

Voies structurantes d'agglomération

Fonctionnement des accès



Voies structurantes d'agglomération

Fonctionnement des accès

Collection « Références »

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...) dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Remerciements

Cet ouvrage, œuvre collective du Cerema, a été réalisé à la demande de la direction des infrastructures de transport (DIT) du ministère de la Transition écologique et solidaire et en lien avec cette dernière.

Il a été rédigé par Olivier Ancelet (Cerema), avec la contribution d'Étienne Hans (Cerema) pour les apports scientifiques et techniques.

Ont participé à l'équipe de projet, sous la coordination d'Olivier Ancelet et la supervision conjointe de Martin de Wissocq (DIT/MARRN) et de Bruno Levilly (Cerema) :

- Nicolas Ditchi, Daniel Grégoire, Lyonel Guillaume, Ève Kerbellec, Kévin Lemaire, Philippe Manzano, Éric Pertus, Sébastien Plantier, Saoud Tliba, Régis Williams (Cerema), Bernard Éneau, et Laurent Fabre (DIT/MARRN).

Sont remerciés les relecteurs de l'ouvrage :

- Marion Escargueil (DRIEA), Christine Buisson et Aurélien Duret (Ifsttar), Haris Sater (Arcadis).

Les schémas ont été réalisés par Olivier Ancelet.

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Voies structurantes d'agglomération. Fonctionnement des accès*, Cerema : Bron, 2019. Collection Références. ISBN 978-2-37180-405-0 (pdf)

Sommaire

Introduction	4
1. Contexte	4
2. Une nouvelle méthode d'évaluation du fonctionnement des accès	4
3. Domaine d'application	5
4. Les principes adoptés.....	5
5. Avertissement.....	10
Partie 1 – Fonctionnement d'un accès	12
1. Introduction	12
2. Fonctionnement d'un convergent simple	15
3. Fonctionnement d'un divergent simple	26
4. Fonctionnement d'un entrecroisement simple	34
5. Fonctionnement des configurations complexes : la méthode des charges	57
Partie 2 – Effet d'un accès congestionné	82
1. Introduction	82
2. Durée de la congestion et impact sur les temps de parcours.....	86
3. Longueur maximale de la congestion	91
Annexes	103
Annexe 1 - Expression des débits effectifs en amont des accès simples	104
Annexe 2 - La méthode des charges en détail	108
Annexe 3 - Précisions sur le programme d'optimisation	114
Annexe 4 - Calcul théorique du coefficient d'équivalence PL	117
Annexe 5 - Typologie de manœuvres sur des exemples d'entrecroisement	120
Terminologie	122
Bibliographie	123
Index des encadrés	<u>124</u>

Introduction

1. Contexte

Les voies structurantes d'agglomération (VSA), dont la fonction est d'assurer les déplacements des personnes et des biens à l'échelle d'une aire urbaine, sont soumises à des congestions récurrentes. Celles-ci ont lieu essentiellement au niveau des échangeurs qui assurent les échanges entre la VSA et une autre voirie d'agglomération. Les principaux problèmes rencontrés au niveau des bretelles d'accès d'un échangeur sont :

- une saturation au niveau d'une entrée, car la demande de trafic entrant est trop importante pour que la section courante en aval puisse l'écouler en plus de son propre trafic amont ;
- le débordement sur la section courante d'une file d'attente remontant d'une bretelle de sortie, lié à une capacité trop faible du carrefour de surface en extrémité de bretelle ;
- des manœuvres de changement de voie induites par la configuration de la VSA (zones d'entrecroisement, bifurcations, accès rapprochés) et du trafic qui génèrent des baisses de capacité.

Les aménagements de nouveaux échangeurs, les modifications d'échangeurs existants ou les modifications des demandes de trafic sur un accès suite à la réalisation d'un projet à proximité engendrent une modification des conditions de circulation sur l'infrastructure susceptible de générer une congestion.

En particulier, la question du fonctionnement des entrecroisements est récurrente. La typologie d'infrastructure des VSA, qui présente la particularité d'avoir des échangeurs proches, oblige souvent à recourir à ce type d'accès. Une évaluation des conditions de circulation au niveau des entrecroisements est donc nécessaire pour mieux appréhender l'opportunité de ces aménagements.

2. Une nouvelle méthode d'évaluation du fonctionnement des accès

Le guide Certu *Conception des accès sur VRU de type A*¹ comportait une méthode d'évaluation des conditions de fonctionnement des différents types d'accès (convergençs, divergençs) et des entrecroisements, en introduisant la méthode dite « ICTAVRU ». Cette méthode n'explicitait pas son domaine de pertinence, ce qui pouvait conduire à des résultats aberrants lorsqu'elle était utilisée en dehors de celui-ci. En outre, le guide ne donnait aucun élément méthodologique permettant d'évaluer le fonctionnement des accès arrivés à saturation, ni l'impact de cette saturation sur les conditions de circulation.

Le présent ouvrage rappelle les modèles usuels de fonctionnement des accès simples utilisés en ingénierie du trafic. Il introduit en outre **une nouvelle méthode d'évaluation du fonctionnement des accès, dite « méthode des charges »**, permettant de traiter avec un unique bagage théorique les configurations d'accès complexes, en particulier les accès rapprochés et les entrecroisements. Il rappelle enfin les principaux éléments de méthode sur l'évaluation de l'impact d'une congestion sur une VSA.

1 Certu, *Conception des accès sur voies rapides urbaines de type A (VRU A)*, Éditions du Certu, 2003.

3. Domaine d'application

Les éléments de méthode du présent guide permettent d'évaluer, selon les demandes de débit en approche d'un accès, son fonctionnement et son impact sur les conditions de circulation à proximité. Les principales étapes de la méthode sont :

1. Disposer des demandes de trafic sur les branches en amont de l'accès ;
2. Étudier le fonctionnement de l'accès :
 - a. Vérifier si les demandes risquent de générer une saturation de l'accès ;
 - b. Si la saturation est avérée, estimer les débits écoulés en conséquence ;
 - c. Déterminer les branches sur lesquelles la congestion va se propager ;
3. Étudier l'impact de la congestion sur la circulation :
 - a. Déterminer l'impact sur les temps de parcours ;
 - b. Calculer la durée totale de la congestion et sa longueur maximale ;
 - c. Si la congestion remonte jusqu'à un accès proche, apprécier son effet sur le fonctionnement de cet accès.

La méthode est applicable à des configurations de projet variées :

- projet neuf de VSA ;
- projet d'un nouvel échangeur sur VSA existante ;
- modification d'un accès existant ;
- modification des demandes de trafic liée à un projet connexe.

4. Les principes adoptés

La lecture du présent ouvrage nécessite de connaître certains fondamentaux d'ingénierie du trafic², qui peuvent s'écarter des principes utilisés jusqu'alors dans les guides de conception, et notamment ceux employés jusqu'alors dans le guide *Conception des accès sur VRU A*³.

4.1 Débit de dimensionnement et débit de fonctionnement

Le guide *VSA90/110*⁴ (comme les autres référentiels routiers) fixe des capacités à prendre en compte pour le dimensionnement géométrique du profil en travers (capacité d'une voie = 1 800 uvp/h) et des bretelles d'échangeur (capacité d'une voie = 1 550 uvp/h).

Ces valeurs standards de débit sont des débits de dimensionnement, c'est-à-dire des débits maximaux qu'une section de VSA90/110 peut écouler à un niveau de service donné. Ils prennent en compte notamment des contraintes réglementaires (interdistance entre les véhicules imposée

2 Le lecteur pourra compléter ses connaissances en théorie du trafic en consultant les guides : C.Buisson et J.-B. Lesort, *Comprendre le trafic routier – Méthodes et calculs*, Éditions du Certu, 2010 et Cerema, *Théorie du trafic et régulation dynamique*, Éditions du Cerema, 2018.

3 Certu, op.cit.

4 Cerema, *Voies structurantes d'agglomération – Conception des voies à 90 km/h et 110 km/h*, Éditions du Cerema, 2014.

par le Code de la route), environnementales (météorologie), d'exploitation (niveau de gêne en cas d'événement), etc.

Les débits utilisés dans le présent ouvrage correspondent à des débits de fonctionnement, c'est-à-dire des débits maximaux qu'une section de VSA90/110 peut écouler et au-delà desquels la congestion apparaît. Par définition, ils n'intègrent aucune contrainte liée à un niveau de service donné, comme c'est le cas pour les débits de dimensionnement.

4.2 L'unité de débit : le véh/h

La particularité des VSA tient au fait que ces infrastructures sont soumises à de fortes variations des niveaux de trafic au cours de la journée, génératrices de congestions régulières. Ceci exclut de faire des études à partir de données en TMJA (trafic moyen journalier annuel, exprimé en nombre de véhicules par jour, véh/j). Les études de trafic impliquent donc l'utilisation de données recueillies sur des périodes plus courtes (1 minute, 6 minutes, 15 minutes...) ramenées à un débit horaire exprimé en nombre de véhicules par heure (véh/h).

Par ailleurs, il est admis que le trafic des poids lourds (PL) a une influence sur les conditions de circulation. L'usage, notamment dans le guide *VSA90/110* et l'ancien guide *Conception des accès sur VRU A*, était de considérer une équivalence entre PL et véhicules légers et d'exprimer les débits en uvp/h (unité de véhicule particulier par heure).

Le parti pris du présent guide est de conserver une expression des débits en véh/h. Le coefficient d'équivalence est redéfini et exploité pour exprimer la charge⁵ supportée par un trafic PL, plus importante que la charge relative à un trafic de véhicules légers.

4.3 L'apport des données pour un projet sur infrastructure existante

Actuellement, les projets de VSA présentent une part importante d'opérations sur infrastructures existantes. Pour de tels projets, il est recommandé de lancer des campagnes de recueil de données de trafic et de les exploiter pour consolider les hypothèses et paramètres des méthodes du guide.

En l'absence de données du terrain ou dans le cas de projets neufs, ces méthodes restent toutefois applicables par l'utilisation des paramètres standards (valeurs par défaut).

La période d'agrégation la plus adaptée pour l'exploitation de données de trafic liées à la congestion est la période de 6 minutes. En effet, cette durée est plus intéressante que la donnée horaire, car les données sont plus nombreuses et plus précises sur l'évolution des conditions de circulation au cours du temps. En outre, elle est suffisante pour lisser les bruits liés à la nature aléatoire du trafic, parfois importants sur des périodes d'agrégation plus faibles (1 minute par exemple).

5 Le concept de charge est défini dans la partie 1, chapitres 4 et 5.

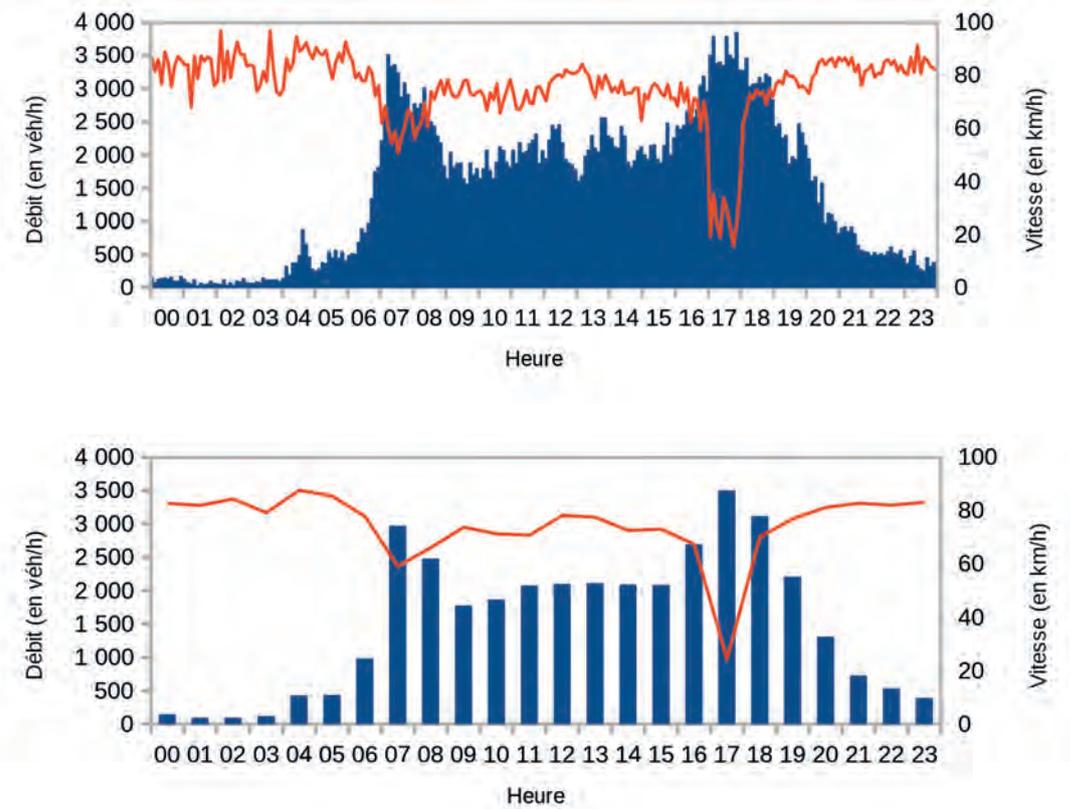


Illustration 1 : comparaison de chroniques de trafic sur deux périodes d'agrégation différentes (6 min en haut, 1 h en bas)

Pour l'étude d'un accès, les données de débit et de vitesse sont requises sur chaque branche (voire sur chaque voie) composant l'accès, en amont comme en aval. La période de mesure doit être identique pour chaque point de mesure. Cette exhaustivité des données est notamment nécessaire pour repérer précisément l'origine des congestions qui touchent l'accès (en comparant les vitesses des branches amont et aval de l'accès) et pour estimer les capacités effectives au niveau de chacune des branches.

4.4 « Concentration-débit » à la place de « débit-vitesse »

Les recueils de données issues des boucles électromagnétiques et agrégées par période de 6 minutes, permettent aisément de représenter le nuage des points dans un plan débit-vitesse. La « courbe débit-vitesse » résultante peut être employée dans l'exploitation routière, pour suivre les conditions de circulation sur un réseau routier, suivant une échelle de niveaux de service en circulation⁶ par exemple.

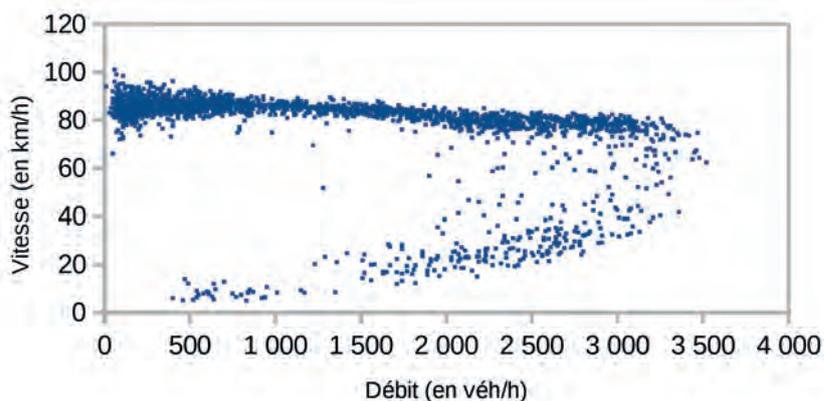


Illustration 2 : nuage de points dans le plan débit-vitesse

La méthode du guide repose quant à elle sur une représentation dans un plan concentration-débit, particulièrement utilisée en théorie du trafic. Le « **diagramme fondamental** » représenté ainsi peut se simplifier sous une forme triangulaire, facilitant son exploitation pour étudier la dynamique du trafic (cf. partie 2, chapitre 3).

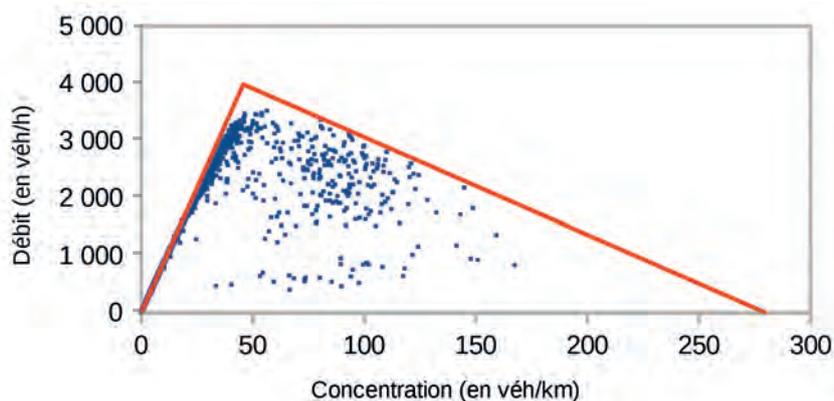


Illustration 3 : le même nuage de points dans le plan concentration-débit

⁶ Pour plus d'informations, le lecteur pourra consulter le rapport d'études du Cerema, *Niveaux de service de circulation en section courante sur les voies structurantes d'agglomération à 90 et 110 km/h*, Éditions du Cerema, 2014.

4.5 Capacité, offre et demande – Définitions et notations

Les principes de l'écoulement du trafic sur une section d'infrastructure reposent toujours sur l'interaction entre une capacité, une offre et une demande.

- La capacité de la section étudiée constitue le débit maximal que l'infrastructure est capable d'écouler dans des conditions idéales.
- La demande de trafic en amont (en « entrée ») de la section étudiée représente le trafic qui cherche à s'écouler dans l'infrastructure en l'absence de toute contrainte en aval.
- L'offre de trafic en aval (en « sortie ») de la section étudiée représente les possibilités d'écoulement du trafic, soit permises par les caractéristiques de l'infrastructure à l'aval de la section, soit contraintes par la congestion présente à la sortie de la section. En l'absence de contrainte en aval de la section étudiée, l'offre de trafic est égale à la capacité.

La comparaison entre la capacité, l'offre et la demande permet de reformuler les différents régimes de trafic sur l'infrastructure.

- Dans le cas où la demande de trafic est inférieure à la capacité de la section :
 - si la demande de trafic en amont est inférieure à l'offre en aval, alors l'écoulement n'est pas contraint. **Le régime sur la section est fluide** ;
 - si la demande de trafic en amont est supérieure à l'offre en aval, alors l'écoulement est contraint. **Le régime sur la section est congestionné**.
- Dans le cas où la demande de trafic en amont est supérieure à la capacité de la section, alors une congestion apparaît en amont de la section étudiée. La demande résultante est écrêtée par cette capacité. Le régime sur la section se détermine alors en comparant la capacité et l'offre en aval.

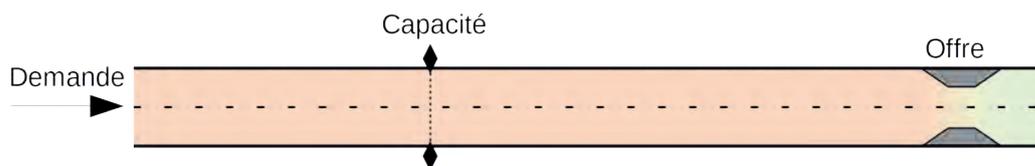


Illustration 4 : entrants dans l'étude de fonctionnement d'une infrastructure

Toute étude d'une configuration d'accès existante doit débuter par l'analyse de l'origine des congestions observées : baisse de l'offre entraînée par une congestion remontant depuis l'aval ou insuffisance de la capacité de l'accès.

La suite du document utilisera les notations suivantes :

- C capacité d'une branche ;
- D demande de débit sur une branche ;
- Q offre en aval d'une branche ;
- q débit effectif s'écoulant dans une branche.

5. Avertissement

Le présent guide expose la méthode à employer pour évaluer *a priori* le fonctionnement des accès, dite « méthode des charges », en complément du guide *Voies structurantes d'agglomération – Conception des voies à 90 et 110 km/h*⁷. Il remplace la méthode du guide *Conception des accès sur VRU de type A*⁸, dite « méthode ICTAVRU ».

Le guide *VSA90/110* fournit l'ensemble des règles de conception géométriques des accès. La conception d'accès rapprochés, même strictement conforme aux règles de l'art⁹, du fait de leurs interférences réciproques, ne garantit pas leur bon fonctionnement pour toutes les demandes de trafic. C'est pourquoi il est recommandé d'évaluer leur fonctionnement en appliquant la méthode des charges présentée dans ce guide.

L'étude de la dynamique de la congestion, présentée dans la partie 2 de ce guide, est une approche très simplifiée de l'évolution de la congestion, les niveaux de trafic étant considérés comme constants pour chaque période donnée (période de pointe et période creuse). Pour une approche plus précise qui prendrait en compte de manière plus fine les chroniques de débit, le recours à des outils de simulation dynamique serait nécessaire.

7 Cerema, op.cit.

8 Certu, op.cit.

9 Le guide *Conception des accès sur VRU de type A* présentait des alternatives à des configurations d'entrecroisement déconseillées. Ces recommandations seront mises à jour et feront l'objet d'une autre publication.

PARTIE 1
Fonctionnement d'un accès

Partie 1 – Fonctionnement d'un accès

1. Introduction

Un accès constitue un élément de la VSA permettant de relier des branches entre elles – par exemple, la section courante (branche principale) à une bretelle d'échangeur (branche secondaire). On distingue trois familles d'accès :

- **les convergents**, qui permettent à des véhicules issus d'une branche secondaire d'entrer sur la branche principale ;
- **les divergents**, qui permettent à des véhicules issus de la branche principale de choisir entre deux itinéraires : rester sur la branche principale, ou bien sortir en empruntant la branche secondaire ;
- **les entrecroisements**, configurations d'accès rapprochés constitués d'un convergent puis d'un divergent, généralement reliés par une voie d'entrecroisement.

1.1 Fonctionnement d'un accès – généralités

Les caractéristiques intrinsèques de l'accès (géométrie, nombre de voies, type de connexion) influent sur son fonctionnement. Aussi, les débits maximaux pouvant s'écouler au travers d'un accès varient en fonction des demandes de débit en amont.

Le modèle de fonctionnement d'un accès doit permettre de déterminer les seuils de trafic en dessous desquels les conditions de circulation restent en régime fluide. Lorsque ces seuils sont dépassés, l'accès est congestionné.

Dans ce cas, l'accès présente une contrainte sur le trafic s'écoulant sur les branches en amont. Les débits effectifs, c'est-à-dire les débits maximaux que l'accès congestionné peut écouler, sont déterminés en considérant des principes d'écoulement propres à chaque famille d'accès.

1.2 Fonctionnement d'un accès en cas de congestion remontant de l'aval

Lorsqu'un accès est contraint par une congestion remontant de l'aval, le calcul de son fonctionnement doit se faire en considérant que la capacité en aval est contrainte par la congestion remontante. Cette offre, qui contraint la capacité, est définie par le débit qui s'écoule effectivement en aval.

1.3 Courbe de capacité

Le fonctionnement d'un accès peut s'illustrer sur un diagramme en deux dimensions, avec le débit sur la branche principale en abscisse et le débit sur la branche secondaire en ordonnée. Sur ce plan, on peut tracer la courbe de capacité de l'accès et représenter les propriétés de fonctionnement.

1.4 Données requises

► Demande

L'étude de fonctionnement d'un accès requiert de connaître les demandes de débit amont qui cherchent à s'écouler à travers l'accès. En général, les demandes de trafic sont estimées dans le cadre d'études de déplacement par des modèles dits « statiques » ou « quatre étapes ». Dans ces modèles, les niveaux de trafic affectés peuvent être supérieurs à la capacité des réseaux.

Il est nécessaire de disposer au minimum de demandes de débit horaire (exprimées en véh/h), en particulier pendant les périodes de la journée où les demandes sont les plus élevées : la période de pointe du matin et la période de pointe du soir.

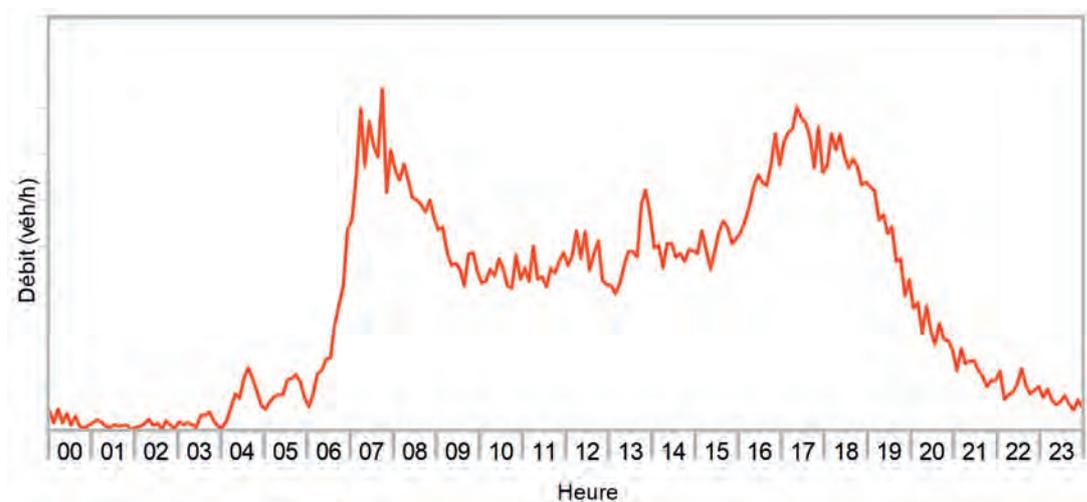


Illustration 5 : chronique de débit mesuré sur une VSA, présentant une période de pointe le matin et le soir

Dans le cas des entrecroisements et des divergents, les demandes de débit doivent être complétées par la matrice origine-destination (matrice OD).

Point de vigilance : difficultés pour déterminer les chroniques de demande

Les modèles statiques sont utiles pour fournir des éléments de trafic à des horizons prospectifs. En général, ils se limitent à l'estimation des demandes sur les périodes de pointe, périodes dimensionnantes pour un projet de VSA. Les demandes en périodes creuses ne sont pas systématiquement calculées, ce qui n'est pas contraignant pour l'étude de fonctionnement d'un accès (en revanche, cela le devient pour l'étude de la dynamique de la congestion – cf. partie 2).

Par ailleurs, l'expression de la demande sur le pas temporel d'une heure n'est adaptée que pour des durées de saturation supérieures à une heure. Dans le cas d'infrastructures existantes où les durées des périodes de pointe – a priori connues – sont inférieures à une heure, il est nécessaire d'adapter le pas temporel de la demande de trafic, de manière à ce qu'il soit inférieur à la durée de la congestion.

► Offre

L'offre au niveau d'un accès n'est pas constante et varie en fonction de l'offre à l'aval de l'accès. Les méthodes permettant de déterminer cette offre sont développées dans la suite de cette partie.

► Capacité

L'étude de fonctionnement d'un accès nécessite, comme paramètres, les capacités des différentes branches le composant. Pour les estimer, on utilise les valeurs standards de capacité d'une voie de circulation. Exprimées en véh/h, ces capacités nominales varient en fonction de la vitesse pratiquée sur cette voie.

Vitesse pratiquée (en km/h)	30	50	70	90	110
Capacité d'une voie (en véh/h)	1550	1850	2000	2100	2150

Si la branche comporte plus d'une voie, sa capacité est égale à la capacité d'une voie multipliée par le nombre de voies.

Point de vigilance : capacité des sections présentant des contraintes géométriques

Ces valeurs standards sont déterminées à partir de la vitesse pratiquée, qui peut être parfois très différente de la vitesse limite autorisée. C'est notamment le cas des bretelles présentant des rayons en plan ne permettant pas de circuler à la vitesse limite autorisée – les bretelles en boucle par exemple. Pour ce type de configuration, la capacité de la bretelle est calculée selon la vitesse praticable la plus faible sur la bretelle, en utilisant les formules présentées en partie 2, chapitre 3.1.

1.5 Avertissement

Les modèles présentés pour les convergents et divergents simples ne permettent pas de prendre en compte toutes les particularités du trafic. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'étudier plus finement le fonctionnement de ces accès, en distinguant les phénomènes de changement de voie (insertion des véhicules, rabattement des PL sur la voie de droite, manœuvres de confort vers la gauche) et l'effet de la longueur du dispositif géométrique. L'étude suivant ces modèles simples doit alors être complétée par une étude suivant la méthode des charges (cf. partie 1, chapitre 5).

2. Fonctionnement d'un convergent simple

2.1 Principe

Le convergent permet à des véhicules issus d'une branche secondaire d'entrer sur la branche principale. Le dispositif d'entrée peut être organisé de plusieurs façons : insertion ou adjonction d'une ou de deux voies.

Pour garantir un régime fluide au niveau du convergent, la somme des demandes de trafic en amont du convergent ne doit pas dépasser la capacité de la branche en aval. Si cette condition n'est pas remplie, alors une congestion se forme au niveau du convergent.

Lorsque les demandes de trafic sur chacune des branches amont sont élevées, la congestion se propage sur les deux branches. Le débit s'écoulant en aval du convergent est égal à la capacité de la branche aval (notée C). Dans cette situation, les usagers suivent une règle d'usage appelée insertion « en fermeture éclair » : les véhicules arrivant de la bretelle s'insèrent un à un, en alternant avec un véhicule circulant sur la section courante. Ce comportement de coopération entre les usagers se traduit par un partage de la capacité du convergent entre les véhicules prioritaires et les véhicules entrants.

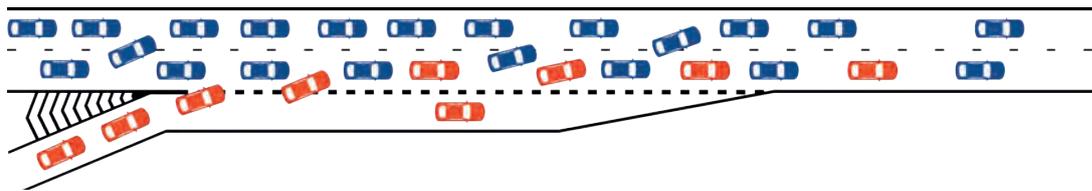


Illustration 6 : coopération en régime congestionné (en "fermeture-éclair")

Ainsi les débits écoulés sur la branche principale et sur la branche secondaire sont indépendants des demandes. Ils sont appelés « débits de partage de capacité » et sont notés respectivement q_p^α et q_s^α . Par définition, la somme de ces débits effectifs est égale à la capacité de la branche en aval : $q_p^\alpha + q_s^\alpha = C$.

En première approche, le partage des débits à capacité, entre la section courante et la bretelle d'entrée, est proportionnel au nombre de voies composant les branches en amont du convergent. Ainsi :

$$q_p^\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche principale}}{\text{nombre total de voies des deux branches}} C$$

$$q_s^\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche secondaire}}{\text{nombre total de voies des deux branches}} C$$

On définit le **coefficient de partage des débits à capacité**, noté α , correspondant au rapport entre le nombre de voies de la branche secondaire et celui de la branche principale en amont du convergent :

$$\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche secondaire}}{\text{nombre de voies de la branche principale}}$$

Le coefficient α est aussi égal au rapport des débits de partage de capacité :

$$\alpha = \frac{q_s^\alpha}{q_p^\alpha}$$

Par conséquent, les débits de partage de capacité s'expriment en fonction du coefficient α :

$$q_p^\alpha = \frac{1}{1+\alpha} C \quad \text{et} \quad q_s^\alpha = \frac{\alpha}{1+\alpha} C$$

Si en revanche l'une des deux demandes en amont du convergent est suffisamment faible pour être inférieure au débit de partage de capacité sur la branche considérée (mais que la somme des demandes est toujours supérieure à la capacité en aval), on observe alors que cette demande est satisfaite. La congestion ne se propage que sur la branche enregistrant la demande élevée. Le débit s'y écoule alors de la demande satisfaite sur l'autre branche.

Par exemple, considérons que la demande sur la branche secondaire, notée D_s , est inférieure au débit de partage de capacité q_s^α . Alors le débit s'écoulant sur la branche principale, noté q_p , est égal à la capacité résiduelle, soit : $q_p = C - D_s$.

En résumé, le débit maximal susceptible de s'écouler sur une branche est :

- soit le débit de partage de capacité sur la branche, que l'on peut déterminer en fonction de C et α ;
- soit, si la demande sur l'autre branche est inférieure au débit de partage de capacité sur sa branche, la capacité résiduelle obtenue en considérant la capacité en aval diminuée de la demande sur cette autre branche.

On peut synthétiser cela en écrivant que l'offre sur une branche est égale à la valeur maximale entre le débit de partage de capacité sur la branche et la capacité résiduelle.

Pour aller plus loin : estimation du coefficient de partage des débits à capacité d'un convergent existant

La valeur du coefficient α peut dépendre d'autres éléments que le nombre de voies, comme la géométrie, la visibilité, le comportement des usagers. Dans le cas d'un convergent existant, il est recommandé de procéder au calage de ce paramètre.

Pour ce faire, il faut disposer d'un recueil de données de débit et de vitesse sur chaque branche constituant le convergent. On discrimine les périodes correspondant à une congestion observée sur les deux branches, en se basant sur les vitesses mesurées sur les branches (vitesses faibles sur les deux branches en amont). La valeur du coefficient α est estimée en calculant le rapport des débits mesurés sur les branches amont.

L'exemple ci-après représente les points de débits sur branches principale et secondaire, correspondant à des vitesses inférieures ou égales à 30 km/h, sur une configuration d'entrée en insertion d'une voie sur une section courante à deux voies de circulation. La droite représentée a pour pente la valeur médiane des rapports de débits mesurés, soit 0,41 (le coefficient de partage théorique des débits à capacité étant de 0,50).

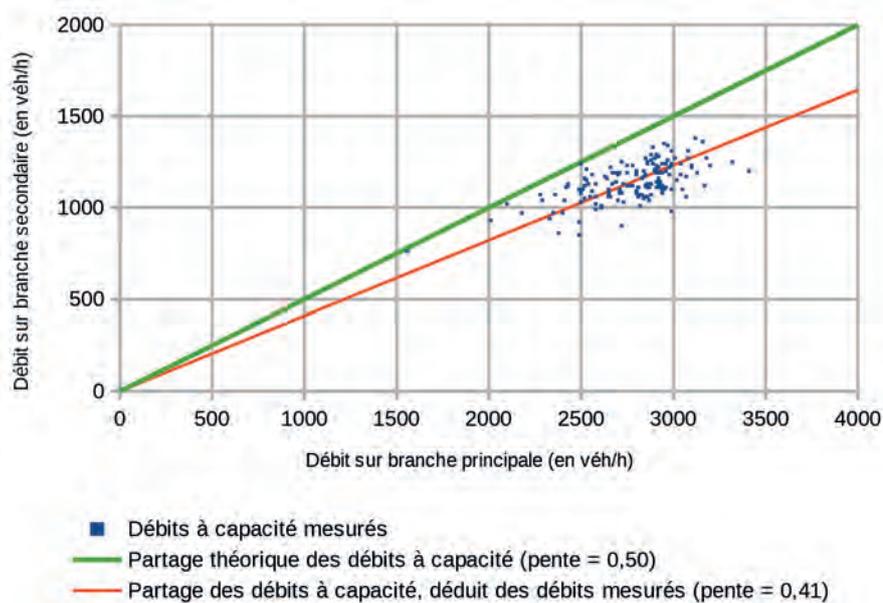


Illustration 7 : comparaison du nuage de points de débits avec la valeur du coefficient de partage théorique des débits à capacité

2.2 Notations

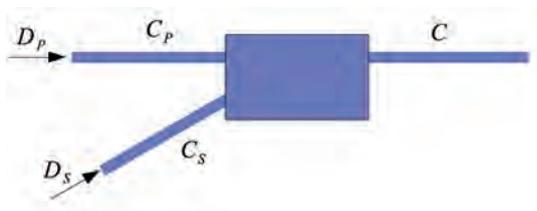


Illustration 8 : convergent ponctuel : notations

- C_p capacité de la branche principale, en amont du convergent ;
- C_s capacité de la branche secondaire (l'entrée), en amont du convergent ;
- C capacité de la branche immédiatement en aval du convergent ;
- D_p demande de débit principal ;
- D_s demande de débit entrant ;
- q_p débit effectif depuis la branche principale ;
- q_s débit effectif entrant ;
- q débit effectif s'écoulant immédiatement en aval du convergent ;
- α coefficient de partage des débits à capacité.

2.3 Courbe de capacité

Sur la courbe de capacité, on peut représenter le point de partage de capacité, noté O , correspondant au fonctionnement du convergent congestionné, conformément à la règle de coopération. Ce point est l'intersection entre la droite de pente α passant par l'origine et la courbe de capacité.

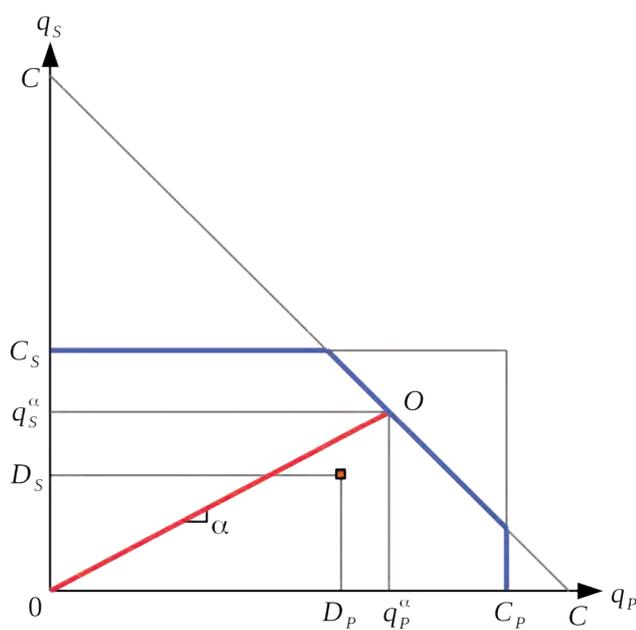


Illustration 9 : courbe de capacité d'un convergent

2.4 Évaluation des conditions de fonctionnement

Pour la suite de la méthode, on considère que les demandes de débit en amont du convergent ne sont pas limitées par la capacité des branches.

$$D_p < C_p \text{ et } D_s < C_s$$

Point de vigilance : cas où les demandes sont écrêtées par la capacité des branches en amont du convergent

On rencontre cette situation lorsque la demande de débit est supérieure à la capacité de la branche en amont du convergent.

$$D_p > C_p \text{ ou } D_s > C_s$$

Dans ce cas, une congestion se forme sur la branche concernée, indépendamment du convergent. La demande qui parvient au convergent, notée d_i est alors écrêtée par la capacité de la branche i .

$$\text{Si } D_p > C_p \text{ alors } d_p = C_p$$

$$\text{Si } D_s > C_s \text{ alors } d_s = C_s$$

► Fonctionnement fluide du convergent

Ce fonctionnement est observé lorsque la somme des demandes est inférieure à la capacité de la branche immédiatement en aval du convergent :

$$D_p + D_s < C$$

Dans ce cas, le convergent reste fluide, les demandes de débit s'écoulent sans contrainte.

$$q_p = D_p ; q_s = D_s ; q = D_p + D_s$$

► Fonctionnement congestionné du convergent

Ce fonctionnement est observé lorsque la somme des demandes est supérieure à la capacité de la branche en aval,

$$D_p + D_s > C$$

Dans ce cas, une congestion se forme au niveau du convergent. Le débit effectif s'écoulant en aval du convergent est limité par la capacité de la branche immédiatement en aval :

$$q = C$$

Pour déterminer les débits effectifs en amont, on commence par calculer les débits de partage de capacité :

$$q_p^\alpha = \frac{1}{1+\alpha} C ; q_s^\alpha = \frac{\alpha}{1+\alpha} C$$

Trois situations sont alors possibles, suivant les valeurs de demande :

• **situation 1**

Conditions : si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s < q_s^\alpha$

alors la congestion se propage uniquement sur la branche principale. Le débit effectif venant de la branche secondaire est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = C - D_s$ et $q_s = D_s$.

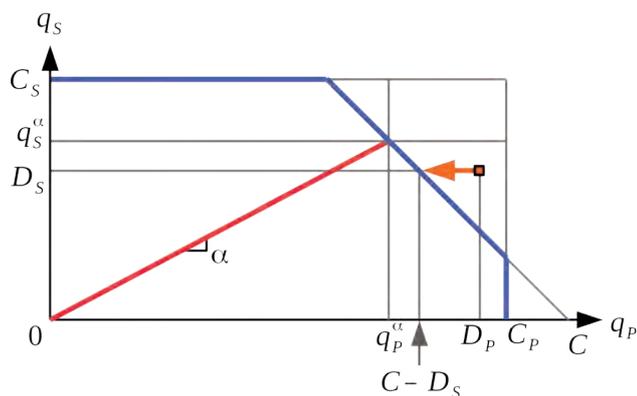


Illustration 10 : projection du point de demande, congestion sur branche principale

• **situation 2**

Conditions : si $D_p < q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$

alors la congestion se propage uniquement sur la branche secondaire. Le débit effectif venant de la branche principale est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = D_p$ et $q_s = C - D_p$.

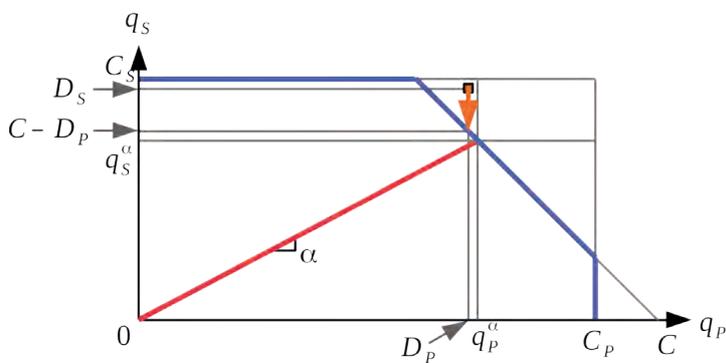


Illustration 11 : projection du point de demande : congestion sur entrée

- **situation 3**

Conditions : si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$

alors la congestion se propage sur la branche principale et sur la branche secondaire. Les débits effectifs sont égaux aux débits de partage de capacité.

Les débits effectifs sont : $q_p = q_p^\alpha$ et $q_s = q_s^\alpha$.

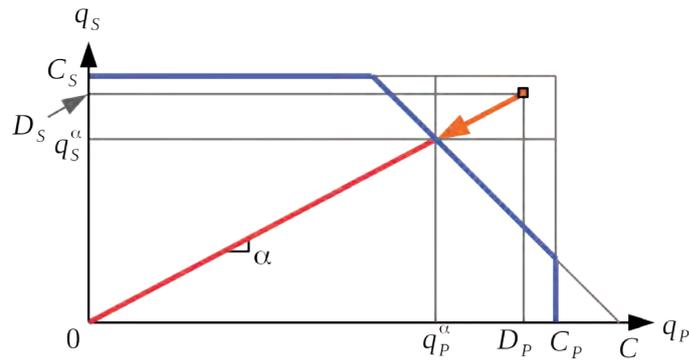


Illustration 12 : projection du point de demande, congestion sur les deux branches

Pour aller plus loin : prise en compte de la chute de capacité d'un convergent

Les études menées sur les convergents ont montré que le débit maximal constaté immédiatement en aval du convergent est inférieur à la capacité de la branche en aval (au-delà de la zone d'influence du convergent). La chute de capacité au niveau d'un convergent est liée à divers phénomènes comme la vitesse et l'accélération des véhicules entrants lors de leur insertion, la variabilité des créneaux intervéhiculaires acceptables pour effectuer une manœuvre, l'adaptation du comportement des usagers sur la section courante (ralentissement, changement de voie vers la gauche), etc.

Dans le cas d'un convergent existant, la chute de capacité peut être estimée à partir de recueils de données de débits et de vitesses sur chaque branche constituant le convergent. Il s'agit de comparer, sur des périodes présentant une saturation du convergent (vitesses élevées en aval, vitesses faibles en amont), la somme des débits mesurés sur les branches amont à la capacité théorique de la branche aval (estimée suivant la méthode proposée en partie 2, chapitre 3.1).

Il est également possible d'estimer cette chute de capacité, en utilisant la méthode des charges (cf. partie 1, chapitre 5). En première approche, on peut considérer la chute de capacité, notée cc , égale à 10 %.

La prise en compte de la chute de capacité dans les calculs se fait en l'appliquant sur la capacité de la branche immédiatement en aval du convergent.

On remplace ainsi le terme C par $(1 - cc) \cdot C$.

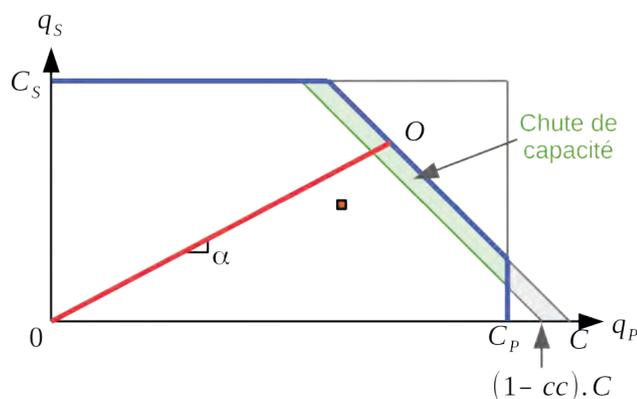


Illustration 13 : chute de capacité sur la courbe de capacité d'un convergent

Application numérique : fonctionnement d'un convergent simple

On projette de construire une entrée en insertion à une voie sur une section de VSA90 à deux voies. La capacité d'une voie de circulation est égale à 2 100 véh/h (cf. partie 1, chapitre 1.4).

$$C_p = C = 4\,200 \text{ véh/h} ; C_s = 2\,100 \text{ véh/h} ; \alpha = \frac{1}{2} = 0,50 .$$

En période de pointe du matin, la demande de débit principal est de 3 090 véh/h et la demande de débit entrant est de 1 280 véh/h.

$$D_p = 3\,090 \text{ véh/h} ; D_s = 1\,280 \text{ véh/h} .$$

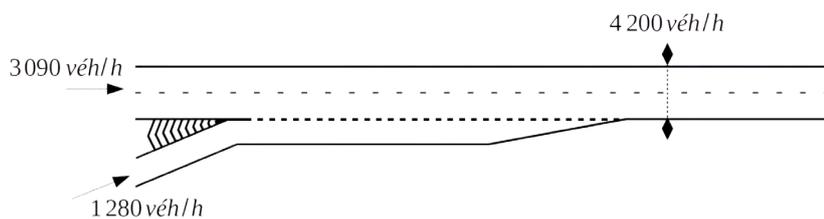


Illustration 14 : répartition des demandes sur le convergent

> Conditions en amont du convergent

$D_p < C_p$ et $D_s < C_s$, donc aucune congestion ne se forme en amont du convergent.

> Conditions de fonctionnement du convergent

$D_p + D_s = 4\,370 \text{ véh/h} > C$, donc une congestion se forme au niveau du convergent. Le débit effectif en aval du convergent est égal à la capacité aval, soit : $q = C = 4\,200 \text{ véh/h}$.

Les débits de partage de capacité étant :

$$q_p^a = \frac{1}{1+\alpha} C = \frac{1}{1+0,50} \times 4\,200 = 2\,800 \text{ véh/h} ; q_s^a = \frac{\alpha}{1+\alpha} C = \frac{0,50}{1+0,50} \times 4\,200 = 1\,400 \text{ véh/h} ,$$

On constate que $D_p > q_p^a$ et $D_s < q_s^a$. Donc la congestion se propage uniquement sur la branche principale. La bretelle d'entrée reste fluide.

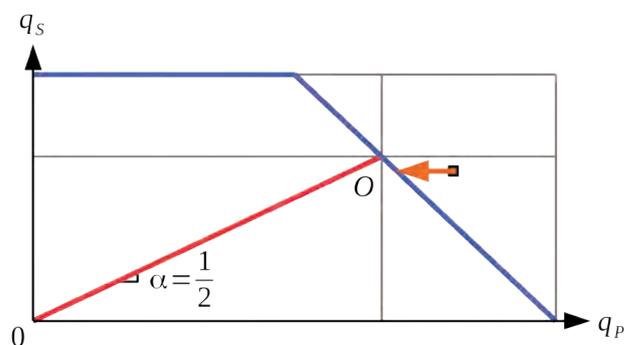


Illustration 15 : courbe de capacité du convergent

Les débits effectifs en amont du convergent sont donc :

$$q_p = C - D_s = 2\,920 \text{ véh/h} \text{ et } q_s = D_s = 1\,280 \text{ véh/h} .$$

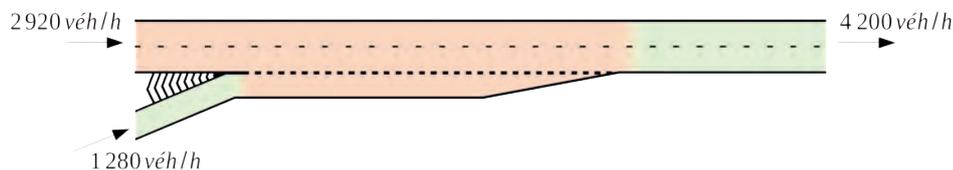


Illustration 16 : débits effectifs sur le convergent

> Prise en compte de la chute de capacité

Si on considère une chute de capacité de 10 %, alors les calculs sont modifiés comme suit :

$$cc = 0,10.$$

L'offre en aval du convergent est égale à : $Q = (1 - cc) \cdot C = (1 - 0,10) \times 4\,200 = 3\,780 \text{ véh/h} .$

$$q_p^\alpha = \frac{1}{1 + \alpha} (1 - cc) \cdot C = \frac{1}{1 + 0,50} \times (1 - 0,10) \times 4\,200 = 2\,520 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s^\alpha = \frac{\alpha}{1 + \alpha} (1 - cc) \cdot C = \frac{0,50}{1 + 0,50} \times (1 - 0,10) \times 4\,200 = 1\,260 \text{ véh/h} .$$

Les débits de partage de capacité sont égaux à :

On constate que $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$. Donc la congestion se propage sur la branche principale et sur la bretelle d'entrée.

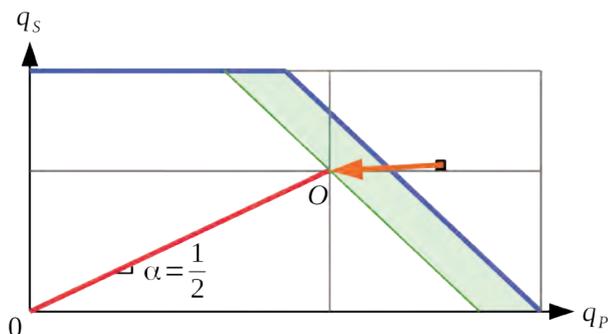


Illustration 17 : courbe de capacité du convergent avec chute de capacité

Les débits effectifs en amont du convergent sont donc :

$$q_p = q_p^\alpha = 2\,520 \text{ véh/h} \text{ et } q_s = q_s^\alpha = 1\,260 \text{ véh/h} .$$

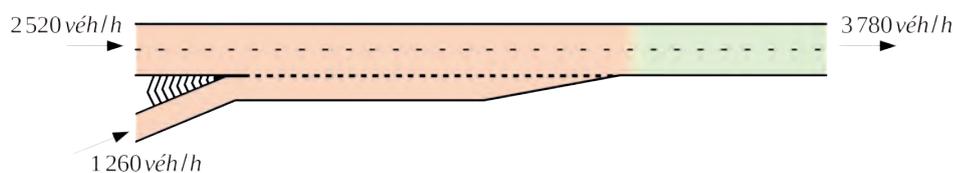


Illustration 18 : débits effectifs sur le convergent avec chute de capacité

2.5 Fonctionnement lorsqu'une congestion remonte de l'aval

La méthode d'évaluation du fonctionnement d'un convergent simple présentée précédemment est toujours valable. Les demandes de débit des branches en amont du convergent sont comparées à la capacité de la branche aval, contrainte par l'offre, notée Q .

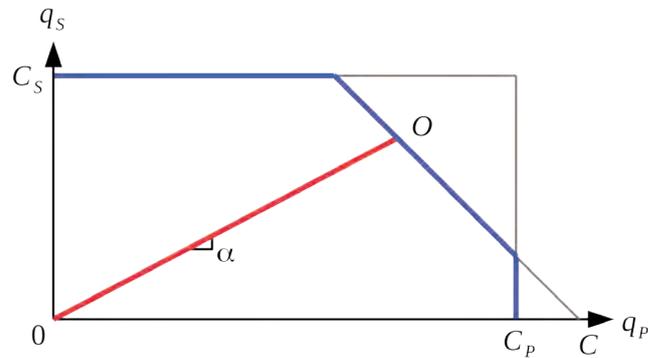


Illustration 19 : courbe de capacité d'un convergent sans contrainte en aval

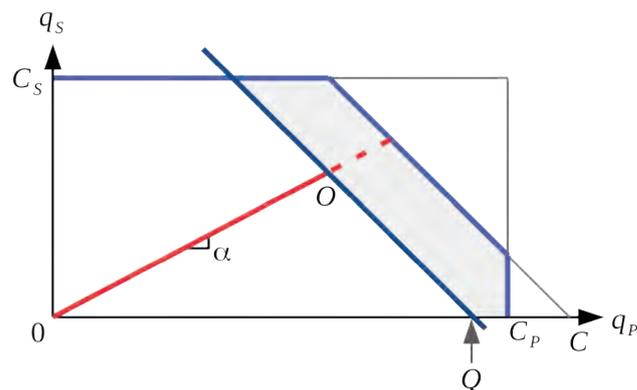


Illustration 20 : courbe de capacité d'un convergent avec contrainte en aval

Point de vigilance : cas d'un convergent déjà congestionné

Si le convergent présente déjà un fonctionnement congestionné, il s'agit de comparer les débits effectifs en amont à la capacité contrainte par l'offre en aval.

3. Fonctionnement d'un divergent simple

3.1 Principe

Le divergent permet à des véhicules issus de la branche principale de choisir entre deux itinéraires : soit rester sur la branche principale, soit sortir en empruntant la branche secondaire. Le dispositif de sortie peut être organisé de plusieurs façons : déboîtement, pseudo-affectation ou affectation d'une ou de deux voies.

Pour garantir l'écoulement fluide du trafic, il est nécessaire que la demande de trafic allant sur chaque branche en aval du divergent soit inférieure à la capacité respective de chaque branche. En revanche, si une demande sur une branche est supérieure à sa capacité, une congestion se forme sur cette branche et se propagera vers l'amont du divergent.

Point de vigilance : origine de la congestion dans un divergent

Il est fréquent qu'une congestion se propage depuis une sortie alors que la demande ne dépasse pas nécessairement la capacité de la branche. D'autres facteurs, comme la capacité du carrefour de raccordement, peuvent être source de saturation. Dans ces cas de figure, ce n'est pas la capacité de la bretelle qui contraint la demande, mais l'offre en aval de celle-ci.

Cette congestion contraindra à la fois la demande allant vers la branche saturée et celle allant vers l'autre branche. Pour déterminer le débit effectif allant vers l'autre branche, on émet l'hypothèse du fonctionnement FIFO (« first in, first out ») du divergent. Selon ce principe, l'ordre de passage des véhicules au niveau du divergent correspond à l'ordre d'arrivée des véhicules en amont du divergent. Les véhicules sortants obligent les véhicules en mouvement direct à subir le même état de trafic, bien que la branche principale ne présente aucune contrainte en aval.

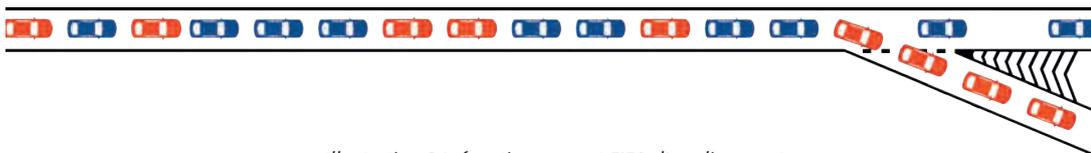


Illustration 21: fonctionnement FIFO d'un divergent

Par ce principe, les débits effectifs s'écoulent sur les deux branches suivant les mêmes proportions définies par les demandes de débit.

Considérons D_p et D_s les demandes de débit respectivement sur la section courante et en sortie, en aval du divergent. Si la demande de débit sortant est supérieure à la capacité de la sortie, notée C_s , le débit s'écoulant en sortie, noté q_s , est égal à cette capacité.

$$q_s = C_s.$$

Le débit s'écoulant alors en section courante, immédiatement en aval du divergent (noté q_p), se calcule par une simple règle de trois :

$$q_p = \frac{D_p}{D_s} C_s.$$

On définit un paramètre β , appelé **coefficient directionnel**, correspondant à la proportion de la demande de trafic amont souhaitant emprunter la branche de sortie :

$$\beta = \frac{\text{demande de débit souhaitant sortir}}{\text{demande de débit total en amont du divergent}} = \frac{D_s}{D_p + D_s}.$$

Les demandes de débit peuvent ainsi s'exprimer en fonction de β :

$$D_s = \beta \cdot (D_p + D_s) \text{ et } D_p = (1 - \beta) \cdot (D_p + D_s).$$

Dans le cas précédent, le débit s'écoulant sur la section courante immédiatement en aval du divergent s'exprime en fonction de β et de C_s :

$$q_p = \frac{1 - \beta}{\beta} C_s.$$

Le débit s'écoulant en amont du divergent, noté q , est égal à la somme des débits effectifs immédiatement en aval. Il peut également s'exprimer en fonction de β et de C_s :

$$q = q_p + q_s = \frac{1}{\beta} C_s.$$

3.2 Notations

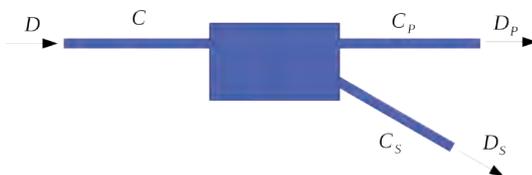


Illustration 22 : divergent ponctuel : notations

- C capacité de la branche en amont du divergent ;
- C_s capacité de la branche secondaire (la sortie) ;
- C_p capacité de la branche principale en aval du divergent ;
- D demande de débit en amont du divergent ;
- D_p demande de débit restant sur la branche principale ;
- D_s demande de débit sortant de la branche principale ;
- q_p débit effectif sur la branche principale immédiatement en aval du divergent ;
- q_s débit effectif sortant sur la bretelle ;
- q débit effectif s'écoulant en amont du divergent ;
- β coefficient directionnel tel que $\beta = \frac{D_s}{D} = \frac{D_s}{D_p + D_s}$.

3.3 Courbe de capacité¹⁰

Sur la courbe de capacité, le coefficient directionnel β se représente indirectement, en positionnant le point de demande sur le diagramme. La droite reliant le point de demande à l'origine a une pente p qui s'exprime comme une fonction de β :

$$p = \frac{D_p}{D_s} = \frac{\beta}{1 - \beta}$$

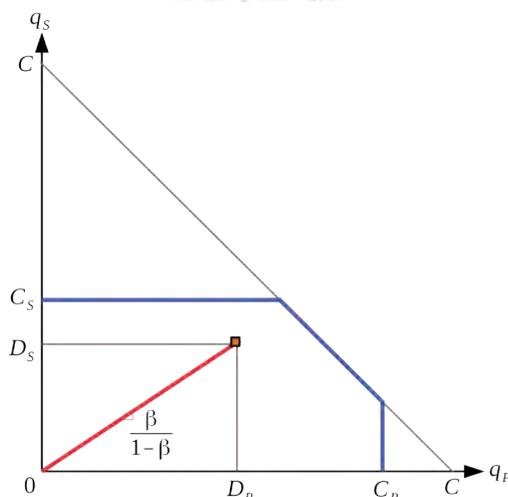


Illustration 23 : courbe de capacité d'un divergent

¹⁰ La représentation graphique de la capacité d'un divergent, ainsi que les principes de projection présentés dans la suite du chapitre, sont issus de réflexions internes au Cerema, menées par A. Duret.

3.4 Évaluation des conditions de fonctionnement

Pour la suite de la méthode, on considère que la demande de débit en amont du divergent n'est pas limitée par la capacité de la branche.

$$D < C$$

Point de vigilance : cas où la demande est écrêtée par la capacité de la branche en amont du divergent

On rencontre cette situation lorsque la demande de débit est supérieure à la capacité de la branche en amont du divergent.

$$D > C$$

Dans ce cas, une congestion se forme sur la branche, indépendamment du divergent. La demande qui parvient au divergent, notée d , est alors écrêtée par la capacité de la branche.

$$\text{Si } D > C, \text{ alors } d = C$$

Les demandes sur les branches en aval du divergent, notées d_p et d_s , sont déterminées en appliquant le coefficient directionnel.

$$d_s = \beta \cdot C \text{ et } d_p = (1-\beta) \cdot C$$

► Fonctionnement fluide du divergent

Ce fonctionnement est observé lorsque les demandes de débit restant et sortant sont respectivement inférieures à la capacité de la branche principale et de la sortie immédiatement en aval du divergent :

$$D_p < C_p \text{ et } D_s < C_s.$$

Dans ce cas, le divergent reste fluide, les trafics s'écoulent sans contrainte.

$$q = D ; q_p = D_p ; q_s = D_s.$$

► Fonctionnement congestionné du divergent

Ce fonctionnement est observé lorsque l'une des demandes est supérieure à la capacité de la branche de destination, immédiatement en aval du divergent :

$$D_p > C_p \text{ ou } D_s > C_s.$$

Dans ce cas, une congestion se forme au niveau de cette branche. Deux situations sont possibles, suivant la branche concernée :

- **situation 1 : congestion depuis la branche de sortie**

Conditions : si $D_p < C_p$ et $D_s > C_s$,

alors la congestion se propage depuis la branche de sortie.

Les débits effectifs sont : $q = \frac{1}{\beta} C_s$; $q_p = \frac{1-\beta}{\beta} C_s$; $q_s = C_s$.

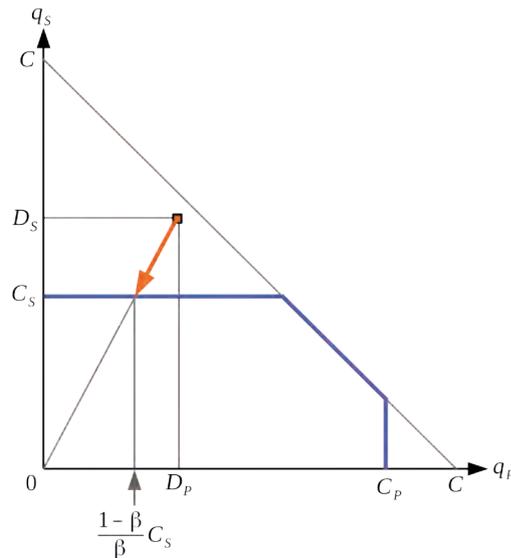


Illustration 24 : projection du point de demande, congestion depuis la sortie

- **situation 2**

Conditions : si $D_p > C_p$ et $D_s < C_s$,

alors la congestion se propage depuis la branche principale.

Les débits effectifs sont : $q = \frac{1}{1-\beta} C_p$; $q_p = C_p$; $q_s = \frac{\beta}{1-\beta} C_p$.

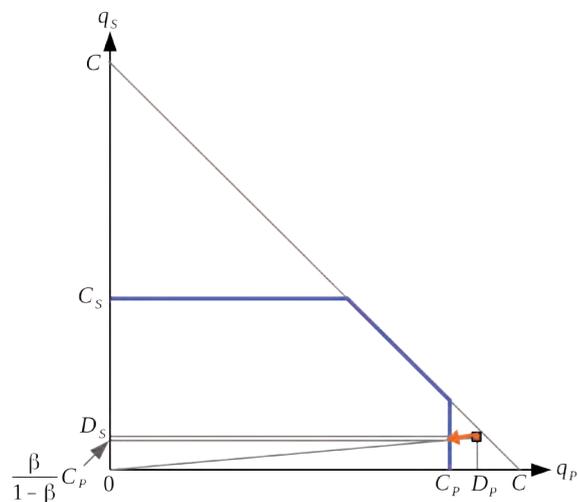


Illustration 25 : projection du point de demande, congestion depuis la branche principale

Point de vigilance : discussions autour de l'hypothèse FIFO

Le principe du FIFO peut être une hypothèse particulièrement pessimiste, car il interdit tout dépassement des véhicules en attente de sortir par des véhicules souhaitant rester sur la branche principale. Certaines configurations de sorties sont telles qu'il peut s'organiser une file d'attente sur la voie de droite pour les véhicules sortants, laissant ainsi des conditions de circulation fluide sur les voies de gauche (dans un tel cas, le débit effectif restant sur la branche est égal à la demande du mouvement direct).

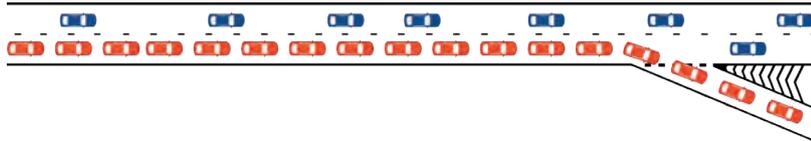


Illustration 26 : fonctionnement non FIFO d'un divergent

Une telle hypothèse (appelée « non FIFO ») peut être éventuellement appliquée dans le cas où la section courante est favorable à une affectation des véhicules selon leur destination (sorties en affectation, déboîtement sur section courante à trois voies) ou si le dépassement de la capacité en sortie est suffisamment faible pour contenir la congestion sur une voie de circulation, sans débordement sur les autres voies.

Dans ce cas, les débits effectifs s'expriment ainsi : $q = D_p + C_s$; $q_p = D_p$; $q_s = C_s$.

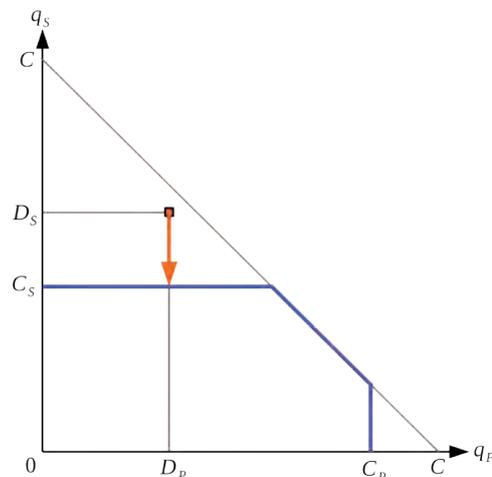


Illustration 27 : projection du point de demande selon un fonctionnement non FIFO

Toutefois, dans le cas d'un tel fonctionnement, des frictions peuvent apparaître entre les véhicules en mouvement direct cherchant à trouver un créneau pour aller sur les voies les plus à gauche et les véhicules sortants cherchant à s'affecter dans la file d'attente. Ces phénomènes sont autant de facteurs de « relâchement » de l'hypothèse FIFO.

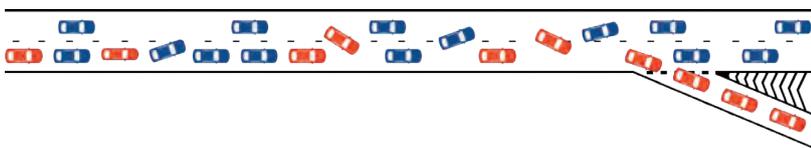


Illustration 28 : fonctionnement d'un divergent avec relâchement du FIFO

Application numérique : fonctionnement d'un divergent simple

Le réaménagement du carrefour de surface d'un diffuseur sur VSA90 contraint la capacité en sortie à 1 500 véh/h. Le type de divergent relié à ce carrefour est une sortie en affectation sur VSA à trois voies. La capacité considérée pour une voie de circulation est égale à 2 100 véh/h.

$C = 6\,300 \text{ véh/h}$; $C_p = 4\,200 \text{ véh/h}$; l'offre en sortie est égale à $Q_s = 1\,500 \text{ véh/h}$.

En période de pointe du soir, la demande de débit restant sur la branche principale est de 3 670 véh/h et la demande de débit sortie est de 1 620 véh/h.

$$D = 5\,290 \text{ véh/h} ; D_s = 1\,620 \text{ véh/h} ; D_p = 3\,670 \text{ véh/h} ; \beta = \frac{D_s}{D} = 0,31 .$$

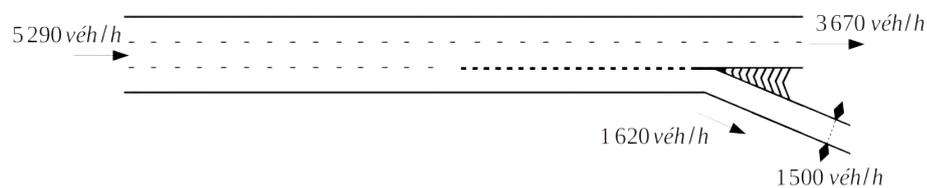


Illustration 29 : répartition des demandes sur le divergent

> Conditions en amont du divergent

$D < C$, donc aucune congestion ne se forme en amont du divergent.

> Conditions de fonctionnement du divergent (hypothèse FIFO)

$D_p < C_p$ et $D_s > Q_s$, donc une congestion se forme sur la sortie. Les débits effectifs sont alors :

$$q = \frac{1}{\beta} Q_s = \frac{1}{0,31} \times 1\,500 = 4\,898 \text{ véh/h} ;$$

$$q_p = \frac{1-\beta}{\beta} Q_s = \frac{1-0,31}{0,31} \times 1\,500 = 3\,398 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s = Q_s = 1\,500 \text{ véh/h} .$$

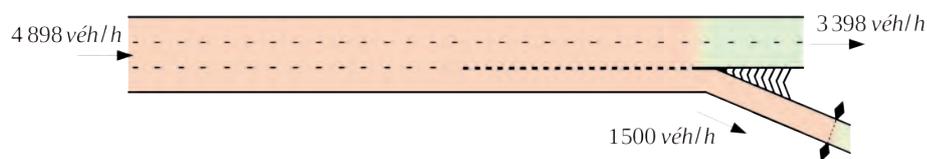


Illustration 30 : débits effectifs sur le divergent

> Conditions de fonctionnement du divergent (hypothèse non FIFO)

Les débits effectifs sont :

$$q = D_p + Q_s = 5\,170 \text{ véh/h} ; q_s = Q_s = 1\,500 \text{ véh/h} ; q_p = D_p = 3\,670 \text{ véh/h} .$$

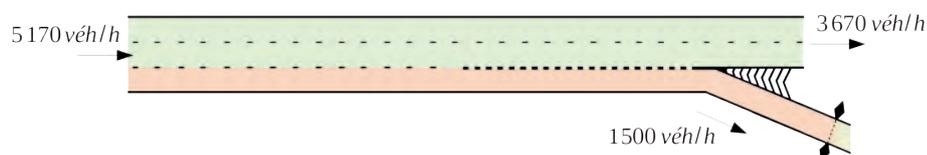


Illustration 31 : débits effectifs sur le divergent (hypothèses non FIFO)

3.5 Fonctionnement lorsqu'une congestion remonte de l'aval

La méthode d'évaluation du fonctionnement d'un divergent simple présentée précédemment est toujours valable. La demande de débit allant vers la branche congestionnée est comparée à la capacité de la branche, contrainte par l'offre, notée Q_p ou Q_s selon la branche touchée par la congestion.

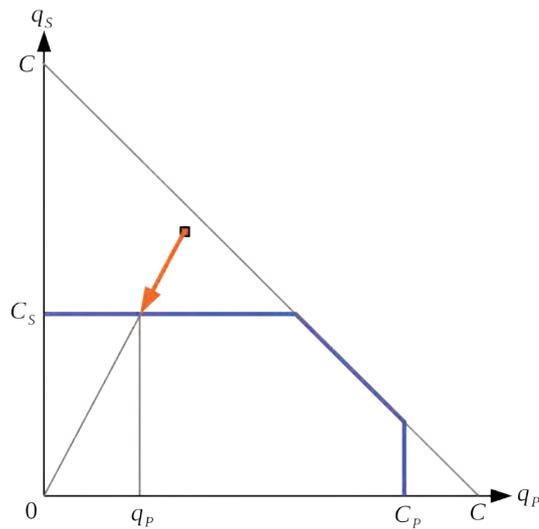


Illustration 32 : courbe de capacité d'un divergent sans contrainte en aval

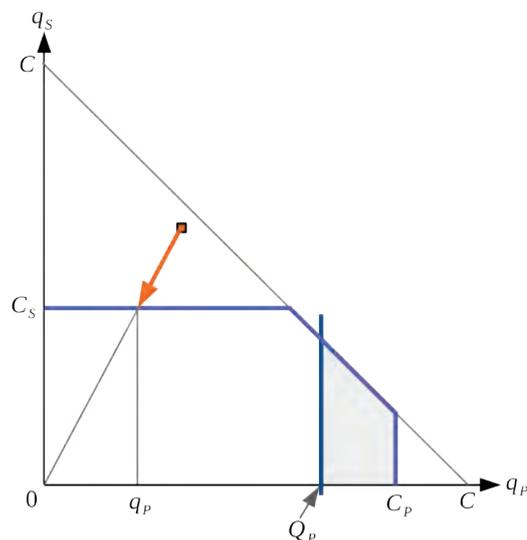


Illustration 33 : courbe de capacité d'un divergent avec contrainte en aval sur la branche principale

Point de vigilance : cas d'un divergent déjà congestionné

Si le divergent présente déjà un fonctionnement congestionné, il s'agit de comparer le débit effectif en amont à la capacité contrainte par l'offre en aval.

4. Fonctionnement d'un entrecroisement simple

On considère simples les entrecroisements constitués de l'enchaînement direct d'une entrée à une voie et d'une sortie à une voie, reliées par une voie d'entrecroisement et dont le nombre de voies composant la section courante est constant entre l'amont et l'aval.

4.1 Principe et hypothèses

► Propriétés d'un changement de voie

Un changement de voie est l'action de passer d'une voie à la voie adjacente. La longueur de changement de voie est la longueur nécessaire à un véhicule pour effectuer une manœuvre de changement de voie.



Illustration 34 : représentation de la longueur de changement de voie

Elle est notée L_{cv} et sa valeur est fixée comme la distance parcourue pendant une durée estimée à 3 secondes à la vitesse libre (ou à la vitesse limite autorisée).

Vitesse pratiquée (en km/h)	50	70	90	110
Longueur de changement de voie (en m)	40	60	75	90

On considère qu'un véhicule effectuant un changement de voie occupe, sur toute la longueur nécessaire à sa manœuvre, à la fois sa voie d'origine et sa voie de destination. Pendant la durée de sa manœuvre, le véhicule empêche tout autre véhicule de circuler sur les deux voies utilisées pour sa manœuvre. Ce véhicule « surcharge » la section sur la longueur de sa manœuvre, puisqu'il compte comme deux véhicules.

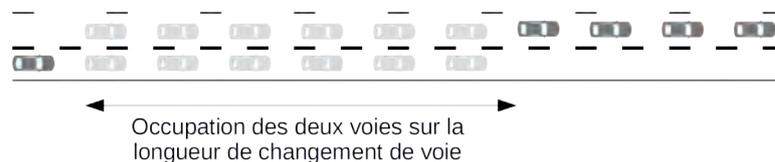


Illustration 35 : effet sur l'occupation des voies d'un changement de voie par un véhicule

Point de vigilance : valeur de la longueur de changement de voie

À la date d'édition du présent ouvrage, une incertitude demeure sur la valeur fixée pour la longueur de changement de voie. Ce paramètre nécessite d'être fiabilisé par des campagnes de mesure de trafic.

► Application à des débits – la notion de charge

Pour généraliser le principe d'un changement de voie individuel à l'ensemble des véhicules souhaitant effectuer cette manœuvre sur une section donnée, certaines hypothèses sont considérées :

- la longueur de changement de voie est identique pour chaque véhicule ;
- l'ensemble des changements de voie s'effectuent sur une zone donnée, appelée « zone de changement de voie » ;
- la répartition des manœuvres est uniforme sur l'ensemble de cette zone.

Pour une manœuvre donnée, on appelle « charge » la traduction, en débit, de la sur-occupation des voies par les véhicules effectuant cette manœuvre. En règle générale, une voie de circulation supporte trois types de charge :

- charge générée par les véhicules restant sur la voie (en mouvement direct) ;
- charge générée par les véhicules entrant sur la voie ;
- charge générée par les véhicules sortant de la voie.

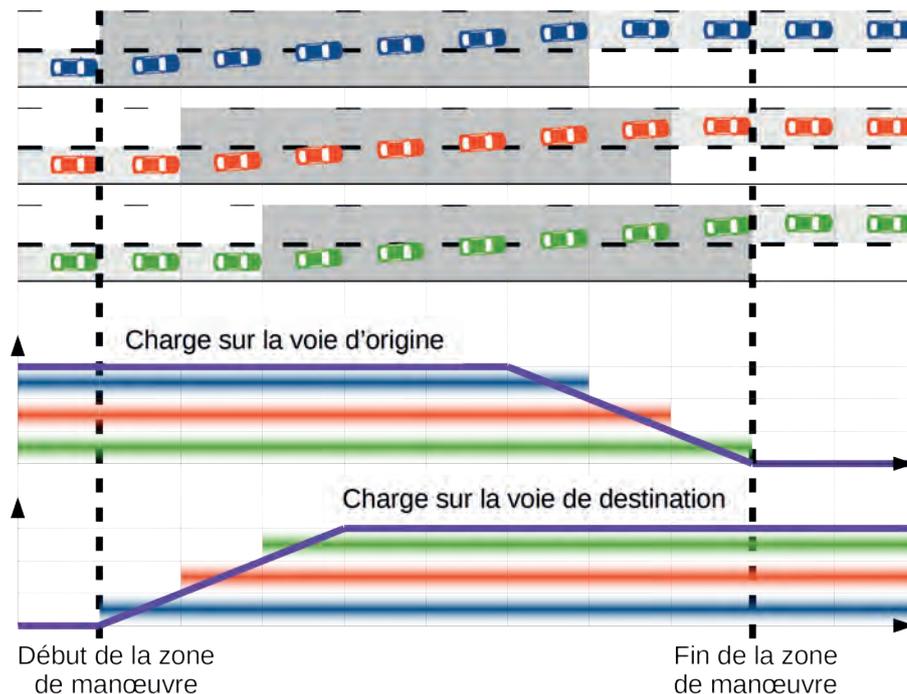


Illustration 36 : charge correspondant à trois véhicules changeant de voie

► Calcul de la charge

Avant de calculer la charge sur un entrecroisement simple, il est nécessaire de définir la zone de changement de voie. On considère que cette zone, notée Z_{cv} , s'étend sur toute la longueur de marquage en T2-5u. Cette longueur diffère donc de la longueur de la voie d'entrecroisement, notée Z et correspondant à la distance entre les points E.1,00m et S.1,00m (cf. guide VSA90/110).

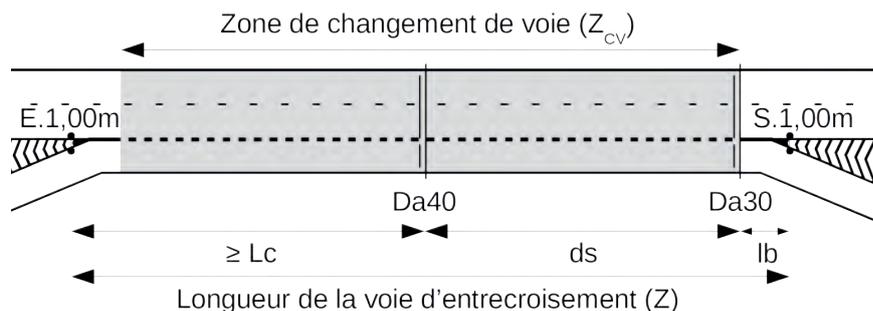


Illustration 37 : localisation de la zone de changement de voie sur l'entrecroisement

Le calcul de la charge totale supportée par la branche principale (section courante) ou la branche secondaire (voie d'entrecroisement) consiste à additionner l'ensemble des charges supportées par cette branche, c'est-à-dire :

- la charge générée par les véhicules en mouvement direct ;
- les charges générées par les véhicules entrants ;
- les charges générées par les véhicules sortants.

Graphiquement, la variation du niveau de charge supportée par une branche prend la forme d'un profil de charge.

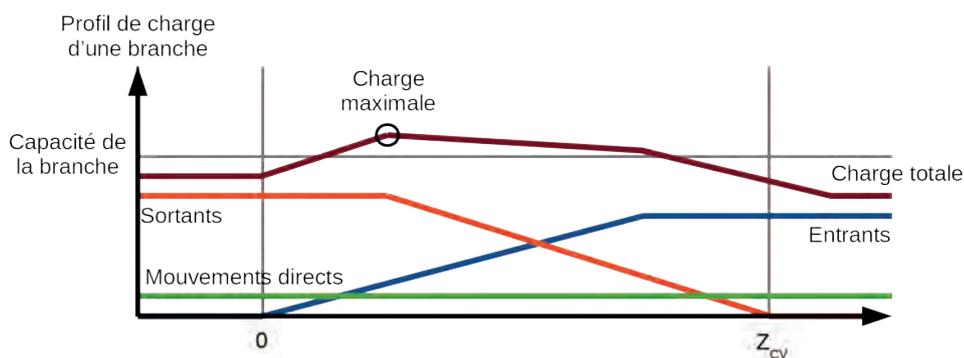


Illustration 38 : représentation graphique de la variation de la charge sur une branche (profil de charge)

Le calcul s'appuie sur les matrices de répartition des entrants et des sortants. Ces matrices donnent, par pas de longueur correspondant à la longueur de changement de voie L_{cv} , la répartition, pour 100 véhicules, entre la branche principale et la branche secondaire.

Pour chaque branche, le niveau maximal de charge est ensuite comparé à la capacité.

- Si la charge maximale est inférieure à la capacité, alors la branche n'est pas saturée. Elle n'est pas à l'origine d'une congestion.
- Si la charge maximale est supérieure à la capacité, alors la branche est saturée. La congestion peut éventuellement s'étendre sur l'autre branche.

Répartition pour 100 entrants

	Pas de longueur ($n \times L_{CV}$)												
	90 km/h	110 km/h	0	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750
			0	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
Zone de changement de voie (Z_{CV})	90 km/h : 300 m 110 km/h : 360 m		0	33	67	100	100						
			100	100	67	33	0						
	90 km/h : 450 m 110 km/h : 540 m		0	20	40	60	80	100	100				
			100	100	80	60	40	20	0				
90 km/h : 600 m 110 km/h : 720 m		0	14	29	43	57	71	86	100	100			
		100	100	86	71	57	43	29	14	0			
90 km/h : 750 m 110 km/h : 900 m		0	11	22	33	44	56	67	78	89	100	100	
		100	100	89	78	67	56	44	33	22	11	0	

Illustration 39 : matrice de répartition des entrants sur un entrecroisement

Répartition pour 100 sortants

	Pas de longueur ($n \times L_{CV}$)												
	90 km/h	110 km/h	0	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750
			0	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
Zone de changement de voie (Z_{CV})	90 km/h : 300 m 110 km/h : 360 m		100	100	67	33	0						
			0	33	67	100	100						
	90 km/h : 450 m 110 km/h : 540 m		100	100	80	60	40	20	0				
			0	20	40	60	80	100	100				
90 km/h : 600 m 110 km/h : 720 m		100	100	86	71	57	43	29	14	0			
		0	14	29	43	57	71	86	100	100			
90 km/h : 750 m 110 km/h : 900 m		100	100	89	78	67	56	44	33	22	11	0	
		0	11	22	33	44	56	67	78	89	100	100	

Illustration 40 : matrice de répartition des sortants d'un entrecroisement

Application numérique : calcul de la charge sur un entrecroisement simple

L’aménagement d’un nouvel échangeur sur une VSA90 à 2x2 voies nécessite la création d’une voie d’entrecroisement. Les demandes de débit attendues au niveau de la future zone d’entrecroisement sont définies par la matrice OD suivante.

Origine \ Destination	VSA	Sortie	Total
VSA	2835	945	3780
Entrée	1260	140	1400
Total	4095	1085	5180

Illustration 41 : matrice OD de la demande

La section d’entrecroisement présente une zone de changement de voie de 300 m de longueur (longueur du marquage en T2-5u). Il s’agit de s’assurer du fonctionnement de l’entrecroisement.

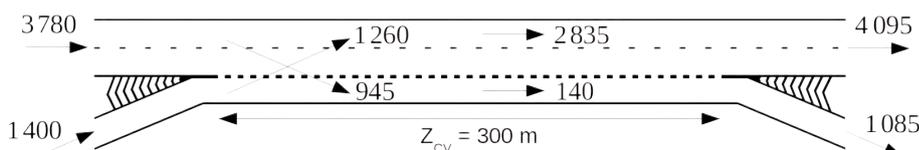


Illustration 42 : répartition des demandes et matrice OD sur l’entrecroisement

La capacité d’une voie est égale à 2 100 véh/h. Donc la capacité de la branche principale (section courante à 2 voies) est de 4 200 véh/h. La capacité de la branche secondaire (voie d’entrecroisement) est de 2 100 véh/h.

Le calcul de la charge s’effectue par application des matrices de répartition des entrants et des sortants, pour une zone de changement de voie de 300 m.

Pas de longueur (n x L _{CV})	90 km/h				
	0	75	150	225	300
Mouvement direct	2 835	2 835	2 835	2 835	2 835
	140	140	140	140	140
Entrants	0	420	840	1 260	1 260
	1 260	1 260	840	420	0
Sortants	945	945	630	315	0
	0	315	630	945	945
Charge totale	3 780	4 200	4 305	4 410	4 095
	1 400	1 715	1 610	1 505	1 085

Illustration 43 : calcul de la charge à partir des matrices de répartition

On constate que la charge totale supportée par la branche principale dépasse sa capacité, en particulier au niveau des pas de longueur 75 m, 150 m et 225 m. Une congestion va donc apparaître.

Les profils de charge peuvent être représentés graphiquement. Le dépassement de la capacité de la branche principale est visible.

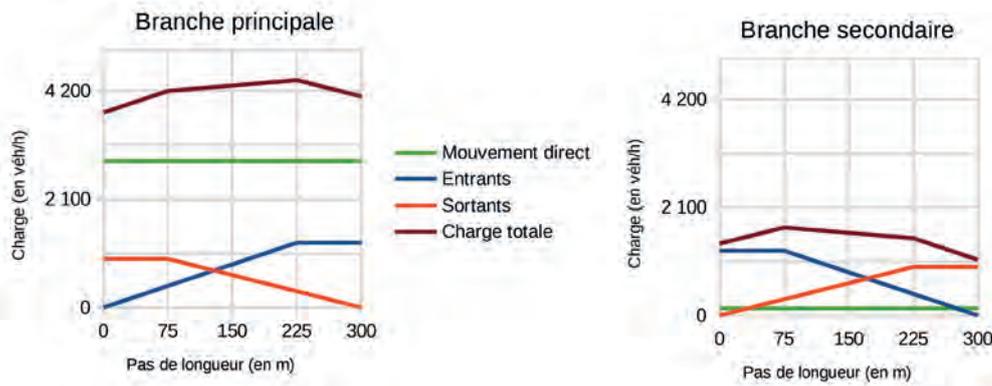


Illustration 44 : profil de charge sur chaque branche de l'entrecroisement

Pour aller plus loin : reformulation du calcul de charge

Pour vérifier que la charge maximale supportée par une branche ne dépasse pas sa capacité, il n'est pas nécessaire de calculer la charge sur l'ensemble des pas de longueur. En effet, la charge maximale, appelée « pointe de charge », est atteinte uniquement en deux points de la zone de changement de voie :

- soit à une distance L_{cv} en aval du début de la zone de changement de voie ;
- soit à une distance L_{cv} en amont de la fin de la zone de changement de voie.

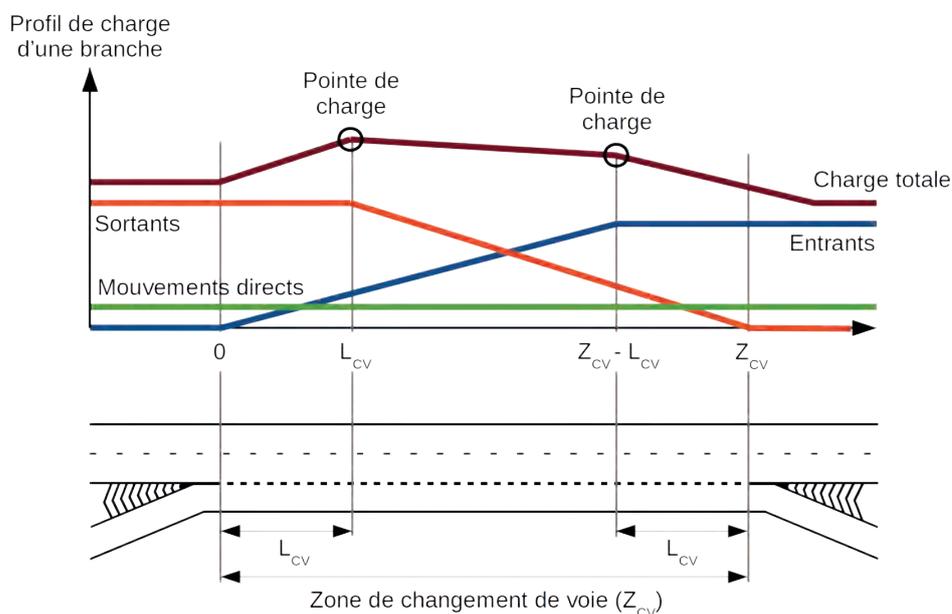


Illustration 45 : localisation des points pouvant présenter un niveau de charge maximal

On considère les notations suivantes, pour la matrice OD de la demande :

Origine \ Destination	Branche principale	Branche secondaire
Branche principale	$D_{P,P}$	$D_{P,S}$
Branche secondaire	$D_{S,P}$	$D_{S,S}$

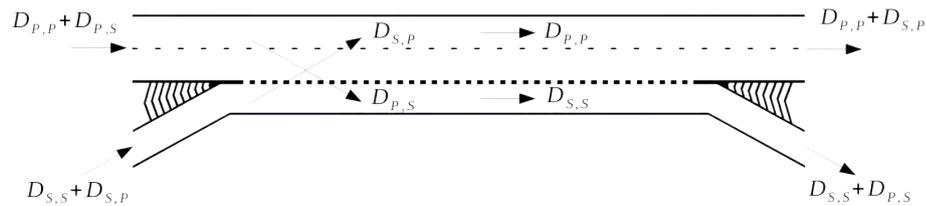


Illustration 46 : localisation des demandes de la matrice OD sur l'entrecroisement

On définit enfin le nombre n_{CV} , correspondant au nombre maximal de manœuvres qu'un véhicule donné peut effectuer le long de la zone de changement de voie, en plus de son changement de direction.

$$n_{CV} = E \left[\max \left(1; \frac{Z_{CV}}{L_{CV}} - 1 \right) \right]$$

Sa valeur est donnée par les tableaux ci-dessous :

Pour $V = 90$ km/h

Z_{CV} (en m)	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750
n_{CV}	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Pour $V = 110$ km/h

Z_{CV} (en m)	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
n_{CV}	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9

La détermination de la charge maximale se limite à un calcul des pointes de charge, en seulement quatre points.

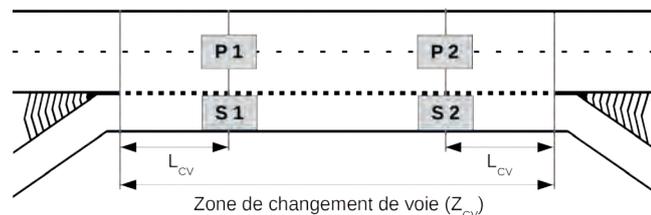


Illustration 47 : localisation des points P1, P2, S1 et S2 sur l'entrecroisement

$$\begin{aligned} \text{En P1 : } & D_{P,P} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} ; & \text{en P2 : } & D_{P,P} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} ; \\ \text{en S1 : } & D_{S,S} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} ; & \text{en S2 : } & D_{S,S} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} . \end{aligned}$$

Application numérique : calcul des pointes de charge sur un entrecroisement simple

On reprend l'exemple précédent, à savoir une voie d'entrecroisement sur VSA90 à 2x2 voies dont la longueur de la zone de changement de voie est de 300 m. La matrice OD est rappelée.

Origine \ Destination	VSA	Sortie	TOTAL
VSA	2835	945	3780
Entrée	1260	140	1400
Total	4095	1085	5180

Illustration 48 : matrice OD à la demande

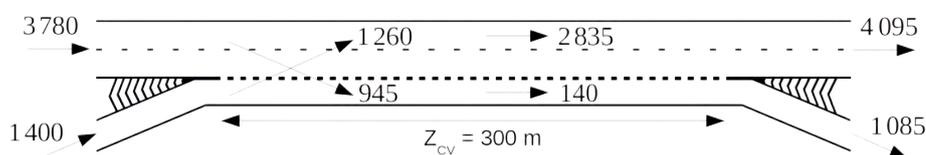


Illustration 49 : répartition des demandes et matrice OD sur l'entrecroisement

La capacité d'une voie est égale à 2 100 véh/h. Donc la capacité de la branche principale (section courante à 2 voies) est de 4 200 véh/h. La capacité de la branche secondaire (voie d'entrecroisement) est de 2 100 véh/h.

Comme la VLA est de 90 km/h, la longueur de changement de voie est fixée à $L_{CV} = 75 \text{ m}$. Ainsi le nombre maximal de changements de voie est $n_{CV} = 3$.

On peut ainsi calculer les pointes de charge :

$$\text{en P1 : } D_{P,P} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} = 3780 + \frac{1260}{3} = 4200 \text{ véh/h ;}$$

$$\text{en P2 : } D_{P,P} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} = 4095 + \frac{945}{3} = 4410 \text{ véh/h ;}$$

$$\text{en S1 : } D_{S,S} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} = 1400 + \frac{945}{3} = 1715 \text{ véh/h ;}$$

$$\text{en S2 : } D_{S,S} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} = 1085 + \frac{1260}{3} = 1505 \text{ véh/h .}$$

On retrouve les pointes de charge calculées précédemment à partir des matrices de répartition des entrants et des sortants, en particulier la charge maximale de 4 410 véh/h sur la branche principale, supérieure à sa capacité (4 200 véh/h).

► Application sur le fonctionnement

La vérification du fonctionnement d'un entrecroisement simple se résume à l'étude des pointes de charge au niveau des points P1, P2, S1 et S2. Plus spécifiquement, la détermination des débits effectifs passe par l'assimilation de l'entrecroisement à un convergent, présentant les propriétés de partage des débits à capacité (cf. partie 1, chapitre 2). La demande de débit arrivant sur ce convergent intègre quant à elle une hypothèse FIFO (cf. partie 1, chapitre 3).

4.2 Notations

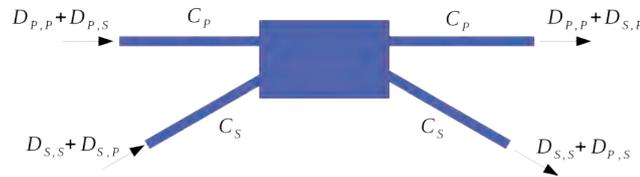


Illustration 50 : configuration d'un entrecroisement simple

La branche principale est notée P et la branche secondaire est notée S .

- C_i capacité de la branche i (réputée identique à l'amont et à l'aval) ;
- D_i demande de débit amont sur la branche i ;
- $D_{i,j}$ demande débit, dont l'origine est la branche i et la destination est la branche j ;
- q_i débit effectif sur la branche i .

Les demandes s'expriment dans une matrice OD :

Origine \ Destination	Branche principale	Branche secondaire
Branche principale	$D_{p,p}$	$D_{p,s}$
Branche secondaire	$D_{s,p}$	$D_{s,s}$

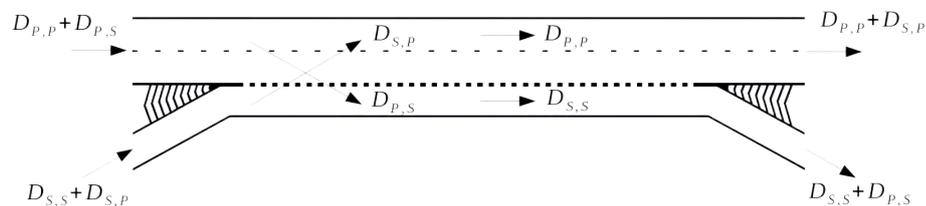


Illustration 51 : localisation des demandes de la matrice OD sur l'entrecroisement

- α coefficient de partage des débits à capacité, tel que

$$\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche secondaire}}{\text{nombre de voies de la branche principale}} ;$$
- β_p coefficient directionnel depuis la branche principale, tel que $\beta_p = \frac{D_{p,s}}{D_p}$;
- β_s coefficient directionnel depuis la branche secondaire, tel que $\beta_s = \frac{D_{s,p}}{D_s}$;
- n_{cv} nombre maximal de manœuvres qu'un véhicule donné peut effectuer le long de la zone de changement de voie, en plus de son changement de direction :

$$n_{cv} = E \left[\max \left(1, \frac{Z_{cv}}{L_{cv}} - 1 \right) \right]$$

avec :

- L_{cv} longueur de changement de voie,
- Z_{cv} longueur de la zone de changement de voie.

4.3 Évaluation des conditions de fonctionnement

Pour la suite de la méthode, on considère que les demandes de débit en amont de l'entrecroisement ne sont pas limitées par la capacité des branches.

$$D_p < C_p \text{ et } D_s < C_s$$

Point de vigilance : cas où les demandes sont écrêtées par la capacité des branches en amont de l'entrecroisement

On rencontre cette situation lorsque la demande de débit est supérieure à la capacité de la branche en amont de l'entrecroisement.

$$D_p > C_p \text{ ou } D_s > C_s$$

Dans ce cas, une congestion se forme sur la branche concernée, indépendamment de l'entrecroisement. La demande qui parvient à l'entrecroisement, notée d_i , est alors écrêtée par la capacité de la branche i . Et les demandes de débits composant la matrice OD, notées d_{ij} , sont déterminées en appliquant les coefficients directionnels.

$$\text{Si } D_p > C_p \text{ alors } d_p = C_p ; d_{p,p} = (1 - \beta_p) \cdot C_p ; d_{p,s} = \beta_p \cdot C_p .$$

$$\text{Si } D_s > C_s \text{ alors } d_s = C_s ; d_{s,p} = \beta_s \cdot C_s ; d_{s,s} = (1 - \beta_s) \cdot C_s .$$

► Fonctionnement fluide de l'entrecroisement

Ce fonctionnement est observé lorsqu'aucune pointe de charge ne dépasse la capacité des branches :

$$D_{p,p} + D_{p,s} + \frac{D_{s,p}}{n_{CV}} < C_p ; \quad D_{p,p} + D_{s,p} + \frac{D_{p,s}}{n_{CV}} < C_p ;$$

$$D_{s,s} + D_{s,p} + \frac{D_{p,s}}{n_{CV}} < C_s ; \quad D_{s,s} + D_{p,s} + \frac{D_{s,p}}{n_{CV}} < C_s .$$

Dans ce cas, l'entrecroisement reste fluide, les demandes de débit s'écoulent sans contrainte. Les débits effectifs sont égaux aux demandes. La matrice OD correspondante est la suivante :

Destination Origin	Branche principale	Branche secondaire
Branche principale	$D_{p,p}$	$D_{p,s}$
Branche secondaire	$D_{s,p}$	$D_{s,s}$

► Fonctionnement congestionné de l'entrecroisement

Ce fonctionnement est observé lorsque l'une des pointes de charge dépasse la capacité de la branche.

$$D_{P,P} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} > C_P \quad \text{ou} \quad D_{P,P} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} > C_P$$

$$\text{ou} \quad D_{S,S} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} > C_S \quad \text{ou} \quad D_{S,S} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} > C_S$$

Dans ce cas, une congestion se forme au niveau de l'entrecroisement.

Pour la suite, on assimile l'entrecroisement à un convergent simple. Ses caractéristiques dépendent du point présentant une pointe de charge supérieure la capacité :

- si $D_{P,P} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} > C_P$, alors le convergent simple à considérer est en P1 ;
- si $D_{P,P} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} > C_P$, alors le convergent simple à considérer est en P2 ;
- si $D_{S,S} + D_{S,P} + \frac{D_{P,S}}{n_{CV}} > C_S$, alors le convergent simple à considérer est en S1 ;
- si $D_{S,S} + D_{P,S} + \frac{D_{S,P}}{n_{CV}} > C_S$, alors le convergent simple à considérer est en S2 ;

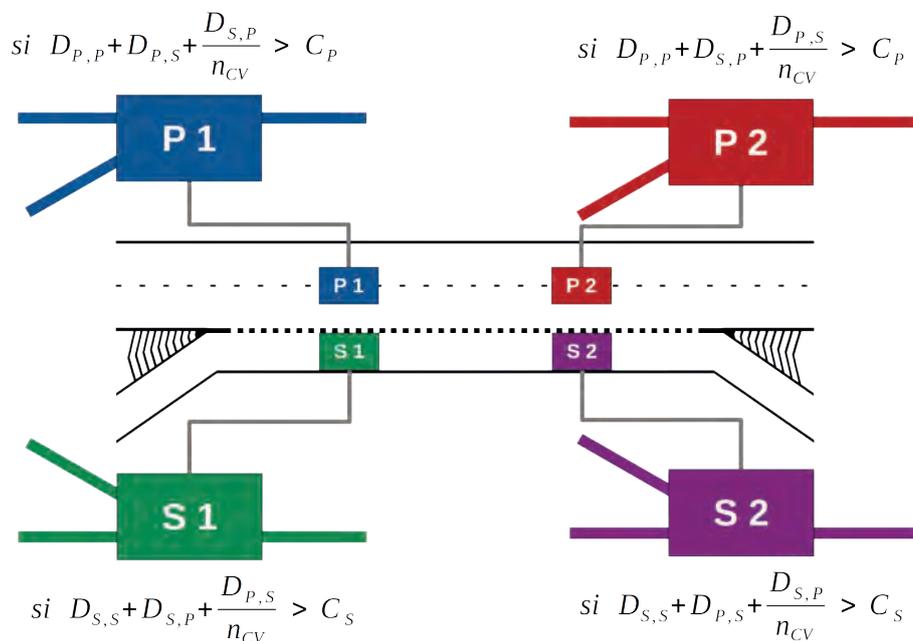


Illustration 52 : assimilation de l'entrecroisement à des convergents aux points P1, P2, S1 et S2

La détermination des débits effectifs en amont suit la même méthode que celle présentée en partie 1, chapitre 2.4, à savoir :

- calculer les débits de partage de capacité q_p^a et q_s^a ;
- comparer les demandes de débit D_p et D_s aux valeurs de q_p^a et q_s^a ;
- en déduire les débits effectifs en amont de l'entrecroisement, q_p et q_s .

Lorsque la pointe de charge calculée dépasse la capacité en plusieurs points de l'entrecroisement, la démarche consiste à :

- calculer les débits effectifs pour chaque point, selon la méthode présentée ;
- comparer les débits effectifs déterminés en chaque point ;
- retenir comme résultat les valeurs minimales des débits effectifs.

Point de vigilance : calcul des débits de partage de la capacité

Chaque convergent (P1 ; P2 ; S1 ; S2) présente un calcul des débits de partage de la capacité qui lui est propre, car il intègre les hypothèses relatives aux manœuvres de changement de voie et au FIFO.

L'expression de ces débits à partir d'un coefficient de partage des débits à capacité est possible, mais n'est pas explicitée. Les calculs présentés restent cohérents avec la méthode des charges présentée en partie 1, chapitre 5.

Une fois les débits effectifs déterminés en amont de l'entrecroisement, il est possible d'en déduire la matrice OD des débits effectifs correspondante :

Origine \ Destination	Branche principale	Branche secondaire
Branche principale	$(1-\beta_p) \cdot q_p$	$\beta_p \cdot q_p$
Branche secondaire	$\beta_s \cdot q_s$	$(1-\beta_s) \cdot q_s$

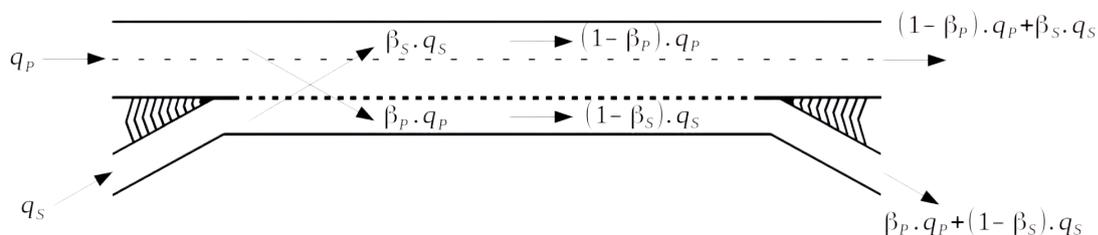


Illustration 53 : formulation des débits effectifs en fonction des coefficients directionnels

► Au point P1

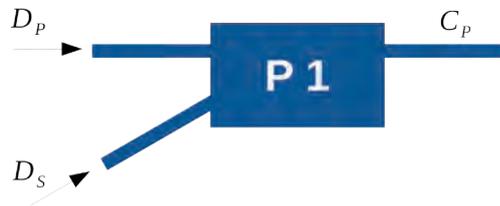


Illustration 54 : entrecroisement assimilé au convergent au point P1

Débites de partage de capacité : $q_p^\alpha = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{\beta_s}{n_{CV}}} C_p$ et $q_s^\alpha = \frac{\alpha}{1 + \alpha \cdot \frac{\beta_s}{n_{CV}}} C_p$.

• Situation 1

Conditions : si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s < q_s^\alpha$

alors la congestion se propage uniquement sur la branche principale de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche secondaire est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = C_p - \frac{\beta_s}{n_{CV}} \cdot D_s$ et $q_s = D_s$.

• Situation 2

Conditions : si $D_p < q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche secondaire de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche principale est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = D_p$ et $q_s = \frac{n_{CV}}{\beta_s} (C_p - D_p)$.

• Situation 3

Conditions : si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$,

alors la congestion se propage sur la branche principale et la branche secondaire de l'entrecroisement. Les débits effectifs se déduisent des débits de partage de capacité.

Les débits effectifs sont : $q_p = q_p^\alpha$ et $q_s = q_s^\alpha$.

► Au point P2

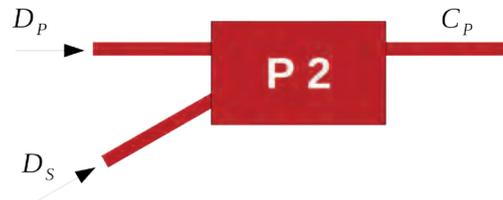


Illustration 55 : entrecroisement assimilé au convergent au point P2

Débits de partage de capacité : $q_p^\alpha = \frac{1}{(1-\beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}} + \alpha \cdot \beta_s} C_p$ et $q_s^\alpha = \frac{\alpha}{(1-\beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}} + \alpha \cdot \beta_s} C_p$.

• Situation 1

Conditions : si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s < q_s^\alpha$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche principale de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche secondaire est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = \frac{C_p - \beta_s \cdot D_s}{(1-\beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}}}$ et $q_s = D_s$.

• Situation 2

Conditions : si $D_p < q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche secondaire de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche principale est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = D_p$ et $q_s = \frac{1}{\beta_s} \left(C_p - \left[(1-\beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}} \right] \cdot D_p \right)$.

• Situation 3

Conditions : si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$,

alors la congestion se propage sur la branche principale et la branche secondaire de l'entrecroisement. Les débits effectifs se déduisent des débits de partage de capacité.

Les débits effectifs sont : $q_p = q_p^\alpha$ et $q_s = q_s^\alpha$.

► Au point S1

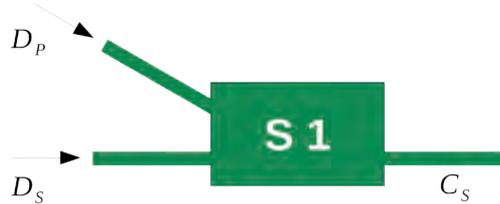


Illustration 56 : entrecroisement assimilé au convergent au point S1

Débits de partage de capacité : $q_s^{\alpha} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\beta_p}{n_{CV}}} C_s$ et $q_p^{\alpha} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\beta_p}{n_{CV}}} C_s$.

• Situation 1

Conditions : si $D_s > q_s^{\alpha}$ et $D_p < q_p^{\alpha}$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche secondaire de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche principale est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_s = C_s - \frac{\beta_p}{n_{CV}} D_p$ et $q_p = D_p$.

• Situation 2

Conditions : si $D_s < q_s^{\alpha}$ et $D_p > q_p^{\alpha}$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche principale de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche secondaire est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_s = D_s$ et $q_p = \frac{n_{CV}}{\beta_p} (C_s - D_s)$

• Situation 3

Conditions : si $D_s > q_s^{\alpha}$ et $D_p > q_p^{\alpha}$,

alors la congestion se propage sur la branche principale et la branche secondaire de l'entrecroisement. Les débits effectifs se déduisent des débits de partage de capacité.

Les débits effectifs sont : $q_s = q_s^{\alpha}$ et $q_p = q_p^{\alpha}$.

► Au point S2

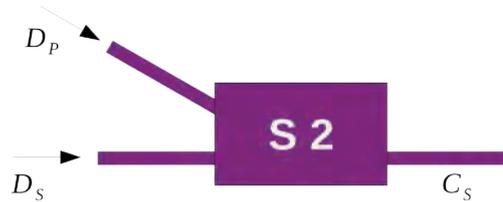


Illustration 57 : entrecroisement assimilé au convergent au point S2

Débits de partage de capacité : $q_s^u = \frac{1}{(1-\beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}} + \frac{1}{\alpha} \cdot \beta_p} C_s$ et $q_p^u = \frac{1}{(1-\beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}} + \frac{1}{\alpha} \cdot \beta_p} C_s$.

• Situation 1

Conditions : si $D_s > q_s^u$ et $D_p < q_p^u$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche secondaire de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche principale est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_s = \frac{1}{(1-\beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}}} (C_s - \beta_p \cdot D_p)$ et $q_p = D_p$.

• Situation 2

Conditions : si $D_s < q_s^u$ et $D_p > q_p^u$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche principale de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche secondaire est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_s = D_s$ et $q_p = \frac{1}{\beta_p} \left(C_s - \left[(1-\beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}} \right] D_s \right)$

• Situation 3

Conditions : si $D_s > q_s^u$ et $D_p > q_p^u$,

alors la congestion se propage sur la branche principale et la branche secondaire de l'entrecroisement. Les débits effectifs se déduisent des débits de partage de capacité.

Les débits effectifs sont : $q_s = q_s^u$ et $q_p = q_p^u$.

Application numérique : fonctionnement de l'entrecroisement simple

On reprend l'exemple précédent, à savoir une voie d'entrecroisement sur VSA90 à 2x2 voies, dont la longueur de la zone de changement de voie est de 300 m. La matrice OD est rappelée.

	VSA	Sortie	Total
VSA	2835	945	3780
Entrée	1260	140	1400
Total	4095	1085	5180

Illustration 58 : matrice OD de la demande

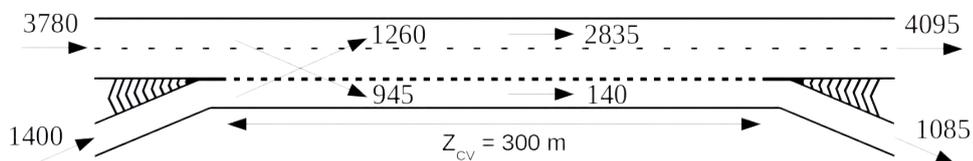


Illustration 59 : répartition des demandes et matrice OD sur l'entrecroisement

La capacité d'une voie est égale à 2 100 véh/h. Donc la capacité de la branche principale (section courante à 2 voies) est de 4 200 véh/h. La capacité de la branche secondaire (voie d'entrecroisement) est de 2 100 véh/h.

Comme la VLA est de 90 km/h, la longueur de changement de voie est fixée à $L_{CV} = 75\text{m}$. Ainsi le nombre maximal de changements de voie est $n_{CV} = 3$.

Conditions en amont de l'entrecroisement

$D_p < C_p$ et $D_s < C_s$, donc aucune congestion ne se forme en amont de l'entrecroisement.

Conditions de fonctionnement de l'entrecroisement

On rappelle les valeurs des pointes de charge :

$$\text{en P1 : } D_{p,p} + D_{p,s} + \frac{D_{s,p}}{n_{CV}} = 4200 \text{ véh/h} ; \text{ en P2 : } D_{p,p} + D_{s,p} + \frac{D_{p,s}}{n_{CV}} = 4410 \text{ véh/h} ;$$

$$\text{en S1 : } D_{s,s} + D_{s,p} + \frac{D_{p,s}}{n_{CV}} = 1715 \text{ véh/h} ; \text{ en S2 : } D_{s,s} + D_{p,s} + \frac{D_{s,p}}{n_{CV}} = 1505 \text{ véh/h} .$$

On constate que la capacité de la branche principale est atteinte au point P1, et dépassée au point P2. On étudie donc le fonctionnement de l'entrecroisement en l'assimilant au convergent simple du point P1 et du point P2.

Au préalable des étapes suivantes, on calcule le coefficient de partage des débits à capacité et les coefficients directionnels :

$$\alpha = 0,50 ; \beta_p = \frac{D_{p,s}}{D_p} = \frac{945}{3780} = 0,25 ; \beta_s = \frac{D_{s,p}}{D_s} = \frac{1260}{1400} = 0,90 .$$

Pour la suite, on applique la méthode sur le point P1 et sur le point P2.

Au point P1

Débits de partage de capacité :

$$q_p^a = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{\beta_s}{n_{CV}}} C_p ;$$

$$q_p^a = \frac{4200}{1 + 0,50 \times \frac{0,90}{3}} = 3652 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s^a = \alpha \cdot q_p^a = 0,50 \times 3652 = 1826 \text{ véh/h} .$$

On constate que :

$$D_p > q_p^a \text{ et } D_s < q_s^a .$$

Donc la congestion se propage sur la branche principale uniquement. Les débits effectifs en amont de l'entrecroisement sont :

$$q_p = C_p - \frac{\beta_s}{n_{CV}} D_s ;$$

$$q_p = 4200 - \frac{0,90}{3} \times 1400 = 3780 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s = D_s = 1400 \text{ véh/h} .$$

Au point P2

Débits de partage de capacité :

$$q_p^a = \frac{1}{(1 - \beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}} + \alpha \cdot \beta_s} C_p ;$$

$$q_p^a = \frac{4200}{0,75 + \frac{0,25}{3} + 0,50 \times 0,90} = 3273 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s^a = \alpha \cdot q_p^a = 0,50 \times 3273 = 1636 \text{ véh/h} .$$

On constate que :

$$D_p > q_p^a \text{ et } D_s < q_s^a .$$

Donc la congestion se propage sur la branche principale uniquement. Les débits effectifs en amont de l'entrecroisement sont :

$$q_p = \frac{1}{(1 - \beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}}} (C_p - \beta_s \cdot D_s) ;$$

$$q_p = \frac{4200 - 0,90 \times 1400}{0,75 + \frac{0,25}{3}} = 3528 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s = D_s = 1400 \text{ véh/h} .$$

On constate que les valeurs des débits effectifs calculés sont les plus faibles au point P2.

Ainsi $q_p = 3528 \text{ véh/h}$ et $q_s = 1400 \text{ véh/h}$.

La matrice des débits effectifs devient :

	VSA	Sortie	Total
VSA	2646	882	3528
Entrée	1260	140	1400
Total	3906	1022	4928

Illustration 60 : matrice OD des débits effectifs

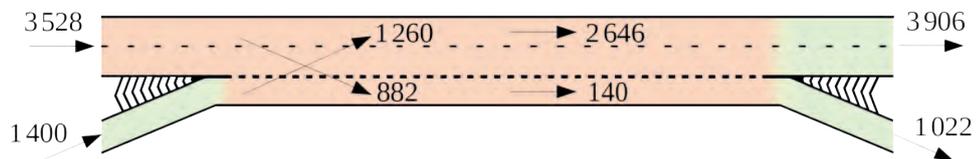


Illustration 61 : débits effectifs sur l'entrecroisement

4.4 Fonctionnement lorsqu'une congestion remonte de l'aval

La méthode d'évaluation du fonctionnement d'un entrecroisement simple est similaire à la démarche exposée en partie 1, chapitre 4.3, mais elle nécessite une adaptation.

La congestion remontant dans un entrecroisement contraint les manœuvres de changement de voie à s'effectuer à des vitesses très faibles. Ainsi, on considère que la longueur nécessaire pour effectuer une manœuvre de changement de voie à l'intérieur d'un entrecroisement congestionné est négligeable. Par conséquent, le nombre maximal de manœuvres qu'un véhicule donné peut effectuer le long de la zone de changement de voie, en plus de son changement de direction, est considéré comme infini.

$$n_{CV} = \infty \text{ et } \frac{1}{n_{CV}} = 0.$$

Le calcul des charges se limite à la somme des demandes de débit de la matrice OD, sans influence des manœuvres de changement de voie. On compare ces demandes à la capacité de la branche contrainte par l'offre, notée Q_p ou Q_s selon la branche touchée par la congestion.

Pour la suite on considère une contrainte de capacité sur la branche principale. On considère donc que la capacité C_p est contrainte par une offre Q_p (donc $Q_p < C_p$). Le point P2, soumis à une congestion remontante, peut présenter une pointe de charge dépassant l'offre en aval.

Les débits effectifs en amont sont déterminés en assimilant l'entrecroisement au convergent simple au point P2. La détermination des débits effectifs en amont suit la même méthode que celle présentée en partie 1, chapitre 2.4, à savoir :

- calculer les débits de partage de capacité q_p^α et q_s^α ;
- comparer les demandes de débit D_p et D_s aux valeurs de q_p^α et q_s^α ;
- en déduire les débits effectifs en amont de l'entrecroisement, q_p et q_s .

Les débits de partage de capacité sont : $q_p^\alpha = \frac{1}{(1-\beta_p) + \alpha \cdot \beta_s} Q_p$ et $q_s^\alpha = \frac{\alpha}{(1-\beta_p) + \alpha \cdot \beta_s} Q_p$.

- **Situation 1**

Conditions : si $D_p > q_p^{\alpha}$ et $D_s < q_s^{\alpha}$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche principale de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche secondaire est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = \frac{Q_p - \beta_s \cdot D_s}{1 - \beta_p}$; $q_s = D_s$

- **Situation 2**

Conditions : si $D_p < q_p^{\alpha}$ et $D_s > q_s^{\alpha}$,

alors la congestion se propage uniquement sur la branche secondaire de l'entrecroisement. Le débit effectif venant de la branche principale est égal à la demande.

Les débits effectifs sont : $q_p = D_p$; $q_s = \frac{1}{\beta_s} (Q_p - [1 - \beta_p] \cdot D_p)$.

- **Situation 3**

Conditions : si $D_p > q_p^{\alpha}$ et $D_s > q_s^{\alpha}$,

alors la congestion se propage sur la branche principale et la branche secondaire de l'entrecroisement. Les débits effectifs se déduisent des débits de partage de capacité.

Les débits effectifs sont : $q_p = q_p^{\alpha}$ et $q_s = q_s^{\alpha}$.

Point de vigilance : cas d'un entrecroisement déjà congestionné

Si l'entrecroisement présente déjà un fonctionnement congestionné, il s'agit de comparer les débits effectifs en amont à la capacité contrainte par l'offre en aval.

Application numérique : impact d'une congestion sur un entrecroisement amont

On reprend l'exemple précédent, à savoir une voie d'entrecroisement sur VSA90 à 2x2 voies, dont la longueur de la zone de changement de voie est de 300 m. Une nouvelle matrice OD de la demande est considérée.

	VSA	Sortie	Total
VSA	2002	858	2860
Entrée	1156	204	1360
Total	3158	1062	4220

Illustration 62 : matrice OD de la demande

La capacité d'une voie est égale à 2 100 véh/h. Donc la capacité de la branche principale (section courante à 2 voies) est de 4 200 véh/h. La capacité de la branche secondaire (voie d'entrecroisement) est de 2 100 véh/h.

La vérification du fonctionnement nous assure que l'entrecroisement est fluide.

Une congestion dure issue d'un accès amont remonte jusqu'à cet entrecroisement. La capacité de la branche principale en aval est contrainte par une offre, estimée à 2 950 véh/h.

Ainsi $Q_p = 2\,950 \text{ véh/h}$.

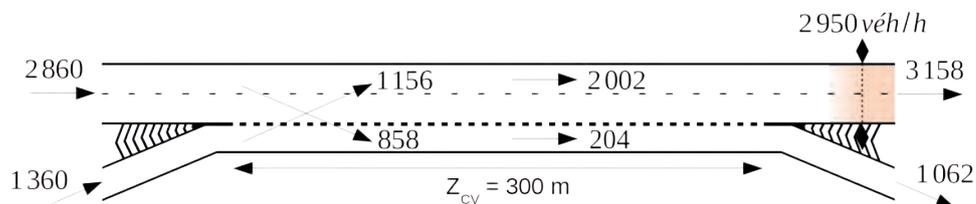


Illustration 63 : répartition des demandes, matrice OD et capacité aval contrainte par l'offre sur un entrecroisement

Conditions de fonctionnement de l'entrecroisement

$D_{p,p} + D_{s,p} = 3158 \text{ véh/h} > Q_p$, donc la congestion remonte jusqu'à l'amont de l'entrecroisement.

Au préalable des étapes suivantes, on calcule le coefficient de partage des débits à capacité et les coefficients directionnels :

$$\alpha = 0,50 ; \beta_p = \frac{D_{p,s}}{D_p} = \frac{858}{2002} = 0,30 ; \beta_s = \frac{D_{s,p}}{D_s} = \frac{1156}{1360} = 0,85 .$$

On en déduit les débits de partage de capacité

$$q_p^\alpha = \frac{1}{(1-\beta_p) + \alpha \cdot \beta_s} Q_p = \frac{2950}{0,70 + 0,50 \times 0,85} = 2622 \text{ véh/h} ;$$

$$q_s^\alpha = \alpha \cdot q_p^\alpha = 0,50 \times 2622 = 1311 \text{ véh/h} .$$

On constate que : $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$

Donc la congestion se propage sur la branche principale et sur la branche secondaire. Les débits effectifs en amont de l'entrecroisement sont égaux aux débits de partage de la capacité :

$$q_p = q_p^\alpha = 2622 \text{ véh/h} \text{ et } q_s = q_s^\alpha = 1311 \text{ véh/h} .$$

La matrice des débits effectifs devient :

	VSA	Sortie	Total
VSA	1836	786	2622
Entrée	1114	197	1311
Total	2950	983	3933

Illustration 64 : matrice OD des débits effectifs

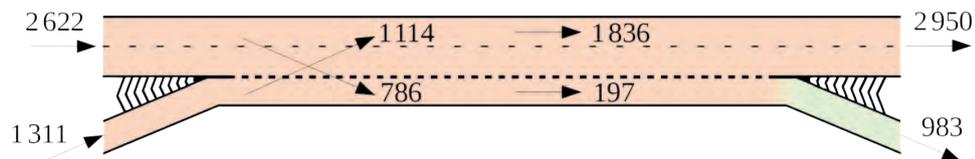


Illustration 65 : débits effectifs sur l'entrecroisement avec contrainte en aval

5. Fonctionnement des configurations complexes : la méthode des charges

La méthode des charges permet d'évaluer les conditions de circulation d'une section de VSA dont la configuration implique des mouvements importants de changement de voie. Le principe de cette méthode consiste à ajouter la contribution des manœuvres de changement de voie au débit supporté par chaque voie de circulation. Si la demande résultante est supérieure à la capacité de la voie, alors cette voie est réputée saturée.

D'une manière générale, la méthode permet l'étude de configurations comprenant des accès rapprochés (ou un accès proche d'un rabattement ou d'une création de voie supplémentaire) qui sont source d'interférences dans leur fonctionnement (comportement des usagers influencé par les accès proches) ou dans leur lisibilité (compréhension de la séquence de signalisation directionnelle)¹¹.

En première approche, on considère que deux accès sont rapprochés lorsqu'ils sont distants de moins de 1 km. Au-delà de cette interdistance, les conditions de circulation influencées par le premier accès sont réputées être revenues à la normale. La distance entre deux accès se compte entre leurs extrémités, comme définies dans le tableau ci-dessous :

	Début de l'accès	Fin de l'accès
Entrée	Point d'entrée au plus tôt (E.1,00)	Fin du biseau d'insertion ou fin du marquage en T2-5u
Sortie	Panneau de présignalisation (D40 ou Da40)	Point de sortie au plus tard (S.1,00)
Rabattement	Panneau de présignalisation (premier C28 à 200 m)	Fin du biseau de rabattement
Décrochement	Début du biseau de décrochement	Fin du biseau de décrochement

La méthode des charges s'attache à l'évaluation du fonctionnement de chaque voie de circulation qui compose les branches de la configuration d'accès. **En ce sens, elle s'adapte à toute configuration d'entrecroisement, notamment les entrecroisements complexes**, non couverts par la méthode présentée en partie 1, chapitre 4.¹²

11 La méthode peut aussi permettre d'approfondir l'étude de fonctionnement des convergents ou divergents isolés. Les modèles simples présentés précédemment considèrent les accès comme ponctuels et ne reproduisent pas nécessairement l'effet des manœuvres au sein de l'accès (manœuvres de confort vers la gauche, pré-affectation en amont d'une sortie, rabattement des PL sur la voie de droite, etc.).

12 L'annexe 3 présente quelques exemples d'entrecroisement complexe, qu'il est possible d'étudier avec la méthode des charges.

5.1 Formules générales de calcul de la charge sur une voie

Les formules de calcul de charge suivantes correspondent aux cas usuels des manœuvres de changement de voie. Sont ainsi traitées les charges générées par les manœuvres de changement de voie unique et les manœuvres comprenant deux changements de voie.

► Rappel des principes et hypothèses

Les calculs suivants reprennent les principes et hypothèses exposés en partie 1, chapitre 4. Ils sont rappelés ici:

- la longueur de changement de voie est la longueur nécessaire à un véhicule pour effectuer une manœuvre de changement de voie. **Elle est notée L_{cv} et sa valeur est fixée comme la distance parcourue pendant une durée estimée à 3 s, à la vitesse libre (ou à la vitesse limite autorisée) ;**

Vitesse pratiquée (en km/h)	50	70	90	110
Longueur de changement de voie (en m)	40	60	75	90

- on considère qu'un véhicule effectuant un changement de voie occupe, sur toute la longueur nécessaire à sa manœuvre, à la fois sa voie d'origine et sa voie de destination. Pendant la durée de sa manœuvre, le véhicule empêche tout autre véhicule de circuler sur les deux voies utilisées pour sa manœuvre ;
- on appelle « charge » l'expression, en nombre de véhicules par unité de temps, de la contribution d'un ensemble de manœuvres données.** Cette charge, en véh/h, peut varier sur la longueur de la section et est spécifique à chaque voie de circulation.

Point de vigilance : discussions sur la répartition des manœuvres de changement de voie

L'hypothèse de l'uniformité de la répartition des changements de voie sur la longueur d'une zone de changement de voie peut, dans certaines situations, être éloignée des comportements effectivement observés. En effet, dans certaines configurations d'accès, on peut observer des phénomènes de concentration des manœuvres sur une longueur inférieure à la zone de changement de voie permise par la configuration. Des observations de terrain peuvent permettre de fiabiliser ces longueurs.

En tout état de cause, il est prudent de considérer que cette hypothèse n'est a priori pas valable s'il existe un accès intermédiaire (entrée ou sortie) le long de la zone de changement de voie.

► Notations

- x_d point auquel le premier véhicule démarre sa manœuvre ;
- x_f point auquel le dernier véhicule a terminé sa manœuvre ;
- L_{CV} longueur de changement de voie ; on suppose que L_{CV} est inférieure à la longueur de la zone de changement de voie : $L_{CV} \leq x_f - x_d$;
- D_{CV} demande de débit correspondant aux véhicules souhaitant changer de voie (issue de la matrice OD) ;
- D_D demande de débit correspondant aux véhicules restant sur leur voie (issue de la matrice OD) ;
- C capacité théorique de la voie ;
- $c_{origine}(x)$ charge générée par les manœuvres dont la voie est à l'origine ;
- $c_{destination}(x)$ charge générée par les manœuvres dont la voie est destinataire ;
- $c_{intermédiaire}(x)$ charge supportée par la voie intermédiaire, lors d'une manœuvre impliquant plus d'un changement de voie.

► Charge sur la voie d'origine

Position	$x_d + L_{CV}$	x_f
$c_{origine}(x)$	D_{CV}	$\frac{x_f - x}{x_f - x_d - L_{CV}} D_{CV}$

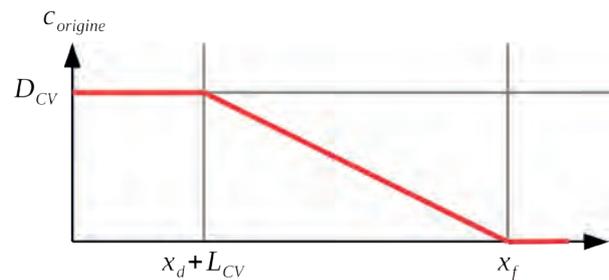


Illustration 66 : profil de charge sur la voie d'origine

► Charge sur la voie de destination

Position	x_d	$x_f - L_{CV}$
$c_{destination}(x)$	0	$\frac{x - x_d}{x_f - x_d - L_{CV}} D_{CV}$

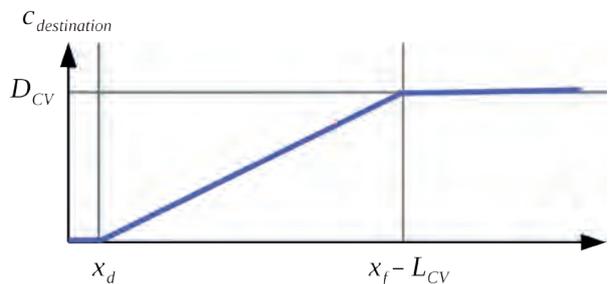


Illustration 67 : profil de charge sur la voie de destination

► Cas d'une manœuvre avec deux changements de voie

Lors d'une manœuvre qui implique plus d'un changement de voie, le véhicule manœuvrant générera une charge sur les voies d'origine et de destination, mais également sur les voies intermédiaires. On estime par ailleurs qu'une telle manœuvre ne peut être continue et que le véhicule restera sur chaque voie intermédiaire entre deux changements de voie consécutifs, pour préparer sa nouvelle manœuvre.

On considère en première approche que la longueur de préparation à un nouveau changement de voie correspond à la longueur L_{cv} .

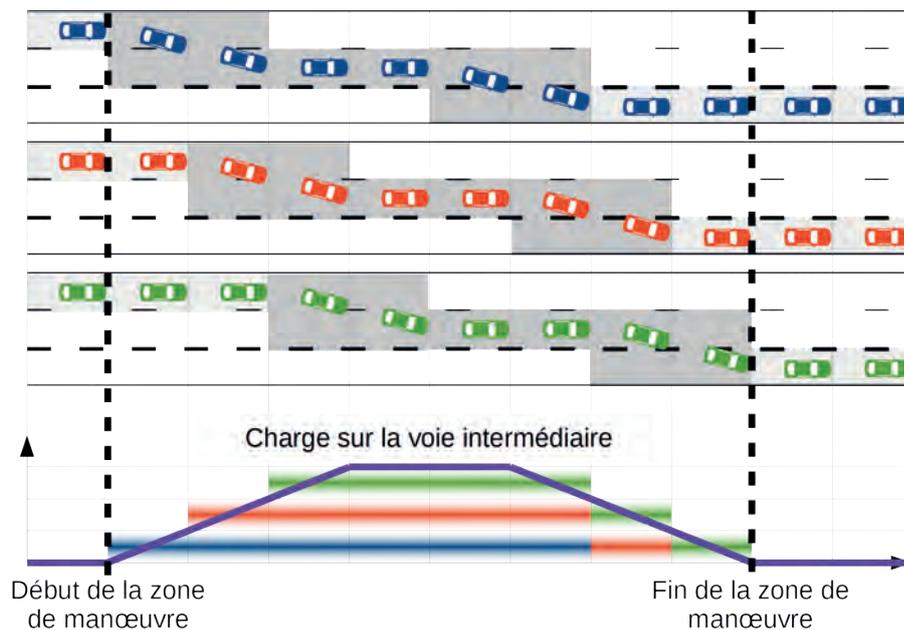


Illustration 68 : charge sur voie intermédiaire correspondant à trois véhicules effectuant chacun deux changements de voie

Point de vigilance : discussions sur la longueur de préparation

Pour l'heure, la longueur de préparation n'a pas fait l'objet de mesures. On peut émettre l'hypothèse qu'elle dépend des conditions de circulation. Ainsi, en cas de trafic dense gênant les manœuvres de changement de voie, la longueur de préparation pourrait s'allonger (mais la longueur de changement de voie, a contrario, serait plus faible).

On suppose que la longueur de la zone de changement de voie ($x_f - x_d$) est supérieure à la distance nécessaire à un véhicule pour passer de la voie d'origine à la voie de destination. Ainsi $x_f - x_d \geq 3 \cdot L_{CV}$.

- charge supportée par la voie d'origine

Position	$x_d + L_{CV}$	$x_f - 2L_{CV}$
$c_{origine}(x)$	D_{CV}	$\frac{x_f - x - 2L_{CV}}{x_f - x_d - 3L_{CV}} D_{CV}$

- charge supportée par la voie de destination

Position	$x_d + 2L_{CV}$	$x_f - L_{CV}$
$c_{destination}(x)$	0	$\frac{x - x_d - 2L_{CV}}{x_f - x_d - 3L_{CV}} D_{CV}$

- charge supportée par la voie intermédiaire

Position	x_d	$x_d + 3L_{CV}$	$x_f - 3L_{CV}$	x_f	
$c_{intermédiaire}(x)$	0	$\frac{x - x_d}{x_f - x_d - 3L_{CV}} D_{CV}$	$\frac{3L_{CV}}{x_f - x_d - 3L_{CV}} D_{CV}$	$\frac{x_f - x}{x_f - x_d - 3L_{CV}} D_{CV}$	0

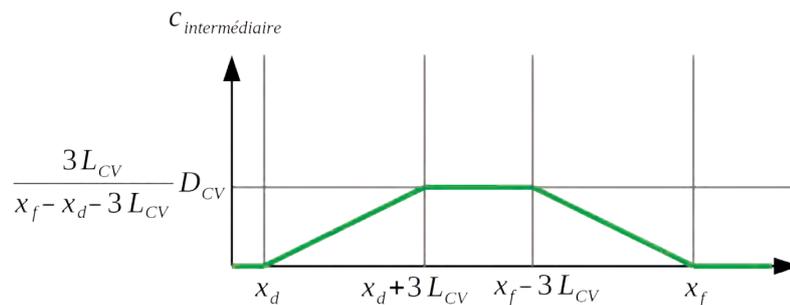


Illustration 69 : profil de charge sur la voie intermédiaire

► Prise en compte des catégories de véhicule

Il est possible d'intégrer **l'influence des poids lourds (PL)** dans le calcul des charges. On définit un coefficient d'équivalence, noté e_{PL} , désignant le nombre de véhicules légers que représente un PL **à des niveaux de trafic proches de la capacité de la voie**.

$$e_{PL} = 1,4$$

Pour aller plus loin : estimation du coefficient d'équivalence PL

Le coefficient d'équivalence dépend fortement des caractéristiques de la section de VSA étudiée, tant géométriques (présence de rampes, largeur des voies, courbes en plan) que fonctionnelles (régime de trafic, occupation des voies de circulation).

Sur des sections existantes, la détermination du coefficient d'équivalence nécessite un recueil de données individuelles. Une méthode proposée consiste à calculer la moyenne des temps intervéhiculaires (TIV) par catégorie de véhicules (en considérant des périodes d'agrégation suffisamment longues pour limiter la dispersion) et à représenter la variation du rapport entre TIV PL et TIV VL en fonction de la concentration. Pour repérer le coefficient d'équivalence à capacité, on identifie l'intervalle de concentration sur lequel le TIV moyen (tous véhicules confondus) est le plus faible.

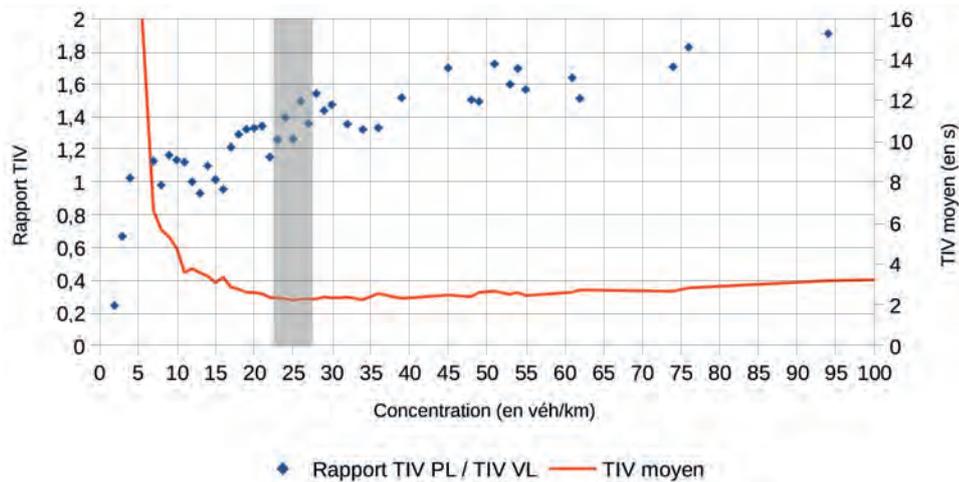


Illustration 70 : représentation graphique du TIV moyen tous véhicules et du rapport TIV PL/TIV VL en fonction de la concentration

Lorsqu'une voie de circulation supporte un trafic comportant une part de PL, la charge équivalente à ce trafic, notée c_e s'exprime comme suit :

$$c_e = D + (e_{PL} - 1) \cdot D_{PL}$$

avec

- D demande de trafic totale, toutes catégories de véhicules confondues ;
- D_{PL} demande de trafic PL ;
- e_{PL} coefficient d'équivalence de PL.

Le calcul de cette charge équivalente est valable quelle que soit la manœuvre de changement de voie considérée.

Application numérique : charge équivalente sur la voie de droite

Considérons une section de VSA110 comportant deux voies de circulation. La demande de trafic en période de pointe est de 3 200 véh/h et le taux de PL que supporte cette section est de 7 %.

On suppose que la demande est répartie de manière homogène entre les deux voies de circulation et que la totalité du trafic PL s'écoule sur la voie de droite. Les valeurs de demande sur la voie de droite sont :

$$D = \frac{3200}{2} = 1600 \text{ véh/h} \text{ et } D_{PL} = 0,07 \times 3200 = 224 \text{ véh/h} .$$

La charge équivalente de la voie de droite est donc :

$$c_e = D + (e_{PL} - 1) \cdot D_{PL} = 1600 + (1,4 - 1) \times 224 = 1690 \text{ véh/h} .$$

Point de vigilance : prise en compte des deux-roues motorisés (2RM)

Les 2RM constituent une catégorie de véhicules présentant des particularités en matière de conduite, comme la circulation interfile, lorsque le régime de trafic est congestionné sur la section. Ce type de comportement dans la congestion peut fortement influencer sur les recueils de données de trafic. C'est pourquoi il est recommandé d'exclure les débits et vitesses des 2RM sur les périodes congestionnées. Sur les périodes où le régime est fluide, les 2RM peuvent être assimilés à des véhicules.

► Calcul de la charge totale

Le calcul de la charge totale supportée par la voie consiste à additionner l'ensemble des charges supportées par cette voie, c'est-à-dire :

- la charge générée par le débit en mouvement direct sur la voie ;
- les charges générées par les manœuvres dont la voie est à l'origine ;
- les charges générées par les manœuvres dont la voie est destinataire ;
- les charges générées par les manœuvres dont la voie est une voie intermédiaire.

$$c_{\text{totale}}(x) = D_D + \sum c_{\text{origine}}(x) + \sum c_{\text{destination}}(x) + \sum c_{\text{intermédiaire}}(x) .$$

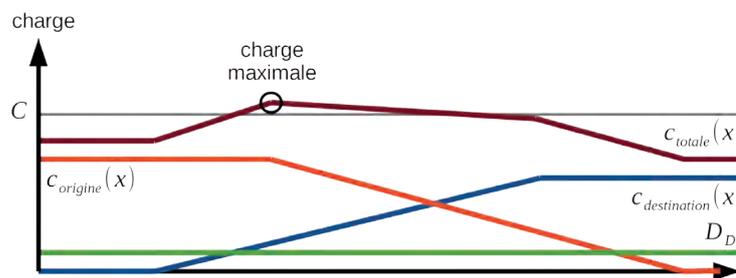


Illustration 71 : profil de charge totale supportée par une voie

Cette charge est ensuite comparée à la capacité théorique de la voie.

- si $c_{\text{totale}}(x) \leq C$, alors la voie n'est pas saturée. Elle n'est pas à l'origine d'une congestion ;
- si $c_{\text{totale}}(x) > C$, alors la voie est saturée. La congestion peut éventuellement s'étendre sur les autres voies.

5.2 Évaluation des conditions de fonctionnement suivant la méthode des charges

► Principe général de la méthode

L'objectif de l'étude d'une configuration d'accès est d'abord, de vérifier si elle sera saturée, puis, si c'est le cas, de définir les débits que cette configuration écoulera.

La méthode est également adaptée au cas d'une configuration existante. Si le site étudié présente déjà une saturation, l'étude pourra vérifier l'impact du projet sur cette saturation : soit il la résorbera, soit il l'aggravera.

L'étude suit un certain nombre d'étapes, décrites dans ce chapitre. Le principe général de la méthode proposée est de considérer a priori que les usagers cherchent à s'affecter sur les voies présentant les conditions de circulation les plus attractives (concentration faible, vitesse élevée) et supportant les charges les plus faibles. La méthode consiste donc à optimiser les variables (répartition des débits par voie, importance des changements de voie), de manière à minimiser la charge maximale par voie de circulation.

► Calcul de la charge sur l'ensemble des voies de la configuration

• 1^{re} étape – Définition de la répartition des débits par voie en amont

La première étape consiste à définir une répartition des débits par voie en amont de la configuration étudiée.

Une première approche simplificatrice consiste à considérer que la répartition des débits est homogène entre les voies de circulation composant une branche.

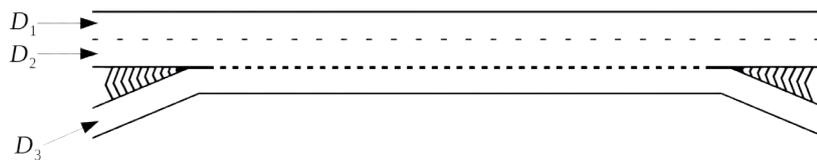


Illustration 72 : définition de la répartition des débits amont par voie

Point de vigilance : variabilité de la répartition des débits par voie

La répartition des débits par voie est très variable d'une infrastructure à une autre. Les particularités locales des VSA (fréquence importante des échangeurs, déplacements majoritairement effectués par des usagers habitués) ne permettent pas de donner une loi générale de répartition des débits entre les voies de circulation¹³.

Certains facteurs peuvent influencer sur la répartition des débits par voie :

- l'influence du trafic PL, pouvant provoquer une sous-occupation de la voie de droite ;
- la présence d'accès en amont, qui déséquilibrera la répartition des débits par voie (entrée qui surchargera la voie de droite, sortie qui videra la voie de droite) ;
- la capacité des usagers à se pré-affecter en fonction de leur itinéraire (pré-affectation sur la voie de gauche pour éviter des perturbations sur les voies de droite) et de la signalisation.

• 2^e étape – Définition des longueurs de zones de changement de voie

Les longueurs de zones de changement de voie influent sur le niveau de dilution ou de concentration de la charge sur une voie.

En première approche, on considère que les limites des zones de changement de voie sont données par la géométrie de la configuration : la longueur de la voie d'entrecroisement définie par la longueur du marquage en T2-5u, la longueur du dispositif d'insertion ou de pseudo-affectation, la séquence de signalisation directionnelle, etc.

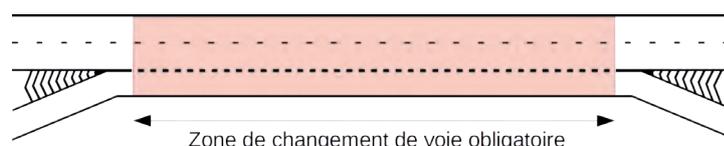


Illustration 73 : localisation de la zone de changement de voie obligatoire

¹³ Pour plus d'informations, le lecteur pourra consulter le guide Cerema, *Théorie du trafic et régulation dynamique*, Éditions du Cerema, coll. Connaissances, 2018.

• 3^e étape – Définition de la matrice OD voie par voie initiale

La troisième étape consiste à définir la matrice OD voie par voie en ne considérant que les manœuvres de changement de voie obligatoires.

Les changements de voie obligatoires sont les manœuvres nécessaires à un véhicule pour effectuer un changement de destination par rapport à la destination de sa voie d'origine (sans changement de voie). Ils sont réalisés en particulier par les véhicules souhaitant sortir de la section courante et par les véhicules souhaitant entrer sur la section courante.

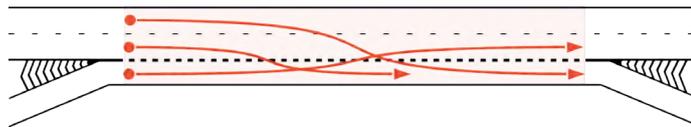


Illustration 74 : caractéristiques des changements de voie obligatoires

En première approche, on considère que les manœuvres obligatoires se limitent au nombre minimal de changements de voie. Ainsi, les véhicules souhaitant entrer effectueront uniquement des manœuvres vers la voie de droite et les véhicules souhaitant sortir sont autant que possible pré-affectés sur la voie de droite.

Dans le cas particulier des débits sortants (ayant pour origine la voie de droite en général) et pour garantir une cohérence avec la répartition des débits amont, on assume les hypothèses suivantes :

- considérer que le débit en mouvement direct (c'est-à-dire restant sur la voie de droite) est au minimum composé du débit PL en mouvement direct ;
- si le débit résiduel sur la voie de droite (débit amont – mouvement direct) est inférieur au débit sortant, alors une part du débit sortant a pour origine la voie adjacente à la voie de droite (voie médiane ou voie de gauche). Les manœuvres requises pour cette part de débit sortant seront nécessairement des changements de voie multiples.

Point de vigilance : extension de la prise en compte des PL dans la matrice OD

Les hypothèses peuvent aboutir à une situation où le débit en voie de droite ne comporte aucun VL en mouvement direct et où le débit sur les voies adjacentes ne comporte aucun PL.

Le recueil de données de trafic, avec distinction des catégories de véhicules, peut permettre éventuellement de modifier ces hypothèses.

• 4^e étape – Estimation des manœuvres de changement de voie de confort

Les premiers calculs effectués en suivant les hypothèses précédentes permettent de dégager une première analyse des conditions de circulation et de vérifier si la charge de chaque voie dépasse sa capacité. Le cas échéant, la matrice OD peut alors être modifiée en intégrant les manœuvres de changement de voie de confort.

Les changements de voie de confort sont les manœuvres qui permettent à l'usager d'optimiser ses conditions de circulation. Ils sont dus notamment aux véhicules en mouvement direct manœuvrant pour éviter les éventuels ralentissements liés aux manœuvres obligatoires. Ils s'effectuent en général vers les voies les plus à gauche de la section courante.

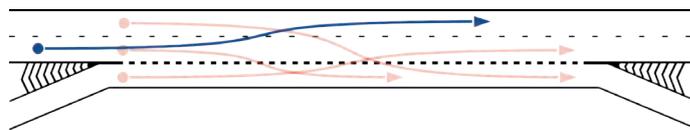


Illustration 75 : caractéristiques des changements de voie de confort

Il s'agit donc à cette étape de reprendre la matrice OD voie par voie en la complétant par les demandes de confort, dont l'effet est de limiter les dépassements de capacité des voies surchargées, en réaffectant les charges sur des voies sous-chargées.

En première approche, on considère que les changements de voie de confort sont limités par l'atteinte :

- **d'un seuil de débit de 1 800 véh/h sur les voies ne supportant pas de manœuvres de changement de voies obligatoire (voie de gauche de la section courante par exemple) ;**
- **de la capacité théorique, pour les autres voies. Les valeurs standards sont données en partie 1, chapitre 1.4.**

Point de vigilance : spécificité du comportement en voie de gauche

Le seuil de débit de 1 800 véh/h permet de fixer une limite de débit au-delà de laquelle les manœuvres de convenance peuvent être empêchées par :

- la densification du trafic, limitant la fréquence de créneaux acceptable pour un véhicule souhaitant manœuvrer ;
- l'organisation d'un différentiel de vitesses entre la voie de gauche en mouvement direct, présentant une vitesse soutenue, et la voie de droite sur laquelle les nombreuses manœuvres peuvent générer une baisse des vitesses.

Une observation des débits existants sur la voie de gauche, lors de périodes de trafic dense sur la voie de droite, permettra éventuellement de prendre une valeur supérieure à 1 800 véh/h.

Il s'agit également de définir les zones de changement de voie de confort. La zone de changement de voie n'est pas nécessairement contrainte par la géométrie de la configuration d'accès, car les changements de voie de confort peuvent s'effectuer par anticipation sur la section courante, en amont de la configuration. L'estimation de la longueur des zones de changement de voie doit se faire en considérant que :

- les changements de voie de confort peuvent se faire par anticipation par les usagers, c'est-à-dire en amont des points éventuels de dysfonctionnement ;
- les fins de manœuvre peuvent être contraintes par l'émergence d'un pic de charge défavorable à ces manœuvres.

Les dimensions de la zone de changement de voie de confort suivent le principe suivant : **on considère, en première approche, que la première manœuvre de confort démarre en amont de début de la première manœuvre obligatoire, en considérant une longueur d'anticipation correspondant à la distance parcourue pendant 2 secondes** (valeur représentative du temps nécessaire pour percevoir et décider la manœuvre de changement de voie). Par analogie, la dernière manœuvre de confort se termine en amont de la fin de la dernière manœuvre obligatoire, suivant la même longueur d'anticipation. Ainsi, la zone de changement de voie de confort est « décalée » de 2 secondes en amont de la zone de changement de voie obligatoire (ces deux zones ayant la même longueur).



Illustration 76 : localisation de la zone de changement de voie de confort

- **5^e étape : comparaison des charges obtenues avec la capacité des voies**

La charge totale supportée par chaque voie est enfin comparée à sa capacité.

- Si, en aucun point de la configuration, la charge ne dépasse la capacité, alors la voie n'est pas saturée. Elle n'est pas à l'origine d'une congestion.
- Si, en un point de la configuration, la charge dépasse la capacité, alors la voie est saturée. La congestion peut éventuellement s'étendre sur les autres voies.

Application numérique : application de la méthode des charges

Une opération d'aménagement urbain à proximité d'une VSA90 à 2x3 voies générera une forte augmentation des demandes de déplacement. En particulier, les demandes de débit attendues à terme au niveau d'une zone d'entrecroisement seront conséquentes.

	VSA	Sortie	Total
VSA	4010	1180	5190
Entrée	1420	260	1680
Total	5430	1440	6870

Illustration 77 : matrice OD de la demande

La section d'entrecroisement présente une zone de changement de voie de 350 m de longueur (longueur du marquage en T2-5u). La vitesse étant de 90 km/h, la capacité considérée pour une voie est égale à 2 100 véh/h (cf. partie 1, chapitre 1.4). Il s'agit de s'assurer du fonctionnement de l'entrecroisement.

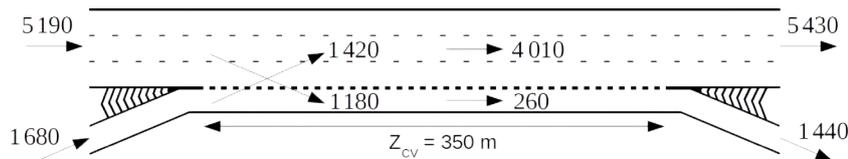


Illustration 78 : répartition des demandes et matrice OD sur l'entrecroisement

1^{re} étape : répartition des débits par voie

En amont de l'entrecroisement, on considère que le débit sur la section courante est réparti de manière homogène sur les trois voies.

$$D_{VD} = D_{VM} = D_{VG} = \frac{5190}{3} = 1730 \text{ véh/h.}$$

2^e étape : définition des longueurs des zones de changement de voie

La zone de changement de voie considérée sera celle du marquage T2-5u de l'entrecroisement, soit 350 m.

La longueur de changement de voie est considérée égale à 75 m pour toutes les manœuvres, soit la distance parcourue en 3 s à 90 km/h.

3^e étape : matrice OD voie par voie

En considérant uniquement les manœuvres de changements de voie obligatoires, on définit la matrice OD voie par voie. On considère que la voie médiane ne comporte pas de sortants et que les manœuvres sont uniquement des changements de voie simples.

	VG	VM	VD	VE
VG	1730	0	0	0
VM	0	1730	0	0
VD	0	0	550	1180
VE	0	0	1420	260

Premiers résultats

Suivant ces hypothèses, le calcul de la charge supportée par chaque voie donne comme charges maximales les valeurs suivantes :

$$c_{\max}(VG)=1730 \text{ véh/h} ; c_{\max}(VM)=1730 \text{ véh/h} ; c_{\max}(VD)=2292 \text{ véh/h} ; c_{\max}(VE)=2002 \text{ véh/h} .$$

La voie de droite présente une charge supérieure à sa capacité (2 100 véh/h).

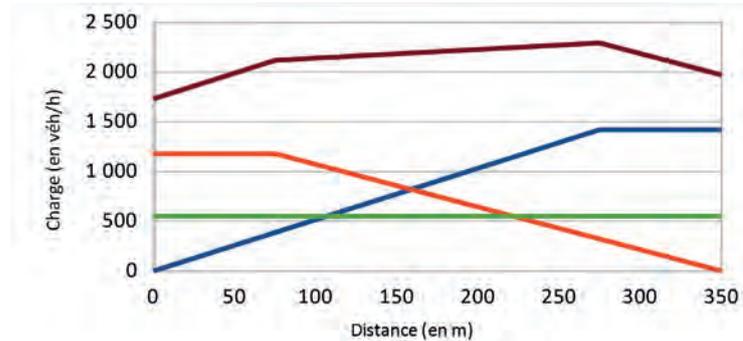


Illustration 79 : profil de charge initial sur la voie de droite

4^e étape : prise en compte des changements de voie de confort

Dans la mesure où la voie de droite sature, les véhicules effectueront des manœuvres de confort pour éviter le point dur que constitue cette voie. On modifie donc la matrice OD voie par voie, en prenant en compte des manœuvres de confort vers les voies les plus à gauche. On limite les manœuvres à un seul changement de voie et on considère que les manœuvres s'opèrent jusqu'à l'atteinte du seuil de 1 800 véh/h pour la voie de gauche et la voie médiane (car celles-ci ne supportent pas de manœuvres obligatoires).

Les zones de changement de voie de confort sont localisées avec une longueur d'anticipation de 50 m (distance parcourue en 2 s à 90 km/h). Ainsi :

- la zone des manœuvres de VD vers VM commence à 50 m en amont du début du marquage en T2-5u (et se termine à 50 m en amont de la fin du marquage) ;
- la zone des manœuvres de VM vers VG commence à 100 m en amont du début du marquage en T2-5u (et se termine à 100 m en amont de la fin du marquage).

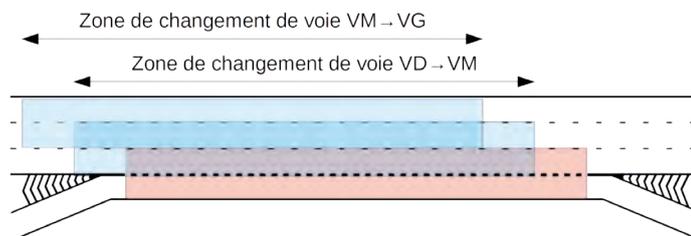


Illustration 80 : localisation des zones de changement de voie de confort selon les voies d'origine et de destination

Comme la voie de gauche ne supporte qu'une seule manœuvre, le débit correspondant aux changements de voie de confort de VM vers VG se détermine par différence entre la charge cible et le débit amont sur la voie de gauche.

$$D_{VM \rightarrow VG} = 1800 - 1730 = 70 \text{ véh/h}.$$

La voie médiane en revanche supporte deux manœuvres (VM→VG et VD→VM). Le débit correspondant aux changements de voie de confort de VD vers VM se détermine par recherche de la valeur cible, de manière à ce que la charge ne dépasse jamais 1 800 véh/h.

$$D_{VD \rightarrow VM} = 134 \text{ véh/h}.$$

On obtient la matrice OD modifiée :

	VG	VM	VD	VE
VG	1730	0	0	0
VM	70	1660	0	0
VD	0	134	416	1180
VE	0	0	1420	260

Résultats

Le calcul de la charge supportée par chaque voie donne comme charges maximales les valeurs suivantes :

$$c_{max}(VG) = 1800 \text{ véh/h} ; c_{max}(VM) = 1800 \text{ véh/h} ; c_{max}(VD) = 2170 \text{ véh/h} ; c_{max}(VE) = 2002 \text{ véh/h}.$$

Malgré les changements de voie de confort, la voie de droite présente une charge toujours supérieure à sa capacité. Une congestion se forme donc sur l'entrecroisement.

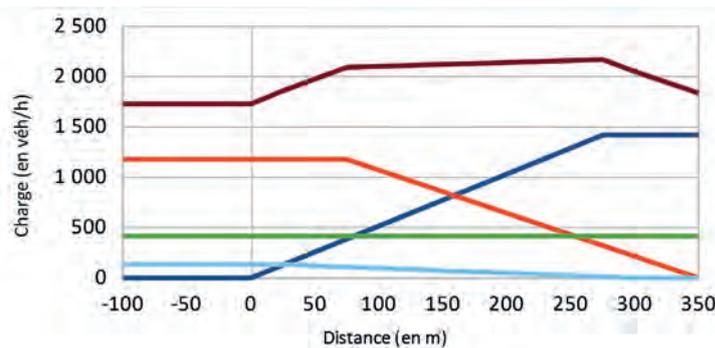


Illustration 81 : nouveau profil de charge sur la voie de droite

► Calcul des débits effectifs sur les branches de la configuration

Si les calculs précédents montrent que la charge sur une voie dépasse sa capacité, alors une congestion apparaît. Il convient alors de déterminer les débits effectifs sur chacune des branches amont, ainsi que les branches qui sont congestionnées. Par la suite, on appelle « branche principale » la section courante et « branche secondaire » la bretelle d'entrée.

Notations

- D_p demande de débit amont sur la branche principale ;
- D_s demande de débit amont sur la branche secondaire ;
- q_p débit effectif sur la branche principale ;
- q_s débit effectif sur la branche secondaire.

Principes

Il s'agit donc de calculer les débits effectifs s'écoulant dans la section étudiée et ainsi de déterminer la (ou les) branche(s) congestionnée(s).

Le calcul des débits effectifs est effectué selon les mêmes étapes que le calcul des charges, en considérant cette fois que certains paramètres nécessaires au calcul sont constants. Ainsi, on considère que :

- la répartition des débits par voie en amont de la configuration étudiée est constante (en proportion), tout comme les paramètres qualifiant les manœuvres de changement de voie (x_d, x_f, L_{CV}) ;
- les taux de répartition de chaque mouvement sont supposés constants. Il s'agit en fait de l'application du principe FIFO à la matrice OD, avec un calcul similaire des coefficients directionnels à celui d'un divergent ponctuel (cf. partie 1, chapitre 3). On note β_p le coefficient directionnel depuis la branche principale (la part de sortants) et β_s le coefficient directionnel depuis la branche secondaire (la part d'entrants). À noter que ces constantes ne concernent que les manœuvres obligatoires, quel que soit le nombre de changements de voie ;
- lorsqu'une congestion se propage sur toutes les branches amont de la configuration étudiée, le fonctionnement est similaire à celui d'un convergent ponctuel, où les usagers coopèrent suivant un fonctionnement de type « fermeture-éclair » (cf. chapitre 2.2). Le coefficient de partage des débits à capacité considéré, α , se calcule de manière similaire, en calculant le rapport, en nombre de voies, entre les deux branches :

$$\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche secondaire}}{\text{nombre de voies de la branche principale}} ;$$

- les constituants de la matrice OD relatifs à des manœuvres de confort sont à ajuster pour optimiser la charge supportée par chaque voie.

Calcul

Les calculs sont menés suivant les mêmes principes que ceux exposés en partie 1, chapitre 2.4 concernant l'évaluation du fonctionnement des convergents :

- considérer le fonctionnement au point de partage de capacité et calculer les débits de partage de capacité. Pour rappel, ces débits sont liés par la relation $q_s^\alpha = \alpha \cdot q_p^\alpha$. Calculer dans ce cas les valeurs maximales que peuvent prendre les débits q_p^α et q_s^α , telles qu'aucune charge ne dépasse la capacité ;
- si les demandes de débit sur chaque branche D_p et D_s sont supérieures respectivement aux débits de partage de capacité q_p^α et q_s^α ($D_p > q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$), alors les débits effectifs sont égaux à ces débits de partage de capacité ($q_p = q_p^\alpha$; $q_s = q_s^\alpha$). **La congestion se forme sur les deux branches ;**
- si $D_p \leq q_p^\alpha$ et $D_s > q_s^\alpha$, alors le débit effectif sur la branche principale est égal à la demande ($q_p = D_p$) et le débit effectif sur la branche secondaire (q_s) prend la valeur maximum telle qu'aucun total des charges supportées par une voie ne dépasse sa capacité. **La congestion se forme sur la branche secondaire ;**
- si $D_p > q_p^\alpha$ et $D_s \leq q_s^\alpha$, alors le débit effectif sur la branche secondaire est égal à la demande ($q_s = D_s$) et le débit effectif sur la branche principale (q_p) prend la valeur maximum telle qu'aucun total des charges supportées par une voie ne dépasse sa capacité. **La congestion se forme sur la branche principale.**

Application numérique : détermination des débits effectifs selon la méthode des charges

En reprenant l'exemple précédent, on déterminera les débits effectifs de l'entrecroisement saturé. La matrice OD de la demande est rappelée :

	VSA	Sortie	Total
VSA	4010	1180	5190
Entrée	1420	260	1680
Total	5430	1440	6870

Illustration 82 : matrice OD de la demande

On calcule la part de la demande sur VSA souhaitant sortir : $\beta_p = \frac{1180}{5190} = 0,23$

et on calcule la part de la demande sur bretelle souhaitant entrer : $\beta_s = \frac{1420}{1680} = 0,85$.

Ces valeurs peuvent être résumées dans une matrice OD :

	VSA	Sortie	Total
VSA	77%	23%	100%
Entrée	85%	15%	100%

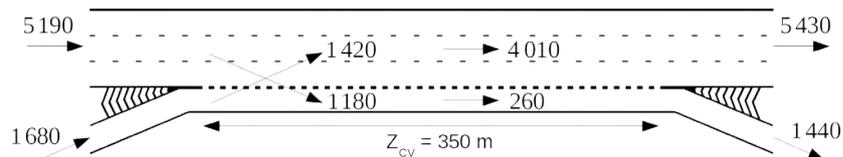


Illustration 83 : répartition des demandes et matrice OD sur l'entrecroisement

Calcul des débits de partage de capacité

On considère que les débits effectifs sur chacune des branches sont reliés par le coefficient de partage des débits à capacité. Comme la branche principale comporte 3 voies et la branche secondaire une seule, la valeur du paramètre est $\alpha = \frac{1}{3}$.

On cherche à déterminer la valeur maximale du débit sur la branche principale q_p^α (q_s^α se déduisant par la relation $q_s^\alpha = \alpha \cdot q_p^\alpha$) telle que la capacité de chaque voie ne soit pas dépassée. La recherche de cette valeur maximale intègre la variation des débits correspondant aux manœuvres de confort. Le calcul est facilité par l'utilisation d'un programme d'optimisation (cf. partie 1, chapitre 5.4 et annexe 3).

Par optimisation, on obtient le débit effectif sur la branche principale : $q_p^\alpha = 5080 \text{ véh/h}$.

On en déduit le débit effectif sur la branche secondaire : $q_s^\alpha = \alpha \cdot q_p^\alpha = 1693 \text{ véh/h}$.

La matrice OD par voie correspondante (intégrant les débits de confort) est la suivante :

	VG	VM	VD	VE
VG	1693	0	0	0
VM	107	1587	0	0
VD	0	204	335	1155
VE	0	0	1431	262

Les calculs de charge montrent qu'aucune voie ne dépasse sa capacité.

$$c_{\max}(VG)=1800 \text{ véh/h} ; c_{\max}(VM)=1800 \text{ véh/h} ; c_{\max}(VD)=2099 \text{ véh/h} ;$$

$$c_{\max}(VE)=2008 \text{ véh/h} .$$

Vérification des conditions de fonctionnement et détermination des débits effectifs en amont

On compare à présent les demandes de débit sur chaque branche avec les débits de partage de capacité. Pour rappel : $D_p=5190 \text{ véh/h}$ et $D_s=1680 \text{ véh/h}$.

On observe que $D_p > q_p^a$ et $D_s < q_s^a$, donc la congestion se propage uniquement sur la branche principale.

Dans cette situation, le débit effectif s'écoulant sur la branche secondaire est égal à la demande.

$$q_s = D_s = 1680 \text{ véh/h} .$$

Le calcul du débit effectif s'écoulant sur la branche principale est similaire au calcul des débits de partage de capacité. On obtient ainsi :

$$q_p = 5096 \text{ véh/h} .$$

Détermination des débits effectifs en aval

On peut également déterminer les valeurs des débits effectifs en aval de l'entrecroisement. On applique aux valeurs de q_p et q_s la matrice OD en proportion :

	VSA	Sortie	Total
VSA	77%	23%	100%
Entrée	85%	15%	100%

	VSA	Sortie	Total
VSA	3937	1159	5096
Entrée	1420	260	1680
Total	5357	1419	6776

Ainsi, en aval de l'entrecroisement, $q_p=5357 \text{ véh/h}$ et $q_s=1419 \text{ véh/h}$.

5.3 Utilisation de la méthode sur des configurations existantes

Certaines études concernent des configurations d'accès existantes. Il peut s'agir soit de projets de modification de l'aménagement existant, soit de projets connexes qui modifieront la demande de trafic initiale.

Dans ce cas, les données de trafic permettent de calculer la capacité de la configuration existante, suivant la méthode des charges. Cette capacité estimée est ensuite exploitée pour évaluer le fonctionnement en situation « projet ».

Le calcul de capacité consiste à définir un niveau de charge maximal admis, au-delà duquel la congestion apparaît. Il requiert de respecter certaines étapes.

Point de vigilance : limites d'emploi de la méthode

La méthode suivante concerne particulièrement les configurations existantes, pour lesquelles les demandes de trafic provoquent déjà une saturation. Elle permettra ainsi de vérifier l'impact du projet sur la saturation existante : soit il la résorbera, soit il l'amplifiera.

Si les niveaux de trafic actuels ne provoquent pas de congestion, la méthode n'est pas applicable en l'état. Dans ce cas, l'étude sera menée suivant la méthode décrite ci-avant, en utilisant au maximum les données disponibles du terrain (géométrie, localisation des zones de changement de voie). Les débits maximaux mesurés par voie seront utilisés, s'ils sont supérieurs aux capacités théoriques.

► Pré-requis : le recueil des données de trafic

Pour assurer un calage, il est nécessaire de disposer de données de comptage de trafic. Les données les plus simples à recueillir sont les données de boucles de comptage. Cependant, le positionnement des boucles n'est pas nécessairement pertinent vis-à-vis de l'étude à mener (éloignement du site, influence d'accès proches sur le comptage, pannes des équipements, etc.). Des campagnes de comptage spécifiques sont souvent requises.

En toutes circonstances, il est nécessaire de disposer de données de comptage sur chaque branche en amont et en aval de la configuration d'accès ainsi que de la matrice origine-destination entre chaque branche (des comptages à l'intérieur de la zone de changement de voie sont souvent peu pertinents, car les biais générés par les manœuvres des véhicules risquent de rendre inexploitable les données).

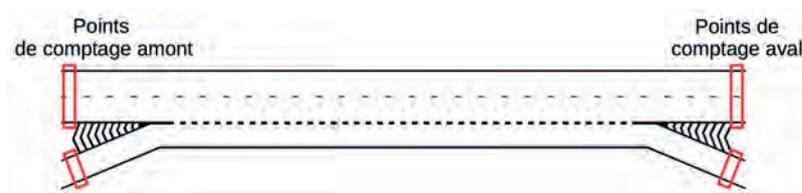


Illustration 84 : localisation des points de recueil de données

- **Les mesures sur les différents points doivent être faites sur la même période.** Une période de deux semaines de recueil est conseillée.
- Les données de débit et de vitesse sur des **périodes agrégées de 6 minutes** sont requises.
- Le détail des données par voie est recommandé pour apprécier la répartition des demandes amont par voie.

Pour aller plus loin : procédés de recueil des données de débit et vitesse

En l'absence de boucles de comptage, le procédé de recueil de données de débit et vitesse se fait préférentiellement de manière non intrusive. Deux types d'appareils peuvent être utilisés pour des comptages temporaires :

- les radars (de type Viking), qui enregistrent la date de passage et la vitesse de chaque véhicule. Leur intérêt réside dans leur coût et leur facilité de pose. En revanche, l'installation en bord de voie ne permet pas de garantir des comptages fiables par voie, en raison des masques mobiles générés par les PL notamment. C'est pourquoi ils sont à utiliser plutôt sur les sections à une voie (bretelles) ou les sections à deux voies (quand la pose en terre-plein central ou au-dessus de la voie rapide est possible) ;
- les radars multivoie (de type SX300 ou Smartsensor), qui permettent un comptage par voie de circulation de manière plus fiable que les radars simples. En revanche, ils nécessitent une installation à hauteur élevée (de l'ordre de 8 à 10 m). La configuration de certaines sections (en remblai par exemple) ne permet pas toujours la pose en hauteur.

Les OD doivent être mesurées **sur une durée correspondant à une période de pointe**. La particularité des trafics sur VSA (trafics pendulaires notamment) rend inadaptée une période d'agrégation à la journée entière.

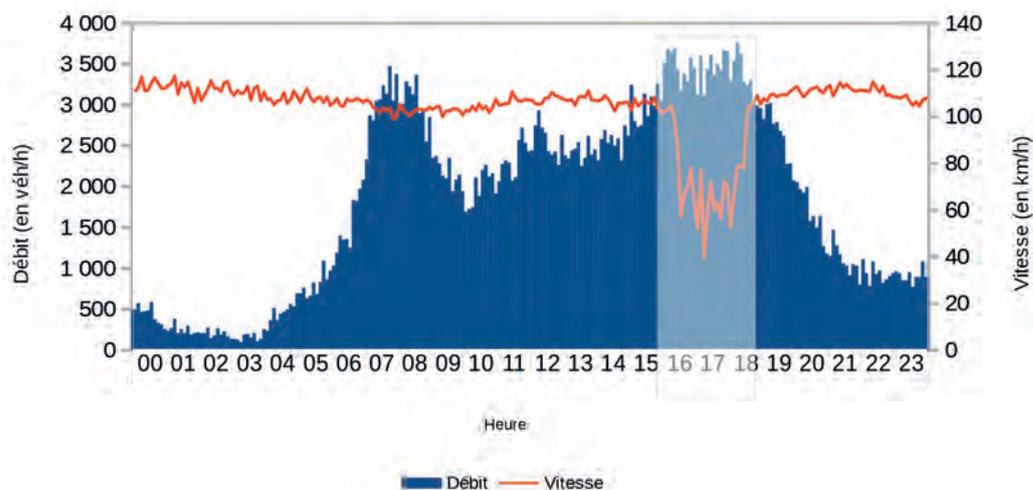


Illustration 85 : identification de la période de recueil des origines-destinations (période de pointe du soir)

Pour aller plus loin : procédés de recueil des données d'origine-destination

Plusieurs méthodes permettent de recueillir les données d'origine-destination (OD) :

- la réalisation d'une enquête par relevé manuel de plaques d'immatriculation sur les périodes à étudier. Un tel procédé ne peut s'envisager que sur une période courte – une ou deux journées. Il peut permettre de reconstituer une matrice OD par voie ;
- l'installation d'appareils de lecture automatique de plaques d'immatriculation (LAPI). Le taux de détection peut être particulièrement élevé dans de bonnes conditions de visibilité et il est possible de décomposer l'OD par voie de circulation. En revanche, le nombre d'appareils et leurs sujétions de pose rendent leur mise en œuvre parfois délicate ;
- l'installation de balises Bluetooth à proximité de chaque tronçon, horodatant le passage d'un véhicule comportant un appareil muni d'une antenne Bluetooth. Sa mise en œuvre est aisée. Compte tenu des portées de ces dispositifs, il faut veiller à bien positionner les capteurs pour pouvoir dissocier les branches sans ambiguïté. Le taux de détection est relativement faible (de l'ordre de 20 % du trafic total) et la distinction de l'OD par voie de circulation est impossible ;
- l'acquisition de données de type « floating car data » (FCD), constituées des « traces » des véhicules par enregistrement de leurs coordonnées GPS. Comme pour les balises Bluetooth, la reconstitution de la matrice OD par voie est impossible et le procédé ne recense que les véhicules équipés d'un appareil GPS. Enfin, la donnée est prétraitée par le fournisseur des données FCD. Ce type de données présente davantage d'intérêt pour des études sur des périmètres plus grands qu'un seul accès.

Comme le taux de détection est faible pour les procédés FCD et Bluetooth, les données d'OD recueillies devront être exploitées en considérant les mouvements en pourcentage.

► Sélection des périodes en limite de capacité

À partir du recueil de données, il s'agit d'identifier les périodes pendant lesquelles la configuration fonctionne en limite de capacité. Pour cela, on se base sur les chroniques de débits et de vitesses, agrégées par branche (la distinction par voie peut rendre difficile la lecture des chroniques). Le fonctionnement en limite de capacité se repère sur la période précédant la chute des vitesses sur les branches amont, liée à la saturation de la configuration.

Par commodité, on considérera par la suite que la durée de cette période en limite de capacité est d'une heure, sinon il conviendra d'adapter le calcul ci-dessous à la durée de cette période.

► Calcul de la capacité

Sur les périodes sélectionnées, il s'agit de déterminer le niveau de charge maximal admissible par la configuration. On cherche donc à homogénéiser les valeurs de charge par voie en faisant varier les débits de confort. Ce principe d'optimisation consiste à « remplir » au maximum la configuration par des manœuvres, de manière à connaître un niveau de charge maximal, au-delà duquel la configuration sature.

Les principales étapes à suivre sont :

- considérer les débits en amont de la configuration, sur la période d'une heure sélectionnée. À partir des données agrégées à 6 minutes (et exprimées en véh/h) sur chaque branche, il s'agit de faire la moyenne des 10 débits 6 min mesurés au cours de cette période ;
- considérer la matrice OD mesurée sur la période de pointe et en déduire les coefficients directionnels ;
- appliquer les coefficients directionnels aux débits amont pour calculer la matrice OD par voie. Seules les manœuvres obligatoires sont considérées à ce stade ;
- calculer les charges par voie ;
- définir les manœuvres de confort possibles et faire varier la valeur des débits correspondants, de manière à homogénéiser les charges par voie. L'homogénéisation des charges se limitera aux voies concernées par des manœuvres de confort (ainsi, pour une voie qui ne comporte que des manœuvres obligatoires, la charge initialement calculée est conservée telle quelle).

La capacité de chaque voie de circulation composant la configuration correspond à sa charge maximale calculée.

Le calcul peut être répété pour chaque période sélectionnée. Le niveau de charge calculé peut différer suivant les périodes. Cette variabilité peut être utile pour connaître la sensibilité du résultat et rendre plus pertinente l'analyse des résultats en situation « projet ».

► Évaluation du fonctionnement de la configuration « projet »

Le fonctionnement de la configuration projet se fait suivant la méthode présentée en partie 1, chapitre 5.2. Mais plutôt que de considérer la capacité théorique comme le seuil de charge à ne pas dépasser, on utilisera, pour chaque voie, sa charge maximale calculée précédemment :

- si la charge calculée en configuration projet pour chaque voie est inférieure à sa capacité, alors la situation projet ne sature pas ;
- si la charge calculée en configuration projet sur l'une des voies est supérieure à sa capacité, alors la situation projet présente une saturation.

5.4 Résumé des calculs à réaliser

► Cas d'un projet neuf

- Vérifier la saturation de la configuration d'accès, en comparant la charge maximale supportée par une voie avec sa capacité théorique ;
- calculer les débits de partage de capacité ;
- en déduire les débits écoulés.

Dans chacune de ces trois étapes, on fait varier les changements de voie de confort pour minimiser la charge maximale supportée par chaque voie.

► Cas d'une modification de configuration existante déjà saturée

- Recueillir des données de trafic de la configuration existante ;
- calculer la charge maximale supportée par chaque voie, en utilisant les débits mesurés et en faisant varier la valeur des changements de voie de confort ;
- appliquer la méthode pour projet neuf sur la configuration modifiée, en prenant en compte la charge maximale par voie, calculée à l'étape précédente.

Selon sa connaissance de la configuration d'accès existante, le modélisateur pourra modifier d'autres paramètres, comme les zones de manœuvre, la répartition des débits amont par voie ou la matrice OD par voie.

5.5 Fonctionnement lorsqu'une congestion remonte de l'aval

La méthode des charges est toujours valable. Cependant, la congestion remontant dans la configuration d'accès contraint les manœuvres de changement de voie à s'effectuer à des vitesses très faibles. Ainsi, la longueur de tout changement de voie (obligatoire ou de confort) **est considérée comme nulle**.

5.6 Utilisation d'un outil de calcul

Les méthodes présentées précédemment nécessitent des modalités de calcul devenant vite difficiles à exécuter « à la main », à mesure que la configuration d'accès étudiée est complexe ou que le nombre de types de manœuvres à prendre en compte est important.

Les recherches de valeurs de débit peuvent donc être facilitées par un programme d'optimisation. Les modalités d'optimisation diffèrent selon le type de calcul mené. L'annexe du présent guide détaille les principes de fonctionnement d'un tel programme d'optimisation.

PARTIE 2

Effet d'un accès congestionné

Partie 2 – Effet d'un accès congestionné

Avertissement

Cette partie vise à :

- rappeler l'intérêt de la méthode des débits cumulés pour l'estimation des effets d'une congestion sur les temps de parcours ;
- rappeler les principes de calcul de longueur de remontée de congestion, en utilisant la propagation des ondes liées à des changements de conditions de circulation.

La longueur maximale d'un bouchon est encore souvent calculée, à tort, en multipliant le stock maximal de véhicules pris dans la congestion par une valeur forfaitaire de distance intervéhiculaire (par exemple 7 m, correspondant en moyenne à la distance entre deux avants de véhicules à l'arrêt). Cette distance intervéhiculaire dépend en fait de la dureté de la congestion et peut varier du simple au quadruple. La méthode proposée ici (utilisant la propagation des ondes) permet une meilleure appréciation de la longueur de la congestion.

Toutefois, les calculs développés par la suite s'appuient sur une situation théorique et simplifiée (variation synchrone et par palier des offres et des demandes) qui ne peut traduire de manière totalement fiable la dynamique du trafic routier sur un réseau existant. Les principes et méthodes restent cependant valables. Si l'on veut se rapprocher des chroniques d'offre et de demande réelles, les calculs gagneront en complexité, ce qui nécessitera l'emploi d'outils adaptés.

1. Introduction

Lorsque l'analyse du fonctionnement d'un accès amène à conclure que la branche principale de cet accès atteint la saturation, il est généralement utile d'étudier les conséquences de la propagation de la congestion vers l'amont, en matière de temps de parcours, de durée de la congestion ou de longueur maximale de la file d'attente. Cette congestion remontant peut impacter des points sensibles de la VSA en amont de l'accès, comme par exemple, un autre accès.

1.1 Le périmètre d'étude

Le périmètre d'étude pour l'application de la méthode sera généralement limité à une section de VSA comportant l'accès saturé et l'accès amont le plus proche. L'ensemble des caractéristiques de cette section doivent être connues, comme le type et la géométrie de chaque accès, ainsi que la distance les séparant.

Des périmètres plus conséquents nécessiteront des calculs plus lourds. Par ailleurs, la méthode proposée néglige certains effets induits de la congestion, comme les changements d'itinéraires ou d'heure de départ.

1.2 Chroniques de demande

Pour étudier le fonctionnement de chaque accès, les demandes de débit sont requises. Cependant, les niveaux de débits à la période de pointe ne sont pas suffisants. Seules des chroniques de demande, c'est-à-dire la variation de la demande dans le temps, permettent d'étudier les phénomènes de propagation et de résorption de la congestion. Au minimum, il s'agira de disposer en données d'entrée, pour chaque accès :

- le découpage temporel des conditions de circulation : durées des périodes de pointe et des périodes creuses ;
- le niveau de la demande pour chacune de ces périodes caractéristiques ;
- dans le cas d'entrecroisement, la matrice origine-destination pour chaque période.

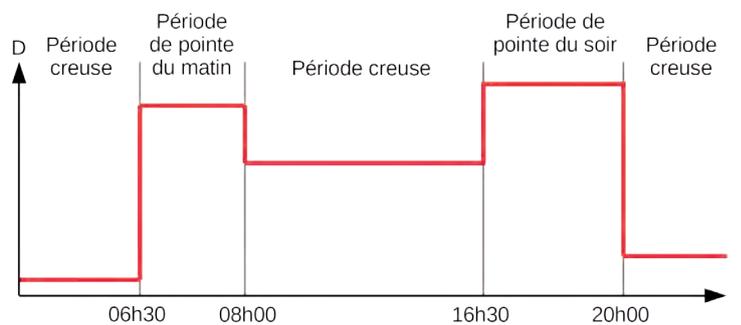


Illustration 86 : exemple de chronique simplifiée de demande

Point de vigilance : difficultés d'estimation de la demande sur une infrastructure existante

En général, les demandes de débits issues des études de trafic sont estimées constantes sur la période de pointe. La demande lors des périodes creuses n'est pas fournie. Sur infrastructure existante, le recueil de données de trafic peut être exploité pour estimer la demande en période creuse, en considérant par exemple que la variation de débit (en valeurs relatives) est similaire entre la situation actuelle et la situation en projet.

Toutefois, les données de trafic ne fournissent pas toujours le niveau de demande réel sur les périodes congestionnées (car la demande est contrainte par l'offre). Pour estimer par la mesure le niveau de demande réel, on peut positionner un point de mesure en amont de la section étudiée, au-delà de la remontée maximale de la congestion. En présence d'accès intermédiaires, il est nécessaire de recueillir les données de trafic sur toutes les branches. Toutefois, cette méthode n'est plus valable si les branches secondaires sur les accès intermédiaires sont congestionnées.

Par ailleurs, il est possible que les périodes de pointe apparaissant en différents points de la VSA soient de durées différentes et qu'elles n'apparaissent pas simultanément. De telles considérations peuvent alors fortement complexifier les calculs. En première approche, on peut s'accorder sur des périodes de pointe synchrones, afin de simplifier les calculs de fonctionnement.

1.3 L'offre

► Chronique de l'offre

L'offre mobilisable au niveau d'un accès n'est pas constante dans le temps, puisqu'elle dépend directement des conditions de trafic en aval. Donc il s'agit également de déterminer, à partir des chroniques de débit écoulé, la chronique d'offre au niveau de l'accès.

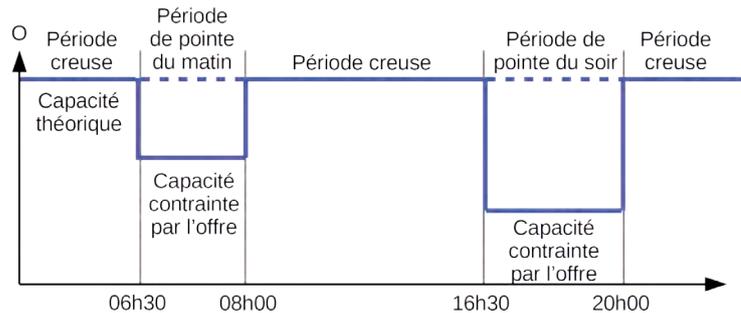


Illustration 87 : variation de l'offre selon les périodes

► Offre en amont d'un convergent

L'offre sur une branche en amont du convergent est égale à la valeur maximale entre le débit de partage de capacité et la capacité (ou l'offre) en aval diminuée de la demande sur l'autre branche.

Pour aller plus loin : expression de l'offre en amont d'un convergent

Les notations suivantes sont issues de la partie 1, chapitre 2.

L'offre sur la branche principale en amont d'un convergent est $\max(q_p^a; C - D_s)$.

L'offre sur la branche secondaire en amont d'un convergent est $\max(q_s^a; C - D_p)$.

► Offre en amont d'un divergent

L'offre sur la branche en amont du divergent est égale à la valeur minimale entre la capacité de la branche amont et le débit maximal telle que la capacité (ou l'offre) sur les branches en aval ne soit pas dépassée.

Pour aller plus loin : expression de l'offre en amont d'un divergent

Les notations suivantes sont issues de la partie 1, chapitre 3. Le coefficient directionnel est à déterminer en fonction des demandes de débit de chaque période considérée.

L'offre sur la branche principale en amont d'un divergent est $\min\left(C; \frac{C_s}{\beta}; \frac{C_p}{1+\beta}\right)$.

► Offre au niveau d'un entrecroisement

L'offre sur une branche en amont de l'entrecroisement est égale à la valeur maximale entre le débit de partage de capacité et le débit maximal telle que la capacité de l'entrecroisement ne soit pas dépassée, considérant un débit amont sur l'autre branche égal à la demande.

Pour aller plus loin : expression de l'offre en amont d'un entrecroisement

Les notations suivantes sont issues de la partie 1, chapitre 4. Les coefficients directionnels sont à déterminer en fonction des demandes de débits de chaque période considérée, de même que les débits de partage de capacité. La valeur de l'offre se détermine au niveau du point qui présente une pointe de charge dépassant la capacité.

• Au point P1

$$\text{Offre sur la branche principale : } \max \left(\frac{1}{1 + \alpha \frac{\beta_S}{n_{CV}}} C_P; C_P - \frac{\beta_S}{n_{CV}} D_S \right).$$

$$\text{Offre sur la branche secondaire : } \max \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha \frac{\beta_S}{n_{CV}}} C_P; \frac{n_{CV}}{\beta_S} (C_P - D_P) \right).$$

• Au point P2

$$\text{Offre sur la branche principale : } \max \left(\frac{1}{\alpha \cdot \beta_S + \left[(1 - \beta_P) + \frac{\beta_P}{n_{CV}} \right]} C_P; \frac{1}{(1 - \beta_P) + \frac{\beta_P}{n_{CV}}} (C_P - \beta_S \cdot D_S) \right).$$

$$\text{Offre sur la branche secondaire : } \max \left(\frac{\alpha}{\alpha \cdot \beta_S + \left[(1 - \beta_P) + \frac{\beta_P}{n_{CV}} \right]} C_P; \frac{1}{\beta_S} \left(C_P - \left[(1 - \beta_P) + \frac{\beta_P}{n_{CV}} \right] D_P \right) \right).$$

• Au point P3

$$\text{Offre sur la branche principale : } \max \left(\frac{1}{\alpha + \frac{\beta_P}{n_{CV}}} C_S; \frac{n_{CV}}{\beta_P} (C_S - D_S) \right).$$

$$\text{Offre sur la branche secondaire : } \max \left(\frac{\alpha}{\alpha + \frac{\beta_P}{n_{CV}}} C_S; C_S - \frac{\beta_P}{n_{CV}} D_P \right).$$

• Au point P4

$$\text{Offre sur la branche principale : } \max \left(\frac{1}{\beta_P + \alpha \left[(1 - \beta_S) + \frac{\beta_S}{n_{CV}} \right]} C_S; \frac{1}{\beta_P} \left(C_S - \left[(1 - \beta_S) + \frac{\beta_S}{n_{CV}} \right] D_S \right) \right).$$

$$\text{Offre sur la branche secondaire : } \max \left(\frac{\alpha}{\beta_P + \alpha \left[(1 - \beta_S) + \frac{\beta_S}{n_{CV}} \right]} C_S; \frac{1}{(1 - \beta_S) + \frac{\beta_S}{n_{CV}}} (C_S - \beta_P \cdot D_P) \right).$$

2. Durée de la congestion et impact sur les temps de parcours

La durée totale de la congestion et son impact sur les temps de parcours se calculent en utilisant la méthode des débits cumulés¹⁴.

2.1 Méthode des débits cumulés

► Principe

La méthode des débits cumulés consiste à examiner durant une période donnée les dates de passage de chaque véhicule en deux points donnés d'une infrastructure. La représentation graphique prend la forme de courbes de véhicules cumulés (CVC).

L'écart entre la date de passage d'un véhicule donné à l'entrée et la date de passage en sortie permet de connaître le temps de parcours de ce véhicule.

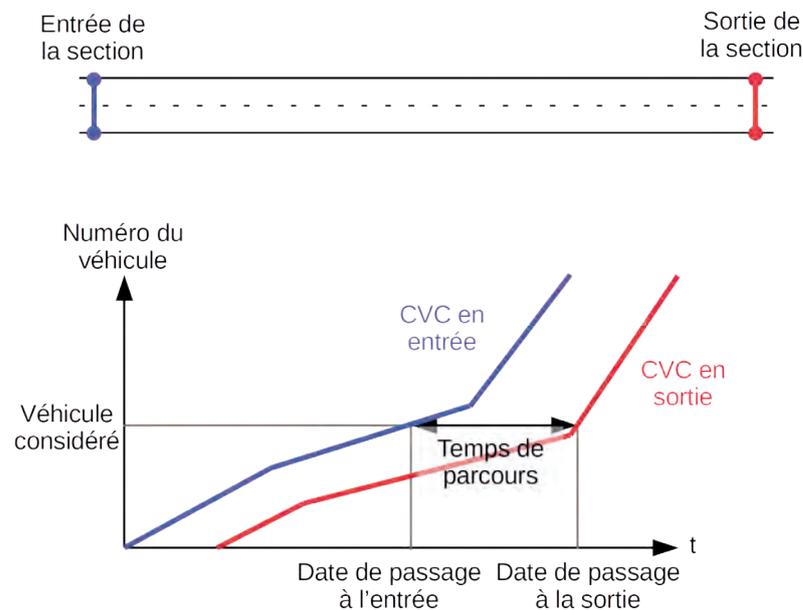


Illustration 88 : CVC en entrée et en sortie de section

La CVC étant une courbe représentant le nombre de véhicules en fonction du temps, la pente de la courbe correspond au débit au point de mesure.

14 Pour plus d'informations sur cette méthode, il est conseillé de se reporter au guide de C.Buisson et J.-B. Lesort, op.cit.

► Analyse d'une congestion

Pour étudier une congestion, deux CVC peuvent être représentées :

- la CVC de la demande, correspondant à la date d'arrivée théorique des véhicules au point de fin de la congestion (tête du bouchon), c'est-à-dire la date à laquelle les véhicules arriveraient en l'absence de congestion ;
- la CVC de l'offre, correspondant à la date effective de départ des véhicules de ce même point.

L'écart entre les deux courbes permet de donner des informations sur la durée totale de la congestion, le nombre total de véhicules touchés et le temps total perdu (aire entre les deux courbes).

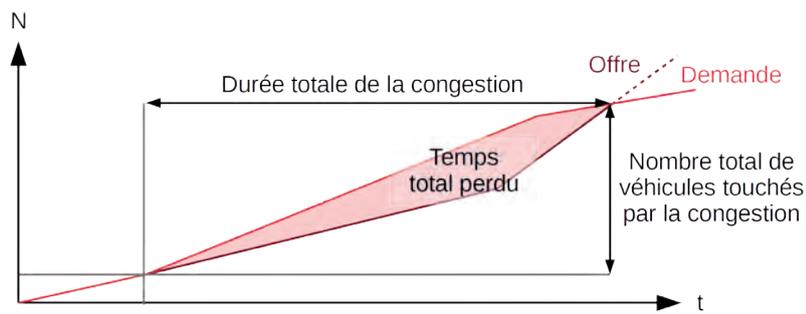


Illustration 89 : indicateurs sur les CVC de demande et d'offre

2.2 Calcul des indicateurs

► Conventions

Pour l'application de la méthode des débits cumulés, le point de passage des véhicules à considérer est situé au droit de l'accès en question. On considère que l'accès est congestionné à la période de pointe, puis redevient fluide à la période creuse.

- T_{pointe} durée de la période de pointe ;
- D_{pointe} demande de débit amont à la période de pointe ;
- Q_{pointe} offre au niveau de l'accès à la période de pointe ;
- D_{creuse} demande de débit amont à la période creuse ;
- Q_{creuse} offre au niveau de l'accès à la période creuse.

► Durée totale de la congestion

$$T_{congestion} = \left[1 - \frac{D_{pointe} - Q_{pointe}}{D_{creuse} - Q_{creuse}} \right] T_{pointe}$$

► Temps total perdu

$$\Delta T_{total} = \frac{D_{pointe} - Q_{pointe}}{2} \cdot T_{pointe} \cdot T_{congestion}$$

► Temps moyen perdu par véhicule

$$\Delta T_{moyen} = \frac{\Delta T_{total}}{N_{total}} \quad \text{avec} \quad N_{total} = \left[D_{pointe} - \frac{D_{pointe} - Q_{pointe}}{D_{creuse} - Q_{creuse}} \cdot D_{creuse} \right] \cdot T_{pointe}$$

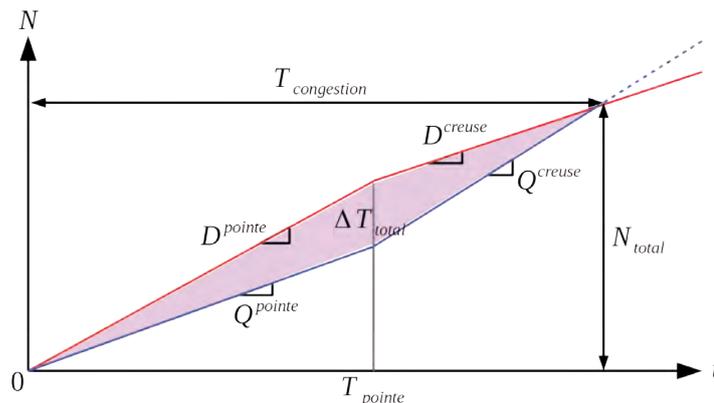


Illustration 90 : indicateurs sur CVC

Pour aller plus loin : les autres indicateurs de la CVC

On peut noter qu'en multipliant le temps total perdu par l'occupation moyenne par véhicule, on détermine le temps perdu à prendre en compte dans le calcul socioéconomique.

Par ailleurs, il est possible de déterminer le temps maximal perdu dans la congestion :

$$\Delta T_{max} = \frac{D^{pointe} - Q^{pointe}}{\min[D^{pointe}; Q^{creuse}]} \cdot T_{pointe}$$

La valeur de cet indicateur individuel peut être bien supérieure à celle du temps moyen perdu.

Application numérique : durée de la congestion et impact sur les temps de parcours

On considère l'entrée en insertion, dont le fonctionnement a été étudié dans la 1re partie. On rappelle les caractéristiques de cet accès : insertion à une voie sur une section de VSA90 à deux voies ; capacité d'une voie de circulation égale à 2 100 véh/h.

$$C_p = C = 4200 \text{ véh/h} ; C_s = 2100 \text{ véh/h}.$$

La chronique de demande est simplifiée sur une période de pointe et une période creuse :

Demande de débit	Période de pointe	Période creuse
Branche principale	3090	1640
Entrée	1280	720

La durée de la période de pointe est de 1 h 30.

Sur la période de pointe, les calculs précédents avaient montré que le convergent était congestionné. La congestion se propage uniquement sur la branche principale. La bretelle d'entrée reste fluide.

Les débits effectifs en amont du convergent sont rappelés :

$$q_p = 2920 \text{ véh/h} \text{ et } q_s = D_s = 1280 \text{ véh/h}$$

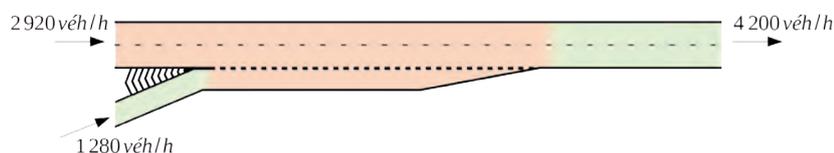


Illustration 91 : débits effectifs sur le convergent

Pour rappel, le débit de partage de capacité sur la branche principale est $q_p^u = \frac{2}{3} C = 2800 \text{ véh/h}$.

La chronique de l'offre depuis la branche principale est :

- en début de période de pointe, tant que la congestion n'est pas résorbée :

$$Q_p^{pointe} = \max(q_p^a; C - D_S^{pointe}) = \max(2800; 4200 - 1280) = 2920 \text{ véh/h} ;$$

- en période creuse :

$$Q_p^{creuse} = \max(q_p^a; C - D_S^{creuse}) = \max(2800; 4200 - 720) = 3480 \text{ véh/h} .$$

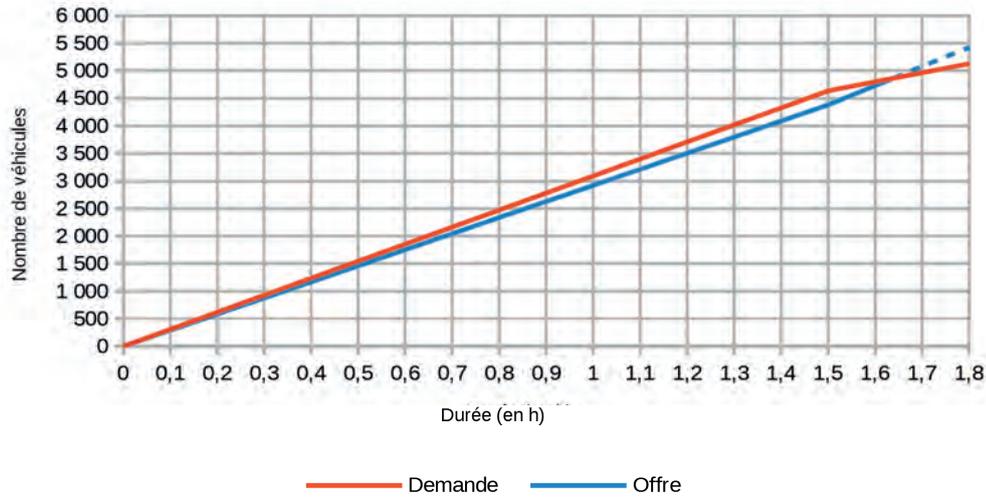


Illustration 92 : CVC du convergent étudié

La durée totale de la congestion est :

$$T_{congestion} = \left[1 - \frac{D_p^{pointe} - Q_p^{pointe}}{D_p^{creuse} - Q_p^{creuse}} \right] T_{pointe} = \left[1 - \frac{3090 - 2920}{1640 - 3480} \right] \cdot 1,5 = 1,64 \text{ h, soit environ 1 h 38.}$$

Le temps total perdu est :

$$\Delta T_{total} = \frac{D_p^{pointe} - Q_p^{pointe}}{2} \cdot T_{pointe} \cdot T_{congestion} = \frac{3090 - 2920}{2} \times 1,5 \times 1,64 = 209 \text{ h} .$$

Le nombre total de véhicules impactés par la congestion est :

$$N_{total} = \left[D_p^{pointe} - \frac{D_p^{pointe} - Q_p^{pointe}}{D_p^{creuse} - Q_p^{creuse}} \cdot D_p^{creuse} \right] \cdot T_{pointe} = \left[3090 - \frac{3090 - 2920}{1640 - 3480} \cdot 1640 \right] \cdot 1,5 = 4862 \text{ véhicules} .$$

Le temps moyen perdu par véhicule est :

$$\Delta T_{moyen} = \frac{\Delta T_{total}}{N_{total}} = \frac{209}{4862} = 0,04 \text{ h} \text{ soit environ 2,5 min.}$$

À titre de comparaison, le temps maximal perdu dans la congestion est :

$$\Delta T_{max} = \frac{D_p^{pointe} - Q_p^{pointe}}{\min[D_p^{pointe}; Q_p^{creuse}]} \cdot T_{pointe} = \frac{3090 - 2920}{\min[3090; 3480]} \cdot 1,5 = 0,08 \text{ h, soit environ 5 min.}$$

3. Longueur maximale de la congestion

L'allongement maximal de la congestion permet de vérifier son éventuel impact sur un accès amont. Il se calcule en exploitant les propriétés du diagramme fondamental. Le chapitre suivant donne des éléments de compréhension de ce modèle et son utilisation pour déterminer la géographie de la congestion.

3.1 États de trafic et modélisation des changements d'état

► Représentation des états de trafic

L'ensemble des états de trafic possibles d'une infrastructure se représentent sous forme d'un diagramme, nommé « diagramme fondamental ». Le diagramme fondamental repose sur l'existence d'une relation entre le débit et la concentration. Le débit, la concentration et la vitesse sont liés par la relation fondamentale, donnée par l'équation $q = k \cdot v$ où :

- q est le débit écoulé (en *véh/h*), c'est-à-dire le nombre de véhicules passant en un point donné pendant une période donnée ;
- k est la concentration (en *véh/km*), c'est-à-dire le nombre de véhicules présents sur une longueur donnée ;
- v est la vitesse de déplacement du flot de véhicules (en *km/h*).

La représentation graphique du diagramme fondamental peut être simplifiée à une forme triangulaire, afin de faciliter les calculs tout en conservant ses propriétés (représentation des états statiques du trafic, expression de la dynamique du trafic).

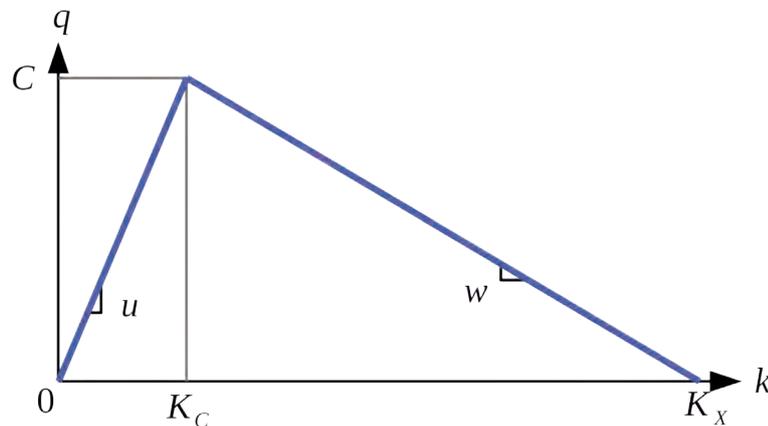


Illustration 93 : diagramme fondamental triangulaire

Les paramètres définissant le diagramme fondamental triangulaire sont :

- la vitesse libre, notée u (en km/h), correspondant à la vitesse maximale du flot de véhicules. Cette vitesse libre se retrouve pour des états de trafic en régime fluide. Elle correspond généralement à la vitesse limite autorisée ;
- la vitesse maximale de remontée de la congestion, notée w (en km/h). Cette vitesse correspond à la vitesse maximale à laquelle une congestion peut remonter sur une infrastructure. C'est également la vitesse à laquelle on peut suivre le redémarrage de véhicules arrêtés dans une file d'attente. Si on considère que les vitesses sont comptées positivement dans le sens de circulation, **cette vitesse est toujours négative** ;
- la concentration maximale, notée K_x (en $véh/km$), correspondant à la concentration d'une file d'attente de véhicules à l'arrêt.

La connaissance de ces trois paramètres permet de déterminer la capacité théorique de l'infrastructure, notée C (en $véh/h$), correspondant au débit maximal qu'elle peut supporter théoriquement :

$$C = \frac{u \cdot w}{w - u} K_x$$

Lorsque le débit est égal à la capacité, la concentration correspondante, appelée « concentration critique » et notée K_c (en $véh/km$), peut se calculer :

$$K_c = \frac{w}{w - u} K_x$$

Les valeurs standards des paramètres du diagramme fondamental triangulaire sont données dans le tableau ci-dessous. Dans le cas d'infrastructures existantes, il est possible de les déterminer à partir de données de trafic.

u (en km/h)	30	50	70	90	110
w (en km/h)	-18	-18	-18	-18	-18
K_x (en $véh/km$ par voie)	140	140	140	140	140
K_c (en $véh/km$ par voie)	53	37	29	23	20
C (en $véh/h$ par voie)	1570	1850	2000	2100	2160

Pour aller plus loin : estimation du diagramme fondamental sur infrastructure existante

Si l'étude porte sur une section de VSA existante, il est possible d'affiner les valeurs des paramètres par des mesures de trafic. En effet, des particularités locales peuvent fortement influencer sur les paramètres du diagramme, comme la circulation des PL sur les voies de droite ou des usagers qui admettent des intervalles intervéhiculaires faibles à l'approche d'accès.

Il est nécessaire de disposer de données de débit et de vitesse agrégées par périodes de 6 minutes, sur des durées de mesure suffisamment longues (15 jours dans l'idéal).

Après avoir calculé la concentration pour chaque donnée (par la relation $q = k \cdot v$), on représente le nuage de points sur le plan $(k ; q)$. La méthode la plus simple pour déterminer le diagramme fondamental est de tracer la courbe enveloppe du nuage de points. Des méthodes automatiques existent (se référer au guide Théorie du trafic et régulation dynamique¹⁵), mais une estimation visuelle peut suffire en première approche.

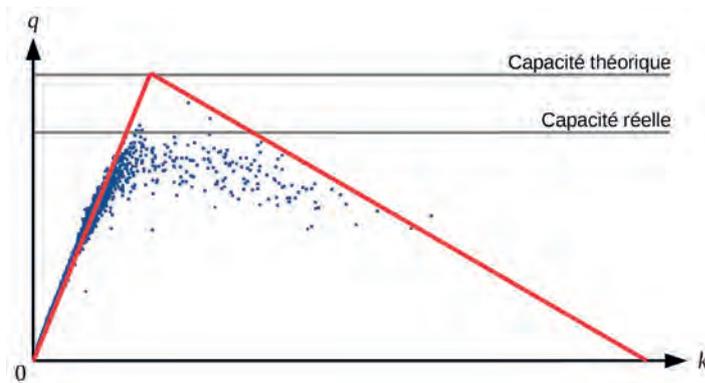


Illustration 94 : courbe enveloppe à partir d'un nuage de points

Selon les sections de VSA et le recueil de données à disposition, il peut être difficile de déterminer la courbe enveloppe. C'est notamment le cas pour la partie congestionnée, où il est rare d'avoir des situations totalement saturées (concentration proche de K_x). Dans certains cas également, la faible occurrence de situations de congestion rend difficile l'estimation de la vitesse maximale de remontée de congestion. En revanche, la vitesse libre est le paramètre le plus aisé à estimer (forte concentration du nuage de points en régime fluide). Dans le cas où l'estimation de certains paramètres est difficile, on utilisera les valeurs conventionnelles des paramètres (cf. tableau précédent).

Pour chaque état de trafic donné par le diagramme fondamental, la vitesse du flot de véhicules est donnée par la pente de la droite reliant le point de trafic à l'origine du diagramme. Ainsi, le diagramme fondamental donne des informations sur les deux régimes de trafic :

- le régime fluide (état 1), sur la partie gauche du diagramme, regroupe tous les états de trafic pour lesquels la vitesse du flot de véhicules est égale à la vitesse libre et où la concentration est inférieure à la concentration critique ;
- le régime congestionné (état 2), sur la partie droite du diagramme, regroupe tous les états de trafics pour lesquels la concentration a dépassé la concentration critique. La vitesse du flot de véhicules diminue avec l'augmentation de la concentration.

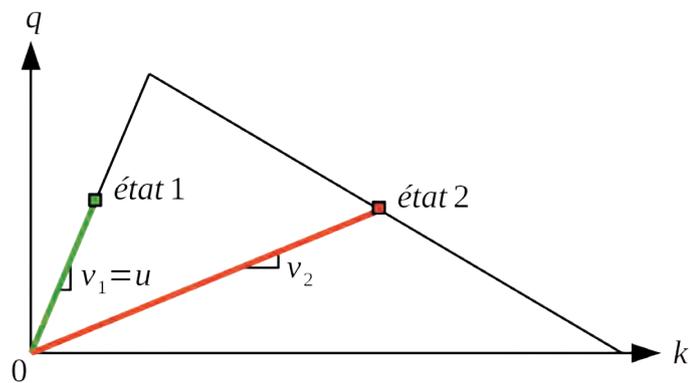


Illustration 95 : représentation des vitesses pour différents états de trafic

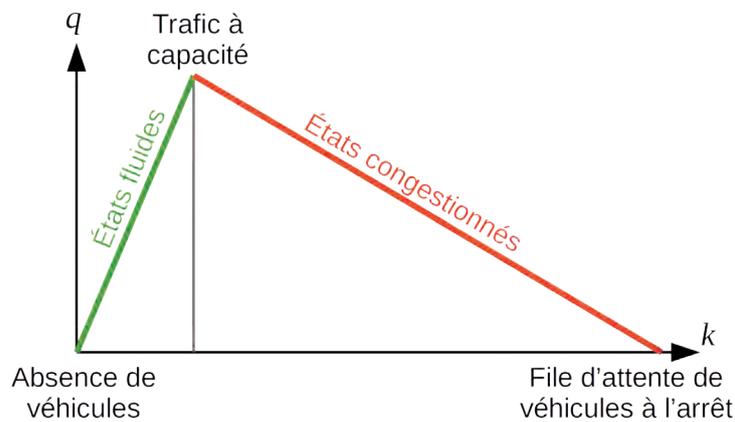


Illustration 96 : régimes de trafic sur un diagramme fondamental

► Vitesse de déplacement des fronts d'onde

On appelle « front d'onde » la ligne de séparation de deux zones présentant des conditions de circulation différentes.

La vitesse du front d'onde dépend du débit et de la concentration de part et d'autre du front d'onde. Si on considère un front d'onde séparant un état de trafic 1 (de débit q_1 et de concentration K_1) d'un état de trafic 2 (de débit q_2 et de concentration K_2), la vitesse du front d'onde en valeur algébrique, notée w_{12} , est donnée par la formule suivante :

$$w_{12} = \frac{q_1 - q_2}{K_1 - K_2}$$

La vitesse du front d'onde séparant un état fluide d'un état congestionné se détermine sur le diagramme fondamental et correspond à la pente de la droite reliant l'état fluide (représentant la demande) à l'état congestionné (représentant l'offre).

- Dans le cas de la propagation d'une congestion, le débit fluide (la demande) est supérieur au débit congestionné (l'offre). La vitesse du front d'onde est négative. Le front d'onde se déplace de l'aval vers l'amont.

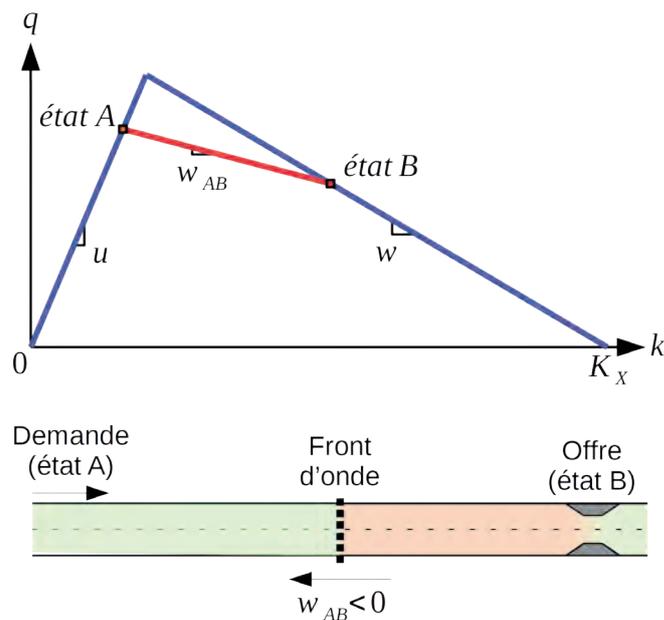


Illustration 97 : propagation de la congestion

- Dans le cas de la résorption d'une congestion, le débit fluide (la demande) est inférieur au débit congestionné (l'offre). La vitesse du front d'onde est positive. Le front d'onde se déplace de l'amont vers l'aval.

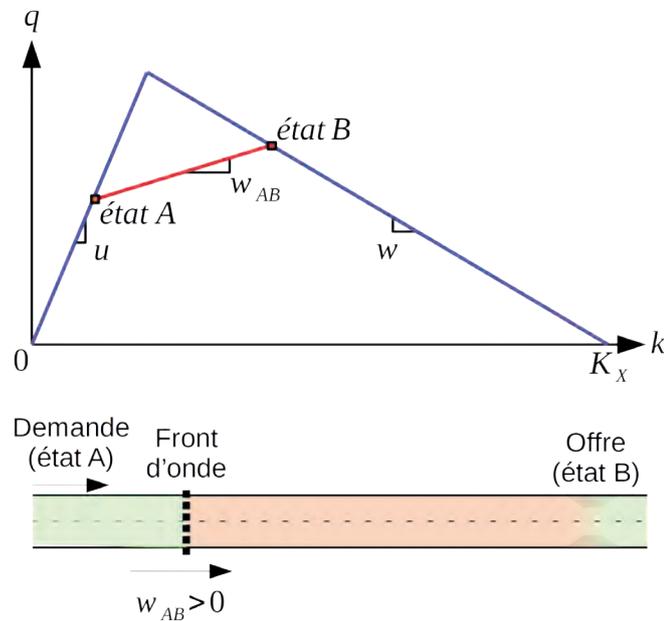


Illustration 98 : résorption de la congestion

Pour aller plus loin : compléments sur le front d'onde

Un front d'onde peut séparer une zone fluide et une zone congestionnée, mais aussi deux zones fluides ou deux zones congestionnées.

- Le front d'onde entre deux zones fluides se déplace de l'amont vers l'aval, à la vitesse u .
- Le front d'onde entre deux zones congestionnées se déplace de l'aval vers l'amont, à la vitesse w . C'est le cas notamment lorsque l'offre augmente pendant la congestion ; l'augmentation de l'offre se propage vers l'amont pour atteindre le front fluide/congestionné, qui se met alors à se déplacer vers l'aval (cf. point précédent).

► Représentation graphique

Comme le diagramme fondamental permet de déterminer les vitesses de propagation des fronts d'onde, on peut représenter graphiquement l'évolution dans l'espace et le temps de ces fronts séparant les états de trafic. Le diagramme espace-temps permet de connaître la géographie de la congestion.

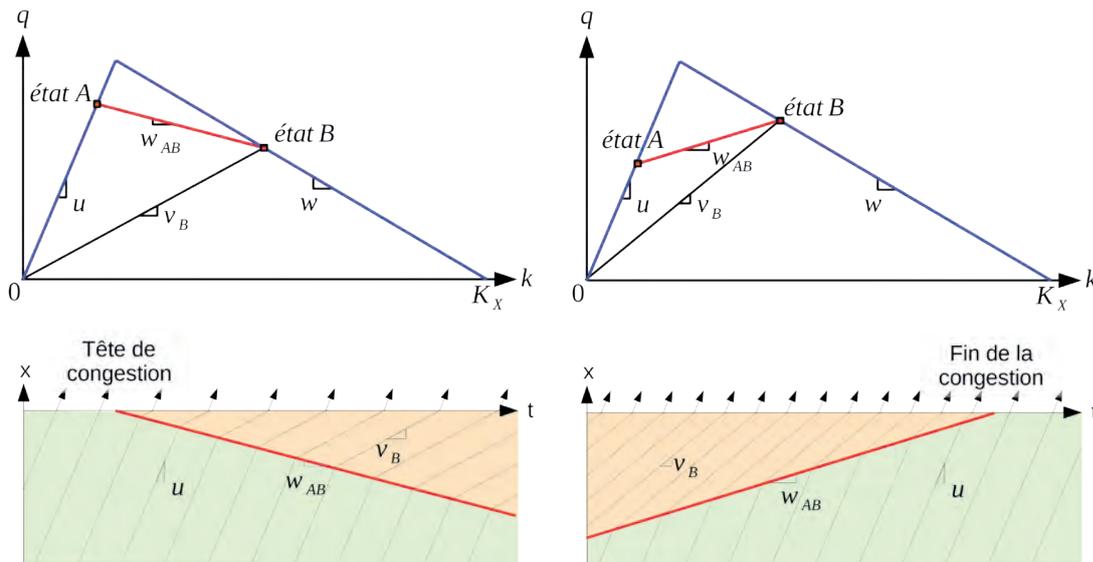


Illustration 99 : Représentation, sur un diagramme espace-temps, de la propagation (à gauche) et de la résorption (à droite) d'une congestion (les lignes correspondent aux trajectoires des véhicules)

3.2 Calcul de la longueur de la congestion

► Notations

- T_{pointe} durée de la période de pointe ;
- $T_{congestion}$ durée de la congestion, calculée suivant la méthode des débits cumulés.

Les paramètres du diagramme fondamental de la section étudiée sont :

- u la vitesse libre ;
- K_x la concentration critique ;
- w la vitesse maximale de remontée de la congestion, en valeur algébrique.

Pour chaque période considérée (pointe ou creuse), on définit :

- D la demande de débit amont et K_D sa concentration correspondante ;
- Q l'offre au niveau de l'accès et K_Q sa concentration correspondante. Cette offre est écrêtée par la capacité du tronçon (en d'autres termes, $q \leq \frac{u \cdot w}{w-u} K_x$) ;

$$K_D = \frac{D}{u} \text{ et } K_Q = \frac{Q}{w} + K_x$$

- w_{DQ} la vitesse du front d'onde délimitant la demande de débit D (à l'état fluide) de l'offre Q (à l'état congestionné)

$$w_{DQ} = \frac{D-Q}{K_D - K_Q}$$

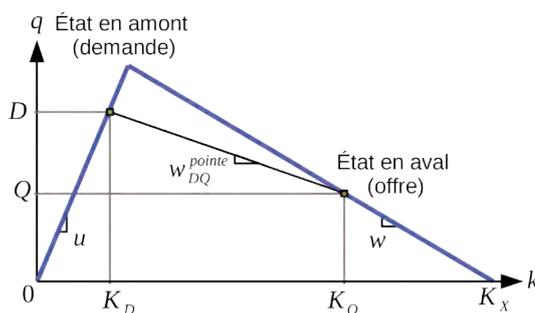


Illustration 100 : paramètres de la période de pointe sur diagramme fondamental

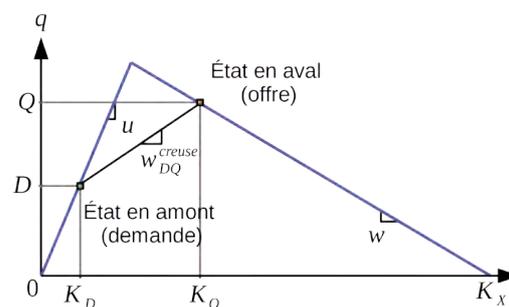


Illustration 101 : paramètres de la période creuse sur diagramme fondamental

► Longueur maximale de la congestion

La longueur maximale de la congestion s'exprime en valeur absolue.

- Si $D^{creuse} \leq Q^{pointe}$, alors $L_{congestion} = |w_{DQ}^{pointe}| T_{pointe}$.

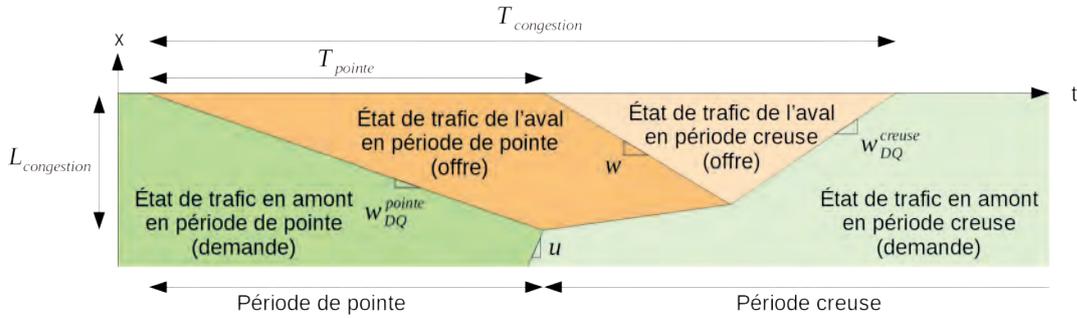


Illustration 102 : longueur maximale de la congestion sur un diagramme espace-temps

- Si $D^{creuse} > Q^{pointe}$, alors $L_{congestion} = \left| \frac{w_{DQ}^{creuse} \cdot w}{w_{DQ}^{creuse} - w} \right| (T_{congestion} - T_{pointe})$.

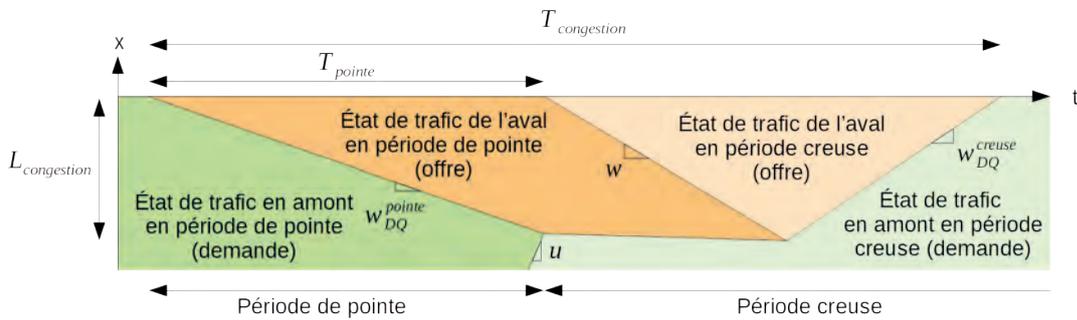


Illustration 103 : longueur maximale de la congestion sur un diagramme espace-temps

Application numérique : longueur maximale de la congestion

On souhaite connaître la longueur maximale de la congestion générée par l'entrée en insertion étudiée précédemment.

La chronique des débits correspondant à l'offre et à la demande est rappelée :

Débit	Période de pointe	Période creuse
Demande	3090	1640
Offre	2920	3480

On constate que $D^{creuse} \leq Q^{pointe}$.

Donc la longueur maximale de la congestion est égale à $L_{congestion} = |w_{DQ}^{pointe}| T_{pointe}$.

Comme le calcul de la longueur maximale de la congestion n'implique que ces termes relatifs à la période de pointe, les calculs sur la période creuse ne sont pas nécessaires.

La durée de la période de pointe est de 1 h 30.

On considère, pour la section étudiée, les paramètres standards du diagramme fondamental d'une VSA90 à deux voies :

$$u = 90 \text{ km/h} ; K_x = 280 \text{ véh/km} ; w = -18 \text{ km/h} .$$

Les concentrations correspondant à l'offre et à la demande sont calculées à partir des paramètres du diagramme fondamental :

$$K_D^{pointe} = \frac{D^{pointe}}{u} = \frac{3090}{90} = 34 \text{ véh/km} ;$$

$$K_Q^{pointe} = \frac{Q^{pointe}}{w} + K_x = -\frac{2920}{18} + 280 = 118 \text{ véh/km} .$$

La vitesse du front d'onde est égale à :

$$w_{DQ}^{pointe} = \frac{3090 - 2920}{34 - 118} = -2 \text{ km/h} \quad (w_{DQ}^{pointe} < 0 \text{ donc la congestion se propage}).$$

Ainsi la longueur maximale de la congestion est égale à :

$$L_{congestion} = |w_{DQ}^{pointe}| T_{pointe} = 2 \times 1,5 = 3 \text{ km} .$$

3.3 Impact d'une congestion sur un accès amont

► Principe

L'accès saturé génère une congestion qui remonte sur la VSA vers l'amont. L'allongement maximal de la congestion peut être tel que celle-ci influera sur les conditions de circulation de l'accès en amont immédiat. Dans un pareil cas, la congestion peut poursuivre sa propagation, avec des conséquences sur les branches qui constituent l'accès.

► Condition

Pour vérifier si l'accès en amont est touché par la congestion, il faut comparer la longueur maximale de la congestion $L_{congestion}$ à la distance entre les deux accès.

On considérera comme distance la longueur séparant le début de l'accès aval à la fin de l'accès amont, comme définis dans le tableau ci-dessous :

	Début de l'accès	Fin de l'accès
Entrée	Point d'entrée au plus tôt (E.1,00)	Fin du biseau d'insertion ou fin du marquage en T2-5u
Sortie	Panneau de signalisation avancée (D30 ou Da30)	Point de sortie au plus tard (S.1,00)
Entrecroisement	Point d'entrée au plus tôt (E.1,00)	Point de sortie au plus tard (S.1,00)

- Si $L_{congestion}$ est inférieure à la distance entre les accès, alors la congestion ne remonte pas jusqu'à l'accès amont. Les conditions de circulation sur l'accès amont se calculent sans contrainte de capacité.
- Si $L_{congestion}$ est supérieure à la distance entre les accès, alors la congestion remonte jusqu'à l'accès amont. Les conditions de circulation sur l'accès amont se calculent avec une contrainte de capacité.

ANNEXES

Annexe 1 - Expression des débits effectifs en amont des accès simples

Les expressions suivantes des débits effectifs permettent de s'affranchir des différentes étapes d'étude de fonctionnement des accès simples. Elles peuvent être utiles pour la construction d'un outil informatique, de type feuille de calcul.

1. Convergent simple

1.1 Notations

- C_p capacité de la branche principale, en amont du convergent ;
- C_s capacité de la branche secondaire (l'entrée), en amont du convergent ;
- C capacité de la branche immédiatement en aval du convergent ;
- Q offre sur la branche en aval du convergent, contraignant sa capacité ;
- D_p demande de débit principal ;
- D_s demande de débit entrant ;
- q_p débit effectif depuis la branche principale, sans remontée de congestion de l'aval ;
- q_s débit effectif entrant, sans remontée de congestion de l'aval ;
- q'_p débit effectif depuis la branche principale, avec remontée de congestion de l'aval ;
- q'_s débit effectif entrant, avec remontée de congestion de l'aval ;
- α coefficient de partage des débits à capacité, tel que

$$\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche secondaire}}{\text{nombre de voies de la branche principale}}$$

1.2 Débits effectifs sans remontée de congestion de l'aval

$$q_p = \min \left[\min(D_p; C_p); \max \left(\frac{1}{1+\alpha} C; C - \min(D_s; C_s) \right) \right]$$

$$q_s = \min \left[\min(D_s; C_s); \max \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} C; C - \min(D_p; C_p) \right) \right]$$

1.3 Débits effectifs avec remontée de congestion de l'aval

$$q'_p = \min \left[q_p; \max \left(\frac{1}{1+\alpha} Q; Q - q_s \right) \right]$$

$$q'_s = \min \left[q_s; \max \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} Q; Q - q_p \right) \right]$$

2. Divergent simple

2.1 Notations

- C capacité de la branche en amont du divergent ;
- C_s capacité de la branche secondaire (la sortie) ;
- C_p capacité de la branche principale en aval du divergent ;
- Q_s offre sur la branche secondaire en aval du divergent, contraignant sa capacité ;
- Q_p offre sur la branche principale en aval du divergent, contraignant sa capacité ;
- D_p demande de débit restant sur la branche principale ;
- D_s demande de débit sortant de la branche principale ;
- q débit effectif en amont du divergent, sans remontée de congestion en aval ;
- q' débit effectif en amont du divergent, avec remontée de congestion en aval ;
- β coefficient directionnel tel que $\beta = \frac{D_s}{D_p + D_s}$.

2.2 Débit effectif sans remontée de congestion en aval

$$q = \min\left(D_p + D_s; C; \frac{1}{\beta} C_s; \frac{1}{1+\beta} C_p\right)$$

2.3 Débit effectif avec remontée de congestion en aval

► Remontée de congestion depuis la branche principale

$$q' = \min\left(q; \frac{1}{1+\beta} Q_p\right)$$

► Remontée de congestion depuis la branche secondaire

$$q' = \min\left(q; \frac{1}{\beta} Q_s\right)$$

3. Entrecroisement simple

3.1 Notations

- C_p capacité de la branche principale (réputée identique à l'amont et à l'aval) ;
- C_s capacité de la branche secondaire (réputée identique à l'amont et à l'aval) ;
- Q_s offre sur la branche secondaire en aval de l'entrecroisement, contraignant sa capacité ;
- Q_p offre sur la branche principale en aval de l'entrecroisement, contraignant sa capacité ;
- D_p demande de débit amont sur la branche principale ;
- D_s demande de débit amont sur la branche secondaire ;
- $D_{p,s}$ demande de débit quittant la branche principale ;
- $D_{s,p}$ demande de débit quittant la branche secondaire ;
- q_p débit effectif sur la branche principale, sans remontée de congestion de l'aval ;
- q_s débit effectif sur la branche secondaire, sans remontée de congestion de l'aval ;
- q'_p débit effectif sur la branche principale, avec remontée de congestion de l'aval ;
- q'_s débit effectif sur la branche secondaire, avec remontée de congestion de l'aval ;
- α coefficient de partage des débits à capacité, tel que :

$$\alpha = \frac{\text{nombre de voies de la branche secondaire}}{\text{nombre de voies de la branche principale}} ;$$

- β_p coefficient directionnel depuis la branche principale, tel que $D_{p,s} = \beta_p \cdot D_p$;
- β_s coefficient directionnel depuis la branche secondaire, tel que $D_{s,p} = \beta_s \cdot D_s$;
- n_{cv} nombre maximal de manœuvres qu'un véhicule donné peut effectuer le long de la zone de changement de voie, en plus de son changement de direction, tel que :

$$n_{cv} = E \left[\max \left(1, \frac{Z_{cv}}{L_{cv}} - 1 \right) \right]$$

avec :

- L_{cv} longueur de changement de voie ;
- Z_{cv} zone de changement de voie.

3.2 Débits effectifs sans remontée de congestion de l'aval

$$q_p = \min(d_p; \max(q_p^a; q_p^D))$$

$$q_s = \min(d_s; \max(q_s^a; q_s^D))$$

avec :

$$d_p = \min(D_p; C_p)$$

$$d_s = \min(D_s; C_s)$$

$$q_p^a = \min \left[\frac{1}{1 + \alpha \frac{\beta_s}{n_{CV}}} C_p; \frac{1}{\alpha \cdot \beta_s + \left[(1 - \beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}} \right]} C_p; \frac{1}{\alpha + \frac{\beta_p}{n_{CV}}} C_s; \frac{1}{\beta_p + \alpha \left[(1 - \beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}} \right]} C_s \right]$$

$$q_s^a = \alpha \cdot q_p^a$$

$$q_p^D = \min \left[C_p - \frac{\beta_s}{n_{CV}} d_s; \frac{1}{(1 - \beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}}} (C_p - \beta_s \cdot d_s); \frac{n_{CV}}{\beta_p} (C_s - d_s); \frac{1}{\beta_p} \left(C_s - \left[(1 - \beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}} \right] \cdot d_s \right) \right]$$

$$q_s^D = \min \left[\frac{n_{CV}}{\beta_s} (C_p - d_p); \frac{1}{\beta_s} \left(C_p - \left[(1 - \beta_p) + \frac{\beta_p}{n_{CV}} \right] \cdot d_p \right); C_s - \frac{\beta_p}{n_{CV}} d_p; \frac{1}{(1 - \beta_s) + \frac{\beta_s}{n_{CV}}} (C_s - \beta_p \cdot d_p) \right]$$

3.3 Débits effectifs avec contrainte en aval

► Remontée de congestion depuis la branche principale

$$q'_p = \min \left[q_p; \max \left(\frac{1}{\alpha \cdot \beta_s + (1 - \beta_p)} Q_p; \frac{1}{1 - \beta_p} (Q_p - \beta_s \cdot q_s) \right) \right]$$

$$q'_s = \min \left[q_s; \max \left(\frac{\alpha}{\alpha \cdot \beta_s + (1 - \beta_p)} Q_p; \frac{1}{\beta_s} (Q_p - (1 - \beta_p) q_p) \right) \right]$$

► Remontée de congestion depuis la branche secondaire

$$q'_p = \min \left[q_p; \max \left(\frac{1}{\beta_p + \alpha (1 - \beta_s)} Q_s; \frac{1}{\beta_p} (Q_s - (1 - \beta_s) q_s) \right) \right]$$

$$q'_s = \min \left[q_s; \max \left(\frac{\alpha}{\beta_p + \alpha (1 - \beta_s)} Q_s; \frac{1}{1 - \beta_s} (Q_s - \beta_p \cdot q_p) \right) \right]$$

Annexe 2 - La méthode des charges en détail

Le guide présente les principales formules de calcul de charges, suivant les manœuvres de changement de voie usuelles. L'annexe propose la méthode des charges de manière plus complète, en présentant d'autres types de manœuvres. En outre, elle précise les modalités de calcul à considérer dans un programme d'optimisation.

1. Notations des paramètres de calcul

Au préalable de la présentation des formules, les notations des paramètres et des variables sont précisées. On considérera par la suite une configuration d'accès comportant n , voies en amont et m , voies en aval.

- Si la configuration conserve le nombre de voies, $n = m$.
- S'il n'y a pas conservation du nombre de voies, $n \neq m$. C'est le cas notamment des configurations comportant un biseau de création de voie (voie de pseudo-affectation par exemple) ou de suppression de voie (rabattement, biseau d'insertion).

1.1 Matrice OD par voie

On définit $D_{i,j}$ la demande allant de la voie i vers la voie j . L'ensemble de ces demandes prend la forme d'une matrice origine-destination.

$$D = \begin{pmatrix} D_{1,1} & D_{1,2} & \dots & D_{1,m} \\ D_{2,1} & D_{2,2} & \dots & D_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n,1} & D_{n,2} & \dots & D_{n,m} \end{pmatrix}$$

1.2 Longueur de changement de voie

On définit $Lcv_{i,j}$ la longueur nécessaire à l'ensemble des véhicules allant de la voie i vers la voie j pour effectuer un changement de voie.

$$Lcv = \begin{pmatrix} 0 & Lcv_{1,2} & \dots & Lcv_{1,m} \\ Lcv_{2,1} & 0 & \dots & Lcv_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Lcv_{n,1} & Lcv_{n,2} & \dots & Lcv_{n,m} \end{pmatrix}$$

Pour les mouvements directs, on ne définit pas de longueur de changement de voie. C'est pourquoi la matrice présente les termes $Lcv_{i,i}$ égaux à 0.

1.3 Longueur préparatoire entre changements de voie successifs

Lors de changements de voie multiples, on considère que les manœuvres ne sont pas continues et le véhicule manœuvrant restera sur une voie intermédiaire avant d'engager un nouveau changement de voie.

On définit $Lp_{i,j}$ la longueur préparatoire requise entre chaque manœuvre de changement de voie, pour l'ensemble des véhicules allant de la voie i vers la voie j . Cette longueur peut s'apparenter à une longueur nécessaire pour trouver un créneau intervéhiculaire acceptable. Elle n'existe pas pour les changements de voie uniques.

$$Lp = \begin{pmatrix} 0 & 0 & Lp_{1,3} & \dots & Lp_{1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Lp_{2,m} \\ Lp_{3,1} & 0 & 0 & \dots & Lp_{3,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Lp_{n,1} & Lp_{n,2} & Lp_{n,3} & \dots & Lp_{n,m} \end{pmatrix}$$

1.4 Début et fin des zones de changement de voie

On définit $xd_{i,j}$ le point auquel le premier véhicule allant de la voie i vers la voie j commence sa manœuvre et $xf_{i,j}$ le point auquel le dernier véhicule allant de la voie i vers la voie j a terminé sa manœuvre.

$$xd = \begin{pmatrix} 0 & xd_{1,2} & \dots & xd_{1,m} \\ xd_{2,1} & 0 & \dots & xd_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ xd_{n,1} & xd_{n,2} & \dots & xd_{n,m} \end{pmatrix}; \quad xf = \begin{pmatrix} 0 & xf_{1,2} & \dots & xf_{1,m} \\ xf_{2,1} & 0 & \dots & xf_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ xf_{n,1} & xf_{n,2} & \dots & xf_{n,m} \end{pmatrix}$$

2. Formules générales de calcul de charge

Les formules ci-dessous ne sont valables que si $(|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) + Lcv_{i,j} \leq xf_{i,j} - xd_{i,j}$, c'est-à-dire si la longueur de la zone de changement de voie est suffisante pour assurer au moins l'intégralité de la manœuvre de changement de voie.

2.1 Charge sur la voie d'origine

La charge supportée par la voie d'origine (voie i), générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(i)}(x) = \min \left[1; \frac{\max[0; xf_{i,j} - x - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})]}{xf_{i,j} - xd_{i,j} - Lcv_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})} \right] \cdot D_{i,j}$$

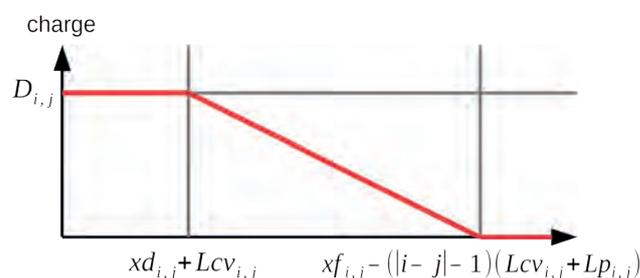


Illustration 104 : profil de charge sur la voie d'origine

2.2 Charge sur la voie de destination

La charge supportée par la voie de destination (voie j), générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(j)}(x) = \min \left[1; \frac{\max[0; x - xd_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})]}{xf_{i,j} - xd_{i,j} - Lcv_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})} \right] \cdot D_{i,j}$$

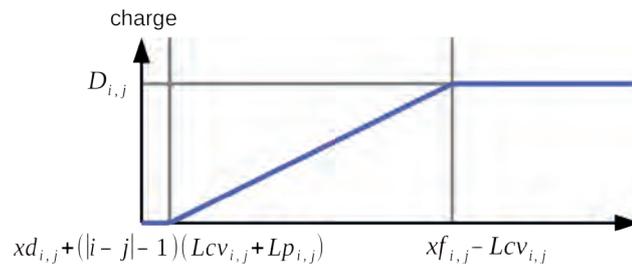


Illustration 105 : profil de charge sur la voie de destination

2.3 Charge sur les voies intermédiaires

Dans le cas des manœuvres de changement de voie multiples (si $|i-j| > 1$), la charge supportée par la voie intermédiaire (voie k), générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(k)}(x) = \left(\begin{array}{l} \min \left[1; \frac{\max[0; x - xd_{i,j} - (|i-k|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})]}{xf_{i,j} - xd_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) - Lcv_{i,j}} \right] \\ + \min \left[1; \frac{\max[0; xf_{i,j} - (|k-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) - x]}{xf_{i,j} - xd_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) - Lcv_{i,j}} \right] - 1 \end{array} \right) \cdot D_{i,j}$$

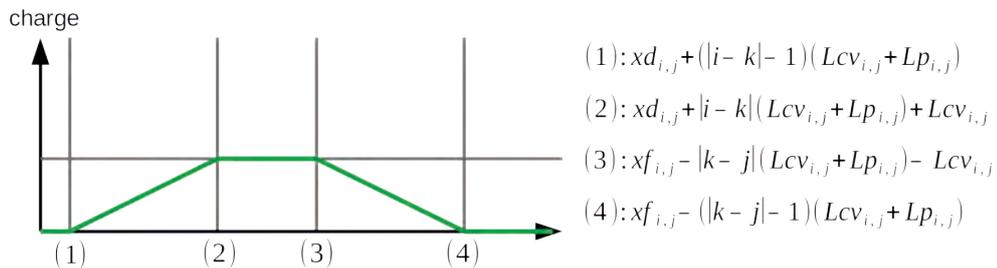


Illustration 106 : profil de charge sur la voie intermédiaire

2.4 Charge en présence de biseaux

La présence d'un biseau sur l'une des voies (biseau d'insertion, biseau de rabattement, biseau de création de voie) peut influencer sur le calcul de la charge, dans la mesure où la voie comportant le biseau n'est pas continue sur la configuration concernée. La suppression ou la création de la voie par le biseau constitue un point dur, qui va contraindre les manœuvres dans l'espace. La présence d'un biseau sur une voie nécessite des précautions dans le calcul de la charge :

- dans le cas de changements de voie unique, les formules de calcul restent identiques. Les points $xd_{i,j}$ et $xf_{i,j}$ sont à définir en cohérence avec la localisation et la dimension du biseau ;
- dans le cas de changements de voie multiples, le calcul de la charge est modifié uniquement sur la voie comportant le biseau et sur sa voie adjacente.

► Biseau de suppression de voie

On définit Bf_i l'abscisse de fin du biseau sur la voie i , c'est-à-dire le point auquel les véhicules provenant de la voie i doivent avoir terminé leur manœuvre, quelle que soit leur destination.

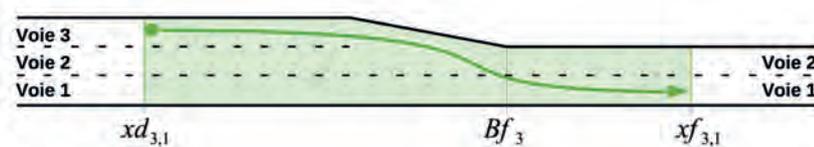


Illustration 107 : biseau de suppression de voie (rabattement) sur une section à trois voies

La charge supportée par la voie i , générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(i)}(x) = \min \left[1; \frac{\max [0; \min [Bf_i; xf_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})] - x]}{\min [Bf_i; xf_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})] - xd_{i,j} - Lcv_{i,j}} \right] \cdot D_{i,j}$$

La charge supportée par la voie k , adjacente à la voie i (soit $k = i \pm 1$), générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(k)}(x) = \left(\min \left[1; \frac{\max [0; x - xd_{i,j}]}{\min [Bf_i; xf_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})] - xd_{i,j} - Lcv_{i,j}} \right] + \min \left[1; \frac{\max [0; xf_{i,j} - (|k-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) - x]}{xf_{i,j} - xd_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) - Lcv_{i,j}} \right] - 1 \right) \cdot D_{i,j}$$

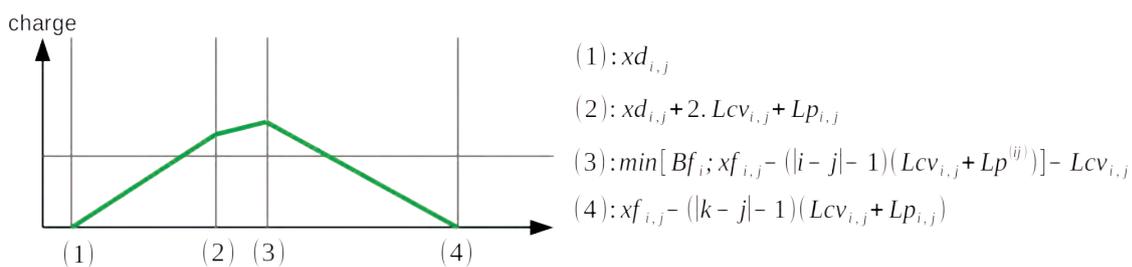


Illustration 108 : profil de charge sur la voie adjacente à la fin du biseau

► Biseau de création de voie

On définit Bd_j l'abscisse de début du biseau sur la voie j , c'est-à-dire le point auquel les véhicules allant vers la voie j peuvent démarrer leur manœuvre, quelle que soit leur origine.

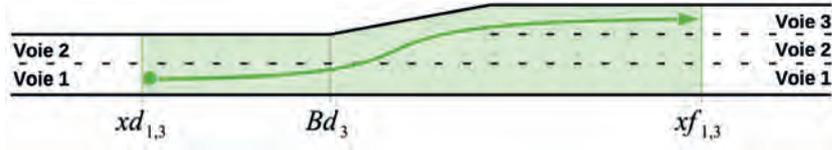


Illustration 109 : biseau de création de voie (décrochement) sur une section à deux voies

La charge supportée par la voie j , générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(j)}(x) = \min \left[1; \frac{\max[0; x - \max[Bd_j; xd_{i,j} + (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})]]}{xf_{i,j} - \max[Bd_j; xd_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})] - Lcv_{i,j}} \right] \cdot D_{i,j}$$

La charge supportée par la voie k , adjacente à la voie j (soit $k = j \pm 1$), générée par les manœuvres de la voie i vers la voie j , est égale à :

$$c_{i,j}^{(k)}(x) = \left(\begin{array}{l} \min \left[1; \frac{\max[0; x - xd_{i,j} - (|i-k|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})]}{xf_{i,j} - xd_{i,j} - (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j}) - Lcv_{i,j}} \right] \\ + \min \left[1; \frac{\max[0; xf_{i,j} - x]}{xf_{i,j} - \max[Bd_j; xd_{i,j} + (|i-j|-1)(Lcv_{i,j} + Lp_{i,j})] - Lcv_{i,j}} \right] - 1 \end{array} \right) \cdot D_{i,j}$$

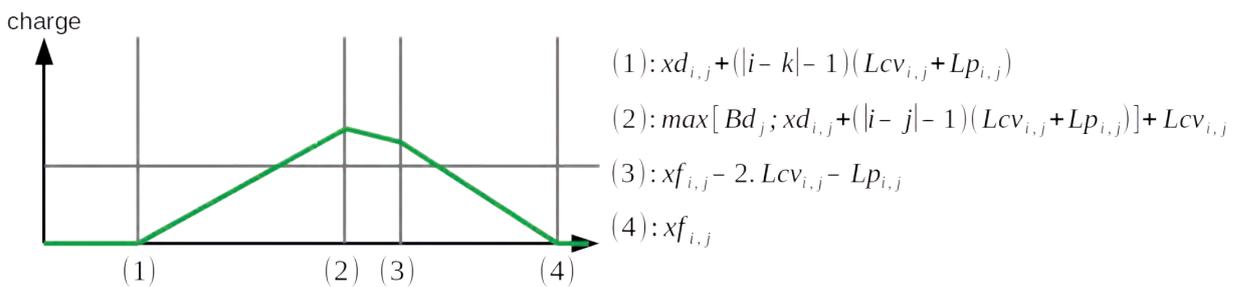


Illustration 110 : profil de charge sur la voie adjacente au début du biseau

2.5 Capacité des voies

La capacité de la voie i est notée C_i .

2.6 Calcul de la charge totale

La charge totale supportée par la voie k , est égale à la somme de l'ensemble des charges générées par les manœuvres de changement de voie.

$$c^{(k)}(x) = D_{k,k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n c_{i,k}^{(k)}(x) + \sum_{\substack{j=i \\ j \neq k}}^n c_{k,j}^{(k)}(x) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \sum_{\substack{j=i \\ j \neq k}}^n c_{i,j}^{(k)}(x)$$

Charge supportée par la voie k Trafic restant sur la voie k Trafic venant sur la voie k Trafic partant de la voie k Trafic passant par la voie k

Cette charge est ensuite comparée à la capacité théorique de la voie k .

- Si $c^{(k)}(x) \leq C_k$, alors la voie k n'est pas saturée.
- Si $c^{(k)}(x) > C_k$, alors la voie k est saturée.

Annexe 3 - Précisions sur le programme d'optimisation

Les modalités de calcul consistent en la définition préliminaire des paramètres (soit les valeurs constantes) à saisir au préalable, des conditions (ou des contraintes) fixées pour le calcul et des variables d'optimisation (calculées automatiquement).

1. Détermination de la charge optimale supportée par les voies (partie 1, chapitre 5.2)

Pour rappel, le principe est de faire varier les débits de confort de manière à limiter la charge de chaque voie, à l'atteinte de sa capacité théorique.

► Paramètres

- Les demandes de débit correspondant aux manœuvres obligatoires (répartition des débits amont par voie, matrice OD obligatoire par voie) ;
- les paramètres de longueur (zones de changement de voie obligatoires, longueur de changement de voie) ;
- les capacités théoriques (ou les seuils de débit maximal) par voie ;
- la sélection a priori des manœuvres de confort admissibles par la configuration et les paramètres de longueur correspondants.

Pour le dernier point, il s'agit avant tout de prédéfinir les types de comportements admissibles pour la configuration donnée et d'éviter des débits de confort peu réalistes sous prétexte qu'ils minimisent les charges.

► Variables

- Les valeurs des débits, correspondant aux manœuvres de confort prédéfinies.

► Contraintes

- Tous les débits composant la matrice OD par voie (intégrant les manœuvres obligatoires et de confort) sont positifs ou nuls ;
- sur les voies non concernées par les manœuvres obligatoires, la charge maximale égale la capacité théorique (ou le seuil de débit maximal).

Pour le deuxième point, les charges concernées par des manœuvres obligatoires sont limitées en matière d'optimisation. Selon les principes de calcul exposés, le dépassement de capacité ne pourra apparaître que sur ces voies.

La vérification de la saturation ou non de la configuration se résume donc à la comparaison entre la charge et la capacité, sur les voies comportant des manœuvres obligatoires.

2. Détermination des débits effectifs en cas de saturation (partie 1, chapitre 5.2)

Pour rappel, le principe est de déterminer le débit maximal en amont d'une des branches, tel qu'aucune des charges ne dépasse la capacité théorique correspondante. De la même manière que la méthode précédente, l'optimisation s'effectue également par variation des débits de confort.

Cette méthode est valable, quel que soit le débit effectif à déterminer : débit de partage de capacité ou débit sur une branche avec conservation de la demande sur l'autre branche.

► Paramètres

- Les répartitions de débits (en proportions), supposées constantes : coefficient de partage des débits à capacité, coefficients directionnels, répartition des débits par voie, matrice OD par voie des manœuvres obligatoires ;
- les paramètres de longueur (zones de changement de voie obligatoires, longueur de changement de voie) ;
- les capacités théoriques (ou les seuils de débits maximaux) par voie ;
- la sélection a priori des manœuvres de confort admissibles par la configuration et les paramètres de longueur correspondants (identiques à ceux définis dans la méthode précédente).

► Variables

- Le débit effectif ;
- les valeurs des débits, correspondant aux manœuvres de confort prédéfinies.

► Contraintes

- Tous les débits composant la matrice OD par voie (intégrant les manœuvres obligatoires et de confort) sont positifs ou nuls ;
- la charge maximale pour chaque voie est inférieure ou égale à la capacité théorique ;
- le débit effectif à calculer doit être maximal.

Il existe bien une multitude de valeurs de débit effectif permettant de vérifier les deux premières contraintes. La dernière contrainte à prendre en compte est primordiale, car elle permet de viser la valeur maximale de débit admise par la configuration.

3. Calcul de la capacité d'une configuration existante (partie 1, chapitre 5.3)

Pour rappel, le principe est, à partir des débits mesurés sur une configuration existante et sur la période précédant la saturation, de déterminer la charge maximale admissible, qui correspondra à la capacité de la configuration.

Le calcul consiste à maximiser les débits de confort, pour obtenir le niveau de charge maximal pour chaque voie. La charge maximale obtenue doit être le plus homogène possible entre les voies concernées par des manœuvres de confort.

► Paramètres

- Les données de trafic mesurées : débits mesurés en amont sur la période précédant la saturation, la matrice OD sur la période de pointe considérée ;
- la matrice OD par voie correspondant aux manœuvres obligatoires ;
- les paramètres de longueur (zones de changement de voie obligatoire, longueur de changement de voie) ;
- la sélection *a priori* des manœuvres de confort admissibles par la configuration et les paramètres de longueur correspondants.

L'observation des comportements peut aider à la détermination de certains paramètres, en particulier les paramètres de longueur, et à la sélection des manœuvres de confort admissibles.

► Variables

- Les valeurs des débits, correspondant aux manœuvres de confort prédéfinies.

► Contraintes

- Tous les débits composant la matrice OD par voie (intégrant les manœuvres obligatoires et de confort) sont positifs ou nuls ;
- la charge doit être identique sur chaque voie.

La dernière contrainte ne s'applique pas sur les voies supportant uniquement des manœuvres obligatoires. Sur de telles voies, la charge ne peut pas être optimisée.

Annexe 4 - Calcul théorique du coefficient d'équivalence PL

1. Objectif du calcul : un coefficient d'équivalence à débit élevé

Il est courant de considérer que ce coefficient est égal au rapport de la longueur moyenne d'un PL sur la longueur moyenne d'un VL. On obtient un coefficient de l'ordre de 2 à 3. Mais il s'agit alors d'une équivalence en matière de concentration, qui plus est lorsque les véhicules sont à l'arrêt. Or, en trafic, les conditions de circulation intéressantes sont celles proches de la capacité, c'est-à-dire lorsque les véhicules circulent à une vitesse relativement élevée. De plus, c'est en débit et non en concentration que les calculs sont conduits. Le coefficient d'équivalence PL/VL doit donc permettre d'appréhender le nombre de VL nécessaire pour avoir les mêmes caractéristiques d'écoulement qu'un flot de PL roulant à capacité.

2. Principe du calcul : un diagramme fonctionnel pour chaque type de véhicule

La méthode de calcul se base sur le diagramme fondamental (DF). Pour rappel, il s'agit d'un outil théorique reliant le débit (en véh/h) à la concentration (en véh/km). Chaque point du DF caractérise un état de trafic à l'équilibre. Une propriété intéressante est que la pente entre l'origine du repère et un point du DF est égale à la vitesse des véhicules dans cet état de trafic. On comprend alors que le point en bas à gauche est l'absence de véhicules, le point supérieur est le trafic à capacité et le point en bas à droite est une file d'attente à l'arrêt. Il est souvent utilisé dans sa forme triangulaire pour plus de simplicité. Il suffit de trois paramètres pour entièrement caractériser le DF. Les plus courants sont : la vitesse libre u , la vitesse des ondes de surcongestion $-w$ et la concentration maximale des véhicules à l'arrêt K .

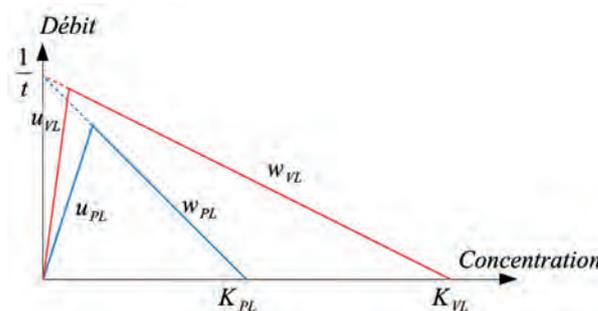


Illustration 111 : DF pour les deux types de véhicules : VL (rouge) et PL (bleu)

Un DF est censé reproduire le comportement de l'ensemble du trafic en considérant celui-ci comme homogène. Il est cependant possible de distinguer les différents types de véhicules le composant, ici VL et PL, et d'associer un DF propre à chacun d'eux. La figure ci-dessus représente en rouge celui des VL et en bleu celui des PL. On remarque que l'on peut prendre une vitesse libre plus faible pour les PL et que, comme les PL sont plus longs que les VL, la concentration maximale est bien inférieure.

En conséquence, la capacité du DF PL est inférieure à la capacité du DF VL. Ce ratio de capacités correspond précisément au coefficient d'équivalent PL/VL dont il est question dans cette annexe.

Pour l'estimer, il convient de calculer les deux capacités des DF VL et PL. Celles-ci se déduisent des paramètres du DF par la formule :

$$C = K \cdot \frac{u \cdot w}{u + w},$$

aussi vraie pour les VL : $C_{VL} = K_{VL} \cdot \frac{u_{VL} \cdot w_{VL}}{u_{VL} + w_{VL}}$ que pour les PL : $C_{PL} = K_{PL} \cdot \frac{u_{PL} \cdot w_{PL}}{u_{PL} + w_{PL}}$.

2.1 Formulation microscopique du DF

Or, comme le montre la figure précédente, les vitesses d'onde de surcongestion des VL et des PL ne sont pas les mêmes. Pour le comprendre, il faut reformuler le DF en termes de loi de poursuite. Par exemple, dans un trafic à capacité, lorsqu'un véhicule freine, son suiveur effectuera approximativement la même démarche avec un peu de retard et légèrement en amont. Ainsi, au niveau microscopique, l'onde de surcongestion se décompose en une distance d et un temps de réaction t . Si l'on note l la longueur d'un véhicule donné, cela se traduit par la formule suivante :

$w = \frac{l+d}{t}$ aussi vraie pour les VL : $w_{VL} = \frac{l_{VL} + d_{VL}}{t_{VL}}$ que pour les PL : $w_{PL} = \frac{l_{PL} + d_{PL}}{t_{PL}}$.

Si l'on revient au niveau du flux, on se rend compte que la somme $(l + d)$, égale à la distance moyenne entre deux avants de véhicules, est égale à l'inverse de la concentration maximale. Le temps de réaction est donné par la formule suivante :

$t = \frac{1}{w \cdot K}$ aussi vraie pour les VL : $t_{VL} = \frac{1}{w_{VL} \cdot K_{VL}}$ que pour les PL : $t_{PL} = \frac{1}{w_{PL} \cdot K_{PL}}$.

On peut faire l'hypothèse que la distance de sécurité et le temps de réaction sont caractéristiques du conducteur et non du véhicule. On peut alors légitimement faire l'hypothèse qu'ils sont identiques pour un conducteur de PL moyen et un conducteur de VL moyen. On obtient alors la relation suivante :

$$t = \frac{1}{w_{VL} \cdot K_{VL}} = \frac{1}{w_{PL} \cdot K_{PL}}.$$

Or, dans le plan (q, k) du DF, la grandeur $w \cdot K$ se trouve être l'ordonnée à l'origine de la droite de congestion. Cela signifie que cette ordonnée à l'origine est la même pour les PL et pour les VL, ce qui est bien le cas sur la première figure de cette annexe (illustration 120).

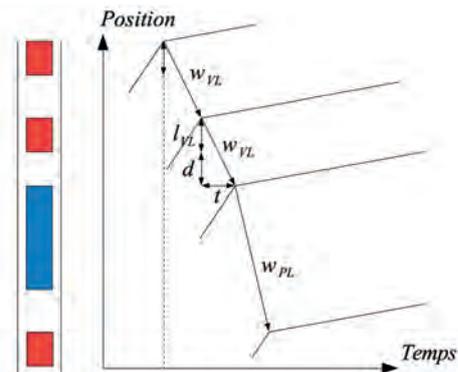


Illustration 112 : signification physique de w au niveau microscopique

2.2 Expression et calcul du coefficient d'équivalence

Des formules précédentes, on peut exprimer le coefficient E d'équivalence PL/VL en fonction d'un certain nombre de paramètres bien choisis. Les paramètres au sens physique le plus clair sont :

- les paramètres du DF des VL ;
- les longueurs moyennes des VL et PL ;
- la vitesse libre des PL.

Pour ces paramètres, les relations intéressantes sont celles qui permettent d'obtenir (attention aux unités !) :

- la capacité du DF des VL : $C_{VL} = K_{VL} \cdot \frac{u_{VL} \cdot w_{VL}}{u_{VL} + w_{VL}}$;
- les paramètres de loi de poursuite microscopique : $t = \frac{1}{w_{VL} \cdot K_{VL}}$ et $d = \frac{1}{K_{VL}} - l_{VL}$;
- les paramètres du DF des PL : $K_{PL} = \frac{1}{l_{PL} + d}$, $w_{PL} = \frac{1}{t \cdot K_{PL}}$, et $C_{PL} = K_{PL} \cdot \frac{u_{PL} \cdot w_{PL}}{u_{PL} + w_{PL}}$.

À partir de ces grandeurs, on peut alors estimer $E = \frac{C_{VL}}{C_{PL}} = \frac{u_{VL}}{u_{PL}} \cdot \frac{u_{PL} + w_{PL}}{u_{VL} + w_{VL}}$.

Application numérique : calcul théorique du coefficient d'équivalence PL

On prendra comme valeurs physiquement acceptables :

$$u_{VL} = 90 \text{ km/h} ; w_{VL} = 18 \text{ km/h} ; K_{VL} = 140 \text{ km/h} ;$$

$$l_{VL} = 5 \text{ m} ; l_{PL} = 18 \text{ m} ;$$

$$u_{PL} = 80 \text{ km/h} .$$

$$\text{On calcule } d = \frac{1}{K_{VL}} - l_{VL} = \frac{1000}{140} - 5 = 2,14 \text{ m} . \text{ On déduit } K_{PL} = \frac{1}{l_{PL} + d} = \frac{1000}{18 + 2,14} = 50 \text{ véh/km} .$$

$$\text{On calcule } t = \frac{1}{w_{VL} \cdot K_{VL}} = \frac{3600}{18 \cdot 140} = 1,43 \text{ s} . \text{ On déduit } w_{PL} = \frac{1}{t \cdot K_{PL}} = \frac{3600}{1,43 \cdot 50} = 51 \text{ km/h} .$$

$$\text{On obtient alors } E = \frac{u_{VL}}{u_{PL}} \cdot \frac{u_{PL} + w_{PL}}{u_{VL} + w_{VL}} = \frac{90}{80} \cdot \frac{80 + 51}{90 + 18} = 1,36 .$$

Annexe 5 - Typologie de manœuvres sur des exemples d'entrecroisement

Sont ici présentés des exemples de configurations d'accès générant des manœuvres d'entrecroisement. L'application de la méthode des charges nécessite en effet la définition des manœuvres de changement de voie possibles. Les schémas suivants proposent les types de manœuvres *a priori* envisageables.

- Seules les OD nécessitant au moins un changement de voie sont représentées. Les OD sans changement de voie (mouvement direct ou entrée/sortie selon les cas) ne sont pas indiquées.
- Les manœuvres obligatoires sont représentées en rouge. Les manœuvres de confort sont représentées en bleu.
- Les flèches en pointillés sont des manœuvres obligatoires supplémentaires, à ajouter selon le niveau et la typologie de demande : sortie forte nécessitant des manœuvres multiples, débit PL se rabattant sur la voie de droite, etc. (cf. partie 1, chapitre 5.2).
- Certains schémas constituent des configurations d'entrecroisement pouvant générer des manœuvres à risque ou présenter des problèmes de lisibilité. Le dimensionnement géométrique des configurations présentées doit faire l'objet d'une attention toute particulière. Il doit être par défaut conforme aux règles de l'art (VSA90/110).

Type de manœuvre	Représentation
Manœuvres obligatoires	
Manœuvres obligatoires supplémentaires, selon le niveau et la typologie de la demande	
Manœuvres de confort	

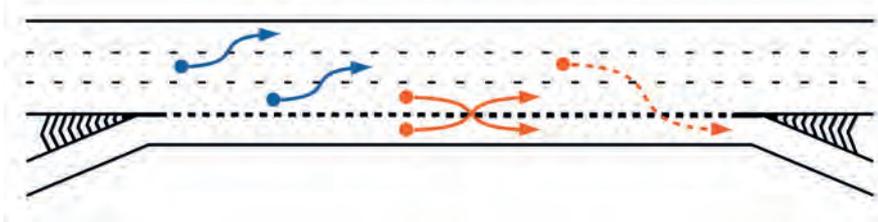


Illustration 113 : manœuvres possibles sur entrecroisement simple

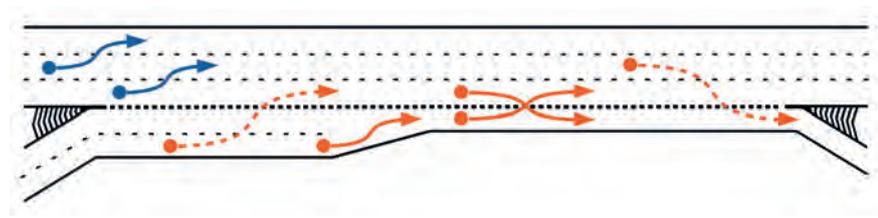


Illustration 114 : manœuvres possibles sur entrecroisement avec entrée à deux voies

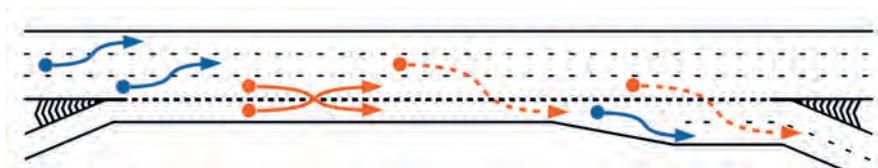


Illustration 115 : manœuvres possibles sur entrecroisement avec sortie à deux voies

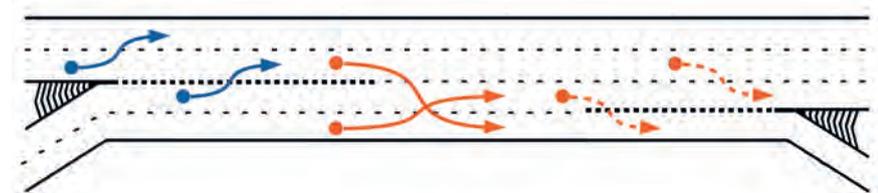


Illustration 116 : manœuvres possibles sur entrée à deux voies suivant d'une sortie à une voie

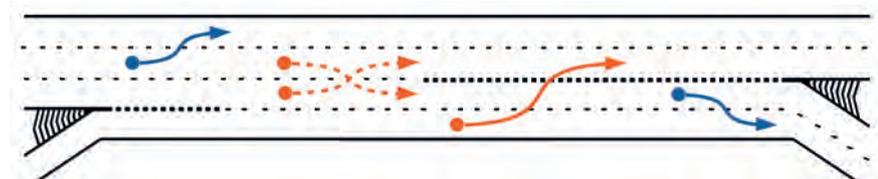


Illustration 117 : manœuvres possibles sur entrée à une voie suivie d'une sortie à deux voies

Terminologie

Capacité : débit maximum d'une infrastructure.

Changement de voie : action de passer d'une voie à la voie adjacente. On distingue les changements de voie qui permettent à l'utilisateur de présélectionner une voie avant un changement de direction (changement de voie obligatoire) des changements de voie qui permettent à l'utilisateur de maintenir des conditions de circulation qui lui conviennent (changement de voie de confort).

Concentration : nombre de véhicules contenus à un instant dans une portion de voie de longueur donnée. L'unité est le nombre de véhicules par unité d'espace (véh/m ; véh/km). Par cohérence avec les unités de débit et de vitesse, l'unité utilisée est le véh/km.

Congestion : état du trafic qui conduit les véhicules à ne pas circuler à leur vitesse désirée. En congestion, le comportement d'un usager est déterminé par celui de l'utilisateur qui le précède.

Convergent : type d'accès au niveau duquel des flots de véhicules se mélangent. Les convergents désignent les entrées sur les VSA.

Débit : nombre de véhicules passant en un point pendant une période donnée. L'unité du débit est le nombre de véhicules par unité de temps (véh/min ; véh/6 min ; véh/h ; véh/j). Pour l'étude du fonctionnement des accès, l'unité utilisée est le véh/h.

Débits cumulés : courbe qui représente l'évolution du nombre de véhicules passés en un point au cours du temps. Les débits cumulés sont toujours croissants.

Demande : débit cherchant à s'écouler sur une infrastructure. La demande de trafic n'est mesurable (au travers du débit) que lorsque le trafic est fluide. Lorsqu'il y a congestion, le débit est une mesure de l'offre (ou de la capacité) et non de la demande.

Diagramme fondamental : relation phénoménologique entre deux des trois variables globales du trafic (débit, concentration et vitesse du flot). Historiquement utilisée par les gestionnaires sous la forme d'une courbe débit-vitesse, la forme employée habituellement dans l'ingénierie du trafic est la courbe concentration-débit.

Divergent : type d'accès au niveau duquel les flots de véhicules se séparent. Les divergents désignent les sorties des VSA.

Entrecroisement : type d'accès de longueur limitée, au niveau duquel les flots de véhicules se mélangent puis se séparent. Ces deux mouvements, appelés « entrecroisements », sont facilités par une voie supplémentaire, appelée « voie d'entrecroisement », qui relie l'entrée à la sortie.

Fluidité : état de l'écoulement du trafic pendant lequel la plupart des véhicules roulent à leur vitesse désirée ou à une vitesse très faiblement inférieure.

Front d'onde : limite dans le flot de circulation séparant deux états de trafic différents, habituellement l'un fluide et l'autre congestionné. Le front d'onde est dynamique et se déplace dans le sens inverse de la circulation (exemple : propagation d'une congestion) ou dans le sens de la circulation (exemple : résorption d'une congestion).

Matrice origine-destination (matrice OD) : tableau à deux entrées indiquant les volumes de trafic depuis leur origine (en ligne) et jusqu'à leur destination (en colonne). L'unité classiquement utilisée pour la matrice OD est le débit, en véh/h.

Période de pointe : période de la journée où un réseau doit écouler une demande supérieure à celle du reste de la journée. Généralement sur les VSA, les périodes de pointe s'accompagnent de congestion.

Temps de parcours : temps de déplacement d'un usager entre un point A et un point B.

Temps total perdu : temps perdu par l'ensemble des usagers dans une congestion. C'est la somme des temps individuels perdus par tous les usagers concernés par cette congestion.

Vitesse du flot : vitesse d'écoulement du flot. Elle est égale au rapport entre le débit et la concentration.

Bibliographie

BUISSON C., LESORT J.-B., *Comprendre le trafic routier – Méthodes et calculs*, Certu, 2010.

CEREMA, *Voies structurantes d'agglomération – Conception des voies à 90 km/h et 110 km/h*, Éditions du Cerema, 2014.

CEREMA, *Niveaux de service de circulation des voies structurantes d'agglomération à 90 ou 110 km/h*, Éditions du Cerema, 2014.

CEREMA, *Théorie du trafic et régulation dynamique*, Éditions du Cerema, 2018.

CERTU, *Conception des accès sur Voies Rapides Urbaines de Type A (VRU A)*, Éditions du Certu, 2003.

DAGANZO C.F., « The cell transmission model representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory » in *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 28, issue 4, 1994, p. 269-287.

LIGHTHILL M.J., WHITHAM J.B., « On kinematic waves, part II : A theory of traffic flow in long crowded roads », in *Proceedings of the Royal Society A229*, 1955, p. 317-345.

MARCZAK F., LECLERCQ L., BUISSON C., « A macroscopic model for freeway weaving sections », in *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 30 « Advanced Computational Methods for Traffic Modeling, Data Processing and ITS », Wiley, 2015, p. 464-477.

RICHARDS P.I., « Shock waves on the highway », in *Operations Research*, vol. 4, 1956, p. 42-51.

Transportation Research Board (TRB), *Highway Capacity Manual*, 2010.

Index des encadrés

Point de vigilance : difficultés pour déterminer les chroniques de demande	13
Point de vigilance : capacité des sections présentant des contraintes géométriques	14
Pour aller plus loin : estimation du coefficient de partage des débits à capacité d'un convergent existant	17
Point de vigilance : cas où les demandes sont écrêtées par la capacité des branches en amont du convergent	19
Pour aller plus loin : prise en compte de la chute de capacité d'un convergent	21
Pour aller plus loin : prise en compte de la chute de capacité d'un convergent	22
Application numérique : fonctionnement d'un convergent simple	23
Point de vigilance : cas d'un convergent déjà congestionné	25
Point de vigilance : origine de la congestion dans un divergent	26
Point de vigilance : cas où la demande est écrêtée par la capacité de la branche en amont du divergent	29
Point de vigilance : discussions autour de l'hypothèse FIFO	31
Application numérique : fonctionnement d'un divergent simple	32
Point de vigilance : cas d'un divergent déjà congestionné	33
Point de vigilance : valeur de la longueur de changement de voie	34
Application numérique : calcul de la charge sur un entrecroisement simple	38
Pour aller plus loin : reformulation du calcul de charge	39
Application numérique : calcul des pointes de charge sur un entrecroisement simple	41
Point de vigilance : cas où les demandes sont écrêtées par la capacité des branches en amont de l'entrecroisement	43
Point de vigilance : calcul des débits de partage de la capacité	45
Application numérique : fonctionnement de l'entrecroisement simple	50
Point de vigilance : cas d'un entrecroisement déjà congestionné	54
Application numérique : impact d'une congestion sur un entrecroisement amont	55
Point de vigilance : discussions sur la répartition des manœuvres de changement de voie	58
Point de vigilance : discussions sur la longueur de préparation	60
Pour aller plus loin : estimation du coefficient d'équivalence PL	62
Application numérique : charge équivalente sur la voie de droite	63
Point de vigilance : prise en compte des deux-roues motorisés (2RM)	63

Point de vigilance : variabilité de la répartition des débits par voie	65
Point de vigilance : extension de la prise en compte des PL dans la matrice OD	66
Point de vigilance : spécificité du comportement en voie de gauche	67
Application numérique : application de la méthode des charges	69
Application numérique : détermination des débits effectifs selon la méthode des charges.	74
Point de vigilance : limites d'emploi de la méthode	76
Pour aller plus loin : procédés de recueil des données de débit et vitesse	77
Pour aller plus loin : procédés de recueil des données d'origine-destination	78
Point de vigilance : difficultés d'estimation de la demande sur une infrastructure existante	83
Pour aller plus loin : expression de l'offre en amont d'un convergent	84
Pour aller plus loin : expression de l'offre en amont d'un divergent.	84
Pour aller plus loin : expression de l'offre en amont d'un entrecroisement	85
Pour aller plus loin : les autres indicateurs de la CVC	89
Application numérique : durée de la congestion et impact sur les temps de parcours.	89
Pour aller plus loin : estimation du diagramme fondamental sur infrastructure existante	93
Pour aller plus loin : compléments sur le front d'onde	96
Application numérique : longueur maximale de la congestion.	100
Application numérique : calcul théorique du coefficient d'équivalence PL	119

Urban structuring roads

Traffic conditions on accesses

Urban structuring roads are subject to high traffic demands throughout the urban area. Development work on interchanges cause changes in traffic conditions on the infrastructure that can lead to recurrent congestion or make existing traffic jams worse.

The 2003 publication entitled “Design of accesses for type A urban expressways” (“Conception des accès sur voies rapides urbaines de type A (VRU A)”) included a method for evaluating the working conditions of the different types of access (Merging or diverging lanes), and introduced the so-called “ICTAVRU” method for weaving sections.

This guide introduces a new method of evaluating how accesses work, known as the “traffic load method”, to deal with complex access layouts, in particular access points that are close together, and weaving sections. It also explains the usual operating models for simple access used in traffic engineering, and the main methodological details for assessing the impact of congestion on urban structuring roads.

Vías estructurantes de aglomeración

Funcionamiento de los accesos

Las vías estructurantes de aglomeración (VSA) están sujetas a fuertes demandas de desplazamientos a escala del área urbana. Los acondicionamientos relacionados con los enlaces ocasionan una modificación de las condiciones de circulación en la infraestructura que pueden generar congestiones recurrentes, incluso agravar un embotellamiento existente.

La obra publicada en 2003 titulada "Diseño de los accesos en vías rápidas urbanas de tipo A (VRU A)" incluía un método para evaluar las condiciones de funcionamiento de los diferentes tipos de acceso (convergentes y divergentes) e presentaba el método llamado "ICTAVRU" para los entrecruzamientos.

La presente guía presenta un nuevo método de evaluación del funcionamiento de los accesos, conocidos como "método de cargas" que permiten tratar las complejas configuraciones de acceso, en particular los accesos cercanos y los entrecruzamientos. Por otra parte, recuerda los modelos usuales de funcionamiento de los accesos sencillos utilizados en ingeniería del tráfico y los principales elementos de método sobre evaluar el impacto de una congestión en una VSA.

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement durable des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Jouve est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : Cerema Territoires et ville / service Édition (P. Marchand)

Impression : Jouve – 1 rue du Docteur Sauvé – 53100 Mayenne – tél. 01 44 76 54 40

Achévé d'imprimer : février 2020

Dépôt légal : février 2020

ISBN : 978-2-37180-405-0 (pdf)

ISBN : 978-2-37180-416-6 (papier)

ISSN : 2417-9701

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25, avenue François Mitterrand CS 92 803

69674 Bron Cedex

Bureau de vente

Cerema Territoires et ville

2 rue Antoine Charial

CS 33927

69426 Lyon Cedex 03 – France

Tél. 04 72 74 59 59 - Fax. 04 72 74 57 80

<https://www.cerema.fr>

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Voies structurantes d'agglomération

Fonctionnement des accès

Les voies structurantes d'agglomération (VSA) sont soumises à de fortes demandes de déplacements à l'échelle de l'aire urbaine. Les aménagements liés aux échangeurs engendrent une modification des conditions de circulation sur l'infrastructure susceptible de générer des congestions récurrentes, voire de durcir un bouchon existant.

L'ouvrage publié en 2003 intitulé « Conception des accès sur voies rapides urbaines de type A (VRU A) » comportait une méthode d'évaluation des conditions de fonctionnement des différents types d'accès (convergents, divergents), et introduisait la méthode dite « ICTAVRU » pour les entrecroisements.

Le présent guide introduit une nouvelle méthode d'évaluation du fonctionnement des accès, dite « méthode des charges », permettant de traiter les configurations d'accès complexes, en particulier les accès rapprochés et les entrecroisements. Il rappelle en outre les modèles usuels de fonctionnement des accès simples utilisés en ingénierie du trafic et les principaux éléments de méthode sur l'évaluation de l'impact d'une congestion sur une VSA.

Sur le même thème

Théorie du trafic et régulation dynamique

2018 - En téléchargement gratuit sur :
www.cerema.fr

Voies structurantes d'agglomération

Conception des voies à 90 et 110km/h
2015

Voies structurantes d'agglomération

Conception des artères urbaines à 70 km/h
2013

Comprendre le trafic routier

Méthodes et calculs
2010

Aménagement et développement des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

ISSN : 2276-0164
ISBN : 978-2-37180-405-0

