



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

Planification et conception des turbo-giratoires

Planung und Entwurf der Turbokreisverkehr

Planning and design of turbo-roundabouts

RGR Robert-Grandpierre et Rapp SA
Patrick Maillard
Sébastien D'Hervé
Maria del Carmen Arias Lopez

bisa bureau d'ingénieurs SA
Xavier Robyr
Pauline Revaz

Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg HEIA-FR
Institut des Technologies de l'Environnement Construit iTEC
Prof. Marc-Antoine Fénart

Projet de recherche VSS 2018/230 sur demande de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Juin 2022

1726

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

Planification et conception des turbo-giratoires

Planung und Entwurf der Turbokreissverkehr

Planning and design of turbo-roundabouts

RGR Robert-Grandpierre et Rapp SA
Patrick Maillard
Sébastien D'Hervé
Maria del Carmen Arias Lopez

bisa bureau d'ingénieurs SA
Xavier Robyr
Pauline Revaz

Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg HEIA-FR
Institut des Technologies de l'Environnement Construit iTEC
Prof. Marc-Antoine Fénart

**Projet de recherche VSS 2018/230 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Patrick Maillard, RGR Robert-Grandpierre et Rapp SA
Marc-Antoine Fénart, HEIA-FR

Membres

Xavier Robyr (bisa)
Sébastien d'Hervé (RGR)
Pauline Revaz (bisa)
Maria del Carmen Aria Lopez (RGR)
Adil Hussain-Khan (RGR)
Tobias Wegmann (RGR)
Stive Azinheirinha (bisa)
Mathieu Lillaz (RGR)

Commission de suivi

Président

Alain Broye

Membres

David Cuttelod
Cindy Freudenthaler
Florian Meyer
Gianantonio Scaramuzza
Vesna Stankovic
Frédéric Stoppa
Roman Zürcher

Auteur de la demande

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

Source

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

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1 Introduction	13
1.1 Situation actuelle, problématique	13
1.2 Plan de recherche et structure du rapport	13
1.3 Motivation et objectifs du projet de recherche	14
2 Etat des connaissances	15
2.1 Méthode et but du traitement de la littérature	15
2.2 Etat de la recherche au niveau national	16
2.3 Etat de la recherche au niveau international	16
2.4 Eléments de base	16
2.5 Tableaux croisés littérature – éléments de base	17
2.6 Synthèse des éléments de base dans la recherche littéraire	29
3 Définition des éléments de base	37
3.1 Matrice des éléments de base	37
3.2 Synthèse des éléments de base	37
4 Etudes de cas	39
4.1 Turbo-giratoires à travers le monde	39
4.2 Turbo-giratoires en Suisse	40
4.3 Sites retenus	42
4.4 Matrices d'application des éléments de base	43
4.5 Glättimüli	44
4.6 Lavapesson	45
4.7 Particularités des sites	46
4.8 Synthèse des études de cas	47
5 Evaluation des éléments de base	49
5.1 Conditions d'implantation, localisation	49
5.1.1 Recommandations	50
5.2 Capacité, conditions de trafic	50
5.2.1 Comptages sur site	50
5.2.2 Conditions de trafic	50
5.2.3 Evaluation en capacité	51
5.2.4 Théorie du dimensionnement du trafic – Bases de calcul	54
5.2.5 Simulations de trafic	55
5.2.6 Glättimüli	58
5.2.7 Définition des paramètres pas à pas	61
5.2.8 Détermination de la capacité d'une voie d'entrée	64
5.2.9 Adaptation des paramètres	64
5.2.10 Détermination du niveau de service	64
5.2.11 Recommandations	66
5.3 Géométrie	67
5.3.1 Evaluation des giratoires suisses	67
5.3.2 Voies d'entrées	68
5.3.3 Angle d'entrée	68
5.3.4 Combinaison d'éléments géométriques et d'équipements	69
5.3.5 Îlot directionnel	69

5.3.6	Îlot central et surface semi-franchissable	70
5.3.7	Distances de visibilité	70
5.4	Méthode de dimensionnement géométrique adaptée	74
5.4.1	Véhicules déterminants	74
5.4.2	Turbo-giratoire à quatre branches	75
5.4.3	Turbo-giratoire à trois branches	78
5.5	Équipements	81
5.5.1	Séparateurs de voies	81
5.5.2	Signalisation horizontale	81
5.5.3	Signalisation verticale	84
5.5.4	Eclairage public	86
5.6	Entretien	86
5.6.1	Evacuation des eaux	86
5.6.2	Entretien hivernal	87
5.7	Comportement des usagers	87
5.8	Intégration des modes doux	97
5.8.1	Trafic cyclable	97
5.8.2	Trafic piétonnier	101
5.8.3	Cas d'étude	101
5.9	Sécurité routière	101
5.9.1	Points de conflits	102
5.9.2	Vitesse	103
5.9.3	Pondération de l'impact positif sur la sécurité routière	103
5.10	Synthèse	104
6	Cartographie des turbo-giratoires	107
6.1	Méthode de choix de variante	107
6.2	Catalogue des turbo-giratoires	109
6.3	Éléments de turbo-giratoires, équipements, recommandations	112
7	Recommandations en vue d'une normalisation	115
8	Conclusions et recommandations	117
8.1	Conclusions	117
8.2	Recommandations	117
8.3	Propositions de recherches ultérieures	118
	Annexes	119
	Glossaire	133
	Bibliographie	135
	Clôture du projet	139

Résumé

Dans le contexte des carrefours giratoires à deux voies ou plus à l'anneau, le turbo-giratoire est un aménagement encore peu représenté et connu en Suisse alors qu'il a fait ses preuves à l'étranger, notamment aux Pays-Bas, pays précurseur dans la mise en œuvre de ce type d'aménagement.

Le turbo-giratoire, dont le nom provient de la forme géométrique de son centre similaire à celle d'une turbine, a pour principale caractéristique de proposer une séparation des flux de circulation à l'anneau, contrairement aux giratoires conventionnels dans lesquels des changements de voies peuvent s'y produire. De fait, il offre un avantage important en termes de sécurité routière notamment en réduisant de l'ordre de 50% le nombre de points de conflits, lieux potentiels d'accidents, ce qui en fait l'un de ses principaux atouts.

En Suisse, ce type d'aménagement n'est encore que peu représenté et ce notamment en raison d'un vide normatif en la matière. En ce sens, ce mandat de recherche constitue la première étape afin de mieux connaître cette solution et en vue de palier au déficit normatif actuel.

La présente recherche s'est tout d'abord penchée sur la littérature internationale en la matière afin de définir les éléments de base à analyser en termes de planification, de conception et de dimensionnement des turbo-giratoires.

Ces éléments de base ont ensuite été analysés et évalués individuellement à l'aide d'approches théoriques (exemples : dimensionnement géométrique, équipements) ou d'approche empirique simulée (exemple : dimensionnement en capacité).

Les résultats obtenus ont été confrontés aux relevés réalisés sur deux aménagements monitorés en Suisse, le turbo-giratoire de Glättimüli sur la commune de Steffisburg (canton de Berne) et l'aménagement provisoire en turbo-giratoire partiel réalisé lors des travaux du pont sur le Lavapesson sur la commune de Granges-Paccot (canton de Fribourg). Un monitoring de turbo-giratoires à l'étranger n'a pas pu être réalisé en raison de la pandémie COVID-19 et aux restrictions correspondantes de déplacements.

Les informations glanées lors de l'analyse de la littérature internationale ou issues d'autres aménagements réalisés ont permis de consolider ou d'orienter les propositions et recommandations émises sur les différents éléments de base.

Comparativement à un giratoire conventionnel à deux voies ou plus à l'anneau, principal aménagement en concurrence avec un turbo-giratoire, un turbo-giratoire offre les avantages suivants : amélioration notable de la sécurité routière, augmentation de la capacité sur les flux principaux. Toutefois, l'inconvénient majeur des turbo-giratoires consiste en une diminution potentielle de la capacité sur les flux secondaires.

Afin de profiter pleinement des avantages de sécurité, il est conseillé d'utiliser des séparateurs de voies dans l'anneau. Cependant cela implique une emprise plus importante et des difficultés liées à l'entretien et à l'évacuation des eaux. Si ces contraintes ne sont pas résolues, une solution sans séparateurs physiques et uniquement du marquage est aussi admissible. Il faut noter que, comme tout nouvel aménagement, l'utilisation d'un turbo-giratoire nécessite une période d'adaptation des usagers et une bonne campagne de communication.

Pour conclure, il ressort de ce mandat de recherche que lors de l'évaluation de la conception d'un giratoire à deux voies ou plus à l'anneau, une variante en turbo-giratoire devrait toujours être analysée et que cette solution risque d'être retenue dans la majorité des cas vis-à-vis de la variante conventionnelle, dans la mesure où elle offre un avantage considérable en termes de sécurité routière.

Si les résultats de cette recherche permettront vraisemblablement d'établir une base normative pour la planification, la conception et le dimensionnement des turbo-giratoires, il est important de garder à l'esprit que des ajustements ou des validations de certains éléments (méthode de dimensionnement géométrique, méthode de dimensionnement en capacité, ...) s'avèreront nécessaires sur la base d'expériences réalisées dans le contexte suisse.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Kreisel mit zwei oder mehr Fahrspuren am Ring ist der Turbokreisverkehr in der Schweiz noch wenig vertretene und bekannte, während er sich im Ausland bewährt hat, insbesondere in den Niederlanden, einem Land, das bei der Umsetzung diese Entwicklung Vorreiter war.

Das Hauptmerkmal des Turbokreisverkehrs, dessen Name sich von der geometrischen Form seines Zentrums ableitet, die der einer Turbine ähnelt, besteht darin, dass er im Gegensatz zu konventionell Kreisel, in denen ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, eine Trennung der Verkehrsströme am Ring bietet. Sie bietet nämlich einen großen Vorteil in Bezug auf die Straßenverkehrssicherheit, insbesondere durch die Verringerung der Zahl der Konfliktpunkte, potenzielle Unfallstellen, um etwa 50 %, was einer ihrer Hauptvorteile ist.

In der Schweiz wird solche Kreiselanlagen noch selten verwendet, was vor allem auf die fehlende Standardisierung in diesem Bereich zurückzuführen ist. In diesem Sinne stellt dieser Forschungsauftrag einen ersten Schritt dar, um besser diese Lösung zu kennen und zur Anfüllung dieses derzeitigen normativen Defizits.

In der vorliegenden Untersuchung wurde zunächst die internationale Literatur zu diesem Thema untersucht, um die Grundelemente zu definieren, die bei der Planung, Gestaltung und Dimensionierung von Turbokreisverkehr zu analysieren sind. Diese Grundelemente wurden dann einzeln mit theoretischen Ansätzen (z. B. geometrische Dimensionierung, Anlagen) oder simulierten empirischen Ansätzen (z. B. Leistungsfähigkeit) analysiert und bewertet.

Die Ergebnisse wurden mit den Daten von zwei Knoten in der Schweiz überwachten Anlagen verglichen, dem Turbokreisverkehr Glättimüli in der Gemeinde Steffisburg (Kanton Bern) und dem provisorischen Teilweiser- Turbokreisverkehrs, der während des Baus der Lavapesson-Brücke in der Gemeinde Granges-Paccot (Kanton Freiburg) gebaut wurde. Ein Monitoring von Turbokreisverkehr im Ausland konnte aufgrund der COVID-19-Pandemie und der entsprechenden Reisebeschränkungen nicht durchgeführt werden.

Die Informationen, die aus der Analyse der internationalen Literatur oder aus anderen Projekten gewonnen wurden, haben dazu beigetragen, die Vorschläge und Empfehlungen zu den verschiedenen Grundelementen zu konsolidieren oder zu orientieren.

Im Vergleich zu einem konventionellen Kreisel mit mehrstreifiger Verkehrsführung, der die Hauptkonkurrenz zum Turbokreisverkehr darstellt, bietet letzterer folgende Vorteile: deutliche Verbesserung der Verkehrssicherheit, erhöhte Kapazität auf den Hauptverkehrsströmen. Der größte Nachteil des Turbokreisels ist jedoch die potenzielle Verringerung der Kapazität bei Sekundärströmen. Um den vollen Sicherheitsnutzen zu erreichen, ist es empfohlen, Fahrbahnteiler im Ring zu verwenden. Dies bedeutet jedoch eine größere Bodenfläche und Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Unterhalt und der Wasserbewertung. Wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, ist auch eine Lösung ohne physische Trennung und nur mit Markierung zulässig. Es sei darauf hingewiesen, dass der Einsatz eines Turbokreisels, wie jede neue Anlage, eine Eingewöhnungsphase für die Nutzer und eine gute Kommunikationskampagne erfordert.

Zusammenfassend zeigt dieser Forschungsauftrag, dass bei der Bewertung des Entwurfs eines Kreisverkehrs mit mehrstreifiger Verkehrsführung immer die Variante eines Turbokreisverkehrs untersucht werden sollte und dass diese Lösung wahrscheinlich in den meisten Fällen gegenüber der herkömmlichen Variante gewählt wird, da sie einen erheblichen Vorteil in Bezug auf die Verkehrssicherheit bietet.

Obwohl die Ergebnisse dieser Untersuchung wahrscheinlich eine normative Grundlage für die Planung, Gestaltung und Dimensionierung von Turbokreisverkehr darstellen werden, ist es wichtig zu bedenken, dass sich Anpassungen oder Validierungen bestimmter Elementen (geometrische Dimensionierungsmethode, Leistungsfähigkeitsmethode, ...) auf der Grundlage von in der Schweiz durchgeführten Versuchen als notwendig erweisen werden.

Summary

In the context of traffic roundabout with two or more lanes at the ring, the turbo-roundabout is a road construction that is still little represented and known in Switzerland, although it has proved its worth abroad, particularly in the Netherlands, a country that was a pioneer in the implementation of this type of design.

The main characteristic of the turbo-roundabout, whose name comes from the geometric shape of its center like a turbine, is that it offers a separation of traffic flows at the ring, contrary to conventional roundabouts in which lane changes can occur. In fact, it offers an important advantage in terms of road safety, notably by reducing the number of conflict points, potential accident sites, by about 50%, which is one of its main advantages.

In Switzerland, this type of road construction is still only rarely used, mainly due to a lack of standardization in this area. In this sense, this research mandate constitutes the first step towards overcoming this current normative deficit.

The present research first examined the international literature on the subject in order to define the basic elements to be analyzed in terms of planning, conception and dimensioning concerning the turbo-roundabouts.

These basic elements were then analyzed and evaluated individually using theoretical approaches (e.g., geometric design, equipment) or simulated empirical approaches (e.g., capacity design).

The results obtained were compared with the data obtained from two monitored roundabouts in Switzerland, the Glättimüli turbo-roundabout in the municipality of Steffisburg (Canton of Bern) and the temporary partial turbo-roundabout built during the repair works of the Lavapesson bridge in the municipality of Granges-Paccot (Canton of Freiburg). Overseas turbo-roundabouts monitoring could not be carried out due to the COVID-19 and because of travel restrictions caused by the pandemic situation. In addition, the information gleaned from the analysis of the international literature or gleaned from other similar developments made possible to react or orient the proposals and recommendations about the various basic elements of the turbo-roundabout.

Compared to a conventional roundabout with two or more lanes at the ring, the main road construction in competition with a turbo-roundabout, the latter offers the following benefits: significant improvement of road safety and potential increase in capacity on the main flows. However, the major disadvantage of turbo-roundabout is a potential decrease of the capacity concerning the secondary flows.

However, it is also worth mentioning here some negative aspects of turbo-roundabouts: potential reduction in capacity on secondary flows, pre-selection before roundabout according to the chosen destination (behavior adaptation), difficulties linked to maintenance and water assessment in the presence of lane separators, requalification of the roundabout and modification of the lane assignment during maintenance works less easy.

In order to take full advantage of the safety benefits, it is advisable to use lane separators in the ring. However, this situation required more space and difficulties due to the maintenance and evacuation of the water. If these constraints are not resolved, a solution without physical separator but only with marking is also admissible. It should be noticed that like any new construction development, the choice of a turbo-roundabout requires a period of adaptation for users and a good communication campaign to sensitize the users.

In conclusion, this research mandate shows that when evaluating the design of a roundabout with two or more lanes at the ring, a turbo-roundabout variant should be analyzed and in most cases be given priority over the conventional roundabout, because she offers a considerable advantage in terms of road safety.

If the results of this research will probably allow to establish a standardization basis for the planning, the conception and the sizing of turbo-roundabouts, it is important to keep in mind that adjustments or validations of some elements (geometrical design method, capacity design method, ...) will be necessary, on the basis of experiences in the Swiss context.

1 Introduction

1.1 Situation actuelle, problématique

En raison de l'augmentation des flux de trafic, on constate que certains aménagements de carrefours giratoires atteignent des situations de saturation. Cela se vérifie notamment dans le cas de giratoires à voie double à l'anneau où la voie intérieure est généralement peu empruntée ce qui implique une sous-utilisation de la capacité de l'aménagement. Les automobilistes hésitent à s'engager sur la voie centrale de peur de ne pas pouvoir sortir sur la branche correspondante. De plus, la pratique démontre que ces aménagements sont le lieu d'incidents ou d'accidents en raison de nombreux points de conflit (entrées du giratoire), de points de cisaillement des flux (cut-in) entre la voie à l'anneau et la voie extérieure et des points d'entrecroisement (weaving).

Dans cet environnement, une solution encore largement méconnue des planificateurs d'aménagements routiers suisses est le turbo-giratoire. Il permet, sous certaines conditions, d'améliorer la capacité du flux principal et d'autre part de diminuer le nombre de points de conflits potentiels et donc la probabilité d'incidents ou d'accidents.

Ce type d'aménagement produit un flux de trafic en spirale où les usagers doivent effectuer une présélection en fonction de leur choix de destination en amont du giratoire. A l'intérieur du turbo-giratoire, chaque voie est séparée et il n'est plus possible de changer de voie.

Cette caractéristique offre ainsi une meilleure utilisation de la voie intérieure du turbo-giratoire comparativement à un giratoire conventionnel, ce qui peut, sous certaines conditions, améliorer la capacité des flux principaux. En termes de sécurité routière, celle-ci est améliorée du fait de la limitation des changements de voies à l'intérieur du turbo-giratoire et de la diminution des vitesses en entrée lorsque la perpendicularité des branches d'entrées par rapport à l'anneau est respectée.

En Suisse, aucune norme concernant les turbo-giratoires n'existe à ce jour. Cela représente un déficit important en termes de conception, de dimensionnement et de recommandations sur ces aménagements, ce qui mène à leur sous-utilisation actuelle.

1.2 Plan de recherche et structure du rapport

Le plan de recherche du projet est résumé à la Fig. 1. Dans un premier temps, une analyse de la recherche documentaire sur la thématique, notamment la littérature de pays profitant d'une avancée en la matière (Pays-Bas, Slovaquie), a été effectuée. Cette première phase a permis d'élaborer un listing des éléments de base du dimensionnement et de la conception de turbo-giratoires.

Les éléments de base ont ensuite été étudiés individuellement et contextualisés en vue d'une application en Suisse. A l'aide des observations réalisées sur des turbo-giratoires en Suisse (études de cas), les théories liées aux éléments de base ont été confirmées ou adaptées.

Sur cette base, une méthodologie de dimensionnement et une méthode de conception des turbo-giratoires adaptées aux conditions rencontrées en Suisse ont été proposées. Il est à noter ici que la méthode de dimensionnement géométrique s'appuie sur des principes similaires à ceux mis en œuvre notamment aux Pays-Bas, avec des adaptations aux véhicules rencontrés en Suisse, alors que la méthode de dimensionnement en capacité a, elle, été déterminée sur une base empirique simulée qui nécessitera, à terme, une validation sur la base des observations qui pourront être menées sur des aménagements réalisés en Suisse.

Les éléments récoltés par les études de cas existants, les analyses théoriques du trafic et des conditions géométriques ont permis d'établir une cartographie des turbo-giratoires répondant aux particularités suisses.

Comme approche finale, la normalisation suisse des turbo-giratoires étant inexistante, le présent travail de recherche a également eu pour but d'établir des recommandations sur la base des résultats obtenus en vue d'une future normalisation.

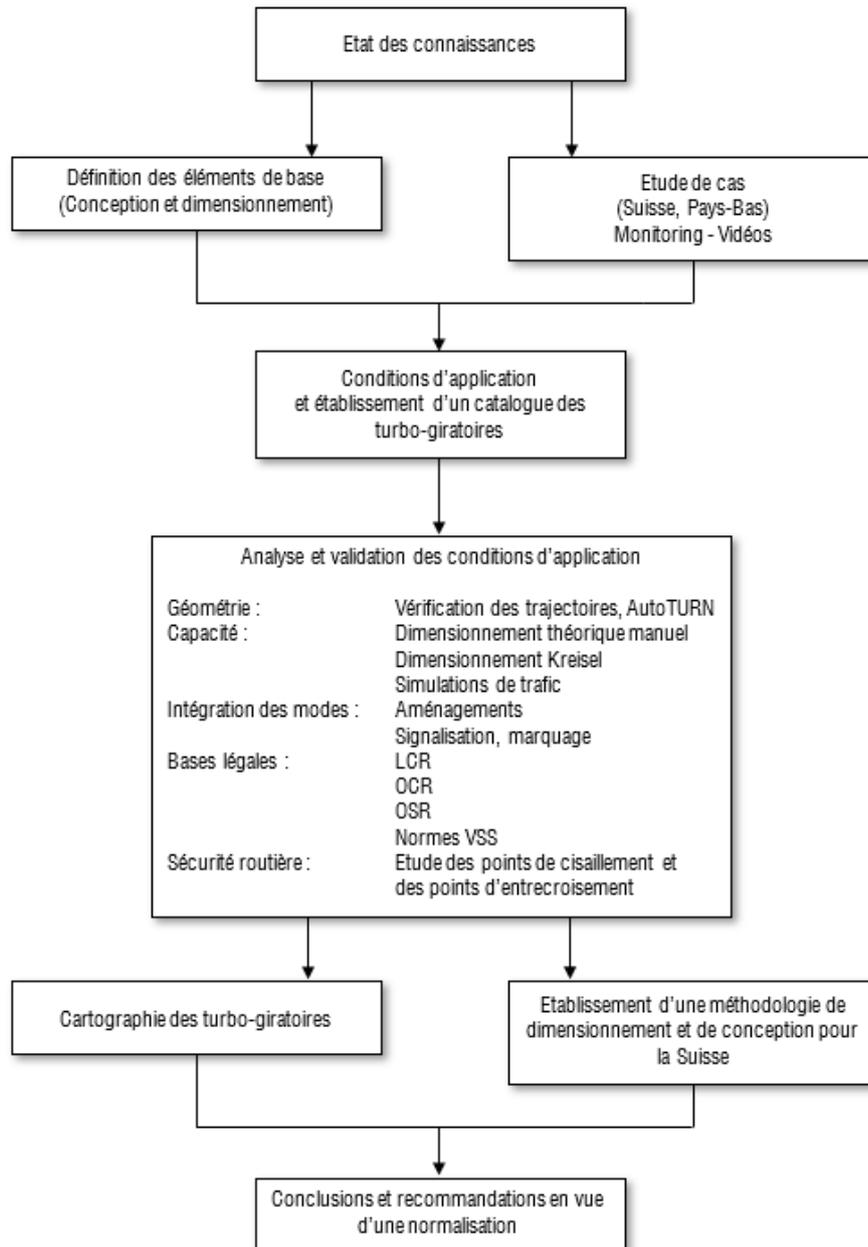


Fig. 1 Plan de recherche du projet.

1.3 Motivation et objectifs du projet de recherche

De par le manque d'expérience et de normalisation, la mise en œuvre en Suisse d'aménagements de turbo-giratoires n'est que très faiblement exploitée alors qu'ils offrent de nombreux avantages et que certains pays les ont adoptés comme solution privilégiée pour des giratoires à deux voies à l'anneau.

Le présent projet de recherche a eu pour objectif de combler les connaissances et le vide normatif par une recherche approfondie sur les turbo-giratoires. Il permet de mieux connaître les avantages et inconvénients d'un tel aménagement, de savoir comment le réaliser en Suisse et ainsi de soutenir la création de ces aménagements lorsque les conditions requises sont remplies et de poser les bases des règles de bonne pratique à respecter en la matière.

2 Etat des connaissances

Le présent chapitre explicite la méthode de traitement de la littérature au niveau national et international. De cette méthode, les principaux enseignements issus de l'état des connaissances se rapportant aux turbo-giratoires sont détaillés par éléments de base.

Le premier travail bibliographique, la recherche documentaire, a permis de dégager trois types de littératures ; une documentation nationale faisant référence aux turbo-giratoires, ne serait-ce que lorsque ceux-ci y sont mentionnés, une documentation internationale principale ayant notamment attiré aux méthodes de dimensionnement et de conception de pays avancés en la matière et finalement une documentation internationale secondaire, issue essentiellement de publications ou de présentations scientifiques.

2.1 Méthode et but du traitement de la littérature

La méthode de traitement retenue pour cette analyse littéraire a consisté à élaborer, pour chaque document, rapport, présentation ou article scientifique, une fiche d'analyse de littérature. Cette fiche individuelle résume, en fonction d'une première liste d'éléments de base du dimensionnement et de la conception des turbo-giratoires établie lors de l'élaboration du projet de recherche, les informations d'importance contenues dans le document analysé.

Les fiches d'analyse sont composées de la manière suivante :

- Fiche d'identité du document analysé ;
- Informations d'importance retenues par élément de base.

Pour chaque élément de base, le niveau de détail est également mentionné. Certains éléments y sont détaillés de manière approfondie ou alors uniquement survolés.

<i>Analyse de documentation littéraire</i>		<i>Fiche n° XXX</i>
<i>Fiche d'identité</i>		
Intitulé	IMAGE DE LA COUVERTURE DU DOCUMENT	
Edité par		
Pays		
Date d'édition XX.XX.XXXX		
<i>Éléments de base</i>		
Élément de base	Traité <input type="checkbox"/>	Détail <input type="checkbox"/>
Informations : <ul style="list-style-type: none">• Informations sur l'élément de base		

Fig. 2 Exemple de fiche d'analyse.

Le traitement de la littérature, soit une trentaine de fiches d'analyse, a eu pour but de compléter les éléments de base, de les décrire et de les répertorier en fonction de leur apparition dans la littérature. De plus, le traitement par fiche a également permis de mettre en évidence des éléments à intégrer en l'état dans une future normalisation suisse, ceux pour lesquels des adaptations au contexte suisse doivent être effectuées et finalement ceux pour lesquels des lacunes sont à combler par la présente recherche.

2.2 Etat de la recherche au niveau national

A ce jour, en Suisse, les aménagements de type turbo-giratoires n'étant mis en œuvre que de manière sporadique, les recherches en la matière au niveau national sont quasiment inexistantes. Toutefois, les rapports de certains mandats de recherche mentionnent des éléments sur les turbo-giratoires.

Dans le cadre du projet dédié au trafic cycliste dans les carrefours [37], les situations de danger pour les cyclistes ont été mises en avant. Le projet de recherche de sécurité routière des carrefours giratoires à deux voies [30] propose d'effectuer des recherches approfondies en matière de turbo-giratoires afin d'évaluer leurs déficits de sécurité.

Le guide suisse des giratoires, bien que ne faisant pas mention des turbo-giratoires, a également été considéré comme littérature nationale à des fins de base en termes de dimensionnement en capacité [23].

2.3 Etat de la recherche au niveau international

En 1996, L.G.H. Fortuijn s'est mis au défi de répondre à la question suivante : « *Comment concevoir un giratoire avec au minimum la même capacité qu'un giratoire à deux voies à l'anneau, mais avec des garanties de sécurité approchant celui à une voie ?* ». Pour cela, il a développé le concept de turbo-giratoire.

Fortuijn étant chercheur aux Pays-Bas, la littérature internationale principale est donc majoritairement issue de ce pays. D'autres pays européens ont également élaboré des documents relatifs à la conception (Croatie) et au dimensionnement (Serbie) des turbo-giratoires.

Ce thème est largement traité dans plusieurs articles ou conférences scientifiques tout en gardant pour base les recherches de Fortuijn. Les pays dans lesquels on trouve traces de cette littérature sont les suivants : Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Canada, Croatie, Italie, Macédoine, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Serbie, Slovénie, USA.

2.4 Eléments de base

Sur la base de la littérature, les éléments de base déterminants pour le dimensionnement et la conception des turbo-giratoires ont été mis en évidence à l'aide de tableaux croisés avec les fiches d'analyse littéraire. Ces éléments sont classifiés et pondérés en fonction de leur influence dans la conception et la planification de ces aménagements. On détermine pour cela quatre catégories :

- Les critères déterminants à prendre en compte dans une méthode de conception et de dimensionnement des turbo-giratoires (**surlignés en rouge**) ;
- Les critères conseillés (**surlignés en jaune**) ;
- Les valeurs de dimensionnement, pouvant servir de base à la méthode de dimensionnement (**surlignées en bleu**) ;
- D'éventuelles remarques, notamment issues de comparaison avec des giratoires conventionnels (**surlignées en vert**).

Les éléments de base servent à définir une méthode de dimensionnement des turbo-giratoires et leurs conditions d'applicabilité.

Cette analyse littéraire est ensuite résumée dans le chapitre suivant (Chap. 2.6). D'éventuelles pistes de recherche ou compléments à ces éléments de base sont également énoncés.

2.5 Tableaux croisés littérature – éléments de base

Conditions d'implantation, localisation

Tab. 1 Analyse littéraire de l'élément de base : « Conditions d'implantation, localisation »

Sujet	Documentation internationale principale N°48	Documentation internationale secondaire N°31	Général
Localisation			- Conseillés hors contexte urbain. En zone urbaine possible si piétons et cyclistes hors giratoire (N°22) - Conseillés en contexte urbain (N°47) - Besoin en espace supplémentaire si installation de feux (n°34)
Emprise	Pas plus importante qu'un giratoire à nombre de voies identique	Pas plus importante qu'un giratoire à nombre de voies identique (ég. N°54, N°41, N°51)	
Légendes :	Critères déterminants , critères conseillés , valeurs de dimensionnement , remarques en comparaison aux giratoires conventionnels		

Capacité, conditions de trafic

Tab. 2 Analyse littéraire de l'élément de base : « Capacité, conditions de trafic » / Littérature nationale et internationale principale – Généralités

Sujet	Documentation nationale	Documentation internationale principale		Généralités
	N°30	N°48	N°28	
Type de turbo		Fonction de la direction principale de l'écoulement du trafic	Fonction de la direction principale de l'écoulement du trafic	Fonction de la direction principale de l'écoulement du trafic
Capacité		<p>- Augmentation de 0 – 50% en comparaison aux giratoires conventionnels</p> <p>- 2 voies, 2 entrées, 2 sorties : 40'000 vhc/j, valeur pratique 3'500 pcu/h (diam. 50m), valeur théorique 3'800 pcu/h, charges en conflit 1'900-2'100 pcu/h</p> <p>Valeurs giratoires à 4 branches : Basique : 3'500 pcu/h, Egg (œuf) : 2'800 pcu/h, Knee (genou) : 3'500 pcu/h, Spirale : 4'000 pcu/h, Rotor : 4'500 pcu/h</p> <p>Valeurs giratoires à 3 branches : Stretched-knee (genou étiré) : 3'800 pcu/h, Star (étoile) : 5'500 pcu/h</p>	<p>- Capacité théorique maximale d'une voie à l'entrée 1'550 vhc/h (Bovy)</p> <p>- Capacité à calculer pour chaque voie d'entrée individuellement</p>	<p>- Pas de consensus sur une augmentation de la capacité (N°54)</p> <p>- Augmentation de la capacité de 0-50% en comparaison aux giratoires conventionnels (N°41)</p> <p>- Diminution du niveau de saturation des sorties de 8.5% (N°51)</p>
Formules de dimensionnement		Formule de base : Bovy	- Modèle analytique de Bovy et Brilon - Equation de Hagring	
Direction du trafic			Turbo-giratoires appropriés dans le cas de flux de trafic dominant dans une direction principale (ég. N°38, N°40, n°24, N°51)	Si les mouvements principaux sont les tourner-à-droite, privilégier des by-pass (N°24)
Nombre de voies	En termes de sécurité : - Si possible, giratoire à une voie - Eviter sorties à 2 voies			
Temps d'attente		Inférieurs à un carrefour avec feux (ég. N°41)	Temps d'attente maximum : 50" pour vhc et 5" pour cyclistes	- Réduction des temps d'attente (N°43) - Pas de consensus sur la réduction des temps d'attente (N°54)
Vitesse	Différence de vitesse entre l'entrée et la circulation intérieure. Vitesse intérieure et des véhicules sortants : 35km/h	- Vitesse plus faible à l'intérieur - Graphique de relation vitesse-rayon	Vitesse intérieure maximale : 35-37km/h (formule)	
Légendes :	Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels			

Tab. 3 Analyse littéraire de l'élément de base : « Capacité, conditions de trafic » / Littérature internationale secondaire

Sujet	Documentation internationale secondaire				
	N°31	N°36	N°46	N°53	N°18
Type de turbo					
Capacité	- Augmentation de 25-35% en comparaison aux giratoires conventionnels (ég. N°53) - Capacité maximale 3'000-3'500 pcu/h	- Augmentation de 12-30% pour charges de trafic <70% de capacité (non-saturé) en comparaison aux giratoires conventionnels - Calculer la capacité pour chaque voie d'entrée individuellement	Capacité supérieure aux giratoires conventionnels pour un nombre de voie identique	Augmentation de 25-35% en fonction de la distribution du trafic aux entrées en comparaison aux giratoires conventionnels	Augmentation de la capacité dans des circonstances très spécifiques de répartition du trafic. Également possible diminution de capacité (ég. N°20)
Formules de dimensionnement		Equations modifiées de Bovy et Hagring			Modèle probabiliste de Brilon
Direction du trafic		Si nombre de tourner-à-droite sur les entrées secondaires >60% et capacité <70%, dans ce cas, en comparaison aux giratoires conventionnels, la capacité est plus élevée		Dans le cas de faibles charges, pas de différences significatives	
Nombre de voies					
Temps d'attente		Réduction des files d'attente (selon simulations de trafic) en comparaison aux giratoires conventionnels		Réduction des temps d'attente pour charges de trafic élevées en comparaison aux giratoires conventionnels	
Vitesse		Vitesse de circulation dans le giratoire <40km/h	Vitesse plus faible à l'intérieur (ég. N°43)	Vitesses plus faibles avant, à l'intérieur et après le turbo-giratoire	Vitesse maximale intérieure : 40km/h
Légendes :	Critères déterminants	critères conseillés	valeurs de dimensionnement	remarques en comparaison aux giratoires conventionnels	

Tab. 4 Analyse littéraire de l'élément de base : « Capacité, conditions de trafic » / Littérature internationale secondaire

Sujet	Documentation internationale secondaire						
	N°52	N°43	N°45	N°54	N°39	N°51	N°34
Type de turbo						<ul style="list-style-type: none"> - Turbo-giratoire, en forme de spirale - Egg - Basique - Knee - Spiral - Rotor 	<ul style="list-style-type: none"> - Distinction entre turbo-giratoire (géométrie adaptée à une spirale) et turboplein : giratoire à deux voies concentriques avec marquage en spirale (base circulaire) - Types : - Basique - Egg - Knee - Spiral - Rotor (à 3 ou 4 branches) - Stretched-knee - Star (à 3 ou 4 branches)
Capacité	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la capacité de la voie intérieure - Flux de trafic moins hésitant en entrée 	<ul style="list-style-type: none"> - En cas de régulation, effet sur la capacité - Traversées piétonnes ont un effet sur la capacité 		<ul style="list-style-type: none"> - Comparaison de différents scénarios entre giratoire conventionnel et turbo-giratoire - Prise en compte d'un modèle de comportement des conducteurs (choix de la voie en fonction de la saturation) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en évidence de l'importance des PL dans la capacité des turbo-giratoires 	<ul style="list-style-type: none"> - 35'000 – 40'000 vhc/j 	
Formules de dimensionnement			Comparaison entre HCM et données empiriques	Modèle de Hagrings	Modèle de Hagrings	Formule adaptée de Bovy	
Direction du trafic							
Nombre de voies							
Temps d'attente							
Vitesse						Vitesse à l'intérieur de l'anneau ≤ 35km/h	
Légendes :	Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels						

Géométrie

Tab. 5 Analyse littéraire de l'élément de base : « Géométrie »

Sujet	Documentation internationale principale		Documentation nationale		Documentation internationale secondaire
	N°48	N°28	N°37	N°30	N°31
Conditions	<ul style="list-style-type: none"> - Face à une entrée, il doit y avoir au moins une seconde voie au niveau du centre du giratoire - Une branche d'entrée va au plus sur 2 voies à l'intérieur - Sur chaque tronçon il doit y avoir un seul point de décision possible - Au moins deux branches de sortie doivent avoir deux voies 	<ul style="list-style-type: none"> - Intersection circulaire à 2 ou 3 voies - Reliant 3 ou 4 voies d'entrée - Voie circulaire de largeur >5.20m déconseillée 	<ul style="list-style-type: none"> - Largeur de voie minimale avant le giratoire : 3.5m - Exigence d'une ligne droite 20m avant l'entrée pour des raisons de visibilité - Contradictions avec la norme VSS 40 263 [11] 	<ul style="list-style-type: none"> - Visibilité nécessaire uniquement 15m avant l'entrée pour limiter la vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Turbo-giratoire : uniquement 2 voies là où nécessaire - Au moins une des sorties doit avoir deux voies
Diamètre					<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre extérieur : 35-50m - Rayon îlot central : 10-20m
Concept de design	Modèle en 5 étapes	Circulation en spirale basée sur les turbo-blocs (dimensions fournies dans des tableaux)			
Véhicule déterminant					
Poids lourds					
Îlot central	Représentation des îlots dans le document				
Îlots de séparation des flux d'entrée et de sortie					
Légendes :	Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels				

Tab. 6 Analyse littéraire de l'élément de base : « Géométrie »

Sujet	Documentation internationale secondaire						Généralités
	N°29	N°27	N°46	N°52	N°40	N°22	
Conditions		<ul style="list-style-type: none"> - Entrées perpendiculaires à l'anneau - Une ou plusieurs voies de circulation en spirale 	<ul style="list-style-type: none"> Deux voies de circulation au maximum dans la zone circulaire au niveau des entrées 	<ul style="list-style-type: none"> - Trois branches d'entrée ou plus 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de voies aux entrées correspond au nombre de voies à l'anneau - Au moins 2 voies de sortie doivent avoir 2 voies - Au moins une voie doit offrir un choix de direction - Approche de l'entrée à angle droit de l'anneau - Maximum 2 voies à l'intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximum 2 voies à l'intérieur - Largeur de voie : 5-6m 	
Diamètre						<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre extérieur : 45-70m 	<ul style="list-style-type: none"> 40-60m (N°24)
Concept de design	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle en 5 étapes - Construction basée sur les turbo-blocs 	<ul style="list-style-type: none"> - Turbo-blocs - Les largeurs des voies en spirale dépendent de la trajectoire balayée et de l'îlot central - Largeurs indépendantes du type de turbo-giratoire 			<ul style="list-style-type: none"> Turbo-blocs 		
Véhicule déterminant	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse des trajectoires et de la vitesse des véhicules - Adapter le véhicule de conception au pays  (NED)  (CRO)	<ul style="list-style-type: none"> - Besoin d'adapter le véhicule de conception avec les caractéristiques locales - Influence du véhicule déterminant sur la conception géométrique 					
Îlot central				<ul style="list-style-type: none"> Partiellement praticable 	<ul style="list-style-type: none"> Sert comme surface de circulation supplémentaire pour les poids lourds 		
Îlots de séparation des flux d'entrée et de sortie				<ul style="list-style-type: none"> Employés 			
Légendes :	<ul style="list-style-type: none"> Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels 						

Comportement des usagers

Tab. 7 Analyse littéraire de l'élément de base : « Comportement des usagers »

Sujet	Documentation internationale principale		Documentation internationale secondaire			
	N°48	N°28	N°32	N°46	N°53	N°43
Règles générales	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de voie avant l'entrée - Priorité cédée au maximum à deux voies délimitées 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de voie avant l'entrée - Priorité cédée au maximum à deux voies délimitées - Pas de conflits de croisement à l'intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de voie avant l'entrée 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de voie avant l'entrée - Les flux de véhicules ne se croisent pas - Dans certains cas impossible de revenir sur l'une des directions - Priorité cédée au maximum à deux voies délimitées 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de voie avant l'entrée - Flux de trafic circulant en voies séparées à l'intérieur - Flux de trafic également séparés en sortie - Priorité cédée au maximum à deux voies délimitées 	<ul style="list-style-type: none"> - Sans régulation, difficultés pour faire respecter le passage de cyclistes ou de piétons
Légendes : Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels						

Intégration des modes doux

Tab. 8 Analyse littéraire de l'élément de base : « Intégration des modes doux »

Sujet	Documentation internationale principale		Documentation nationale		Documentation internationale secondaire		
	N°48	N°28	N°37	N°30	N°20	N°43	N°51
Cyclistes et piétons	<ul style="list-style-type: none"> - Piétons et cyclistes devraient ne pas utiliser les giratoires à voies multiples - Entrées et sorties à deux voies à éviter - Itinéraires hors giratoire conseillés - Passage supérieur préférable à passage inférieur 	<ul style="list-style-type: none"> Si possible, passage du trafic non-motorisé à un autre niveau 	<ul style="list-style-type: none"> - Interdire les vélos, guidage à l'extérieur du giratoire, si possible à un niveau différent - Si trafic mixte nécessaire (question de place), prendre des mesures complémentaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaussées étroites et sans marquage plus sûres pour les cyclistes que les zones de passage élargies - Passages piétons dans sorties à 1 voie plus sûrs que sur sorties à 2 voies - Ev. Réguler la circulation des piétons et cyclistes 	<ul style="list-style-type: none"> Turbo-giratoire plus appropriés que les carrefours giratoires conventionnels lorsqu'un niveau de sécurité plus élevé doit être garanti, en particulier en présence d'un trafic piétonnier ou de deux roues important 	<ul style="list-style-type: none"> - Besoins spécifiques pour les piétons (év. signalisation particulière pour les carrefours giratoires à plusieurs voies, mesures pour les personnes malvoyantes) 	<ul style="list-style-type: none"> - Giratoire à trafic mixte, impossible dans les turbo-giratoires - Giratoire avec piste cyclable, pas recommandé - Turbo-giratoires, sortir le trafic cyclable
Mesures complémentaires		<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des vitesses aux entrées et sorties en phase de conception - Îlots séparateurs de voies d'entrée et de sortie - Sorties turbo-giratoires avec une seule voie - Visibilité à assurer en entrées et sorties - Traversées piétonnes et cyclistes entre 5-15m du bord extérieur du giratoire (1-3 voitures) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la largeur de la voie d'entrée afin d'éviter le dépassement de vélos - Figures dans document pour aménagements cyclistes 		<ul style="list-style-type: none"> Importance d'un bon éclairage 	<ul style="list-style-type: none"> - Passages pour piétons placés à distance du giratoire (voir emplacements document) - Passages inférieurs ou supérieurs en fonction des volumes de trafic piétonnier et cycliste - Combinaison nécessaire de passage piétons et d'îlots. 	Principes dans le document
Légendes : Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels							

Equipements

Tab. 9 Analyse littéraire de l'élément de base : « Equipements »

Sujet	Documentation internationale principale		Documentation internationale secondaire				
	N°48	N°28	N°29	N°52	N°21	N°51	N°34
Marquage	- Concept de marquage en spirale - Flèches avec représentation du turbo-giratoire	- Concept de marquage en spirale - Flèches avec représentation du turbo-giratoire					Marquage en spirale
Séparateurs de voies	Détails de séparateurs de voies surélevés	Détails de séparateurs de voies surélevés	- Positif : prévient les conflits entre voies - Négatif : sécurité pour les cyclistes, motos et difficultés d'entretien et de déneigement	- Pays avec séparateurs surélevés : Pays-Bas, Slovénie, Hongrie et Macédoine - Pays sans séparateurs surélevés : Allemagne (interdits), Pologne, Danemark, République-Tchèque	Séparateurs de voies surélevés doivent être franchissables	Séparateurs surélevés	- Séparateurs surélevés franchissables à basse vitesse par les véhicules longs - Recommandations et considérations juridiques dans le document sur les responsabilités en cas d'accidents
Signalisation verticale	1 ^{ère} signalisation à 400m	Exemples de signalisation fixe (urbain, extra-urbain)				Signalisation 200m, 100m, 50m avant le giratoire	Très importante, surtout dans le cas de Turboplein
Eclairage public	Améliorer la visibilité de l'îlot central et des séparateurs de voies						
Feux de circulation							Détails dans le document
Dosage							Détails dans le document
Légendes :	Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels						

Sécurité routière

Tab. 10 Analyse littéraire de l'élément de base : « Sécurité routière »

Sujet	Documentation nationale		Documentation internationale principale	
	N°37	N°30	N°48	Généralités
Points de conflit			<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'entrecroisements à l'intérieur du turbo-giratoire - Giratoire à 2 voies avec sorties à 1 voie : 16 pts - Giratoire à 2 voies avec sorties à 2 voies : 20pts - Turbo-giratoire 2 voies avec sorties à 2 voies : 10 pts - Réduction environ 50% du nombre de points de conflits 	
Comparaisons	- Accidents moins graves que dans des carrefours conventionnels	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau de sécurité des turbo-giratoires équivalent à un giratoire conventionnel (mais accidents plus graves dans les turbo-giratoires, ég. N°40 et N°54) - Par rapport à une intersection à priorité, gravité des accidents réduite de -82% ; Nombre d'accidents réduits (-49%) - Pas d'apport p/r à un giratoire à voie unique, mais plus grande capacité 	<ul style="list-style-type: none"> - Sécurité inférieure à un giratoire à une voie (+20%-40% d'accidents, ég. N°41) - Par rapport à un carrefour non-régulé, -70% d'accidents graves ou avec blessés (ég. N°41) - Par rapport à un carrefour régulé, -50% d'accidents graves ou avec blessés (ég. N°41) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des accidents de piétons en fonction des dimensions du giratoire (N°43) - Augmentation de la sécurité
Mesures d'amélioration de la sécurité	Réduction des largeurs de voies en entrée ou sortir les modes doux	Signalisation indiquant les séparateurs surélevés (motos)		
Légendes : Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels				

Tab. 11 Analyse littéraire de l'élément de base : « Sécurité routière »

Sujet	Documentation internationale secondaire							
	N°31	N°36	N°46	N°53	N°18	N°40	N°19	N°51
Points de conflit		Réduction des points de conflit	- Réduction du nombre de points de conflit - Turbo-giratoire permet la réduction d'environ 60% des points de conflit		- Réduction du nombre de points de conflit - Réduction d'environ 50% des points de conflit	Réduction d'environ 50% des points de conflit	Réduction d'environ 40% des points de conflit	Réduction des points de conflits d'environ 40%
Comparaisons	Par rapport à un carrefour non-régulé ou régulé, - 70% d'accidents graves ou avec blessés	- Amélioration de la sécurité - Réduction de 70% des accidents		- Réduction du nombre d'accidents de 40-50% (ég. N°54, N°47) - Réduction du nombre d'accidents avec blessés de 20-30% (ég. N°54, N°47)	- Faible risque d'accidents - Augmentation de la sécurité - Réduction du taux d'accidents 40-70%	Niveau de sécurité équivalent à un giratoire à 1 voie	Conflits plus graves dans les turbo-giratoire à cause de l'angle d'impact (90°)	Accidents plus fréquents si rayon <20m
Mesures d'amélioration de la sécurité			- Séparateurs de voies surélevés plus sûrs que les lignes continues (respect) - Avec séparateurs à lignes continues, le niveau de sécurité des turbo-giratoires est équivalent aux giratoires conventionnels à deux voies - 50% des accidents ont lieu avec des piétons					Besoin d'information (nouveau système)
Légendes : Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels								

Coûts

Tab. 12 Analyse littéraire de l'élément de base : « Coûts »

Sujet	Documentation internationale principale	Documentation internationale secondaire			
	N°48	N°31	N°40	N°43	N°41
Comparaisons	- Coûts plus élevés qu'une intersection à feux	- Besoin d'investissements initiaux plus élevés	- Durée de construction et coûts légèrement plus importants		- Coûts plus élevés qu'une intersection à feux
Coûts sociaux	- Coûts LCC et sociaux moins importants	- Réduction des coûts d'entretien, de consommation, d'énergie et des accidents de la route			- Coûts LCC et sociaux moins importants
Coûts équipements				Tableau des coûts de signalisation pour l'accessibilité piétons	

Entretien

Tab. 13 Analyse littéraire de l'élément de base : « Entretien »

Sujet	Documentation internationale secondaire		
	N°52	N°22 / N°24	N°21
Service hivernal	En Slovénie, pas de problème avec le service hivernal, des ouvertures sont créées dans les séparateurs de voies	En Allemagne, les séparateurs de voies surélevés sont interdits à cause de l'entretien hivernal (et raisons de sécurité)	Problèmes avec les séparateurs de voies franchissables au Québec pour le service hivernal

Impact environnemental

Tab. 14 Analyse littéraire de l'élément de base : « Impact environnemental »

Sujet	Documentation internationale secondaire		
	N°36	N°32	N°42
Emissions	Réduction des émissions de CO et de CO ₂	- Estimations des émissions - Segment aval (accélération), responsable de >30% des émissions totales - En condition de saturation, les turbo-giratoires ont des émissions plus élevées que les giratoires conventionnels - Tables d'émissions (comparaison entre turbo-giratoire et giratoire conventionnel)	Les intersections sont moins performantes que les giratoires en raison d'un plus grand nombre d'arrêts de véhicules
Généralités		Analyses de données empiriques et microsimulation	
Légendes : Critères déterminants, critères conseillés, valeurs de dimensionnement, remarques en comparaison aux giratoires conventionnels			

2.6 Synthèse des éléments de base dans la recherche littéraire

Localisation, conditions d'implantation

En termes de localisation, l'aménagement de turbo-giratoire tant en zone extra-urbaine qu'en zone urbaine est recommandé. Toutefois, en zone urbaine, il est préconisé de mettre en œuvre des mesures au profit de la sécurité des usagers non-motorisés (by-pass, passerelles, passages inférieurs, ...).

La littérature s'accorde sur le fait que l'emprise d'un turbo-giratoire n'est pas plus importante que celle nécessaire à un giratoire conventionnel avec un nombre de voies équivalent.

Sur la base de la méthode de dimensionnement géométrique des turbo-giratoires adaptée aux véhicules déterminants circulant en Suisse (Chap. 5.4), on peut confirmer qu'un turbo-giratoire ne nécessite pas d'emprise supplémentaire par rapport à un giratoire conventionnel équivalent.

Capacité, conditions de trafic, types de turbo-giratoires

La direction principale d'écoulement du trafic est l'élément prépondérant dans le choix de type de turbo-giratoire à mettre en œuvre. Il existe une multitude de configurations possibles dont voici les principales :

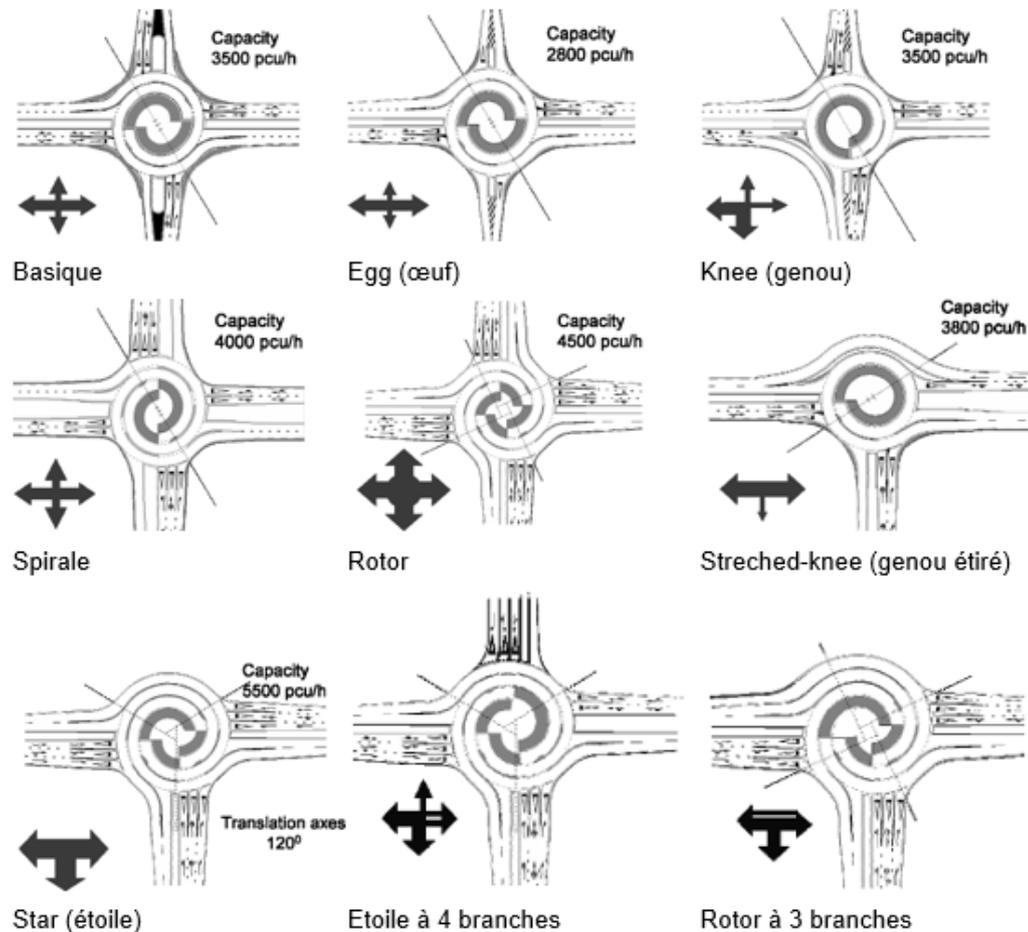


Fig. 3 Configurations principales de turbo-giratoires, flux principaux d'écoulement du trafic et indications de capacité [48], [34].

Dans le contexte suisse, des configurations sont proposées dans le catalogue des turbo-giratoires (Chap. 0). A noter que les typologies représentées ci-dessus (Fig. 3) peuvent être utilisées, moyennant adaptations aux conditions géométriques adaptées pour les véhicules déterminants circulant en Suisse.

En termes de capacité et de temps d'attente, aucun consensus n'est trouvé dans la littérature. Certains documents évoquent une augmentation de la capacité respectivement des temps d'attente alors que d'autres, en fonction de la configuration du turbo-giratoire et de la répartition des charges de trafic, indiquent une diminution de ceux-ci par rapport aux giratoires conventionnels.

Il semble dès lors évident, dans le cas où le choix de variantes entre turbo-giratoire et giratoire conventionnel se porte sur la notion de capacité, qu'un dimensionnement des deux variantes est nécessaire afin d'évaluer la variante la plus favorable.

Les calculs en capacité doivent être effectués pour chaque voie dans la mesure où, il est possible que pour certaines branches du giratoire, la conception d'un turbo-giratoire soit favorable du point de vue capacité (notamment sur la direction principale de l'écoulement), mais peut également être défavorable (sur les directions secondaires) en raison de la gêne due au courant principal et à la meilleure utilisation de la voie intérieure.

Les formules de dimensionnement qui sont le plus fréquemment évoquées dans la littérature concernent :

- La formule de Bovy & al., issue du Guide suisse des giratoires, élaboré en 1991 [23] ;
- La formulation de Fortuijn & Harte (1997), une adaptation aux turbo-giratoires dérivée de la formule de Bovy ;
- Le modèle analytique de Brilon, lequel ne fait pas intervenir la géométrie du giratoire (1997) ;
- Le modèle de Hagring, un modèle probabiliste basé sur les temps intervéhiculaires (1998) ;
- Le modèle HCM, considérant l'impact des piétons sur les capacités des giratoires (2010).

On remarque que la plupart de ces formules ont des bases communes ou ont été adaptées aux cas des turbo-giratoires.

Une méthode de dimensionnement, ayant pour base la formule générale de Bovy & al., est ici proposée (Chap. 5.2). Celle-ci prend en compte certaines considérations établies dans les normes suisses relatives aux giratoires. La méthode de dimensionnement est établie sur la base de simulations de trafic menées sur le logiciel de micro-simulation Aimsun et à l'aide des observations menées in-situ (méthode empirique-simulée). De plus, cette méthode est comparée à celles intégrées dans le logiciel de dimensionnement Kreisel.

En termes de vitesses, l'ensemble de la littérature évoque des vitesses inférieures à 40km/h, de l'ordre de 35-37km/h pour la circulation intérieure au turbo-giratoire.

Des mesures de vitesse ont réalisées in-situ en plusieurs points d'un turbo-giratoire (en entrée, à l'intérieur, en sortie) à l'aide de vidéos de drone (Chap. 5.7) afin de vérifier ces valeurs issues de la littérature, de plus, celles-ci ont été comparées aux vitesses obtenues dans les simulations de trafic (Chap. 5.2.5).

Géométrie

Des conditions de mise en œuvre géométriques sont évoquées dans la littérature. On retiendra notamment les conditions de fonctionnalité suivantes, définies par Fortuijn [34] qui ont une implication sur la conception géométrique des turbo-giratoires :

- 1) Un flux de circulation régulier est garanti par l'alignement en spirale du giratoire ;
- 2) Face à une voie d'entrée, il y doit y avoir au moins une seconde voie au niveau du centre du giratoire ;
- 3) Le trafic présent sur une entrée ne doit céder la priorité, au maximum, qu'à deux voies à l'anneau ;
- 4) Sur chaque tronçon, il doit y avoir un seul point de décision possible : continuer dans le giratoire ou en sortir ;
- 5) Au moins deux branches de sortie possèdent deux voies (4 branches) ou au moins une branche de sortie possède deux voies (3 branches) ;
- 6) Les branches d'entrée sont perpendiculaires au giratoire.

Les 4 premiers points sont des caractéristiques de base. Si l'une d'entre elles n'est pas respectée, le carrefour n'est pas considéré comme turbo-giratoire.

Dans le cas où le 5^{ème} point n'est pas respecté, le turbo-giratoire est considéré comme partiel. Et finalement, le 6^{ème} point est optionnel mais néanmoins indiqué afin d'atteindre les objectifs de sécurité des turbo-giratoires fixés (réduction des vitesses).

Une des notions principales de la conception géométrique des turbo-giratoires sont les turbo-blocs. Ceux-ci consistent en une continuité de segments d'arcs de cercles, dont les extrémités peuvent être légèrement décalées, afin de définir la forme en spirale des turbo-giratoires.

Les guides nationaux ou manuels de conception [48], [28], [44] proposent des tableaux de paramètres de dimensionnement des turbo-blocs. Les écarts entre les différents modèles restent toutefois peu importants.

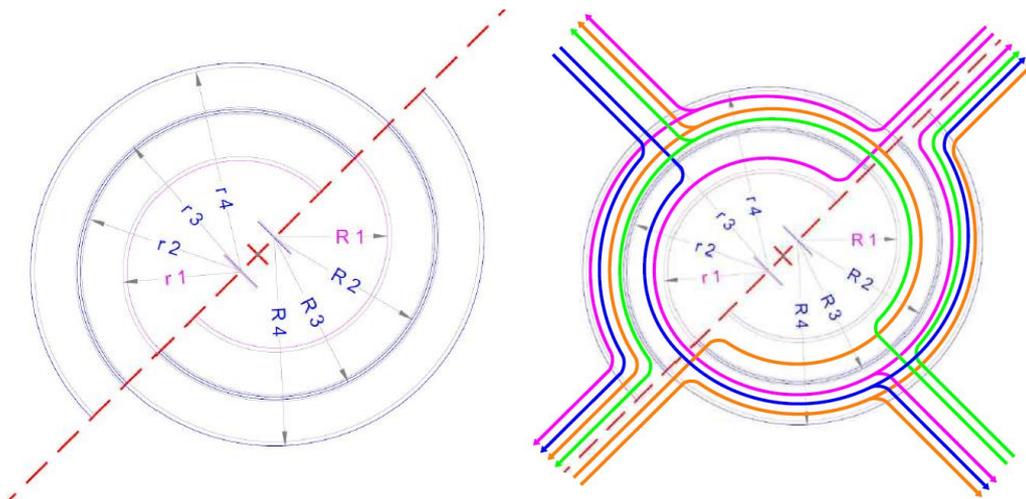


Fig. 4 Turbo-blocs [28] et exemples de conception des flux de circulation.

A noter finalement que la géométrie des turbo-giratoire doit être adaptée au véhicule de conception, qui varie d'un pays à l'autre. De plus, une attention particulière devra être portée aux véhicules des entreprises de transports publics pouvant parcourir l'aménagement (BHNS, bus articulés, ...). Le cas échéant, des simulations de giration spécifiques devront être menées.

Un dimensionnement géométrique de plusieurs types de turbo-giratoires sur la base des véhicules déterminants en Suisse a été réalisé dans le logiciel de simulation de giration AutoTURN. Les tableaux de paramètres de dimensionnement des turbo-blocs ont ainsi adaptés aux conditions présentes en Suisse (Chap. 5.4).

Comportement des usagers

En approche d'un turbo-giratoire, la géométrie de celui-ci implique que les usagers doivent effectuer un choix de direction avant d'y entrer. Certains mouvements de demi-tour peuvent être plus difficiles à réaliser en raison de la configuration du turbo-giratoire.

Prenons pour exemple la figure de la page suivante (Fig. 5), certaines voies offrent la possibilité d'effectuer un demi-tour facilement (flèche verte), c'est en général le cas sur le flux principal, qui s'écoule ici de gauche à droite, avec notamment deux voies qui permettent d'aller tout droit et la voie de gauche offre la possibilité de rebrousser chemin.

Par contre, sur les flux secondaires (haut et bas), bien qu'elle puisse être tolérée légalement, car aucune signalisation (verticale ou horizontale) n'interdit ce mouvement, un demi-tour peut être effectué, toutefois avec difficultés (flèche orange) puisqu'après la section à l'anneau à une voie, la trajectoire du demi-tour nécessite d'effectuer un angle très marqué.

Dans d'autres cas finalement (flèche rouge), le mouvement de demi-tour n'est pas possible sans contrevenir à la signalisation (verticale et horizontale).

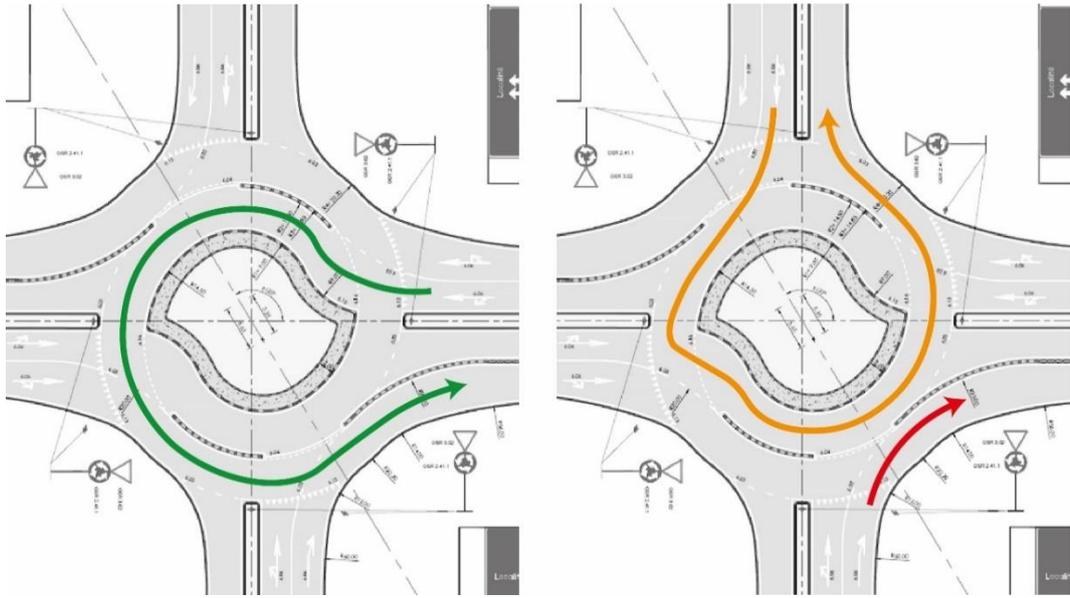


Fig. 5 Exemple de restrictions de certains mouvements.

A l'entrée du turbo-giratoire, la priorité sera cédée au maximum à deux voies et les conflits à l'intérieur du giratoire sont supprimés (pas de changements de voies).

Il est également relevé dans certains documents qu'une information aux usagers est nécessaire lors de la réalisation de tels aménagements, afin d'en augmenter la compréhension.

Les observations réalisées in-situ permettent de proposer des mesures à mettre en œuvre afin de faciliter la lisibilité des turbo-giratoires pour leurs usagers, notamment en termes d'équipements (Chap. 5.5). Toutefois, de par les quelques expériences menées en Suisse, il semble important d'effectivement informer les usagers et de les rendre attentifs aux spécificités d'un turbo-giratoire. Il est fort probable, dans un pays comme la Suisse où l'utilisation de ce type d'aménagement n'est pas encore démocratisée, que les objectifs (diminution des accidents, augmentation de la capacité sur les axes présentant les flux principaux) et les caractéristiques de fonctionnement (compréhension, mouvements erronés, conditions de circulation) ne soient atteints qu'après plusieurs mois, voire années, lorsque les usagers seront habitués au système.

A ce stade, il nous paraîtrait également important d'encourager l'explication théorique du fonctionnement de ces aménagements lors des cours pour jeunes conducteurs.

Intégration des modes doux

L'ensemble de la littérature s'accorde sur le fait que les cyclistes ne devraient pas utiliser les turbo-giratoires pour des raisons de sécurité (respect des cyclistes par les automobilistes et risques liés aux séparateurs de voies). Un guidage de ceux-ci à l'extérieur du giratoire est recommandé. A noter que la littérature suisse [37], en matière trafic cycliste dans les carrefours, recommande également, de manière générale, un itinéraire cyclable hors giratoire.



Fig. 6 Viaduc à cyclistes, Naaldwijk, Pays-Bas, crédit photo : Roy Storm, 2017.

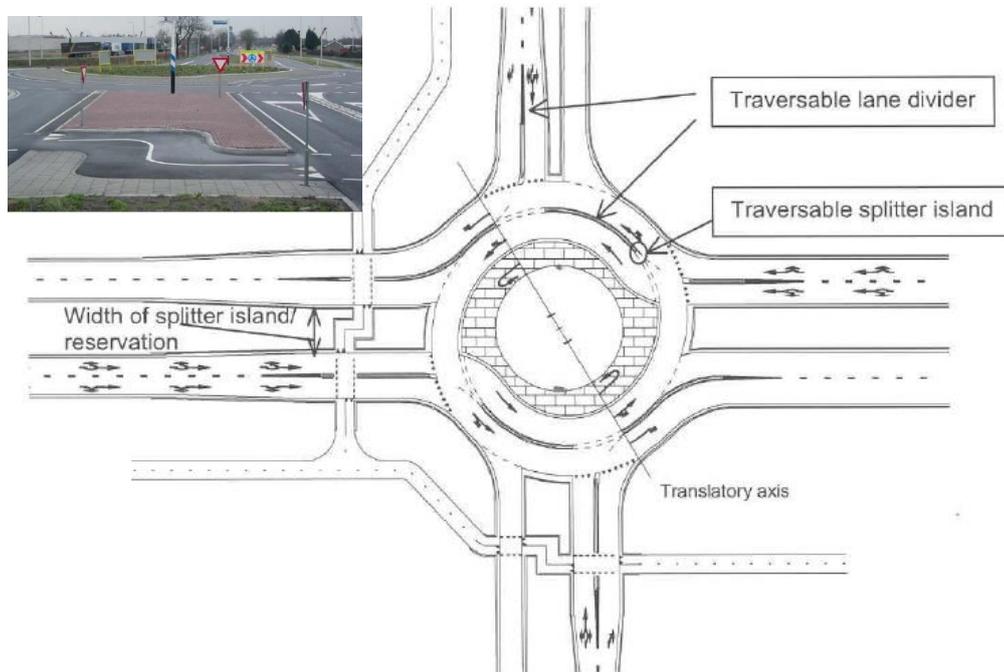


Fig. 7 Exemple d'aménagement cyclable, Pays-Bas [26] [43].

Aux Pays-Bas, les solutions proposées prennent forme de viaduc ou de passages inférieurs qui permettent d'éviter complètement l'introduction de cyclistes et de piétons dans les turbo-giratoires ou, lorsque la place et les conditions ne le permettent pas, des aménagements sont réalisés à une distance raisonnable du turbo-giratoire (Fig. 7).

Concernant les traversées piétonnes, il est recommandé de les placer à distance du giratoire, 5-15m du bord extérieur, dans le cas où le trafic piétonnier ne peut être guidé à l'extérieur du giratoire (via des passages inférieurs ou supérieurs par exemple).

De manière générale et tant que possible, la circulation de cyclistes dans les giratoires à double voies, ce qui s'applique également aux turbo-giratoires, devrait être évitée en privilégiant des cheminements hors giratoires. Si toutefois cette circulation ne peut être évitée, le turbo-giratoire, de par la séparation des flux de circulation offre une meilleure sécurité qu'un giratoire conventionnel à nombre de voies de circulation équivalent. En

termes d'équipements, il est néanmoins proposé de ne pas mettre en place de séparateurs de voies physiques, bordures (Chap. 5.5.1) si les flux de circulation cycles sont importants. Si cela péjore potentiellement les mouvements interdits (changement de voies au sein du turbo-giratoire), cela évite un élément physique pouvant provoquer la chute et des blessures d'un cycliste respectivement d'un motocycliste.

Equipements

Un des équipements particuliers du turbo-giratoire sont les bordures franchissables (séparateurs de voies physiques). En effet, il a été relevé à plusieurs reprises que sans elles, soit uniquement avec un marquage, le respect des voies de circulation à l'intérieur du giratoire est diminué. Toutefois, comme révélé ci-avant, ces séparateurs présentent un danger pour les véhicules deux-roues, que ce soient les vélos, vélomoteurs ou les motos (risque de chute et de blessures). Alors qu'il est recommandé de séparer la circulation des vélos du turbo-giratoire, la circulation des deux-roues motorisés est conservée dans le turbo-giratoire. Certains pays demandent la mise en place de séparateurs surélevés (Pays-Bas, Slovénie, Hongrie, Macédoine) avec pour certains une signalisation avancée liée à ces séparateurs, alors que d'autres (Allemagne, Pologne, République-Tchèque), au contraire, préconisent de ne pas mettre en place ces équipements.

En termes de marquages et de signalisation fixe verticale, plusieurs exemples d'applications sont donnés dans la littérature.

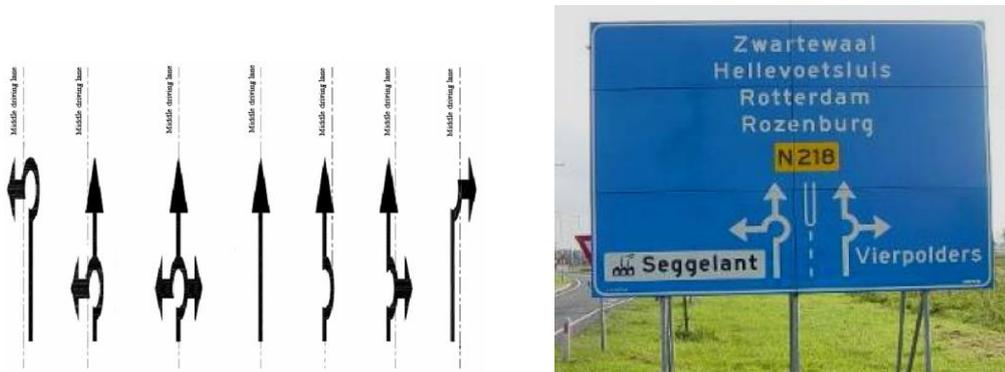


Fig. 8 Exemples de signalisation horizontale et fixe verticale, Pays-Bas [48].

Les rapports de monitoring et les observations in-situ ont permis de déterminer si les séparateurs de voies franchissables doivent ou non être disposés en Suisse et sous quelles conditions. De plus, les différentes solutions de signalisation horizontale (marquage) et de signalisation fixe verticale proposées dans la littérature ont été étudiées en détail et confrontées aux différentes normes et ordonnances suisses en la matière afin de déterminer leur applicabilité.

Sécurité routière

Un des buts premiers des turbo-giratoires est d'obtenir un niveau de sécurité plus important que celui des giratoires conventionnels. Si la réduction du nombre de points de conflits (~40% à ~60%) notamment en raison des entrecroisements qui sont supprimés à l'intérieur du turbo-giratoire, est un point avéré par la littérature, de même que la diminution du nombre d'accidents, la discussion sur la gravité des accidents semble ouverte ; Si certains estiment que les accidents sont moins graves que dans les giratoires conventionnels, d'autres prétendent que les accidents sont plus graves dans le cas de turbo-giratoires en raison d'un angle d'impact plus prononcé (angle proche de 90°).

S'il est encore trop tôt pour se prononcer sur l'impact réel d'un aménagement de turbo-giratoire en termes de sécurité routière, qui nécessitera un monitoring des aménagements réalisés en Suisse, les expériences menées in-situ et la diminution théorique des points de conflit (Chap. 5.9) offrent une perspective encourageante en la matière.

Coûts

Les investissements initiaux (notamment coûts de construction) des turbo-giratoires sont plus élevés que ceux des giratoires conventionnels. Néanmoins, il en ressort que les coûts sur l'ensemble de la durée de vie de l'ouvrage et sociétaux (liés aux accidents) sont moins importants dans le cas de turbo-giratoires.

Entretien

Il est relevé que l'exécution de l'entretien hivernal, notamment le déneigement, est plus compliqué dans les turbo-giratoires en raison séparateurs de voies. Pour exemple, en Allemagne, il est préconisé de ne pas mettre de séparateurs de voies entre autres pour cette raison. Au contraire, en Slovénie, on garantit l'entretien hivernal à l'aide d'une non-continuité des séparateurs de voies.



Fig. 9 Non-continuité des séparateurs de voies afin de garantir l'entretien hivernal, Slovénie [52].

Des mesures relatives à l'écoulement des eaux et à l'entretien hivernal sont proposées pour le contexte suisse (Chap. 5.6).

Impact environnemental

En termes d'impact environnemental, certaines recherches annoncent une diminution de certaines émissions de polluants en comparaison aux giratoires conventionnels, alors que d'autres, dans des conditions spécifiques de trafic (saturation), relèvent des émissions plus élevées.

Du fait du peu d'aménagements de turbo-giratoires réalisés en Suisse, il est difficile de se prononcer à ce stade sur une comparaison de l'impact environnemental d'un turbo-giratoire à comparaison d'un giratoire conventionnel. Seuls des monitorings réalisés sur plusieurs aménagements en Suisse permettront éventuellement de dégager une tendance en la matière.

Afin de réaliser cette appréciation comparative, on pourra se baser sur l'aide à l'exécution du groupement cercle bruit, « Détermination du bruit à proximité des carrefours et des giratoires ».

3 Définition des éléments de base

3.1 Matrice des éléments de base

Sur la base de l'état des connaissances (Chap. 2), on établit une matrice des éléments de base à considérer lors de la conception et la planification d'aménagement de turbo-giratoires. Les éléments de base répertoriés ont été rassemblés par familles, de même, celle-ci sont agrégées en trois groupes principaux.

Il est important de faire remarquer ici que les groupes ne peuvent être traités indépendamment les uns des autres. En effet, l'interdépendance de ces groupes est importante, pour seuls exemples, des modifications de géométrie ou d'équipements peuvent avoir un effet sur la sécurité routière, ou à l'inverse, la méthode d'intégration des modes doux peut avoir un impact sur la géométrie ou les équipements.

Tab. 15 Matrice des éléments de base

Groupe	Famille	Élément de base
Infrastructures	Conception	Conditions d'implantation, localisation
		Capacité, conditions de trafic
		Géométrie
		Equipements
	Maintenance	Entretien
Usagers et modes	Usagers	Comportement des usagers
		Intégration des modes doux
Aspects sociétaux et environnementaux	Société	Sécurité routière
		Coûts
	Environnement	Impact environnemental

Il était prévu de pondérer les différentes familles d'éléments de base en fonction de leur importance dans un projet de conception et de planification de turbo-giratoires. Toutefois, au vu de la synthèse de la littérature, des études de cas menées et de l'interdépendance des différentes familles, il s'avère qu'une telle pondération n'est pas recommandée. De plus, une telle pondération serait subjective dans la mesure où la sensibilité vis-à-vis des éléments de base de chaque personne impliquée dans un tel projet différerait.

3.2 Synthèse des éléments de base

Lors d'un projet de planification et de conception de turbo-giratoire, les différents éléments de base énumérés devront être abordés.

L'analyse de ces éléments de base, à l'aide notamment d'études de cas et en comparaison aux normes suisses permet de définir les fondements de la théorie de dimensionnement géométrique et en capacité, de décrire les conditions d'applicabilité et serviront de chapitres clés en vue de l'établissement d'une future normalisation.

4 Etudes de cas

4.1 Turbo-giratoires à travers le monde

Suite aux recherches de L.G.H. Fortuijn, les premières prémisses d'un turbo-giratoire ont vu le jour en 1999 au niveau de la jonction autoroutière Maasdijk à De Lier aux Pays-Bas.



Fig. 10 Turbo-giratoires en goutte à la jonction autoroutière Maasdijk, [google.com/maps](https://www.google.com/maps), 2021.

Le premier véritable turbo-giratoire a, lui, été réalisé en l'an 2000 à Barendrecht aux Pays-Bas.

Début 2020, selon le site internet spécialisé dirkdebaan.nl, on compte plus de 600 turbo-giratoires ou assimilables dans le monde.



Fig. 11 Localisation mondiale de turbo-giratoires, dirkdebaan.nl, 2020.

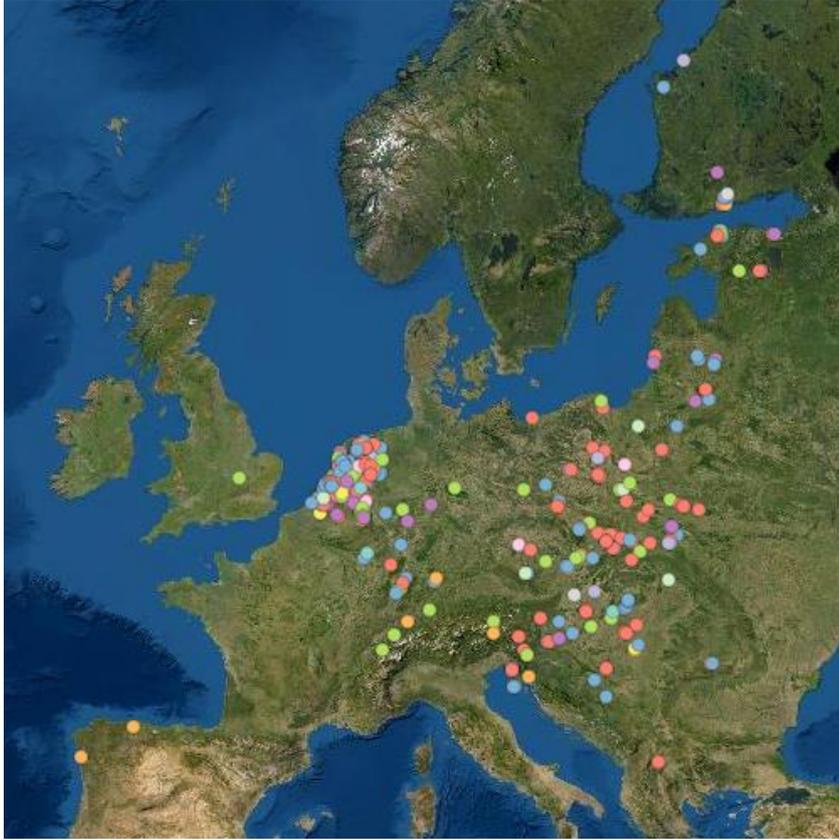


Fig. 12 Localisation européenne de turbo-giratoires, *dirkdebaan.nl*, 2020.

Alors que plus de la moitié de ces aménagements sont réalisés aux Pays-Bas (380 turbo-giratoires), on en trouve également en premier lieu en Pologne (73), en Hongrie (24), en Allemagne (19) et en Slovénie (18).

4.2 Turbo-giratoires en Suisse

Selon *dirkdebaan.nl*, on dénombre en Suisse en début 2020, cinq turbo-giratoires :

- Le giratoire de Glättimüli (Steffisburg), classé comme turbo-giratoire ;
- Deux giratoires, non-loin de Glättimüli, à l'échangeur de l'A6 (Heimberg), classés comme turbo-giratoires partiels ;
- Le giratoire du Boeuferrant (Monthey), classé comme turbo-giratoire partiel ;
- Le giratoire de Muripark (Muri), classé comme presque-turbo-giratoire.



Fig. 13 Glättimüli (relevé par drone – RGR, 2020), Heimberg (*Berner Zeitung*, 2019).



Fig. 14 Boeuferrant (map.geo.admin.ch), Muripark (*Aargauer Zeitung*).

Durant la recherche, il est apparu que plusieurs autres giratoires suisses ressemblent aujourd'hui fortement à des turbo-giratoires. Toutefois, tout comme certains des giratoires présentés ci-dessus, tous ne respectent pas les conditions géométriques définies par Fortuijn (Chap. 2.6) et seraient donc plutôt assimilés à des « presque-turbo-giratoires » (Turbo-like roundabout en anglais).

Il s'agit notamment du giratoire du Bas-du-Reymond à la Chaux-de-Fonds (dans sa partie Est), du giratoire souterrain de la Poya à Fribourg, du giratoire Wettsteinplatz à Bâle et du giratoire de la Seetalstrasse à Lenzburg.

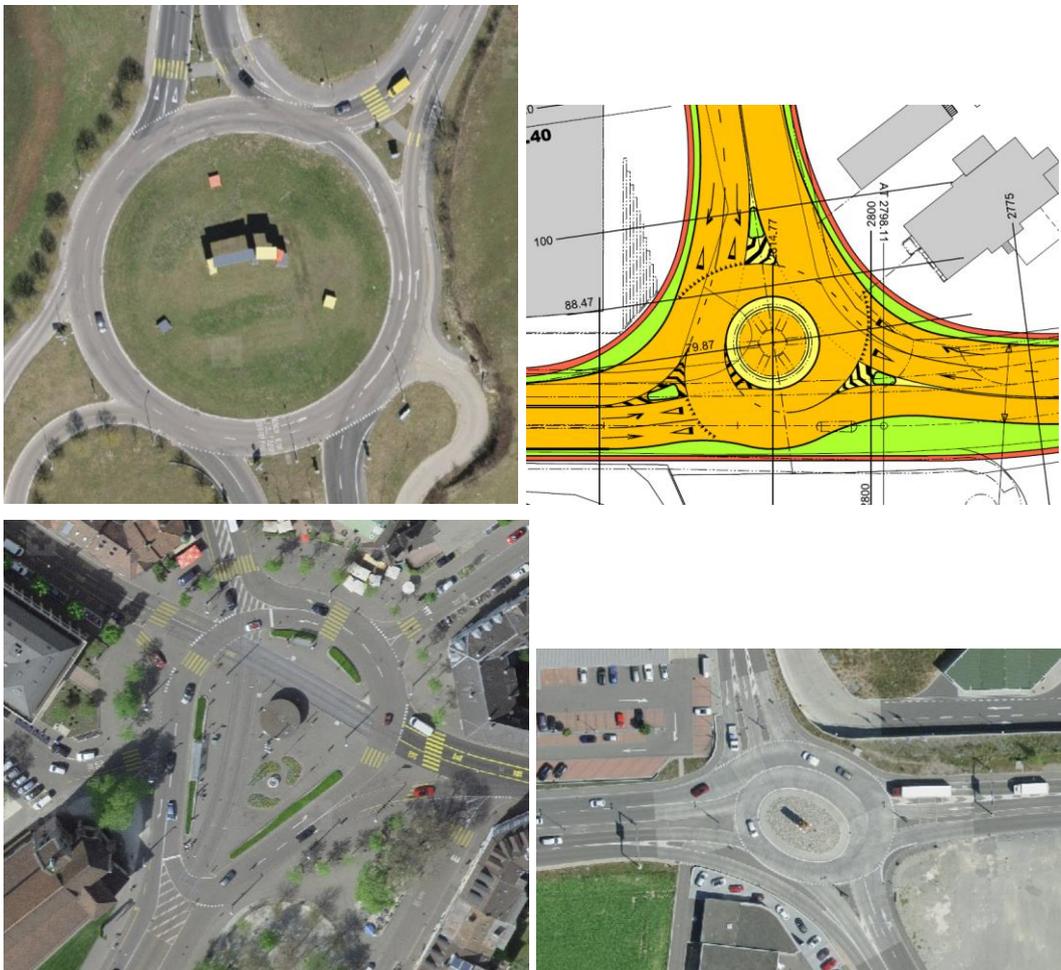


Fig. 15 Bas-du-Reymond (map.geo.admin.ch, 2020), Poya (*Service des Ponts et Chaussées du Canton de Fribourg, groupement MPP*), Wettsteinplatz (map.geo.admin.ch, 2018), Seetalstrasse (map.geo.admin.ch, 2018).

Finalement, le giratoire du Lavapesson à Fribourg, qui a été transformé temporairement dans le cadre de travaux de réfection d'un ouvrage d'art à proximité, est également considéré.



Fig. 16 Lavapesson (travaux OFROU, relevé par drone – RGR, 2018).

4.3 Sites retenus

Afin d'évaluer les différents éléments de base établis précédemment (Chap. 3.1), des observations in-situ ont été réalisées. Les sites suivants ont été sélectionnés pour ces analyses (éléments grisés, voir note) :

- Glättimüli (Steffisburg), turbo-giratoire à 4 branches, sans séparateurs physiques de voies ;
- Lavapesson – Giratoire « Ibis » (Fribourg), turbo-giratoire partiel à 4 branches en phases de chantier et giratoire conventionnel hors phases de chantier ;
- Turbo-giratoire N470-Berckel en Rodenrijs, Zoetermeer (Pays-Bas), turbo-giratoire à 4 branches, 2 voies d'entrée au maximum ;
- Turbo-giratoire N470-Tolhekplein, Pijnacker (Pays-Bas), turbo-giratoire à 4 branches, 5 voies d'entrée au maximum, avec by-pass et signalisation lumineuse.

Les sites suisses ont été retenus pour les raisons suivantes :

- Glättimüli : seul turbo-giratoire classifié comme tel connu au début du projet de recherche ;
- Lavapesson : giratoire provisoire permettant une comparaison directe avec un giratoire conventionnel, de plus le bureau RGR Robert-Grandpierre et Rapp SA (direction du projet de recherche) était également mandataire trafic pour les travaux liés au Pont sur le Lavapesson et assurait donc le suivi du turbo-giratoire.

Les deux sites hollandais ont été retenus en raison de leurs différentes topologies de turbo-giratoires et de leur proximité géographique (distants d'environ 4km).

Note : En raison de la pandémie de coronavirus, les analyses devant être réalisées sur site aux Pays-Bas n'ont pas pu être menées. Les études se sont donc concentrées sur les turbo-giratoires suisses, raison pour laquelle les deux turbo-giratoires situés aux Pays-Bas sont ici grisés. Toutefois, certaines analyses (éléments géométriques, équipements, vitesse simulée) ont pu être réalisées sur ces aménagements.

Une évaluation hors site d'autres éléments de base a été effectuée sur certains de ces aménagements. A cette fin, les méthodes développées dans ce projet (méthode de dimensionnement et de comparaison de la sécurité routière) ainsi que les outils informatiques suivants ont été utilisés :

- AutoTURN : logiciel de simulation de girations, dimensionnement géométrique ;
- KREISEL : logiciel de dimensionnement en capacité ;
- Aimsun : logiciel de simulations de trafic.



Fig. 17 Berckel en Rodenrijs – Zoetermeer, Tolhekplein – Pijnacker (*maps.google.com*, 2021).

4.4 Matrices d'application des éléments de base

Dans les chapitres qui suivent, les éléments de base ont été appliqués sur les différentes études de cas menées. Les matrices ci-dessous représentent les différents éléments de base qui ont été relevés ou ont été évalués pour chaque site sélectionné.

Tab. 16 *Éléments de base relevés in-situ*

Site	Élément de base	Méthode de relevé
Glättimüli, Lavapesson	Conditions de trafic	Observations (y.c. drone)
	Vitesse	Drone
	Comportement des usagers	Observations (y.c. drone)
	Intégration des modes doux	Observations
	Equipements	Vision sur site

Tab. 17 *Éléments de base étudiés hors site*

Site	Indicateurs	Méthode d'évaluation
Glättimüli	Capacité	Monitoring Application de la méthode de dimensionnement Dimensionnement par méthodes implémentées dans le logiciel Kreisel Simulations de trafic Aimsun
	Géométrie	Plans
	Sécurité routière	Comparaison théorique vs giratoire conventionnel Monitoring (rapport monitoring à 3 mois, à 1 an)
Lavapesson	Capacité	Monitoring Application de la méthode de dimensionnement Dimensionnement par méthodes implémentées dans le logiciel Kreisel Simulations de trafic Aimsun
	Géométrie	Plans Evaluation AutoTURN
	Sécurité routière	Comparaison théorique avec un giratoire conventionnel Monitoring
	Entretien	Discussion avec le service d'entretien

4.5 Glättimüli

Le cas d'étude Glättimüli est situé au nord de Thoune. Le giratoire est le lien entre l'accès à la A6 via la jonction Thoune-Nord (16) et le contournement de Thoune (AlpenBrücke).

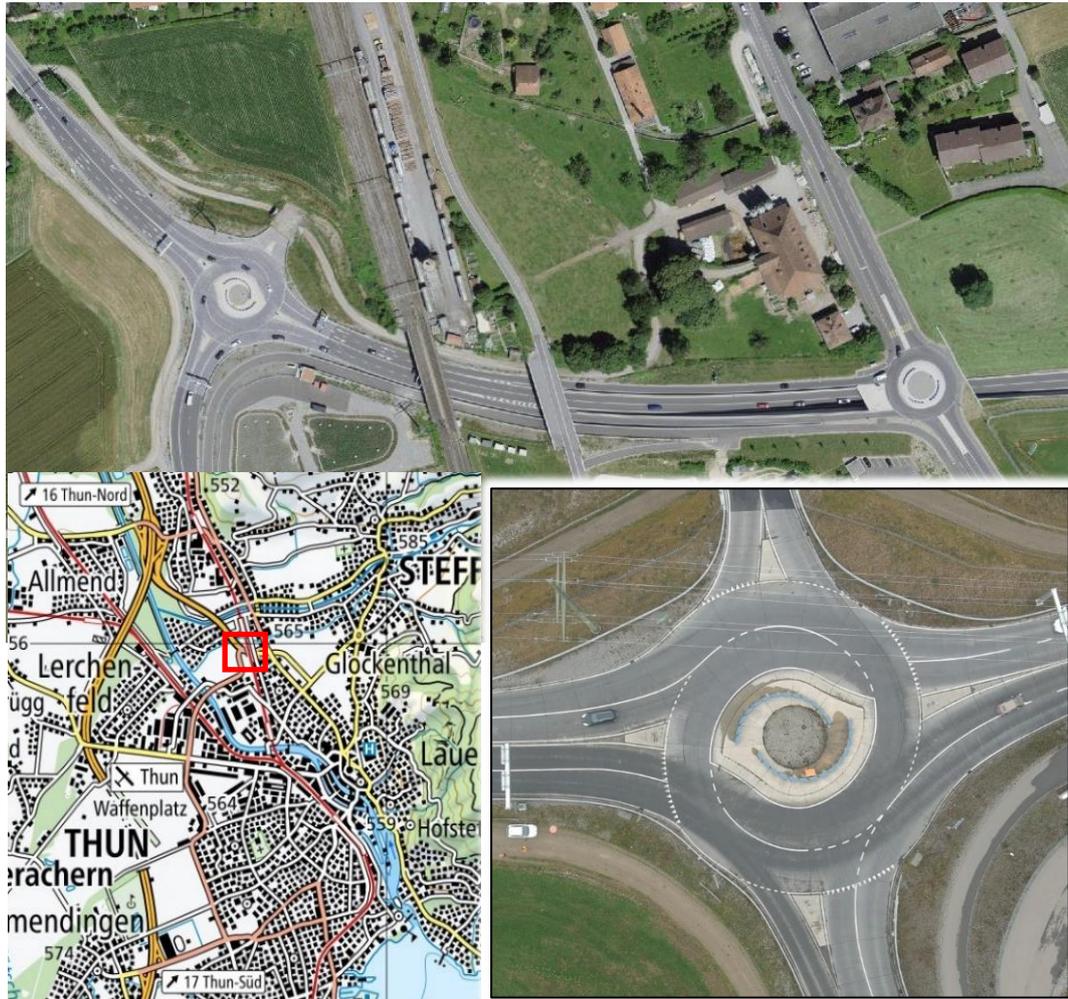


Fig. 18 Turbo-giratoire de Glättimüli (map.geo.admin.ch, 2018 et relevé par drone – RGR, 2020).

Ce turbo-giratoire à 4 branches est de typologie basique-œuf (Chap. 2.6) avec une des entrées (Nord, Aarefeld) ne possédant qu'une seule voie. Il est à noter que cette branche, non-utilisée dans un premier temps, a été ouverte avant le relevé effectué par drone sur cette zone d'étude.

Relevés sur site

Un relevé par vol de drone a été effectué en date du lundi 16 décembre 2020. Dans le but de l'analyse des éléments de base, notamment des familles « Conception » et « Usagers », des emplacements de compteurs virtuels ont été déterminés et nommés (Fig. 19).



Fig. 19 Emplacements des compteurs virtuels, Glättimüli.

4.6 Lavapesson

Le cas d'étude Lavapesson est situé à proximité de la jonction de Fribourg-Nord. Ce giratoire à deux voies à l'anneau a été aménagé en un turbo-giratoire dans le cadre dans le cadre de travaux d'assainissement du Pont sur le Lavapesson (OFROU). Ce turbo-giratoire à 4 branches est de typologie œuf (Chap. 2.6). A noter qu'il s'agit d'un turbo-giratoire partiel dans la mesure où, durant les travaux, une seule branche de sortie du giratoire possédait 2 voies.

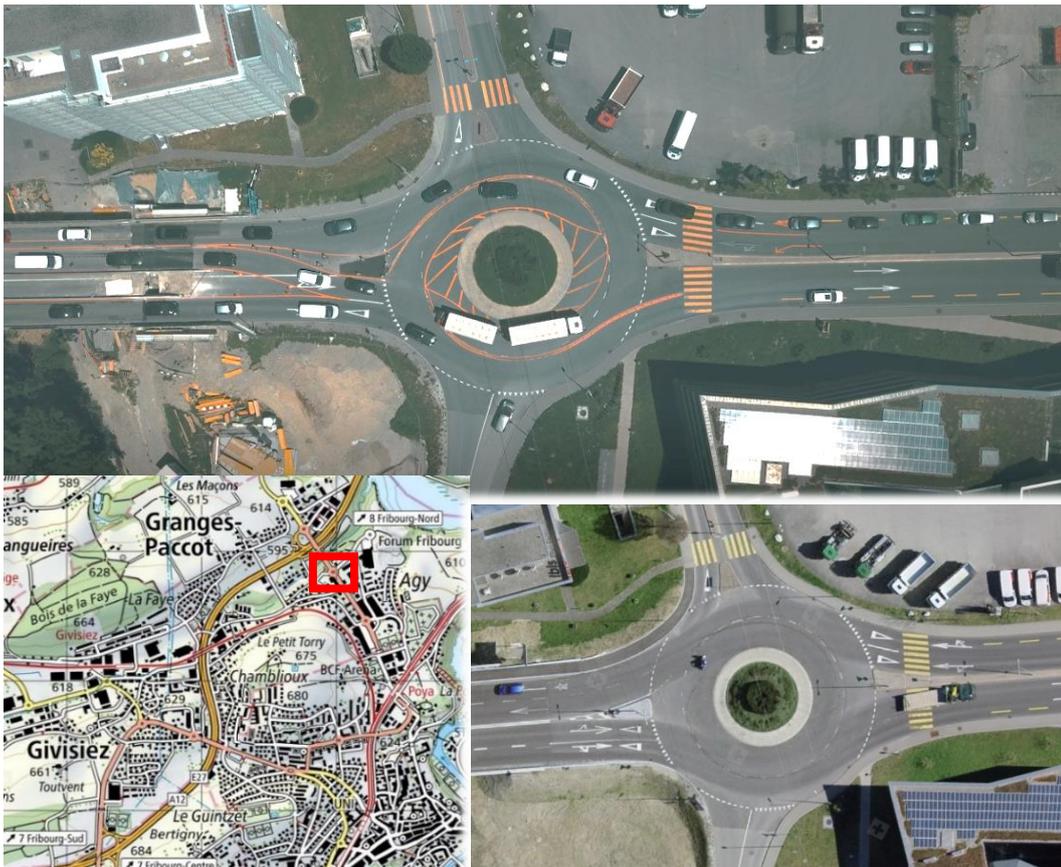


Fig. 20 Turbo-giratoire partiel du Lavapesson (map.geo.admin.ch, 2020 et relevé par drone – RGR, 2018).

Le turbo-giratoire partiel a été mis en œuvre pour les travaux effectués en 2018, enlevé durant la période froide afin de garantir la maintenance hivernale et a été remis en œuvre pour les travaux effectués en 2019. Le giratoire conventionnel à deux voies à l'anneau a ensuite été remis en état après travaux.

Relevés sur site

Des relevés par vol de drone ont été effectués en dates du lundi 7 mai 2018, du mercredi 20 juin 2018 et du jeudi 10 octobre 2019. Ces différents vols ont permis de constater les différences de circulation entre deux étapes de travaux distinctes (mai 2018 – juin 2018) et également de visualiser l'habitude prise par les usagers en octobre 2019.

Finalement, un vol de drone a été effectué en date du 25.02.2021 afin de comparer le turbo-giratoire au giratoire conventionnel.

Tout comme pour le turbo-giratoire de Glättimüli, des emplacements de compteurs virtuels ont été déterminés et nommés (Fig. 21).

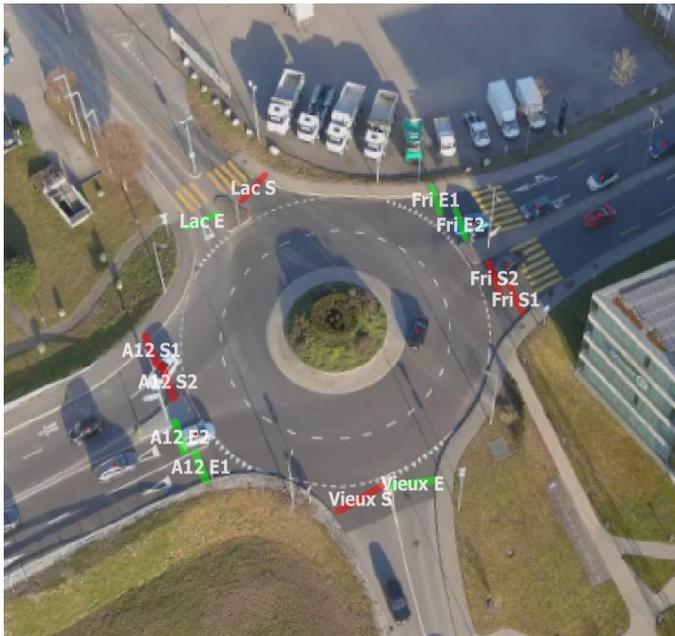


Fig. 21 Emplacements des compteurs virtuels, Lavapesson.

4.7 Particularités des sites

Glättimüli

Il est à noter ici plusieurs particularités du site de Glättimüli. A l'Est, une zone d'entrecroisement relativement courte est présente avant l'entrée dans le giratoire, de même qu'à la sortie du giratoire. A l'Ouest, en sortie de giratoire, un rabattement de la voie de droite sur la voie de gauche est présent. Ces différentes particularités peuvent impliquer un comportement spécifique en amont, sur les entrées du giratoire. En effet, en fonction de la destination, ou ayant connaissance du rabattement de voie, les usagers ont tendance à se présélectionner différemment que si le turbo-giratoire offrait une configuration « standard » à savoir deux voies de circulation en entrées et sorties, sans spécificités.

Dans le cadre d'un dimensionnement en capacité, que ce soit lors de la planification ou de l'analyse de performances d'un turbo-giratoire, de telles particularités doivent être considérées. Finalement, à l'Ouest, en entrée de giratoire, de même qu'au Sud, le passage d'une à deux voies de circulation peut devenir un élément déterminant de la capacité routière et devrait donc être également considéré.

Lavapesson

Le site du Lavapesson offre également quelques particularités. Outre le fait d'être un aménagement provisoire, les différentes phases de travaux ont impliqué des trajectoires d'entrées ou de sorties parfois relativement marquées à quelques mètres du turbo-giratoires, notamment sur la branche venant et allant à l'A12.

En provenant de Fribourg, alors qu'il s'agit d'un flux principal en temps normal réparti sur deux voies, le turbo-giratoire, en raison des phases de travaux, n'offre la possibilité d'aller tout droit que sur la voie de droite en entrée. Cette situation a notamment impliqué des comportements erronés (franchissement de ligne continue de véhicules entrant sur la voie de gauche, voir Chap. 5.7) mais également des files d'attente plus importantes sur la voie de gauche que celle de droite. Ce dernier phénomène a entraîné des comportements particuliers, mais néanmoins pas fondamentalement proscrits par le marquage au sol, bien qu'impliquant une trajectoire cassée, à savoir des véhicules entrants sur la voie de gauche (Fribourg) faisant le tour complet du turbo-giratoire pour passer devant la branche d'entrée de laquelle ils proviennent pour finalement sortir en direction de l'A12.

Si ces comportements ne sont que difficilement prévisibles, ils ont été pris en compte dans les simulations de trafic pour l'évaluation des niveaux de service de même qu'avec la nouvelle méthode de dimensionnement proposée (voir Chap. 5.2.3).

4.8 Synthèse des études de cas

De par l'analyse internationale, on relève le même constat qui a abouti à cette recherche à savoir que les turbo-giratoires ne sont que très peu aménagés en Suisse alors que d'autres pays européens (notamment Pays-Bas) les adoptent en lieu et place de giratoire conventionnel à deux voies à l'anneau.

La pandémie de coronavirus vécue durant cette étude n'a malheureusement pas permis d'effectuer des observations in-situ de deux turbo-giratoires aux Pays-Bas qui avaient été sélectionnés. Les analyses se sont donc concentrées sur le turbo-giratoire de Glättimüli à Steffisburg et le turbo-giratoire partiel provisoire du Lavapesson à Fribourg.

La sélection de ces deux giratoires a été justifiée au Chap. 4.3. Il est toutefois à relever que l'analyse effectuée (Chap. 5.2) confirme que ce choix était judicieux, ces deux giratoires étant ceux qui approchent au mieux les conditions géométriques établies par Fortuijn [34].

5 Evaluation des éléments de base

Les éléments de base sont évalués et définis à l'aide de détails relevés dans la littérature (Chap. 2), des différentes observations menées in-situ sur les sites retenus et des éléments étudiés hors site (Chap. 4.4).

5.1 Conditions d'implantation, localisation

Dans l'approche du concept géométrique, le premier élément à considérer est celui du domaine d'application, puisqu'il sert de base au dimensionnement géométrique des giratoires. De par l'analyse de la littérature et la comparaison aux normes nationales, il en ressort les éléments clés suivants :

- Routes à orientation trafic (principales, de liaison ou collectrices importantes). Puisque face aux entrées, il doit y avoir au moins deux voies de circulation à l'anneau et qu'au moins une ou deux sorties possèdent deux voies, impliquant des charges de trafic relativement importantes ;
- Applicable tant en milieu extra-urbain qu'en milieu urbain. Dans ce dernier cas, des mesures spécifiques devront être prises pour les usagers non-motorisés (itinéraires hors giratoire).

Glättimüli

Le giratoire de Glättimüli est situé sur une route à orientation trafic (Route principale, domaine des Routes Nationales) et est composé de deux voies à l'anneau.

Situé en milieu extra-urbain, un cheminement pour les cyclistes et les piétons (itinéraire de mobilité douce) a tout de même été réalisé afin que ceux-ci n'empruntent pas le giratoire.

Lavapesson

Le giratoire du Lavapesson est situé sur une route à orientation trafic (Route principale, domaine des Routes Nationales) et est composé de deux voies à l'anneau.

Etant situé à la jonction des milieux-urbains et extra-urbain, des mesures ont été prises pour les usagers non-motorisés avec un itinéraire spécifique réalisé hors giratoire pour les cyclistes durant la période des travaux.



Fig. 22 Cheminements pour la mobilité douce – Glättimüli et balisage de l'itinéraire cyclable – Lavapesson.

5.1.1 Recommandations

Le domaine d'application doit être celui des routes à orientation trafic qui nécessitent la mise en œuvre d'un giratoire à au moins deux voies de circulation à l'anneau pour des raisons de capacité.

Lors de la mise en œuvre d'un aménagement de turbo-giratoire en milieu urbain ou en milieu extra-urbain sur des itinéraires cyclables d'importance, des mesures doivent être prises les usagers non-motorisés (Chap. 5.8).

5.2 Capacité, conditions de trafic

5.2.1 Comptages sur site

Sur la base des vols par drone effectués et des emplacements des compteurs virtuels (Fig. 19 et Fig. 21), une extraction de comptages de trafic a été effectuée sur les deux sites de cas d'étude, permettant de réaliser une matrice origine-destination des giratoires, notamment à l'heure de pointe du soir (HPS).

Charges directionnelles

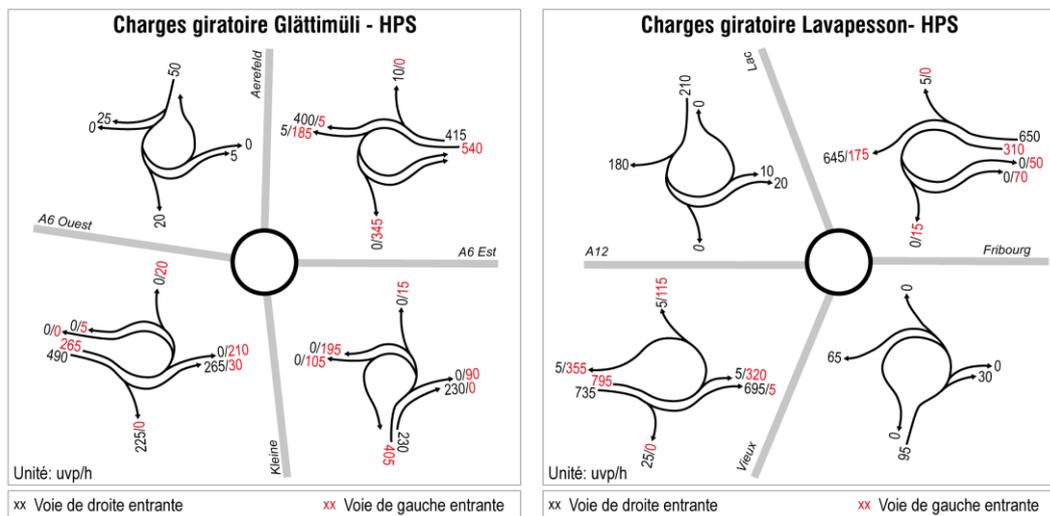


Fig. 23 Glättimüli – 16.12.2020 à l'HPS

Lavapesson – 07.05.2018 à l'HPS

5.2.2 Conditions de trafic

Glättimüli

Selon le monitoring effectué en 2017 [35], il ressort que suite à la réalisation du turbo-giratoire, le trafic a augmenté de 5% sur l'axe principal (Est-Ouest). Les derniers comptages effectués en décembre 2020 montrent un volume global équivalent (2'400 uvp/h) mais la répartition entre les branches a évolué avec une diminution du trafic sur les branches de l'axe principal et une augmentation sur la branche secondaire « Kleine ». Il est à noter que le relevé de 2020 a été effectué durant la crise sanitaire.

Lavapesson

En comparant les charges de trafic de 2018 et de 2021, on constate une baisse du trafic, de l'ordre de 8%, sur les branches de l'axe principal A12 – Fribourg, qui s'explique probablement par les changements de comportements liés à la crise sanitaire.

5.2.3 Evaluation en capacité

Dans chacun des cas étudiés, le fonctionnement du turbo-giratoire a été analysé à l'aide du logiciel Kreisell selon les quatre méthodes suivantes (voir Annexe I) :

- Turbo-Kreisverkehr 2015 (Allemagne) ;
- Turbo-Rotonde, Crow 2008 (Pays-Bas) ;
- Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007 (Pays-Bas) ;
- HCM 2010 (Etats-Unis d'Amérique).

L'objectif est ici de déterminer, avec les outils à disposition, quelle méthode est la plus appropriée au turbo-giratoire en Suisse, ou approche le mieux la méthode préconisée, et de connaître leurs limites.

Méthodes implémentées dans le logiciel Kreisell

Le tableau ci-dessous synthétise les différentes méthodes de calcul implémentées dans le logiciel Kreisell (version 8.1.7).

Tab. 18 Méthode de calcul des turbo-giratoires avec le logiciel Kreisell

Capacité	Turbo-Kreisverkehr 2015 (Allemagne)	HCM 2010 (USA)	Turbo-Rotondes, Crow 2008 (Pays Bas)	Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007 (Pays Bas)
Temps d'attente	HBS 2015 +HBS 2009 Akcelik, Troutbeck (1991)	HCM 2010	HBS 2015 +HBS 2009 Akcelik, Troutbeck (1991)	HBS 2015 +HBS 2009 Akcelik, Troutbeck (1991)
Longueur de file d'attente	Wu, 1997	Wu, 1997	Wu, 1997	Wu, 1997
Influence des piétons en entrée	Stuwe, 1992	Stuwe, 1992	Donnée non disponible	Donnée non disponible
Influence piétons en sortie	Non pris en compte	Selon méthode Griffith-Formula	Non pris en compte	Non pris en compte
Niveau de service (LOS)	HBS	HCM 2010	Donnée non disponible	Donnée non disponible

Capacité – Turbo-Kreisverkehr (2015)

La formule générale peut être énoncée comme suit :

$$G = 3600 \cdot \left(1 - \frac{t_{min} \cdot q_k}{n_k \cdot 3600}\right)^{n_k} \cdot \frac{n_z}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_k}{3600} \cdot (t_g - \frac{t_f}{2} - t_{min})}$$

Informations relatives au trafic :

- G : Capacité de base [UVP/h] ;
- q_k : Volume de trafic dans l'anneau [UVP/h] ;
- n_k : Nombre de voies à l'anneau ;
- n_z : Nombre de voies dans l'entrée ;
- t_g : Délai limite (intervalle de temps) [s], t_g = 4.1s ;
- t_f : Temps intervéhiculaire [s], t_f = 2.9s ;
- t_{min} : Écart de temps minimum entre les véhicules dans l'anneau [s], t_{min} = 2.1s.

Capacité – HCM (2010)

Pour un giratoire à deux voies et deux entrées, la formule générale peut être énoncée comme suit :

- C_{e,R} = 1.420 · e^(-0.85·10⁻³)
- C_{e,L} = 1.350 · e^(-0.92·10⁻³)

Informations relatives au trafic :

- C_{e,R} : Capacité de la voie de droite [UVP/h] ;
- C_{e,L} : Capacité de la voie de gauche [UVP/h] ;

Temps d'attente – Turbo-Kreisverkehr (2015) – Crow (2008) – Fortuijn (2007)

La formule générale peut être énoncée comme suit :

$$t_{w,i} = \frac{3600}{C_i} + 900 \cdot \left[\left(\frac{q_i}{C_i} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{q_i}{C_i} - 1 \right)^2 + \frac{8 \cdot q_i}{C_i^2}} \right]$$

Informations relatives au trafic :

- $T_{w,i}$: Temps d'attente moyen du courant i [s/véh] ;
- C_i : Capacité du courant i [UVP/h] ;
- q_i : volume de trafic du courant i [UVP/h].

HCM (2010)

Pour un giratoire à deux voies à l'anneau et deux entrées, la formule générale peut être énoncée comme suit :

$$d = \frac{3600}{C_{m,x}} + 900T \cdot \left[\left(\frac{v_x}{C_{m,x}} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{v_x}{C_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_{m,x}} \right) \cdot \left(\frac{v_x}{C_{m,x}} \right)}{450T}} \right] + 5$$

Informations relatives au trafic :

- d_i : Temps d'attente moyen par véhicule [s/véh] ;
- $C_{m,x}$: Capacité du courant x [UVP/h] ;
- V_x : Volume de trafic du courant x [UVP/h] ;
- T : Période d'enquête [h].

Ces deux formules sont quasiment similaires, à une exception près, celle de l'HCM augmente le temps d'attente de 5s.

Glättimüli

Tab. 19 Tableau de synthèse des résultats - Glättimüli

Méthodes	Modélisation de l'affectation des voies	Répartition des charges en entrée	Répartition des charges en sortie	Niveau de service global
Turbo-Kreisverkehr, 2015	OUI	NON	NON	A
Crow, 2008	OUI	NON	NON	A
Fortuijn, 2007	NON	OUI / NON	NON	B
HCM, 2010	OUI	NON	NON	C

Le tableau ci-dessus indique si la méthode intégrée dans le logiciel de dimensionnement en capacité Kreisell permet d'une part la modélisation de l'affectation des voies telle qu'elle est constatée sur le terrain (possibilités de mouvements offertes par chaque voie), la répartition des charges de trafic en entrée par voies de circulation et en sortie, ainsi que le niveau de service global du turbo-giratoire (niveau de service le plus élevé pour une des voies d'entrée).

L'évaluation des niveaux de service est comparée à l'aide des applications suivantes :

- Logiciel de dimensionnement Kreisell (selon les méthodes intégrées) ;
- Modélisation réalisée dans le logiciel de micro-simulation Aimsun (Chap. 5.2.5) ;
- Méthode de dimensionnement proposée (Chap. 5.2.4 et suivants) ;
- In-situ (visuel).

Il est à noter ici que la dernière méthode est issue d'une évaluation visuelle des vitesses par traitement automatisé (Chap. 5.7). L'évaluation du niveau de service est donc sujette à interprétation (subjective car non-basée sur des valeurs extraites).

L'évaluation du niveau de service dépend du temps d'attente estimé dans chaque voie d'entrée d'un turbo-giratoire. Selon les bases théoriques permettant de déterminer les temps d'attente (ex : Kimber & Hollis), celui-ci dépend d'un facteur de probabilité alpha (50% $\alpha = 1$, 95% $\alpha = 2.97$, 99% $\alpha = 4.65$). Le calcul du temps d'attente considéré dans les méthodes Kreisel et dans les normes suisses actuelles pour les giratoires conventionnels s'appuient sur une probabilité de 50%, soit un temps d'attente moyen.

Tab. 20 Analyse des niveaux de service - Glättimüli

Branche	T-Kreis.	Crow	Fortuijn	HCM	Aimsun	Nouvelle méthode	In-situ
A6 Ouest	A	A	A	C	A	A	A
Kleine	A	A	A	B	A	A	A
A6 Est	A	A	B	C	A	A	A
Aarefeld	A	A	A	A	B	B	B

Lavapesson

Tab. 21 Tableau de synthèse des résultats - Lavapesson

Méthodes	Modélisation de l'affectation des voies	Répartition des charges en entrée	Répartition des charges en sortie	Niveau de service global
Turbo-Kreisverkehr, 2015	OUI	NON	NON	D
Crow, 2008	OUI	NON	NON	B
Fortuijn, 2007	NON	OUI / NON	NON	F
HCM, 2010	OUI	NON	NON	F

Tab. 22 Analyse des niveaux de service - Lavapesson

Branche	T-Kreis.	Crow	Fortuijn	HCM	Aimsun	Nouvelle méthode	In-situ
A12	B	A	F	F	A / B	A	A
Vieux	C	B	A	C	D	E	C / D
Fribourg	D	B	C	F	B	C	B
Lac	C	B	A	C	C	D	B

Conclusions

Les méthodes utilisées dans le logiciel Kreisel (version 8.1.7) ne permettent pas une répartition correcte des charges de trafic par voie. L'utilisation du logiciel est destinée à une analyse d'un giratoire en phase de planification (procédure d'après la demande) lorsque la répartition réelle des charges de trafic ne sont pas connues. Lors d'une vérification du fonctionnement d'un giratoire existant (analyse des performances), un paramétrage des variables est nécessaire.

Seule la méthode de Fortuijn permet de gérer la répartition des charges en entrée mais elle ne permet pas de modéliser tous les cas d'affectation des voies possibles (ex. : Glättimüli, ce problème a été confirmé sur la version 8.2). De plus, selon les informations du bureau BPS (développeur du logiciel Kreisel), cette méthode de dimensionnement n'est plus utilisée aux Pays-Bas. La méthode de Fortuijn n'est donc pas retenue.

La méthode du HCM n'a pas été retenue car elle propose des niveaux de service incohérents par rapport à ceux observés et simulés (axe principal avec niveau de service plus élevé que les branches secondaires).

Entre les méthodes Turbo-Kreisverkehr 2015 et de Crow 2008, aucune différence n'est constatée sur les résultats de Glättimüli. Toutefois, sur Lavapesson, la méthode Turbo-Kreisverkehr offre des niveaux de service plus élevés que la méthode de Crow et inverse à la cohérence attendue (niveaux de services plus élevés sur les branches secondaires, alors qu'ici c'est sur l'axe principal, Fribourg, que le niveau de service est élevé).

Parmi toutes les méthodes actuellement implémentées dans le logiciel de dimensionnement Kreisel, nous pouvons recommander d'utiliser la méthode Crow, qui est celle qui approche au mieux les résultats observés et simulés. Cela confirme les propos du bureau BPS qui donne également cette méthode comme la plus pertinente en la matière et la plus utilisée actuellement aux Pays-Bas.

Les différences toutefois constatées entre les différentes méthodes et les observations relevées in-situ démontrent l'intérêt d'approfondir la méthode d'évaluation en capacité des turbo-giratoires en Suisse. Un développement qui est effectué dans les chapitres qui suivent, où, à l'aide de simulations de trafic, une nouvelle méthode de dimensionnement est proposée.

Les résultats obtenus par cette nouvelle méthode, de même que ceux issus des simulations de trafic sont intégrés aux tableaux ci-avant. On constate que les simulations de trafic approchent les niveaux de service observés, à rappeler néanmoins que cette observation visuelle est dans une certaine mesure subjective, des valeurs de temps d'attente précises n'étant pas fournies.

La nouvelle méthode de dimensionnement a apparemment tendance à surestimer le niveau de service des branches secondaires. Seul un monitoring des nouveaux aménagements de turbo-giratoires réalisés pourront confirmer ou permettre de modifier cette nouvelle méthode.

Recommandations

En résumé, au vu des restrictions imposées par le logiciel Kreisel et par les résultats obtenus, nous conseillons de considérer pour méthode de dimensionnement la nouvelle méthode proposée (Chap. 5.2.4 et suivants). Des simulations de trafic permettent également d'obtenir des informations relativement proches des résultats attendus sur site.

5.2.4 Théorie du dimensionnement du trafic – Bases de calcul

En termes de dimensionnement du trafic dans les giratoires, du fait de la priorité aux véhicules circulant à l'anneau, le calcul de la capacité se résume principalement au calcul de la capacité d'entrée de chaque branche.

Cette affirmation qui s'applique tant aux giratoires à une voie qu'aux giratoires à deux voies de circulation à l'anneau est également valable pour les turbo-giratoires et ce quel que soit leur nombre de voies.

Une vérification en capacité est également effectuée sur les branches de sortie du fait de la gêne induite par les traversées piétonnes, toutefois, celle-ci ne s'avère généralement pas ou peu souvent déterminante.

Hypothèse de base

Comme énoncé au chapitre 2.6, la méthode de base retenue est celle de Bovy & al., celle-ci étant d'une part relevée comme l'une des méthodes prédominantes dans la détermination de la capacité des turbo-giratoires dans la littérature internationale, et d'autre part car elle est actuellement la base de la normalisation suisse en termes de dimensionnement en capacité des giratoires.

Méthode de Bovy & al.

La formule générale de Bovy et al. peut être énoncée comme suit :

$$C_e = \frac{\omega}{\gamma} \cdot [C_0 - f \cdot (\alpha \cdot Q_s + \beta \cdot Q_c)]$$

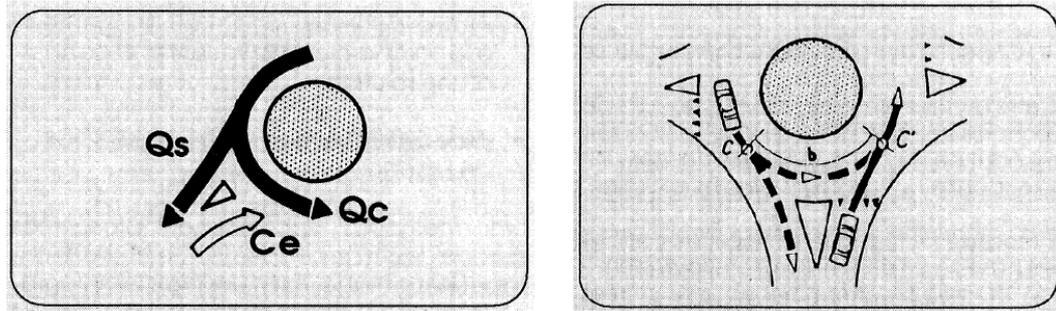


Fig. 24 Schématisation des paramètres de la méthode de Bovy [23].

Informations relatives au trafic :

- C_e : Capacité d'entrée déterminée [UVP/h] ;
- C_0 : Capacité d'entrée sans gêne relative au trafic à l'anneau [UVP/h] ;
- Q_s : Volume de trafic sortant sur la branche étudiée [UVP/h] ;
- Q_c : Volume de trafic à l'anneau [UVP/h].

Coefficients :

- α : Coefficient de pondération du trafic sortant Q_s , dépendant de la distance b entre les points de conflits sortant C respectivement entrant C' sur la branche analysée ;
- β : Coefficient de pondération du trafic à l'anneau Q_c , dépendant du nombre de voies à l'anneau ;
- γ : Coefficient de répartition du trafic entrant, dépendant du nombre de voies dans l'entrée ;
- ω : Coefficient de correction tenant compte des traversées piétonnes ;
- f : Coefficient de pondération du trafic gênant.

5.2.5 Simulations de trafic

Comme vu au chapitre précédent, il existe à l'heure actuelle plusieurs méthodes de dimensionnement en capacité des turbo-giratoires pour lesquelles les résultats peuvent varier de manière relativement importante. De par le fait qu'il existe très peu de turbo-giratoires en Suisse et que de plus, les niveaux de services qui y sont relevés, hormis dans le turbo-giratoire du Lavapesson mais qui est un cas particulier en situation « phases de chantier », semblent relativement faibles (LOS A – LOS B), compliquant la mesure de temps d'attente, il est alors difficile de savoir quelle méthode offre les meilleurs résultats.

Afin de définir une méthode appropriée pour le cas suisse, des simulations de trafic ont été mises en œuvre. La démarche méthodologique appliquée est présentée dans la Fig. 25. Celle-ci a notamment consisté à calibrer les modèles afin de vérifier que ceux-ci retranscrivent les réalités mesurées sur site et par la suite à déterminer individuellement chacun des paramètres de la méthode de dimensionnement de Bovy (définition sur la base du turbo-giratoire de Glättimüli et validation sur la base du turbo-giratoire du Lavapesson).

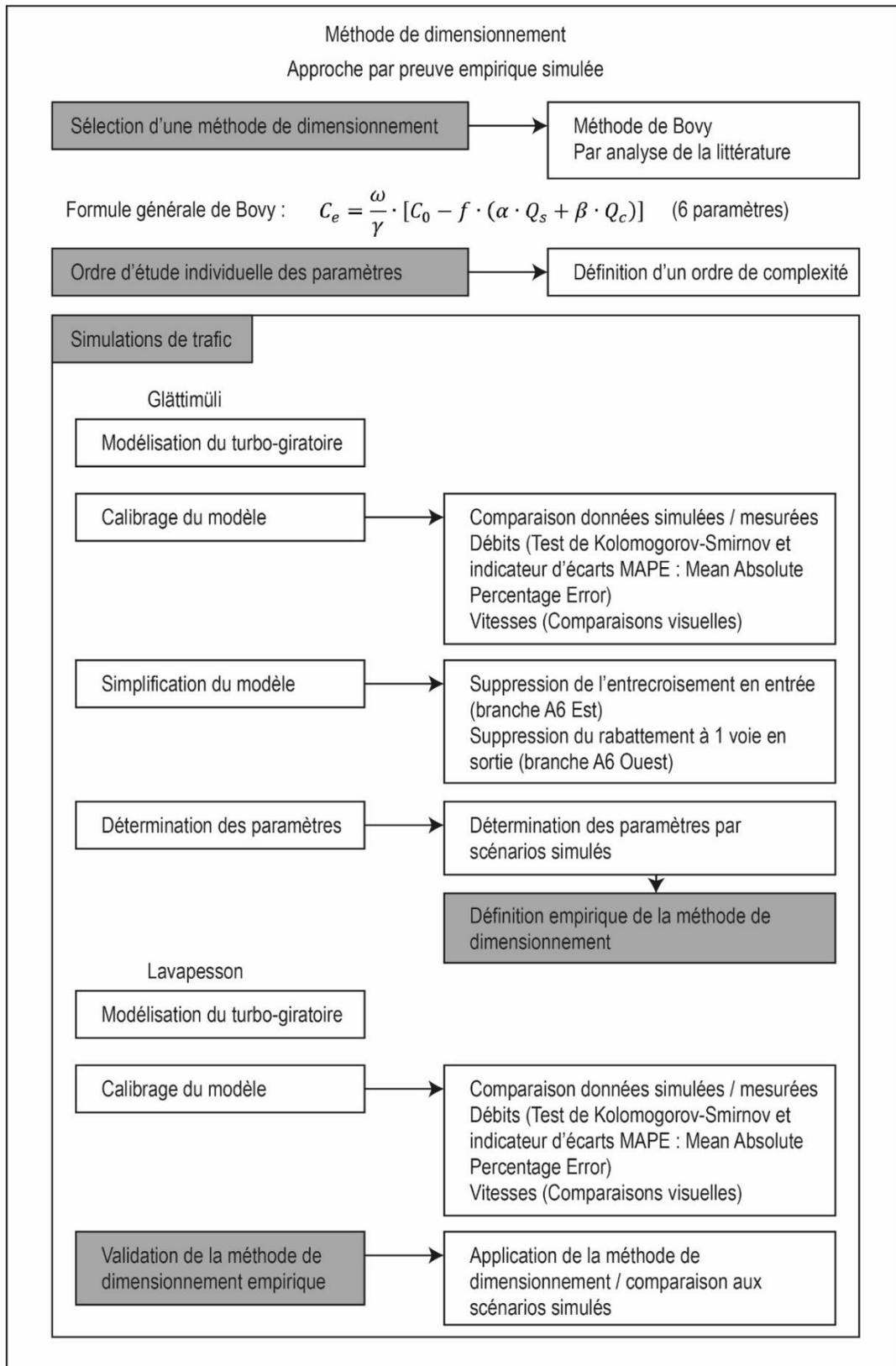


Fig. 25 Approche de la définition de la méthode de dimensionnement par simulations.

Démarche méthodologique

La démarche méthodologique est identique à celle utilisée et prouvée dans le cadre de plusieurs mandats de recherche auxquels ont participé certains membres de l'équipe de recherche [55] [56].

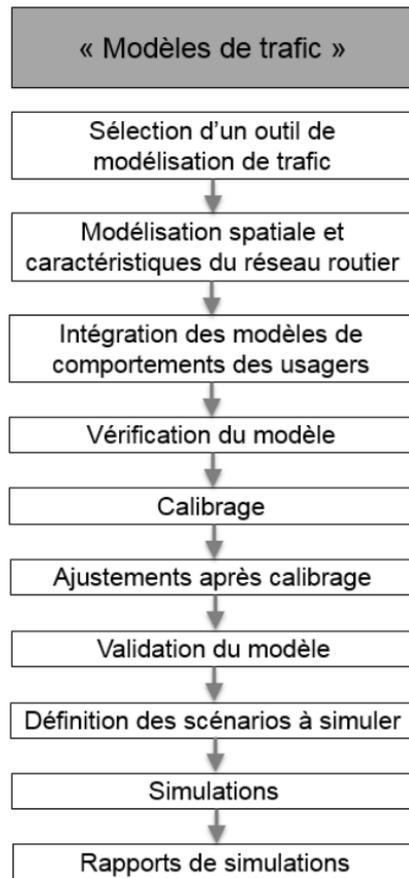


Fig. 26 Démarche méthodologique relative aux simulations de trafic [55].

Sélection d'un outil de modélisation de trafic

Afin de réaliser les différentes simulations de trafic, le logiciel professionnel Aimsun (version Aimsun Next 20) a été retenu. Le choix s'est porté sur ce logiciel dans la mesure où il y fait ses preuves dans le cadre de plusieurs projets menés par l'équipe de recherche et est utilisé à l'échelle mondiale.

Modélisation spatiale et caractéristiques du réseau routier

La modélisation spatiale et géométrique du réseau routier dans le périmètre d'étude a été effectuée sur la base de l'importation d'images satellites géoréférencées extraites du géoportail de la Confédération suisse (map.geo.admin.ch). Les différentes caractéristiques du réseau ayant une influence sur le comportement en simulation (largeur de voies, vitesses, géométrie, signalisation, ...) ont été intégrées dans la mesure du possible. Il est à noter ici que la géométrie des turbo-giratoires doit être modélisée au plus proche de la réalité dans la mesure où celle-ci a une influence importante sur le comportement en simulation (ex. : vitesses des véhicules à l'approche et à l'intérieur du giratoire).

Intégration des modèles de comportement des usagers

Les modèles de comportement des usagers inclus de base dans le logiciel de même que des connaissances spécifiques acquises dans certains projets relatifs aux simulations de trafic ont été intégrés.

5.2.6 Glättimüli

Modélisation spatiale

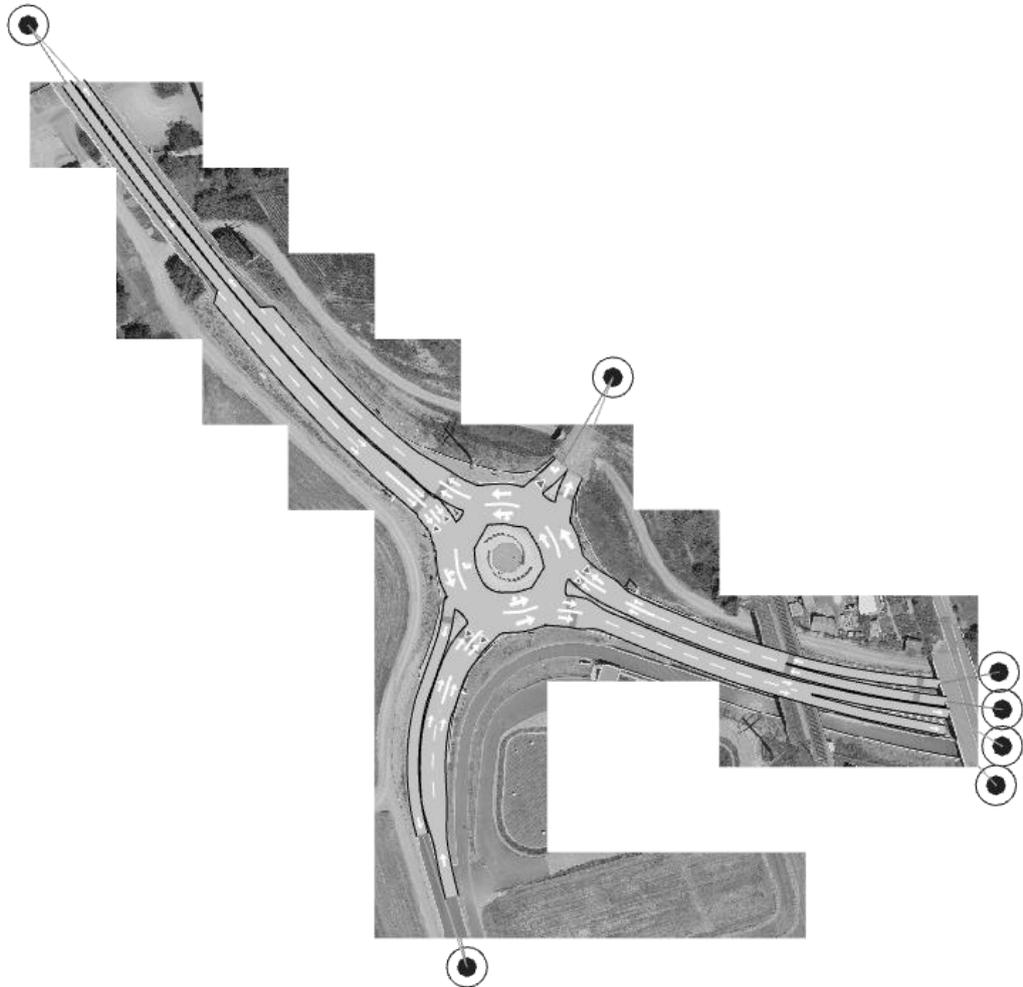


Fig. 27 Modélisation du turbo-giratoire de Glättimüli.

Calibrage des débits

Les matrices O-D ont été insérées par tranche de 5 minutes dans le logiciel de simulation selon la situation relevée par drone le 16.12.2020. La première étape consiste à calibrer le modèle par concordance des débits simulés et mesurés ainsi que des vitesses.

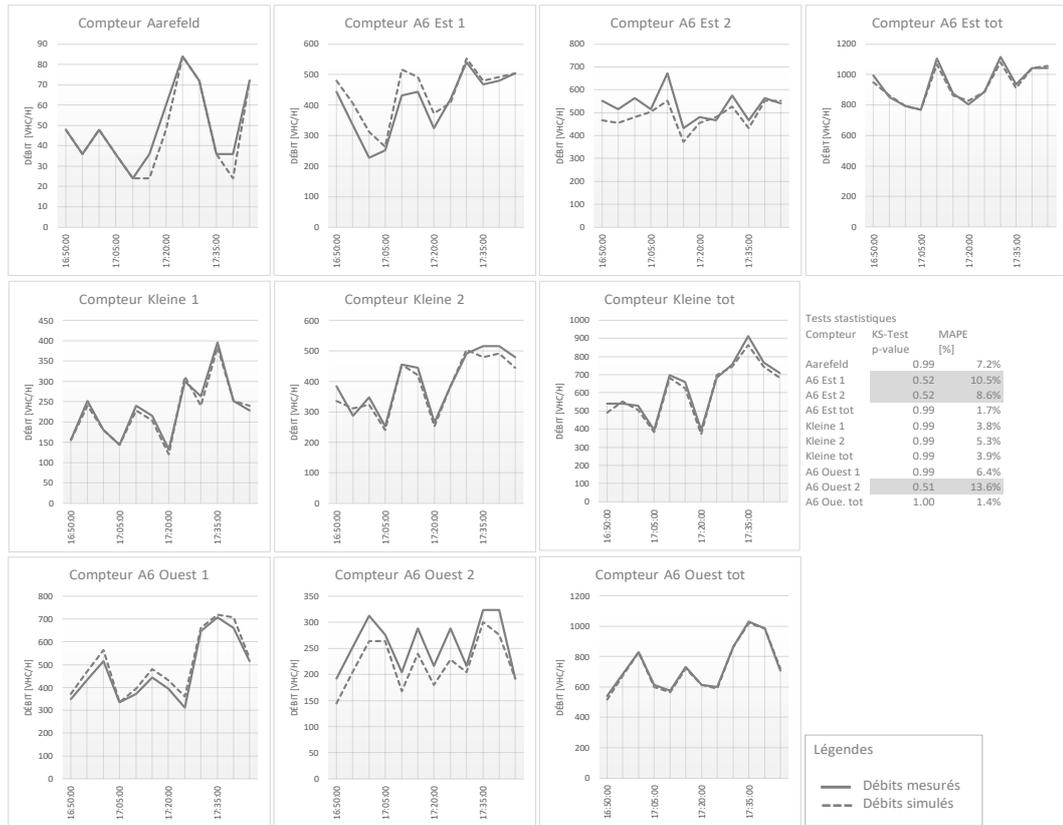


Fig. 28 Débits mesurés et simulés aux entrées du turbo-giratoire et tests statistiques.

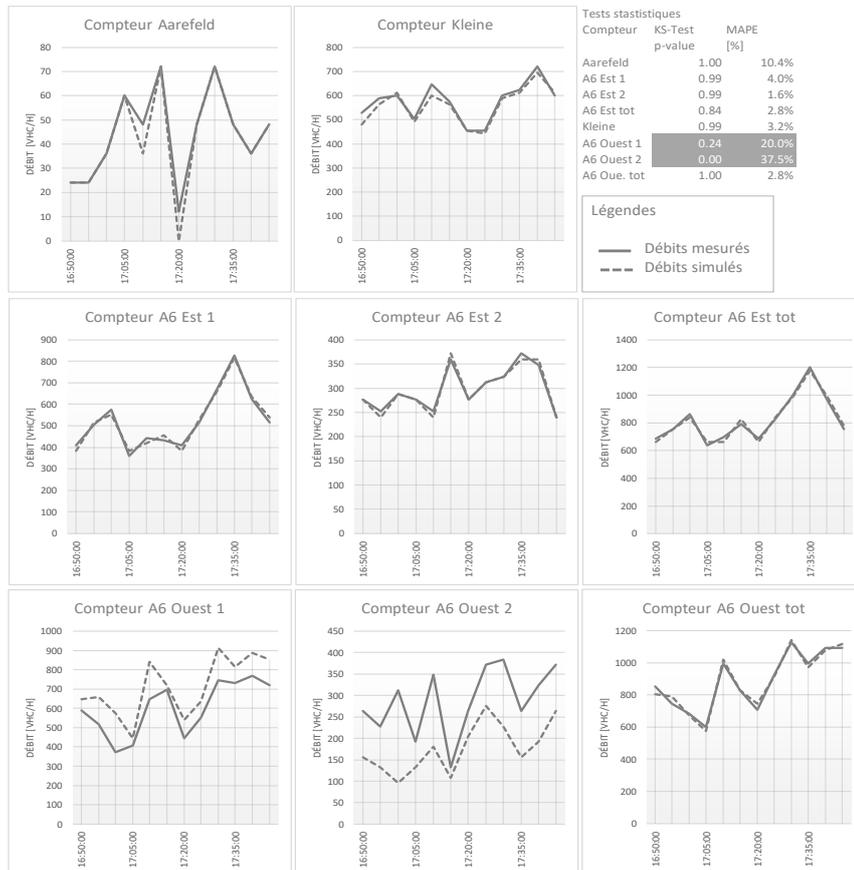


Fig. 29 Débits mesurés et simulés aux sorties du turbo-giratoire et tests statistiques.

Alors que globalement le calibrage de la simulation retranscrit le comportement en débits relevés, on constate des différences relativement importantes sur la branche suivante :

- A6 Est en entrée ;
- A6 Ouest en sortie.

Ces différences peuvent s'expliquer par la double particularité de l'environnement immédiat du turbo-giratoire (voir Chap. 4.7, entrecroisement avant entrée A6 Est et rabattement après sortie A6 Ouest).

Dans la simulation, les véhicules vont tenter de se placer, s'il leur est possible, sur la voie de droite (art. 34 LCR [1]). Dans le comportement sur site, certainement induit par la présence d'usagers désormais habitués, les véhicules empruntent la voie intérieure du turbo-giratoire afin de se positionner à gauche en sortie de giratoire pour éviter la zone de rabattement. Cela explique donc la nette sous-utilisation de la voie de droite en sortie et l'utilisation plus importante de la voie de gauche en entrée.

On note également des différences sur la branche suivante :

- A6 Ouest voie de gauche en entrée.

Cette différence peut également être expliquée par un positionnement induit en entrée par l'entrecroisement présent en sortie de giratoire (sortie A6 Est).

Il est important de rappeler ici que les simulations de trafic doivent certes s'approcher de la réalité observée, mais qu'elles sont utiles à valider la méthode de dimensionnement. Les particularités de l'environnement immédiat du turbo-giratoire, bien que prévisibles, constituent un cas particulier et donc ne peuvent être prises en compte dans la méthode de dimensionnement (en planification) du turbo-giratoire, raison pour laquelle on ne cherchera pas à améliorer le calibrage de ce point de vue.



Fig. 30 Vitesse moyenne simulée et mesurée (encart) entre 15 : 00 et 16 : 45 le 16.12.2020.

La simulation ne peut être visualisée sous le même niveau de détail que les traces de la vitesse moyenne mesurée. Toutefois, on constate un comportement en vitesse similaire dans les deux cas.

Pour les scénarios à simuler, le modèle est donc considéré comme calibré.

5.2.7 Définition des paramètres pas à pas

Les différents paramètres de la formule générale de Bovy ont été déterminés à l'aide de ces simulations de trafic, par un dimensionnement pas à pas, soit en traitant individuellement et dans un ordre précis chacun de ces paramètres en faisant évoluer différents débits sur les branches d'un turbo-giratoire. Cette étude a fait l'objet d'un projet de semestre de deux étudiants de la Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg HEIA-FR, Alice Zenoni et Bruno Marques dont les principaux résultats, adaptés au cadre de la présente étude, sont décrits ci-après.

Paramètre C_0

Le premier paramètre déterminé consiste en la capacité d'une voie d'entrée sans aucune gêne liée au trafic circulant à l'anneau, soit le paramètre C_0 .

Ce paramètre prend les valeurs suivantes :

- Pour un flux de trafic principal, par voie : 1'500 [UVP/h] ;
- Pour les autres flux, par voie : 1'350 [UVP/h].

Paramètre γ

La capacité de chaque voie d'entrée du turbo-giratoire devant être calculée séparément, le paramètre γ n'a pas lieu d'être étudié, du moins pas sous la forme d'un paramètre entrant en considération dans la formule de la détermination de la capacité par voie.

Dans le cas où un flux de circulation peut être parcouru par deux voies de circulation, on admettra la répartition suivante :

- Jusqu'à un flux total pour deux voies de circulation de 500 [UVP/h], la voie de droite est uniquement utilisée ;
- A partir de 500 [UVP/h] jusqu'à la capacité maximale des deux voies de circulation déterminée par le paramètre C_0 , on peut admettre une répartition évoluant jusqu'à une parité de répartition 50/50 ;
- En cas de dépassement de la capacité maximale C_0 , on admettra une répartition à parité 50/50 sur chacune des deux voies de circulation.

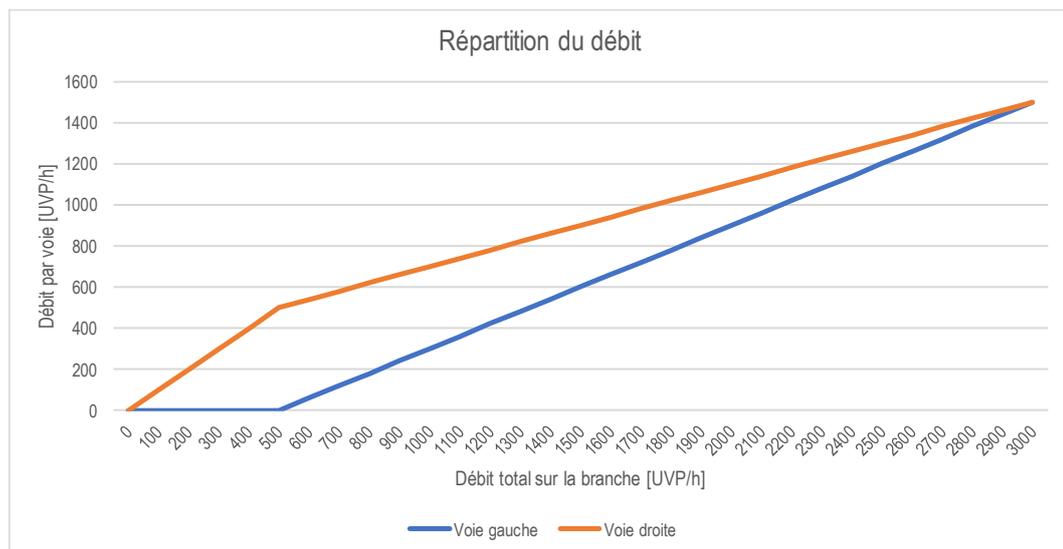


Fig. 31 Exemple de répartition du débit par voie, pour une capacité maximale de 3'000 UVP/h ($C_0 = 1'500$ UVP/h par voie).

Si ce paramètre permet de déterminer la répartition du flux principal (2 voies en entrées sur 2 voies en sortie), il y a toutefois lieu de tenir compte de la répartition induite par les autres mouvements. Des exemples fictifs, sur la base de la géométrie du turbo-giratoire de Glättimüli, sont donnés ci-après.

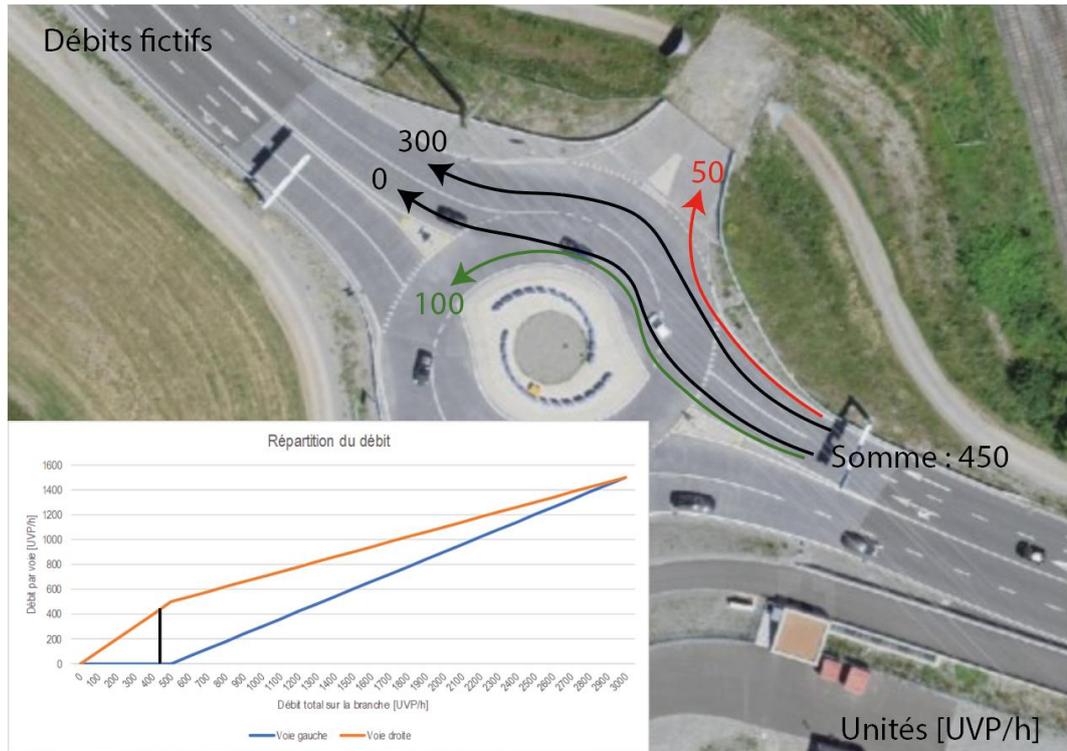


Fig. 32 Exemple fictif de répartition du débit par voie, flux total inférieur à 500 UVP/h.

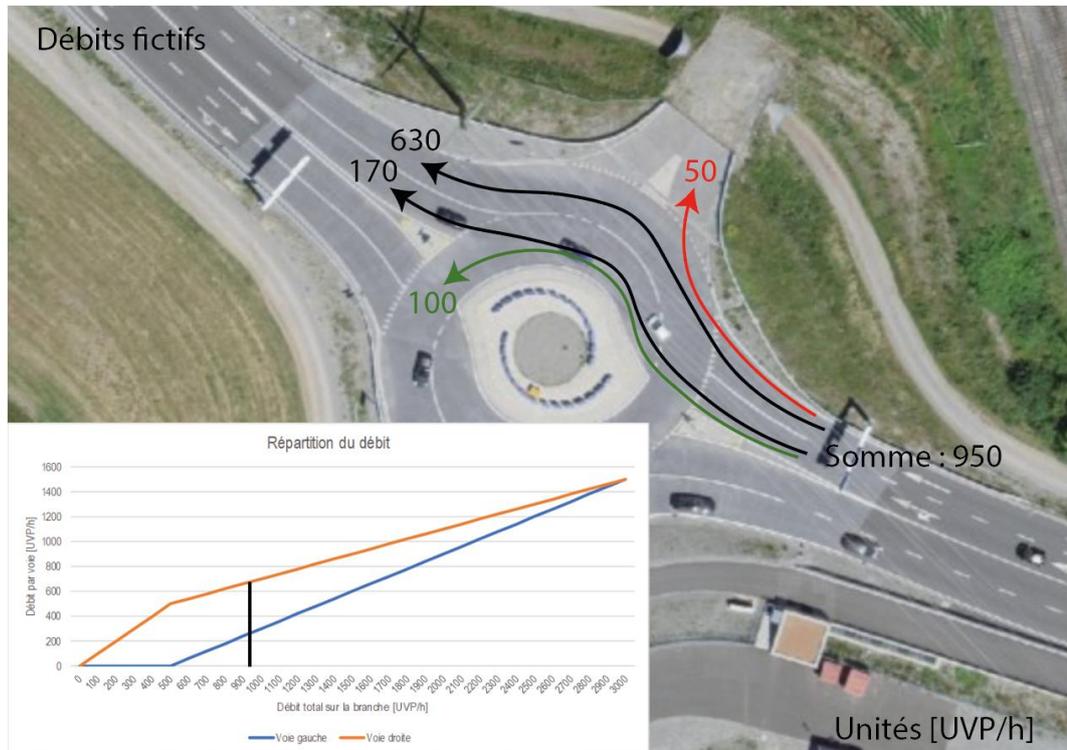


Fig. 33 Exemple fictif de répartition du débit par voie, flux total supérieur à 500 UVP/h.

Paramètre $f\alpha$

Le paramètre $f\alpha$, lié au trafic sortant du giratoire Q_s , ne peut être déterminé à l'aide de simulations de trafic. En effet, le comportement trop exemplaire des véhicules sortants (clignotant activé en cas de sortie) en simulation n'implique pas de gêne sur le débit entrant.

Afin de déterminer ce paramètre, on reprend l'approche proposée par Bovy pour les giratoires à deux voies à l'anneau [23] confortée par les observations réalisées par drone sur les cas d'étude.

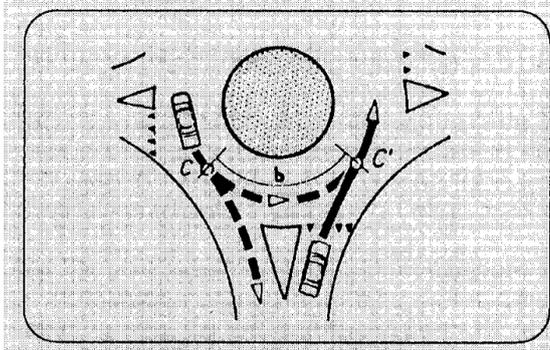


Fig. 34 Influence du débit sortant en fonction de la longueur b entre points de conflit.

Selon Bovy, on mesure la distance b entre les points de conflits C et C' afin de déterminer l'influence du débit sortant Q_s sur la capacité de la branche entrante. Le paramètre $f\alpha$ peut être déterminé de la manière suivante :

- $b \in [6m ; 21m], f\alpha = \frac{8}{9} \cdot (0.98 - 0.042 \cdot b)$;
- $b \in [21m ; 27m], f\alpha = \frac{8}{9} \cdot 0.1$;
- $b > 27m, f\alpha = 0$.

Ce paramètre est toutefois soumis à une hypothèse illustrée à l'aide de l'image ci-dessous :

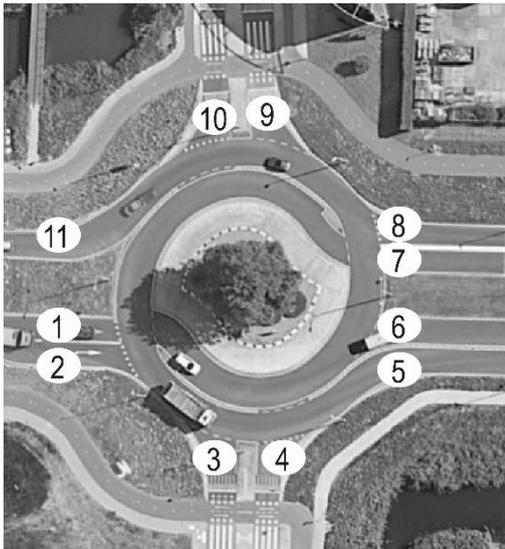


Fig. 35 Illustration d'un turbo-giratoire, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

- Le paramètre est nul lorsqu'une sortie ne peut pas influencer une entrée en raison du marquage ou de séparateurs de voies (ex : sortie 11 sur entrée 1, sortie 5 sur entrée 7).

Paramètre $f\beta$

Le paramètre $f\beta$ est lié au trafic circulant à l'anneau Q_c . Ce paramètre prend les valeurs suivantes :

- Lorsqu'un double flux est présent face à une entrée, pour autant que le flux soit gênant : 0.9 pour le flux extérieur et 0.6 pour le flux intérieur ;
- Pour les autres flux : 0.9.

Coefficient de correction tenant compte des traversées piétonnes et cyclables ω

La droite de régression permettant de déterminer la valeur du coefficient de correction tenant compte des traversées piétonnes et de cyclistes ω , tant en entrée qu'en sortie est la suivante :

$$\omega = -0.0025 \cdot \text{débit traversée} \left[\frac{\text{piétons et cyclistes}}{h} \right] + 1$$

Bien que les cyclistes n'ayant pas mis bien à terre n'aient pas la priorité, il est possible que certains automobilistes s'arrêtent en pensant devoir leur céder la priorité. Pour cette raison, nous proposons à ce stade que la méthode tienne compte de l'entier du flux cycliste.

5.2.8 Détermination de la capacité d'une voie d'entrée

La capacité d'une voie d'entrée i est donc déterminée de la manière suivante :

$$C_{ei} = \omega \cdot (C_{0i} - f \cdot \alpha_i \cdot Q_{si} - f \cdot \beta_i \cdot Q_{ci})$$

5.2.9 Adaptation des paramètres

Lorsqu'un aménagement présente des conditions spécifiques ou une répartition des débits influencée (exemple entrecroisement ou rabattement de Glättimüli, Chap. 4.7), le planificateur est libre d'adapter les différents paramètres (voir exemple Glättimüli ci-dessous et Lavapesson à la page suivante).

5.2.10 Détermination du niveau de service

La détermination du niveau de service s'effectue selon la réserve de débit R . Celle-ci s'obtient de la manière suivante :

$$R_i = C_{ei} - q_i \left[\frac{UVP}{h} \right]$$

Informations relatives au trafic :

- C_{ei} : capacité d'entrée déterminée de la voie i [UVP/h] ;
- q_i : débit de circulation sur la voie d'entrée i [UVP/h] ;

Tab. 23 Détermination du niveau de service

Niveau de service	Réserve de débit du flux principal horizontal [UVP/h]	Réserve de débit des autres flux [UVP/h]
LOS A	[365 ; 1'500]	[365 ; 1'350]
LOS B	[270 ; 365[[270 ; 365[
LOS C	[110 ; 270[[110 ; 270[
LOS D	[50 ; 110[[50 ; 110[
LOS E	[0 ; 50[[0 ; 50[
LOS F	< 0	< 0

Glättimüli

La capacité des branches d'entrées du turbo-giratoire de Glättimüli selon la méthode proposée ci-dessus se calcule de la manière suivante. A noter qu'en raison des particularités du site (Chap. 4.7), la répartition des flux de circulation sur les voies, le paramètre γ , ne suit pas la proposition élaborée. La répartition observée sur place est ici considérée.

Tab. 24 Dimensionnement en capacité des entrées du turbo-giratoire de Glättimüli

Paramètre	Valeurs par voies						
	A6 est 1	A6 est 2	Aarefeld	A6 ouest 1	A6 ouest 2	Kleine 1	Kleine 2
C_o [UVP/h]	1500	1500	1350	1500	1500	1500	1500
Q_s [UVP/h]	300	300	45	295	295	590	590
b [m]	20	14	13	19	11	23	13
fα	0.12	0.35	0.39	0.16	0.46	0.09	0.39
Q_c [UVP/h]	25+315	25+315	Intérieur 535+105 Ext. 5+405 +195	20+345	20+345	5+265	Intérieur 210 Extérieur 5+295
fβ	0.9	0.9	0.6 / 0.9	0.9	0.9	0.9	0.6 / 0.9
ω	-	-	-	-	-	-	-
C_e [UVP/h]	1158	1089	404	1124	1035	1203	873
q_i [UVP/h]	415	540	50	490	265	230	405
R [UVP/h]	743	549	354	634	770	973	468
LOS	A	A	B	A	A	A	A

Lavapesson

La capacité des branches d'entrées du turbo-giratoire du Lavapesson est déterminée de la même manière que précédemment. A noter qu'ici également, la répartition des flux de circulation sur les voies étant connue, le paramètre γ ne suit pas la proposition élaborée.

Tab. 25 Dimensionnement en capacité des entrées du turbo-giratoire de Lavapesson

Paramètre	Valeurs par voies					
	Fr1	Fr2	Lac	A12 1	A12 2	Vieux
C_o [UVP/h]	1500	1500	1350	1500	1500	1350
Q_s [UVP/h]	385	385	125	0	0	40
b [m]	17	11	14	-	-	9
fα	0.24	0.46	0.35	-	-	0.54
Q_c [UVP/h]	480+65	480+65	Intérieur 310 Extérieur 1070	135+30	135+30	Intérieur 10+50+795 Extérieur 20+70+710
fβ	0.9	0.9	0.1 / 0.9	0.9	0.9	0.6 / 0.9
ω	0.97	0.97	0.98	-	-	-
C_e [UVP/h]	889	807	306	1351	1351	95
q_i [UVP/h]	650	310	210	730	795	95
R [UVP/h]	240	497	96	621	556	0
LOS	C	A	D	A	A	E

Remarque : la majorité du flux sortant de Lac se dirige directement sur A12 Est n'est donc pas gêné par le flux intérieur. C'est pourquoi on peut réduire le paramètre $f\beta$.

Comparaison de dimensionnement entre turbo-giratoire et giratoire conventionnel

Dans le cadre du turbo-giratoire de Glättimüli, le dimensionnement selon la méthode du guide suisse [23] d'un giratoire conventionnel à deux voies à l'anneau équivalent a été effectuée pour être comparée à la méthode de dimensionnement proposée pour les turbo-giratoires.

Il est à noter ici que le dimensionnement, dans les deux cas, a été effectué pour une étape de planification simplifiée, à savoir que les particularités du site (Chap. 4.7) ne sont pas considérées, raison pour laquelle les résultats diffèrent légèrement de ceux énoncés précédemment.

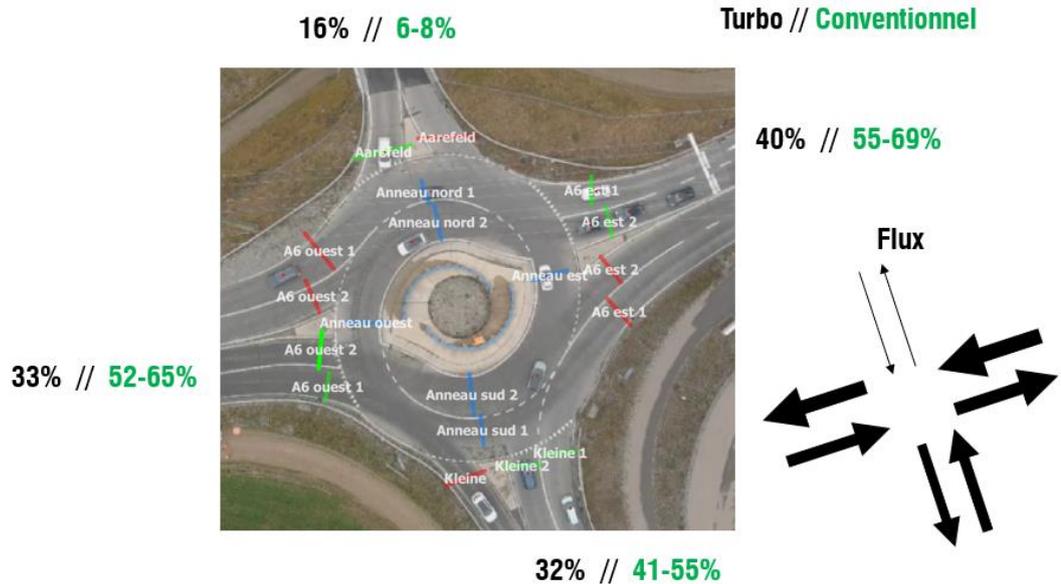


Fig. 36 Comparaison d'un dimensionnement entre un turbo-giratoire et le giratoire à deux voies à l'anneau conventionnel équivalent, taux de capacité utilisée.

Pour cet aménagement, on constate que sur les flux principaux (principalement horizontaux), la variante turbo-giratoire propose un meilleur taux de capacité utilisée (capacité améliorée), tandis que, sur le flux secondaire le plus faible (Aarefeld), la variante turbo-giratoire péjore la capacité de la branche, ce qui concorde avec certaines observations tirées de la littérature internationale.

Toutefois, à ce stade, n'ayant que peu d'aménagements en Suisse sur lesquels une telle analyse peut être menée, il est trop tôt pour tirer des conclusions sur ce point de vue bien que cette comparaison aille dans la direction de l'hypothèse émise dans la problématique liée au projet (Chap. 1.1).

Lors de l'évaluation des variantes (turbo-giratoire vs giratoire conventionnel), il est recommandé de comparer et d'évaluer la capacité des deux aménagements.

5.2.11 Recommandations

Il est recommandé d'appliquer la nouvelle méthode de dimensionnement. Toutefois, cette nouvelle méthode proposée et déterminée par une approche empirique simulée devra faire l'objet de vérification et de comptages sur le terrain (monitoring) pour des cas d'usages en Suisse afin d'être consolidée. Des simulations de trafic peuvent également être utilisées afin de déterminer les conditions de circulations envisagées dans un turbo-giratoire.

5.3 Géométrie

Les sous-chapitres qui suivent contiennent pour la plupart directement les recommandations émises par l'équipe de recherche.

5.3.1 Evaluation des giratoires suisses

En premier lieu, on propose l'évaluation des conditions géométriques définies par Fortuijn [34] (Chap. 2.6) sur l'ensemble des giratoires identifiés en Suisse et similaires à des turbo-giratoires. Pour rappel, ces conditions sont les suivantes :

- 1) Un flux de circulation régulier est garanti par l'alignement en spirale du giratoire ;
- 2) Face à une voie d'entrée, il y doit y avoir au moins une seconde voie au niveau du centre du giratoire ;
- 3) Le trafic présent sur une entrée ne doit céder la priorité, au maximum, qu'à deux voies à l'anneau ;
- 4) Sur chaque tronçon, il doit y avoir un seul point de décision possible : continuer dans le giratoire ou en sortir ;
- 5) Au moins deux branches de sortie possèdent deux voies (4 branches) ou au moins une branche de sortie possède deux voies (3 branches) ;
- 6) Les branches d'entrée sont perpendiculaires au giratoire.

Tab. 26 Evaluation des « turbo-giratoires » suisses

Lieu	Conditions géométriques					
	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
Glättimüli, Steffisburg	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)
Echangeur A6, Heimberg	✓	✗	✓	(✓)	✗	(✓)
Boeuferrant, Monthey	(✓)	✗	✓	✗	✗	✗
Muripark, Muri	(✓)	✗	✓	✗	✗	✓
Bas-du-Reymond (Partie Est), La Chaux-de-Fonds	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Poya, Fribourg	✓	✗	✓	✓	✓	✗
Wettsteinplatz, Bâle	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Seetalstrasse, Lenzburg	(✓)	✗	✓	✓	✗	✓
Lavapesson (provisoire), Fribourg	✓	✓	✓	✓	✗	✗

Sur la base des conditions définies par Fortuijn, seul le giratoire de Glättimüli remplit les conditions pour être nommé « turbo-giratoire ». Le giratoire provisoire du Lavapesson peut lui être considéré comme un turbo-giratoire partiel. Pour les autres giratoires, ils peuvent être assimilés, du point de vue de la géométrie, à des « presque-turbo-giratoires ».

De notre point de vue, la condition 2 est fortement liée à la condition 5 (ex. : Heimberg, Lenzburg). Alors que la première est indispensable selon Fortuijn, la seconde ne l'est pas nécessairement.

Pour simplifier l'évaluation des turbos-giratoires en Suisse, nous proposons que ceux-ci soient évalués selon les 6 conditions et que les appellations soient les suivantes en fonction du résultat :

- Turbo-giratoire si les conditions 1, 2, 3, 4 et 5 sont réunies ;
- Turbo-giratoire partiel si les conditions 1, 3 et 4 sont réunies ;
- Presque turbo-giratoires dans les autres cas.

Toutefois, pour des raisons notamment de sécurité routière (vitesse), on essaiera d'atteindre l'ensemble de ces conditions lors de la réalisation d'un turbo-giratoire.

5.3.2 Voies d'entrées

Les relevés sur site ont montré des vitesses en entrée proches de 25km/h. Sur cette base et par correspondance avec les giratoires conventionnels, une vitesse inférieure à 30km/h peut être retenue pour le dimensionnement du profil géométrique type en entrée.

La distance à la ligne d'arrêt à laquelle la largeur de la voie d'entrée est mesurée de 7m pourra être reprise. Dans le cas où le turbo-giratoire est muni d'une installation de régulation lumineuse (Fig. 37), on mesurera la largeur à 7m de la ligne d'arrêt relative au feu de circulation.



Fig. 37 Turbo-giratoire N470-Tolhekplein, Pijnacker (Pays-Bas), maps.google.com, 2021.

Dans tous les cas, on veillera à ce que cette mesure soit effectuée dans une zone relativement homogène en termes de largeur avec le tronçon précédent, ne présentant pas un élargissement de voie d'entrée répondant à la viabilité des véhicules en approche du bord du giratoire.

On prêtera une attention particulière notamment aux engins de déneigement qui peuvent, suivant les cas, nécessiter des largeurs de voies de circulation plus importantes (4m ou plus). Toutefois, des largeurs plus importantes auront un impact sur les angles d'entrée impliquant une vitesse en entrée, notamment des voitures de tourisme, plus importante. Cet effet est défavorable sur la sécurité routière.

De façon identique aux giratoires conventionnels, dans le cas de traversées piétonnes non-régulées sur les voies d'entrée, un espace de 5m sera réservé afin de permettre le stockage d'un véhicule léger entre le passage piétons et la ligne d'arrêt.

Contrairement à la recommandation faite pour les giratoires conventionnels à deux voies à l'anneau, dans les entrées à deux voies, on ne limitera pas la largeur totale de l'entrée, en raison des flux directionnels répartis par voies (présélection en entrée).

Dans le cadre de la circulation des véhicules des entreprises de transport en commun, des véhicules spéciaux, des transports exceptionnels, une évaluation au cas par cas de la viabilité devra être effectuée.

De manière identique aux giratoires conventionnels, le bord de chaussée, en entrée, est constitué de deux arcs de cercle de valeurs :

- Rayon d'entrée intérieur : $Re_2 = 12m$,
- Rayon d'insertion : $Re_1 = 5 * Re_2 = 60m$.

Si les 2 arcs de cercle ne peuvent pas être construits, des clothoïdes ou des paraboles peuvent être utilisées.

De manière générale, les viabilités devront être garanties pour les véhicules déterminants (Chap. 5.4.1).

5.3.3 Angle d'entrée

L'angle d'entrée du turbo-giratoire, mesuré entre la courbe extérieure de la voie extérieure et l'anneau directionnel se situera au plus proche possible de la perpendicularité, soit 100 gons. Toute modification de cet angle induira une vitesse potentiellement plus élevée et donc une diminution potentielle de la sécurité routière.

5.3.4 Combinaison d'éléments géométriques et d'équipements

Des analyses basées sur les simulations de trafic ont permis de déterminer que la vitesse maximale d'entrée géométrique, sans trafic gênant, est influencée par la combinaison des éléments suivants :

- Angle d'entrée ;
- Angle de déviation ;
- Largeur d'entrée et des voies de circulation internes ;
- Equipement de séparation de voies (marquage ou séparateurs physiques).

Remarque : la dynamique liée aux dévers n'est pas considérée. Seuls les éléments en plan sont pris en compte.

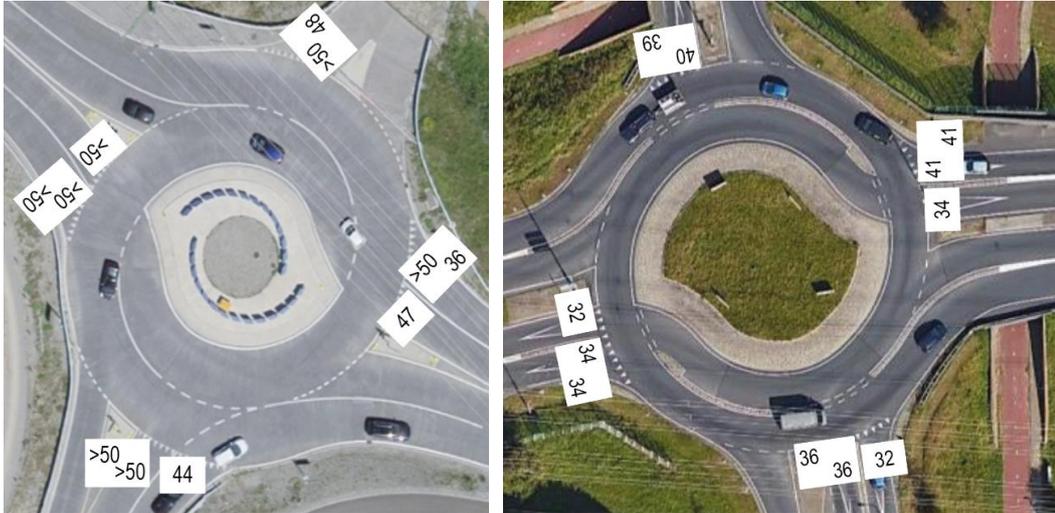


Fig. 38 Vitesse maximale d'entrée géométrique [km/h], Glättimüli, Zoetermeer.

On veillera tout particulièrement à ces combinaisons d'éléments qui, en influençant la vitesse d'entrée maximale, ont également un impact sur la sécurité routière.

Toutefois, il est difficile, du fait du peu de cas d'étude, de définir l'impact réel de ces combinaisons d'éléments. Dans tous les cas, on veillera à respecter la méthode de dimensionnement géométrique d'un turbo-giratoire (Chap. 5.4) et les recommandations individuelles sur les éléments géométriques et les équipements, afin de garantir une sécurité routière suffisante.

5.3.5 Îlot directionnel

A proximité du turbo-giratoire, entre les voies d'entrée et de sortie du turbo-giratoire, un îlot est à mettre en place. Cet îlot permet d'améliorer la perceptibilité du carrefour, le guidage du trafic et de canaliser les courants de circulation.

Contrairement au giratoire conventionnel, l'îlot directionnel en forme d'entonnoir n'est pas utilisé, puisque, dans les turbo-giratoires, pour atteindre les objectifs de sécurité fixés (réduction de vitesses), les branches d'entrée doivent être perpendiculaires au giratoire (condition géométrique n°6, Chap. 2.6).

L'îlot séparateur de voies à prévoir dans le cas de turbo-giratoires est un îlot séparateur, de forme allongée. Ce type d'îlot permet d'empêcher le dépassement et de protéger la voie intérieure d'entrée dans le turbo-giratoire. Les dimensions minimales de l'îlot séparateur, définies dans la norme VSS 40 262 [10] sont applicables :

- Largeur minimale : 1.20m si l'îlot n'est pas emprunté par les piétons ou par des cyclistes tournant à gauche ou traversant la chaussée ;
- Longueur minimale : environ 50m sur les routes hors des espaces bâtis, pour empêcher la circulation à contre-sens et protéger les véhicules en attente, 30m dans les espaces bâtis ;
- Retrait : 0.30m car la vitesse de projet des turbo-giratoires est inférieure à 50km/h.

Dans le turbo-giratoire standard suisse, il a été prévu un îlot séparateur d'une largeur de 2.00m, de manière à bien canaliser les flux de trafic.

Cet îlot séparateur doit être suffisamment perceptible, c'est pourquoi il devra être équipé de bordures (hauteur 12cm).

5.3.6 Îlot central et surface semi-franchissable

L'îlot central de turbo-giratoires est constitué d'une surface semi-franchissable et d'un îlot central (non dévolu à la circulation et servant à faciliter la perception du giratoire).

Surface semi-franchissable

Selon la norme VSS 40 263 [11], la surface semi-franchissable, soit l'anneau intérieur, est à réaliser avec un décrochement vertical surélevé d'environ 4cm par rapport à la chaussée. Le revêtement de cet anneau intérieur peut être réalisé en pavage irrégulier, en enrobé bitumineux ou en béton. Toutefois, une distinction visuelle efficace entre la surface semi-franchissable et la chaussée est recommandée. Les dimensions des bordures biaisées de l'anneau franchissable sont :

- H = 2-4cm verticalement au bord de chaussée ;
- Biais de hauteur 6-8cm sur une largeur de 15cm.

La largeur de la surface semi-franchissable est à définir en prenant compte la viabilité dans le turbo-giratoire des voitures automobiles lourdes. Dans le cas du turbo-giratoire standard, avec un rayon intérieur de 9m, la largeur de la surface semi-franchissable est définie à 2m.

Pour la création de la surface semi-franchissable, les trois exemples qui suivent, tirés de la documentation technique du canton de Vaud, sont constructivement applicables pour le domaine des turbo-giratoires (Fig. 39 à Fig. 41).

Îlot central (non-dévolu à la circulation)

La construction de l'îlot central du turbo-giratoire peut être réalisée selon les pratiques courantes en Suisse et notamment les indications de la norme VSS 40 263 [11].

L'îlot central doit être suffisamment perceptible. Pour garantir cela, il doit être notablement surélevé ou constitué de bordures bien visibles, par exemple avec une bordure haute (+0.20m). Il pourra être aménagé de plantations ou d'autres éléments d'équipement (sans déconcentrer les conducteurs). La visibilité par-dessus l'îlot central doit être masquée pour ne pas inciter les conducteurs à relâcher leur attention vers la gauche et à ne pas respecter la priorité.

L'aménagement de l'îlot central ne doit cependant pas comporter des obstacles nuisibles à la sécurité des usagers de la route, sur la trajectoire d'un véhicule en perdition (selon la figure 4 de la norme VSS 40 263 [11]).

Dans le cas des turbo-giratoires, selon la forme des îlots directionnels, la zone d'aménagement possible, hors de la trajectoire d'un véhicule en perdition, est faible. L'aménagement de l'îlot central pourrait ainsi se faire avec des plantations et des éléments en terre pour garantir une visibilité masquée par-dessus l'îlot central. Cette surface est dépendante de la géométrie des îlots sur les branches du turbo-giratoire. Dans le cas du turbo-giratoire standard esquissé selon les caractéristiques suisses, cette surface consiste en un carré de 2m de côté.

5.3.7 Distances de visibilité

La distance de visibilité d'arrêt, selon la norme VSS 40 090b [4], doit être garantie pour les branches d'entrée du turbo-giratoire et sur l'anneau de circulation.

De même, la distance de visibilité A dans le carrefour giratoire, doit être déterminée selon les normes VSS 40 090b [4] et VSS 40 273a [13], en fonction de la vitesse du véhicule prioritaire.

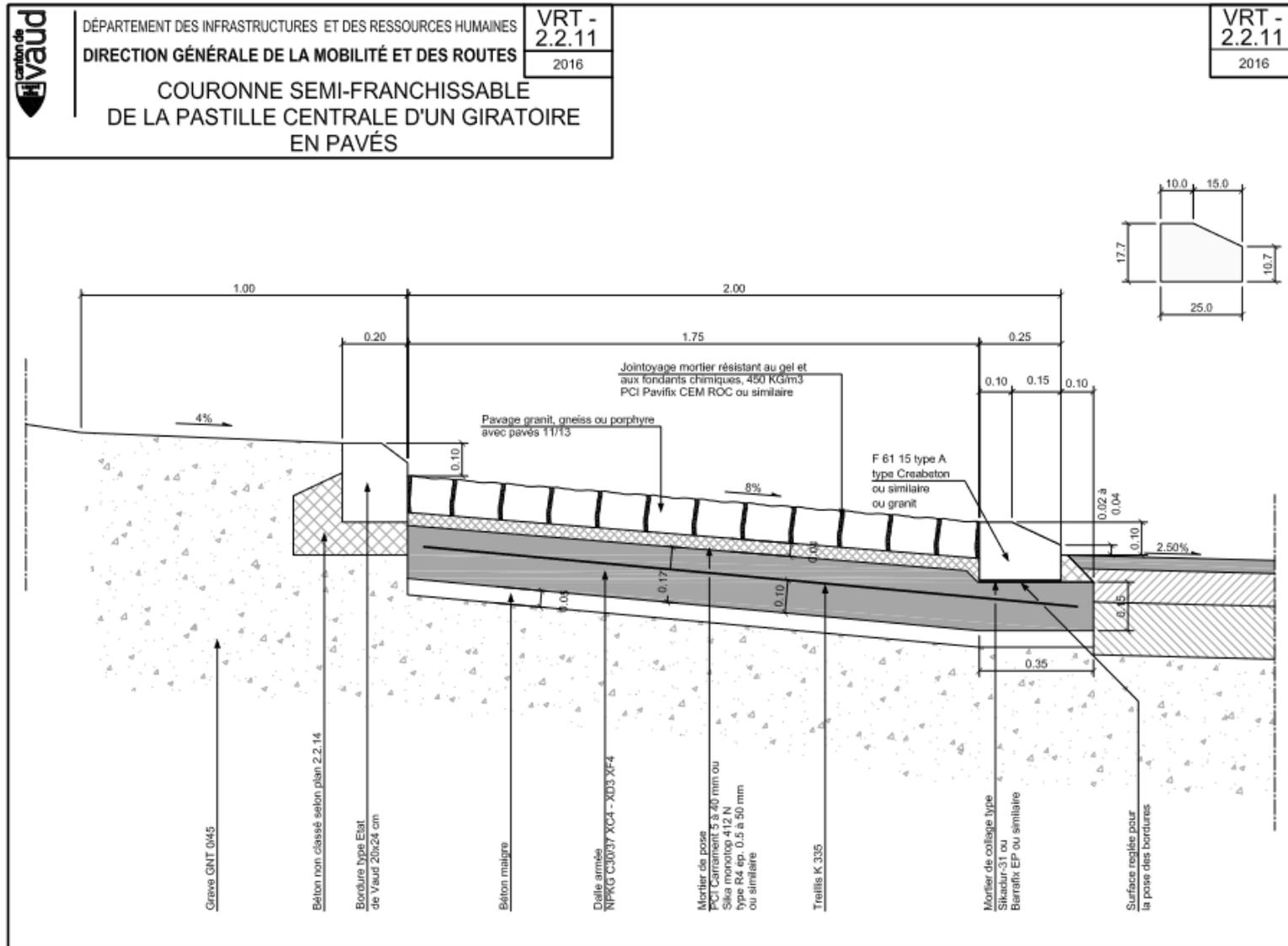


Fig. 39 Détail technique – Surface semi-franchissable pavée, DGMR, Canton de Vaud.

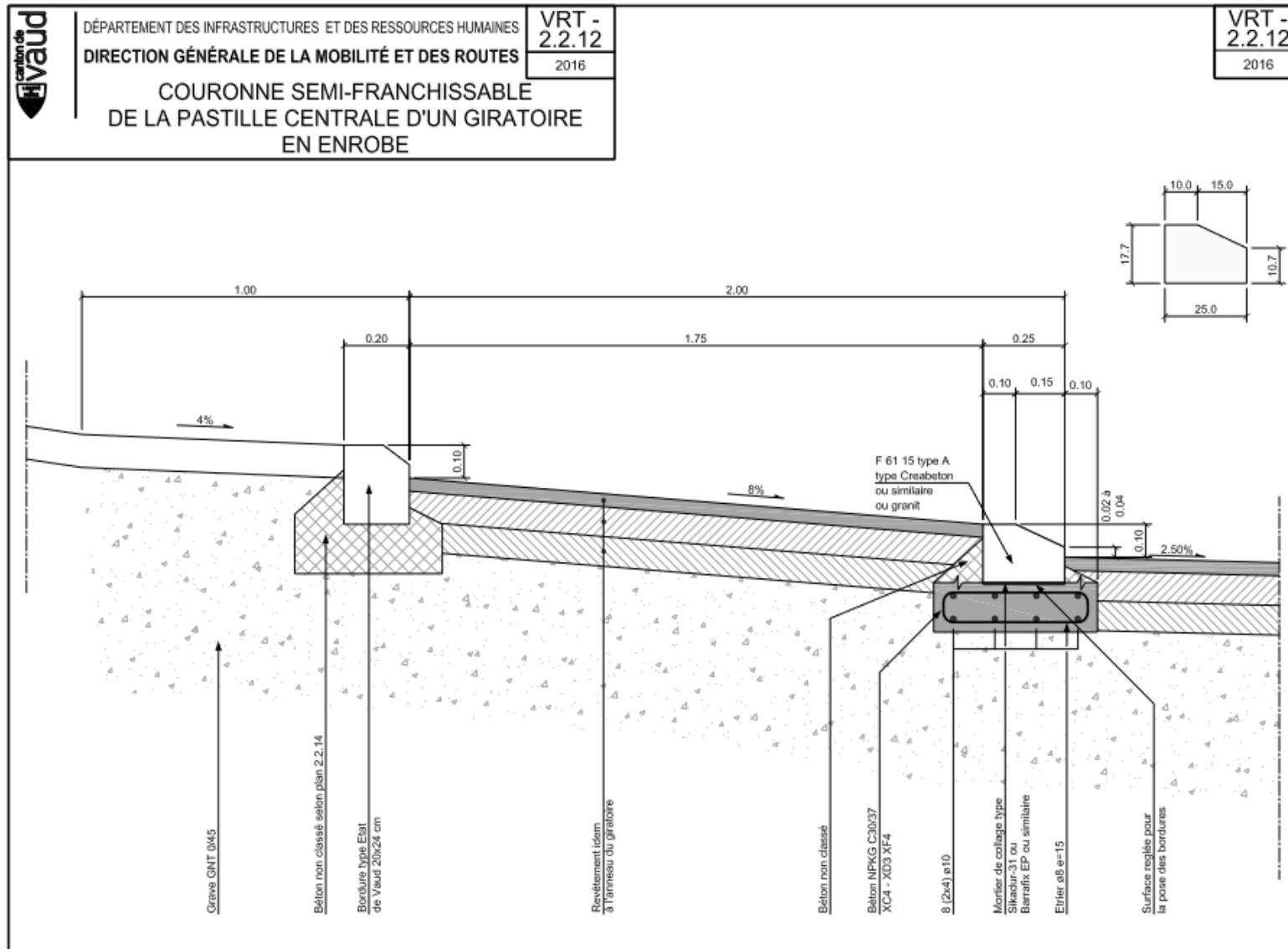


Fig. 40 Détail technique – Surface semi-franchissable en enrobé bitumineux, DGMR, Canton de Vaud.

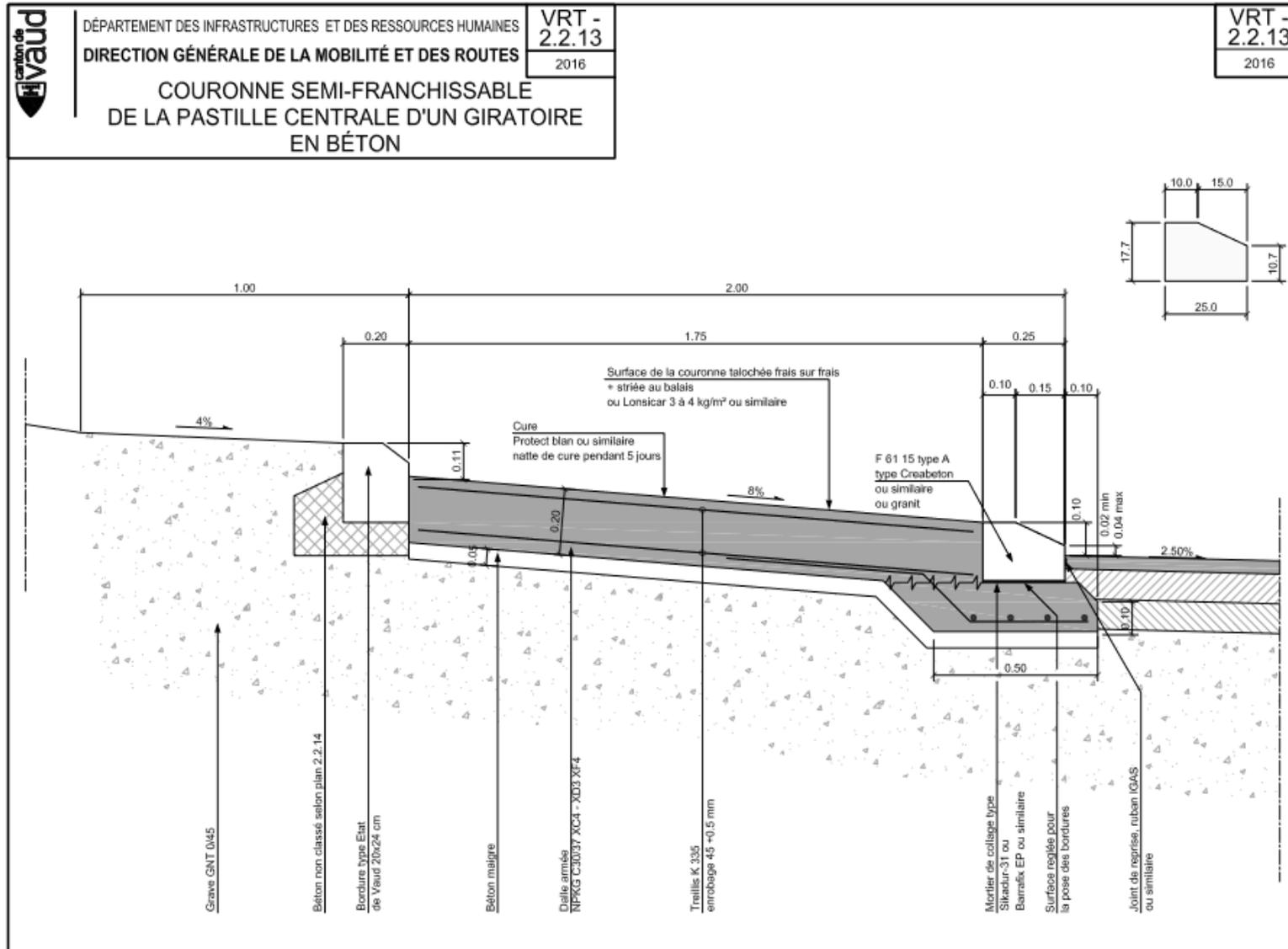


Fig. 41 Détail technique – Surface semi-franchissable en béton, DGMR, Canton de Vaud.

5.4 Méthode de dimensionnement géométrique adaptée

La méthode de dimensionnement géométrique proposée est fortement inspirée de la littérature étrangère tout en étant adaptée au cas suisse.

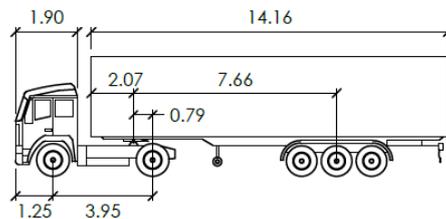
Il est à noter ici, et comme notamment vu dans les chapitres précédents, que toutes les caractéristiques géométriques des normes suisses ne peuvent pas être appliquées dans le cas des turbo-giratoires.

Les caractéristiques géométriques ainsi que les étapes de construction du turbo-giratoire sont détaillées ci-après pour un giratoire à quatre branches et un giratoire à trois branches.

5.4.1 Véhicules déterminants

Les véhicules déterminants pour la construction du turbo-giratoire standard consiste en un semi-remorque (tracteur à sellette avec semi-remorque) et un camion avec remorque (emprise au sol plus grande, une révision de la norme sur les viabilités est en cours).

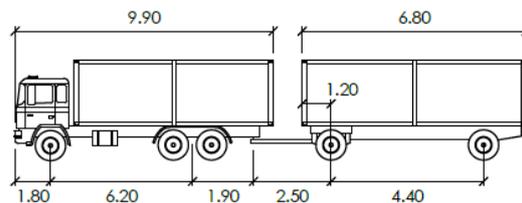
La vitesse de viabilité est fixée à 10km/h. Les contrôles de viabilité ont été également vérifiés pour des vitesses supérieures à 10km/h, soit 15 et 20km/h, dans ces cas, la surface semi-franchissable, ainsi que la bordure type turbo-giratoire pourront être franchies.



Sattelschlepper Rm=7.5m

	mètres		
Largeur du tracteur	: 2.55	Délai contre-braq.	: 6.0
Largeur de la remorque	: 2.55	Angle de braquage	: 31.8
Trace du tracteur	: 2.55	Angle d'articulation	: 70.0
Trace de la remorque	: 2.55		
Vitesse	: 10 Km/h		

Fig. 42 Caractéristiques du véhicule déterminant, semi-remorque.



LWA-A8+

	mètres		
Largeur du tracteur	: 2.60	Délai contre-braq.	: 6.0
Largeur de la remorque	: 2.60	Angle de braquage	: 43.2
Trace du tracteur	: 2.50	Angle d'articulation	: 70.0
Trace de la remorque	: 2.50		
Vitesse	: 10 Km/h		

Fig. 43 Caractéristiques du véhicule déterminant, camion avec remorque.

Dans le cas où des véhicules de sociétés de transports publics (BHNS, bus articulés, ...) parcourent régulièrement l'aménagement, il est conseillé de procéder à une vérification des girations spécifiques à ces véhicules, ceux-ci pouvant représenter le cas de figure déterminant.

5.4.2 Turbo-giratoire à quatre branches

Le turbo-bloc est l'élément géométrique du turbo-giratoire qui définit les rayons et les trajectoires des voies de circulation.

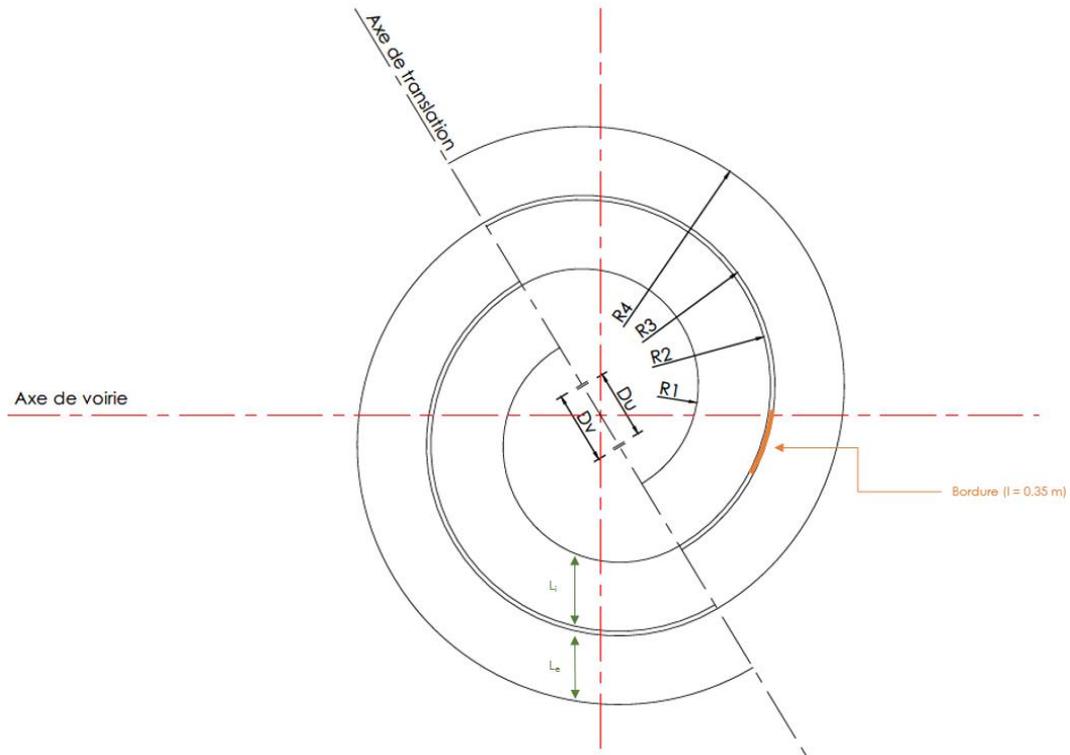


Fig. 44 Conception géométrique en turbo-blocs.

Étapes de construction

Les étapes de construction d'un turbo-giratoire à quatre branches sont les suivantes :

Turbo-bloc

- 1) Définition des axes de chacune des branches et de l'axe de translation – inclinaison de l'axe de translation de $\sim 120^\circ$ (depuis l'horizontale, sens anti-horaire) (selon les quadrants horaires, à 4h55) ;
- 2) Positionnement du centre de gravité (intersection entre les différents axes) et des distances D_u (Rayons côté R_i) et D_v (Rayons symétriques à R_i) par rapport au centre de gravité ;
- 3) Disposition des rayons R_1 à R_4 .

Îlot central – Surface semi-franchissable

- 4) Construction d'un rayon de 9m, tangent à l'îlot de l'axe principal (voie d'entrée) et R_1 .
- 5) Jonction entre R_2 et le cercle tangent construit à l'étape 4 ;
- 6) Appliquer les étapes 5 et 6 pour l'autre branche de l'axe principal.

Entrées et sorties du turbo-giratoire (semblables au giratoire conventionnel, selon la VSS 40 263 [11])

- 7) Construction des rayons d'entrée (deux arcs de cercle, en anse de panier) ;
- 8) Construction des rayons de sortie (deux arcs de cercle, en anse de panier).

Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques d'un turbo-giratoire à quatre branches sont détaillées dans le tableau ci-après.

Tab. 27 *Caractéristiques géométriques d'un turbo-giratoire à quatre branches*

Caractéristique géométrique	Dimension
Largeur de la voie intérieure L_i [m]	5.50
Largeur de la voie extérieure L_e [m]	5.35
Largeur de la bordure l [m]	0.35
Distance entre les centres de gravité des rayons intérieurs D_u [m]	5.65
Distance entre les centres de gravité des rayons extérieurs D_v [m]	5.35
Rayon R_1 [m]	9.00
Rayon R_2 [m]	14.50
Rayon R_3 [m]	14.85
Rayon R_4 [m]	20.20

Les caractéristiques géométriques ont été déterminées sur la base d'un turbo-giratoire avec un rayon intérieur (à l'îlot central, avec surface semi-franchissable) de 9m de rayon. Cela représente un turbo-giratoire avec un diamètre extérieur d'environ 40m. Il s'agit du diamètre minimal pour lequel ce type de turbo-giratoire peut être construit afin de garantir la viabilité des semi-remorques et des camions avec remorques jusqu'à une vitesse de 20km/h.

Avec des vitesses de viabilité réduites, le diamètre du turbo-giratoire peut également être diminué. Ces caractéristiques géométriques peuvent être adaptées, en respectant la même logique et les mêmes largeurs de voies à l'anneau, mais avec un diamètre différent (voir Annexe II).

5.4.3 Turbo-giratoire à trois branches

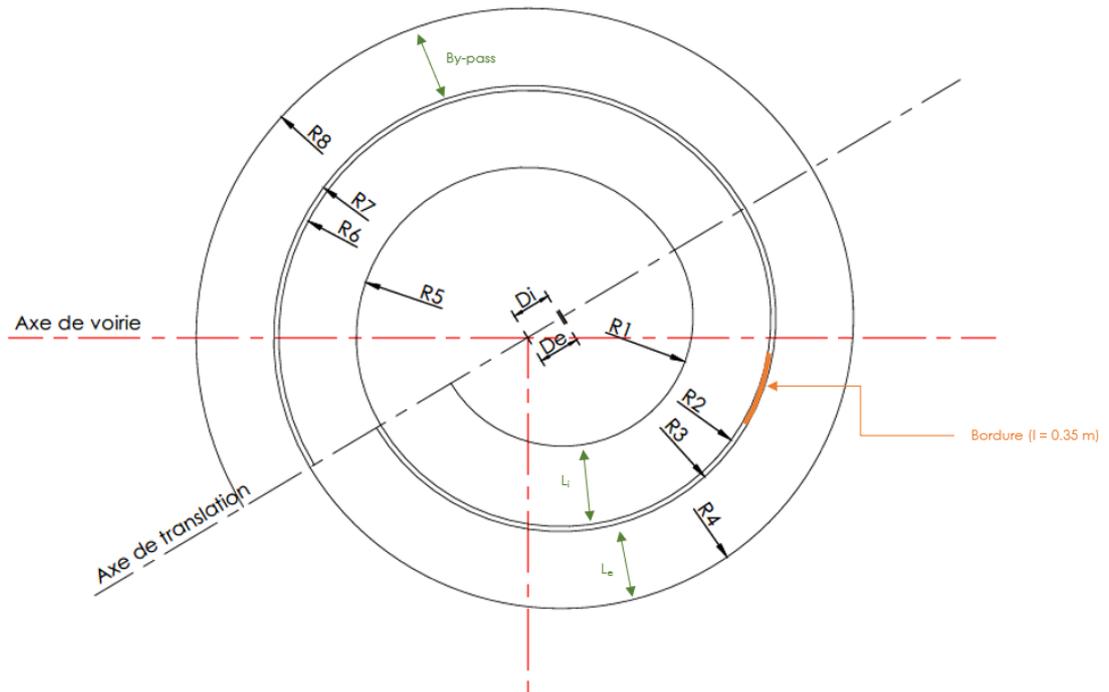


Fig. 46 Conception géométrique en turbo-blocs.

Étapes de construction

Les étapes de construction d'un turbo-giratoire à trois branches sont les suivantes :

Turbo-bloc

- 1) Définition des axes de chacune des branches et de l'axe de translation – inclinaison de l'axe de translation d'environ 30° (selon les quadrants horaires, à 8h10) ;
- 2) Positionnement du centre de gravité (intersection entre les différents axes) et des distances D_i et D_e par rapport au centre de gravité ;
- 3) Disposition des rayons R1 à R4, du côté de l'axe secondaire (3^{ème} branche) ;
- 4) Disposition des rayons R5 et R6, tangents aux rayons R1 et R2, du côté opposé à l'axe secondaire (3^{ème} branche) ;
- 5) Si by-pass : construction des rayons R7 et R8, tangents aux rayons R3 et R4, du côté opposé à l'axe secondaire (3^{ème} branche).

Îlot central – Surface semi-franchissable

- 6) Construction d'un rayon de 9m, tangent à l'îlot de l'axe principal et R1 (depuis les voies d'entrée) ;
- 7) Jonction entre le R2 et le cercle tangent construit à l'étape 6.

Entrées et sorties du turbo-giratoire (semblables au giratoire conventionnel, selon la VSS 40 263 [11])

- 8) Construction des rayons d'entrée (deux arcs de cercle, en anse de panier) ;
- 9) Construction des rayons de sortie (deux arcs de cercle, en anse de panier).

Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques d'un turbo-giratoire à trois branches sont détaillées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristique géométrique	Dimension
Largeur de la voie intérieure L_i [m]	5.50
Largeur de la voie extérieure L_e [m]	5.35
Largeur de la bordure l [m]	0.35
Distance entre les centres de gravité des rayons intérieurs D_i [m]	2.83
Distance entre les centres de gravité des rayons extérieurs D_e [m]	2.68
Rayon R_1 [m]	9.00
Rayon R_2 [m]	14.50
Rayon R_3 [m]	14.85
Rayon R_4 [m]	20.20
Rayon R_5 [m]	11.825
Rayon R_6 [m]	17.175
Rayon R_7 [m] – Si by-pass	17.175
Rayon R_8 [m] – Si by-pass	22.875

Les caractéristiques géométriques ont été déterminées sur la base d'un turbo-giratoire avec un rayon intérieur (à l'îlot central, avec surface semi-franchissable) de 9m de rayon.

Cela représente un turbo-giratoire avec un diamètre d'environ 40m (sans by-pass) et d'environ 45m (avec by-pass). Il s'agit d'un diamètre minimal pour une viabilité à 20km/h. Avec des vitesses de viabilité réduites, le diamètre du turbo-giratoire peut également être diminué. Ces données peuvent être adaptées, en respectant la même logique et les mêmes largeurs de voies à l'anneau, mais avec un diamètre différent.

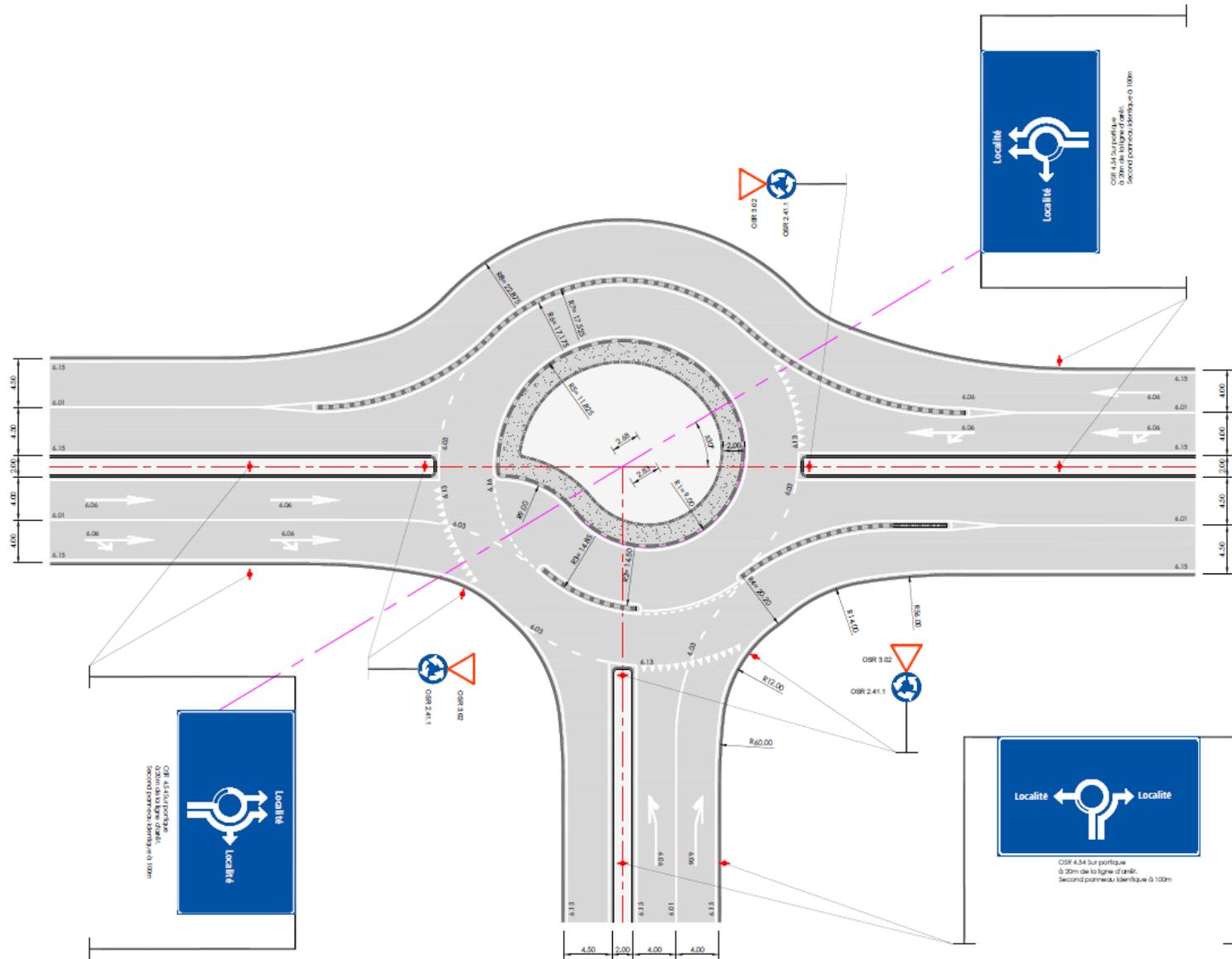


Fig. 47 Turbo-giratoire à trois branches, selon méthode de dimensionnement géométrique adaptée à la Suisse.

5.5 Equipements

5.5.1 Séparateurs de voies

Les séparateurs de voies surélevés permettent de faire respecter la séparation des voies, les vitesses en entrée et ainsi de prévenir ou minimiser les conflits entre les voies. Ces séparateurs de voies doivent être franchissables par des véhicules longs ou des transports exceptionnels et ne doivent pas présenter d'arêtes vives.

La bordure permet de délimiter et/ou border des zones de circulation, elle sert de guidage. Il ne s'agit pas d'un dispositif de balisage. Les dispositifs de balisage sont disposés aux abords des routes et associés aux dispositifs de protection et aux marquages sur la chaussée, de manière à garantir un guidage optique continu.

Une forme de bordure, aujourd'hui inexistante en Suisse, a été définie spécifiquement pour le cas des turbo-giratoires par l'équipe de recherche sur la base de celles utilisées pour les franchissements d'accès privés (sans angles vifs, effet miroir de la bordure type existante, type DMTE 208S, Canton du Valais). Ces séparateurs de voies pourraient également être préfabriqués et présenter un profil arrondi.

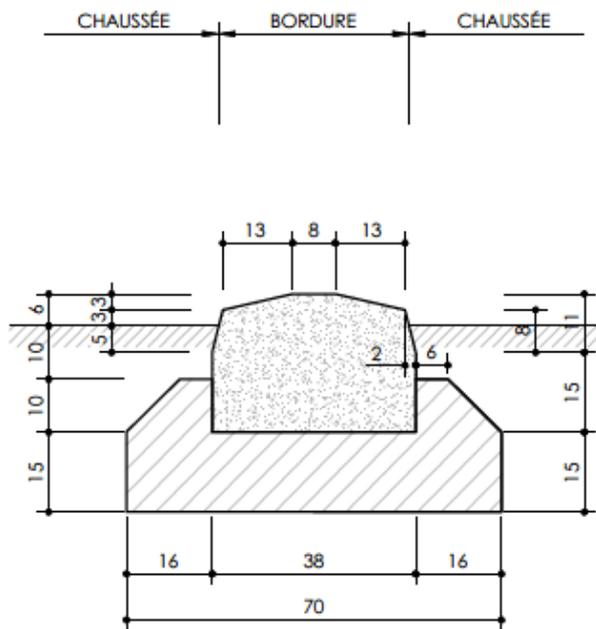


Fig. 48 Bordure type turbo-giratoire (cotes en cm).

Une bordure de transition (bordure plongeante) entre le marquage et le début de la bordure type turbo-giratoire est à prévoir, afin ne pas créer d'arêtes vives dans le sens de circulation.

5.5.2 Signalisation horizontale

Dans le cas où la réalisation des séparateurs de voies contraint de manière trop importante la géométrie du turbo-giratoire en termes de dévers, de déclivités, d'évacuation des eaux, d'entretien, selon la situation topographique ou les flux de cyclistes, celle-ci pourrait être remplacée par un marquage.

Cette solution n'est cependant pas optimale en termes de sécurité routière. En effet, si la séparation des voies n'est pas matérialisée par un élément physique, toutefois franchissable, les conflits entre les voies seront plus importants.

Les principes de marquage du turbo-giratoire doivent respecter l'ordonnance sur la signalisation routière (OSR, RS 741.21 [3]) et la norme VSS 640 850a [15].

Le choix définitif de l'application des marquages dépend également de la localisation du turbo-giratoire, qu'il soit en ou hors localité. Un résumé des différentes applications des marquages est présent à la fin de ce chapitre.

Anneau de circulation

Le bord de l'anneau de circulation est à marquer d'une ligne de bordure OSR 6.15 et de ligne de direction OSR 6.03 pour les voies de sortie du giratoire.

Pour les voies où le changement de direction est autorisé, une ligne de direction OSR 6.03, délimitant les voies de circulation, est à prévoir. L'espace délimité pour l'entrée dans la voie intérieure du giratoire, à l'anneau, est à marquer par une ligne de guidage OSR 6.16.

La délimitation des voies de l'anneau de circulation, où le changement de voie n'est pas autorisé, devrait être composé de la bordure type turbo-giratoire. Celle-ci n'ayant pas de statut légal (OSR), elle doit être accompagnée de part et d'autre d'une ligne de sécurité (OSR 6.01). Au cas où cette bordure ne peut pas être mise en place, un marquage est à prévoir entre les voies de l'anneau de circulation. Cette séparation des voies pourra se faire soit avec une ligne de sécurité OSR 6.01, soit avec une double ligne de sécurité OSR 6.02.

Voies d'entrée du giratoire

Pour les branches du turbo-giratoire à 2 voies d'entrée, la longueur de la double voie est définie selon la norme VSS 40 262 [10], en fonction de la longueur de la voie de présélection. La géométrie de cette double voie doit être conçue avec un biseau. Cela permet de clairement identifier le début de la double voie et implique ainsi que les usagers adaptent leur vitesse.

La longueur de la double voie est à définir en premier lieu selon la norme VSS 40 262 [10] et en second lieu, lors de l'étude de trafic, selon la capacité du turbo-giratoire. Cette longueur doit prendre en compte la longueur de ralentissement et la longueur de stockage.

Entre les deux voies, en direction du giratoire, le marquage doit être le suivant :

- Ligne de direction OSR 6.03 ;
- Ligne d'avertissement OSR 6.05 ;
- Ligne de sécurité OSR 6.01, où le changement de direction n'est plus autorisé.

Le marquage continu entre les 2 voies d'entrée est une condition minimale. La mise en place d'un élément séparateur de voie est possible en entrée, permettant d'améliorer le guidage, la compréhension et le comportement des usagers (sécurité routière). Toutefois, l'OSR [3] doit être respectée.

Le bord de la voie extérieure sera délimité par une ligne de bordure OSR 6.15.

La délimitation de la voie d'entrée au niveau de l'anneau du giratoire est marquée par la ligne d'attente OSR 6.13 (série de triangles blancs en travers de la chaussée) et une ligne longitudinale continue OSR 6.12 sur le bord gauche (entre les 2 voies).

La direction que les usagers doivent suivre pour s'engager sur la bonne voie du turbo-giratoire, est à marquer sur la chaussée à l'aide de flèches de direction.

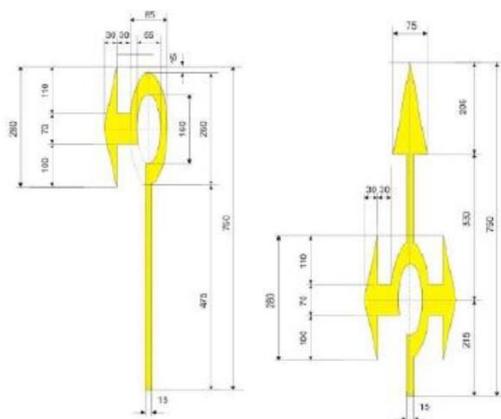


Fig. 49 Flèches de direction circulaires [28].

Si certains pays préconisent des flèches comprenant une partie circulaire représentant le turbo-giratoire (Fig. 49), pour les cas d'application en Suisse, on se doit d'utiliser les flèches définies par l'OSR (OSR 6.06). Un monitoring de l'utilisation de cette signalisation devra être mené afin de définir si les types de flèches préconisées à l'étranger permettraient d'offrir une meilleure interprétation des voies à utiliser en fonction de la direction souhaitée. S'il est démontré qu'une telle signalisation offre un avantage notable, il faudra toutefois adapter la législation en vigueur (OSR [3]).

Voies de sortie du giratoire

Le bord de la voie extérieure sera délimité par une ligne de bordure OSR 6.15.

La délimitation de la voie de sortie au niveau de l'anneau du giratoire est indiquée par la ligne de guidage OSR 6.15.

Entre les deux voies, en partant du giratoire, le marquage doit être le suivant :

- Ligne de sécurité OSR 6.01, dès la sortie du giratoire ;
- Ligne d'avertissement OSR 6.05 ;
- Ligne de direction OSR 6.03.

Avant la fin de la double voie, une flèche de rabattement OSR 6.07 est à mettre en place.

Pour les voies en by-pass, une flèche de rabattement OSR 6.07 est à mettre en place.

Résumé – Champ d'application des différents marquages

Tab. 29 Domaines d'application des marquages dans un turbo-giratoire

Marquage	En localité	Hors localité
<i>Marquages longitudinaux</i>		
Ligne de sécurité	o	+
Double ligne de sécurité	o	+
Ligne de direction	+	+
Ligne double	o	+
Ligne d'avertissement	+	++
Ligne longitudinale continue	+	+
Ligne de bordure	o	+
Ligne de guidage	+	+
<i>Marquages transversaux</i>		
Ligne d'attente	+	+
<i>Flèches</i>		
Flèche de présélection	+	+
Flèche de rabattement	o	+
Flèche de direction	o	o

Légende : o = exception, + = règle, ++ = obligatoire

5.5.3 Signalisation verticale

Pour la signalisation des turbo-giratoires, la norme VSS 40 847 « Signaux – Disposition aux carrefours giratoires » [14] peut être appliquée. La signalisation suivante est à prévoir pour les turbo-giratoires.

Signaux de prescription et signaux de priorité

Le signal OSR 2.41.1 « carrefour à sens giratoire » indique la direction du mouvement giratoire que les véhicules ont l'obligation d'effectuer. De ce fait, ce signal doit être maintenu pour un turbo-giratoire

Le signal OSR 3.02 « Cédez-le-passage » donne la priorité aux véhicules circulant à l'anneau sur ceux provenant des voies d'entrée. Dans le cas d'un turbo-giratoire, cette priorité est également valable.

Le signal « Carrefour à sens giratoire » (OSR 2.41.1) est à installer avec le signal « Cédez-le-passage » (OSR 3.02) de la façon suivante :

- Une seule voie d'entrée dans le giratoire : les signaux de prescription (OSR 2.41.1 et 3.02) sont à installer à droite de l'entrée du giratoire ;
- Deux voies d'entrée dans le giratoire : les signaux de prescription (OSR 2.41.1 et 3.02) sont à installer des deux côtés de la chaussée.

Le positionnement de ces différents panneaux doit être étudié avec attention (étude de girations). En effet, en raison des girations des véhicules longs (notamment bus, autocars), la géométrie des turbo-giratoires peut impliquer un balayage du porte-à-faux avant du véhicule hors du turbo-giratoire.

Indicateurs de direction avancés

Sur les routes hors localité, une signalisation avancée est à mettre en place, sous la forme du panneau « Indicateur de direction avancé pour carrefour à sens giratoire » (OSR 4.54). La signalisation avancée est à installer entre 150 et 250m avant le turbo-giratoire.

Sur les routes en localité et sur les routes secondaires, on pourrait renoncer à la signalisation avancée. Toutefois, dans le cadre des turbo-giratoires, il est conseillé de la mettre en œuvre car le trafic doit s'affecter sur les bonnes voies. L'indicateur de direction avancé du giratoire est à mettre en place entre 20 et 100m avant le turbo-giratoire.

Plusieurs types de panneaux peuvent être envisagés à ce sujet. Tout d'abord, sur la base du signal OSR 4.54 pour les giratoires simples, un panneau « Indicateur de direction avancé pour carrefour turbo-giratoire » peut être créé.



Fig. 50 Exemples de signaux « Indicateur de direction avancé pour carrefour turbo-giratoires ».

Une autre solution qui pourrait être envisagée, nécessitant toutefois une adaptation des bases de l'OSR [3], consiste à représenter le turbo-giratoire sur un indicateur de direction, de même que la séparation de voies (marquage).



Fig. 51 Exemples de signaux « Indicateur de direction avec répartition des voies pour turbo-giratoires » [28].

Une autre possibilité consiste à mettre en place des indicateurs de direction avec répartition rectiligne des voies. Néanmoins, on perd ici la notion de giratoire.

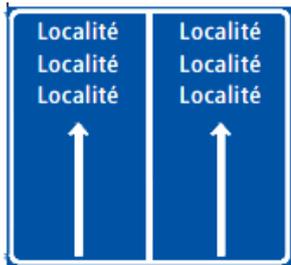


Fig. 52 Exemples de signaux « Indicateur de direction avec répartition rectiligne des voies ».

Dans tous les cas d'un tronçon à plusieurs voies en entrée, ces indicateurs de direction devraient être disposés sur des portiques surplombant les voies de circulation.

A ce stade, il est préconisé de mettre en œuvre des signaux « Indicateur de direction avancé pour carrefour turbo-giratoires » (OSR 4.54).

Tel que le montre l'exemple ci-dessous, nous conseillons de placer cette signalisation sur deux positions (env. 20m avant l'entrée et un signal avancé) et sur portiques/potences (position au-dessus des voies) afin que les usagers se présélectionnent convenablement à l'approche de l'aménagement et au moment de s'insérer.



Fig. 53 Exemples de signaux « Indicateur de direction avec répartition des voies pour turbo-giratoires », presque-turbo-giratoire de Seetalstrasse, Lenzburg, 2021.

Indicateurs de direction

Les indicateurs de direction en forme de flèches (OSR 4.31, 4.32 et 4.33), avec le nom de la direction d'un seul côté, sont à placer sur l'îlot directionnel, perpendiculairement à la direction du regard.

Pour les turbo-giratoires, en fonction de la dimension de l'îlot directionnel, entre les voies d'entrée et de sortie du giratoire, l'emplacement des indicateurs de direction est à disposer de manière à ne pas empiéter dans l'emprise du gabarit d'espace libre et à ne pas créer un obstacle en bordure de chaussée (vérification des girations des véhicules longs, déterminants, bus et autocars).

5.5.4 Eclairage public

L'éclairage des turbo-giratoires est identique à l'éclairage des giratoires conventionnels et doit être conforme à la directive SLG de l'éclairage public - « Eclairage public – compléments à SNR 13201-1 et SN EN 13201-2 à 5 ».

Les points lumineux sont à disposer à l'extérieur des voies de circulation de manière à pouvoir s'orienter facilement, à distinguer en toute sécurité les sorties du turbo-giratoires ainsi que d'avoir une vision suffisante sur les autres usagers en présence. A nouveau, les emprises et girations doivent être vérifiées afin de déterminer le positionnement de l'éclairage.

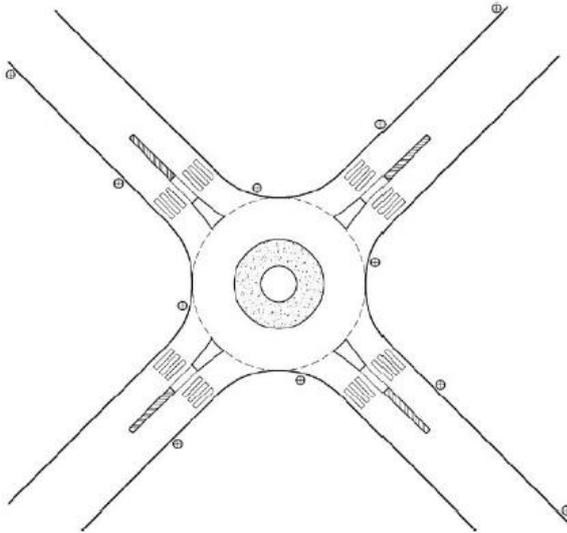


Fig. 54 Eclairage public des giratoires, applicable par analogie aux turbo-giratoires [57].

5.6 Entretien

5.6.1 Evacuation des eaux

Une attention particulière est à porter sur le positionnement du système d'évacuation des eaux dans les turbo-giratoires.

Les séparateurs de voies type turbo-giratoire peuvent empêcher l'évacuation des eaux et créer des zones de stockage d'eau, présentant un risque notamment de plaque de verglas en hiver ou un risque pour les deux-roues.

Pour cette raison, le concept d'évacuation des eaux, notamment l'emplacement des sacs de route, doit être élaboré en tenant compte :

- De la planéité de l'assiette du turbo-giratoire ;
- Des dévers ;
- De la position des séparateurs de voies ;

- Des traces de roues potentielles (notamment des 2-roues motorisés ou non-motorisés) afin d'éviter leur chute sur une grille d'évacuation.

Si le cheminement d'évacuation des eaux est fortement empêché par la position des séparateurs de voies, des découpes convenablement dimensionnées peuvent être réalisées afin de permettre l'évacuation des eaux tout en ne présentant pas d'arêtes vives marquées.

Dans le cas où la largeur des découpes nécessaires viendrait à être trop importante, on recommande de privilégier un marquage en lieu et place de séparateurs de voies.

Afin de sécuriser la circulation des cyclistes et d'autres usagers deux-roues, on recommande de placer les grilles d'évacuation (sacs de route) hors de la surface de circulation. Toutefois, si les grilles sont placées dans la surface de circulation, on privilégiera une position des ouvertures perpendiculaire à la direction de circulation.

5.6.2 Entretien hivernal

Selon l'expérience du giratoire du Louché à Lens (Valais), le déneigement d'un aménagement avec une bordure présentant une différence de niveau par rapport à la chaussée n'est pas problématique du point de vue des lames, pour autant que les largeurs de voies soient suffisantes. Toutefois, les bordures type turbo-giratoire (séparateurs de voies) proposées n'ayant encore jamais été mises en œuvre, un monitoring sera nécessaire afin de confirmer qu'elles ne posent pas de problème particulier au déneigement.

En hiver, il pourrait être envisagé de placer, notamment aux extrémités des séparateurs de voies, des poteaux de signalisation flexibles de petite taille afin de permettre au conducteur de l'engin de déneigement d'identifier la bordure. Toutefois, s'agissant d'une zone où le franchissement du séparateur de voies a la plus grande probabilité, la durabilité de cet équipement pourrait être remise en cause.

En cas d'entretien hivernal important, dans ce cas, il vaut mieux privilégier un marquage en lieu et place de séparateurs de voies. Toutefois, cela a potentiellement un impact négatif sur le comportement des usagers (franchissement du marquage, changements de voies à l'anneau).

5.7 Comportement des usagers

Sur la base des relevés effectués par drone, l'analyse du comportement des usagers a été réalisée au moyen du logiciel DataFromSky. Il a ainsi été possible de faire ressortir les informations suivantes :

- Les traces des véhicules ;
- Les vitesses des véhicules ;
- La circulation à cheval sur les voies de l'anneau ;
- L'usage erroné des voies ;
- Les freinages d'urgence.

Glättimüli – Trace des usagers



Fig. 55 Glättimüli – Traces des usagers, traitement à l'aide de DataFromSky.

Le traitement des traces des usagers permet d'obtenir une première appréciation visuelle des comportements inadéquats ou illégaux que l'on peut déceler dans un aménagement de turbo-giratoire (changement de voies, passage sur une ligne continue, mouvements avec cassure).

Glättimüli – Vitesses



Fig. 56 Glättimüli – Vitesses, traitement à l'aide de DataFromSky.

En termes de vitesses, on constate que la vitesse moyenne relevée en période de pointe du soir en entrée de turbo-giratoire se situe aux environs de 25km/h ou en deçà. Comme attendu, les vitesses moyennes augmentent au fil de la circulation à l'anneau pour être maximales en sortie d'aménagement. Après les sorties, elles augmentent à nouveau (tronçons rectilignes en flux globalement séparés).

Glättimüli – Circulation à cheval sur les voies de l'anneau

La Fig. 57 illustre le chevauchement des usagers sur les différentes voies de l'anneau. Y est représentée la part du trafic horaire des véhicules circulant à cheval par rapport à l'ensemble du trafic concerné par ces mouvements.

Dans le cas des flux indiqués en rouge, cette part est importante avec près de 18% de véhicules chevauchant la ligne blanche continue située entre les deux voies de l'anneau. Ces véhicules proviennent majoritairement de la branche « A6 Est » avec un angle de déviation moins prononcé que dans le sens « A6 Ouest direction A6 Est » où le chevauchement est moindre (9%).

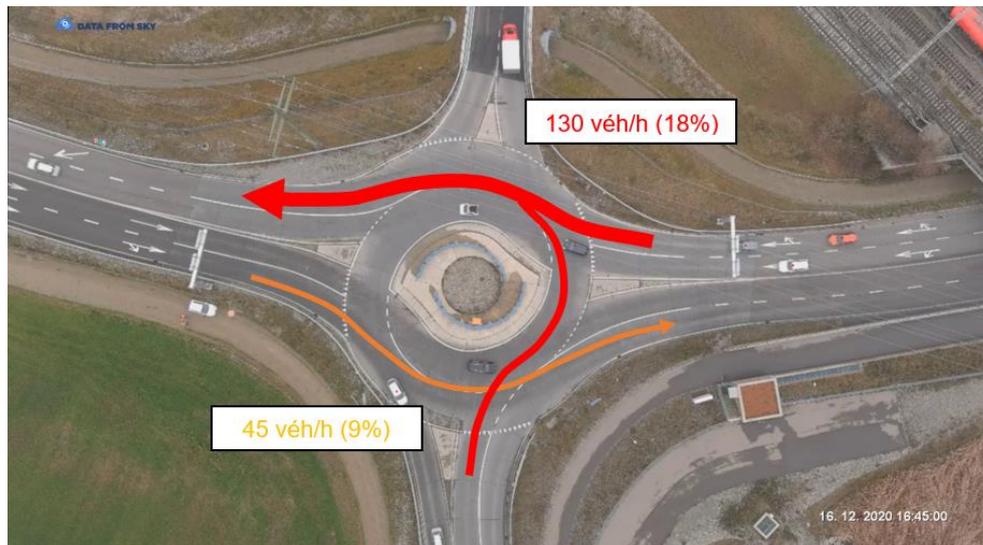


Fig. 57 Glättimüli – Circulation à cheval sur les voies de l'anneau, traitement à l'aide de DataFromSky.

Glättimüli – Usage erroné des voies

Les figures ci-après montrent la part de véhicules ne respectant pas l'affectation de la voie dans laquelle ils se sont engagés.

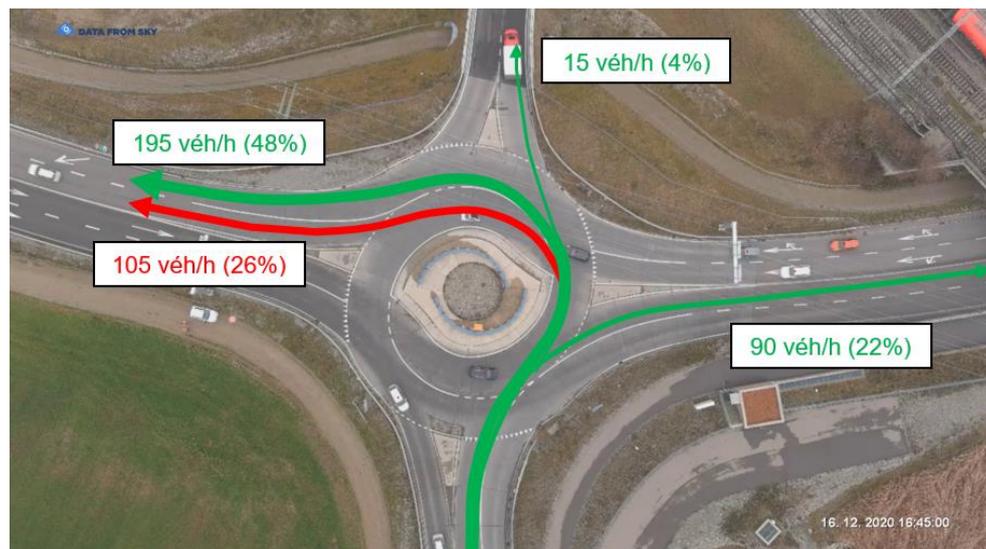


Fig. 58 Glättimüli – Usage erroné des voies, traitement à l'aide de DataFromSky.

La figure Fig. 58 démontre que plus d'un quart des véhicules circulant sur la voie de gauche de la branche « Kleine » présentent un comportement qui, sans être interdit, ni illégal, n'est pas celui attendu. Si ce mauvais comportement peut être dû à l'anticipation du rabattement de la branche de sortie « A6 Ouest », il n'en demeure pas moins dangereux dans la mesure où l'angle que se doit de faire le véhicule est très prononcé.

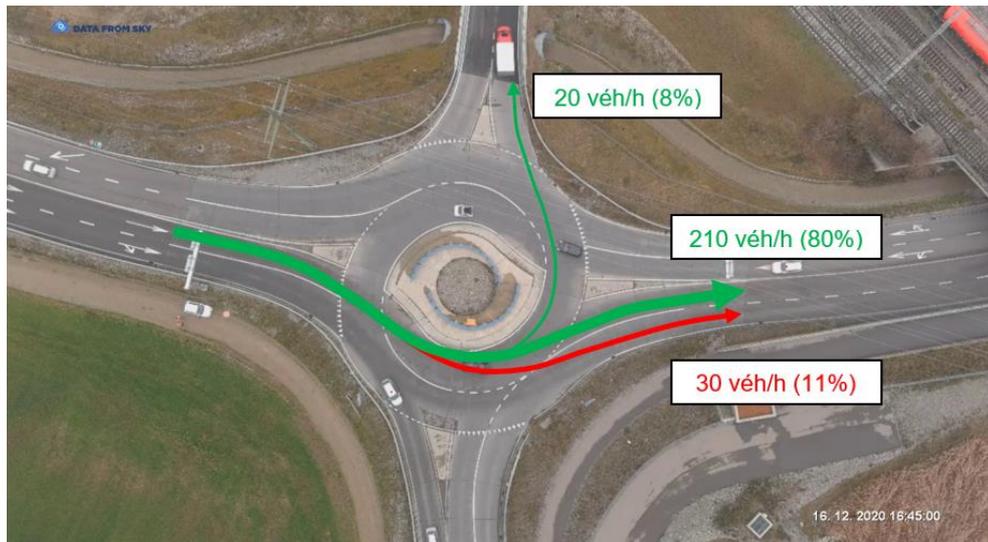


Fig. 59 Glättimüli – Usage erroné des voies, traitement à l'aide de DataFromSky.

La Fig. 59 indique que 11% des véhicules entrants sur la voie de gauche de la branche « A6 Est » ressortent sur la voie de droite, au lieu de rester à gauche (en rouge). Si ce comportement n'est pas illégal du point de vue du marquage en place (ligne de direction, flèche de présélection), il est contraire à la signalisation verticale en place (panneau de présélection) et présente un risque de collision avec un véhicule circulant sur la voie de droite ou venant de la branche « Kleine ».

Pour les autres voies des branches de ce giratoire, les mouvements non conformes ne sont pas représentés graphiquement dans la mesure où ils sont faibles (< 10 véh/h).

Glättimüli – Freinages d'urgence

Sont admises comme freinages d'urgence des occurrences présentant une valeur de décélération d'au moins 5m/s^2 . Le paramétrage de l'application DataFromSky avec cette valeur de décélération n'a pas fait ressortir de telles situations.

Lavapesson – Turbo-giratoire – Trace des usagers

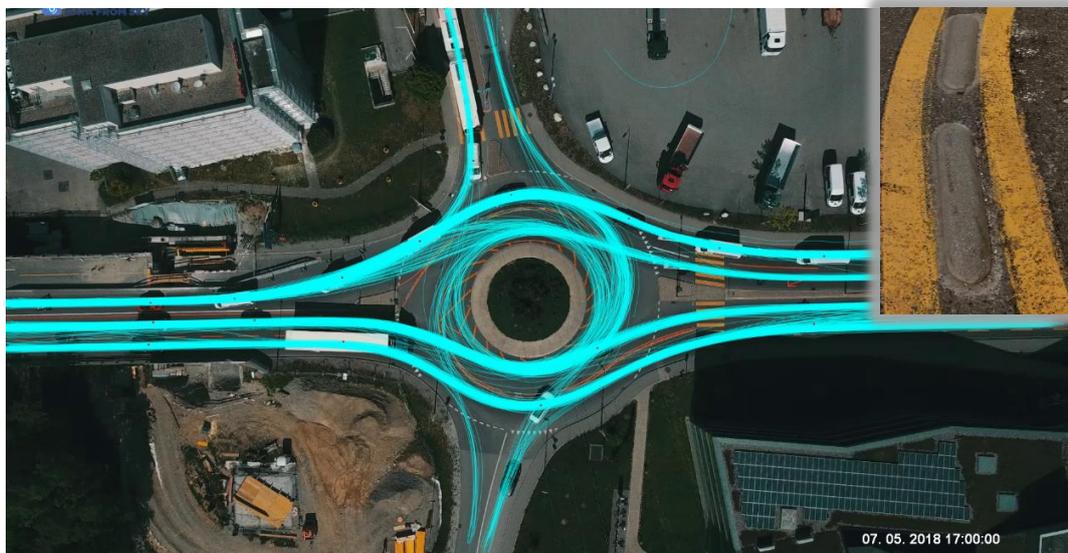


Fig. 60 Lavapesson – Turbo-giratoire – Traces des usagers, traitement à l'aide de DataFromSky et exemple de bordurettes collées.

On constate ici un grand nombre de traces de véhicules circulant sur les zones interdites (œil du turbo-giratoire). Il est à noter que lors des phases de travaux 2018, cette surface interdite centrale était uniquement indiquée sous forme de marquage. Lors des phases de

travaux effectués en 2019, des bordurettes ont été collées dans la zone interdite afin d'inciter les véhicules à respecter la zone interdite. S'ils n'ont pas été étudiés à l'aide d'un traitement informatisé des traces des véhicules, sur site, l'effet s'est montré concluant. Les traces dans le turbo-giratoire sont moins nettes que dans le giratoire conventionnel, cela peut s'expliquer par le mauvais comportement de certains usagers.

Lavapesson – Turbo-giratoire – Vitesses

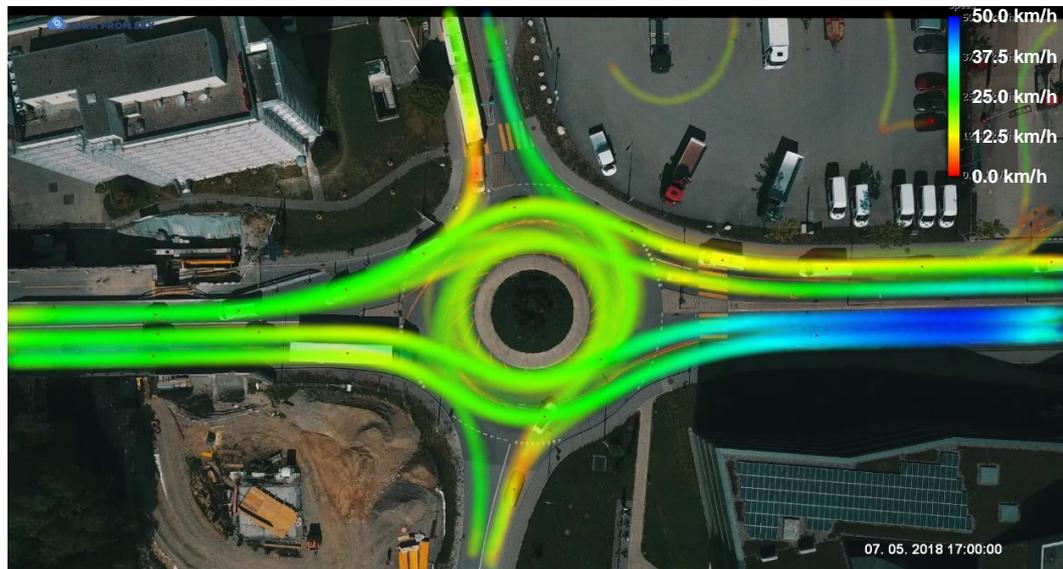


Fig. 61 Lavapesson – Turbo-giratoire – Vitesses, traitement à l'aide de DataFromSky.

En termes de vitesses, on constate que la vitesse moyenne relevée en période de pointe du soir en entrée de turbo-giratoire se situe aux environs de 15km/h ou en deçà notamment sur les branches secondaires. Comme attendu, les vitesses moyennes augmentent au fil de la circulation à l'anneau pour être maximales en sortie d'aménagement. Après les sorties, elles augmentent à nouveau (tronçons rectilignes en flux globalement séparés). Côté jonction, la vitesse est moins élevée que côté Fribourg en raison du chantier.

Lavapesson – Turbo-giratoire – Surfaces interdites

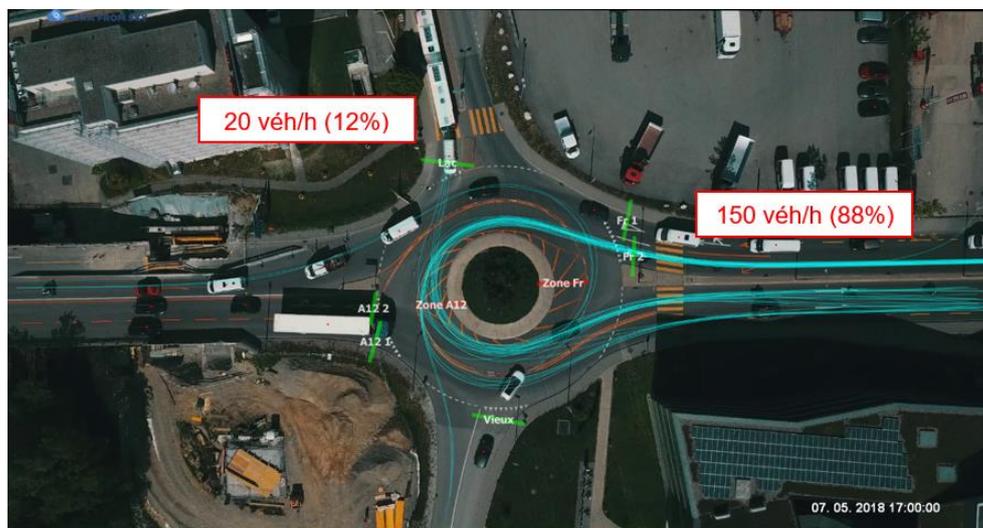


Fig. 62 Lavapesson – Turbo-giratoire – Surface interdite côté A12, traitement à l'aide de DataFromSky.

La majorité du trafic circulant sur la zone interdite du côté A12 consiste en un flux de trafic provenant de Fribourg et faisant demi-tour (88%). Les autres véhicules qui ne respectent pas cette zone interdite proviennent de la Route du Lac.

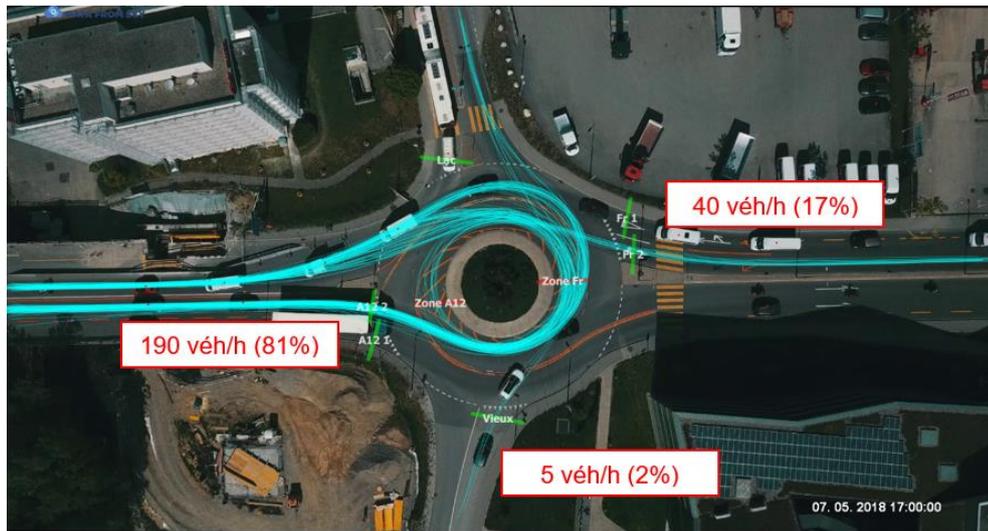


Fig. 63 Lavapesson – Turbo-giratoire – Surface interdite côté Fribourg, traitement à l’aide de DataFromSky.

La majorité du trafic circulant sur la zone interdite provient du côté A12 et fait demi-tour en direction de Morat (81%). En effet, de par sa configuration, la jonction autoroutière de Fribourg-Nord ne permet pas directement aux usagers de se rendre à Morat, ceux-ci doivent alors nécessairement emprunter le giratoire du Lavapesson.

Avec le turbo-giratoire provisoire mis en œuvre, les usagers ne peuvent plus nécessairement effectuer le demi-tour de la même manière qu’avec le giratoire conventionnel à deux voies de circulation à l’anneau. En effet, ils doivent entrer sur la voie de gauche et sortir sur la voie de droite.

Comme mentionné précédemment, lors des phases de travaux 2019, des bordurettes ont été collées afin d’éviter tant que possible ces franchissements de la zone interdite au trafic alors que l’analyse ci-dessus est relative aux phases de travaux 2018.

Ces différents constats démontrent d’une part que la surface semi-franchissable centrale (Chap. 5.3.6) doit être clairement identifiable d’où la recommandation d’un décrochement vertical surélevé. D’autre part, les mouvements induits par la configuration en spirale du turbo-giratoire, notamment les mouvements de demi-tour qui diffèrent par rapport à une configuration conventionnelle, exigeront un changement de comportement et d’habitude des usagers. Il faut donc s’attendre à un besoin d’acclimatation à ce type d’aménagement.

Lavapesson – Turbo-giratoire – Circulation à cheval sur les voies de l’anneau

Les deux figures qui suivent illustrent la circulation à cheval sur les voies de l’anneau des usagers en mai 2018 et en octobre 2019. Dans les deux cas, des bordures physiques accompagnées de marquages séparent les voies à l’anneau.

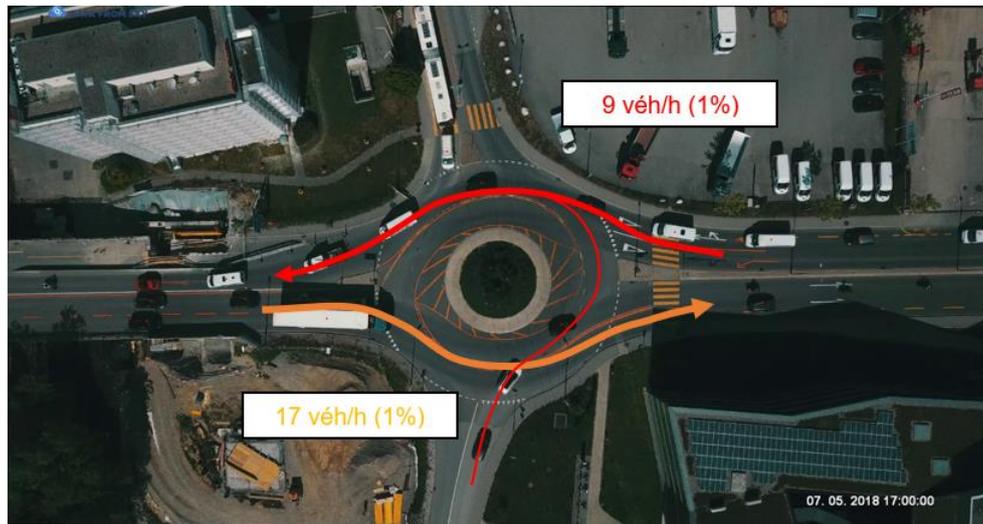


Fig. 64 Lavapesson – Turbo-giratoire – 2018 – Circulation à cheval sur les voies de l’anneau, traitement à l’aide de DataFromSky.

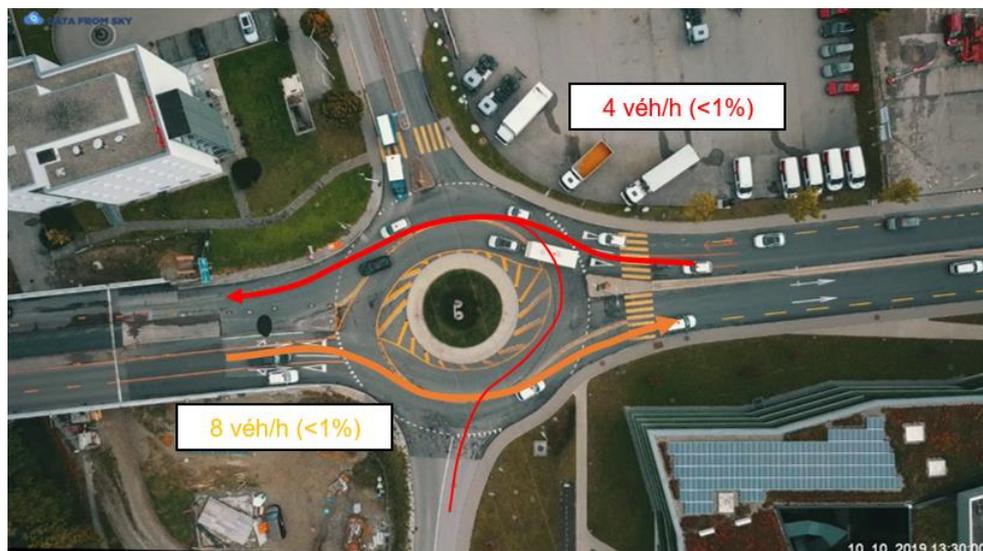


Fig. 65 Lavapesson – Turbo-giratoire – 2019 – Circulation à cheval sur les voies de l’anneau, traitement à l’aide de DataFromSky.

Le nombre de véhicules circulant à cheval sur les voies de l’anneau a diminué de moitié entre mai 2018 et octobre 2019. La situation étant quasiment identique entre les deux années (présence de séparateurs de voies et de marquages), une probable explication à ce phénomène est un changement d’habitude et une meilleure compréhension de l’aménagement de la part des usagers au fil du temps.

En comparant des trajectoires identiques, dans le cas du turbo-giratoire du Lavapesson (avec séparateurs de voies), moins de 1% des véhicules circulent à cheval sur les voies de circulation contre 9 à 20% à Glättimüli (sans séparateurs de voies). On peut en déduire que la mise en place de séparateurs de voies a un effet positif en ce sens sur le comportement des usagers.

Lavapesson – Turbo-giratoire – Usage erroné des voies

Sur la Fig. 66, on peut observer que, sur la totalité des véhicules entrant dans le giratoire sur la voie de gauche depuis Fribourg (310 véh/h), env. 72% ont des mauvais comportements (en rouge).

De ces 72%, on peut estimer que 56% en direction de l’autoroute effectuent ces manœuvres pour remonter les files d’attente se formant sur la voie de droite depuis

Fribourg. La grande majorité (48 %) le font en effectuant un demi-tour sur la zone interdite et le reste (8%) vont tout droit en franchissant la ligne continue (avec séparateurs de voies).

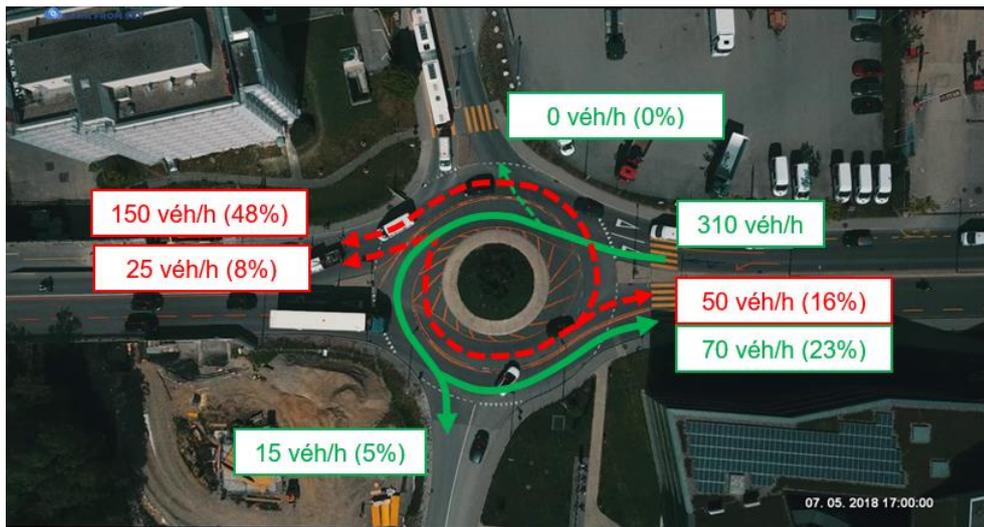


Fig. 66 Lavapesson – Turbo-giratoire – Usage erroné des voies, traitement à l'aide de DataFromSky.

Pour les autres voies de ce giratoire, les mouvements non conformes ne sont pas représentés graphiquement, car ils représentent de faibles valeurs (< 10 véh/h).

Lavapesson – Turbo-giratoire – Freinages d'urgence

Sont admises comme freinages d'urgence des occurrences présentant une valeur de décélération d'au moins 5m/s^2 . Le paramétrage de l'application DataFromSky avec cette valeur de décélération n'a pas fait ressortir de telles situations, comme pour le cas d'étude de Glättimüli.

Lavapesson – Giratoire conventionnel – Trace des usagers



Fig. 67 Lavapesson – Giratoire conventionnel – Traces des usagers, traitement à l'aide de DataFromSky.

Dans le cas du giratoire conventionnel, on constate que les traces de véhicules sont nettes. Dans son ensemble, le comportement des automobilistes est correct par rapport à leurs itinéraires. Par exemple, en provenance de la jonction, ils rentrent dans le giratoire par la voie de gauche pour prendre la voie intérieure en direction de la branche secondaire (en haut de l'image).

Lavapesson – Giratoire conventionnel – Vitesses

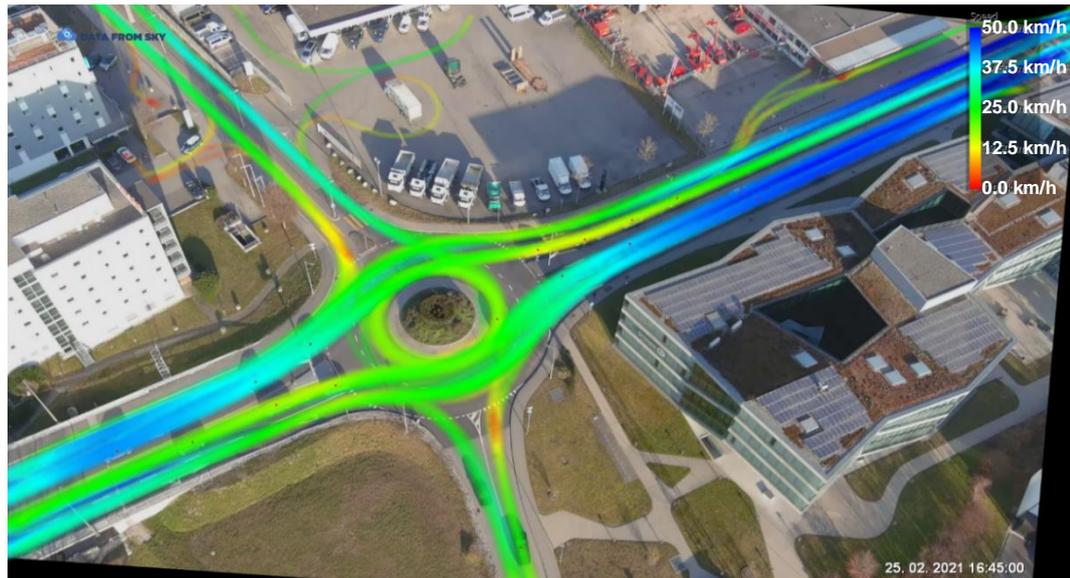


Fig. 68 Lavapesson – Giratoire conventionnel – Vitesses, traitement à l'aide de DataFromSky.

En termes de vitesses, on constate que la vitesse moyenne relevée en période de pointe du soir en entrée se situe aux environs de 25km/h ou en deçà notamment sur les branches secondaires. Il n'est pas possible de faire des comparaisons significatives des vitesses en approche et en sortie sur l'axe principal entre les deux types d'aménagement, en raison de la présence des travaux lors de la configuration en turbo-giratoire.

Lavapesson – Giratoire conventionnel – Circulation à cheval sur les voies de l'anneau

Dans le cas du giratoire conventionnel, on constate que, sur l'axe principal, entre 40 et 60% des véhicules chevauchent la ligne discontinue de l'anneau sur l'axe et quelques véhicules passent de la voie d'entrée à gauche à la voie de sortie à droite à travers l'anneau.

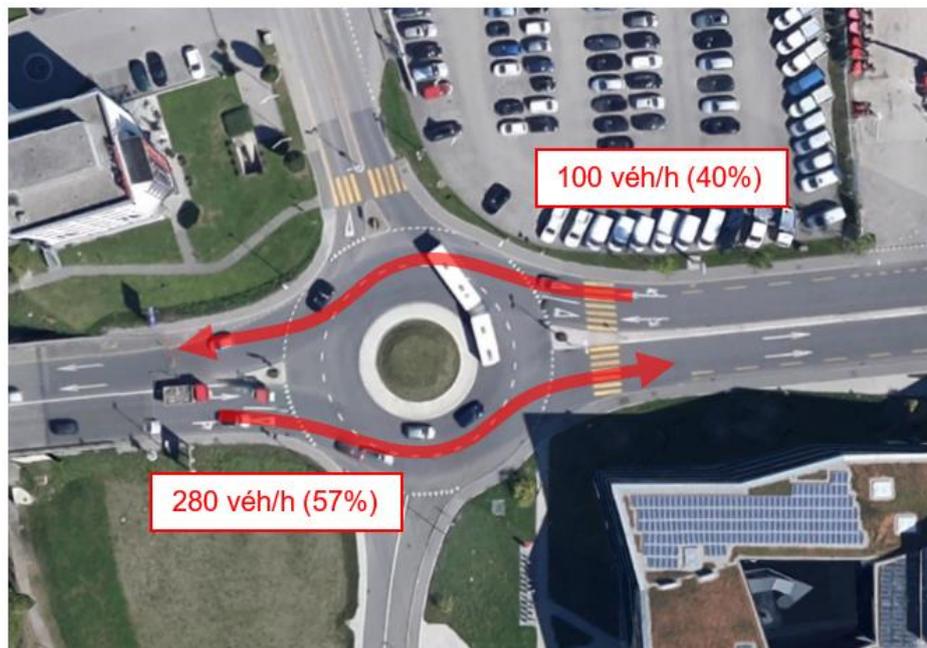


Fig. 69 Lavapesson – Giratoire conventionnel – Usage erroné des voies, traitement à l'aide de DataFromSky.

Ce pourcentage est très élevé par rapport au turbo-giratoire où seuls quelques véhicules ont chevauché les voies de l'anneau. Le turbo-giratoire permet d'améliorer le comportement des usagers notamment avec la mise en place de séparateurs de voies.

Lavapesson – Giratoire conventionnel – Traces des usagers effectuant un demi-tour



Fig. 70 Lavapesson – Giratoire conventionnel – Demi-tours côté jonction, traitement à l'aide de DataFromSky.



Fig. 71 Lavapesson – Giratoire conventionnel – Demi-tours côté Fribourg, traitement à l'aide de DataFromSky.

Côté jonction, dans la configuration en giratoire conventionnel, la trajectoire des véhicules est identique pour la grande majorité des véhicules effectuant le demi-tour. Dans le cas du turbo-giratoire, on constate un comportement différent, avec une partie des usagers qui respectent le marquage en effectuant un demi-tour par la voie extérieure de l'anneau et une autre partie qui continue de prendre la voie intérieure de l'anneau.

Côté Fribourg, les traces de véhicules montrent que les automobilistes effectuent un demi-tour en sortant sur la voie de droite contrairement au turbo-giratoire où ils sortent majoritairement sur la voie de gauche en raison de la mise en place de séparateurs de voies.

Lavapesson – Giratoire conventionnel – Freinages d'urgence

Sont admises comme freinages d'urgence des occurrences présentant une valeur de décélération d'au moins 5m/s^2 . Le paramétrage de l'application DataFromSky avec cette valeur de décélération n'a pas fait ressortir telles situations.

Dans le cas étudié du Lavapesson, aucune distinction ne se fait entre les types de giratoires sur ce point.

Conclusions

L'analyse des comportements dans les différents cas étudiés précédemment permet de faire ressortir les éléments suivants :

- Certains usagers n'ont pas un comportement adapté au turbo-giratoire selon les trajectoires théoriques ;
- La mise en place de séparateurs de voies permet de réduire ces mauvais comportements et potentiellement d'améliorer la sécurité (un monitoring est nécessaire) ;
- Le carrefour turbo-giratoire nécessite un changement d'habitudes et une bonne compréhension des usagers. Ce type d'aménagement n'étant encore que peu fréquent en Suisse, il est probable que le fonctionnement « idéal » de ces aménagements ne soit pas atteint de suite, un temps d'adaptation est nécessaire ;
- La circulation dans un turbo-giratoire n'occasionne pas de freinages d'urgence malgré des comportements inappropriés, confirmant l'effet positif de ce type de carrefour sur l'aspect sécuritaire.

5.8 Intégration des modes doux

Les turbo-giratoires sont principalement construits dans les secteurs présentant des charges de trafic élevées, hors localité. Peu de cyclistes et piétons fréquentent donc des turbo-giratoires.

Dans le cas de turbo-giratoire en zone urbaine, le trafic piétonnier et cyclable situé au même niveau que le trafic automobile est problématique en termes de sécurité routière, au même titre que dans les giratoires conventionnels à deux voies à l'anneau. Une analyse approfondie du guidage de la mobilité douce est à prévoir lors de la conception de turbo-giratoires.

La géométrie du turbo-giratoire (nombre de voies en entrée et en sortie, nombre de voies à l'anneau, largeurs, ...), les flux de trafic piétonnier, cyclable et individuel motorisé (charges de trafic, circulation, traversées, ...) sont à étudier. Le nombre de situation de conflits est à déterminer et à considérer avant de projeter une circulation piétonne et cyclable dans un turbo-giratoire.

Les règles de base de sécurité pour les piétons et les cyclistes sont les mêmes que dans les cas de carrefours et de giratoires conventionnels.

5.8.1 Trafic cyclable

Les prescriptions de la norme VSS 40 252 – « Carrefour – Gestion des cycles » [9] sont à appliquer pour le trafic cyclable dans les turbo-giratoires. De plus, le manuel « Gestion des cycles aux carrefours – Manuel d'infrastructure – Version pour la consultation – Juillet/Août 2020 » (OFROU et Conférence Vélo Suisse) a été consulté.

De la même manière que pour des giratoires conventionnels à deux voies de circulation à l'anneau, les turbo-giratoires présentent un risque sécuritaire pour les cyclistes (présélection en entrée, circulation potentielle au centre de l'anneau).

Avant toute chose, la taille du turbo-giratoire (nombre des voies, vitesses de circulation théoriques), le nombre de situations conflictuelles entre le trafic motorisé et le trafic non motorisé, ainsi que le nombre de voies d'entrée et de sortie du giratoire sont à prendre en considération afin de définir un éventuel aménagement cyclable.

Dans la mesure du possible, le trafic cyclable doit donc être dirigé à l'extérieur du turbo-giratoire. Un aménagement cyclable est à séparer du reste du trafic, par la construction de voies en site propre parallèles au turbo-giratoire (à l'anneau et aux entrées du giratoire). Ces voies cyclables en site propre sont unidirectionnelles ou bidirectionnelles en fonction des charges de trafic cyclable et des origines-destinations des cyclistes.

Ces aménagements permettent d'obtenir un haut niveau de confort et de sécurité puisque le trafic cyclable est séparé du trafic individuel motorisé. De plus, la gestion de cycles se fait de manière indépendante. En revanche, les cyclistes perdent la priorité aux traversées et les axes secondaires seront indirectement rejoints. Des exemples de piste cyclable en site propre sont donnés ci-après.

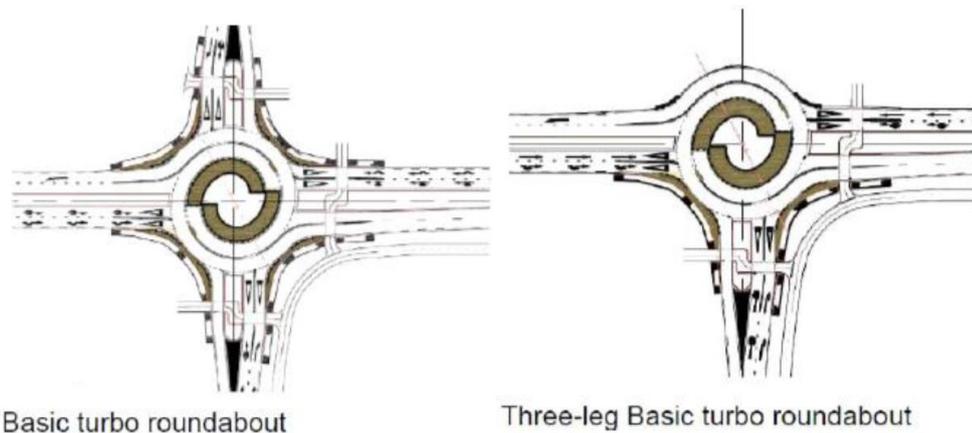


Fig. 72 Exemples de voies cyclables dans des turbo-giratoires basiques [40].

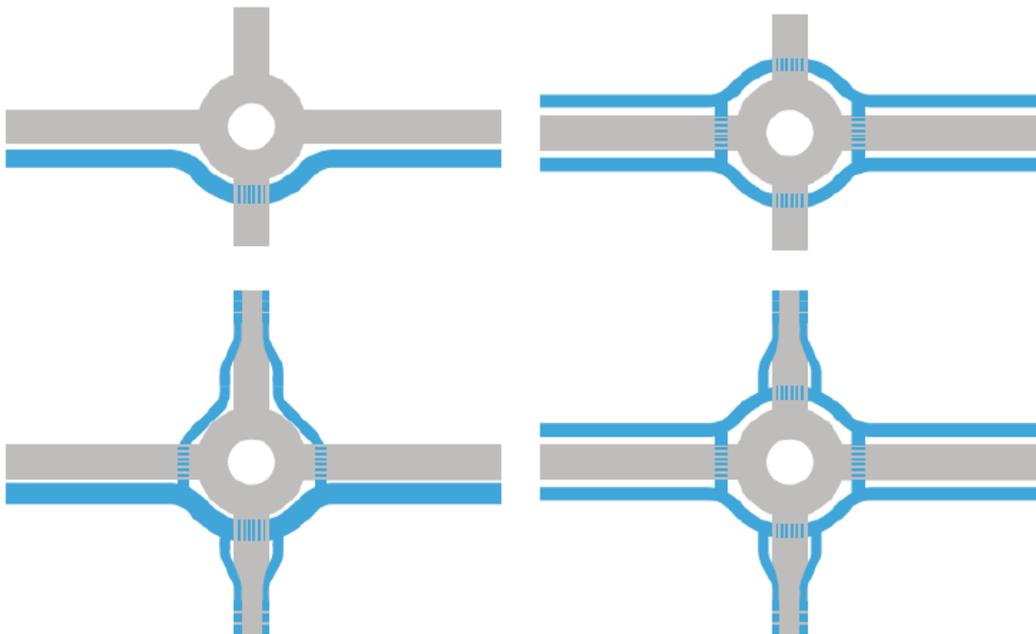


Fig. 73 Pistes cyclables en site propre, parallèles au giratoire conventionnel, applicables par analogie aux turbo-giratoires [58].

Les charges de trafic, la capacité du turbo-giratoire et le type de turbo-giratoire permettent de déterminer les itinéraires cyclables.

Si le flux de cyclistes tournant à droite est important et qu'il y a une seule voie de sortie du turbo-giratoire, un by-pass pour cyclistes est à mettre en place. Il permet de contourner le giratoire avec une voie cyclable. La réinsertion sur la branche peut se faire sans perte de priorité. La largeur du by-pass doit être de 2.50m, 1.80m minimum pour des questions d'entretien hivernal et de nettoyage.

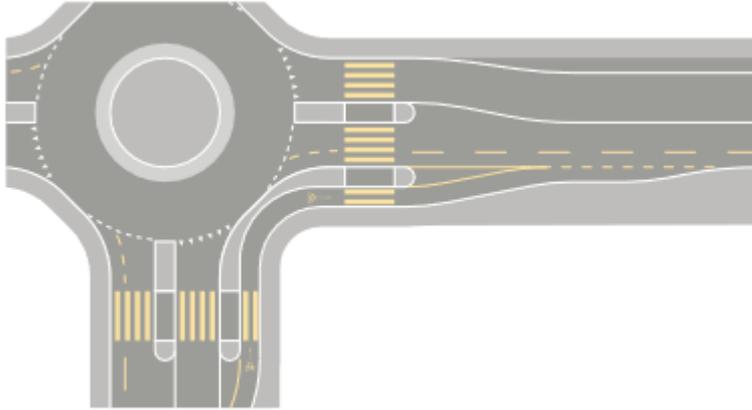


Fig. 74 By-pass cyclable, applicable par analogie aux turbo-giratoires [58].

Le franchissement des branches du turbo-giratoire peut être projeté soit par une traversée cyclable soit par un franchissement dénivelé (passages supérieur ou inférieur). Les flux de cyclistes et l'importance de l'itinéraire franchissable influencent le choix du mode de traversée.

Traversée cyclable

Les traversées cyclables d'un turbo-giratoire doivent respecter les mêmes exigences que celles en vigueur dans le cas de giratoires conventionnelles et des traversées piétonnes (VSS 40 241 [5]).

La traversée cyclable doit se trouver à une distance supérieure ou égale à 5m de l'anneau du turbo-giratoire (identique à la distance indiquée pour les passages piétons) et avoir une largeur supérieure ou égale à 3m.

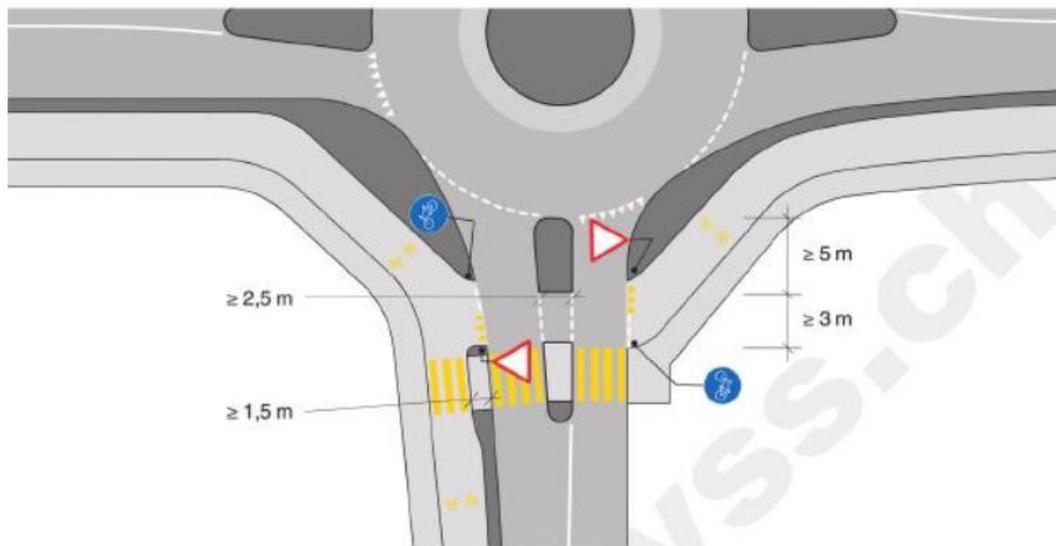


Fig. 75 Voie cyclable bidirectionnelle parallèle au giratoire, applicable par analogie aux turbo-giratoires [9].

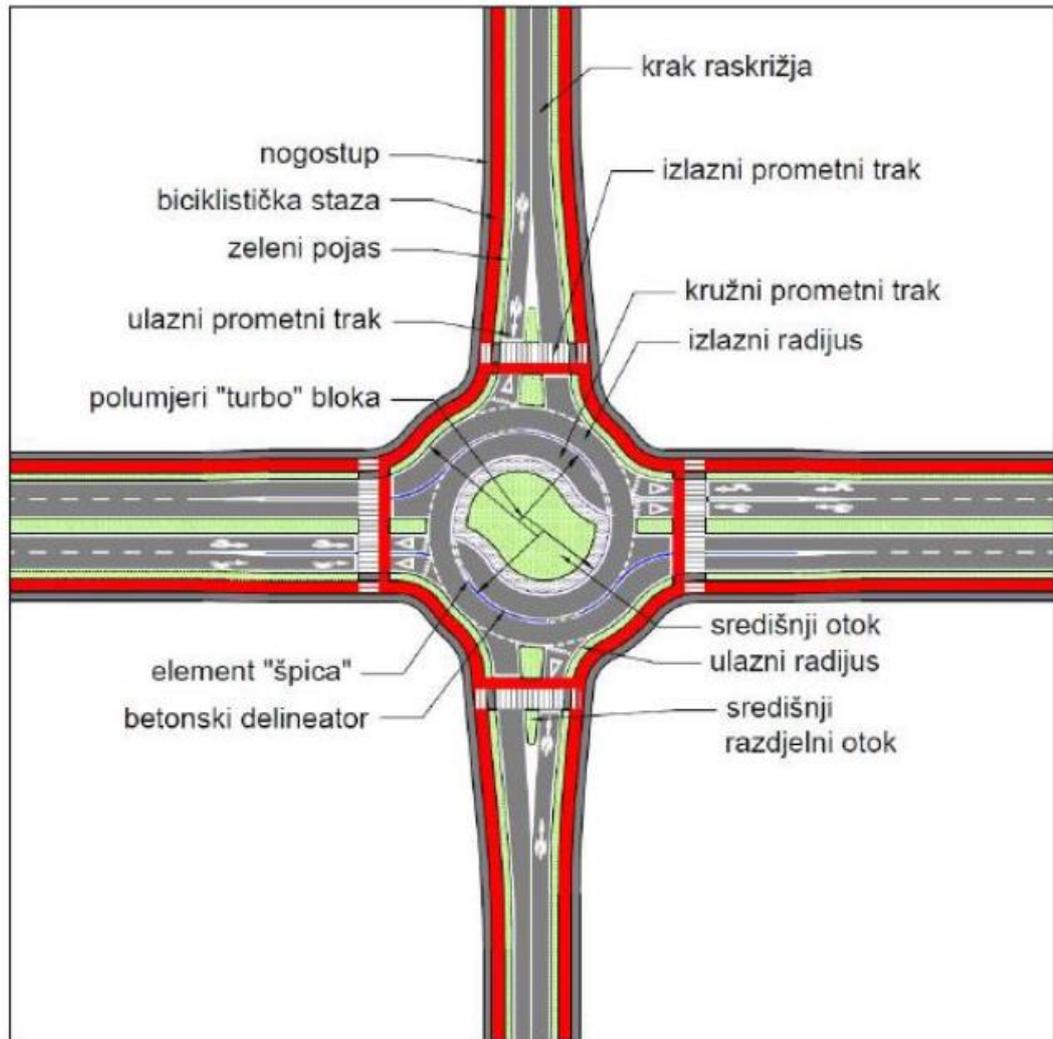


Fig. 76 Voies cyclables séparées et traversées cyclables d'un turbo-giratoire [28].

Lorsque deux voies de même sens doivent être traversées par des cyclistes et des piétons, il est recommandé de mettre en œuvre un îlot de protection entre les voies de même sens. Élément qui devrait également être mis en œuvre dans le cas de giratoires conventionnels. De plus, on recommande également la conception d'un îlot de protection entre les voies de sens contraire, de manière à garantir une visibilité suffisante. La sécurité routière, lors de la traversée cyclable, est ainsi améliorée.

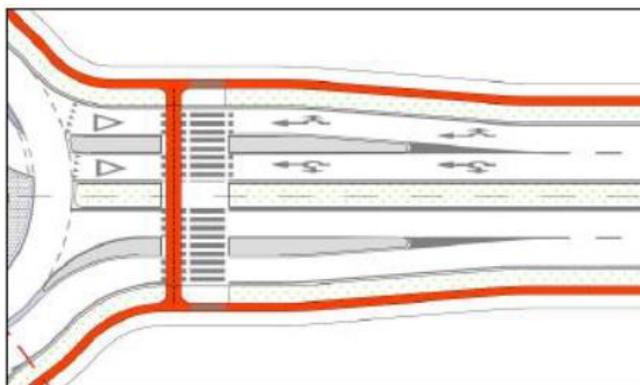


Fig. 77 Détails des îlots de protection pour les traversées cyclables et piétonnes [28].

Franchissement dénivelé

En cas de manque de place pour la mise en œuvre des îlots de protection et en cas de multiples voies d'entrée et de sortie du turbo-giratoire, la création d'un franchissement dénivelé, soit sous forme de passage supérieur ou de passage inférieur, est la solution recommandée. De plus, si la fréquentation cyclable et piétonne est très importante, dans les zones urbaines, à proximité de zone résidentielle, les passages inférieurs ou supérieurs consistent également en la meilleure solution.

Toutefois, il s'agira dans ce cas de vérifier que les lignes de désir sont suffisamment suivies afin d'éviter une sous-utilisation de ces franchissements dénivelés et une mise en danger d'usagers vulnérables traversant le turbo-giratoire sur des itinéraires non-sécurisés.

Ces franchissements dénivelés permettent également de ne pas engendrer de ralentissement des flux de circulation et n'engendre pas de diminution de capacité du turbo-giratoire.

Les normes VSS 40 246a [6] pour les passages inférieurs et VSS 40 247a [7] pour les passages supérieurs sont à respecter dans le cas de franchissements dénivelés. Elles définissent les conditions de mise en œuvre, la géométrie, la conception et les équipements de ces franchissements.

5.8.2 Trafic piétonnier

Les exigences de la norme VSS 40 241 - « Traversées à l'usage des piétons et des deux-roues légers – Passages piétons » [5] sont à respecter pour les traversées piétonnes des turbo-giratoires.

En zone urbaine, lorsqu'un cheminement passe dans le secteur d'un turbo-giratoire, les piétons doivent se situer hors de l'emprise du giratoire, sur un aménagement en site propre. Des traversées piétonnes peuvent être projetées pour autant qu'elles respectent les exigences ci-dessous.

Le passage pour piétons doit se trouver à une distance supérieure ou égale à 5m du bord de l'anneau de circulation. Il doit être accessible, réalisé avec une bordure de 30mm (vertical) ou 40mm de biais avec une largeur de 0.13 à 0.16m.

Un îlot de protection est à mettre en place entre les voies d'entrée et de sortie du turbo-giratoire, avec une largeur de 2.00m (1.50m au minimum).

Si deux voies de même sens doivent être traversées par les piétons, indépendamment de la largeur totale des voies et de la charge de trafic, un îlot doit être projeté entre les voies de même sens, de manière à garantir une visibilité suffisante (Fig. 77). Si la place est insuffisante pour construire cet îlot, la traversée devrait être remplacée par un passage inférieur ou supérieur ou être équipée de feux de circulation. Les feux de circulation améliorent la sécurité des piétons, mais péjorent la capacité du turbo-giratoire.

Les distances de visibilité sont à garantir en fonction de la vitesse en entrée et en sortie du turbo-giratoire, selon la norme VSS 40 241 [5].

Des aménagements identiques à ceux proposés au Chap. 5.8.1 pour le trafic cyclable peuvent être appliqués pour les traversées et cheminements piétons.

5.8.3 Cas d'étude

Dans les deux cas d'étude suisse, Glättimüli et Lavapesson, les piétons et cyclistes ont un itinéraire hors giratoire préconisé (Chap. 5.1).

5.9 Sécurité routière

De manière quasiment unanime, l'état de l'art (Chap. 2) sur les turbo-giratoires relève que ceux-ci apportent une amélioration notable de la sécurité routière comparativement aux giratoires conventionnels à nombre de voies à l'anneau équivalent. Cet aspect a

notamment convaincu certains pays à les adopter en lieu et place des giratoires conventionnels à deux voies à l'anneau.

5.9.1 Points de conflits

En matière de sécurité routière, l'objectif principal consiste à diminuer le nombre d'accidents et leur gravité. Dans n'importe quelle infrastructure routière, plus le nombre de points de conflit augmente, plus la probabilité de voir des accidents survenir est grande.

Dans un giratoire conventionnel, les principaux problèmes de sécurité routière sont liés au comportement inadéquat d'usagers à l'entrée, dans l'anneau et à la sortie du giratoire.

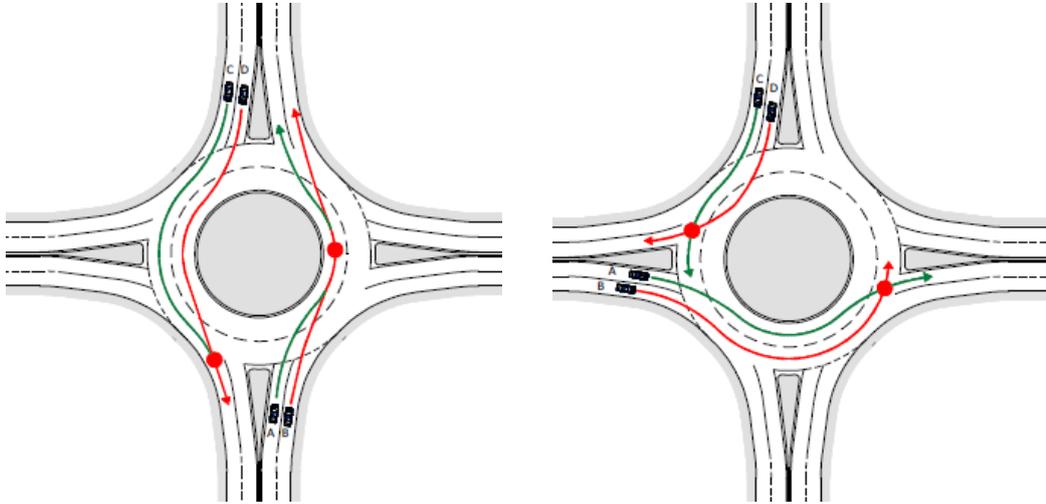


Fig. 78 Comportements inadéquats dans des giratoires conventionnels [19].

Les comportements inadéquats relevés dans les images précédentes sont généralement empêchés lors de l'aménagement de turbo-giratoires. En effet, un des points essentiels des turbo-giratoires consiste en le fait que les changements de voies à l'intérieur de l'anneau sont empêchés.

De cet état de fait, dans le cadre de turbo-giratoires, comparativement à des giratoires conventionnels à nombre de voies équivalent, le nombre de points de conflit est fortement réduit.

On considère, dans les giratoires, deux types de points de conflits :

- Des points d'entrecroisement, où les flux se séparent, se rejoignent ou s'entrecroisent (Fig. 79, points bleus) ;
- Des points de cisaillement, où les flux s'entrecoupent (Fig. 79, points rouges).

A noter ici, du fait des angles de collision entre les véhicules, la gravité des accidents sur les points de cisaillement est potentiellement plus importante que celle des points d'entrecroisement, d'où le code couleur rouge pour les points de cisaillement.

Lavapesson

La configuration du giratoire conventionnel à deux voies de circulation à l'anneau a été légèrement modifiée en sortie direction Morat (sortie située à gauche de l'image), du fait qu'en raison de la présence des travaux du Pont sur le Lavapesson, une seule voie de circulation était sur cette sortie.

Dans le cas où un giratoire quasi-conventionnel à deux voies avait été conservé durant cette phase de travaux, on constate que le nombre de points de conflits aurait été de 29. Avec la configuration en turbo-giratoire, le nombre de points de conflits a été réduit à 15 unités, soit une diminution de près de 50%, équivalente aux valeurs relevées dans la littérature (Chap. 2.5).

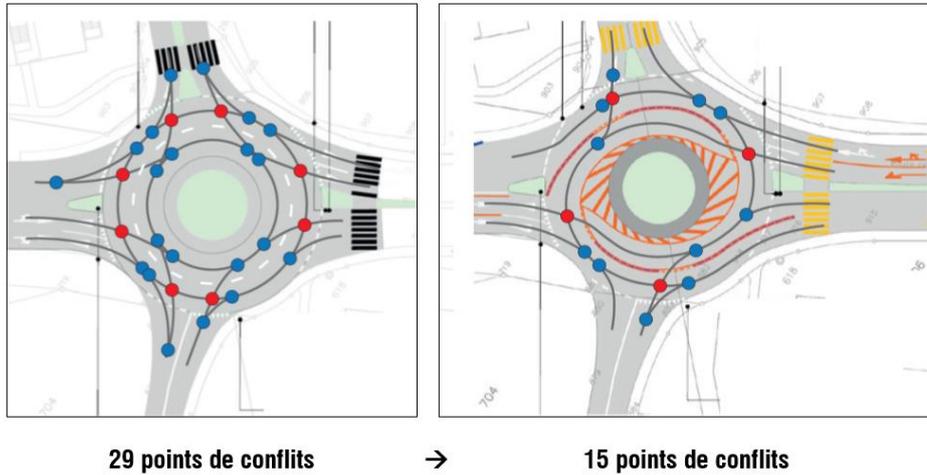


Fig. 79 Evolution des points de conflits – Giratoire quasi-conventionnel et turbo-giratoire partiel provisoire du Lavapesson.

Glättimülli

Le turbo-giratoire de Glättimülli présente un total de 15 points de conflits, contre 27 points de conflits s'il avait été aménagé en giratoire conventionnel à deux voies de circulation à l'anneau.

Conclusions

De manière générale, les turbo-giratoires permettent donc de réduire, par rapport aux giratoires conventionnels, de :

- ~50% le nombre de points de conflits ;
- ~50% individuellement le nombre de points de cisaillements et de points d'entrecroisements.

5.9.2 Vitesse

De par le fait de la géométrie en spirale et donc de la courbure de la trajectoire, la vitesse de circulation à l'entrée et à l'anneau d'un turbo-giratoire devrait être moins importante (respect des conditions de Fortuijn, Chap. 2.6) que dans le cas d'un giratoire conventionnel. Cela implique potentiellement des accidents de gravité moins importante (énergie cinétique dissipée moindre).

5.9.3 Pondération de l'impact positif sur la sécurité routière

Il est important de relever ici certains éléments qui pourraient, au contraire des effets bénéfiques constatés sur la sécurité routière par rapport aux giratoires conventionnels, apporter une diminution de la sécurité routière.

Premièrement, les angles d'entrée étant quasiment perpendiculaires, un véhicule entrant ne respectant pas la priorité sur un véhicule circulant à l'anneau provoquerait une collision sous un angle de près de 90°, alors que dans le cas de giratoires conventionnels, du fait de la déviation induite par l'îlot directionnel en entrée, cet angle est plus petit.

Ceci implique que lors d'une collision entre deux véhicules, en raison d'un angle proche de l'angle droit (cisaillement), la gravité du choc sera potentiellement plus élevée.

Deuxièmement, les accidents impliquant des deux-roues motorisés qui conduisent à des gravités d'accidents généralement plus importantes dans les giratoires conventionnels devront être minutieusement étudiés dans le cadre d'aménagement de turbo-giratoires.

En effet, si la séparation des voies de circulation à l'anneau empêche probablement des accidents avec ce mode de transport, le risque de perte de maîtrise et les dommages occasionnés par les séparateurs de voies physiques pourraient être plus importants.

Troisièmement, l'aménagement de turbo-giratoires pourrait péjorer la sécurité des usagers les plus vulnérables que sont les cyclistes et les piétons si leurs itinéraires à niveau sont conservés, dans la mesure où, la voie de circulation intérieure est plus utilisée dans le cas de turbo-giratoires (danger pour les piétons). Pour les cyclistes, ceux-ci se trouveront potentiellement sur cette voie intérieure et donc seront donc potentiellement plus vulnérables par rapport aux véhicules s'insérant dans le turbo-giratoire.

D'autre part, de façon identique aux deux-roues motorisés, les risques liés aux séparateurs de voies physiques pourraient également être plus importants. D'où la nécessité, pour ces catégories d'usagers, de prévoir des itinéraires hors turbo-giratoire (Chap. 5.7).

Finalement, si les voies ne sont pas séparées par des éléments physiques (séparateurs de voies, chap. 5.5.1), le nombre de points de conflits s'approche à nouveau de celui d'un giratoire conventionnel et les vitesses d'entrées et de circulation à l'anneau sont plus importantes de par le comportement inadéquat d'usagers (franchissement d'une ligne ou d'une double ligne continue). Un marquage de séparation de voies réduit donc potentiellement l'impact positif d'un turbo-giratoire sur la sécurité routière.

Lors de la mise en œuvre d'un turbo-giratoire, il est probable que des accidents surviennent en raison d'un manque d'habitude et de méconnaissance de ce type d'aménagement, d'autant plus qu'actuellement, en Suisse, on n'en trouve que très rarement. Pour faire face à ce point, des campagnes d'informations aux usagers peuvent avoir un effet favorable.

5.10 Synthèse

Un aménagement de turbo-giratoire est en concurrence directe avec un giratoire conventionnel à au moins deux voies à l'anneau. Les analyses menées dans le mandat de recherche permettent de définir les avantages et inconvénients d'un turbo-giratoire par rapport à un giratoire conventionnel, qui sont présentées ci-dessous.

Tab. 30 Avantages/inconvénients d'une variante en turbo-giratoire par rapport à un giratoire conventionnel

Éléments de base	Avantages	Inconvénients
Conditions d'implantation, localisation		Emprise légèrement plus importante avec des séparateurs de voies
Capacité, conditions de trafic	Augmentation de la capacité sur les flux principaux	Diminution potentielle de la capacité sur les flux secondaires En cas de modification importante des flux de trafic, une modification de l'aménagement peut être nécessaire
Géométrie	Position des îlots (piétons et cyclistes) en continuité des séparateurs de voies	Construction plus complexe Viabilité plus difficile pour des véhicules longs (attention particulière aux véhicules de transports publics) Demi-tour légèrement plus difficile depuis les entrées à une voie
Intégration des modes doux	Niveau de sécurité plus important (diminution des points de conflit)	Séparateurs de voies pouvant créer des chutes et blessures (2-roues)
Equipements		Signalisation verticale au-dessus des voies recommandée (choix de direction)
Sécurité routière	Diminution du nombre de points de conflit conséquent Amélioration du respect des trajectoires avec séparateurs de voies	

Coûts	Coûts plus élevés (investissement initial)
Entretien	Difficultés liées au service hivernal et à l'évacuation des eaux avec séparateurs de voies

Si en nombre la variante turbo-giratoire semble présenter plus d'inconvénients que d'avantages, il est à noter qu'aucune pondération n'est ici mise en œuvre. L'avantage déterminant d'un turbo-giratoire par rapport à un giratoire conventionnel étant le niveau de sécurité routière atteint grâce à la réduction du nombre de points de conflit, celui-ci peut, proportionnellement prédominer, lors d'une évaluation multicritères des différentes variantes d'aménagement.

6 Cartographie des turbo-giratoires

6.1 Méthode de choix de variante

En première approche, il convient d'évaluer tous les types d'aménagements possibles à réaliser sur une intersection, un croisement, à l'aide d'une analyse multicritères.

Dans le cas où un giratoire à plus d'une voie est retenu, un turbo-giratoire pourra être comparé à un giratoire conventionnel.

Nécessité d'un giratoire à deux voies

Le premier élément déterminant pour la mise en œuvre d'un turbo-giratoire est le dimensionnement en capacité d'un giratoire. Dans le cas où un giratoire à une voie à l'anneau garantit une capacité suffisante, un turbo-giratoire ne devrait pas être mis en œuvre. Par contre, dans le cas où un giratoire à deux voies est sollicité pour des questions de capacité, une variante en turbo-giratoire devrait être étudiée.

Evaluation d'un turbo-giratoire ou d'un giratoire conventionnel

Lors de l'évaluation en capacité d'une variante turbo-giratoire par rapport à une variante giratoire conventionnel, on préconise la démarche de la page suivante (Fig. 80). Pour les autres critères, on se basera sur les avantages et inconvénients des différentes variantes (Chap. 5.10), traitées sur la base d'une analyse multicritères.

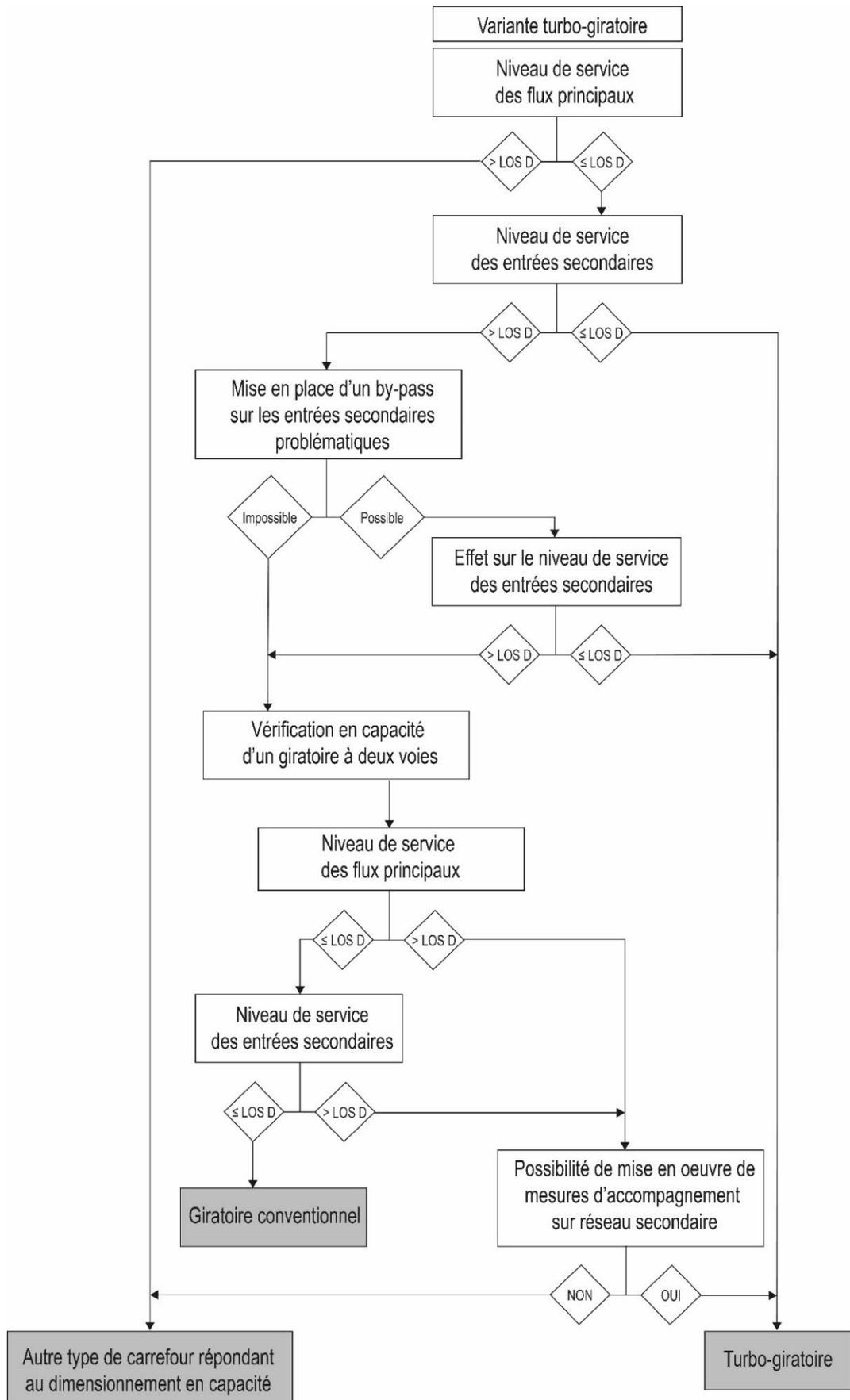


Fig. 80 Choix de variante de giratoire à deux voies en capacité.

6.2 Catalogue des turbo-giratoires

Le présent catalogue propose différentes typologies de turbo-giratoires qui pourraient être mises en œuvre en Suisse. Celles-ci sont issues d'aménagements réalisés aux Pays-Bas.

Le dimensionnement géométrique des turbo-giratoires doit être adaptée aux valeurs et configurations retenues pour la Suisse (voir chapitre 5.4). D'autres configurations, ajouts de voies, peuvent être étudiés, tout en conservant l'essence même d'un aménagement en turbo-giratoire.

3 branches

- Axe principal horizontal : 2 voies dont 1 bypassée
- Branche secondaire verticale : 2 voies entrantes, 1 voie sortante
- Remarques : gain en capacité pour la voie de droite sur l'axe principal, sans gêne au trafic ; possibilité de rabattre l'axe principal à 1 voie après le turbo-giratoire



Fig. 81 Turbo-giratoire à 3 branches avec by-pass, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

- Axe principal horizontal : 2 voies entrantes, 2 voies sortantes
- Branche secondaire verticale : 2 voies entrantes, 1 voie sortante



Fig. 82 Turbo-giratoire à 3 branches, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

4 branches

- Branches horizontales : 2 voies entrantes, 1 voie sortante
- Branches verticales : 1 voie entrante, 1 voie sortante
- Axe principal horizontal avec tourne-à-droite important



Fig. 83 Turbo-giratoire à 4 branches, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

- Axe principal horizontal : direction 1 : 2 voies entrantes, 2 voies sortantes ; direction 2 : 2 voies entrantes, 1 voie sortante, avec tourne-à-droite important
- Branches secondaires verticale : 1 voie entrante, 1 voie sortante



Fig. 84 Turbo-giratoire à 4 branches, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

- Axe principal horizontal : 2 voies entrantes, 2 voies sortantes
- Branches secondaires verticales : 1 voie entrante, 1 voie sortante

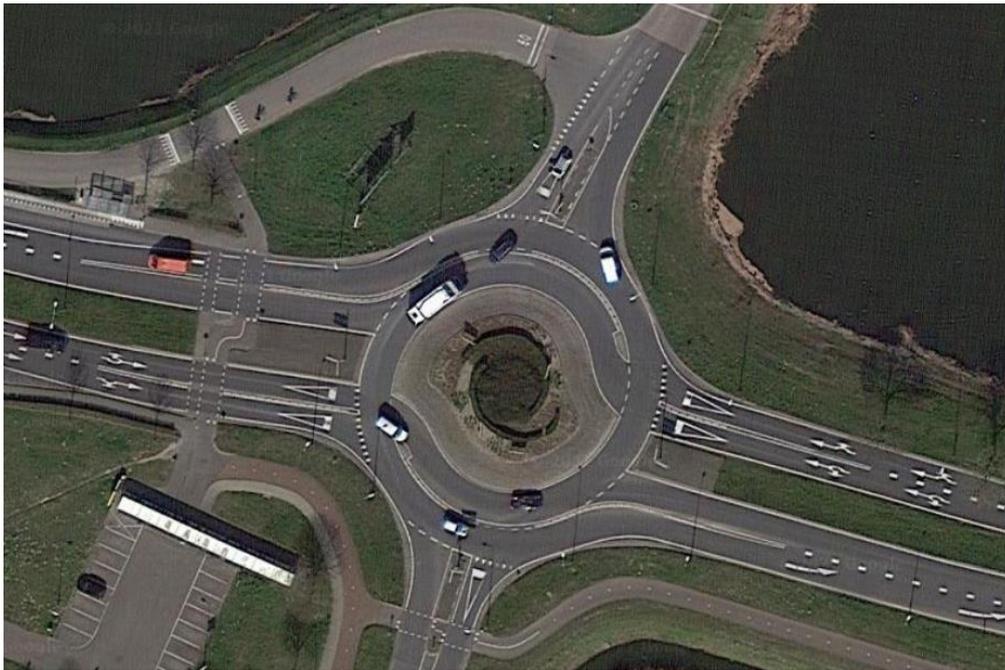


Fig. 85 Turbo-giratoire à 4 branches, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

- Axe principal horizontal : 2 voies entrantes, 2 voies sortantes
- Branches secondaires verticales : direction 1 : 2 voies entrantes, 1 voie sortante ; direction 2 : 1 voie entrante, 1 voie sortante



Fig. 86 Turbo-giratoire à 4 branches, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

- Axe principal horizontal : 2 voies entrantes, 2 voies sortantes
- Branches secondaires verticales : 2 voie entrantes, 1 voie sortante
- Possibilité de bypass des voies en tourner-à-droite sur l'axe principal, possibilité de rabattement à 1 voie en sortie de turbo-giratoire sur l'axe principal



Fig. 87 Turbo-giratoire à 4 branches avec by-pass, Zoetermeer, Pays-Bas, Google Maps, 2021.

6.3 Éléments de turbo-giratoires, équipements, recommandations

Dimensionnement en capacité

Il est recommandé d'utiliser la nouvelle méthode de dimensionnement en capacité proposée (Chap. 5.2.8 et suivants). Celle-ci devra être consolidée sur la base des monitorings de nouveaux aménagements de turbo-giratoires.

Dans l'attente de l'intégration de cette méthode à des moyens informatiques, actuellement, la méthode du logiciel Kreisell qui s'approche au mieux des résultats escomptés est celle de Crow.

Des simulations de trafic peuvent être menées. Celles-ci offrent généralement les meilleurs résultats par rapport aux constatations effectuées sur la base des relevés in-situ. Toutefois, elles nécessitent des compétences spécifiques en la matière.

Dimensionnement géométrique

Il est recommandé de respecter, au mieux, les conditions établies par Fortuijn (Chap. 5.3.1). Pour le dimensionnement du profil géométrique, une vitesse de 25km/h – 30km/h peut être retenue.

Pour la détermination de la viabilité (girations), des vitesses de 20km/h peuvent être pratiquées. Il est possible de diminuer cette vitesse afin d'obtenir un turbo-giratoire de diamètre inférieur. Toutefois, cela nécessite de convenablement planifier et dimensionner les zones semi-franchissables par les véhicules longs de même que les séparateurs de voies. Une attention particulière doit être portée sur les girations des véhicules de transports publics (bus) de même qu'aux engins de déneigement et d'entretien.

D'autres recommandations sont énumérées dans les chapitres 5.3 et suivants. Celles-ci peuvent parfois diverger par rapport aux conditions normatives appliquées par analogie aux giratoires conventionnels à deux voies de circulation à l'anneau.

La mise en application de la méthode de dimensionnement géométrique adaptée au cas suisse en préconisée (Turbo-blocs, Chap. 5.4).

Séparateurs de voies

Afin de garantir la séparation des voies de circulation à l'anneau, il est conseillé de mettre en œuvre des séparateurs de voies. Dans certains cas, ceux-ci devront être évités et notamment :

- En présence d'un fort flux cycliste à travers le turbo-giratoire ;
- En cas de difficultés d'entretien hivernal ;
- En cas de difficultés d'évacuation des eaux.

Solution pour palier à ces cas spécifiques, la mise en œuvre de marquage en lieu et place de séparateurs de voies augmente toutefois les mauvais comportements à l'intérieur du turbo-giratoire et péjore potentiellement l'aspect de sécurité routière.

Pour fonction de séparateur de voie, une bordure type turbo-giratoire est proposée (Chap. 5.5.1).

Signalisation horizontale

La signalisation horizontale à mettre en œuvre est renseignée au Chap. 5.5.2.

Signalisation verticale

Il est recommandé de mettre en œuvre les signaux OSR 2.41.1, OSR 3.02 et OSR 4.54 ainsi que des indicateurs de direction sur les îlots directionnels. Le positionnement de la signalisation doit être étudié avec attention (gabarit d'espace libre, obstacle, vérification des girations).

Eclairage public

La mise en œuvre d'un éclairage public est identique aux configurations retenues pour les giratoires conventionnels.

Evacuation des eaux

En raison de la présence des séparateurs de voies, le cheminement de l'évacuation des eaux doit être réfléchi et dimensionné avec attention (Chap. 5.6.1).

Entretien hivernal

Les séparateurs de voies peuvent poser des difficultés à l'entretien hivernal. Toutefois, si les dimensions des engins de déneigement sont considérées lors de l'élaboration géométrique de l'aménagement, cette problématique est réduite.

Le gain fonctionnel et sécuritaire offert par les séparateurs de voies l'emporte sur les désagréments liés à l'entretien hivernal, pour autant que celui-ci ne soit pas trop important.

Comportement des usagers

La non-prise en compte de certains paramètres de dimensionnement géométrique ou de recommandations d'équipements induisant potentiellement un comportement erroné des usagers doit être mesurée et appréciée.

Il est à noter, que par le faible nombre d'aménagements de turbo-giratoires en Suisse, l'adaptation des comportements vis-à-vis de ces spécificités peut prendre un certain temps. Des campagnes d'information, lors de la mise en œuvre d'un tel aménagement, sont donc recommandées.

Modes doux

Si le turbo-giratoire est situé dans un environnement où les modes doux sont fortement représentés, il est recommandé de projeter tant que possible un aménagement dédié à la mobilité douce hors giratoire (Chap. 5.8). Si toutefois les flux doivent être conservés à

l'intérieur d'un turbo-giratoire, à comparaison égale à un giratoire conventionnel, le turbo-giratoire ne péjore pas la situation des modes doux.

Sécurité routière

De par la diminution du nombre de points de conflits par rapport à un giratoire conventionnel équivalent, le turbo-giratoire offre un avantage indéniable du point de vue de la sécurité routière.

7 Recommandations en vue d'une normalisation

Il s'agit de déterminer si des compléments doivent être apportés aux normes actuelles et ensuite, de définir s'ils sont à intégrer dans la norme correspondante ou si une nouvelle norme propre à la conception d'un turbo-giratoire devrait être élaborée.

Le tableau ci-dessous mentionne les principales normes qui traitent des différentes thématiques concernant la conception d'un turbo-giratoire, la liste n'est pas exhaustive et n'intègre pas l'aspect légal.

Trois niveaux d'appréciation ont été définis :

- Non applicable au turbo-giratoire = l'utilisation de la norme n'est pas pertinente ;
- Complément à ajouter = la norme comporte des éléments utilisables mais est incomplète ;
- Ne nécessite pas de complément = les éléments de la norme sont utilisables en l'état.

Tab. 31 Normes impactées par la conception de turbo-giratoires

Thématique	Normes	Compléments aux normes
Capacité	VSS 40 024a « Capacité, niveau service, Charges compatibles : carrefour giratoire » 03-2019 <i>Indication pour le dimensionnement d'un giratoire avec une voie à l'anneau et îlot central infranchissable</i>	Cette norme ne s'applique pas aux giratoires avec deux voies sur l'anneau marquées ⇒ Non applicable au turbo-giratoire
Aspects géométriques (Entrée, sortie, anneau, îlot, voie)	VSS 40 251 « Carrefours : Eléments de Carrefours » 06-2019 [8] <i>Indication sur les éléments nécessaires à la conception des carrefours</i>	Cette norme précise la distinction d'un giratoire sans et avec entrecroisement. ⇒ Ne nécessite pas de complément
	VSS 40 262 « Carrefours : Carrefours à niveau (non giratoire) » 12-2020 [10] <i>Indication sur les détails géométriques des éléments de carrefours</i>	Cette norme précise notamment les gabarits des voies, l'aménagement des présélections et différents types d'îlots. ⇒ Ne nécessite pas de complément
	VSS 40 263 « Carrefours giratoires » 06-2019 [11] <i>Indication sur la disposition géométrique, le dimensionnement et l'utilisation des éléments de projets ainsi que sur la conception des carrefours giratoires</i>	Cette norme permet d'avoir une vision des éléments à traiter pour la conception d'un giratoire d \leq 40m. Elle peut être appliquée par analogie aux giratoires à plusieurs voies. ⇒ Nouvelle norme préconisée pour les étapes de mise en œuvre et les caractéristiques géométriques d'un turbo-giratoire
	VSS 40 271a « Vérification de la viabilité » 03-2019 [12] <i>Indication sur les courbes tractées des poids lourds</i>	Cette norme permet de contrôler la viabilité des projets routiers. ⇒ Ne nécessite pas de complément
Distance de visibilité (Visibilité d'arrêt et dans les carrefours)	VSS 40 263 « Carrefours giratoires » 06-2019 [11] <i>Indication sur la disposition géométrique, le dimensionnement et l'utilisation des éléments de projets ainsi que sur la conception des carrefours giratoires</i>	Cette norme renvoie aux normes VSS 40 090b « Projets bases ; distance de visibilité » [4] et VSS 40 273a « Carrefours ; conditions de visibilité dans les carrefours à niveau » [13] ⇒ Ne nécessite pas de complément
Signalisation (Horizontale verticale) et	SN 640 850a « Marquages aspects et domaines d'application » 02-2005 [15] Indication sur les aspects des différents marquages sur la base de la LCR [1] et de l'OCR [2].	Cette norme indique les différents marquages non particuliers comme les flèches. ⇒ Ne nécessite pas de complément
	VSS 40 851 « Marques particulières : domaines d'application, formes et dimensions » 01-2021 [16] Indication pour l'application et les détails techniques des marques particulières	Cette norme ne s'applique pas aux routes à orientation trafic. ⇒ Non applicable au turbo-giratoire

	VSS 40 862 « Marquages : application pour routes principales et secondaires » 02-2021 [17] <i>Indication sur l'application des marquages</i>	Cette norme illustre la combinaison des éléments selon la situation. Elle n'a pas pour but d'être exhaustive. ⇒ Ne nécessite pas de complément
	VSS 40 847 « Signaux routiers : disposition aux carrefours à sens giratoire » 04-2021 [14] <i>Indication pour la disposition des signaux</i>	Cette norme indique les signaux de police et directionnel. ⇒ Complément sur les détails techniques des panneaux avancés à ajouter
Modes doux	VSS 40 241 « Traversées à l'usage des piétons et 2RL : Passage piétons » 03-2019 [5] <i>Indication pour sur les exigences d'un passage piéton et sa mise en œuvre</i>	Cette norme indique les distances de visibilité nécessaires, les détails d'aménagements et de signalisation pour un passage piétons. ⇒ Ne nécessite pas de complément
	VSS 40 252 « Carrefours : Gestion des cycles » 03-2019 [9] <i>Indication pour les aménagements cyclables dans les carrefours.</i>	Cette norme indique les gabarits et principes d'aménagement aux grands giratoire. ⇒ Ne nécessite pas de complément
Sécurité routière (Séparateurs de voie)	Pas de norme spécifique.	La question de la mise en place de bordures type turbo-giratoire (séparateurs de voies) tient compte de la localisation (problématique de déneigement), évacuation des eaux, lignes de bus.

Il résulte de l'analyse un manque dans les normes existantes sur les aspects suivants :

- 1) Le dimensionnement en capacité des turbo-giratoires ;
- 2) Les étapes de construction et les caractéristiques géométriques d'un turbo-giratoire ;
- 3) Sur les détails de signalisation des panneaux directionnels avancés pour la répartition du trafic.

Ces points peuvent être traités de la manière suivante :

- Le point 1 : Réalisation d'une nouvelle norme propre aux turbo-giratoires ;
- Le point 2 : Réalisation d'une nouvelle norme propre aux turbo-giratoires (y.c. informations sur les équipements spécifiques notamment séparateurs de voies) ;
- Le point 3 : Ajout d'un paragraphe complémentaire accompagné d'une illustration dans les normes SN 640 850a [15] pour le marquage et VSS 40 847 [14] pour les panneaux directionnels avancés.

De plus, dans la nouvelle norme de base de l'analyse d'un carrefour, qui précisera la démarche pour aboutir à la solution d'aménagement optimum par rapport aux besoins d'un carrefour, la solution de turbo-giratoire devra être intégrée.

Recommandations

La conception de turbo-giratoire nécessite des éléments précis selon les caractéristiques propres à ce type de carrefours et à son utilité. De nombreux éléments sont présents dans les normes en vigueur pour concevoir un giratoire à une voie et par analogie à plusieurs voies mais des indications complémentaires sont nécessaires. Ces éléments complémentaires ne sont pas nombreux et il est pertinent de les intégrer dans des normes existantes par l'ajout d'un chapitre ou d'un paragraphe.

Toutefois, de nouvelles normes sur le dimensionnement en capacité d'un turbo-giratoire voire une norme étendue sur le domaine des giratoires à deux voies sur l'anneau, de même qu'une norme sur le dimensionnement, la conception géométrique et l'aménagement de turbo-giratoires devraient être élaborées.

8 Conclusions et recommandations

8.1 Conclusions

Le mandat de recherche a permis de mieux connaître les particularités d'un turbo-giratoire et d'identifier clairement les avantages et inconvénients d'un tel aménagement, par rapport à un giratoire conventionnel à deux voies à l'anneau.

Les avantages principaux sont :

- Une amélioration notable de la sécurité par réduction des points de conflits et un meilleur guidage des flux dans l'anneau ;
- Une augmentation de la capacité sur les flux principaux (meilleure utilisation de la voie intérieure) ;
- La possibilité de réaliser des passages piétons avec îlot intermédiaire sur les branches d'entrée et de sortie à deux voies du giratoire, dans le prolongement de la séparation des flux.

Les inconvénients principaux sont :

- Une potentielle diminution de la capacité et augmentation des temps d'attente sur les flux secondaires ;
- Des mouvements de demi-tour légèrement plus compliqués depuis une entrée à une voie ;
- Des emprises supplémentaires (diamètre 40m) si des bordures de séparation des flux sont intégrées et qu'une vitesse de viabilité de 20km/h est envisagée pour les semi-remorques et les camions avec remorques ;
- Des difficultés ou des complications liées à l'entretien et au déneigement en présence de séparateurs de voies, notamment dans des régions avec un fort enneigement ;
- Une typologie d'aménagement moins adaptative en cas de modification des régimes de circulation.

Le mandat de recherche contient un descriptif clair et complet de tous les éléments à prendre en compte lors de la planification, la conception et le dimensionnement d'un turbo-giratoire, à savoir :

- Une cartographie des différents types de turbo-giratoire ;
- Une méthode de dimensionnement géométrique ;
- Une proposition de critères pour différencier les turbo-giratoires, les turbo-giratoires partiels et presque-turbos, car on constate qu'une application stricte de toutes les conditions édictées au niveau international pour un turbo-giratoire ne sont pas toujours réalisables et réalistes pour une application en Suisse ;
- Une nouvelle méthode d'évaluation de la capacité et des niveaux de service, qui permet de tenir compte des différentes typologies ;
- Des propositions concrètes pour tous les équipements nécessaires au turbo-giratoire (séparateurs de voies conseillés, signalisation verticale et horizontale, éclairage public, évacuation des eaux) ;
- Des recommandations pour la circulation des modes doux et l'entretien hivernal.

8.2 Recommandations

Sur la base de l'expérience internationale et des premiers essais réalisés en Suisse (Glättimüli, Lavapesson, Lenzburg, ...), il est recommandé dès aujourd'hui d'intégrer la solution de turbo-giratoire lors de l'évaluation d'un giratoire à deux voies à l'anneau, en comparaison avec un giratoire conventionnel. Il est fort probable que la solution turbo-giratoire soit régulièrement retenue. En attendant le complément des normes, l'utilisation des résultats et des recommandations de ce mandat de recherche permettent une conception uniforme et appropriée en Suisse. Il est aussi important de prévoir une bonne campagne d'information aux usagers, afin qu'ils comprennent comment utiliser

judicieusement ce nouvel aménagement. Cette campagne doit être locale, voire, à un certain moment, nationale.

Il est aussi recommandé d'établir des nouvelles normes (capacité et niveau de service, géométrie) et d'en adapter certaines (signalisation verticale) aussi vite que possible et aussi lentement que nécessaire. Cette base normative est absolument nécessaire à une planification, une conception et un dimensionnement judicieux et homogène des turbo-giratoires en Suisse.

8.3 Propositions de recherches ultérieures

Si le mandat de recherche permet d'établir une base normative pour la planification, la conception et le dimensionnement des turbo-giratoires, il est important de garder à l'esprit que des ajustements ou des validations de certains éléments seront nécessaires sur la base des expériences futures réalisées en Suisse.

A ce stade, nous identifions les éléments suivants qui devront être auscultés de manière plus approfondie :

- La méthode de dimensionnement géométrique ;
- La nouvelle méthode d'évaluation de la capacité et des niveaux de service ;
- L'efficacité et les avantages/inconvénients des séparateurs de voies.

Annexes

I	Note de dimensionnement – Logiciel Kreisel	121
I.1	Introduction	121
I.1.1	Analyse des différentes méthodes	121
I.2	Glättimüli	123
I.2.1	Méthode de calcul allemande : Turbo-Kreisverkehr 2015	123
I.2.2	Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Rotonde, Crow 2008.....	124
I.2.3	Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Roundabout, Fortuijn 2007	125
I.2.4	Méthode de calcul américaine : HCM 2010.....	126
I.3	Lavapesson.....	127
I.3.1	Méthode de calcul allemande : Turbo-Kreisverkehr 2015	127
I.3.2	Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Rotonde, Crow 2008.....	128
I.3.3	Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Roundabout, Fortuijn 2007	129
I.3.4	Méthode de calcul américaine : HCM 2010.....	130
II	Turbo-giratoire diamètre 36m	131
II.1	Giratoire à 4 branches.....	131

I Note de dimensionnement – Logiciel Kreisel

I.1 Introduction

Cette note a pour but de recommander la méthode la plus appropriée pour dimensionner un turbo-giratoire avec le logiciel Kreisel, dans sa version 8.1.7.

Ces méthodes sont au nombre de quatre :

- Turbo-Kreisverkehr 2015 (allemande) ;
- Turbo-Rotonde, Crow 2008 (néerlandaise) ;
- Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007 (néerlandaise) ;
- HCM 2010 (américaine).

L'évaluation de ces différentes méthodes de calcul est basée sur l'analyse des turbo-giratoires de Glättimüli à Thoun et du Lavapesson à Fribourg.

I.1.1 Analyse des différentes méthodes

L'analyse des différentes méthodes porte sur les critères suivants :

- Permet de modéliser l'affectation des voies du turbo-giratoire : **OUI/NON**

Est-il possible de représenter la réalité du terrain avec la méthode de calcul (nombre de voies d'entrée / sorties / anneau ; type de turbo-giratoire) ?

- Répartition possible des charges de trafic par voies d'entrée : **OUI/NON**

Est-il possible de modifier la répartition des charges de trafic sur les voies d'entrées (gauche / droite) des branches du giratoire ?

- Répartition possible des charges de trafic des charges par voies de sortie : **OUI/NON**

Est-il possible de modifier la répartition des charges de trafic sur les voies de sortie (gauche / droite) des branches du giratoire ?

- Niveau de service : Présentation des niveaux de service et détermination de la capacité utilisée.

Verkehrsqualitätsstufen für den Individualverkehr an Knoten mit Kreisverkehr gemäss [12] Degrés du niveau de service du trafic individuel pour des carrefours giratoires selon [12]				
Verkehrsqualitätsstufe Degré du niveau de service	Verkehrsqualität Niveau de service	Verkehrsablauf Ecoulement de la circulation	Merkmale Caractéristiques	Mittlere Wartezeit Temps d'attente moyen [s]
A	Sehr gut Très bon	Nahezu ungehindert A peu près sans gêne	Mehrzahl der Motorfahrzeuge ohne Wartezeit (nur etwa 5 s Orientierungszeit); kein Rückstau Pas de temps d'attente pour la majorité des véhicules automobiles (seulement environ 5 s de temps d'orientation); aucune file d'attente	≤ 10
B	Gut Bon	Nur in geringem Mass behindert Seulement faiblement gênés	Wartezeit hinnehmbar; kaum Rückstau Temps d'attente acceptables; guère de files d'attente	≤ 20
C	Zufriedenstellend Satisfaisant	Häufige Beeinflussung durch vortrittsberechtigte Motorfahrzeuge Influence fréquente des véhicules automobiles prioritaires	Wartezeiten wachsen spürbar an; kleinerer Rückstau Augmentation sensible des temps d'attente; petites files d'attente	≤ 30
D	Ausreichend Suffisant	Alle Motorfahrzeuge müssen Behinderungen hinnehmen Tous les véhicules automobiles doivent supporter des gênes	Z. T. hohe Wartezeiten für einzelne Motorfahrzeuge; vorübergehend längerer Rückstau, der abgebaut werden kann Temps d'attente partiellement élevés pour certains véhicules automobiles; longues files d'attente temporaires qui peuvent se résorber	≤ 45
E	Mangelhaft Insuffisant	Ständige Behinderungen mit zeitweiliger Überlastung Gênes permanentes avec surcharge temporaire	Sehr lange und stark streuende Wartezeiten; kein Abbau des z. T. sehr langen Rückstaus Temps d'attente très longs et fortement variables; pas de diminution des files d'attente en partie très longues	> 45
F	Völlig ungenügend Totalemt insuffisant	Überlastung während ganzer Stunde (Zufluss grösser als Kapazität) Débit excédentaire de la durée d'une heure (flux d'entrée supérieur à la capacité)	Sehr lange Wartezeiten; kein Abbau des sehr langen Rückstaus Temps d'attente très longs; pas de diminution des très longues files d'attente	Keine Angabe Aucune indication

Fig. 88 Niveaux de service pour des carrefours giratoires, norme VSS 40 024a (2019-03).

Level of Service	Control Delay (s/veh)
A	0–10
B	> 10–15
C	> 15–25
D	> 25–35
E	> 35–50
F	> 50

Fig. 89 Niveaux de service pour des carrefours giratoires, méthode HCM (extrait de la documentation du logiciel Kreisel).

Temps d'attente

A l'aide du logiciel Data From Sky, les temps d'attente moyens réels sont illustrés par des zones colorées qui correspondent aux seuls véhicules effectuant un arrêt. L'analyse est basée sur une période de 20 minutes.

Cela permet d'évaluer le niveau de service réel de manière sommaire et probablement surévaluée.

I.2.2 Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Rotonde, Crow 2008

- 1. Permet de modéliser l'affectation des voies du turbo-giratoire : OUI
- 2. Répartition des charges par voies d'entrée : NON
- 3. Répartition des charges par voies de sortie : NON
- 4. Niveau de service A

Entrées	Sorties						Total
	A6 ouest 1	A6 ouest 2	Kleine	A6 est 1	A6 est 2	Aarefeld	
A6 ouest 1	0	0	225	265	0	0	490
A6 ouest 2	5	0	0	30	210	20	265
Kleine 1	0	0	0	230	0	0	230
Kleine 2	195	105	0	0	90	15	405
A6 est 1	400	5	0	0	0	10	415
A6 est 2	5	185	345	0	5	0	540
Aarefeld	25	0	20	5	0	0	50
total	630	295	590	530	305	45	2395
	925			835			

		A6 ouest	Kleine	A6 est	Aarefeld
en amont	droit	930	895	625	950
en amont	gauche	380	240	555	350
sortie	droit	930	590	625	45
sortie	gauche	0	0	215	0
mouve. princ.	droit	380	305	340	905
mouve. princ.	gauche	0	240	0	350
entrée	droit	515	320	610	25
entrée	gauche	240	315	350	30
en aval	droit	895	625	950	930
en aval	gauche	240	555	350	380

Fig. 93 Glättimüli – Répartition des charges par voies – Crow 2008.



Fig. 94 Glättimüli – Modélisation de l'affectation des voies – Crow 2008.

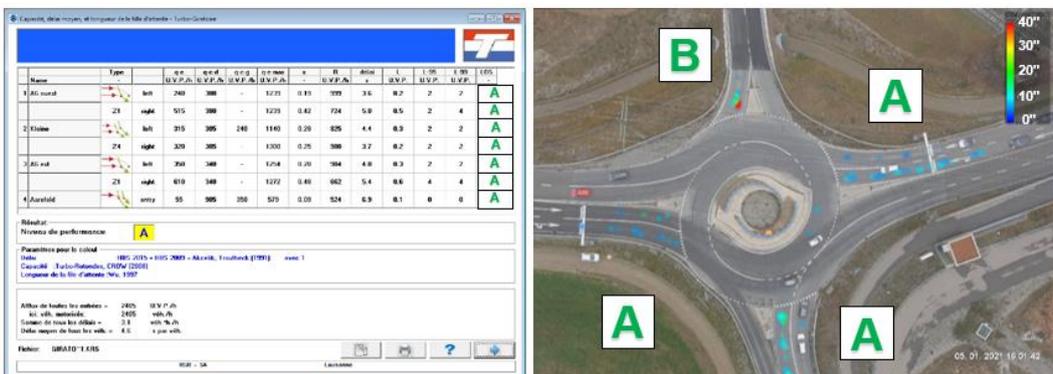


Fig. 95 Glättimüli – Niveau de service – Crow 2008.

I.2.3 Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Roundabout, Fortuijn 2007

1. Permet de modéliser l'affectation des voies du turbo-giratoire : NON
2. Répartition des charges par voies d'entrée : OUI / NON
3. Répartition des charges par voies de sortie : NON
4. Niveau de service B

Entrées	Sorties						Total
	A6 ouest 1	A6 ouest 2	Kleine	A6 est 1	A6 est 2	Aarefeld	
A6 ouest 1	0	0	225	265	0	0	490
A6 ouest 2	5	0	0	30	210	20	265
Kleine 1	0	0	0	230	0	0	230
Kleine 2	195	105	0	0	90	15	405
A6 est 1	400	5	0	0	0	10	415
A6 est 2	5	185	345	0	5	0	540
Aarefeld	25	0	20	5	0	0	50
total	630	295	590	530	305	45	2395

		A6 ouest	Kleine	A6 est	Aarefeld
en amont	droit	858	878	608	878
en amont	gauche	452	257	572	422
sortie 3	droit	858	590	608	45
sortie 3	gauche	72	0	232	0
mouve. princ.	droit	380	288	340	833
mouve. princ.	gauche	0	257	0	422
entrée 2	droit	498	320	538	25
entrée 2	gauche	257	315	422	30
en aval	droit	878	608	878	858
en aval	gauche	257	572	422	452

Fig. 96 Glättimüli – Répartition des charges par voies – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007.

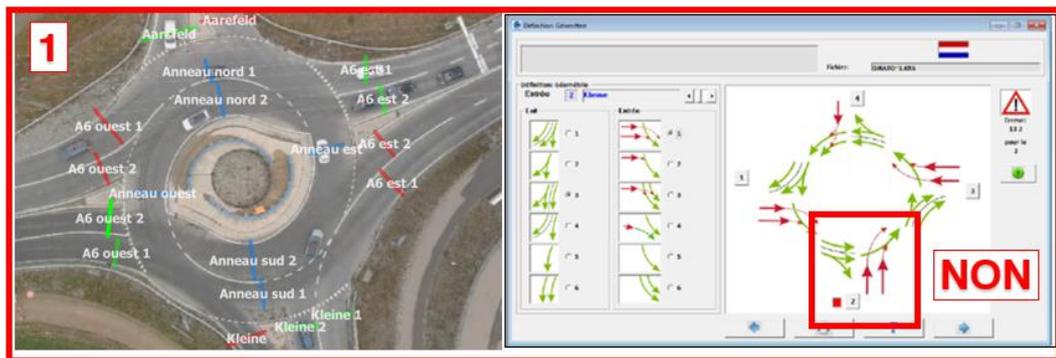


Fig. 97 Glättimüli – Modélisation de l'affectation des voies – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007.

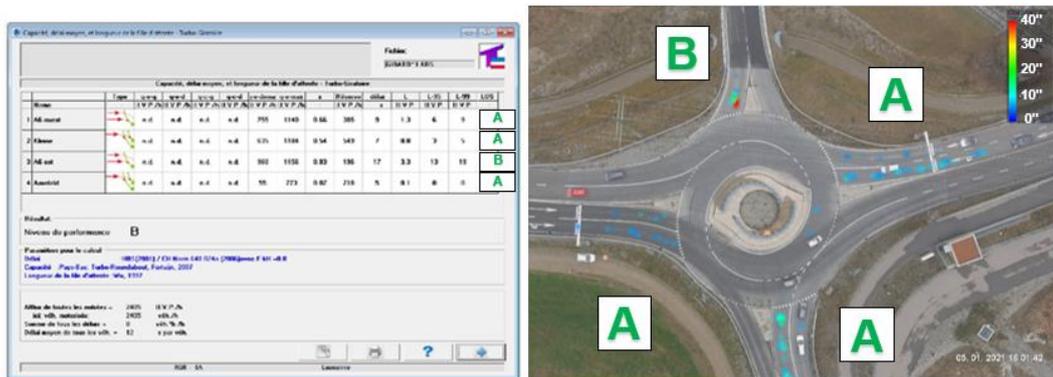


Fig. 98 Glättimüli – Niveau de service – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007.

I.3 Lavapesson

I.3.1 Méthode de calcul allemande : Turbo-Kreisverkehr 2015

- 1. Permet de modéliser l'affectation des voies du turbo-giratoire : OUI
- 2. Répartition des charges par voies d'entrée : NON
- 3. Répartition des charges par voies de sortie : NON
- 4. Niveau de service D

Entrées	Sorties					Total	Total
	A12	Vieux	Fr 1	Fr 2	Lac		
A12 1	5	25	695	5	0	730	1525
A12 2	355	0	5	320	115	795	
Vieux	65	0	30	0	0	95	895
Fr 1	645	0	0	0	5	650	
Fr 2	110	15	70	50	0	245	
Lac	180	0	15	10	0	205	
total	1360	40	815	385	120	2720	
			1200				

		A12	Vieux	Fribourg	Lac
en amont	droit	1360	1139	1129	1300
en amont	gauche	160	546	611	135
sort	droit	1360	40	1129	120
sort	gauche	0	0	71	0
mouve. princ.	droit	160	1099	540	1160
mouve. princ.	gauche	0	546	0	135
enti	droit	979	30	760	180
enti	gauche	546	65	135	25
en aval	droit	1139	1129	1300	1360
en aval	gauche	546	611	135	160

Fig. 102 Lavapesson – Répartition des charges par voies – Turbo-Kreisverkehr 2015.

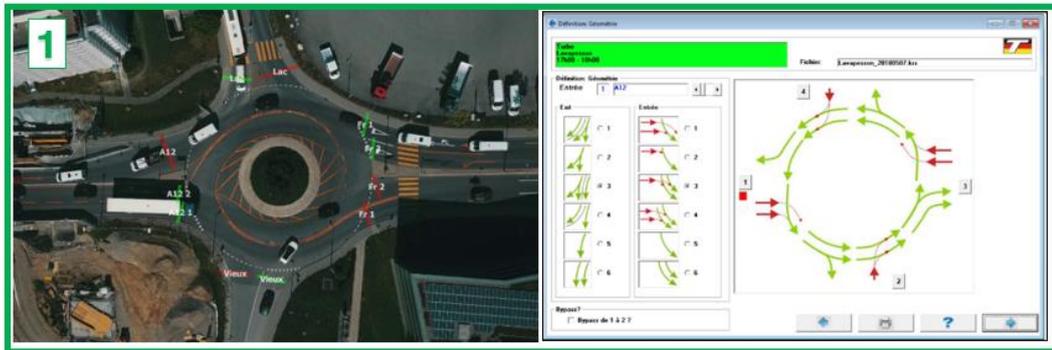


Fig. 103 Lavapesson – Modélisation de l'affectation des voies – Turbo-Kreisverkehr 2015.



Fig. 104 Lavapesson – Niveau de service – Turbo-Kreisverkehr 2015.

I.3.3 Méthode de calcul hollandaise : Turbo-Roundabout, Fortuijn 2007

1. Permet de modéliser l'affectation des voies du turbo-giratoire : OUI
2. Répartition des charges par voies d'entrée : OUI / NON
3. Répartition des charges par voies de sortie : NON
4. Niveau de service F

Entrées	Sorties					Total	Total
	A12	Vieux	Fr 1	Fr 2	Lac		
A12 1	5	25	695	5	0	730	1525
A12 2	355	0	5	320	115	795	
Vieux	65	0	30	0	0	95	895
Fr 1	645	0	0	0	5	650	
Fr 2	110	15	70	50	0	245	
Lac	180	0	15	10	0	205	2720
total	1360	40	815	385	1200		

		A12	Vieux	Fribourg	Lac
en amont	droit	1360	892	882	1300
en amont	gauche	160	793	858	135
sortie	droit	1360	40	882	120
sortie	gauche	0	0	318	0
mouve. princ.	droit	160	852	540	1180
mouve. princ.	gauche	0	793	0	135
entrée	droit	732	30	760	180
entrée	gauche	793	65	135	25
en aval	droit	892	882	1300	1360
en aval	gauche	793	858	135	160

Fig. 108 Lavapesson – Répartition des charges par voies – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007.



Fig. 109 Lavapesson – Modélisation de l'affectation des voies – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007.



Fig. 110 Lavapesson – Niveau de service – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007.

I.3.4 Méthode de calcul américaine : HCM 2010

- 1. Permet de modéliser l'affectation des voies du turbo-giratoire : OUI
- 2. Répartition des charges par voies d'entrée : NON
- 3. Répartition des charges par voies de sortie : NON
- 4. Niveau de service : F

Entrées	Sorties					Total	
	A12	Vieux	Fr 1	Fr 2	Lac		
A12 1	5	25	695	5	0	730	1525
A12 2	355	0	5	320	115	795	
Vieux	65	0	30	0	0	95	895
Fr 1	645	0	0	0	5	650	
Fr 2	110	15	70	50	0	245	205
Lac	180	0	15	10	0	205	
total	1360	40	815	385	120	2720	

		A12	Vieux	Fribourg	Lac
en amont	droit	1360	1139	1129	1300
en amont	gauche	160	546	611	135
sortie 3	droit	1360	40	1129	120
sortie 3	gauche	0	0	71	0
mouve. princ.	droit	160	1099	540	1180
mouve. princ.	gauche	0	546	0	135
entrée 2	droit	979	30	760	180
entrée 2	gauche	546	65	135	25
en aval	droit	1139	1129	1300	1360
en aval	gauche	546	611	135	160

Fig. 111 Lavapesson – Répartition des charges par voies – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007



Fig. 112 Lavapesson – Modélisation de l'affectation des voies – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007

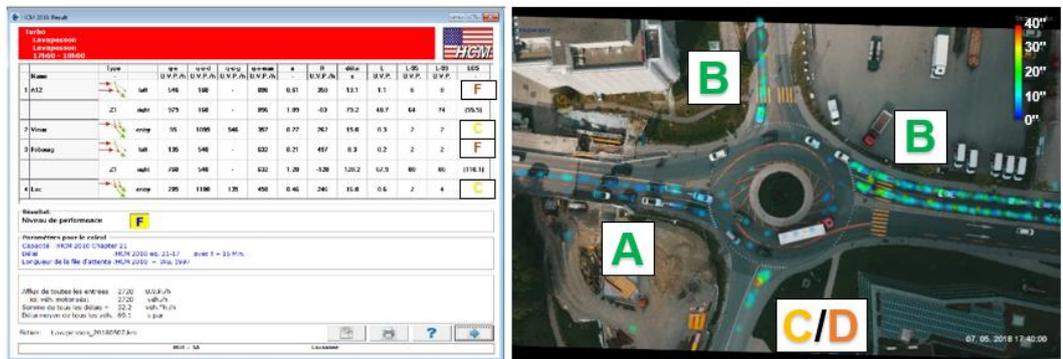


Fig. 113 Lavapesson – Niveau de service – Turbo-Roundabout, Fortuijn, 2007

II Turbo-giratoire diamètre 36m

II.1 Giratoire à 4 branches

Un turbo-giratoire à 4 branches d'un diamètre de 36m a également été modélisé géométriquement. Il est à noter que les vitesses de viabilité pour les véhicules longs (semi-remorques, camions remorques) sont, dans ce cas, de l'ordre de 10km/h.

Tab. 32 Caractéristiques géométriques d'un turbo-giratoire à quatre branches, diamètre 36m

Caractéristique géométrique	Dimension
Largeur de la voie intérieure L_i [m]	5.50
Largeur de la voie extérieure L_e [m]	5.35
Largeur de la bordure l [m]	0.35
Distance entre les centres de gravité des rayons intérieurs D_u [m]	5.65
Distance entre les centres de gravité des rayons extérieurs D_v [m]	5.35
Rayon R1 [m]	6.80
Rayon R2 [m]	12.30
Rayon R3 [m]	12.65
Rayon R4 [m]	18.00

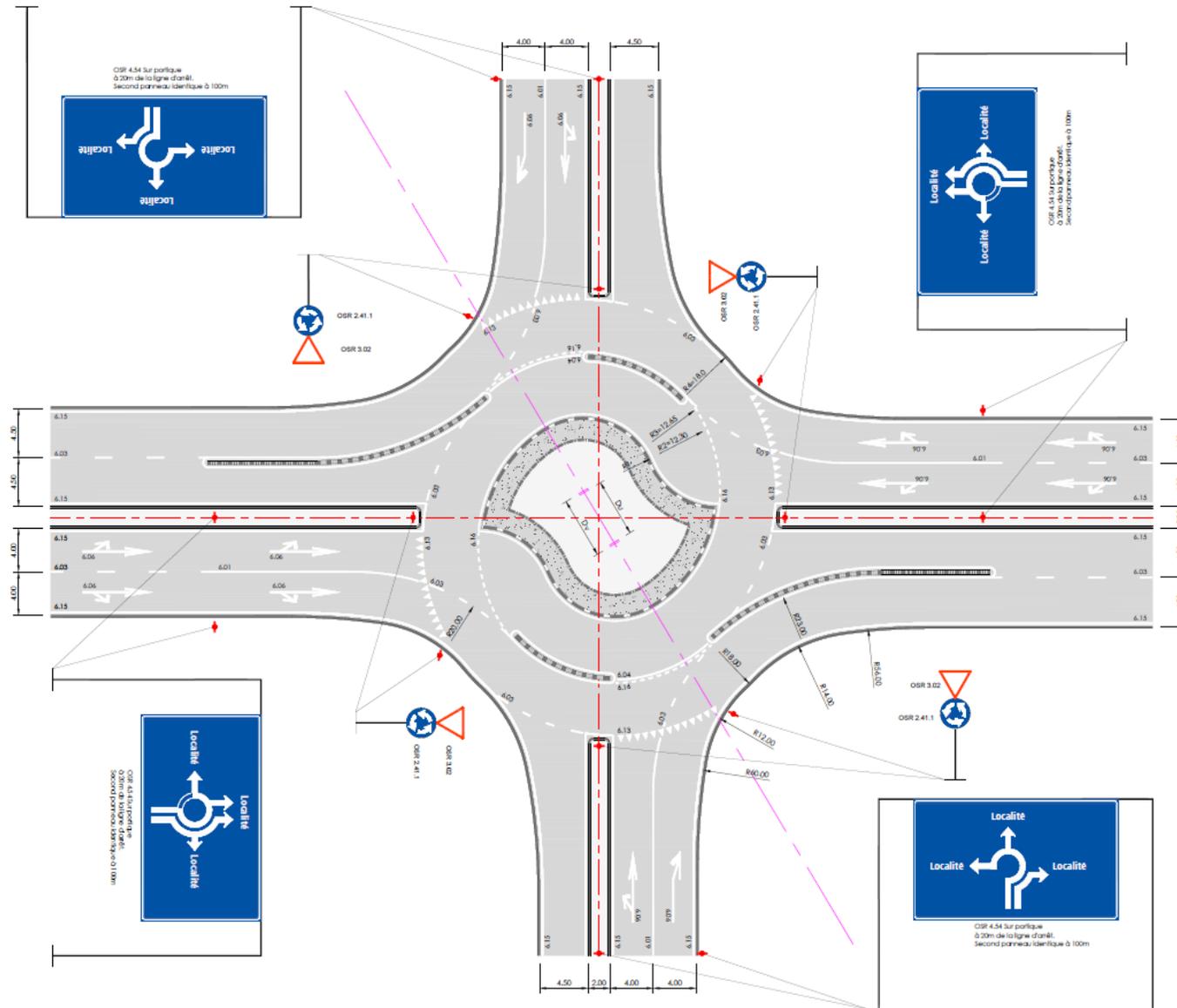


Fig. 114 Turbo-giratoire à quatre branches, diamètre 36m, selon méthode de dimensionnement géométrique adaptée à la Suisse.

Glossaire

Terme	Signification
BHNS	Bus à haut niveau de service (BHNS)
CO	Oxyde de carbone (CO)
CO ₂	Dioxyde de carbone (CO ₂)
CRO	Croatie (CRO)
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)
UVEK	<i>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)</i>
DATEC	<i>Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC)</i>
DGMR	Direction générale de la mobilité et des routes, Canton de Vaud (DGMR)
HEIA-FR	Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR)
HCM	Highway capacity manual, manuel consacré à l'étude de capacité (HCM)
HPS	Heure de pointe du soir (HPS)
LCC	Life cycle cost, analyse du cycle de vie (LCC)
LCR	Loi fédérale sur la circulation routière (LCR)
LOS	Level of service, niveau de service (LOS)
NED	Pays-Bas (NED)
OCR	Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR)
OFROU	Office fédéral des routes (OFROU)
OSR	Ordonnance sur la signalisation routière (OSR)
pcu/h	Passenger Car Unit per hour, équivalent à unité véhicule particulier par heure (pcu/h)
SLG	Association suisse pour l'éclairage (SLG)
USA	Etats Unis d'Amérique (USA)
UVP/h	Unité véhicule particulier (UVP)
véh	Véhicules (véh)
vhc/j	Véhicules par jour, unités (vhc/j)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
VSS	<i>Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)</i>
VSS	<i>Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)</i>
VSS	<i>Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)</i>

Bibliographie

Loi fédérale

- [1] « **Loi fédérale sur la circulation routière (LCR)** », RS 741.01, état au 1^{er} janvier 2020, www.admin.ch.

Ordonnances

- [2] « **Ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR)** », RS 741.11, état au 20 mai 2021, www.admin.ch.
- [3] « **Ordonnance sur la signalisation routière (OSR)** », RS 741.21, état au 1^{er} janvier 2021, www.admin.ch.

Normes

- [4] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Projets, bases – Distances de visibilité** », VSS 40 090b.
- [5] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Traversée à l'usage des piétons et des deux-roues légers – Passages piétons** », VSS 40 241.
- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Traversée à l'usage des piétons et des deux-roues légers – Passages inférieurs** », VSS 40 246a.
- [7] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Traversée à l'usage des piétons et des deux-roues légers – Passages supérieurs** », VSS 40 247a.
- [8] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Carrefours – Eléments de carrefours** », VSS 40 251.
- [9] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Carrefours – Gestion des cycles** », VSS 40 252.
- [10] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2020), « **Carrefours – Carrefours à niveau (non-giratoires)** », VSS 40 262.
- [11] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Carrefours – Carrefours giratoires** », VSS 40 263.
- [12] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Vérification de la viabilité** », VSS 40 271a.
- [13] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2019), « **Carrefours – Conditions de visibilité dans les carrefours à niveau** », VSS 40 273a.
- [14] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2021), « **Signaux routiers – Disposition aux carrefours à sens giratoire** », VSS 40 847.
- [15] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2005), « **Marquages – Aspect et domaines d'application** », VSS SN 640 850a.
- [16] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2021), « **Marques particulières – Domaines d'application, formes et dimensions** », VSS 40 851.
- [17] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2021), « **Marquages – Exemples d'application pour routes principales et secondaires** », VSS 40 862.

Documentation

- [18] A. Bastos Silva, S. Santos, M. Gaspar, University of Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, « **Turbo-roundabout use and design** », CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Responsive transports for smart Mobility.
- [19] A. Bastos Silva, L. Vasconcelos, S. Santos, University of Coimbra, Polytechnic Institute of Viseu, Campus de Repeses (2013), « **Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-Roundabouts** », EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation.
- [20] K. Beer, E. Aninipoc, D. Andrea, T. Beer, Safe System Solutions Pty Ltd, VicRoads (nov. 2014), « **Making Roundabouts a Safe System Solution for Motorcyclists** », 2014 Australasian Road Safety Research, policing & Education Conference, Melbourne.
- [21] J. Belovski, Stantec, « **Les "Turbo giratoires", sont-ils la meilleure solution ?** », *Présentation*.
- [22] L. Bondzio, Brilon Bondzio Weiser « **Experiences with Turbo-Roundabouts in Germany** », 5th Rural Roads Design meeting, *Présentation*.

- [23] P. H. Bovy, K. Dietrich, A. Harmann, P. de Aragao, F. Molina, J. Tan, P. Blanc, P. Christe, P. Glayre, L. Veuve (fév. 1991), « **Guide suisse des giratoires** », Fonds de sécurité routière FSR, Recherche en matière de route DFTCE/UFS, *Rapport No. 220*.
- [24] W. Brilon, Ruhr-Universität Bochum (mai 2011), « **Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned** », 3rd International TRB-roundabout Conference, Carmel, Indiana.
- [25] W. Brilon, Ruhr-Universität Bochum (2008), « **Turbo-Roundabout – An Experience from Germany** », National Roundabout Conference, TRB, *Présentation*.
- [26] D. Campbell, I. Jurisich, R. Dunn, GHD Ltd, University of Auckland (2006), « **Improved Multi-lane Roundabout Designs for Cyclists** », Land Transport New Zealand Research, *Report 287*.
- [27] S. Chan, R. Linvigston, Transoft Solutions Inc. (avril 2014), « **Design vehicle's influence to the geometric design of turbo-roundabouts** », International Roundabout Conference.
- [28] T. Cvetko, T. Tollazzi, A. Deluka-Tibljaš, I. Barišić, Z. Kenjić, T. Zgrablić, S. Babić, J. Garmaz (sept. 2014), « **Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja sa spiralnim tokom kružnog kolnika na državnim cestama** », GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI, Zabreb.
- [29] T. Džambas, S. Ahac, V. Dragčević, University of Zagreb (janv. 2016), « **Geometric design of turbo roundabouts according to Croatian and Dutch guidelines** », 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, CETRA 2018, Croatie.
- [30] M. Dorfel, D. Bättig, H. P. Lindenmann, C. A. Huber, N. Berger (déc. 2015), « **La sécurité routière des carrefours giratoires à deux voies** », Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, *Projet de recherche VSS 2010/301, Rapport VSS No. 1541*.
- [31] J.C. Engelsman, M. Uken (juil. 2007), « **Turbo roundabouts as an alternative to two lane roundabouts** », 26th Southern African Transport Conference, SATC 2007, Pretoria, Afrique du Sud.
- [32] P. Fernandes, N. M. Roupail, M. C. Coelho, University of Aveiro, North Carolina State University, « **Turbo-roundabouts along corridors: analysis of operational and environmental impacts** ».
- [33] L.G.H Fortuijn (janv. 2007), « **Turbo-Kreisverkehre** », Présentation au séminaire « Aktuelle Themen der Strassenplanung », BAST.
- [34] L.G.H Fortuijn (janv. 2013), « **Turborotonde en turboplein: ontwerp, capaciteit en veiligheid** », TRAIL Thesis Series T 2013/1.
- [35] F. Gadiant, L. Richner, Y. Siegrist, B+S (déc. 2017), « **Thun Nord, Neubau Kreisel Glättimühli – Monitoring Turbokreisel – Zwischenbericht zur Inbetriebnahme** », *Rapport*.
- [36] V. Gallèlli, T. Luele, R. Vaiana, University of Calabria (avril 2016), « **Conversion of a semi-two lanes roundabout into a turbo-roundabout: a performance comparison** », 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, ANT 2016.
- [37] M. Ghielmetti, C. Pestalozzi, V. Conrad, U. Kirsch (août 2016), « **Trafic des cyclistes dans les carrefours** », Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, *Projet de recherche VSS 2010/204, Rapport VSS No. 1571*.
- [38] O. Giuffrè, A. Granà, S. Marino (sept. 2012), « **Comparing Performances of Turbo-roundabouts and Double-lane Roundabouts** », Volume 6, No. 10, Modern Applied Science, Canadian Center of Science and Education.
- [39] O. Giuffrè, A. Granà, S. Marino, F. Galatioto, University of Palermo, Italy, Transport System Catapult, United Kingdom (mars 2016), « **Microsimulation-based passenger car equivalents for heavy vehicles driving turbo-roundabouts** », Special Issue on the Impact of Vehicle Movement on Exploitation Parameters of Roads and Runways, Taylor & Francis.
- [40] A. Granà, University of Palermo, Italie (déc. 2014), « **Designing Turbo-roundabouts** », Conferência AVALIAÇÃO OPERACIONAL E AMBIENTAL DE ROTUNDAS, *Présentation*.
- [41] N. Gredoska, K. Bombol, D. K. Nechoska, Sv. Kliment Ohridski University, Republic of Macedonia (mai 2016), « **An evaluation of turbo roundabout performances: case study of the city of Ohrid** », ijtte.
- [42] R. R. M. Hoek, TUDelft (juil. 2013), « **Signalized turbo roundabouts – A study into the Applicability of Traffic Signals on Turbo Roundabouts** », *Master thesis*.
- [43] V. W. Inman, G. W. Davis, Science Applications International Corporation, Federal Highway Administration, RD&T (janv. 2007), « **Synthesis of Literature Relevant to Roundabout Signalization to Provide Pedestrian Access** », *Final Report*.
- [44] Javno preduzeće Putevi Srbije (avril 2012), « **PRIRUČNIK ZA PROJEKTOVANJE PUTEVA U REPUBLICI SRBIJI** », République de Serbie.
- [45] E. Macioszek, Silesian University of Technology, Poland (sept. 2016), « **The application of HCM 2010 in the determination of capacity of traffic lanes at turbo roundabout entries** », Transport Problems.
- [46] E. Macioszek, Silesian University of Technology, Poland (2015), « **The road safety at turbo roundabouts in Poland** », Volume 33, Issue 1, The archives of transport.

-
- [47] R. Mauro, M. Guerrieri, Università degli Studi di Trento, Università degli Studi di Palermo (mars 2015), « **Evaluation of the safety performance of turbo roundabouts by means of a potential accident rate model** », The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering.
-
- [48] D.P. Overkamp, W. van der Wijk (juin 2009), « **Roundabouts – Application and design, A practical manual** », Ministry of Transport, Public Works and Water management, DHV.
-
- [49] A. Šarić, I. Lovrić (juil. 2017), « **Multi-lane Roundabout Capacity Evaluation** », Volume 3, Article 42, Frontiers in Built Environment, www.frontiersin.org.
-
- [50] H. Suter, L. Richner, B+S (août 2018), « **Thun Nord, Neubau Kreisell Glättimüli – Monitoring Turbokreisell – Schlussbericht** », *Rapport*.
-
- [51] P. Steppe, D. Lauwers, Universiteit Gent, AMRP (2006), « **Analyse van het concept “turborotonde” en onderzoek naar de toepasbaarheid in Vlaanderen** », *Travail de diplôme*.
-
- [52] T. Tollazzi, M. Renčelj, University of Maribor, Slovénie (oct. 2014), « **Turbo roundabouts in Slovenia – State of the art** », 12th International Symposium, Road accidents prevention 2014, Borsko Jezero, *Présentation*.
-
- [53] T. Tollazzi, R. Mauro, M. Guerrieri, M. Renčelj, University of Maribor, Slovénie, University of Trento, Italy (fév. 2015), « **Comparative Analysis of Four New Alternative Types of Roundabouts: “Turbo”, “Flower”, “Target” and “Four-Flyover” Roundabout** », Periodica Polytechnica Civil Engineering, *Research article*.
-
- [54] A. L. P. Vasconcelos, A. Bastos Silva, A. J. da Maia Seco, Institute of Viseu, University of Coimbra (juil. 2012), « **Capacity of normal and turbo-roundabouts: comparative analysis** », Institution of Civil Engineers, ICE.
-
- [55] M.-A. Fénart, A.-G. Dumont (LAVOC, EPFL), L. D’Angelo, A. Nussbaumer (ICOM, EPFL) (août 2017), « **Simulations de trafic intégrant la détermination d’indices de performance structurale – Partie 1 : Trafic** », Groupe de travail recherche en matière de ponts (AGB), *Projet de recherche AGB 2010/003, Rapport No. 685*.
-
- [56] M.-A. Fénart, S. Samoili, A. Founta A.-G. Dumont (LAVOC, EPFL), P. Maillard, J. Chapoton, M. Roudy (RGR) (oct. 2016), « **Effets sur le trafic de l’utilisation des bandes d’arrêt d’urgence** », Office fédéral des routes, *Projet de recherche ASTRA 2010/023_OBF, Rapport No. 1580*.
-

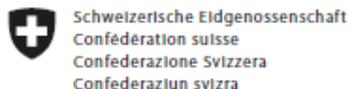
Directives

-
- [57] Association Suisse pour l’éclairage (2005), « **Éclairage des routes – Compléments aux normes SN TR 13201-1 et SN EN 13201-2 à -4** », directive SLG 202.
-

Manuels

-
- [58] Office fédéral des routes OFROU, Conférence Vélo Suisse (2021), « **Gestion des cycles aux carrefours** », Manuel d’infrastructure.
-

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 22.12.2021

Données de base

Projet N° : VSS 2018/230

Titre du projet : Planification et conception des turbo-giratoires

Echéance effective : 31.12.2021

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche contient une évaluation et des recommandations en matière de conception, de dimensionnement et d'usage des turbo-giratoires dans le contexte routier suisse.

En premier lieu, un état des connaissances au niveau national et international a permis de définir les éléments de base de la conception et du dimensionnement de turbo-giratoires.

Ces éléments de base (conditions d'implantation, localisation, capacité, conditions de trafic, géométrie, comportement des usagers, intégration des modes doux, équipements, sécurité routière, coûts, entretien, impact environnemental) ont été évalués et analysés à l'aide d'approches théorique ou empirique simulée puis comparés aux résultats des monitorages effectués sur deux aménagements suisses, le turbo-giratoire de Glättimüli (Steffisburg) et le turbo-giratoire partiel provisoire du Lavapesson (Fribourg).

Il est à noter ici qu'en raison de la pandémie de COVID-19 et aux restrictions de déplacements liées, aucun aménagement de turbo-giratoire réalisé à l'étranger n'a pu être étudié sur site.

Sur la base des analyses menées, des méthodes de dimensionnement géométrique, de conception et de dimensionnement en capacité des turbo-giratoires de même qu'une cartographie des turbo-giratoires applicables dans le contexte suisse ont été établies. Celles-ci devront être confortées par la suite par les monitorages d'aménagements réalisés sur le territoire suisse.

Finalement, la recherche est conclue par une série de recommandations de modifications ou de création de normes relatives à ces aménagements.

Atteinte des objectifs :

Les objectifs fixés du projet de recherche étaient d'aboutir à une cartographie des turbo-giratoires, de pouvoir évaluer leur efficacité, leurs contraintes, de définir les équipements requis pour leur conception et de décrire une méthode de dimensionnement applicable dans le contexte suisse.

De par les résultats du projet de recherche, les objectifs cités ci-dessus ont été atteints.

Les résultats obtenus constituent ainsi une base utile pour des compléments normatifs ou la réalisation de normes relatives à la conception et au dimensionnement de turbo-giratoires.

Déductions et recommandations :

Le projet aboutit aux déductions et recommandations suivantes :

- Lors de choix d'aménagement routier, il est recommandé d'évaluer la variante en turbo-giratoire en comparaison avec un giratoire conventionnel à deux voies à l'anneau ;
- Dans l'attente d'un complément normatif, la mise en application des résultats de cette recherche permet d'envisager une conception uniforme et appropriée à l'usage suisse de ces aménagements ;
- Lors de la mise en œuvre d'un aménagement en turbo-giratoire, une campagne d'information aux usagers est recommandée ;
- L'établissement de nouvelles normes relatives aux turbo-giratoires et l'adaptation d'une norme existante sur la signalisation verticale sont recommandés.

Publications :

Aucune

Chef/cheffe de projet :

Nom : Maillard

Prénom : Patrick

Service, entreprise, institut : RGR Robert-Grandpierre et Rapp 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 propose une approche globale et complète de la thématique, comprenant les aspects de planification, de la conception et de l'exploitation des turbo-giratoires.

L'étude démontre que les turbo-giratoires sont une alternative directe aux carrefours giratoires traditionnels qui comportent plus d'une voie à l'anneau. Il faudrait systématiquement évaluer et comparer les avantages et inconvénients de ces deux catégories de carrefours afin de choisir la variante la plus adaptée au contexte.

Mise en oeuvre :

Le projet de recherche peut être utilisé comme "guide" pour les bureaux d'étude confrontés à ce type de carrefours en absence d'autres documents disponibles.

Le projet de recherche doit servir de base à l'élaboration de normes dédiées à cette catégorie de carrefour.

Les bases normatives pour les giratoires à plus d'une voie à l'anneau faisant également défaut, leur élaboration devrait être envisagée.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Méthode de dimensionnement des éléments géométriques pour les turbo-giratoires

Influence sur les normes :

SN 640 250 « carrefours : norme de base »
VSS 40 263 « Carrefours giratoires »
VSS 40 847 « Signaux routiers : disposition aux carrefours à sens giratoire »
SN 640 850a « Marquages aspects et domaines d'application »

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Broye

Prénom : Alain

Service, entreprise, institut : Service des ponts et chaussées, Section surveillance du réseau routiers, Fribourg

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