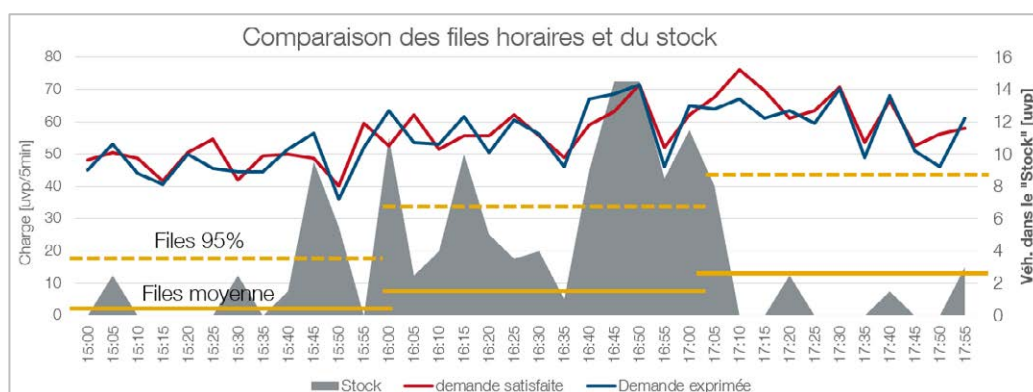


Fig. 53 Comparaison des files d'attente horaires avec le stock

On peut constater un pic de stock vers 16h50, correspondant au pic de capacité utilisée. Ce pic ne se voit pas avec les estimations de files 95% basées sur des valeurs de capacités utilisées horaires. Une comparaison entre stock et files dynamiques a donc été réalisée.

La littérature présente les formules d'estimation de files pour des valeurs horaires. Il n'est donc pas sûr qu'il soit pertinent de les utiliser pour des estimations aux 5 minutes. Un test a tout de même été effectué.

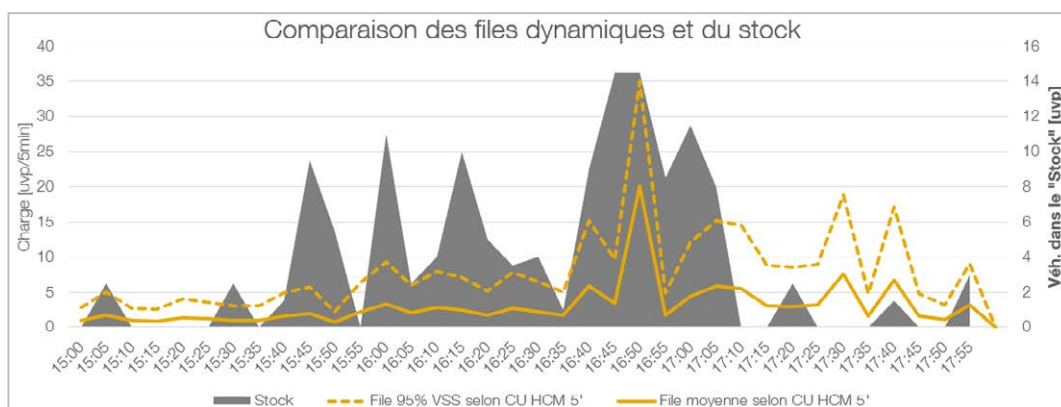


Fig. 54 Comparaison des files dynamiques (5') et du stock

Certains pics de stock sont observés entre 15h40 et 16h20 mais ne sont pas reflétés par l'estimation théorique des files. En effet, les capacités utilisées étaient faibles à ce moment-là, il peut donc s'agir de pics dus à des situations particulières. En revanche, le pic de saturation de 16h50 se voit bien dans les files estimées et s'approche bien du stock observé. D'autres pics (CU à 90%) sont estimés mais pas vérifiés dans le calcul du stock à la fin de la période.

13.2.3 Tests de sensibilité

Afin de d'interpréter les résultats des calculs de capacité et d'effectuer des comparaisons pertinentes entre méthodes, il est important de comprendre l'influence des différentes données d'entrées sur les résultats des formules. Des tests de sensibilité ont donc été effectués pour différentes formules de calcul de capacité.

Influence de la charge pour les méthodes classiques

On étudie ici l'influence d'une variation de charge à l'anneau de +/- 50 uvp/h sur la capacité théorique.

Avec la méthode VSS, une variation de charge de 50 uvp/h produit une variation de capacité de +/- 30 uvp/h. La sensibilité est donc limitée ($\times 0.6$) et linéaire au niveau des valeurs. Les impacts d'une variation de capacité sur la capacité utilisée dépendent de la valeur de la capacité : avec une capacité théorique basse, une variation de +/-30 uvp/h impactera plus la valeur de la CU que si la capacité théorique est haute.

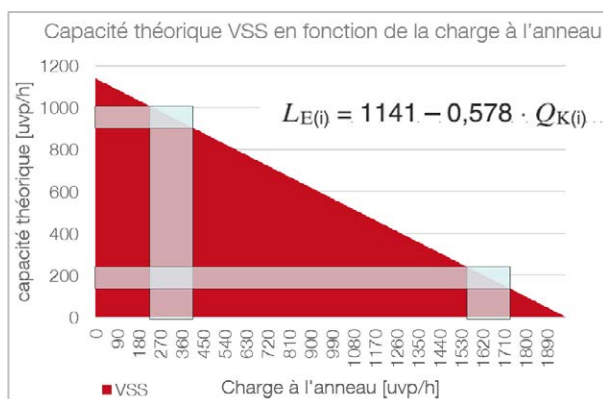


Fig. 55 Analyse de sensibilité de la capacité théorique VSS en fonction de la charge à l'anneau

Avec la méthode TEA, une variation du flux gênant de 50 uvp/h produit une variation de capacité de +/- 45 uvp/h. La sensibilité de la formule est donc plus importante.

Si l'on fait varier à la fois le flux circulant et le flux sortant de 50 uv/h, la variation de capacité théorique sera plus importante : +/- 90 uv/h.

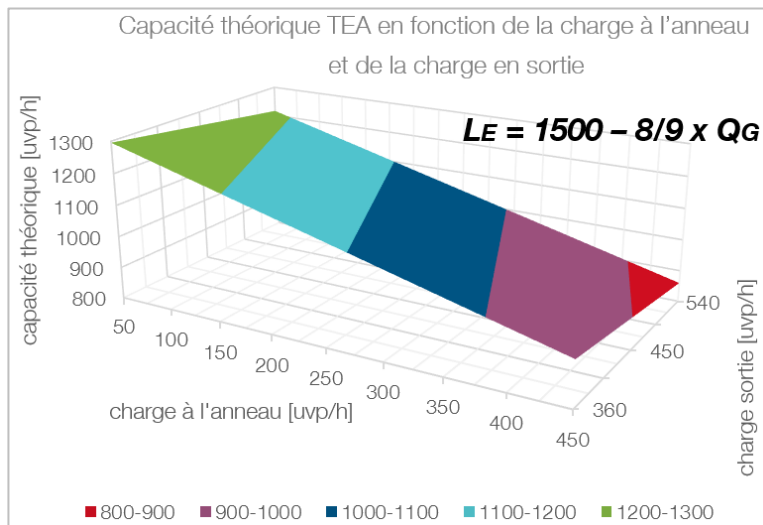
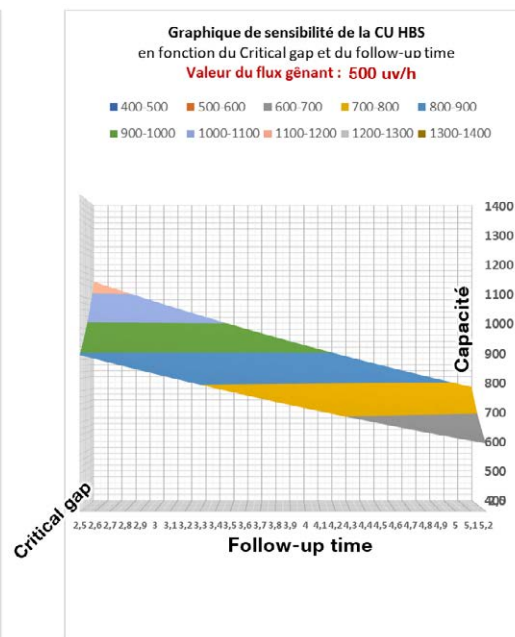
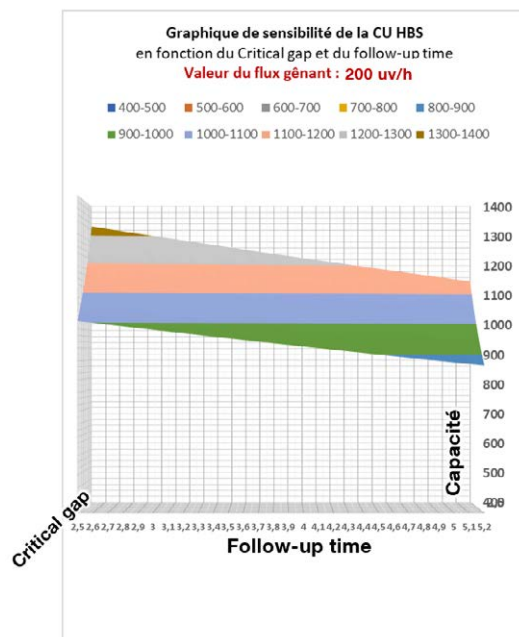


Fig. 56 Capacité théorique TEA en fonction de la charge à l'anneau et de la charge en sortie

Influence du « critical gap » sur les méthodes gap acceptance

On étudie ici la variation de capacité en fonction des valeurs de critical gap pour différentes valeurs de flux gênant (voir graphiques ci-après).

L'analyse des graphiques montre que la capacité diminue lorsque le « critical gap » augmente. **Une variation de 10% du « critical gap » (entre 3.0 et 3.3 ou entre 2.7 et 3.0 secondes) entraîne une variation de 2% de capacité lorsque le flux gênant est de 200 uv/h, de 4% lorsque le flux gênant est de 500 uv/h et de 7% lorsque le flux gênant est de 800 uv/h. La sensibilité du choix du critical gap est donc plus importante lorsque le flux gênant est élevé et que la capacité est réduite. En effet, les créneaux sont alors courts et la capacité dépend essentiellement du critical gap.**



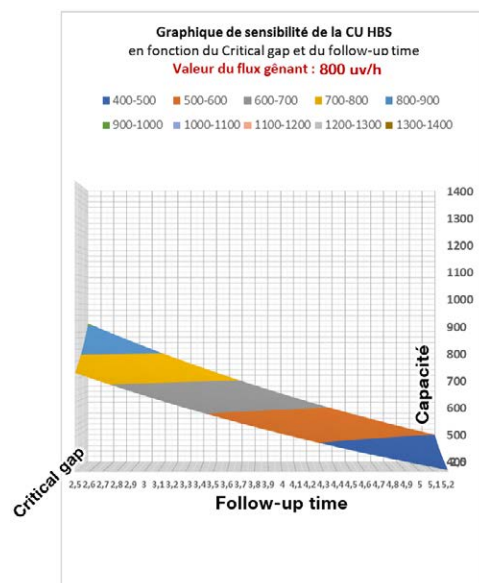
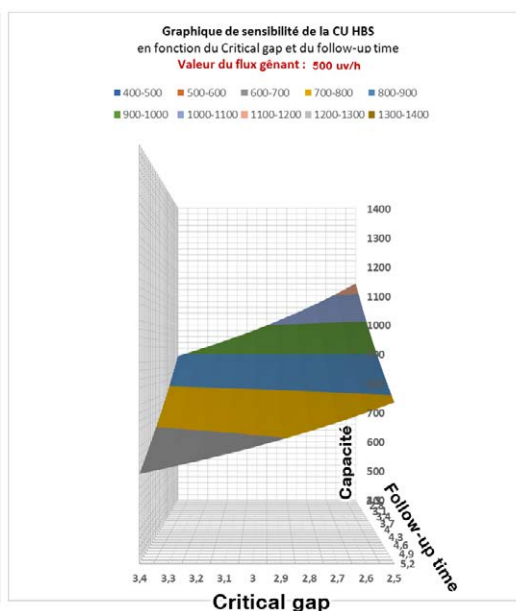
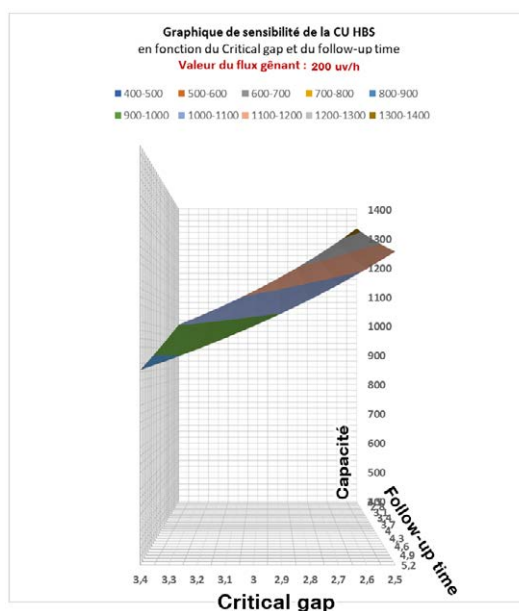


Fig. 57 Analyse de sensibilité de la capacité HBS en fonction du « follow-up time » pour différentes valeurs du flux gênant

Influence du « follow-up time » sur les méthodes gap acceptance

On étudie la variation de capacité en fonction des valeurs de « follow-up time » pour différentes valeurs de flux gênant (voir graphiques ci-après).

Les graphiques montrent que la capacité diminue lorsque le « follow-up time » augmente. **Une variation de « follow-up time » de 10% (entre 3.0 et 3.3 ou entre 2.7 et 3.0 secondes) entraîne une variation de capacité de 10% lorsque le flux gênant est de 200 uvp/h, de 9% lorsque le flux gênant est de 500 uvp/h et de 7% lorsque le flux gênant est de 800 uvp/h. La sensibilité du choix du follow-up time est donc plus importante lorsque le flux gênant est faible et que la capacité est élevée (avec donc moins d'enjeux en situation saturée). En effet, cela correspond à des gaps longs pour lesquels le « follow-up time » est déterminant.**



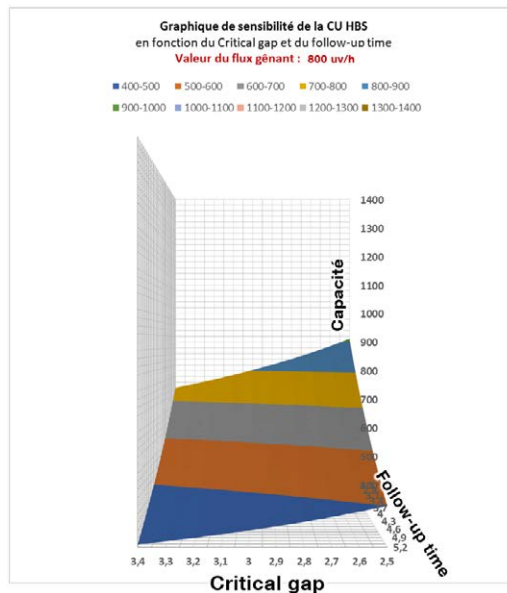


Fig. 58 Analyse de sensibilité de la capacité HBS en fonction du « critical gap » pour différentes valeurs du flux gênant

Impact de la variation de capacité théorique sur la capacité utilisée – Méthodes gap acceptance

Cet impact est explicité par le cas concret suivant :

On prend l'hypothèse d'un giratoire présentant une capacité théorique de 660 uv/h +/- 5%, soit une fourchette allant de 630 à 690 uv/h. La charge à écouler est de 600 uv/h. La capacité utilisée moyenne sera alors de 600/660, soit 90%. La variation de capacité utilisée sera située entre 85% et 95%, soit environ +/- 5% ce qui est assez faible mais qui peut engendrer des impacts importants sur les longueurs de files d'attente.

Conclusions et recommandations

Lors d'un calcul de capacité utilisée, il est primordial d'être conscient de la sensibilité des résultats afin de tirer des conclusions prudentes sur le fonctionnement du giratoire étudié.

Une petite variation des paramètres d'entrée peut engendrer une variation de la capacité théorique, qui elle-même peut engendrer une grande variation de la capacité utilisée, en situation saturée. Ainsi, des tests de sensibilité devraient toujours accompagner les résultats.

En complément de ces tests de sensibilité, il est recommandé de présenter plusieurs résultats issus de plusieurs méthodes, comme le fait le logiciel allemand Kreisel.

13.2.4 Influence du flux sortant sur la capacité utilisée

Dans la méthode TEA, le flux sortant génère une crainte pour le véhicule souhaitant s'insérer. Il a donc toujours un effet gênant sur les véhicules entrant.

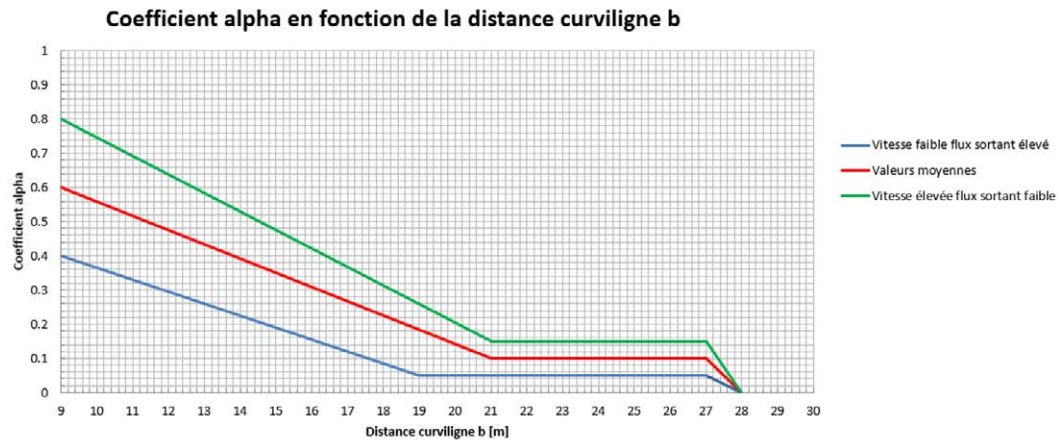


Fig. 59 Méthode TEA – valeurs du coefficient alpha en fonction de la distance curviligne entre points de conflits et de la vitesse

Au contraire, des recherches plus récentes suggèrent que le flux sortant peut avoir une influence positive sur la capacité d'entrée en créant des possibilités pour le véhicule entrant de s'insérer (6).

D'autres travaux montrent que le flux sortant peut aussi bien être perturbateur qu'utile, en fonction du contexte et de la répartition du flux de circulation (3).

L'objectif des analyses suivantes est de comprendre un peu plus précisément l'influence du flux sortant.

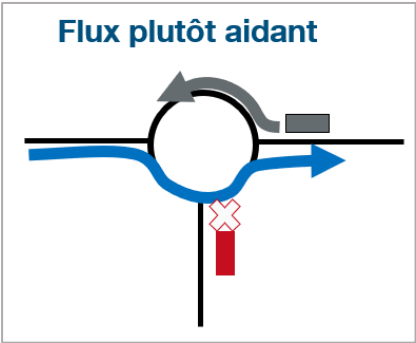
L'analyse d'extraits vidéo a permis d'observer que le flux sortant était surtout aidant lorsqu'un flux circulant quasi-continue bloque l'insertion. Dans ce cas, le flux sortant interrompt ce flux continue et offre une « lucarne » pour s'insérer. Il est donc intéressant de creuser l'influence positive du flux sortant en situation saturée.

Ci-dessous, les véhicules sortants interrompent le flux continue à l'anneau, permettant à la voiture blanche de s'engager.

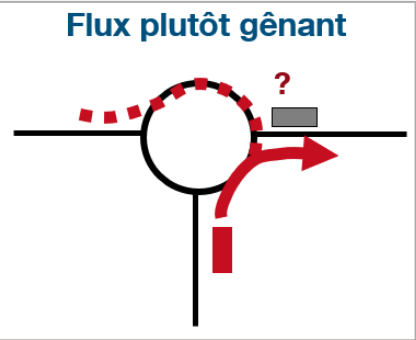


Fig. 60 Observations des effets du flux sortant sur les vidéos

Le flux sortant n'exerce pas la même influence sur l'insertion selon sa branche d'origine, comme le montrent les illustrations ci-dessous.



Lorsque le giratoire est compact, le véhicule en insertion (en gris ci-contre) est gêné par le flux circulant lié aux véhicules rouges. Or le flux bleu gêne le flux rouge, donc il allonge les gaps et aide à l'insertion. Dans ce cas, on devrait donc pouvoir observer une insertion facilitée grâce à davantage de possibilités de follow-up liés à des gaps plus longs. Ce phénomène ne devrait avoir lieu que lorsque la part de flux bleu est importante.



Lorsque le flux en rouge s'insère, comme il est très proche du véhicule gris souhaitant s'insérer, si le giratoire est compact et qu'il y a une ambiguïté sur la destination du véhicule rouge, il se peut que le véhicule gris refuse des gaps qui auraient pu sembler attractifs. On devrait donc théoriquement pouvoir observer des critical gaps plus longs lorsque la part de flux rouge est élevée.

Fig. 61 Rôle aidant ou gênant du flux sortant

Pour le cas de Brig, le rapport entre flux aidant et flux gênant a été analysé au cours de la période.

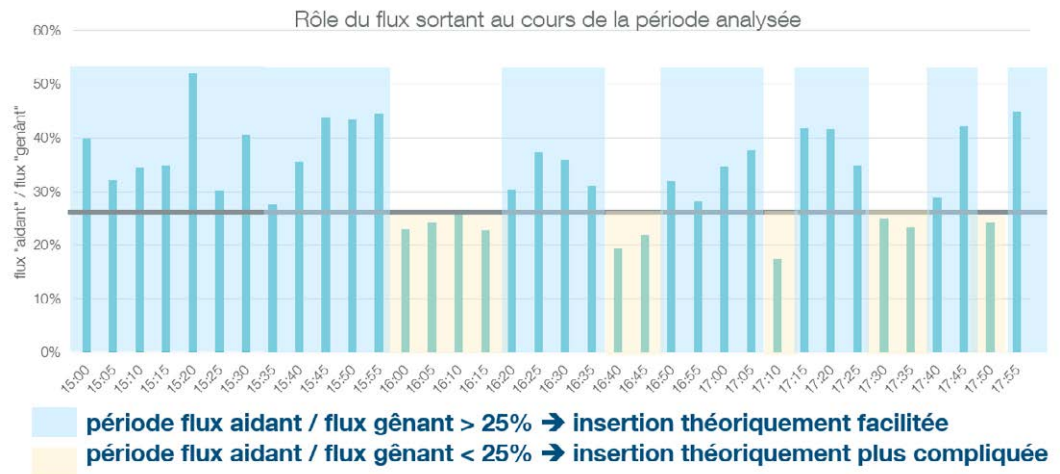


Fig. 62 Parts des flux aidant et gênant au cours du temps pour le cas de Brigue

Une analyse des gaps moyens et du critical gap en fonction du rôle majoritaire du flux sortant a été effectuée :

	15h -18h Période entière	Période « bleue » Flux sortant à dominante « aidant »	Période « jaune » Flux sortant à dominante « gênant »
Gap moyen [s]	23.0	24.4	20.0
Critical gap [s]	3.50	3.70	3.0

Fig. 63 Valeurs moyennes des « critical gap » et « follow-up time » en fonction de la prédominance du flux sortant ou du flux aidant

L'allongement du gap moyen lorsque le flux sortant est « aidant » semble se confirmer : 24.4" au lieu de 20", soit un véhicule en follow-up en plus par gap. En période de flux sortant « gênant », l'insertion est plus difficile et le critical gap est plus court.

La distribution des gaps en fonction du rôle du flux sortant a été analysée avec les résultats suivants :

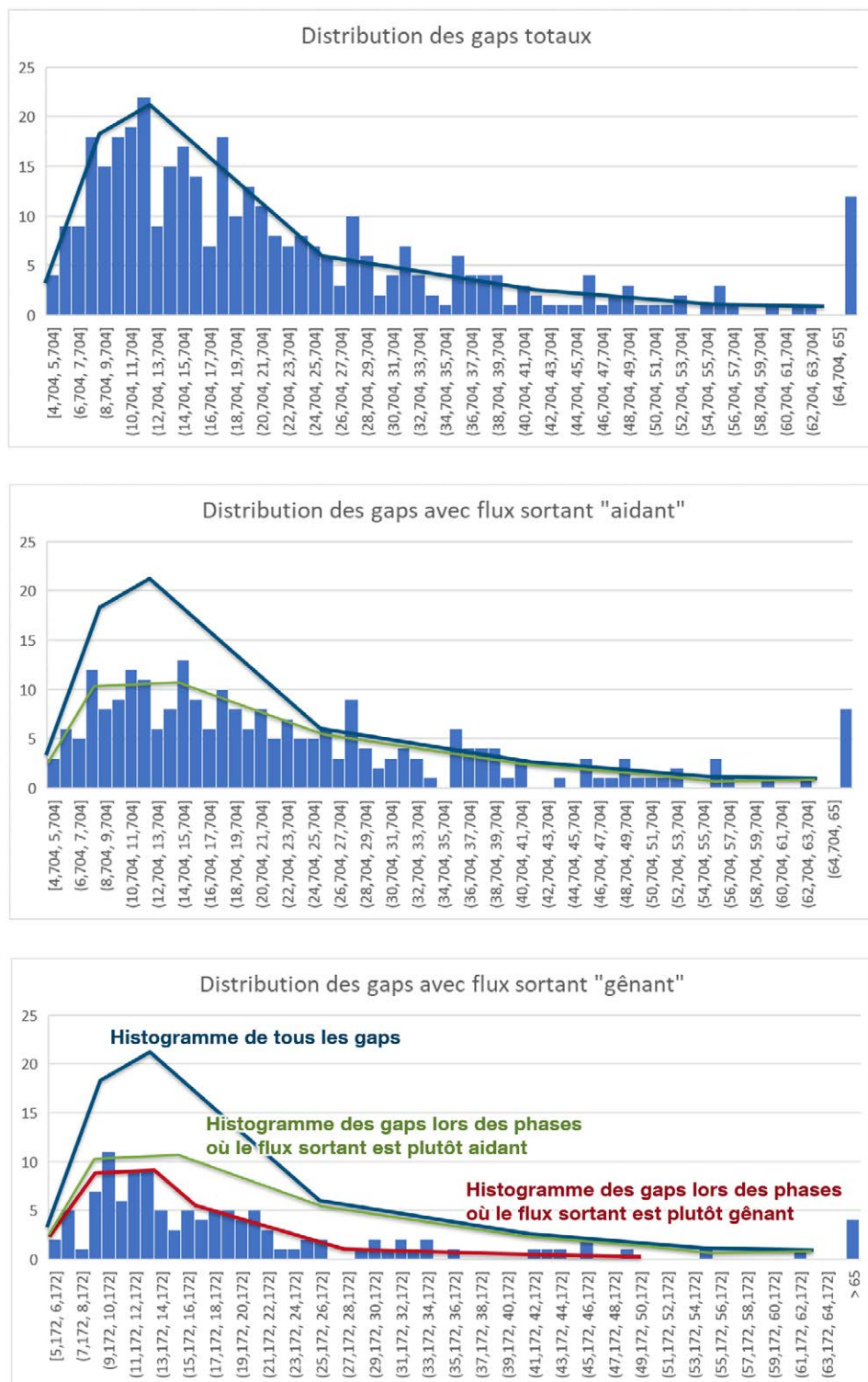


Fig. 64 Distribution des gaps en fonction du rôle du flux sortant

Il apparaît que les gaps longs (la queue de distribution) sont moins nombreux lorsque le flux sortant est « aidant », pour les données sélectionnées. Cette « mise en attente » des

flux de la branche orthogonale pousse à créer d'autres gaps plus courts lorsque ces derniers peuvent s'écouler. Il reste à vérifier si une somme de gaps « courts + longs » est plus capacitaire que des gaps « moyens », grâce au follow-up time.

Conclusions sur l'effet du flux sortant

L'effet aidant du flux sortant pourrait être utilisé de façon à améliorer l'écoulement d'une branche au détriment d'une autre. A titre d'exemple, un flux pourrait être amené de façon à gêner le flux prioritaire et à aider une branche à s'écouler, comme illustré dans l'exemple ci-dessous.

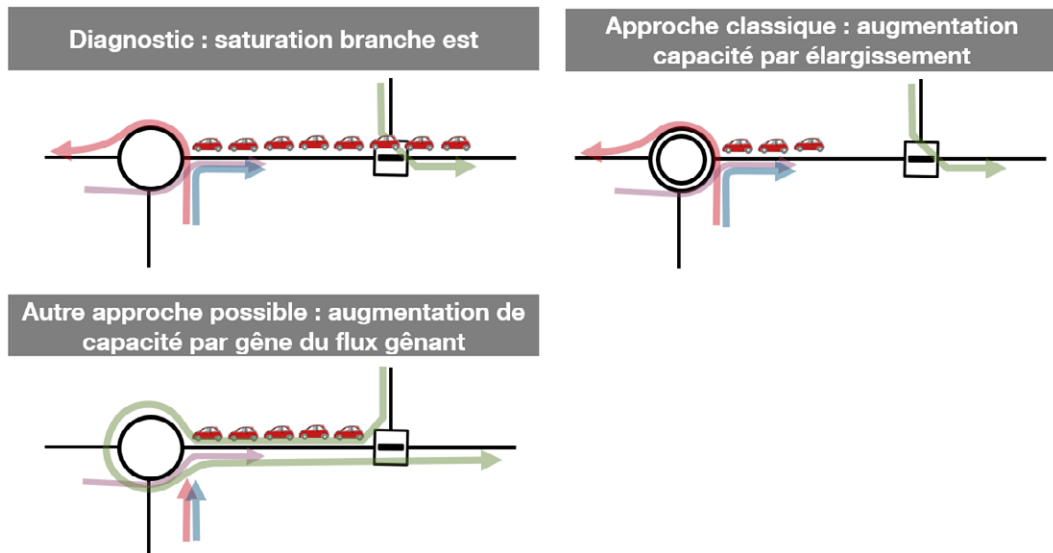


Fig. 65 Résolution d'un problème de saturation par gêne du flux gênant

13.3 Synthèse des enseignements

13.3.1 Efficacité du traitement vidéo

Le traitement vidéo permet d'obtenir des données supplémentaires très précieuses, véhicule par véhicule et gap par gap ouvrant différentes possibilités :

- possibilité d'avoir une idée plus précise et dynamique de la réserve de capacité en utilisant notamment la méthode déterministe;
- **obtention des paramètres contextualisés pour un giratoire et une branche donnés**, plutôt que des paramètres génériques.

Le traitement vidéo présente néanmoins certains inconvénients :

- afin d'obtenir des données pertinentes, il est nécessaire de positionner différentes caméras : au moins une caméra générale, une caméra par point d'entrée et une caméra en amont de la branche. **Le dispositif expérimental est donc plus lourd;**
- les données issues du logiciel sont en .CSV et sont assez brutes. **Un traitement avec Excel est possible mais il reste plus efficace de procéder avec du code (Python) pour obtenir des données « raffinées »;**
- des erreurs de comptage peuvent survenir notamment à cause de la perspective des vidéos. Des vidéos en plan (par drone) permettraient une analyse plus fiable.

Applicabilité :

- Le traitement logiciel peut être utilisé dans le cadre d'études selon les enjeux et les objectifs visés.
- **Il y a un intérêt à promouvoir ce type d'approche** au sein des bureaux spécialisés et des administrations publiques, pour les études complexes car elles permettent d'obtenir des résultats plus solides.
- **Un benchmark des logiciels existants serait utile** pour ne pas dépendre que d'un seul acteur (Logiroad) et mettre à disposition des bureaux une solution plus « clé en main » avec une bonne fiabilité et des résultats faciles à traiter sur Excel.
- La standardisation de l'acquisition vidéo par « drone captif » serait utile pour augmenter la fiabilité du traitement logiciel.

13.3.2 Existence de différentes méthodes utiles pour le calcul de capacité utilisée

Malgré leurs limitations, les méthodes par régression (TEA/VSS) sont utiles pour des résultats rapides et dans des situations peu saturées. En revanche elles devraient toujours être utilisées avec la demande exprimée, la demande en entrée ne permettant pas toujours de détecter une saturation.

La comptabilisation directe des gaps pour le giratoire étudié permet d'utiliser la méthode « déterministe », très pragmatique et compréhensible. Elle permet d'avoir une vision directe de la ressource en « gaps » permettant d'écouler les flux.

Les méthodes « gap acceptance » fonctionnent bien, que ce soit avec des paramètres standards ou contextualisés.

Applicabilité :

- **L'utilisation systématique de plusieurs méthodes devrait être recommandée**, sur le modèle du logiciel allemand Kreisel, qui permet d'avoir plus de recul sur les résultats et leur précision.
- **Une norme VSS utilisant la méthode « gap acceptance », jusqu'ici inconnue en Suisse, pourrait être développée**, sachant que la littérature est très fournie et que le HCM utilise cette méthode, ainsi que le HBS.
- La méthode déterministe pourrait également être utilisée, mais elle est plus expérimentale et la recherche ne permet pas de l'appliquer à un état théorique futur pour le moment. Il faudrait pour cela pouvoir estimer la distribution future des gaps en fonction des charges futures.

13.3.3 Sensibilité des calculs de capacité utilisée

Les variations de charges et les variations de valeurs des paramètres engendrent des variations de capacité d'écoulement et par là même, des variations de capacité utilisée. Il serait utile de **conseiller les utilisateurs en leur indiquant la « fourchette de confiance » qui accompagne un résultat.**

Applicabilité :

- Les estimations de sensibilité des résultats sont faciles à produire et pourraient être incluses dans une norme.
- L'intérêt est d'inciter à l'esprit critique et d'éviter l'effet « boîte noire ».

13.3.4 Intérêt des calculs dynamiques

Avec les comptages vidéo à l'aide d'un logiciel adapté, il est possible d'obtenir des flux chaque cinq minutes. Les méthodes théoriques peuvent donc être appliquées de façon dynamique, à la fois pour le calcul de la capacité d'écoulement et de la capacité utilisée. Il est également possible d'obtenir des estimations théoriques dynamiques des files d'attente. Les résultats obtenus sont plutôt convaincants lorsqu'il s'agit d'identifier les effets sur le réseau en cas d'hyperpointes.

Applicabilité :

- **L'accès aux données toutes les cinq minutes, leur utilisation dans les formules ainsi que la représentation graphique des résultats sont aisés.**
- La comparaison des files d'attente estimées avec les relevés in situ est moins évidente et dépend :
 - soit de calculs de stocks, qui sont aisés à obtenir mais demandent une bonne fiabilité;
 - soit d'observations du stock via une multiplication des caméras ou des drones, avec des complications fréquentes sur le terrain.

13.3.5 Influence du flux sortant sur la capacité utilisée

Le flux sortant n'est pas pris en compte dans la méthode VSS actuelle.

Dans les faits, le flux sortant peut être gênant, neutre ou aidant, en fonction de la géométrie mais surtout de la probabilité perçue par le conducteur que ce flux risque d'être un flux circulant ou pas.

On peut s'attendre à ce que les flux sortants « aidants » contribuent à diminuer les gaps moyens pour créer des gaps courts et des gaps longs. Cependant, la recherche n'a pas encore permis de montrer l'effet du rôle du flux sortant sur la distribution des gaps.

Applicabilité :

- Pour disposer de données suffisamment claires et contrastées permettant de quantifier l'effet du flux gênant sur le critical gap, il est recommandé d'établir des protocoles expérimentaux adaptés (en situation réelle ou en micro-simulation), au cours desquels les flux pourraient être bloqués ou libérés. L'effet sur la distribution des gaps et des critical gaps pourrait ainsi être mesuré.
- L'instauration d'un paramètre correctif en fonction du flux gênant dans les calculs de capacité utilisée pourrait être utile dans le cadre d'une normalisation des méthodes « gap acceptance ».

14 Présentation détaillée du cas de Bulle

14.1 Présentation du cas d'étude

14.1.1 Situation géographique et spécificités

Le giratoire étudié est situé en périphérie de la commune de Bulle, à la limite de la commune de Riaz, et à proximité de l'accès à l'autoroute.



Fig. 66 Situation géographique du giratoire de Bulle

Ce giratoire possède deux voies dans l'anneau et deux voies dans les branches d'entrée. Il ne présente pas de congestion dans l'anneau mais la circulation est tout de même dense. La circulation est peu gênée par les traversées piétonnes, et les carrefours voisins ne viennent pas impacter le giratoire.

14.1.2 Plan des voies et charges de trafic actuelles

Les charges de trafic directionnelles par branche (toutes voies confondues) montrent que les branches sud et ouest sont les plus chargées en entrée. L'étude se concentrera donc sur ces branches-ci.

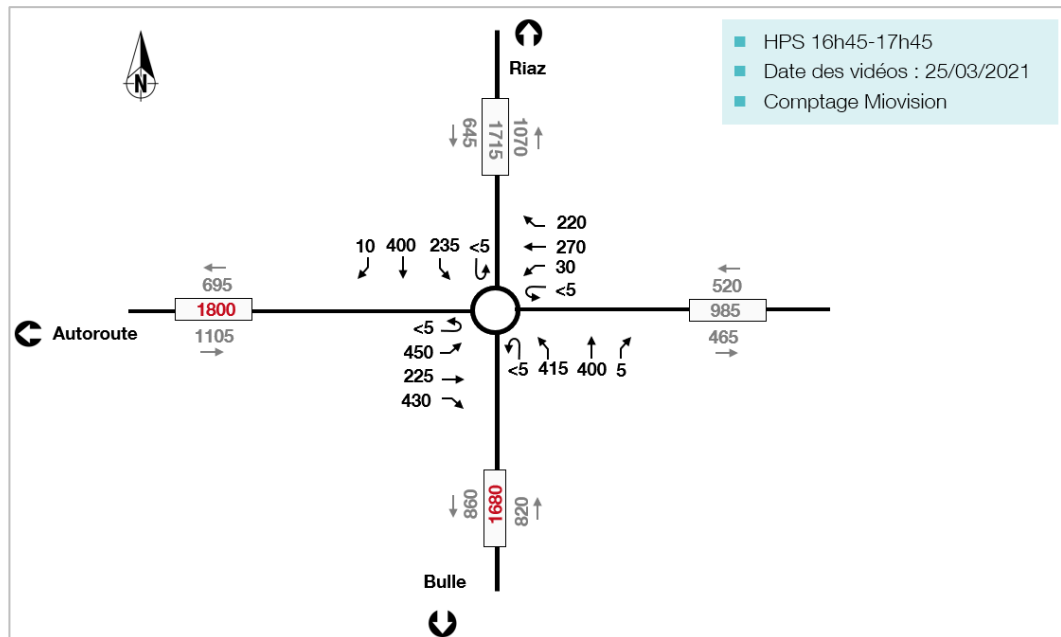


Fig. 67 Charges de trafic directionnelles à l'heure de pointe du soir (uv./h)

14.1.3 Objectifs de recherche pour le cas d'étude

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- définir une méthode de calcul de capacité compatible avec les giratoires à double voie dans l'anneau et comportant plusieurs voies d'entrée;
- mieux identifier le flux qui est gênant entre les différentes voies de l'anneau : le flux à l'anneau intérieur, le flux à l'anneau extérieur ou les deux;
- traiter chacune des voies d'insertion séparément pour identifier des comportements différents ou l'éventuelle gêne d'une voie sur l'autre.

14.2 Protocole expérimental

Les analyses prévues au cours de l'étude sont les suivantes :

- analyse des charges dynamiques en approche et des charges en entrée par voie;
- calcul des capacités d'écoulement selon différentes méthodes, en distinguant les différentes voies d'entrée;
- calcul des files d'attente dynamiques par voie avec les meilleures méthodes ciblées à l'étape précédente et comparaison avec les vidéos pour valider les résultats.

Des caméras ont été positionnées sur chaque branche tel qu'indiqué sur la figure ci-après, afin d'obtenir les différentes données nécessaires à l'analyse, à savoir :

- les charges en amont du giratoire: **demande exprimée**;
- les charge en entrée : **demande satisfaite**;
- les charges **par voie d'entrée**;
- les charges **à l'anneau par voie**;
- les **gaps acceptés/ rejetés** par les véhicules en entrée.

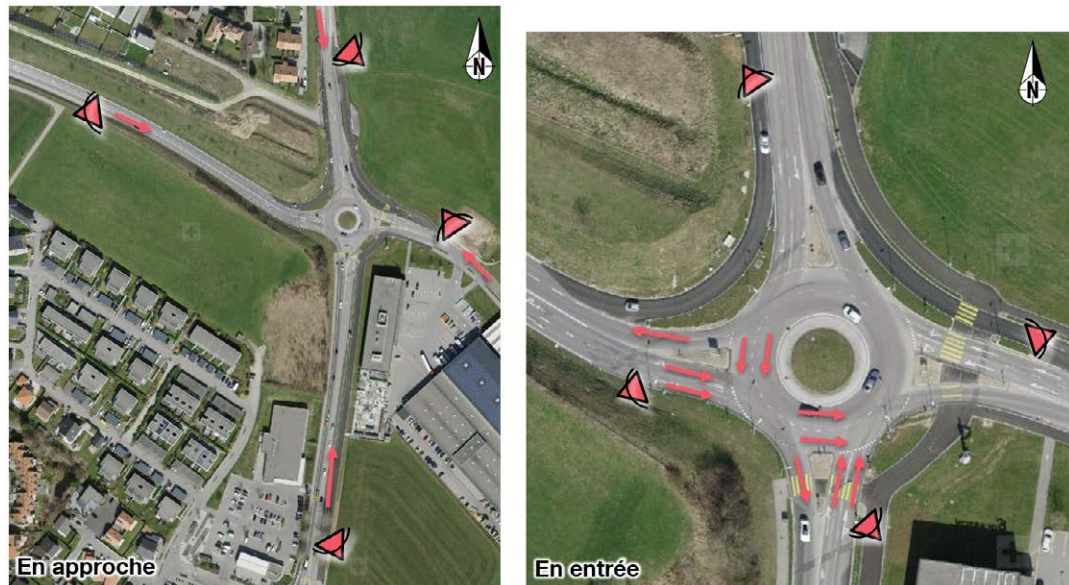


Fig. 68 Positionnement des caméras en approche et en entrée de giratoire

Les traitements vidéo ont été effectués à l'aide de deux logiciels différents afin de couvrir tous les besoins d'analyse :

- **Miovision**, qui permet d'obtenir des comptages directionnels;
- **Logiroad** avec lequel il est possible de compter les véhicules voie par voie et d'évaluer les gaps entre véhicules.

14.3 Analyses

14.3.1 Analyse des charges par voie pour les branches sud et ouest

A l'heure de pointe du soir, le plan de charge par voie permet de faire les constats suivants :

- **sur la branche sud, la charge est beaucoup plus importante sur l'anneau intérieur.** Les charges en entrée sont équivalentes sur les deux voies;
- **sur la branche ouest, la charge est plus importante sur l'anneau extérieur. En entrée, les charges ne sont pas réparties de manière égale** et la voie de gauche est plus chargée. Cela peut s'expliquer par le marquage au sol qui indique aux véhicules allant tout droit ou à gauche, de se positionner sur la file de gauche.

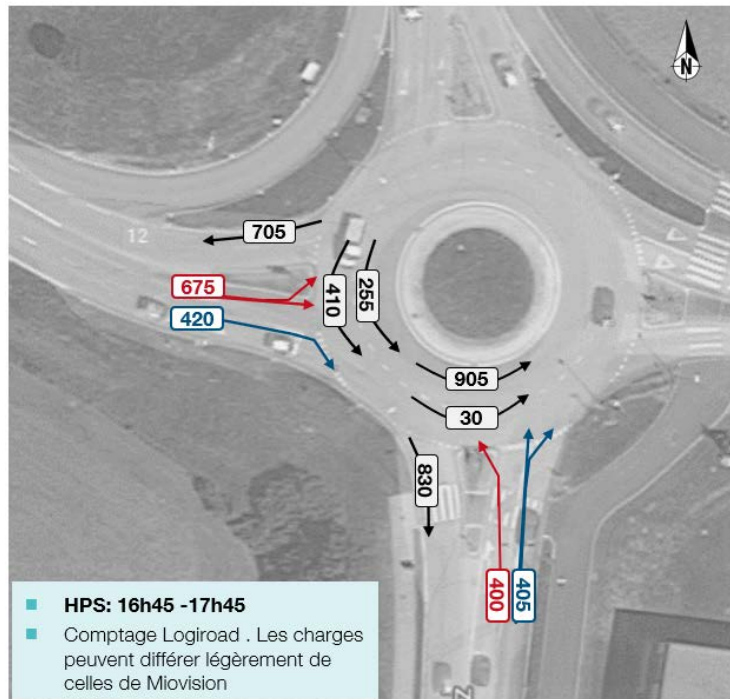


Fig. 69 Charges par voie sur les branches sud et ouest en heure de pointe du soir (uv./h)

Les déséquilibres de charge constatés soulèvent différentes questions et pourraient engendrer des dysfonctionnements dans la circulation du giratoire.

Sur la branche sud, les deux voies d'entrée sont également chargées et confrontées à un flux important à l'anneau. On peut se demander si **la gêne à l'insertion est** équivalente pour les deux voies et si les calculs de capacité utilisée peuvent répondre à cette question. Par ailleurs, comme les charges en entrée sont équilibrées entre les deux voies, on peut se demander **si une analyse de capacité voie par voie est nécessaire.**

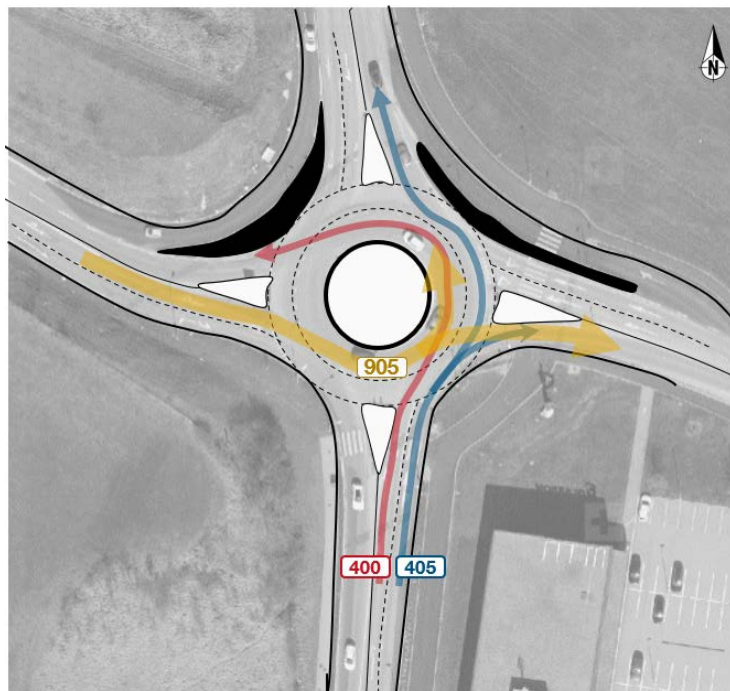


Fig. 70 Charges par voie et flux circulant à l'anneau pour la branche sud (uv./h)

Sur la branche ouest, la voie de droite devrait être principalement utilisée par les véhicules tournant à droite. Elle pourrait donc être gênée uniquement par le flux extérieur à l'anneau. La voie de gauche, en revanche, devrait être gênée par la totalité du flux à l'anneau, car elle devrait contenir majoritairement des véhicules allant tout droit ou à gauche.

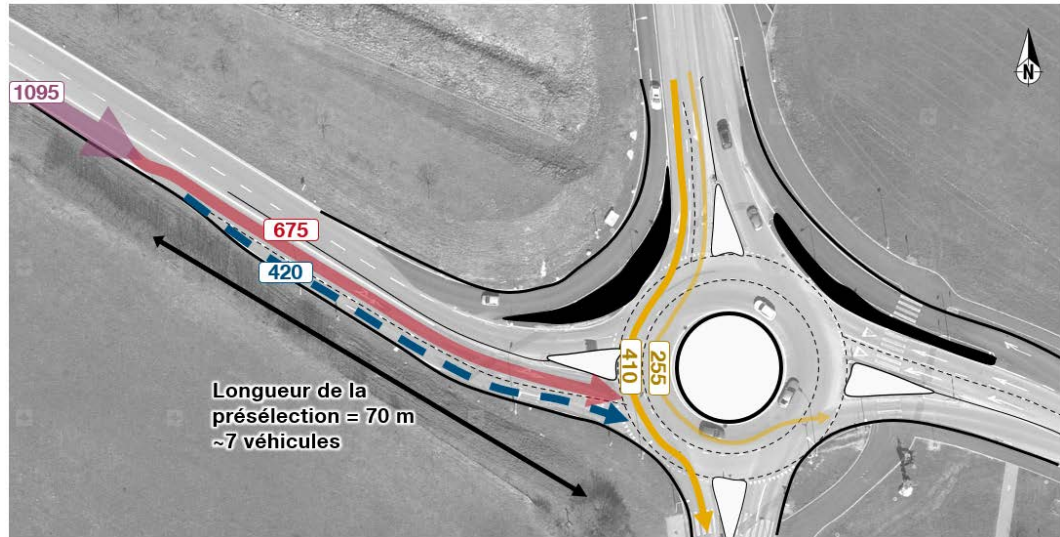


Fig. 71 Charges par voie et flux circulant à l'anneau pour la branche ouest (uv./h)

D'autre part, le déséquilibre de charges entre les voies d'entrées pourrait engendrer un phénomène de gêne d'une voie sur l'autre. En effet, la charge à gauche étant plus importante, une file a plus de chance d'apparaître. Si cette file dépasse la longueur des voies de présélection, alors, les véhicules souhaitant tourner à droite seront bloqués et ne pourront pas accéder à la voie de droite.

Ces hypothèses doivent être validées par des calculs de capacité et de files d'attente. Elles sont étudiées plus en détails dans la suite de l'étude.

14.3.2 Analyse détaillée du fonctionnement de la branche sud

Charges de trafic dynamiques par voie d'entrée

L'analyse des charges de trafic, avec une précision de cinq minutes permet de réaliser les observations suivantes :

- les charges des deux voies d'entrée ne sont pas tout le temps équivalentes au cours de la période. On observe une prédominance de la voie de droite ou de la voie de gauche selon les moments;
- la charge sur l'anneau intérieur fluctue mais reste globalement élevée sur toute la période.

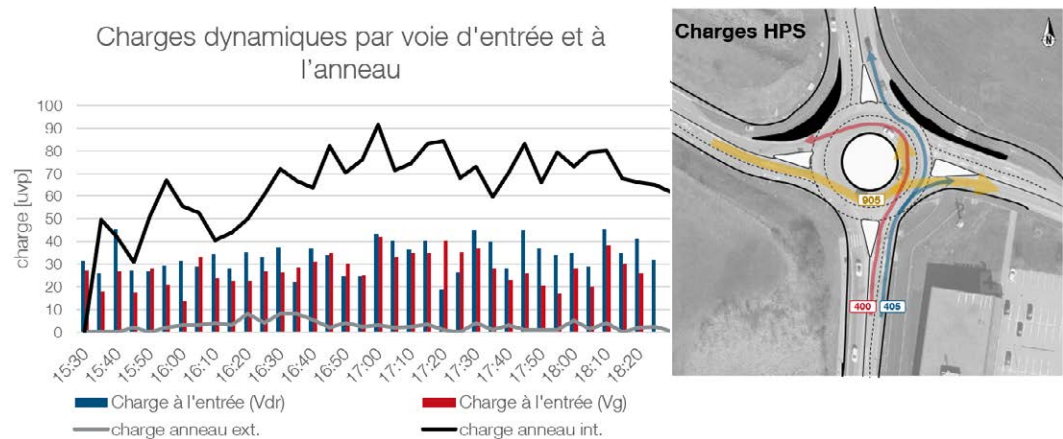


Fig. 72 Charges de trafic liées à la branche sud - précision de 5 minutes

Au regard de ces différences de charges dynamiques entre voie de gauche et voie de droite, on peut se demander si les capacités d'écoulement seront différentes entre ces deux voies.

Calcul de capacités utilisées

Les capacités utilisées de la branche sud dans son ensemble et de chaque voie d'entrée, ont été calculées en utilisant différentes méthodes de calcul.

Méthodes classiques

Le calcul par différentes méthodes classiques a été réalisé en utilisant la charge totale en entrée à l'heure.

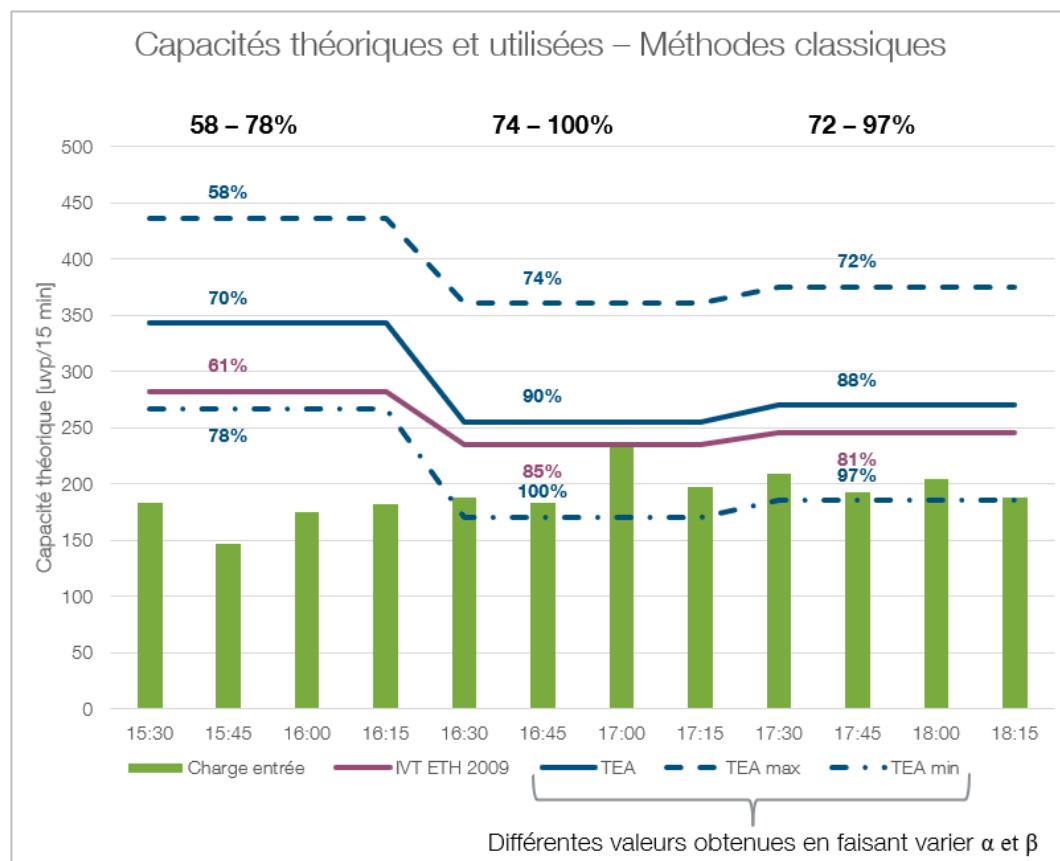


Fig. 73 Calcul de capacités théoriques par différentes méthodes classiques

Les résultats montrent des différences de capacité utilisées assez importantes entre les méthodes de calcul et il n'est pas possible de savoir quelle méthode est la plus pertinente. Dans l'ensemble, les valeurs de capacité utilisée indiquent que la situation est chargée mais pas saturée. Il est difficile de tirer plus de conclusions avec ces méthodes qui comportent différentes limitations :

- les résultats par voie d'entrée ne sont pas disponibles;
- ces méthodes ne sont pas prévues pour le calcul des capacités dynamiques (toutes les 5-10 min).

Une comparaison avec d'autres méthodes de calcul est nécessaire afin de combler ces limitations et de comparer les résultats obtenus.

Méthodes gap acceptance

Normalement, les méthodes gap acceptance (HBS et HCM) ne sont pas conçues pour calculer les capacités par voie d'entrée. Dans le contexte de l'étude, les calculs ont été adaptés afin d'obtenir cette distinction. Les charges et les paramètres utilisés pour le calcul sont les suivantes :

- pour **la demande**, on utilise la charge en approche répartie par voie au prorata des charges en entrée. La charge en approche est en effet considérée comme plus représentative de la demande réellement exprimée;
- pour le **flux gênant**, la charge totale à l'anneau est utilisée;

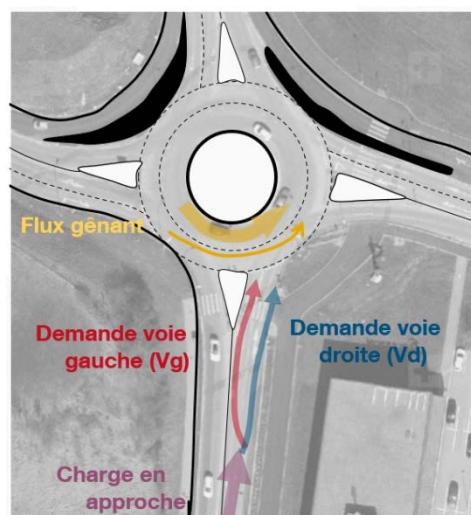


Fig. 74 Charges impliquées dans le calcul de capacité par voie avec les méthodes gap acceptance

- pour les **paramètres « critical gap »** et **« follow-up time »**, le calcul est réalisé avec les paramètres théoriques mais aussi avec des paramètres déduits de mesures des gaps entre véhicules sur le giratoire.

	Critical gap (s)		Follow-up time (s)	
	gauche	droite	gauche	droite
Valeurs théoriques HBS	4.1	4.1	2.9	2.9
Valeurs théoriques HCM	4.29	4.11	3.19	3.19
Valeurs mesurées	3.5	3.3	3.4	2.8

Fig. 75 Valeurs des paramètres « critical gap » et « follow-up time » utilisés dans les calculs de capacité

Les calculs ont été effectués avec une granularité de 15 minutes et sont présentés de la manière suivante :

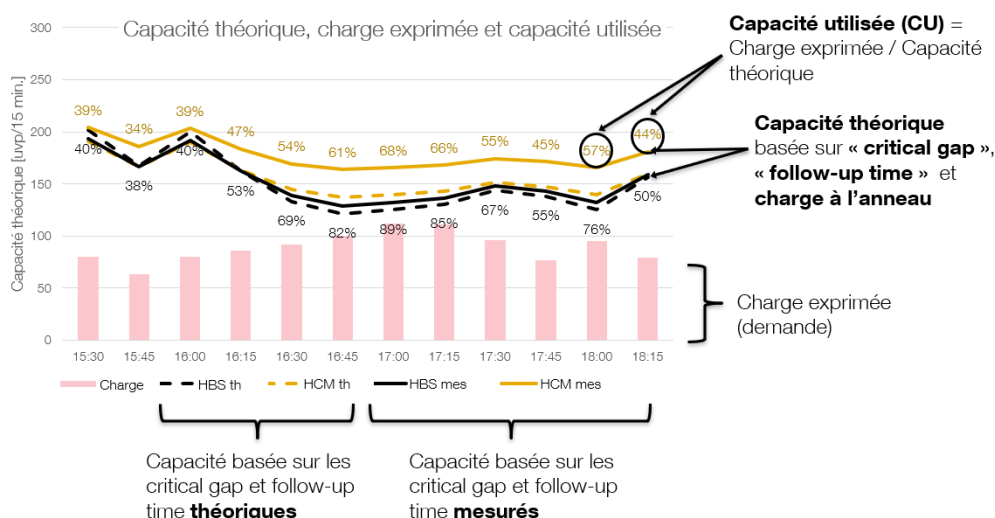


Fig. 76 Présentation des résultats de calculs de capacité et de capacité utilisée

La comparaison entre la voie de gauche et la voie de droite donne les résultats suivants :

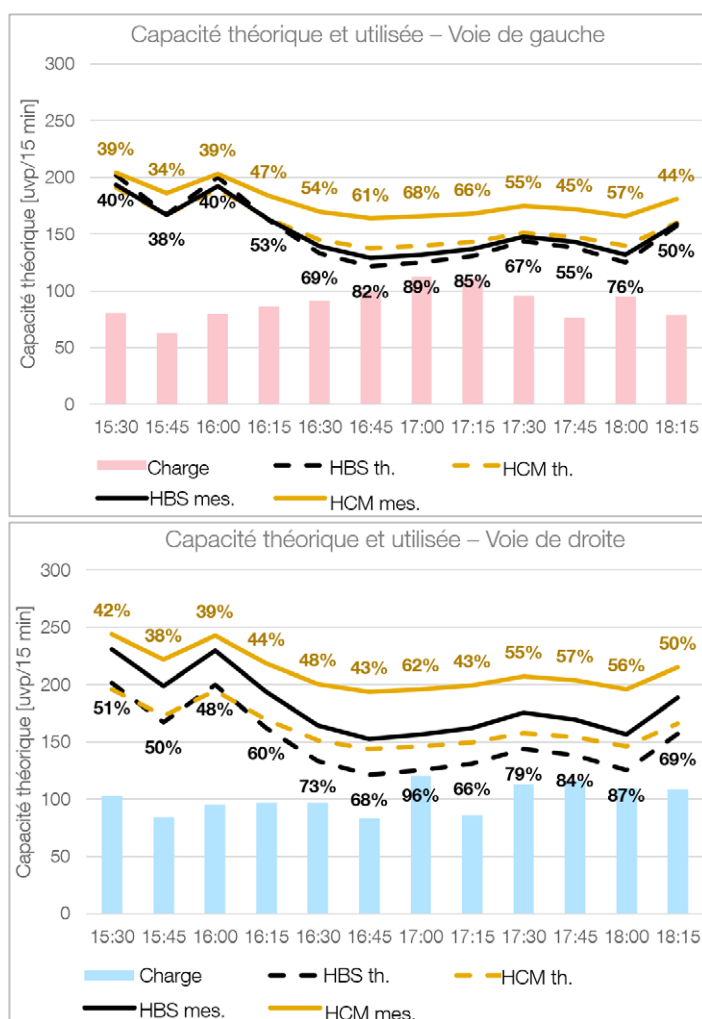


Fig. 77 Comparaison entre la capacité de la voie de gauche et celle de la voie de droite – branche sud

Les observations suivantes peuvent être faites :

- les capacités d'écoulement théoriques sont plus hautes en utilisant les paramètres gap acceptances et follow-up time mesurés;
- les capacités théoriques diminuent entre 16h30-17h15, quelle que soit la méthode, car les flux dans l'anneau augmentent (voir figures précédentes). Par conséquent, la capacité utilisée augmente. **Elle est à son maximum vers 17h avec 96% sur la voie de droite et 89% sur la voie de gauche;**
- les deux voies montrent des charges, des capacités théoriques et des capacités utilisées similaires.

Afin de savoir si ces résultats sont fiables et d'identifier le calcul le plus pertinent, une comparaison avec les observations de terrain a été réalisée.

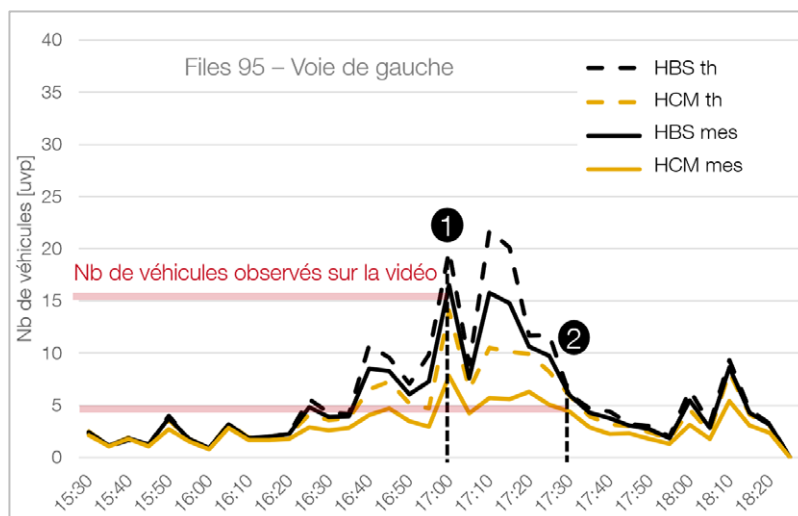


Fig. 78 Observations vidéo du trafic en approche du giratoire sur la branche sud

Vers 17h, les vidéos montrent la formation d'une file un peu plus marquée en approche du giratoire. Il n'est cependant pas possible d'en déduire la capacité utilisée réelle, ni la méthode de calcul la plus pertinente. Des indicateurs plus comparables avec la réalité doivent être utilisés afin d'effectuer ce calibrage.

Calibrage à l'aide du calcul de files d'attente et de la capacité utilisée déterministe

Les files d'attente 95% ont été calculées par voie à l'aide des méthodes gap acceptance, puis comparées avec les observations sur les vidéos.



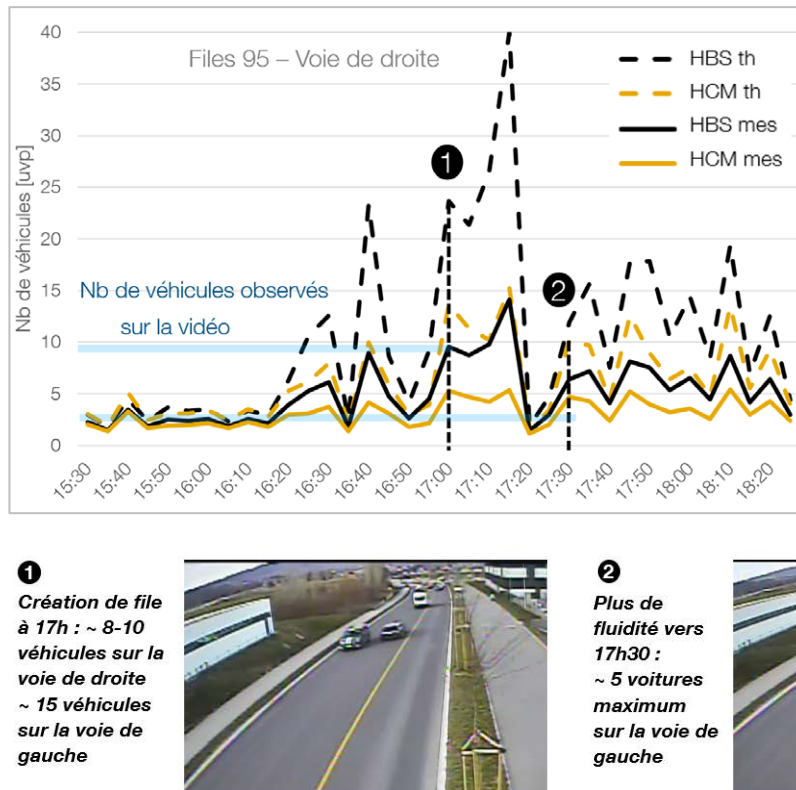


Fig. 79 Files d'attente théoriques comparées aux observations vidéo - approche du giratoire sur la branche sud

Les files calculées avec les paramètres mesurés sont cohérentes avec la réalité observée sur les vidéos, que ce soit avec la méthode HBS ou HCM. En revanche, la méthode HBS utilisant les valeurs théoriques semble largement surestimer les files, surtout pour la voie de droite. Ces conclusions doivent tout de même être nuancées car la répartition des véhicules entre la file de gauche et la file de droite est assez difficile à observer. En effet, la faible résolution et la distance entre la caméra et l'entrée du giratoire ne permettent pas un comptage précis.

Afin de valider quelle méthode de calcul est la meilleure, un autre indicateur a été utilisé : la capacité utilisée déterministe.² Cette méthode de calcul étant basée sur une mesure des gaps réellement utilisés par les véhicules sur le giratoire étudié, on considère qu'elle devrait donner des résultats proches de la réalité. La capacité utilisée déterministe a été calculée pour la voie de droite, qui est la plus chargée, avec les résultats suivants :

² Voir le paragraphe 5.4 pour les principes de la méthode déterministe et le processus de détermination de la capacité utilisée.

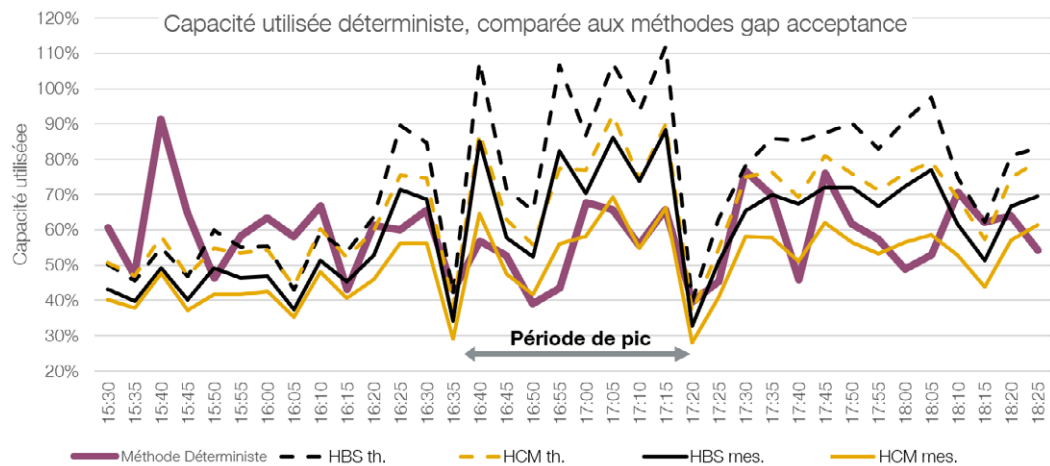


Fig. 80 Capacité utilisée déterministe comparée aux méthodes gap acceptance

La capacité utilisée HBS calculée avec les paramètres mesurés est proche de la capacité utilisée déterministe, mais uniquement pendant la période de pic de trafic (16h40-17h20). En dehors de l'heure de pointe, elle donne des valeurs de capacité utilisée plus faibles que la méthode déterministe, ce qui signifie qu'elle surestime la capacité théorique. Cette différence pourrait s'expliquer par l'hypothèse suivante : **le critical gap et le follow-up time sont considérés comme constants dans les calculs HBS et HCM alors que dans la réalité, ces paramètres doivent varier selon l'état du trafic.** En effet, le conducteur adapte certainement son comportement en fonction de la circulation et acceptera des gaps plus petits si la charge à l'anneau est très importante. Ces hypothèses devront bien sûr être vérifiées dans le cadre d'une recherche dédiée.

14.3.3 Enseignements à retenir pour la branche sud

- Les deux voies d'entrée présentent des charges statiques similaires. Les calculs de capacité utilisée et de files d'attente ont montré que les deux voies présentaient des comportements proches. **L'analyse voie par voie n'est peut-être donc pas indispensable en cas de charges symétriques.**
- Les estimations de capacité utilisée avec les méthodes gap acceptance semblent donner des résultats plus proches de la réalité en utilisant les paramètres « **critical gap** » et « **follow-up time** » mesurés pour le giratoire étudié.
- Le calcul de files permet une comparaison de la théorie avec la réalité et donc un calibrage. Cependant, le nombre de véhicules dans une file est difficile à confirmer sur une vidéo si la résolution est trop basse ou les distances trop importantes. L'utilisation de drones permettrait d'obtenir de meilleures estimations.
- **La méthode déterministe aide à identifier la meilleure formule gap acceptance en heure de pointe** (calibrage).
- **Les calculs gap acceptance devraient utiliser des valeurs de paramètres « follow-up time » et « critical gap » variant selon le niveau de trafic.** Cela permettrait de refléter l'adaptation – observée – des comportements des automobilistes, de façon à ne pas surestimer la saturation.

14.3.4 Analyse détaillée du fonctionnement de la branche ouest

Pour rappel, la branche ouest présente un déséquilibre des charges entre les deux files d'entrée.

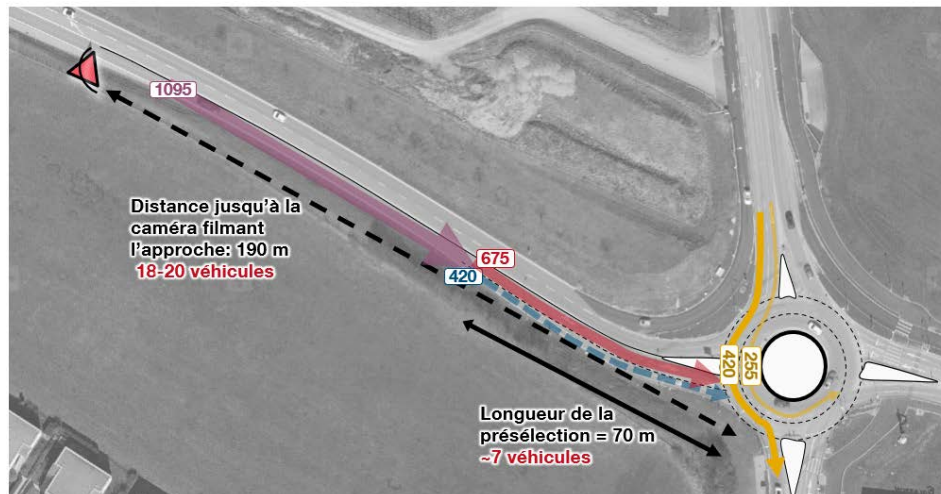


Fig. 81 Répartition des charges sur la branche ouest et longueurs de présélection

Les objectifs de l'étude de cette branche sont les suivants :

- vérifier si la voie de droite est gênée par la totalité de la charge à l'anneau ou juste par une partie de cette charge;
- identifier la formation potentielle d'une file sur la voie de gauche et vérifier si cette file peut gêner la voie de droite (longueur de file plus longue que la présélection);
- déterminer si ces phénomènes ont un impact sur le calcul de capacité utilisée.

Charges de trafic dynamiques par voie d'entrée

L'analyse des charges aux cinq minutes montre que la voie de gauche est nettement plus chargée que la voie de droite sur toute la période. La charge globale fluctue avec des périodes de pics et de creux. Cela peut être dû à des blocages intermittents du giratoire de la jonction autoroutière située en amont du giratoire étudié. La charge à l'anneau est en revanche plutôt constante, à l'exception d'une augmentation entre 16h30 et 16h50.

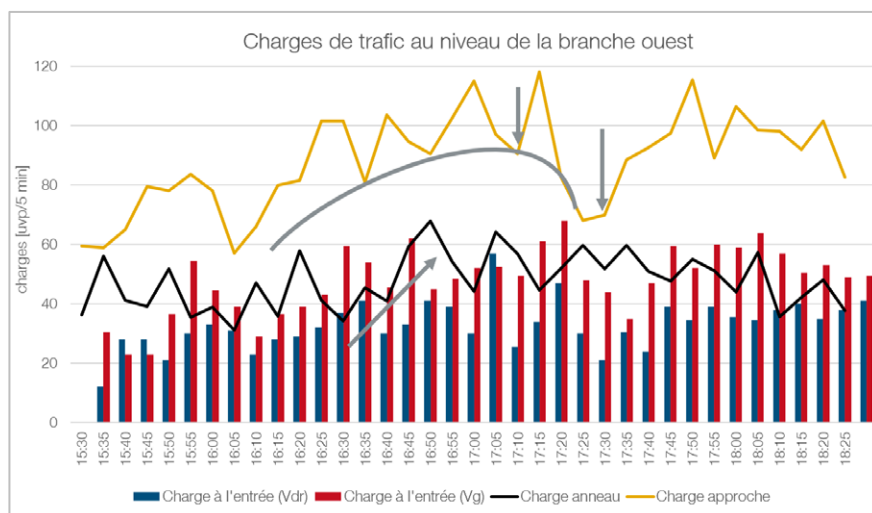


Fig. 82 Charges de trafic dynamiques liées à la branche ouest – comparaison entre les deux voies d'entrée

Calculs de capacités utilisées

L'étude de la branche sud ayant montré que les méthodes gap acceptance donnaient des résultats plus pertinents que les méthodes classiques, seules les méthodes gap

acceptance ont été utilisées pour la branche ouest. De la même manière, les calculs ont été effectués avec les méthodes HBS et HCM, en utilisant les paramètres « critical gap » et « follow-up time » théoriques et mesurés.

Les graphiques ci-dessous donnent la capacité théorique de chaque voie pour les différents calculs, ainsi que les charges et les capacités utilisées minimum et maximum.

Les calculs ont été effectués avec les données d'entrée suivantes : la charge exprimée en approche par voie et la charge totale à l'anneau.

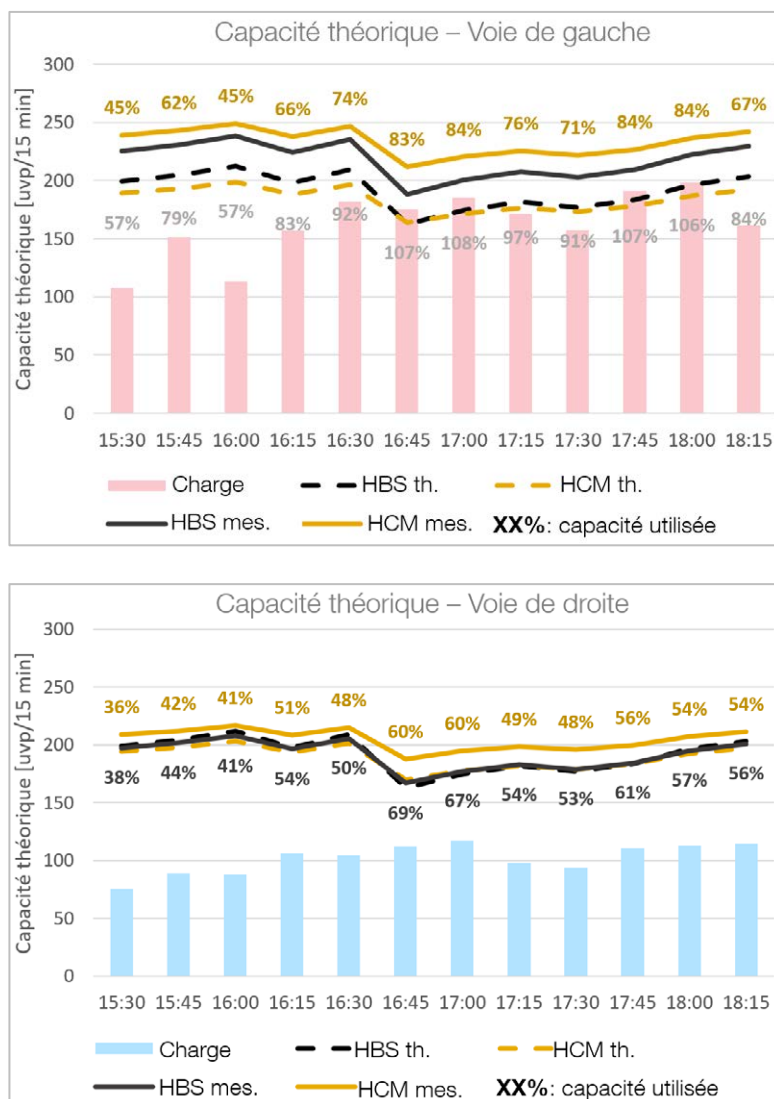


Fig. 83 Comparaison entre la capacité de la voie de gauche et celle de la voie de droite – branche ouest

La comparaison des deux voies permet d'effectuer les observations suivantes :

- les capacités d'écoulement théoriques sont assez proches mais sont légèrement plus élevées sur la voie de gauche. La charge étant plus importante sur la voie de gauche, la capacité utilisée est par conséquent plus haute sur cette voie;
- La variabilité des résultats entre les méthodes de calcul est moindre pour la voie de droite pour laquelle les charges sont plus faibles.

Afin de vérifier quelle méthode est la plus proche de la réalité, les files d'attente et la capacité utilisée déterministe ont été calculées.

Calibrage à l'aide du calcul de capacité utilisée déterministe

La capacité utilisée par la méthode déterministe³ a été calculée pour les deux voies d'entrée. On considère que cette méthode est la plus proche de la réalité pour les calculs de capacité utilisée, car les résultats sont basés sur une mesure des gaps entre véhicules sur le giratoire étudié.

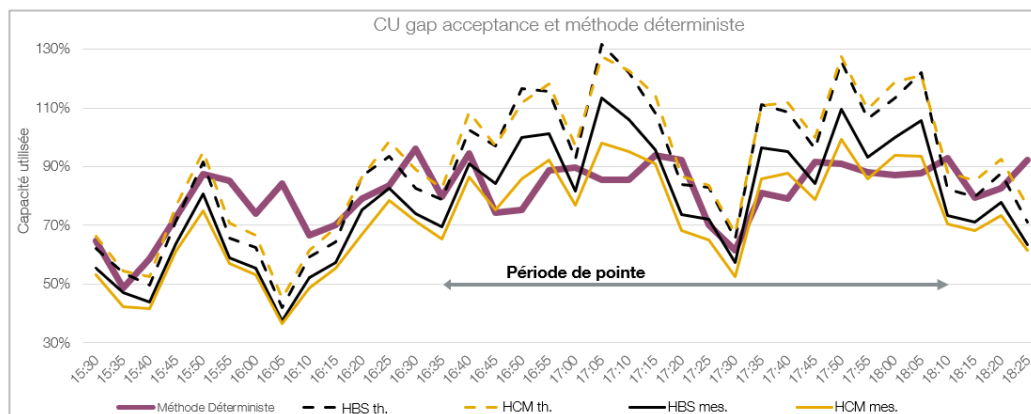


Fig. 84 Capacité utilisée déterministe comparée aux résultats des méthodes gap acceptance – Voie de gauche

Sur la voie de gauche, en période de pointe, c'est la méthode « HCM avec valeurs mesurées » qui est la plus proche de la méthode déterministe. En dehors de l'heure de pointe, elle donne des valeurs de capacité utilisée plus faibles que la méthode déterministe. On a donc le même phénomène que pour la branche sud. Il pourrait être expliqué par l'hypothèse suivante : les paramètres « critical gap » et « follow-up time » ne sont pas constants et varient selon le niveau de trafic car le conducteur adapte son comportement selon la situation.

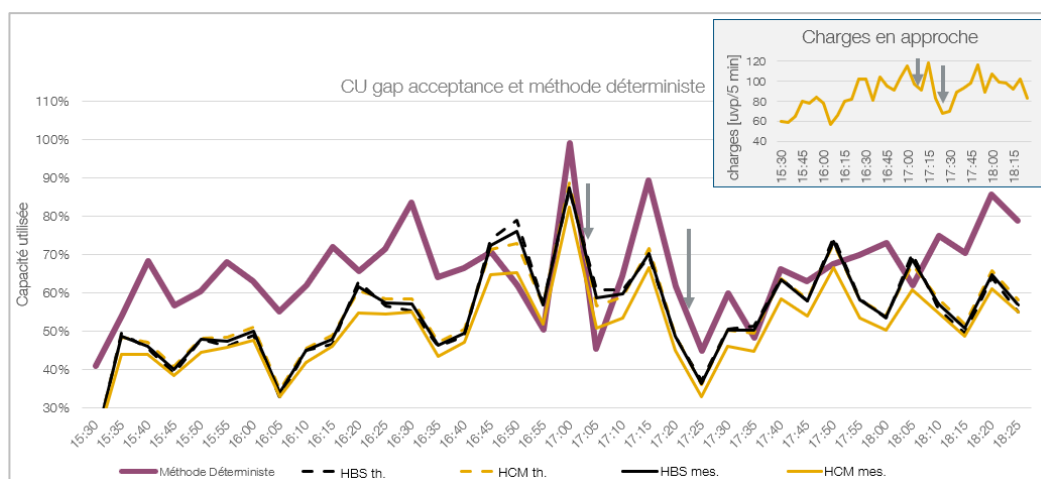


Fig. 85 Capacité utilisée déterministe comparée aux résultats des méthodes gap acceptance – Voie de droite

Pour la voie de droite, la comparaison est moins pertinente car les calculs gap acceptance donnent des résultats assez proches. On remarque tout de même que les méthodes gap acceptance semblent sous-estimer la capacité utilisée.

Des pics de capacité utilisée sont observés vers 17h et 17h15, suivis de creux. Cela suit les pics de charge en approche et en entrée observés sur les graphiques précédents. Les

³ Voir le paragraphe 5.4 pour les principes de la méthode déterministe et le processus de détermination de la capacité utilisée.

creux peuvent être dus à un blocage ponctuel de l'approche au niveau du giratoire de la jonction autoroutière. Cette **saturation en amont semble donc créer un soulagement en aval**.

Capacité utilisée de la voie de droite – part du flux gênant à l'anneau

La capacité utilisée déterministe a été utilisée pour effectuer un calibrage concernant la part du flux gênant à considérer à l'anneau.

La capacité utilisée a été calculée avec la méthode « HBS – paramètres mesurés », en considérant deux valeurs différentes du flux gênant :

- flux gênant correspondant au total du flux à l'anneau;
- flux gênant correspondant au flux de l'anneau extérieur uniquement.

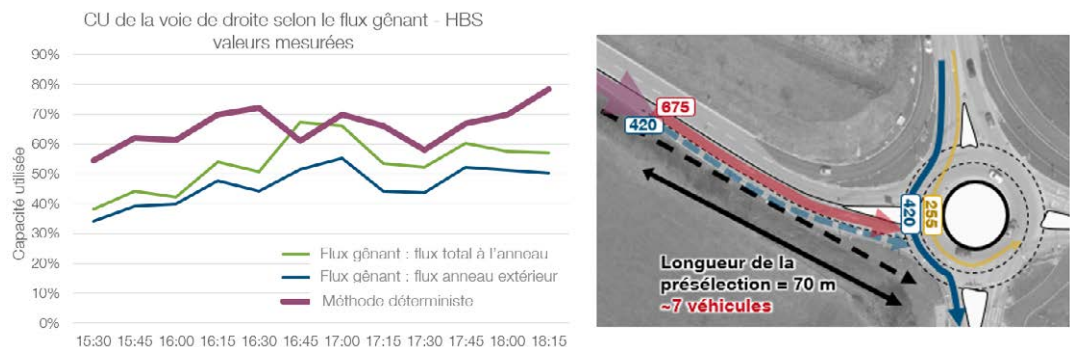


Fig. 86 Calculs de capacité utilisée avec différentes parts du flux à l'anneau

L'analyse du graphique montre que la capacité utilisée calculée avec la charge totale à l'anneau donne des résultats plus proches de la méthode déterministe en heure de pointe. A première vue, la gêne semble donc être provoquée par les deux voies de l'anneau. Cette hypothèse a été confrontée aux vidéos filmées autour de 17h, en observant le comportement des conducteurs en entrée sur la voie de droite. Sur les images suivantes extraites des vidéos, les véhicules en entrée de giratoire sont entourés en bleu, les véhicules pouvant gêner l'insertion en rouge et les véhicules « aidant » en vert. Les constats suivants peuvent être faits :

- la plupart du temps, quand des véhicules circulent sur l'anneau intérieur, les conducteurs en entrée hésitent à s'insérer dans le giratoire (image 1);
- certains conducteurs s'insèrent même si un véhicule est présent sur l'anneau intérieur, s'il est clair qu'il tourne à gauche (image 2);
- les véhicules sur la voie de gauche peuvent parfois aider les véhicules de la voie de droite à s'insérer en créant une « protection » : quand le véhicule sur la voie de gauche s'insère, le véhicule sur la voie de droite peut s'insérer en parallèle sans craindre aucun risque de collision (image 3). L'effet de protection est encore plus important quand le véhicule « aidant » est de grande dimension.



Fig. 87 – Observation de l'effet gênant du flux de l'anneau intérieur sur l'insertion*Fig. 88 Observation d'un cas où le flux de l'anneau intérieur ne gêne pas l'insertion**Fig. 89 Observation de l'effet protecteur des véhicules sur la voie de gauche*

L'observation du comportement des conducteurs révèle que dans la plupart des cas, la charge sur l'anneau intérieur constitue une gêne pour les véhicules en entrée car elle provoque une hésitation. Ce constat ne correspond pas aux hypothèses de départ mais il est cohérent avec l'analyse comparative des calculs de capacité utilisée précédente.

Ainsi, le flux gênant pourrait être la somme de la charge totale sur l'anneau extérieur et d'une partie seulement de la charge sur l'anneau intérieur. À savoir :

- toute la charge de l'anneau intérieur pour les véhicules sortant en tout-droit;
- une partie seulement de la charge pour les véhicules sortant en tourner-à-gauche.

Cette hypothèse ainsi que la part du flux intérieur gênant devront être validés grâce à des recherches ultérieures.

Par ailleurs, il est intéressant de constater que **la charge de la voie gauche aide les conducteurs de la voie de droite à s'insérer**. Ce constat ouvre des pistes de réflexion pour agir sur le fonctionnement d'un giratoire. Dans le cas d'un giratoire présentant un écoulement difficile sur la voie de droite, on pourrait inciter les automobilistes allant tout droit à se positionner à gauche : pour la voie de droite, cela permet à la fois une diminution de la charge ainsi qu'une insertion plus aisée.

Analyse des stocks et des files d'attente – effet de gêne d'une voie sur l'autre

Afin de comprendre l'effet potentiel de gêne d'une voirie sur l'autre, les longueurs de files doivent être calculées, en particulier pour la voie de gauche. D'après des mesures sur image aérienne, et en prenant l'hypothèse que chaque véhicule occupe 10 m dans la file

(véhicules et distance inter-véhiculaire), la longueur de file maximale dans la présélection est estimée à sept véhicules.

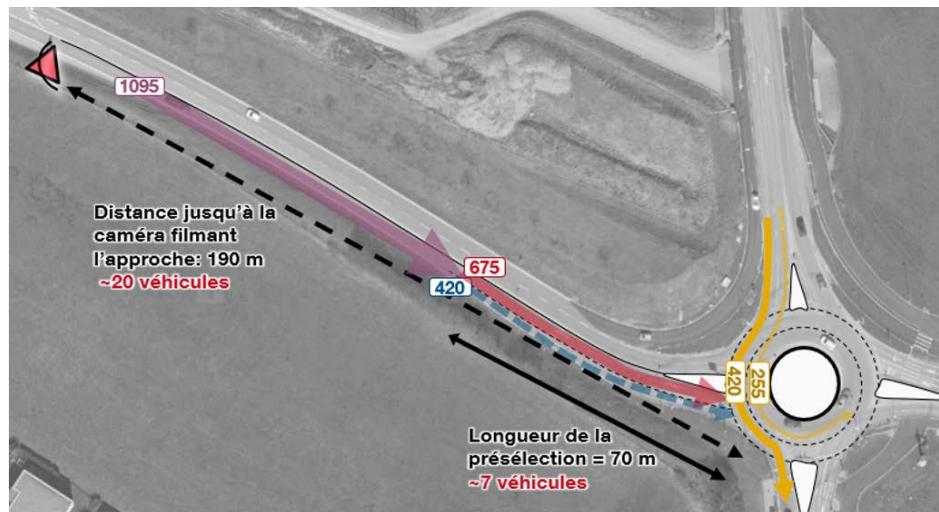


Fig. 90 Longueur des présélections et de l'approche sur la branche ouest

Le calcul des files 95 sur la voie de gauche, basé sur les méthodes gap acceptance donne les résultats suivants :

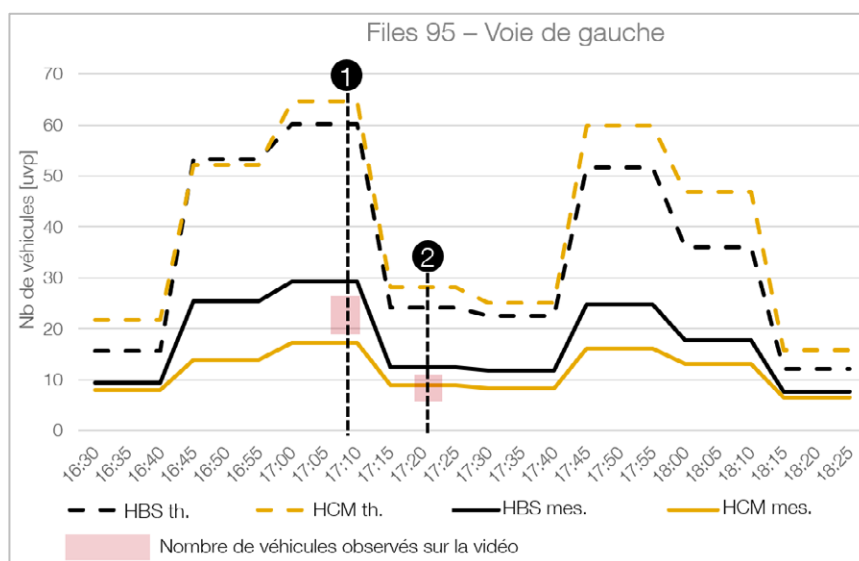


Fig. 91 Calcul de File 95%, méthode « gap acceptance » - Voie de gauche

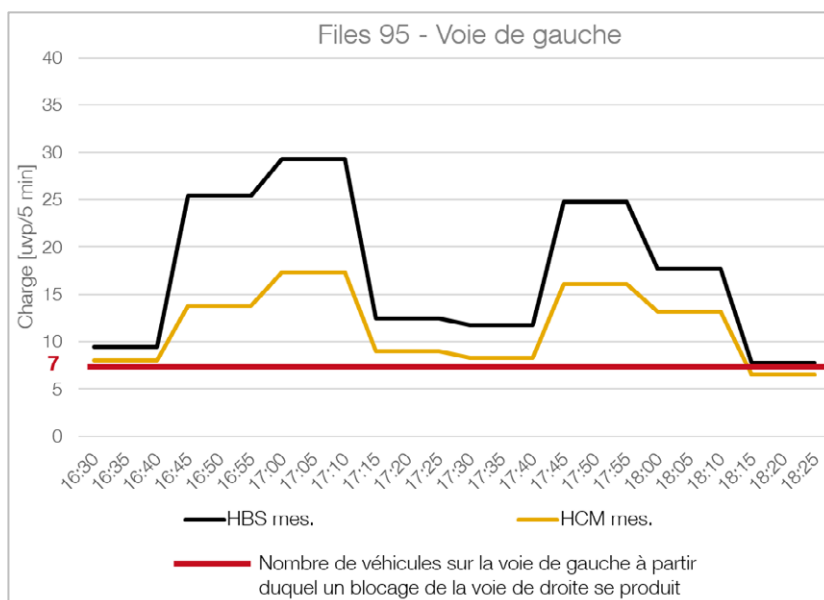
Selon les différents calculs, les files pourraient atteindre soit 17, soit près de 60 véhicules. Il y a donc une importante disparité des résultats qui doivent être comparés à la réalité du terrain pour connaître le calcul le plus proche de la réalité.

Afin d'observer les files sur la totalité de leur longueur, les vidéos d'approche du giratoire ont été analysées. La caméra d'approche étant éloignée du giratoire (~200 m), il n'est pas possible de compter tous les véhicules de manière précise. En revanche, on peut estimer qu'une file remontant jusqu'à la deuxième caméra devrait contenir environ 20 à 25 véhicules. C'est le cas vers 17h10 (voir image 1 ci-dessous). En revanche, à 17h23, les files sont beaucoup plus courtes avec un maximum de 10 véhicules (peu visibles sur la vidéo).

① Création de file à 17h10 > 20-25 véhicules**② Files plus courtes à 17h23 – max. 10 véhicules****Fig. 92 Observation des files sur la branche ouest**

En comparant ces observations aux résultats théoriques, il apparaît que les calculs basés sur les paramètres mesurés sont beaucoup plus proches de la réalité. Les calculs avec paramètres théoriques ont donc été écartés pour la suite de l'étude.

A partir de sept véhicules sur la voie de gauche, la présélection devrait être remplie et un blocage de la file de droite devrait se produire. Le graphique ci-dessous montre que c'est le cas sur toute la période étudiée avec des files comprises entre sept et trente véhicules.

**Fig. 93 Estimation de la longueur de file (en nombre de véhicules) à partir de laquelle un blocage se produit**

Si la voie de droite est bloquée, cela signifie qu'une partie des véhicules voulant aller à droite sont forcés de se positionner à gauche. La file de gauche contient donc plus de véhicules que la charge considérée dans le calcul initial. Le calcul initial a en effet été effectué comme si les présélections étaient infinies et qu'il n'y avait pas de file commune. Le calcul de file pour la voie de gauche devrait donc être adapté pour refléter le phénomène de blocage.

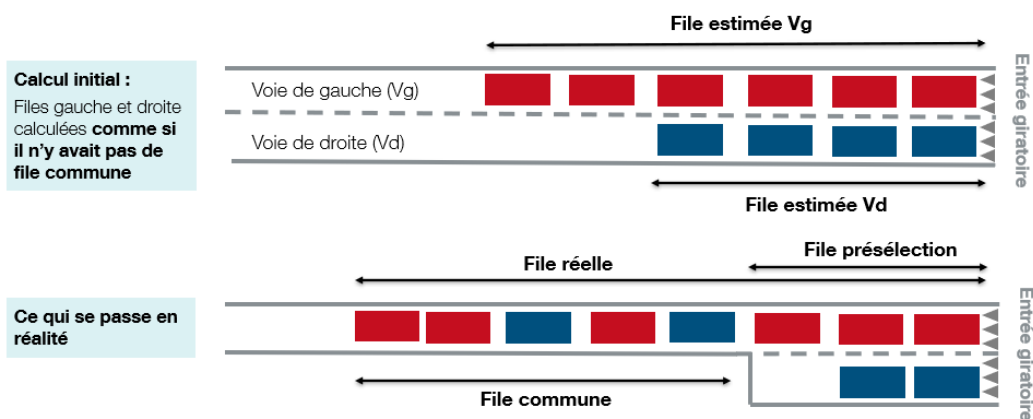


Fig. 94 Répartition des véhicules sur les voies de présélection et sur la voie commune en cas de blocage

D'après les schémas ci-dessus, dans la file commune, le ratio de véhicules souhaitant aller à gauche (r_g) est le suivant : $r_g = \frac{\text{Charge Vg}}{\text{Charge Approche}}$, soit en considérant les charges réelles du giratoire étudié, $\frac{675}{1095} = 0.62$.

Une formule adaptée aux cas de blocage peut ainsi être déduite :

Calcul de la « file réelle » adaptée aux cas de blocage :

$$\text{File réelle} = \text{File présélection} + \frac{1}{r_g} \times (\text{File estimée Vg} - \text{File présélection})$$

Cette formule a été appliquée à la branche ouest et les résultats comparés avec les calculs initiaux :

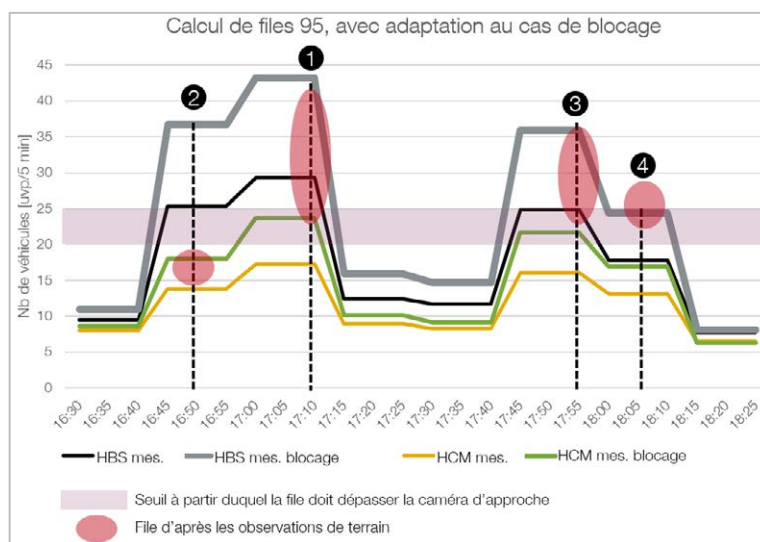


Fig. 95 Calcul de file d'attente réajusté en tenant compte du blocage d'une voie sur l'autre

Les observations vidéo permettent ensuite de définir quel calcul est le plus proche de la réalité.

- ❶ 17h10 : la file atteint la caméra et les véhicules sont à l'arrêt → la file dépasse largement la caméra : >> 25 véhicules → courbe noire ou grise



- ❷ 16h50 : les files ne remontent pas jusqu'à la caméra → < 20 véhicules → courbe verte ou jaune



- ❸ 17h55 : la file atteint la caméra et les véhicules sont très ralentis → la file dépasse largement la caméra : >> 25 véhicules → courbe grise



- ❹ 18h06 : les files remontent jusqu'à la caméra → courbe grise



Fig. 96 Observations vidéo des files d'attente sur la branche ouest et comparaison avec les résultats des calculs théoriques adaptés aux cas de blocage

Les comparaisons entre théorie et réalité permettent d'établir les constats suivants :

- le calcul avec HBS adapté aux situations de blocage semble plus proche de la réalité la plupart du temps. Il semble donc pertinent de prendre en compte la gêne d'une voie sur l'autre dans le calcul de file (nouveau par rapport à la norme VSS actuelle). Néanmoins, il est important de noter que les résultats du calcul adapté peuvent varier selon la place occupée par un véhicule dans la présélection et dans la file commune. L'hypothèse de la place occupée doit donc être réalisée avec soin;
- la file dépasse la deuxième caméra entre 17h et 17h15 puis entre 17h45 et 18h. Cela est cohérent avec la théorie HBS adaptée mais il n'est pas possible de vérifier la longueur totale de la file.

14.3.5 Enseignements à retenir pour la branche ouest

- Plus la charge en approche du giratoire est importante, plus les écarts de capacité utilisée sont importants entre méthodes de calcul.
- **La charge à l'anneau influence l'insertion des véhicules de la voie de droite de la manière suivante :**
 - **le flux extérieur de l'anneau est gênant en permanence;**
 - **le flux intérieur en tourner-à-gauche (hors conflit) est partiellement gênant** et ne doit pas compter pleinement dans le flux gênant, au risque de surestimer la capacité utilisée. Cette hypothèse devra être confirmée par des travaux de recherche dédiés.
- **Si les deux voies d'entrée sont bien chargées, la voie de gauche protège la voie de droite et l'aide à s'écouler.** Cet effet positif devra être chiffré plus précisément dans de futures recherches.
- **En cas de blocage d'une voie sur l'autre, le calcul de remontée de file doit être adapté afin de ne pas sous-estimer les longueurs.**

14.4 Synthèse des enseignements

14.4.1 Particularités liées à l'étude d'un giratoire à plusieurs voies

Calculs par voie d'entrée

Quand un giratoire possède plusieurs voies d'entrée, il peut être pertinent d'effectuer les calculs de capacité utilisée et de file d'attente **voie par voie**. L'intérêt de ce calcul dépend de la répartition des charges entre les voies d'entrée :

- **si les charges des différentes voies d'entrée sont équivalentes, le calcul voie par voie n'est pas vraiment nécessaire** car il apportera peu d'informations supplémentaires par rapport à un calcul pour la branche;
- **si les charges des différentes voies sont déséquilibrées, le calcul voie par voie est pertinent** car les capacités utilisées et les longueurs de files seront elles aussi différentes.

Le calcul de file voie par voie permet de vérifier si l'on a un phénomène de blocage d'une voie sur l'autre. En effet, une fois qu'une file de présélection est remplie, cela peut bloquer l'accès à l'autre file. Dans ce cas, les calculs de longueur de file et de capacité utilisée doivent être adaptés pour la file bloquante afin de ne pas sous-estimer les valeurs.

Influence partielle de la charge à l'anneau

Dans le cas d'un anneau à plusieurs voies, le flux se répartie entre l'anneau intérieur et l'anneau extérieur selon la sortie visée par les véhicules. **Les véhicules en entrée qui souhaitent sortir à droite ne semblent être gênés que par une partie du flux à l'anneau :**

- **la totalité du flux de l'anneau extérieur;**
- **seulement une partie du flux de l'anneau intérieur.** En effet, seuls les véhicules empruntant la même sortie que le véhicule en entrée sont systématiquement gênants. Les autres véhicules sont moins gênants car ils ne peuvent pas générer de conflit. Cependant, ils peuvent faire hésiter le véhicule en entrée.

Ces tendances devraient être précisées par des travaux de recherche dédiés.

14.4.2 Calibrage des calculs de capacité utilisée

Il est important de réaliser les calculs de capacité utilisée en appliquant différentes méthodes en parallèle et en faisant varier les valeurs des paramètres utilisés. Les méthodes gap acceptance apportent des informations supplémentaires par rapport aux méthodes classiques car elles permettent d'avoir des résultats plus dynamiques (calculs aux cinq ou quinze minutes).

Afin de valider la fiabilité des résultats et d'identifier la méthode la plus pertinente, il est utile de comparer les valeurs théoriques avec la réalité observée sur le terrain. Pour cela, plusieurs possibilités existent :

- **comparaison des files d'attente théoriques** (en utilisant les mêmes méthodes que pour la capacité utilisée), **avec les files réelles observées sur les vidéos.** Pour les méthodes gap acceptance, l'étude a montré que les résultats basés sur des « critical gap » et « follow-up time » mesurés localement, sont généralement plus proches de la réalité;
- **comparaison des capacités utilisées théoriques (gap acceptance) avec la capacité utilisée déterministe** qui est basée sur la mesure des gaps acceptés ou refusés par les véhicules en entrée de giratoire. Cette comparaison est surtout pertinente en période de pointe. En période creuse, les valeurs de capacités utilisées calculées avec la méthode déterministe et avec les méthodes gap acceptance s'éloignent. Cela pourrait s'expliquer de la manière suivante : les paramètres critical gap et follow-up time ne sont pas constants mais varient selon le niveau de trafic car le comportement du conducteur change selon les conditions de conduite.

15 Présentation détaillée du cas de Bussigny

15.1 Présentation du cas d'étude

15.1.1 Situation géographique et spécificités

Le cas étudié est situé sur la commune de Bussigny, dans une zone d'activité, à proximité de la jonction autoroutière d'Ecublens. C'est un système de deux giratoires de même géométrie, présentant deux voies à l'anneau et reliés par une courte branche de deux fois deux voies. Ce système présente des interactions avec les carrefours voisins et notamment avec le carrefour à feux au nord-est dont les remontées de file refoulent dans les giratoires.

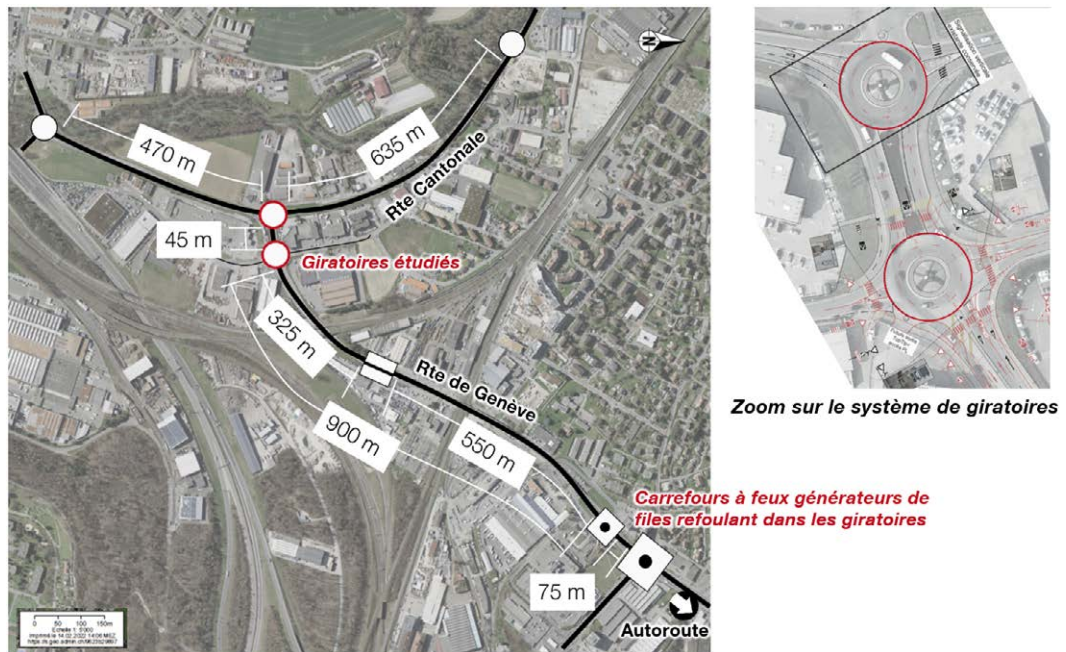


Fig. 97 Situation du giratoire de Bussigny et distances par rapport aux carrefours voisins

15.1.2 Charges de trafic actuelles et points de conflit

Pour plus de simplicité, les deux giratoires seront appelés G1 et G2, G1 étant le giratoire le plus à l'ouest (voir figure suivante).

A l'heure de pointe du soir, l'entrée du système la plus chargée est la route cantonale sud. Les charges de trafic en approche sont plus importantes qu'à l'entrée du giratoire, ce qui montre que cette entrée de G1 n'est pas fluide. La majeure partie du flux s'insérant sur le giratoire 2 depuis l'ouest va tout droit et peut être gêné par le flux venant du chemin du Vallon.

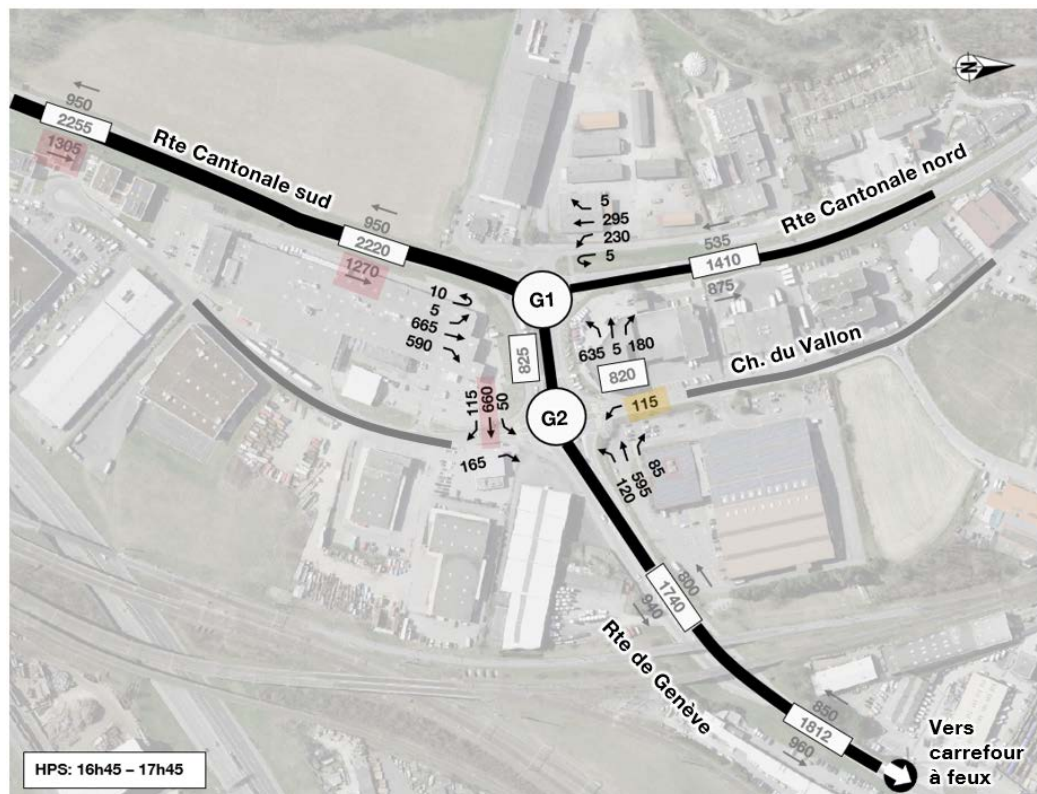


Fig. 98 Charges de trafic à l'heure de pointe du soir au niveau du système de giratoires (uv./h)

Pour ce cas, les analyses se concentreront sur le flux impacté par le carrefour à feux, soit le flux entrant dans le système par la route cantonale sud et sortant par la route de Genève vers l'est (en rose sur la figure ci-dessous) :

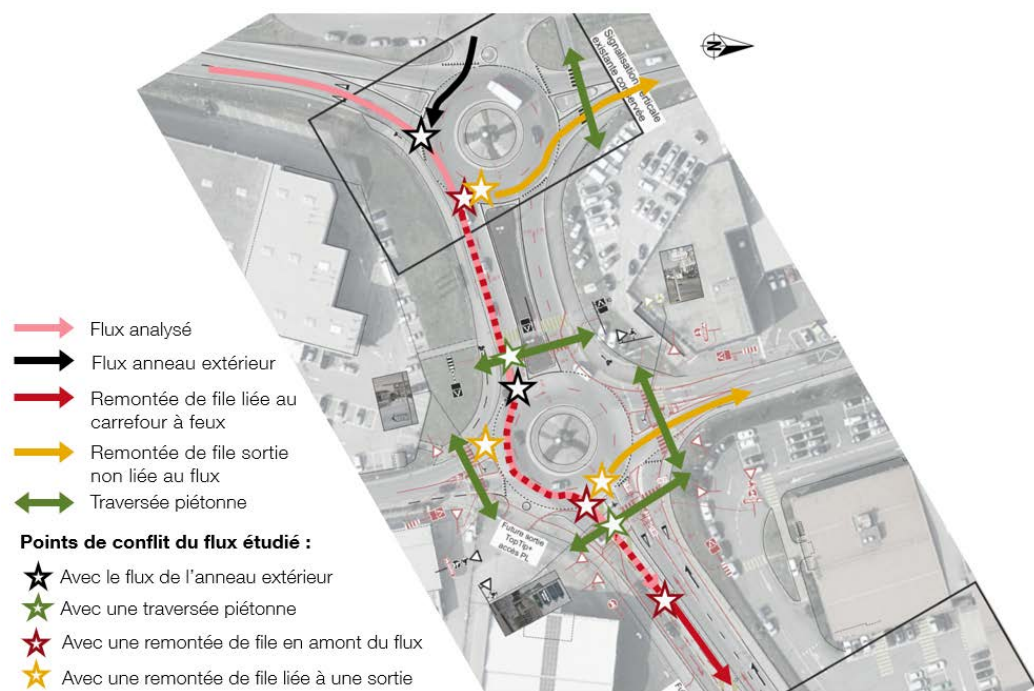


Fig. 99 Flux analysé et points de conflits

Le flux étudié rencontre différents points de conflits :

- en entrées de giratoires avec le flux circulant à l'anneau (étoiles noires);
- au niveau des traversées piétonnes en entrée et sorties de giratoires (étoiles vertes);
- en sortie de système avec la remontée de file liée au carrefour à feu (étoile rouge);
- potentiellement des points de conflits avec d'autres remontées de files refoulant dans les giratoires (étoiles jaunes).

Les points de conflit déterminants ne sont pas forcément les entrées de giratoires c'est pourquoi il est important de considérer le système dans son ensemble ainsi que les impacts extérieurs.

15.1.3 Objectifs de recherche pour le cas d'étude

Les objectifs pour ce cas d'étude sont les suivants :

- étudier un **cas complexe** de double giratoire;
- étudier le fonctionnement d'un **système** dans son ensemble;
- comprendre l'**impact des carrefours voisins** sur le fonctionnement du système de giratoires.

15.2 Protocole expérimental

Les charges de trafic ont été relevées en amont et en entrée pour chaque branche du système, ainsi que sur la branche de liaison entre les deux giratoires. Le relevé des charges sur la branche est, permet de comprendre l'effet du carrefour à feux (création de files).

15.3 Analyses

15.3.1 Analyse détaillée des charges en différents points du système

Une première analyse à l'heure de pointe du soir est réalisée en comparant les charges en approche et en entrée de système (voir figure ci-après).

En entrée sud du système, la différence de charges entre l'approche et l'entrée montre que le flux ne parvient pas bien à s'écouler et qu'une accumulation de véhicules se produit. Cette congestion se répercute entre les deux giratoires en raison de la part importante du flux tournant à droite.

En sortie de système, sur la route de Genève, les véhicules sont libérés petit à petit d'après la différence de charges entre la sortie et l'approche du carrefour à feux. Le système semble agir comme un goulet d'étranglement.

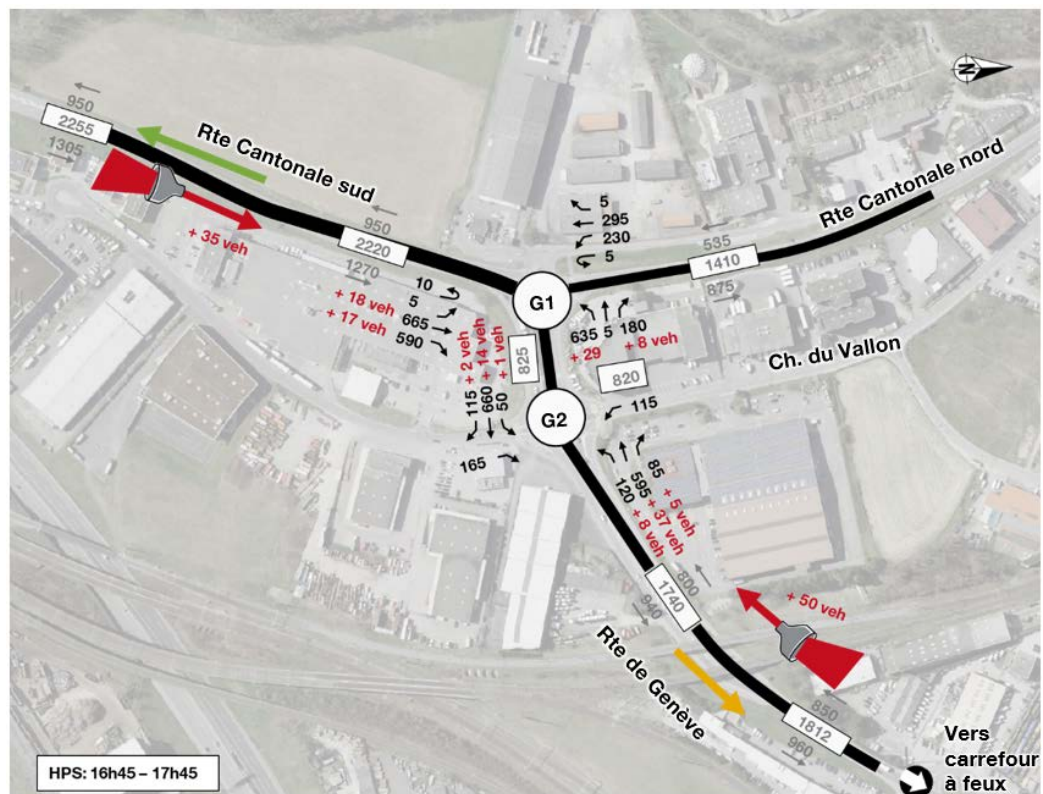


Fig. 100 Comparaison des charges en approche et en entrée à l'heure de pointe du soir

Pour une meilleure compréhension des phénomènes, les charges dynamiques ont été analysées en différents points du système, tout au long du flux étudié. La figure ci-dessous représente par des flèches de couleur, les différentes charges considérées.

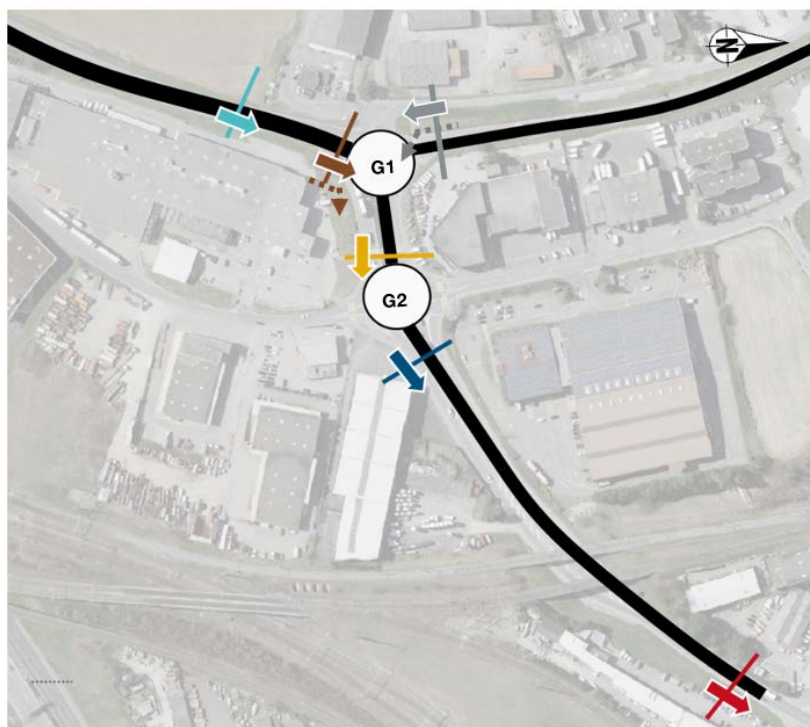


Fig. 101 Charges dynamiques étudiées pour la compréhension du fonctionnement du système

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution des charges de trafic entre 15h30 et 18h30 pour les différents points de comptages schématisés ci-dessus. L'analyse suit le flux des véhicules du début de la congestion jusqu'à son origine supposée.

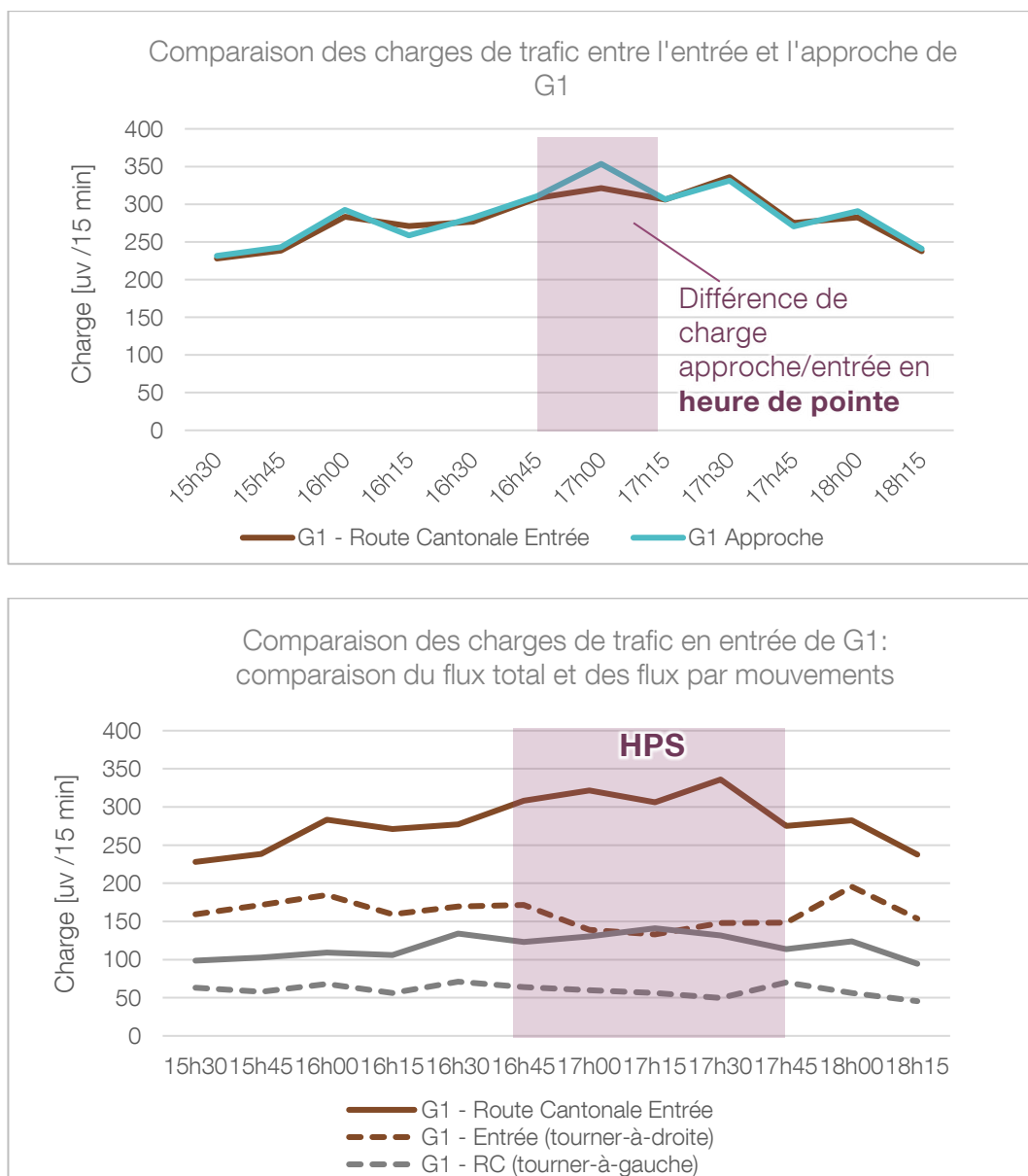


Fig. 102 Comparaison des charges de trafic à l'approche et en entrée de G1

Constats :

A l'heure de pointe, la charge en entrée sud (courbe marron traits pleins) augmente globalement mais diminue pour le flux tournant à droite (courbe marron pointillés). Il y a donc une diminution du débit pour le tourner-à-droite, signe d'une congestion.

Ce phénomène n'est pas observé pour le tourne-à-gauche en entrée nord ce qui est le signe d'un trafic fluide.

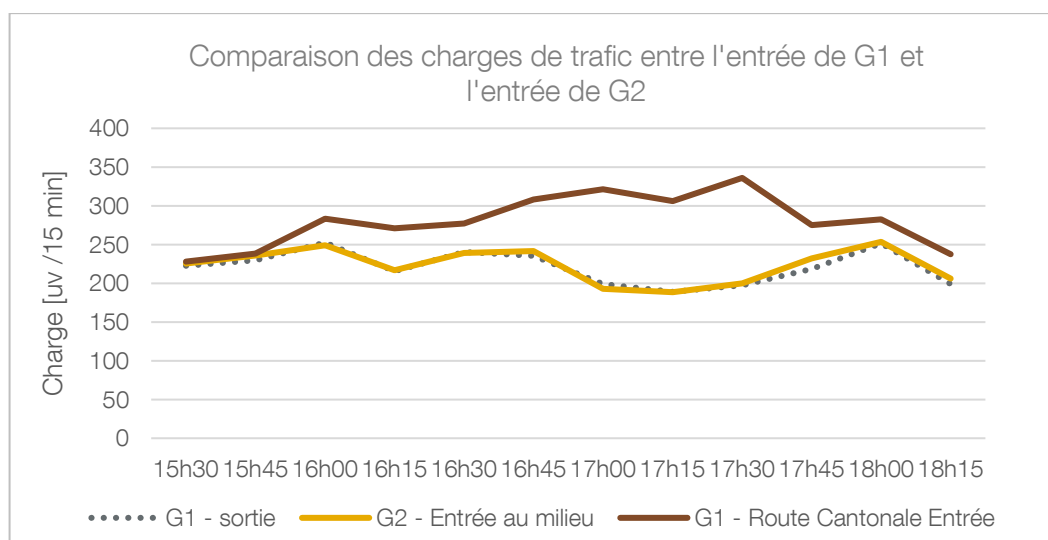


Fig. 103 Comparaison des charges de trafic entre les entrées de G1 et de G2

Constats :

La baisse de charge de l'entrée sud en tourne-à-droite s'observe sur la sortie de G1 (courbe pointillée) et l'entrée de G2 (courbe jaune). Une réaction en cascade commence donc à se révéler.

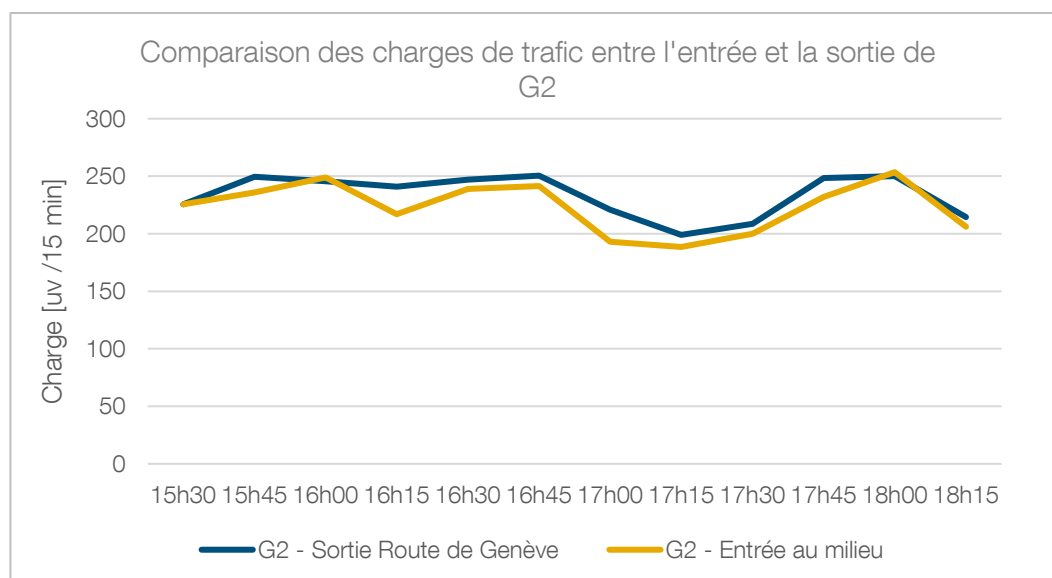


Fig. 104 Comparaison des charges de trafic entre l'entrée et la sortie de G2

Constats :

La baisse de charge en entrée de G2 (courbe jaune) est également observée en sortie de G2 (courbe bleue). On remonte petit à petit le flux soumis à la congestion sur l'ensemble du système.

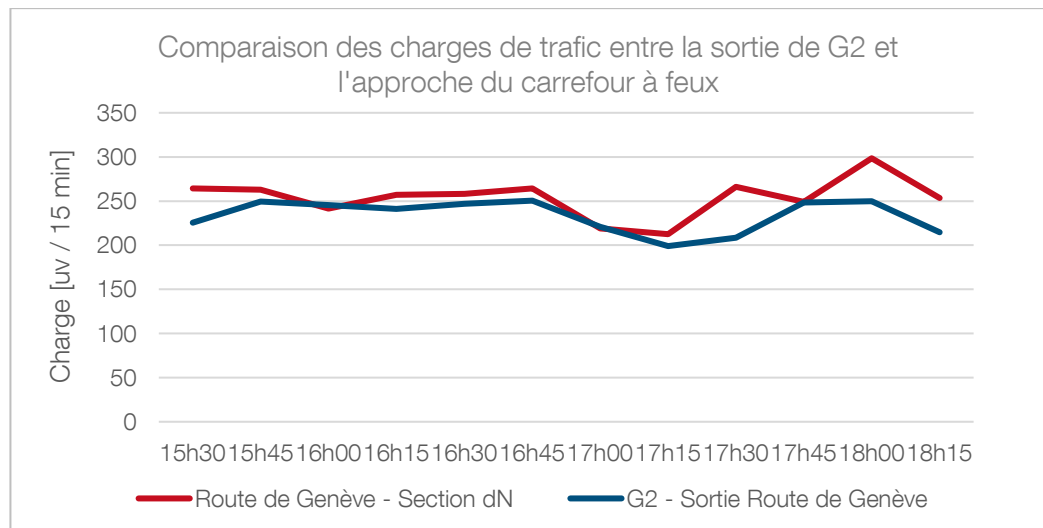


Fig. 105 Comparaison des charges de trafic entre la sortie de G2 et l'approche du carrefour à feux

Constats :

La charge en amont du giratoire sur la route de Genève subit une baisse sans doute liée au carrefour à feux. Cette baisse de charge semble se répercuter directement sur la sortie de G2. On peut donc supposer que le carrefour à feux génère une **remontée de file à l'origine de la congestion**.

On observe ensuite une augmentation des charges sur la branche qui se répercute sur la sortie de G2 avec un retard. Ce retard correspond au temps nécessaire pour libérer le flux congestionné.

15.3.2 Calculs de capacité utilisée

Le but de ces analyses est de vérifier si la capacité utilisée reflète le problème de congestion observé.

Calcul par les méthodes classiques

Les capacités théoriques et utilisées ont été calculées en entrée de chaque giratoire en utilisant différentes méthodes par régression.

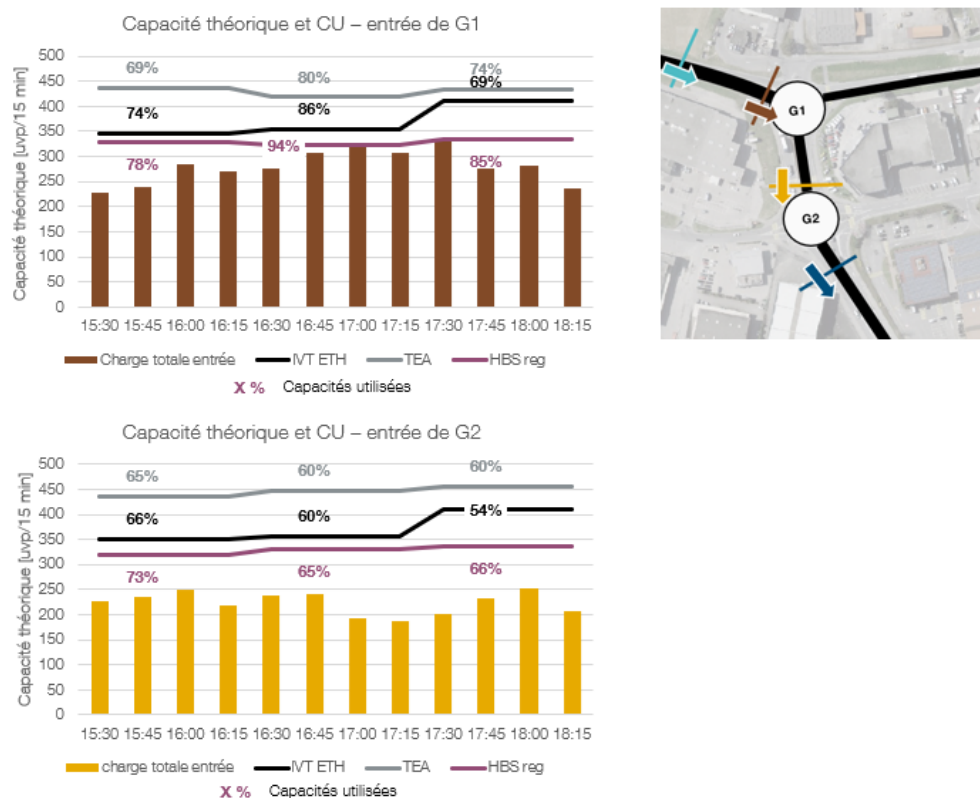


Fig. 106 Calcul de capacité aux entrées des giratoires – Méthodes classiques

Les méthodes classiques ne reflètent pas le comportement attendu :

- le giratoire 1 n'atteint jamais la saturation sauf avec HBS reg, et le giratoire 2 est très loin de la saturation;
- la capacité varie peu sur la période et le calcul à l'heure ne permet pas d'observer de variations plus précises.

Calcul par les méthodes gap acceptance

Comme l'étude porte sur le flux congestionné, on s'intéresse aux capacités d'écoulement de la voie de droite uniquement. Les capacités utilisées ont donc été calculées pour chaque giratoire, pour les voies de droite uniquement.

Le calcul est effectué avec la charge en approche qui reflète mieux la demande exprimée.

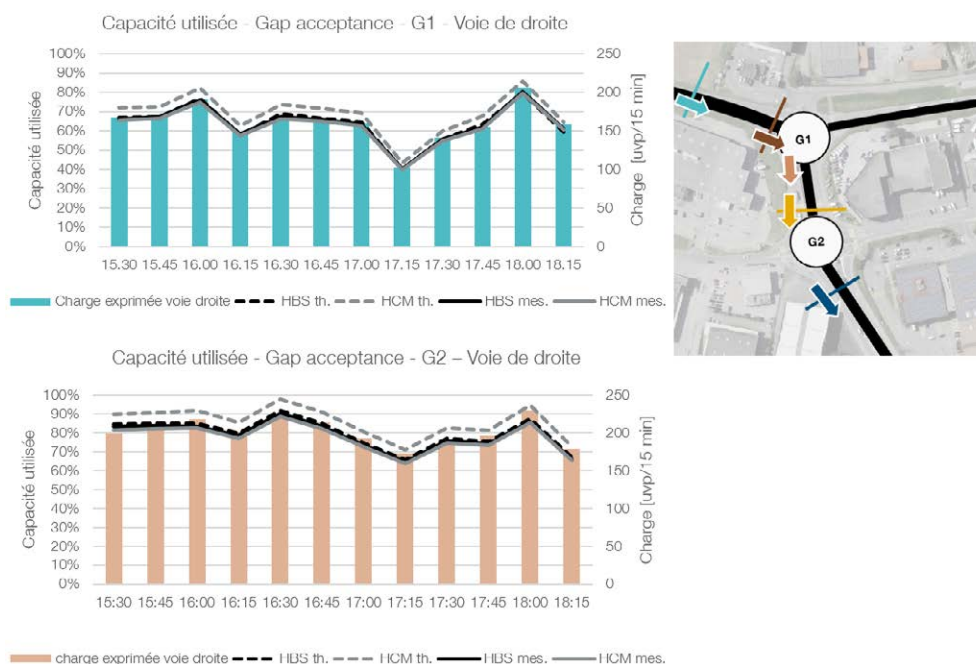


Fig. 107 Calcul de capacité aux entrées des giratoires – Méthodes « gap acceptance »

La limite de capacité n'est jamais atteinte au niveau des deux giratoires. Avec le giratoire 1, on peut même s'attendre à ce que la circulation soit complètement fluide. Ce résultat théorique a été comparé aux vidéos à un moment où la capacité utilisée est plutôt basse pour les deux giratoires (17h30).

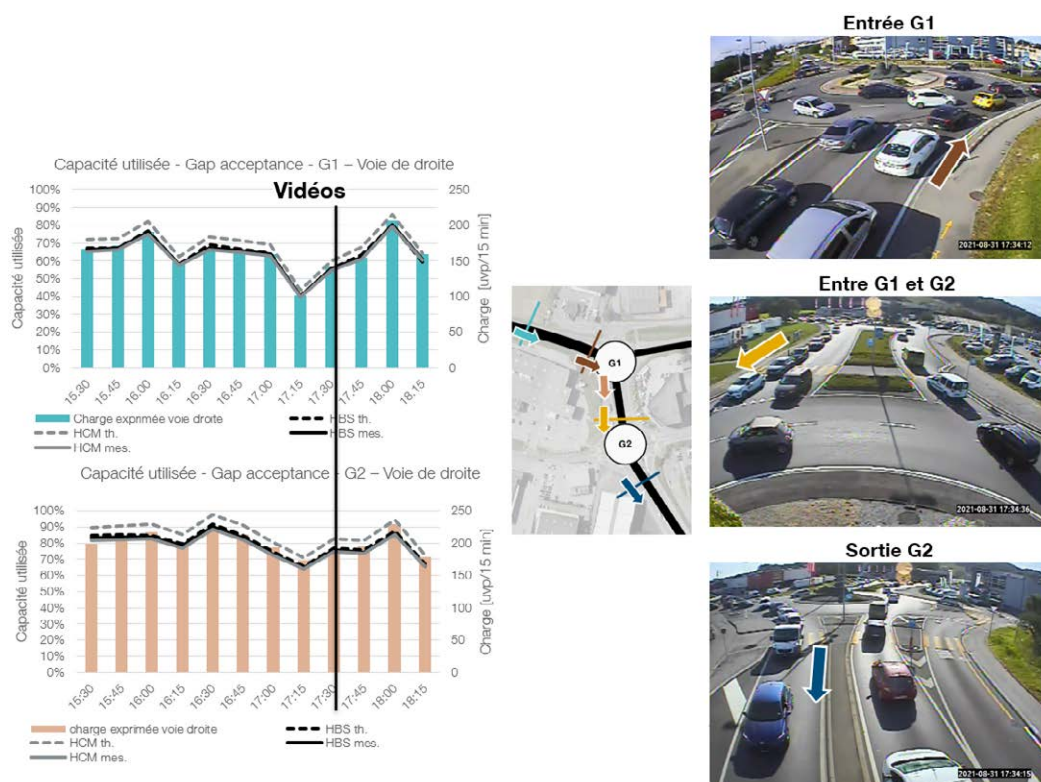


Fig. 108 Comparaison de la capacité utilisée gap acceptance avec le trafic observé

Les vidéos montrent qu'à partir de 17h30, le flux a beaucoup de mal à s'écouler. Les capacités utilisées calculées avec gap acceptance (60-80%) ne permettent pas de révéler ce phénomène. Cela paraît cohérent si la cause de la congestion est extérieure au giratoire.

Les calculs de capacité utilisés ne permettent pas de révéler de problématique dans le cas où la congestion est liée au refoulement d'un autre carrefour. Il est donc nécessaire de trouver un autre indicateur permettant de refléter le fonctionnement de ce type de cas.

15.3.3 Analyse des densités de trafic et des vitesses

La norme VSS 40 210a établit une classification des **niveaux de service des axes routiers** hors localité, en fonction de la densité de trafic, de la liberté de déplacement, des vitesses atteignables et de la capacité du flux à s'écouler. Les différents niveaux de services sont classifiés comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

A	Sehr gut	Bei sehr geringer Verkehrsdichte völlige Bewegungsfreiheit, weitgehend freie Geschwindigkeitswahl (innerhalb zulässiger Limiten), nur wenige Überholvorgänge erforderlich und nahezu ohne Zeitverlust möglich, freier Verkehrsfluss
	Très bon	Avec une densité du trafic très faible, une liberté totale de déplacement, choix de la vitesse en grande partie libre (dans les limites autorisées), peu de dépassements nécessaires et, le cas échéant, ils sont possibles presque sans perte de temps, flux de trafic libre
B	Gut	Trotz geringer Verkehrsdichte Beeinträchtigung der Bewegungsfreiheit durch andere Fahrzeuge, Wunschgeschwindigkeiten über längere Abschnitte nicht erreichbar, Überholvorgänge nur mit Zeitverlust möglich, eingeschränkter Verkehrsfluss
	Bon	Malgré une densité du trafic faible, restriction de la liberté de déplacement, par d'autres véhicules, vitesses souhaitées non atteignables sur de longues parties des tronçons, dépassements possibles seulement avec perte de temps, flux de trafic restreint
C	Zufrieden stellend	Bei mittlerer Verkehrsdichte deutliche Beeinträchtigung der Bewegungsfreiheit, hohe Wunschgeschwindigkeiten über lange Abschnitte nicht erreichbar, Überholvorgänge nur mit grossem Zeitverlust möglich, stabiler Verkehrsfluss bei sinkenden mittleren Geschwindigkeiten
	Satisfaisant	Avec une densité du trafic moyenne, restriction nette de la liberté de déplacement, vitesses élevées souhaitées non atteignables sur de longues parties des tronçons, dépassements possibles seulement avec grande perte de temps, flux de trafic stable avec des vitesses moyennes en baisse
D	Ausreichend	Bei hoher Verkehrsdichte deutliche Einschränkung der Bewegungsfreiheit und individuellen Geschwindigkeitswahl, sichere Überholvorgänge nur noch selten möglich und wenig sinnvoll, Konfliktsituationen und gegenseitige Behinderungen, Kolonnenverkehr bei stabilem Verkehrsfluss
	Suffisant	Avec une densité du trafic élevée, restriction nette de la liberté de déplacement et du choix individuel de la vitesse, des dépassements sûrs ne sont que rarement possibles et peu opportuns, situations de conflit et gênes réciproques, circulation en file avec un flux de trafic stable
E	Mangelhaft	Bei sehr hoher Verkehrsdichte extrem eingeschränkte Bewegungsfreiheit, geringes Geschwindigkeitsniveau, kaum noch Überholvorgänge, Wechsel zwischen stabilem und instabilem Verkehrsablauf, bereits z.B. geringfügige Verhaltensänderungen können zum Verkehrszusammenbruch (Staubildung und Stillstand) führen, Kapazität ist erreicht
	Insuffisant	Avec une densité du trafic très élevée, très forte restriction de la liberté de déplacement, niveau de vitesse faible, presque plus de dépassements, l'écoulement de la circulation varie entre stable et instable, de très petites modifications du comportement peuvent p.ex. déjà engendrer des embouteillages (formation de bouchon et trafic immobilisé), capacité atteinte
F	Völlig ungenügend Totalément insuffisant	Verkehrszusammenbruch unvermeidlich, Überlastung (Zufluss grösser als Leistungsfähigkeit), Stillstand und Stau im Wechsel mit Stop-and-Go Embouteillages inévitables, surcharge (l'afflux est supérieur à la capacité), trafic immobilisé et bouchon en alternance avec stop-and-go

Fig. 109 Niveaux de service des espaces routiers hors localité d'après la norme VSS 40 210a

La variation des vitesses des véhicules apparaît comme un bon indicateur permettant de comprendre la capacité du flux à s'écouler. Si la vitesse diminue, les distances entre véhicules se raccourcissent et **la densité de trafic** (en véhicules/km) **augmente** :

$$\text{Densité de trafic} = \frac{\text{Charge (veh. par h)}}{\text{vitesse (km par h)}}$$

La corrélation entre niveau de service et densité de trafic est la suivante :

Niveau de Service	Densité de Trafic (veh/km)
A	<= 5
B	<= 12
C	<= 20
D	<= 30
E	<= 40
F	> 40

Fig. 110 Niveaux de service des espaces routiers hors localité en fonction de la densité de trafic

La norme ne s'applique qu'aux axes routiers hors localité. Néanmoins, il est intéressant de s'en inspirer pour étudier le fonctionnement d'un giratoire.

Application au cas de Bussigny

Les vitesses et densités de trafic ont été estimées pour le flux congestionné, en différents points du système de giratoires. Ces estimations sont basées sur des mesures « manuelles » et « visuelles », effectuées en visionnant les vidéos. Aucun logiciel n'a été utilisé.

La **vitesse moyenne** des véhicules **en fonction du temps a été déduite** en chronométrant le temps de parcours d'un échantillon de véhicules entre deux points de repère. **Cinq véhicules sont chronométrés par créneau de quinze minutes**. La distance entre les points de repère a été estimée à l'aide de mesures sur une vue aérienne.

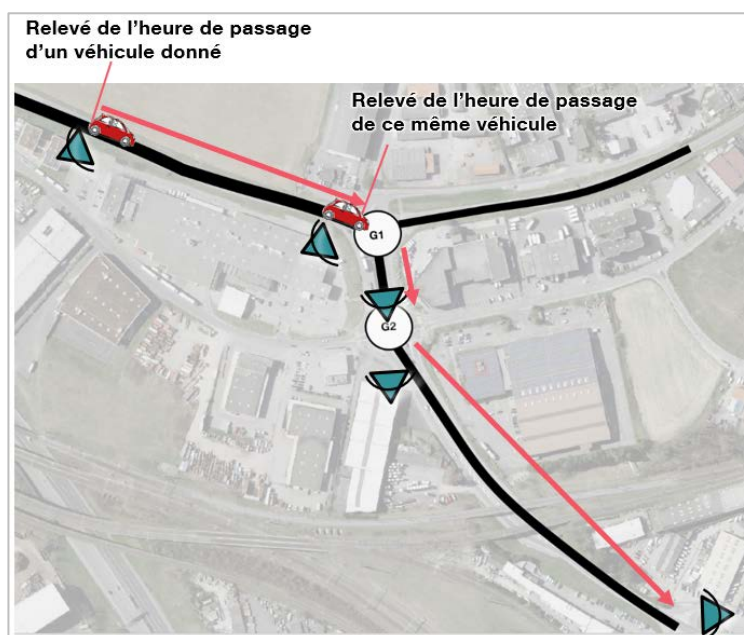


Fig. 111 Méthodologie pour l'estimation de la vitesse des véhicules

La vitesse moyenne a été ainsi mesurée sur **3 tronçons** : en amont du giratoire 1, entre les deux giratoires, en aval du giratoire 2. **La densité peut ensuite être déduite de la vitesse moyenne.**

Densité de trafic en aval de G2

Les densités de trafic obtenues sont comparées aux charges en sortie de giratoire.

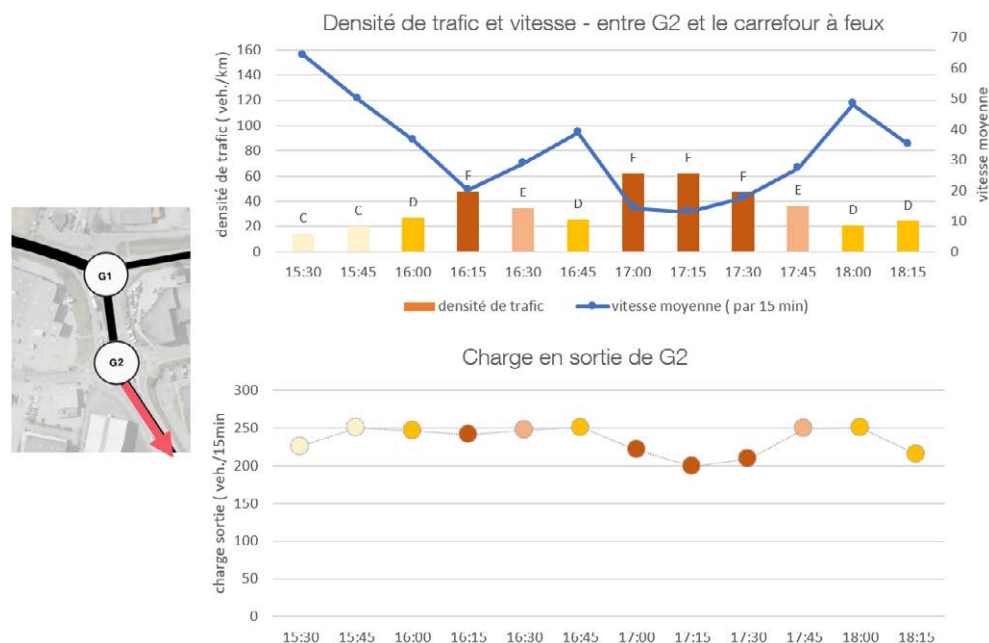


Fig. 112 Densité de trafic et charges en sortie de G2

La densité augmente et la vitesse baisse à 16h15 et 17h alors que la charge n'augmente pas en sortie de giratoire. Cela révèle un évènement **extérieur au giratoire** tel qu'un ralentissement au niveau du carrefour à feux.

Avant le blocage de 17h, on observe un pic de vitesse qui peut être la conséquence du pic de densité observé précédemment (à 16h15) : **les conducteurs qui ont été bloqués un moment, veulent aller le plus vite possible dès qu'ils sont libérés.**

Densité de trafic entre G1 et G2

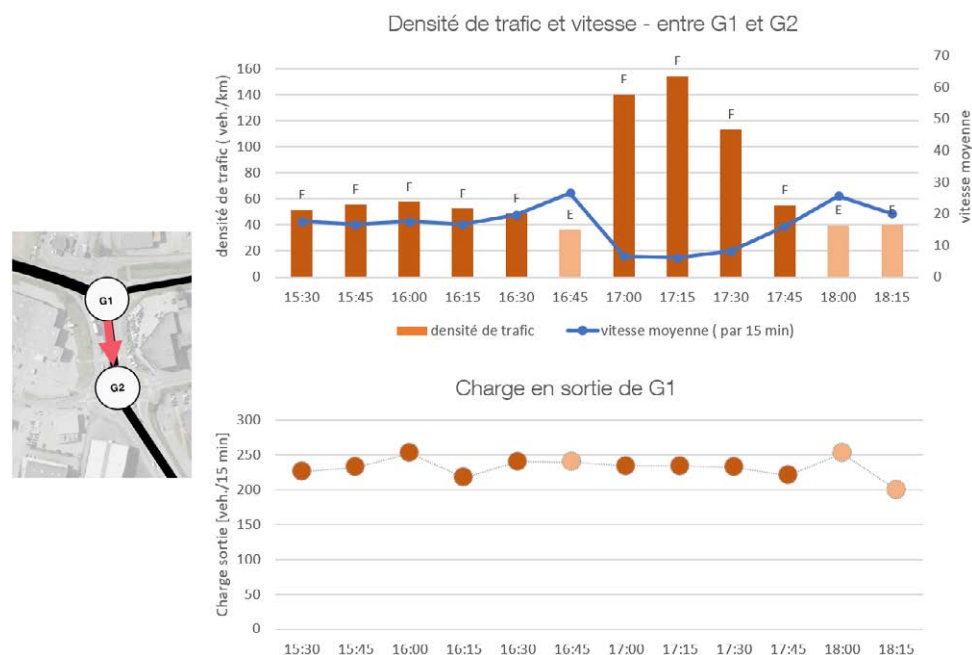


Fig. 113 Densité de trafic et charges entre G1 et G2

Entre les deux giratoires, les **densités sont beaucoup plus élevées** en raison de la longueur faible du tronçon : les véhicules roulent par défaut assez lentement.

Le **même pic de densité** est observé entre les deux giratoires à partir de 17h. Cela semble être la conséquence directe de la situation en sortie du giratoire 2.

Densité de trafic en amont de G1

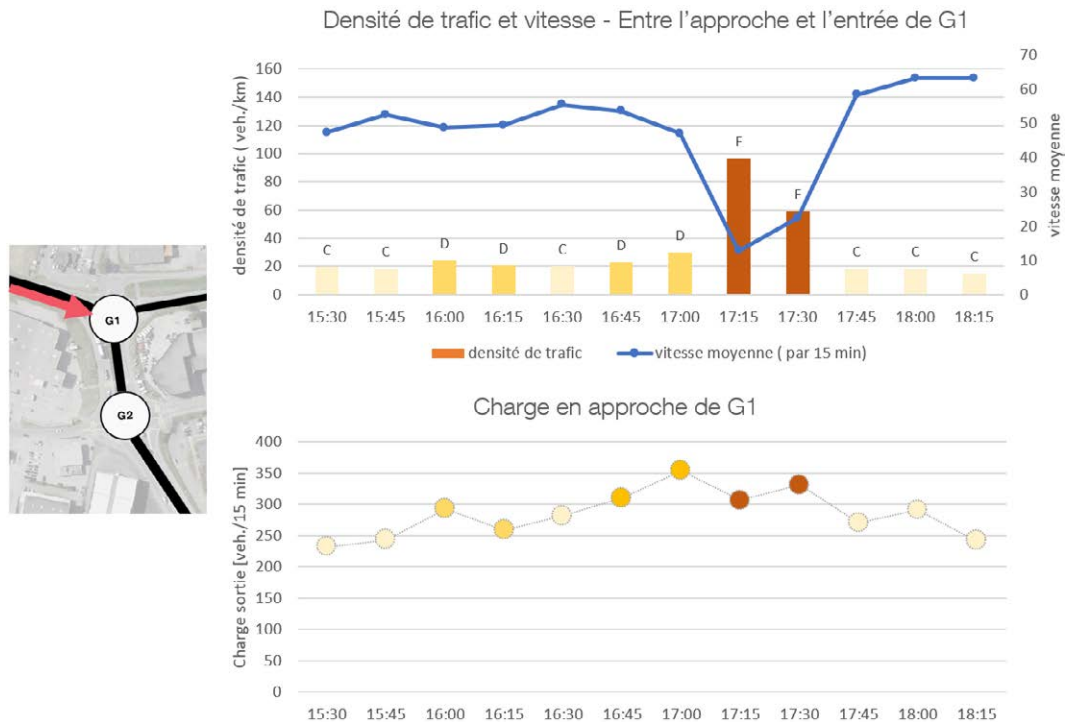


Fig. 114 Densité de trafic et charges entre l'approche et l'entrée de G1

En amont du système, le **pic de densité est observé avec un retard**. Cela correspond au temps de propagation du ralentissement depuis la sortie vers l'entrée du système.

En dehors du pic, les vitesses sont stables et le niveau de service est plutôt bon. En effet, les densifications légères en sortie de système n'ont pas le temps de se répercuter.

Comparaison des densités avec la capacité utilisée

La capacité utilisée donne des résultats à l'opposé des mesures de densité et de vitesse. A 17h15, la capacité utilisée est minimale alors que la densité a fortement augmenté. A 18h, la capacité utilisée montre un pic alors que la densité est revenue à la normale.

Cette différence s'explique du fait que la charge ne parvient pas à s'écouler, à cause d'un élément extérieur. La charge est donc plus faible et la capacité utilisée plus basse.

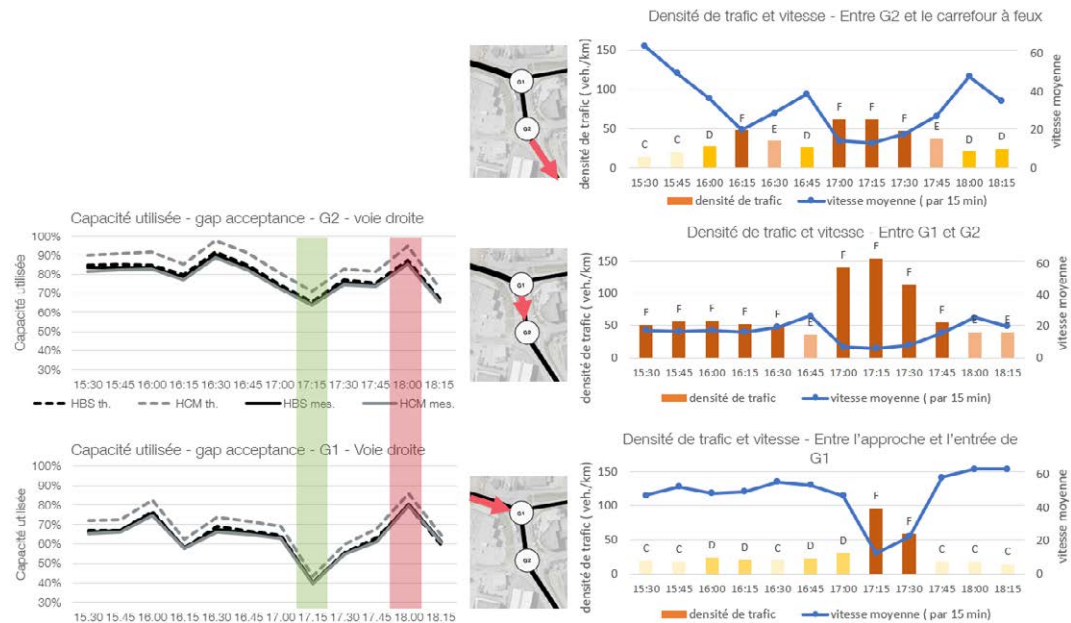


Fig. 115 Comparaison de la capacité utilisée et des densités de trafic

15.4 Synthèse des enseignements

15.4.1 Importance d'étudier un système dans son ensemble

L'étude d'un giratoire nécessite en premier lieu d'identifier tous les points de conflit pouvant impacter les flux en entrée et en sortie. Le point de conflit déterminant n'est pas forcément celui situé entre le flux entrant et le flux circulant à l'anneau. Il peut être situé :

- au niveau des traversées piétonnes surtout si elles sont très fréquentées;
- au niveau des sorties de giratoire quand celles-ci sont bloquées par un impact extérieur.

Quand un giratoire est situé à proximité d'autres carrefours, il est important d'estimer si ces derniers peuvent avoir un impact sur le giratoire. Les carrefours proches peuvent présenter des problèmes de fonctionnement et générer des files d'attente qui peuvent refouler dans le giratoire étudié. Dans ce cas, si l'on étudie le giratoire de manière isolée et qu'on ne considère que les charges en entrée, en approche et à l'anneau, les résultats risquent de ne pas être pertinents car les impacts extérieurs auront été mis de côté. Il est important de considérer les charges en sortie de giratoire, car elles peuvent révéler un blocage venant de l'extérieur.

15.4.2 Indicateurs pertinents en cas d'impacts extérieurs

Quand l'origine d'une congestion est extérieure à un carrefour, le calcul de capacité utilisée n'est pas pertinent pour révéler les problèmes de fonctionnement. En effet, la capacité utilisée sera basse car le flux ne parvient plus à s'écouler à cause du blocage extérieur. On pourrait donc croire que la circulation est fluide alors que c'est tout le contraire.

Dans ce cas, l'étude des vitesses et des densités de trafic donne une bien meilleure vision du fonctionnement d'un carrefour ou d'un système car seuls les effets du problème sont mesurés. Une densité de trafic qui augmente ou un ralentissement annoncent la création d'une file et parfois même avant que la file ne soit vraiment visible.

Ces indicateurs sont aussi pertinents pour les giratoires sans impacts extérieurs, particulièrement dans les cas où de longues files d'attentes sont observées. Cependant,

ils ne permettent pas d'étudier des cas futurs puisqu'aucune théorie n'existe pour estimer les vitesses en fonction des charges attendues et en fonction de la configuration du giratoire.

15.4.3 Influence de la vitesse à l'anneau sur la capacité théorique et les générations de files

Les files théoriques calculées par la méthode gap acceptance présentent des incohérences avec la réalité observée sur le terrain. Les pics de file ne sont pas toujours observés au même moment et les ordres de grandeur peuvent être différents.

Les calculs effectués avec une précision de cinq minutes doivent être utilisés avec précaution car ils peuvent présenter du « bruit » en cas de petites variations de charges. Dans ce cas, les résultats peuvent donner une fausse image de la réalité et des courbes peu lisibles. Il vaut donc mieux comparer avec des résultats utilisant une précision de quinze minutes.

Même en utilisant la bonne précision, il est tout de même difficile d'obtenir un résultat proche de la réalité. Cela pourrait être dû au fait que les calculs théoriques ne prennent pas en compte tous les paramètres pouvant influencer la capacité. La vitesse des véhicules à l'anneau pourrait ainsi exercer une influence sur la capacité du giratoire. Plus les véhicules vont vite dans l'anneau et plus les véhicules en entrée auraient du mal à s'insérer, ce qui aurait pour conséquence de faire baisser la capacité. Les analyses effectuées montrent qu'une légère augmentation de la vitesse est corrélée avec une augmentation importante des files d'attente sur le cas de Belp. Cette corrélation devra être étudiée plus en détails sur différents cas afin d'en déduire une règle et si possible d'adapter les calculs de capacité en conséquence.

16 Présentation détaillée du cas de Belp

16.1 Présentation du cas d'étude

16.1.1 Situation géographique et spécificités

Le giratoire étudié est situé à la périphérie de la commune de Belp, au sud de Berne. Il comporte quatre branches avec chacune une voie d'entrée ainsi qu'une voie à l'anneau. Des passages piétons sont présents en entrée et sortie. Le giratoire présente une congestion au niveau de l'anneau mais pas de refoulement depuis l'extérieur.

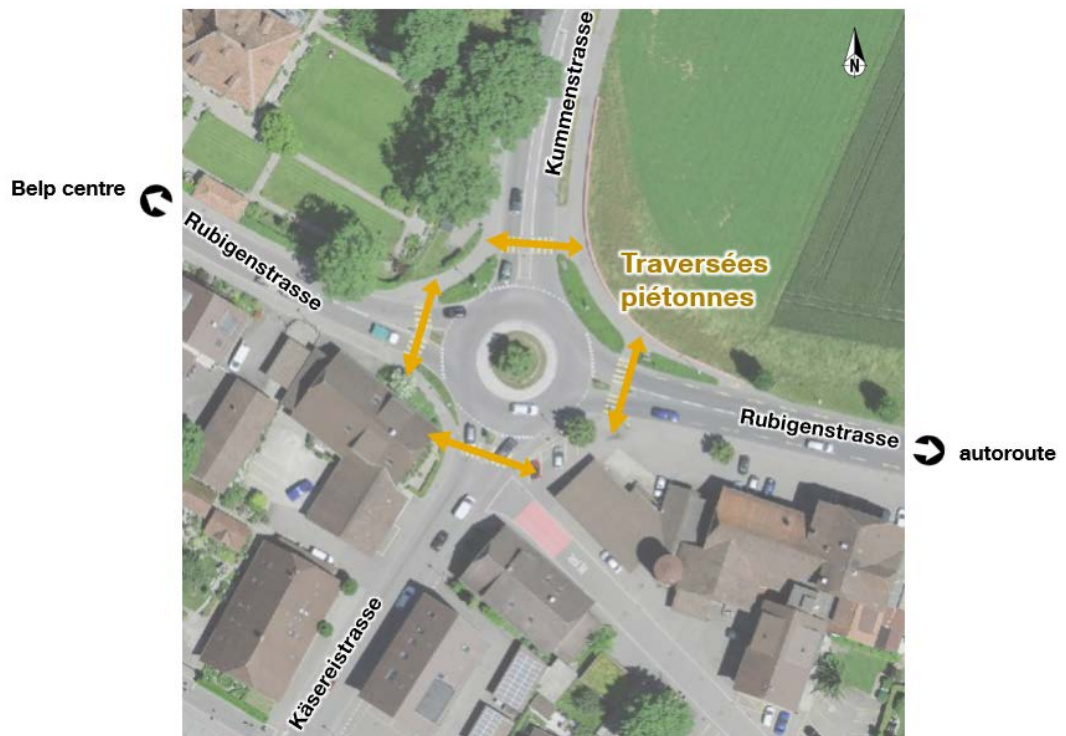


Fig. 116 Situation et configuration du giratoire de Belp

16.1.2 Charges actuelles

En amont de l'étude, des captures Google trafic ont été effectuées pour différentes heures afin de mieux cibler les branches à étudier et d'observer les longueurs de files attendues.

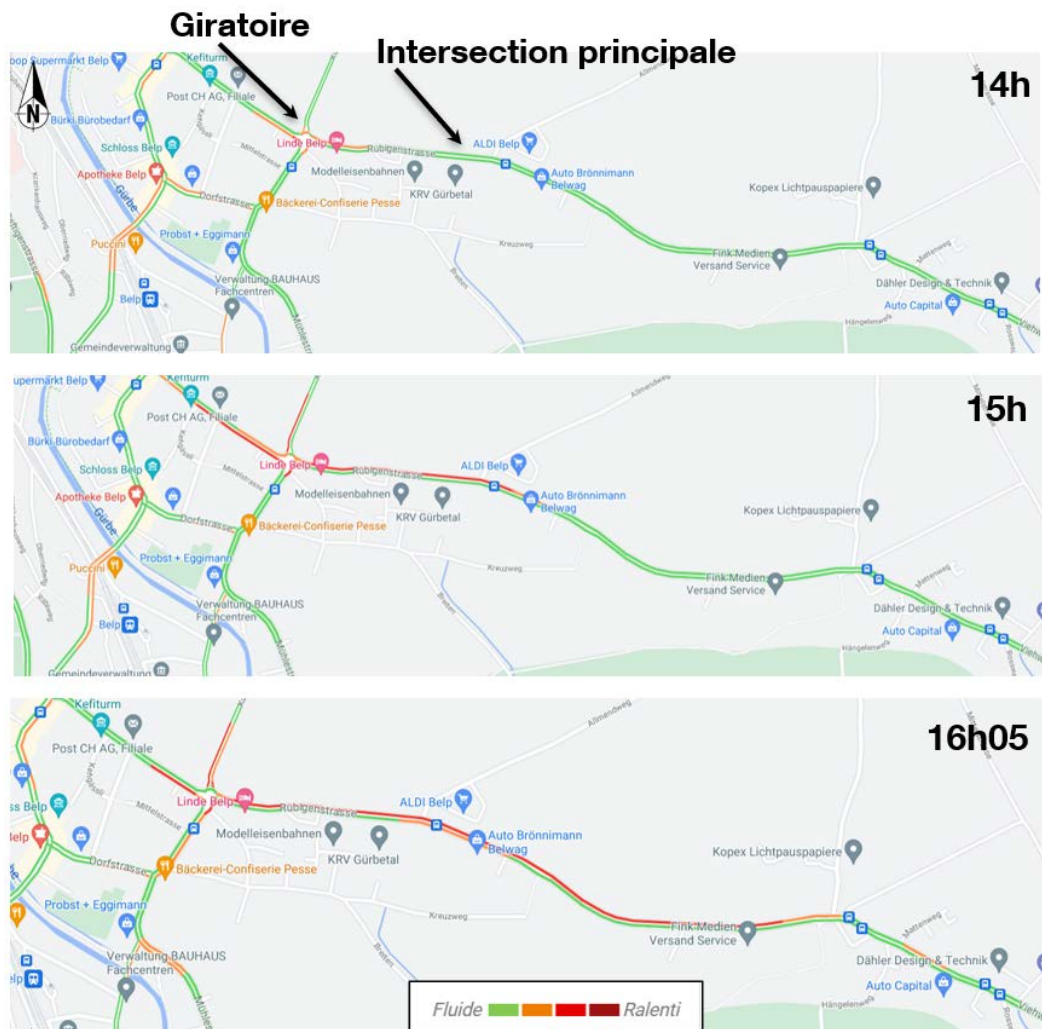


Fig. 117 Relevés Google trafic pour différentes heures le même jour de la semaine que le jour des mesures

L'étude de la figure précédente montre que la branche est la plus congestionnée. L'étude détaillée se concentre donc sur cette branche.

Pour cette branche, les files remontent jusqu'à environ un kilomètre en amont, au-delà des intersections voisines. Cette information a été prise en compte pour positionner les caméras plus loin que les remontées de files critiques.

16.1.3 Objectifs de recherche pour le cas d'étude

Les objectifs d'étude de ce cas sont les suivants :

- vérifier l'effet des piétons sur la capacité d'écoulement en entrée et sortie du giratoire, comme par exemple la création d'un blocage dans l'anneau;
- observer plus finement le comportement en approche du giratoire et la création de files, en positionnant plusieurs caméras en amont.

16.2 Protocole expérimental

Les caméras ont été positionnées en entrée et en approche du giratoire de façon à compter les piétons sur les traversées en entrée et sortie. Sur la branche étudiée, des caméras sont positionnées en entrée et en différents points en amont afin de mieux observer la formation des files et de compter la demande exprimée. Enfin, une caméra est positionnée au niveau de l'intersection en amont du giratoire afin de pouvoir comptabiliser les véhicules entrants et sortant de Allmendweg.

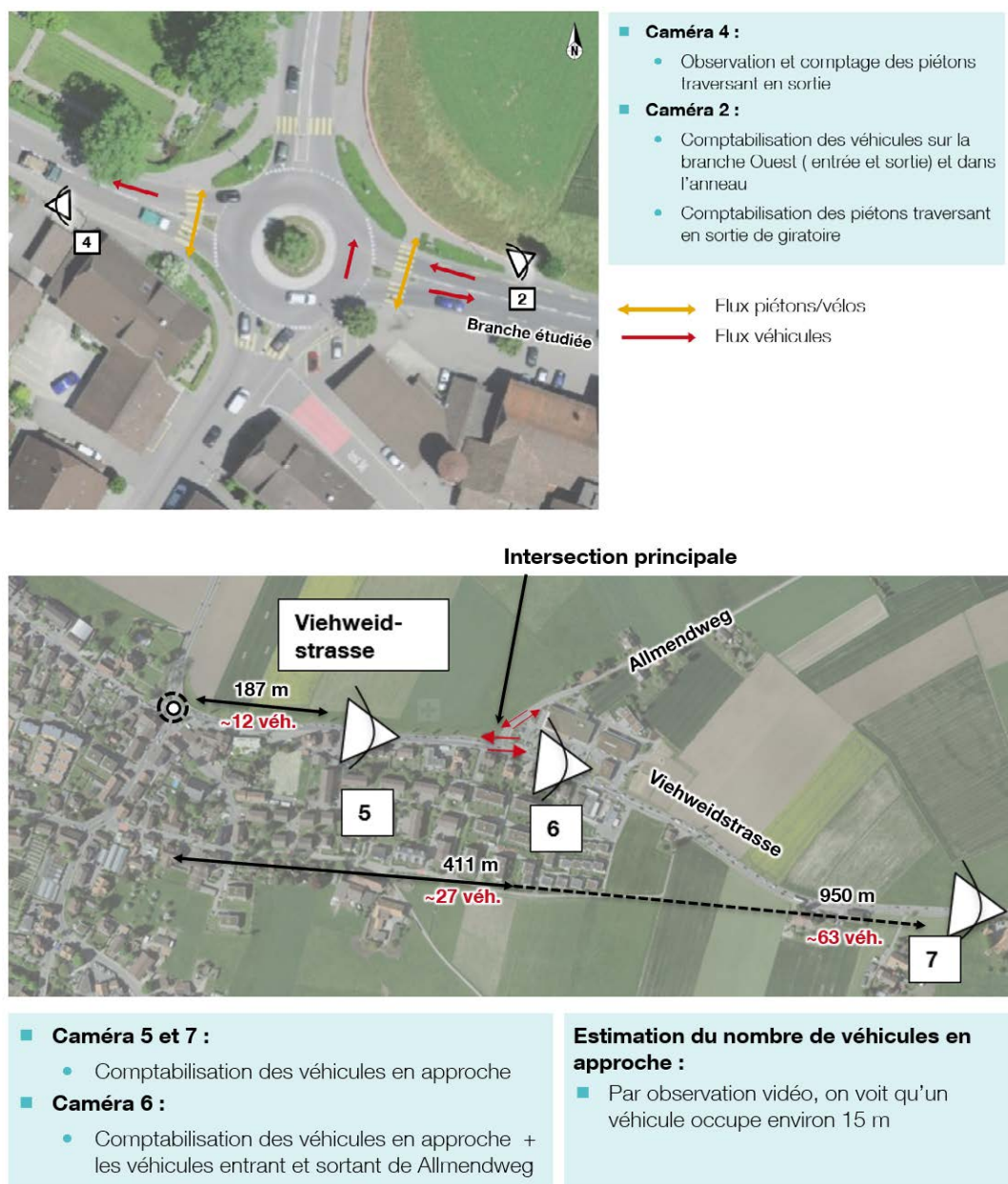


Fig. 118 Positionnement des caméras en entrée et en approche du giratoire

Les relevés vidéo ont été effectués entre 15h30 et 18h30. Les analyses vidéo par Logiciel ont ensuite permis d'obtenir des charges de trafic par intervalles de cinq min.

16.3 Analyses

16.3.1 Analyse des charges dynamiques

Charges des véhicules circulant sur la chaussée

L'analyse des charges de trafic en entrée, en sortie et à l'anneau montre qu'il n'y a pas de période de pointe nette ni de pic de trafic entre 15h30 et 18h30. On observe cependant une fluctuation des charges au cours du temps.

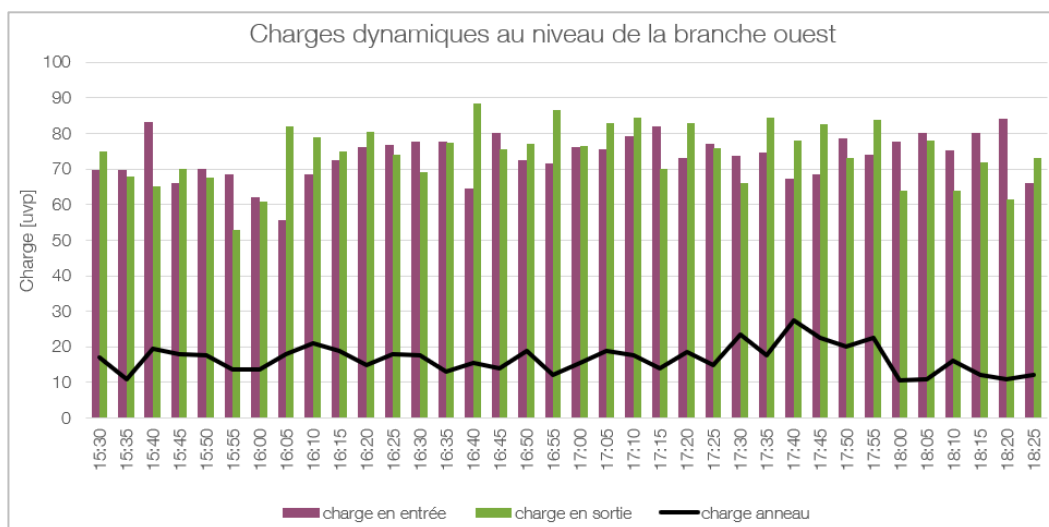


Fig. 119 Charges de trafic dynamiques en entrée, en sortie et à l'anneau

Au moment où la charge à l'anneau est la plus haute (17h40), aucune formation de file dans l'anneau n'est observée d'après les analyses vidéo. D'autre part, la sortie du giratoire est fluide et aucun refoulement provenant d'un autre carrefour n'est visible.



Fig. 120 Observation du trafic au niveau de l'anneau

Charges sur les traversées piétonnes

Les piétons et vélos sur les traversées piétonnes ont été comptés en entrée et sortie de giratoire. Leur **volume semble peu important** et insuffisant pour provoquer des **problèmes de congestion** en entrée de giratoire ou un **blocage de l’anneau** en sortie. Un **calcul de capacité utilisée adapté** à la présence de passages piétons devrait permettre de vérifier cette hypothèse.



Fig. 121 Charges de piétons et vélos sur les traversées piétonnes en entrée et sortie de giratoire

16.3.2 Analyse de l’influence des piétons sur la capacité utilisée

La présence de passages piétons peut influencer sur la capacité d’écoulement en entrée ou en sortie de giratoire. Les différentes méthodes de calculs prenant en compte les traversées piétonnes sont résumées dans le tableau ci-dessous et détaillées dans le paragraphe 6.1.

Méthode		Principe de calcul de capacité d’écoulement	
		Entrée	Sortie
Méthodes classiques utilisées en Suisse	VSS	Calcul de la capacité théorique sans passage piéton puis application d’un facteur de réduction basé sur la charge du passage piéton d’entrée	Formule basée sur la charge de piétons sur le passage piéton en sortie
	TEA	Les piétons n’ont une influence qu’à partir d’un seuil de 150 piétons/heure	✗
Méthodes Gap acceptance	HCM		✗
	HBS	Calcul de la capacité théorique sans passage piéton puis application d’un facteur de réduction basé sur la charge du passage piéton d’entrée Les piétons n’ont une influence qu’à partir d’un seuil de 100 piétons/heure	✗

Fig. 122 – Méthodes de calcul de capacité utilisée prenant en compte l’influence des passages piétons

La capacité théorique du giratoire en entrée et en sortie a été calculée en appliquant la méthode VSS tenant compte des traversées piétonnes. L’analyse des résultats montre que

la **capacité d'écoulement n'est pas influencée par la présence des passages piétons** ce qui confirme l'intuition précédente. Cela est cohérent car les différentes méthodes considèrent que **l'effet des traversées est observé à partir de 100 ou 150 piétons/heure**. Dans le cas étudié, le volume est bien inférieur, avec **50 piétons/vélos maximum par heure**.

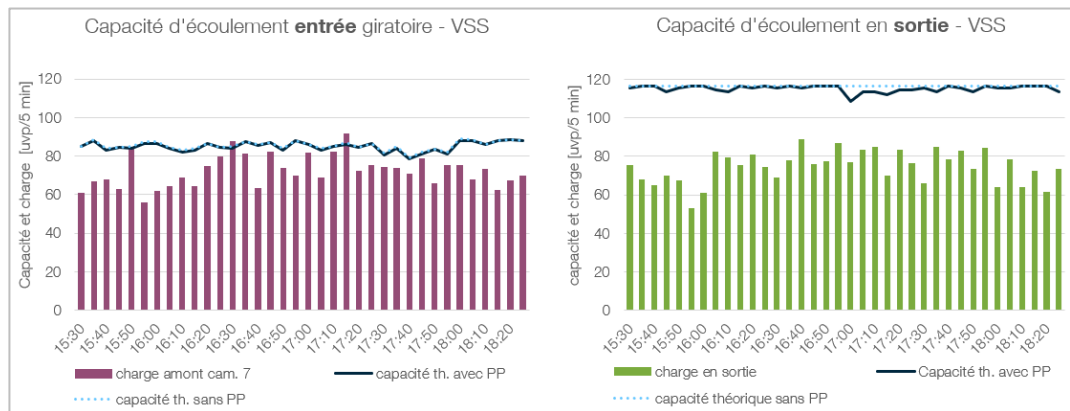


Fig. 123 Capacité d'écoulement en entrée et sortie de giratoire en tenant compte des traversées piétonnes – Méthode VSS

L'étude du cas de Belp n'a donc pas permis de tirer des conclusions sur l'influence des piétons sur les calculs de capacité. Un autre giratoire présentant des traversées avec plus de piétons devra être choisi pour poursuivre les études.

Malgré leur impact faible, les piétons ont tout de même été pris en compte dans les calculs de capacité dans la suite de l'étude.

16.3.3 Analyse des phénomènes en approche sur la branche ouest

Calcul de la capacité utilisée

La capacité utilisée a été calculée avec les méthodes gap acceptance (HBS et HBM) en utilisant des valeurs de paramètres théoriques et mesurées sur le giratoire étudié. La demande correspond à la charge d'approche vue par la caméra 7, ajustée pour prendre en compte les véhicules tournant sur Allmendweg.

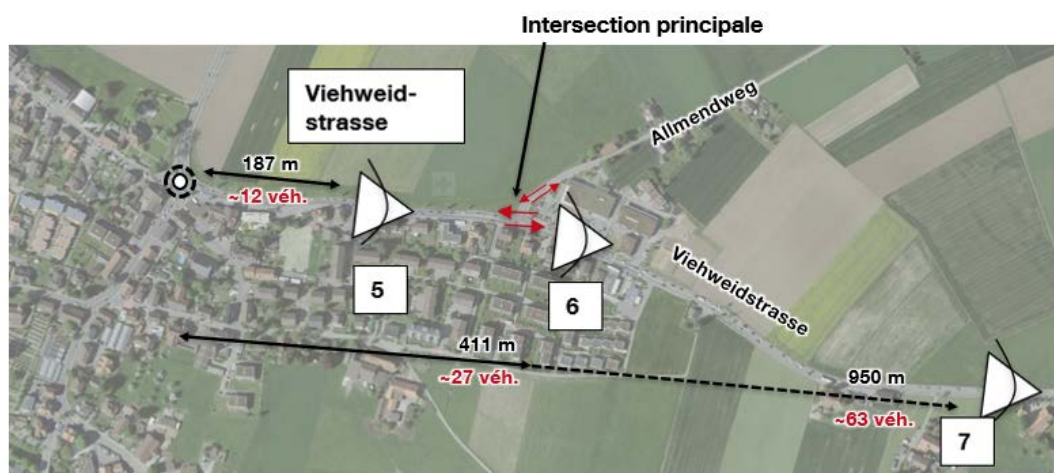


Fig. 124 Positionnement des caméras et distances par rapport à l'entrée du giratoire

Les résultats, présentés sur le graphique ci-dessous montrent que :

- les valeurs de **capacité utilisée sont similaires avec les méthodes** HBS théoriques et HBS/HCM utilisant les paramètres mesurés localement;

- avec HCM théorique, la saturation est atteinte très fréquemment sur la période. Avec les autres estimations, la saturation est atteinte autour de 16h30 et autour de 17h15.

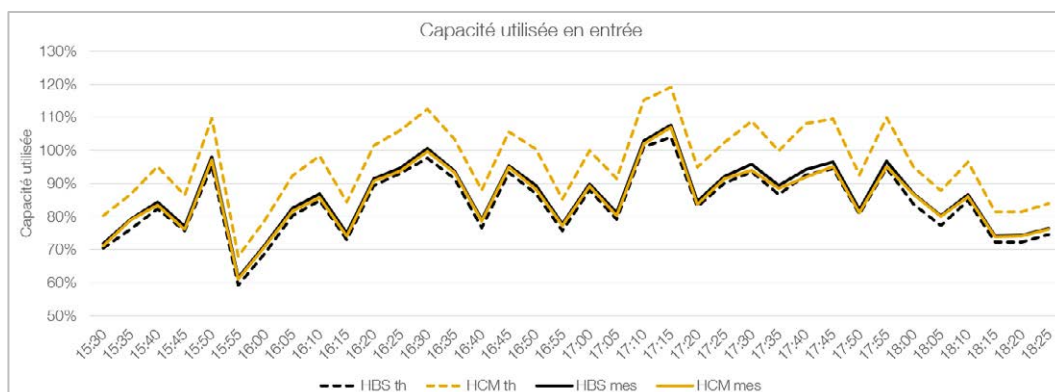


Fig. 125 Capacité utilisée selon les méthodes « gap acceptance »

Pour savoir quelle courbe est la plus réaliste, une comparaison avec la réalité observée sur les vidéos est nécessaire. Or, il est difficile d'estimer la capacité utilisée en observant le fonctionnement du giratoire. Il est plus aisé d'estimer les files d'attente par observation et de les comparer avec les files théoriques.

Evaluation du stock et des files d'attente

La branche ouest est découpée en trois tronçons de longueurs différentes. Par observations des vidéos, il a été estimé que chaque véhicule occupait en moyenne quinze mètres en incluant l'espace inter véhiculaire.



Fig. 126 Tronçons étudiés en amont du giratoire, distance et position des caméras

Les files d'attentes ainsi que le stock ont été évalués par tronçon de branche d'approche.

Evaluation du stock

Le stock correspond au nombre de véhicules accumulés sur un tronçon à un instant t. Cet indicateur devrait être facilement comparable à la réalité.



Fig. 127 Définition et calcul du stock

Dans le cas étudié, au niveau de la caméra 6, il faut aussi effectuer une correction en prenant en compte les véhicules entrant et sortant d'Allmendweg.



Fig. 128 Impact du carrefour avec Allmendweg sur le calcul du stock

Le calcul du stock entre 15h30 et 18h30 sur les différents tronçons donne les résultats suivants :

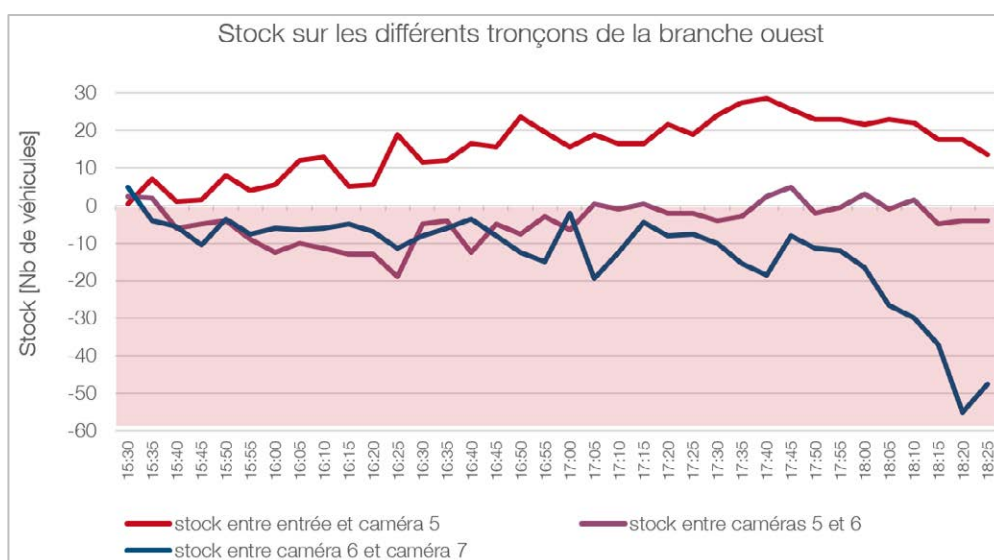


Fig. 129 Estimation du stock sur les différents tronçons en amont du giratoire

Pour les deuxièmes et troisièmes tronçons, les valeurs de **stock sont négatives** ce qui n'est pas possible dans la réalité. Ce problème pourrait venir d'erreurs dans les comptages effectués par le logiciel de traitement vidéo. Cependant, ces comptages ont été comparés avec des comptages « manuels » sur une courte période et les résultats étaient cohérents.

Ces stocks négatifs pourraient être liés à la présence d'intersections en amont du giratoire (accès à des zones résidentielles en majorité). Les véhicules sortant ou entrant au niveau des **intersections intermédiaires ne sont pas vus par les caméras et ne sont pas pris en compte dans les comptages.**

Dans tous les cas, les erreurs dans le calcul de stock vont s'accumuler sur la durée de la période étant donné que le stock à un instant t dépend de la valeur du stock à l'instant $t-1$.

Conclusion : L'évaluation du stock n'apporte pas de résultats utilisables. C'est un indicateur trop sensible qui nécessite une grande précision dans les comptages.

Evaluation des files d'attente

Les files d'attente théoriques ont été calculées à l'aide de la méthode gap acceptance à partir des capacités théoriques calculées précédemment. Sur le diagramme ci-dessous,

les lignes horizontales donnent le nombre de véhicules maximal que peut contenir chaque tronçon. Cette estimation est basée sur la longueur des tronçons et sur la place occupée par un véhicule dans la file d'après nos observations.

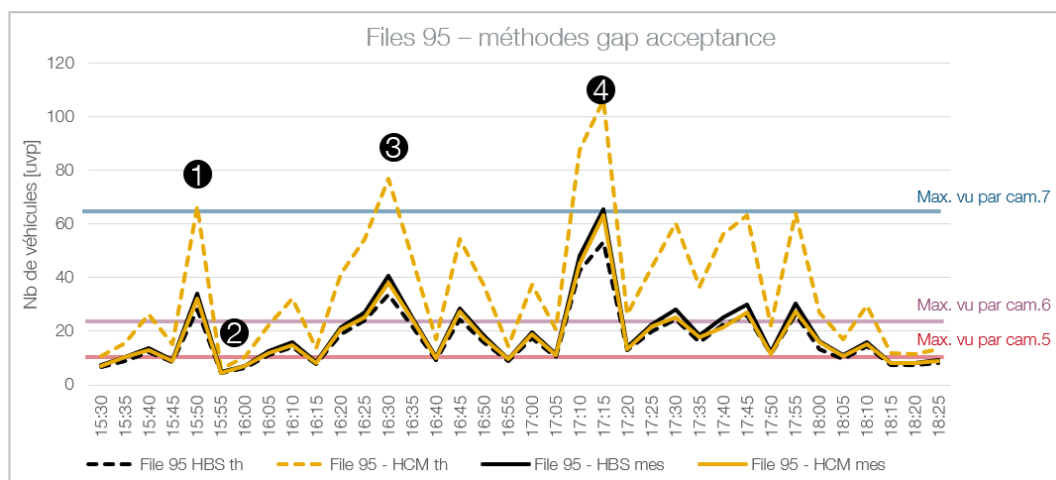


Fig. 130 Files d'attente 95 calculées avec la méthode « gap acceptance » - Comparaison avec le nombre de véhicules attendus par tronçon

Les différents résultats théoriques montrent des pics aux mêmes moments mais les volumes sont très différents. Afin de déterminer lequel des calculs est le plus proche de la réalité, les résultats ont été croisés avec une observation des vidéos à différents moments (repérés par les numéros au-dessus des courbes). En regardant une vidéo, il est possible de voir si une file remonte jusqu'à la caméra correspondante ou non (voir images ci-après).

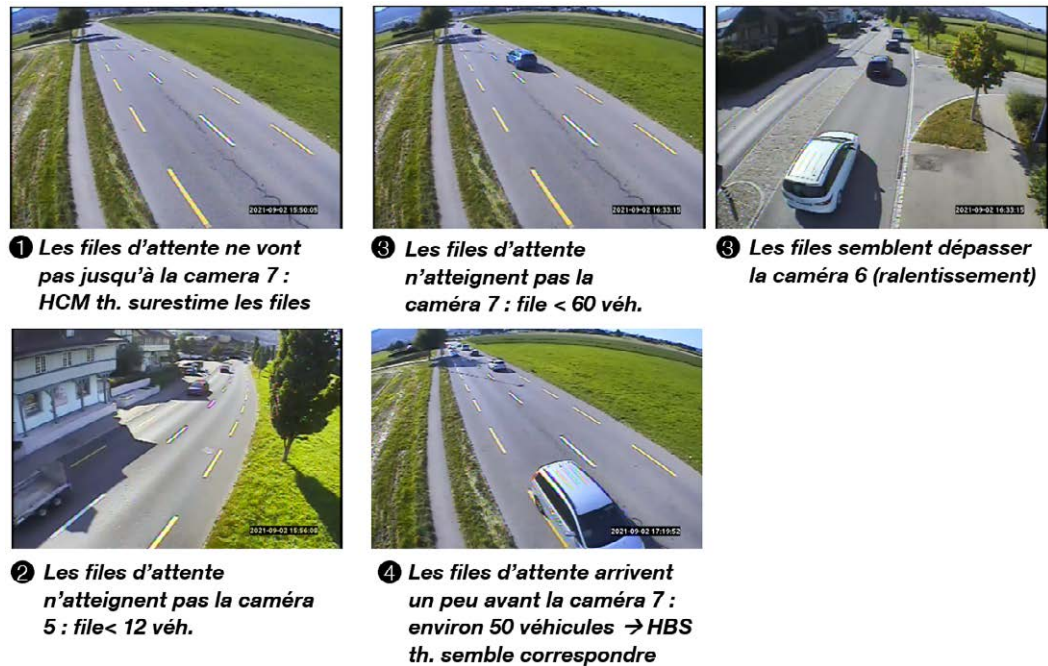


Fig. 131 Observation des files d'attente en différents points d'approche de la branche ouest

D'après les différentes observations, le calcul HCM utilisant les valeurs de paramètres théoriques semblent surestimer la réalité. D'après les calculs, les pics 1, 3 et 4 correspondent à des files qui devraient atteindre et même dépasser la caméra la plus éloignée du giratoire. Cela ne correspond pas à la réalité observée.

Les autres méthodes donnent des résultats assez similaires et plus proches de la réalité pour les pics principaux.

L'estimation a été réalisée à des moments précis et espacés. Afin d'obtenir une vision des files réelles plus fine, une estimation de leur longueur a été réalisée sur toute la période à intervalles de 5 min. par visionnage vidéo des 3 caméras. A noter, qu'il n'est pas possible de compter les voitures de la file sur la vidéo, la résolution étant trop faible et les distances trop grandes. Le nombre de véhicules est estimé approximativement en identifiant un type de situation :

- aucune file n'est visible (ex : 16h – cam. 5);
- une file est visible mais n'atteint pas la caméra (ex : 16h35 cam. 6 et 17h35 cam. 7);
- une file s'est formée et atteint presque la caméra;
- la file atteint la caméra;
- la file dépasse la caméra (ex : 18h – cam. 7);



Fig. 132 Estimation des longueurs de files d'attente par observation croisée des différentes vidéos

Il est ainsi possible de positionner des points de manière relative sur un graphique :

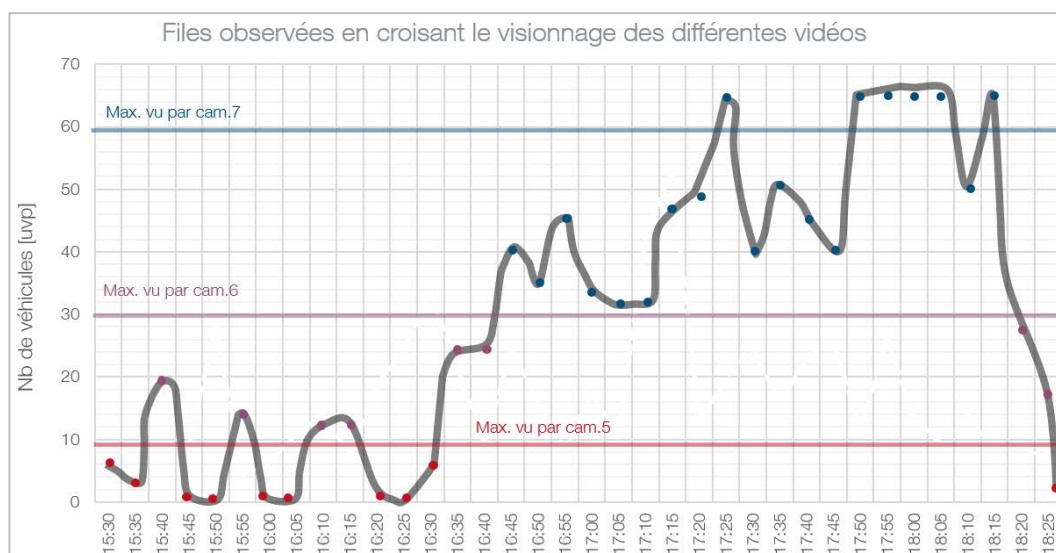


Fig. 133 Estimation des longueurs de files d'attente par observations vidéo

La comparaison des courbes obtenues par la théorie et de cette courbe obtenue par observation, permet différents constats :

- les pics de files obtenus par le calcul se retrouvent dans files observées mais avec un décalage de 5 min;
- les files calculées avec HCM et les valeurs de paramètres théoriques sont globalement surestimées;
- pour les autres méthodes, les ordres de grandeur ne sont pas toujours cohérents avec la réalité observée (ex : pic 6 et 7). Dans ce cas, HCM avec valeurs théorique est plus pertinent.

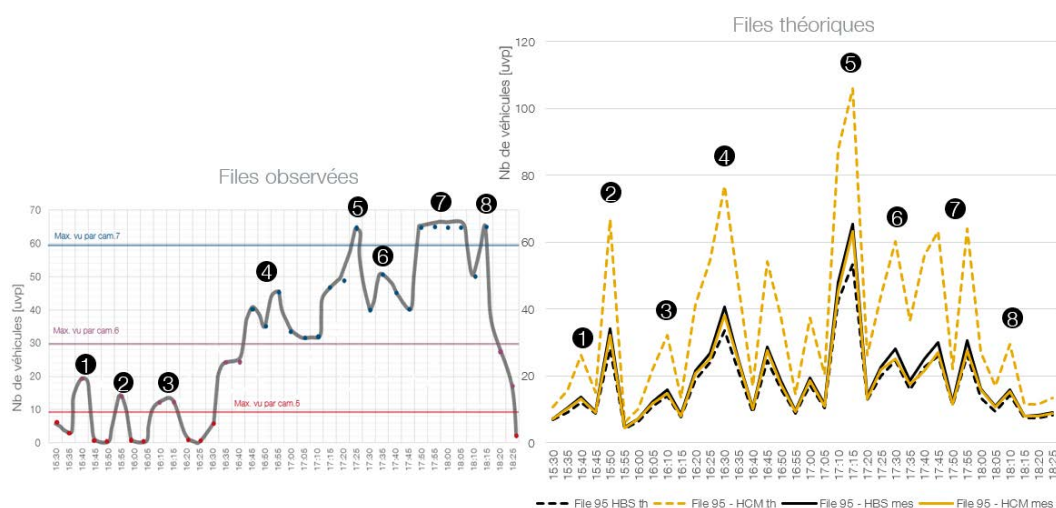


Fig. 134 Comparaison des files d'attente théoriques et obtenues par observation des vidéos

Il est donc difficile de conclure que la théorie reflète bien la réalité. Cependant cette comparaison aide à écarter les calculs qui ne sont pas pertinents (HCM avec paramètres théoriques ici).

16.3.4 Analyse des densités de trafic et des vitesses pour le cas de Belp

Le cas de Belp présente de longues remontées de files d'attente (jusqu'à 1 km) qui ont été étudiées sur trois tronçons en amont du giratoire. Les capacités utilisées et les remontées

de files ont été estimées sur ces trois tronçons en utilisant les calculs théoriques gap acceptance (HBS/HCM), et par observation en visionnant les vidéos.



Fig. 135 Approche du giratoire de Belp avec positionnement des différentes caméras

Pour ce cas, les charges et la capacité théorique variaient peu au cours du temps. Le flux de véhicules en approche reste relativement élevé et aucune période de pointe très nette n'est observée.

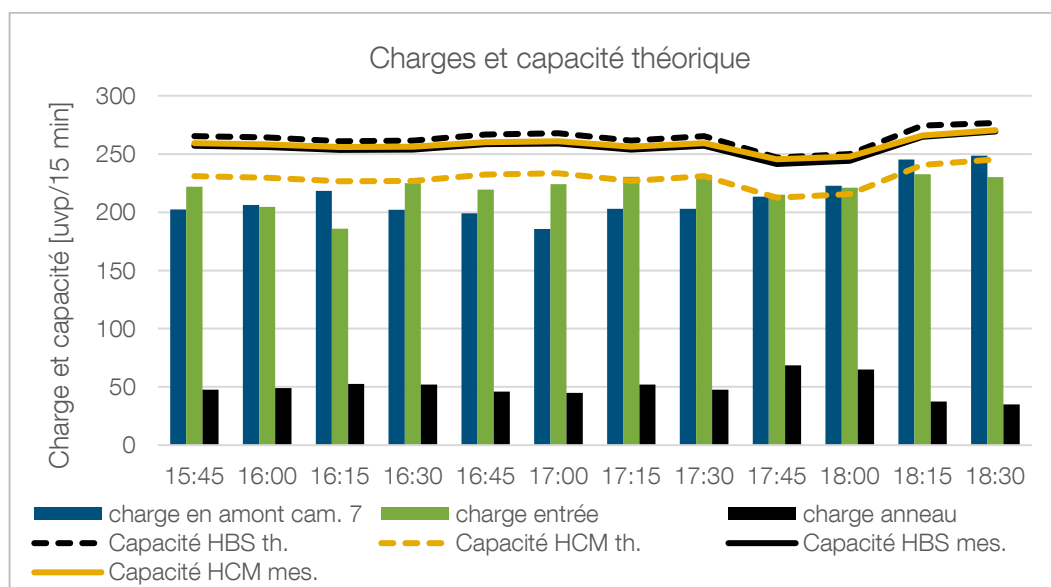


Fig. 136 Cas de Belp – Variation des charges et de la capacité d'écoulement « gap acceptance »

L'étude s'est surtout portée sur les estimations de files d'attente qui ont été obtenues de deux manières :

- par calcul théorique avec la méthode gap acceptance;
- par estimation visuelle en visionnant les vidéos.

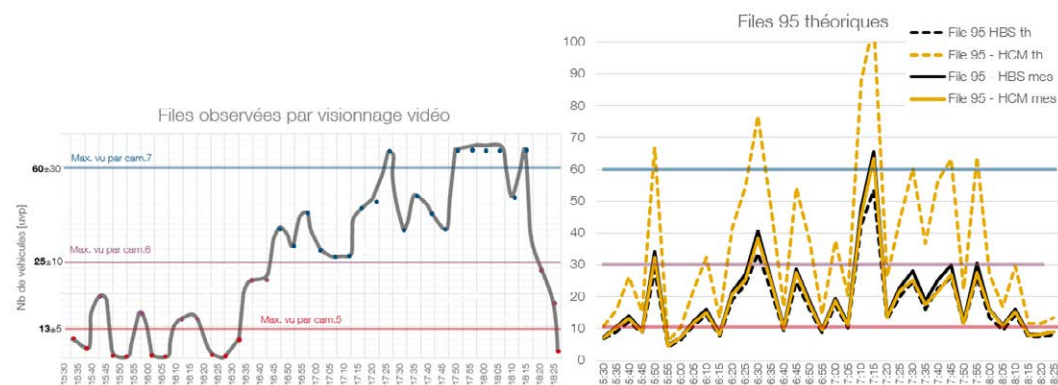


Fig. 137 Comparaison des files d'attente théoriques et obtenues par observation des vidéos

Les observations vidéo ont permis de constater des files remontant jusqu'à 1 km en amont du giratoire. Cependant, **le calcul de files théoriques est peu cohérent avec les files observées**. Les pics de file ne sont pas observés exactement au même moment et les ordres de grandeur sont différents.⁴

Les calculs de files n'ayant pas donné des résultats permettant de bien refléter la réalité, une analyse des vitesses et des densités de trafic a été réalisée sur ce même giratoire, pour les trois tronçons précédemment étudiés. Ces résultats ont été comparés aux longueurs de files relevées visuellement :

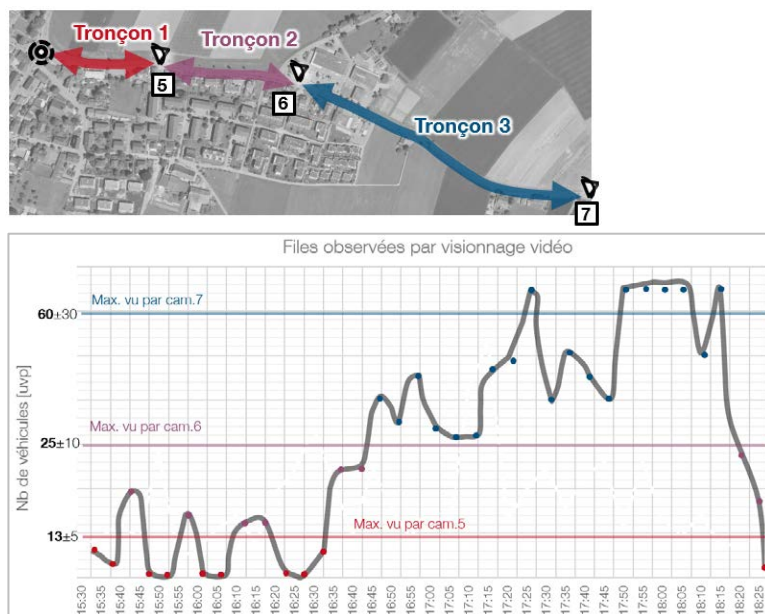


Fig. 138 Longueurs de file relevées visuellement et comparaison avec le nombre de véhicules maximal admissible par tronçon

⁴ Les longueurs de files estimées visuellement ont été ajustées après coup. En effet, au départ, la place occupée par un véhicule (distance inter-véhiculaire comprise) avait été estimée à 15 m. Une évaluation plus fine a été réalisée ultérieurement en mesurant les **distances inter-véhiculaires réelles sur cinq minutes au moment du pic de file et au niveau de chaque caméra**. Pour définir la graduation de la courbe, une valeur moyenne a été utilisée et l'écart type a été pris en compte.

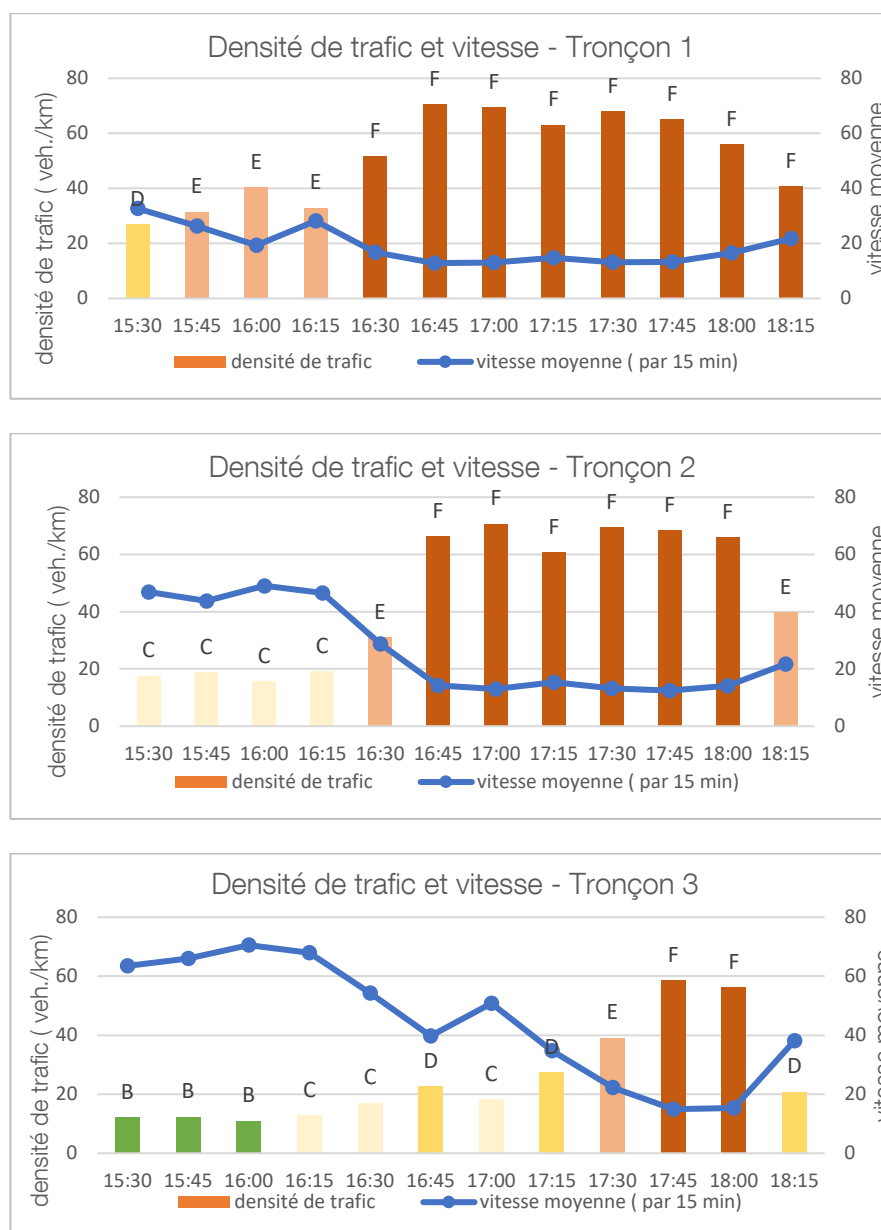


Fig. 139 Evolution de la densité de trafic et de la vitesse des véhicules sur les trois tronçons en amont du giratoire

Densité de trafic sur le tronçon 1

A partir de 16h30, la **densité de trafic augmente**, ce qui correspond au **début de la formation d'une file d'attente** dépassant le tronçon 1. A partir d'une certaine longueur de file (16h45), la vitesse sur le tronçon 1 reste stable et très ralentie. La densité de trafic commence à baisser vers 17h45, et ce avant que la file ne décroisse. Il y a donc une inertie liée au temps nécessaire pour écouler le stock.

Densité de trafic sur le tronçon 2

La densité de trafic commence à augmenter plus tard que sur le tronçon 1 (vers 16h45), une fois que la file a rempli le tronçon 2. La densité de trafic diminue avant que la file ne décroisse, mais cela se fait de manière plus progressive que sur le tronçon 1.

Densité de trafic sur le tronçon 3

A partir de 16h30, la vitesse diminue même si la file est encore courte et la densité de trafic augmente un peu. On peut observer deux phases :

- 16h15-17h30 : il n'y a **pas de file** ou seulement une file courte dans le tronçon 3. Cependant, **un fort ralentissement est constaté**;
- 17h45-18h15 : **la file dépasse le tronçon 3 et la densité de trafic est élevée**. Cela correspond à une situation de blocage.

Même si aucune file bien définie n'est constatée, un ralentissement important peut donc signaler une congestion en formation.

Constats globaux

- **L'analyse met clairement en évidence la corrélation entre densité de trafic et files d'attente** : le niveau de service F correspond à une file fortement ralentie remplissant le tronçon étudié.
- L'apparition d'une file se produit en même temps que la densification du trafic. Cependant, **la file se met à décroître avec un décalage comparé à la diminution de densité** de trafic. Ceci correspond à l'inertie liée à la libération du stock.
- Plus que les valeurs absolues, **les variations de vitesse et de densité indiquent l'apparition d'une congestion** et cela même si une file n'est pas encore clairement constituée.

Densité de trafic et vitesse sont des indicateurs intéressants, qui permettent de mettre en évidence les conséquences d'un problème de capacité ou de blocage extérieur. Cependant, Il n'existe pas de modèle théorique permettant d'estimer les files et les densités de trafic. Ces indicateurs ne sont donc utilisables que pour étudier des situations actuelles où des mesures sont possibles. Il serait intéressant d'obtenir une corrélation entre files théoriques et densité de trafic afin de pouvoir déduire cet indicateur pour des situations projetées. Cependant, les calculs de files théoriques ne sont pas forcément cohérents avec la réalité. Il paraît donc difficile d'établir une corrélation fiable.

16.3.5 Analyse des incohérences entre files théoriques et files observées

Pour rappel, **les files sont calculées à partir de la capacité théorique et de la charge en amont**. Si l'on analyse le cas de Belp, **les charges et la capacité varient peu**. On ne devrait donc pas obtenir de longues files par le calcul théorique. Ce n'est pas le cas avec le calcul toutes les cinq minutes par les méthodes gap acceptance. En effet, des petites fluctuations de capacité se traduisent par de plus grosses fluctuations de file.

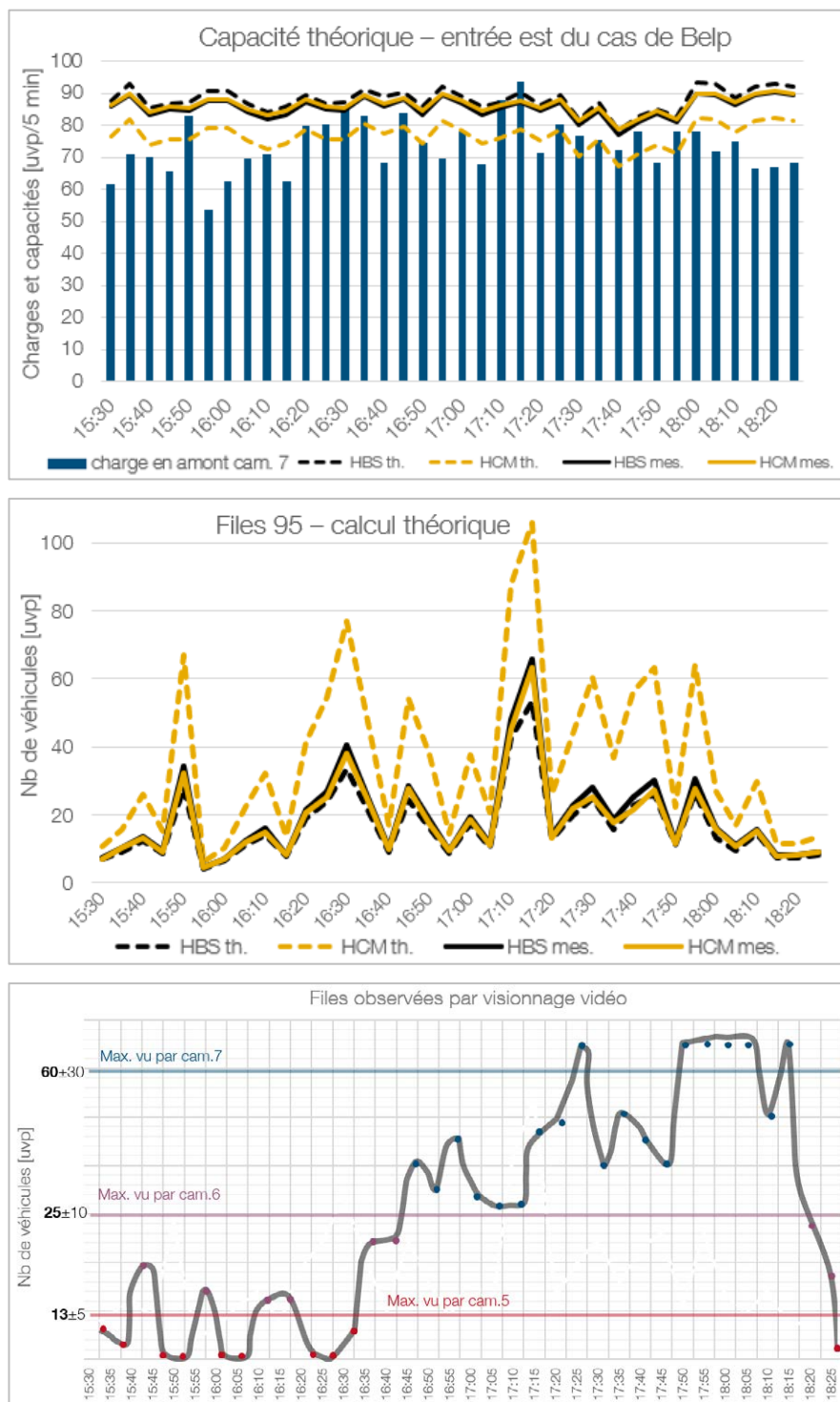


Fig. 140 Comparaison des charges et de la capacité dynamiques avec les estimations de file d'attente

Le calcul de file toutes les cinq minutes a été comparé à un calcul effectué avec une précision de quinze minutes.

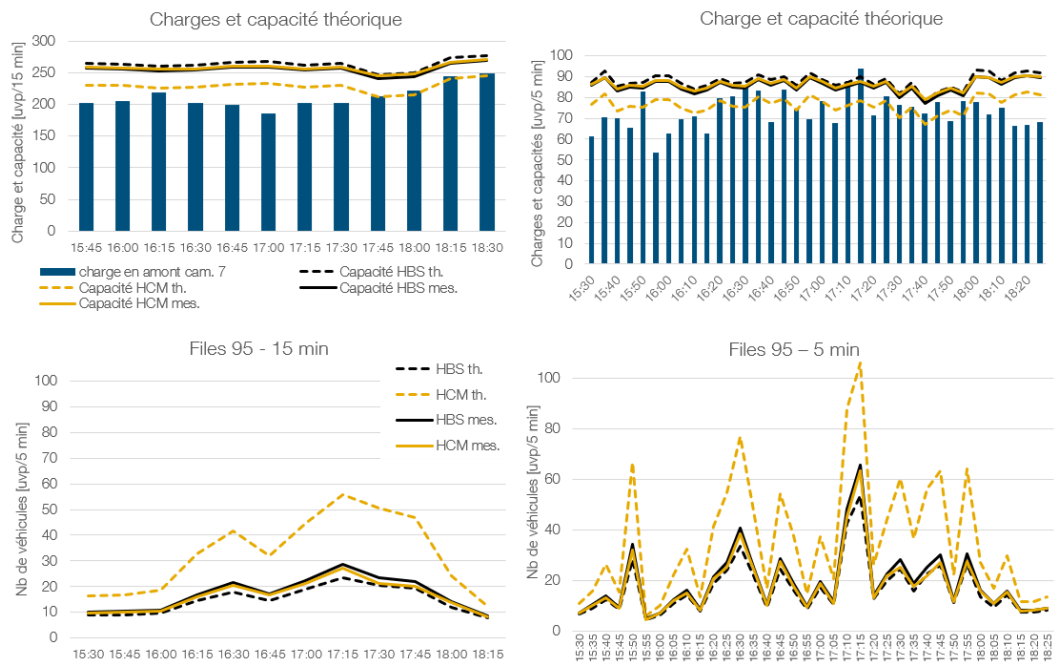


Fig. 141 Comparaison des files d'attente calculées avec une précision de 5 minutes et 15 minutes

Le calcul effectué avec une granularité de quinze minutes donne des longueurs de files bien moins importantes que celui effectué avec une granularité de cinq minutes. **Le « bruit » engendré par des petites fluctuations de charge/capacité n'est pas présent et le résultat est plus lisible. Il est donc intéressant de comparer différents focus afin de choisir le bon compromis entre précision et lisibilité des résultats.**

Cependant, dans ce cas, aucune des courbes ne permet de refléter la réalité puisqu'à 18h, aucune file importante n'est révélée (contrairement aux observations in situ). **Si la variation de charge ne permet pas d'expliquer la création de files, c'est peut-être qu'un autre paramètre impactant la capacité (et donc les longueurs de file) manque dans le calcul théorique.**

16.3.6 Influence de la vitesse à l'anneau sur la capacité du giratoire

La densité de trafic et la vitesse des véhicules à l'anneau a été mesurée et comparée avec les files observées sur la branche est :

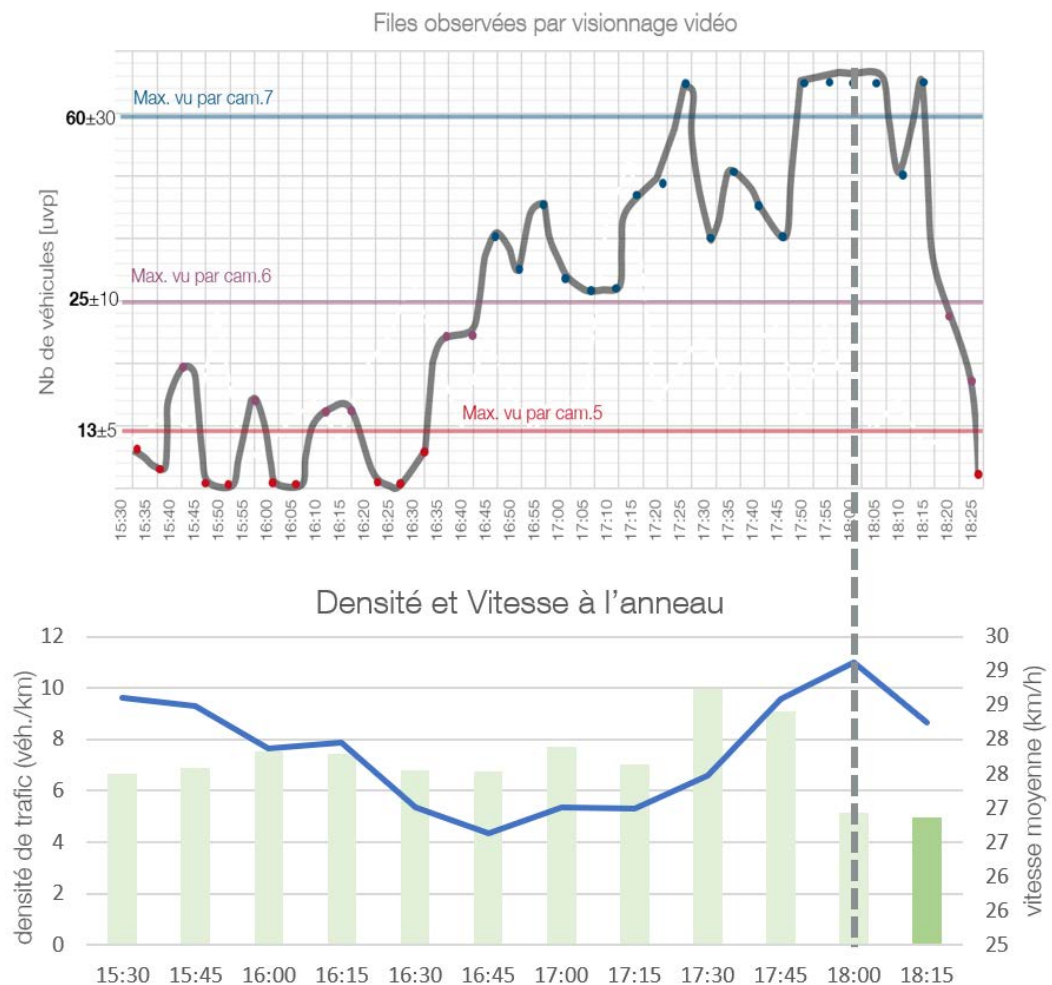


Fig. 142 Comparaison entre la vitesse à l'anneau et les longueurs de files observées

A 18h, on remarque que la **vitesse des véhicules à l'anneau augmente légèrement (+1%)**. Cela pourrait faire baisser la capacité de manière plus importante que ce que prédisent les calculs théoriques. En effet, les véhicules entrants auraient plus de difficultés à s'insérer.

Cependant, il est étonnant qu'une variation de vitesse si légère exerce une telle influence sur la capacité. Le lien entre vitesse à l'anneau et capacité devra donc être étudié plus finement avant de tirer des conclusions.

Si cette corrélation se vérifie, les calculs de capacité devraient évoluer pour prendre en compte la vitesse à l'anneau et ainsi mieux refléter la réalité.

16.4 Synthèse des enseignements

16.4.1 Influence des traversées piétonnes sur la capacité utilisée

Le cas de Belp présente peu de piétons et de vélos sur les traversées en entrée et sortie de giratoire (moins de 100/h). La capacité n'est donc pas impactée par les passages piétons.

Ainsi, il n'est pas utile de prendre en compte les traversées piétonnes dans le calcul de capacité utilisée si le nombre de personnes les empruntant est en dessous de 100/h.

Afin de mieux comprendre l'influence des passages piéton sur la capacité utilisée, un autre cas d'étude plus pertinent devra être trouvé.

16.4.2 Utilisation du stock comme nouvel indicateur

L'évaluation du stock ne donne pas de résultats pertinents. Cet indicateur est très sensible et nécessite d'avoir des comptages vraiment précis. Par ailleurs, si des intersections existent sur le tronçon étudié, il faudrait normalement effectuer des comptages à chacun de ces carrefours. Sans cela, les véhicules entrants et sortant ne sont pas bien comptabilisés et peuvent venir fausser le stock.

En conclusion, l'utilisation de cet indicateur n'est pas recommandée pour l'évaluation du fonctionnement d'un giratoire. En cas d'utilisation, il est très important de vérifier la précision des comptages en effectuant des comparaisons avec la réalité.

16.4.3 Positionnement des caméras

Le positionnement des caméras sur la branche d'approche est primordial afin de réaliser des comptages pertinents. Il est important de prendre en compte la totalité de la demande exprimée en amont du giratoire. Pour cela, une caméra doit être placée en amont de la file maximale pouvant être générée. L'utilisation de Google trafic est très utile pour avoir une idée de la longueur des files mais aussi des heures de pointe. Il est donc recommandé d'utiliser cet outil afin de définir les conditions de mesure sur le terrain : position des caméras et horaires de mesure.

Si les files attendues sont longues, il est intéressant de positionner plusieurs caméras en approche du giratoire afin de faciliter la comparaison entre files théoriques et réalité. Il est recommandé de positionner les caméras de façon à pouvoir observer la totalité du tronçon pouvant être occupé par une file.

16.4.4 Pertinence des calculs de files théoriques - méthode gap acceptance

Les calculs de files théoriques effectués avec la méthode gap acceptance donnent des résultats assez différents de la réalité observée. Les tendances dans les variations de longueurs de files sont assez similaires mais les **pics théoriques sont décalés dans le temps** par rapport aux observations. D'autre part, **les longueurs de files données par le calcul peuvent être assez éloignées de la réalité**, selon la méthode utilisée. Il est donc important de passer par une étape de calibrage afin d'écarter les théories trop éloignées de la réalité et de conserver les plus proches.

17 Glossaire

Acronyme	Signification
C_E	Capacité théorique d'écoulement
CEREMA	Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (établissement public Français)
CU	Capacité utilisée
ETHZ, IVT	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme <i>Acronyme utilisé dans le rapport pour parler des formules de calcul de capacité développées par l'ETH de Zürich</i>
HBS	Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (Deutschland) <i>Acronyme majoritairement utilisé dans le rapport pour parler de la méthode de calcul de CU par gap acceptance qui y est décrite.</i>
HCM	Highway Capacity Manual (from US Department of Transportation, Federal Highway Administration) <i>Acronyme majoritairement utilisé dans le rapport pour parler de la méthode de calcul de CU par gap acceptance qui y est décrite.</i>
$HBS_{th.}/HCM_{th.}$	Calculs de capacité effectués avec les méthodes gap acceptante tirés de HBS ou HCM et utilisant les valeurs théoriques des paramètres « critical gap » et « follow-up time »
$HBS_{mes.}/HCM_{mes.}$	Calculs de capacité effectués avec les méthodes gap acceptante tirés de HBS ou HCM et utilisant les valeurs mesurées des paramètres « critical gap » et « follow-up time »
HPM	Heure de pointe du matin
HPS	Heure de pointe du soir
OFROU	Office Fédéral des Routes
Q_A	Charge de trafic sur l'anneau du giratoire
Q_E	Charge de trafic à l'entrée du giratoire
Q_S	Charge de trafic sortant du giratoire
TEA	Unité Transport, Environnement, Aménagement de l'Institut des Transports et de Planification (ITEP) - EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne <i>Acronyme majoritairement utilisé dans le rapport pour parler de la méthode de calcul de CU par gap acceptance qui y est décrite.</i>
THD	Trafic Horaire Déterminant
TJM	Trafic Journalier Moyen
TP	Transport Public
UV/UVp	Unités Véhicules/Unités Véhicules Particuliers
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) <i>Acronyme majoritairement utilisé dans le rapport pour parler de la méthode de calcul de CU par gap acceptance qui est décrite dans la norme VSS.</i>

18 Bibliographie

Rapports et Documentations

- (1) Bie J., Lo H., Wong S. (2010), "Capacity Evaluation of multi-lane traffic roundabout", University of Twente, The Netherlands and Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong
- (2) Daganzo C. (1997), "Fundamentals of Transportation and Traffic: Cumulative plots", Emerald Group, Bingley
- (3) Griffith University, Australia, Ren L. (2017), "New Capacity Models for Roundabouts", Thesis, South East Queensland, Australia
- (4) Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT der ETH Zürich (2004), "Leistungsfähigkeit hoch belasteter Kreisel - (Grundlagen)", Forschungsbericht VSS 1998/076, Zürich
- (5) Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT der ETH Zürich, SNZ Ingenieure und Planer, Lehrstuhl für Verkehrswesen Universität Bochum (2009), "Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel", Forschungsbericht VSS 2005/301, Zürich
- (6) Qu Z., Duan Y., Hu H., Song X. (2014), "Capacity and Delay Estimation for Roundabouts Using Conflict Theory", Jilin University, China
- (7) Shaikh A. (2014), "Capacity-Related Driver Behaviour on Modern Roundabouts built on High-Speed Roads", Thesis, Purdue University, U.S.
- (8) Institut für Wirtschaftsstudien Basel IWSB, Karlsruher Institut für Technologie KIT, SNZ Ingenieure und Planer (2016), «L'homogénéisation de la charge de trafic – briser les pics », Forschungsbericht SVI 2013/001.
- (9) Emch+Berger (1990), «Empirische Ermittlung der Leistungsfähigkeit von innerörtlichen Kreisverkehrsplätzen», Forschungsbericht VSS 3/89, Zürich

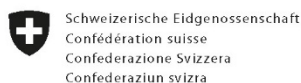
Normes

- (10) Association suisses des professionnels de la route et des transports VSS (2019), "Capacité, niveau de service, charges compatibles - Carrefours giratoires", 40 024a.
- (11) Association suisses des professionnels de la route et des transports VSS (2019), "Recensements dans les transports", 40 002.
- (12) Association suisses des professionnels de la route et des transports VSS (2019), "Trafic déterminant", 40 016a.
- (13) Association suisses des professionnels de la route et des transports VSS (2019), "Capacité, niveau de service, charge compatibles : route à deux voies de circulation sans séparation physique de sens de circulation", 40 016a.

Guides

- (14) Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques Certu (2015), "Girabase Version 4.0 - Calcul de capacité de carrefour giratoire", Girabase.
- (15) Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV (2015), "Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen", HBS 2015.
- (16) Institut des Transports et de Planification de l'EPFL - Unité TEA, Transitec, Urbaplan (1991), "Guide suisse des giratoires", TEA 1991.
- (17) Transport and Road Research Laboratory TRRL (1979), "Traffic queues and delays at road junctions", Kimber R. and Hollis E., TRRL 1979
- (18) U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration FHA (2000), "Roundabouts: an informational guide", HCM 2000.
- (19) U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration FHA (2010), "Roundabouts: an informational guide - Second Edition", HCM 2010.

19 Clôture du projet



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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 16.01.2023

Données de base

Projet N° : VSS 2018/231

Titre du projet : Capacités utilisées des giratoires en situation saturée

Echéance effective : 31.03.2023

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche établit une nouvelle méthodologie pour produire des diagnostics approfondis de carrefours giratoires et introduit l'utilisation de la méthode de calcul dite "gap acceptance". La méthodologie "enrichie" produite par le projet de recherche se base sur les principes suivants :

- le protocole expérimental est plus approfondi qu'un simple comptage au carrefour : le périmètre et la période de comptages sont suffisamment larges et les comptages doivent être faits par tranches de 15 minutes pour produire des calculs de capacité dynamiques.
- plusieurs méthodes de calculs sont utilisées et comparées, accompagnées de tests de sensibilité.
- si l'étude est très exigeante en termes de précision, il peut être utile de déterminer les paramètres locaux plutôt que d'utiliser des paramètres standards;
- une phase de calibrage doit permettre de comparer les résultats des remontées de files d'attente ou des temps d'attente avec les mesures sur le terrain, pour vérifier que les méthodes de calculs soient représentatives.
- lorsqu'une congestion dans l'anneau se produit à cause d'un refoulement en aval, ces épisodes doivent être détectés ou anticipés car les méthodes de calculs classiques sont alors invalides. Il faut alors considérer que la capacité est nulle ou qu'une capacité « de courtoisie » permet tout de même aux véhicules en insertion de passer entre deux véhicules à l'arrêt dans l'anneau.
- pour les giratoires à deux voies dans l'anneau, un calcul de capacité est produit pour chacune des voies, puis on vérifie si elles se gênent entre elles ou pas.
- la mesure des densités de trafic permet de quantifier l'état du trafic et de détecter des congestions qui ne ressortent pas d'un simple comptage des flux.

Ces résultats constituent une nouvelle approche plus exigeante mais aussi plus fiables pour répondre aux situations saturées. Elles restent valables dans les situations non saturées. La méthodologie est partiellement applicable aux situations futures.

Atteinte des objectifs :

Les buts du projet de recherche ont été atteints :

- 1 - les pratiques actuelles ont été décrites et évaluées, leurs faiblesses identifiées. Il ne fait plus doute que l'application stricte du calcul de la VSS à une valeur horaire ne permet pas de détecter des situations saturées, qu'elle manque de fiabilité et qu'elle n'est pas applicable dans un grand nombre de cas.
- 2 - les particularités d'une situation saturée ont été identifiées. Ces particularités justifient de développer des méthodologies et méthodes de calculs particulières, qui sont plus complexes à étudier.
- 3 - une méthodologie et des méthodes de calcul ont été élaborées et testées. Le traitement vidéo permet un diagnostic dynamique, multi-méthodes, multimodal et calibré. Celui-ci peut être répliqué pour les prochaines études de giratoires complexes.

Déductions et recommandations :

Le projet de recherche permet d'aboutir aux déductions et recommandations suivantes :

- les méthodes actuelles présentent de nombreuses lacunes, en particulier dans les situations saturées/congestionnées;
- la combinaison des caméras-vidéos et du traitement logiciel ouvre des portes à des diagnostics plus approfondis, dynamiques, voie par voie, avec des paramètres locaux;
- la définition d'une nouvelle méthodologie normative est recommandée : elle doit être dynamique, calibrée et systémique;
- les mesures de densité de trafic sont essentielles car elles complètent la description;
- l'influence de la vitesse sur les capacités d'insertion mériterait de faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Publications :

Chef/cheffe de projet :

Nom : Hänggi

Prénom : Christian

Service, entreprise, institut : Transitec Ingénieurs-Conseils SA

Signature du chef/de la cheffe de projet :



RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Les différents objectifs du projet de recherche sont atteints. Le rapport de recherche montre les nombreuses lacunes des méthodologies actuelles et notamment pour les giratoires en situation de congestion. Il définit une ligne directrice d'une nouvelle méthodologie normative demandant un diagnostic plus approfondi de la situation. Celle-ci consiste en une analyse regroupant plusieurs méthodes existantes et se base sur des observations et traitement de données vidéo. Au final, les situations pouvant être très différentes d'un état de saturation à l'autre, la méthodologie suggérée tend à donner des résultats de capacité utilisées sous forme de fourchettes, plutôt que de valeurs fixes connues actuellement. Celles-ci, couplées aux observations de terrain, ont permis de donner de bons résultats sur les 4 cas analysés dans la recherche.

Mise en oeuvre :

Le projet de recherche doit servir de base à l'élaboration de normes dédiées à cette catégorie de carrefour. Il donne une excellente base pour la révision des normes sur les giratoires. Les résultats ne peuvent en revanche pas être immédiatement utilisés puisque le rapport ne présente pas une méthode claire et laisse certaines questions en suspens. Celles-ci devront être approfondies dans le cadre d'un projet de recherche à venir (éventuellement celui sur l'élaboration des giratoires visant à l'élaboration des futures normes sur les giratoires).

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

L'influence de la vitesse sur les capacités d'insertion ou l'influence de la mobilité douce mériteraient d'être mieux analysés.

Influence sur les normes :

VSS 40 024a « Capacités, niveau de service, charges compatibles ; carrefours giratoires »
VSS 40 263 « Carrefours giratoires »

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Cuttelod

Prénom : David

Service, entreprise, institut : Président NFK 2.2 et de la commission de suivi, DGMR Etat de Vaud

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

