

Théorie du trafic et régulation dynamique



Théorie du trafic et régulation dynamique

Collection Connaissances

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

La première version de cet ouvrage, qui n'a pas fait l'objet d'une édition, a été rédigée sous la coordination d'Aurélien Duret (Cerema, puis Ifsttar).

La présente version de l'ouvrage est une œuvre collective du Cerema. En vue de son édition, elle a été revue et actualisée en 2017 par Bruno Levilly (Cerema) et relue par Christine Buisson (Ifsttar).

Ont contribué à sa rédaction : Aurélien Duret, Stéphane Chanut, Frédéric Murard, Sylvain Belloche, Sébastien Plantier et Fabrice Reclus (Cerema).

Ont contribué à sa relecture : Christine Buisson et Anne-Christine Demanny (Ifsttar), Aurélie Hervé, Nicolas Ditchi, Étienne Hans, Boris Ly, Sébastien Plantier, Jean-Michel Putzola et Mathieu Vérité (Cerema).

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Théorie du trafic et régulation dynamique*. Bron : Cerema, 2018. Collection : Connaissances.
ISBN : 978-2-37180-275-9

Sommaire

Volet 1 – Caractéristiques et représentation des phénomènes de trafic routier 5

1 Le diagramme fondamental	5
1.1 Les variables de trafic	5
1.2 Origine du diagramme fondamental	6
1.3 Propriétés mathématiques	6
1.4 Lien avec le comportement de conduite – Variables individuelles	9
1.5 Propriétés physiques	10
1.6 Diagramme fondamental d'une section multivoie	12
1.7 Mesure des variables du trafic	14
1.8 Méthodes d'estimation du diagramme fondamental d'une section	17
2 Les phénomènes d'insertion	24
2.1 À l'échelle du véhicule	24
2.2 À l'échelle du flot de véhicules	26
2.3 Phénomènes d'insertion et régulation d'accès	30
3 Les niveaux d'utilisation des voies	31
3.1 Section à deux voies	31
3.2 Section à trois voies	33

Volet 2 - Impact et domaine d'emploi des dispositifs de régulation 40

1 La régulation d'accès	40
1.1 Les causes de la congestion	40
1.2 Impacts de la régulation d'accès au niveau microscopique	41
1.3 Représentation macroscopique	41
1.4 Stratégies de régulation	43
2 La régulation des vitesses	45
2.1 La sous-utilisation de la voie de droite	45
2.2 Impact de la sous-utilisation de la voie lente	46
2.3 Effet de la régulation des vitesses	48
2.4 Domaine d'emploi	50
3 L'interdiction de dépassement pour les poids lourds (IDPL)	52
3.1 Théorie du bouchon mobile	52
3.2 Cas particuliers	54
3.3 Phénoménologie des trafics lors des dépassements entre PL	55
3.4 Impacts de l'IDPL	57
3.5 Domaines d'emploi de l'IDPL	59

Bibliographie 61

Avant-propos

Contenu de l'ouvrage

Cet ouvrage se compose de deux volets.

Le premier volet introduit **les grands principes de l'ingénierie du trafic** qui doivent être maîtrisés pour le diagnostic de fonctionnement d'un réseau routier. Ce volet réactualise des notions courantes en se reposant sur des travaux récents en matière de théorie du trafic et d'ingénierie routière.

Le second volet synthétise **les connaissances actuelles en matière de régulation dynamique du trafic**. Dans un contexte de déploiement progressif de ces solutions innovantes d'exploitation, nous proposons ici une synthèse des effets attendus des mesures de régulation dynamique. Ce volet insiste sur les mécanismes d'efficacité de ces solutions d'exploitation, ce qui permet de définir leurs domaines d'emploi et de comprendre leur impact sur la fluidité de nos réseaux.

Le contenu technique de cet ouvrage est le fruit d'une maturation de nombreuses connaissances scientifiques (**savoirs**) et l'objectif ici est de le traduire en des termes opérationnels afin d'améliorer nos pratiques d'évaluation en matière d'ingénierie du trafic (**savoir-faire**). Par souci de lisibilité et d'accessibilité, seules les références scientifiques majeures sont citées et les résultats sont souvent présentés sans preuve. Cette simplification est volontaire et le lecteur curieux peut facilement retrouver des informations grâce aux références majeures citées à la fin de cet ouvrage (thèses, rapports, etc.).

Cibles principales

Cet ouvrage s'adresse prioritairement aux personnes s'intéressant à l'**ingénierie du trafic routier** : techniciens et ingénieurs chargés d'élaborer des diagnostics et des évaluations sur le fonctionnement d'infrastructures routières.

Il s'adresse également aux **décisionnaires et gestionnaires d'infrastructures** pour lesquels il est nécessaire de comprendre et maîtriser les trafics sur les réseaux. Cela leur permet d'agir en amont des problèmes en mettant en place des stratégies d'exploitation innovantes et pertinentes. Ils peuvent également réagir en temps réel face à des situations de trafic qu'ils seront mieux à même de comprendre.

Volet 1 – Caractéristiques et représentation des phénomènes de trafic routier

Le trafic routier obéit à des lois de la physique qui permettent d'expliquer la plupart des phénomènes observés sur nos réseaux routiers. Depuis plusieurs décennies, ces lois sont appuyées par des observations de ces phénomènes grâce à des dispositifs de comptage : de débit, de vitesse, d'occupation, de type de véhicule, etc. Ces comptages ont permis de mesurer ces phénomènes physiques, de les comprendre, de les expliquer et de faire le lien avec les connaissances théoriques sur les écoulements routiers.

1 Le diagramme fondamental

Pour comprendre le fonctionnement d'une section ou d'un réseau routier, une première approche consiste souvent à mesurer l'évolution de la vitesse du trafic en fonction du débit (relation « débit-vitesse » ou « diagramme fondamental ») et d'en déduire des paramètres de fonctionnement de la section, comme la vitesse libre ou la capacité. Cette partie revient sur la notion de diagramme fondamental en détaillant ses origines et propriétés mathématiques, son interprétation, son élaboration, et propose une méthode d'estimation de ses paramètres caractéristiques simple à mettre en œuvre.

1.1 Les variables de trafic

Un écoulement de trafic sur un réseau routier présente de nombreuses similitudes avec l'écoulement d'un fluide. La première similitude concerne la définition du réseau qui se compose de tuyaux (les sections routières), de jonctions (les carrefours), de bifurcations, de zones d'échanges, de lieux de stockage, etc. Les similitudes se poursuivent dans la définition de la demande qui irrigue le réseau : elle s'écoule de l'amont vers l'aval. Et lorsqu'elle s'écoule sur le réseau, on observe des débordements (les congestions) lorsque la capacité du réseau ne suffit pas à écouler tout le volume de demande. Ces débordements peuvent rester locaux ou bien perturber le fonctionnement global du réseau.

Ces similitudes nous amènent à utiliser les mêmes variables issues de la mécanique des fluides pour décrire les états de trafic routier : le débit, la vitesse et la densité (concentration). Ces variables se définissent ainsi :

- le débit **Q** représente le nombre de véhicules **N** passés pendant une période **Δt** en un point donné.

$$Q = \frac{N}{\Delta t}$$

Le débit est facilement mesurable par des dispositifs de comptage fixes et comptant le nombre de véhicules passés à leur niveau.

- la concentration **K** représente le nombre de véhicules **N** présents sur une section de longueur **Δx** à un instant donné.

$$K = \frac{N}{\Delta x}$$

La concentration est rarement mesurée directement. Il faudrait pour cela obtenir un cliché instantané d'une section entière et compter le nombre de véhicules présents à cet instant sur la section.

- La vitesse **V** représente la vitesse de déplacement du flot de véhicules. Cette vitesse peut être calculée à partir du débit et de la concentration : $V = Q/K$

Grâce à cette dernière formule, il suffit de connaître deux des variables pour avoir une estimation de la troisième. En règle générale, c'est la concentration qui n'est pas connue, car elle n'est jamais mesurée directement sauf exception¹.

Pour avoir malgré tout une estimation indirecte de la concentration, on mesure classiquement le taux d'occupation (TO). Il représente le pourcentage de temps durant lequel un point de la route est « occupé » par un véhicule au-dessus de lui. Le taux d'occupation est exprimé en pourcentage. Il est à noter que sa qualité de mesure par des capteurs classiques est très dégradée lorsque les vitesses des véhicules sont basses.

Les variables de débit, de vitesse et de concentration sont donc liées entre elles (par la relation $Q=K*V$, et la relation (dite fondamentale) qui les relie deux à deux constitue le **diagramme fondamental (DF)**.

1.2 Origine du diagramme fondamental

Dès les années 1930, les similitudes avec la mécanique des fluides ont permis de poser les premiers fondements théoriques des écoulements routiers. La première de ces analogies concerne la conservation du nombre de véhicules le long des sections.

Ici, on montre comment, à partir de la loi de conservation, on conclut sur l'**existence d'une relation fondamentale entre le débit et la concentration** : cette relation fondamentale trouve donc son origine dans le principe de conservation des véhicules.

1.2.a Loi de conservation

Observons une section routière de longueur dx pendant une courte période dt . Sur cette section de route se trouvent des véhicules dont le numéro est décrit par la variable N (les véhicules sont indicés dans l'ordre croissant de leur entrée sur la portion de route). En considérant qu'aucun véhicule n'apparaît ni ne disparaît spontanément de cette section (hypothèse raisonnable), alors l'équation de conservation des véhicules s'écrit :

$$\frac{dk}{dt} + \frac{dq}{dx} = 0$$

1.2.b Existence du diagramme fondamental

Pour être résolue, cette équation peut être transformée en une équation hyperbolique selon la variable de concentration k :

$$\frac{dk}{dt} + \frac{dQ(k)}{dx} = 0$$

La résolution de cette équation suppose qu'il existe une relation entre le débit et la concentration, $q=Q(k)$: c'est la relation fondamentale.

1.3 Propriétés mathématiques

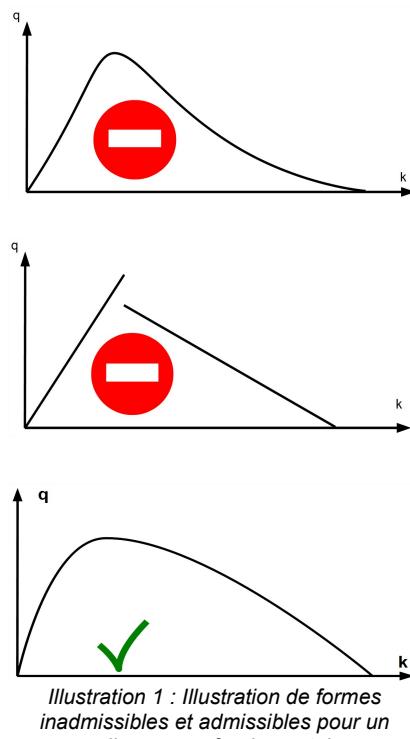
Le diagramme fondamental trouve donc son origine dans le principe de conservation des véhicules. Sans entrer dans des considérations mathématiques complexes, il faut retenir que ce système hyperbolique confère au diagramme fondamental des propriétés mathématiques. Le non-respect de ces propriétés mathématiques remet en cause l'existence même du diagramme fondamental et la solvabilité du système hyperbolique à son origine.

1 À des fins de recherche notamment.

Ces propriétés sont les suivantes :

- **Les valeurs de débit sont positives ou nulles.**
- **Le diagramme fondamental est continu**, sur une plage de concentration bornée, comprise entre une concentration nulle (en cas d'absence de véhicule) et une concentration maximale (lorsque tous les véhicules sont à l'arrêt dans une file d'attente). Sur cette plage de concentration, chaque valeur de concentration correspond à une valeur de débit unique.
- **Le diagramme fondamental est concave.**

Compte tenu de ces trois propriétés, seul le diagramme du bas respecte les propriétés de continuité et de concavité.



1.3.a Quelle forme pour le diagramme fondamental ?

En résumé, toutes les fonctions concaves, continues et positives sur une plage bornée de concentration sont acceptables pour définir un diagramme fondamental. On retrouve dans la littérature de nombreuses formes possibles pour représenter le diagramme fondamental : linéaire par morceaux, bilinéaire, semi-parabolique, parabolique, etc.

Néanmoins, il doit représenter des phénomènes observables, et une dernière contrainte s'ajoute donc aux exigences mathématiques : ce sont ses propriétés physiques. La fonction choisie pour représenter le diagramme fondamental doit avant tout relier les valeurs de débit, de vitesse et de concentration fidèlement à ce qui est observé sur le terrain.

À titre d'exemple, considérons une section urbaine composée d'une voie de circulation et sur laquelle les véhicules circulent ainsi :

- lorsqu'ils ne sont pas gênés, les véhicules circulent à une vitesse de 50 km/h ;
- dans une file d'attente à l'arrêt, les véhicules sont positionnés tous les 7 mètres, soit une concentration maximale d'environ 140 véhicules par kilomètre ;
- lorsque l'infrastructure fonctionne à capacité, les véhicules sont espacés de deux secondes, correspondant donc à une capacité de 1 800 véhicules par heure.

À partir de ces données facilement mesurables sur le terrain, il est possible de proposer un diagramme fondamental respectant chacune de ces contraintes. Pour la simplification du propos, nous considérons ici que le diagramme fondamental est triangulaire :

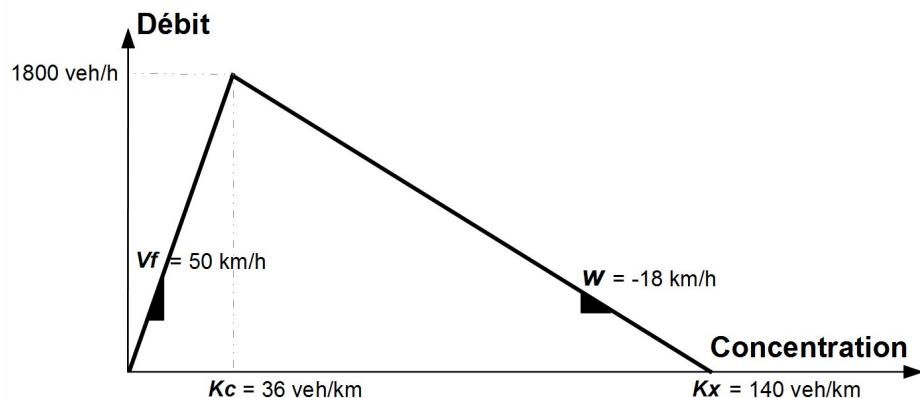


Illustration 2 : Diagramme fondamental triangulaire d'une section routière à une voie en milieu urbain

Ce diagramme décrit les états de trafic, fluide et congestionné, qui peuvent exister sur cette section urbaine à une voie. On peut également en tirer des informations complémentaires. Par exemple que la concentration critique est de l'ordre de 36 véhicules par kilomètre. Autrement dit, lorsque les véhicules sont séparés d'une distance inférieure à 30 mètres environ (longueur du véhicule incluse), les véhicules se gênent entre eux, et adaptent leur distance à la vitesse de leur prédecesseur : c'est le comportement de poursuite.

1.3.b Autres représentations

La relation $Q = K.V$ reste vraie. Aussi, toutes les représentations ci-dessous sont strictement équivalentes et correspondent à un simple changement de repère :

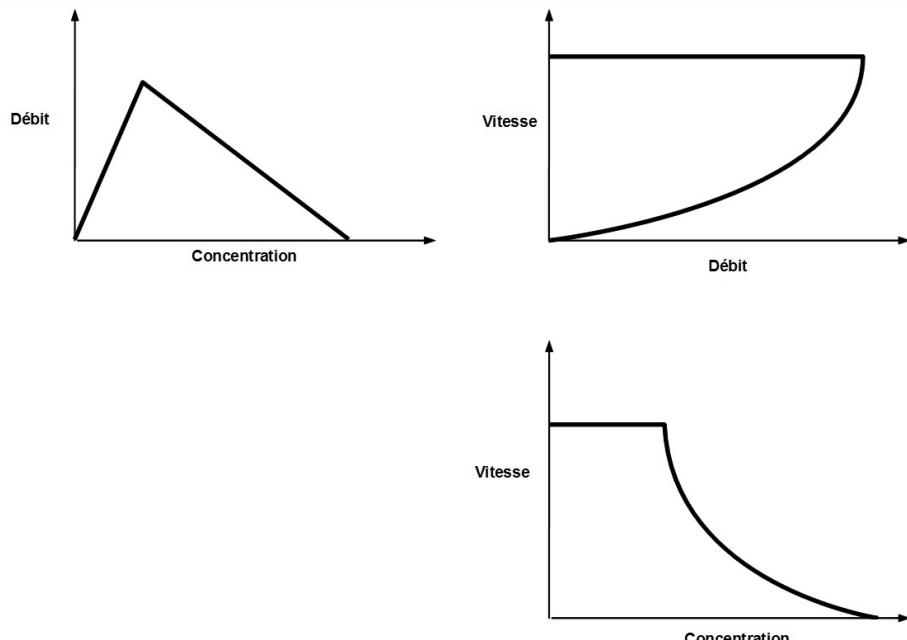


Illustration 3 : Différents plans de représentation du diagramme fondamental

1.4 Lien avec le comportement de conduite – Variables individuelles

Les écoulements de trafic routier peuvent être étudiés à l'échelle collective comme l'écoulement d'un fluide. Le trafic routier peut également être étudié à l'échelle individuelle par l'étude de la trajectoire de chaque véhicule. Cette échelle peut être plus intuitive puisque directement en lien avec nos comportements de conduite.

Dans ce cas, le trafic n'est plus décrit par des variables globales (débit, vitesse, concentration), mais par des variables individuelles :

- **le temps intervéhiculaire t_i** : c'est le temps qui sépare le passage de deux têtes de véhicules successifs en un point donné. Lorsque l'on connaît les temps intervéhiculaires t_i de N véhicules successifs, il est possible de calculer le débit moyen Q par la formule suivante :

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N t_i$$

Et inversement, lorsque l'on connaît le débit, on peut estimer le temps intervéhiculaire moyen.

Par exemple, pour un débit de 0,5 véhicule par seconde (1 800 véh/h), le temps intervéhiculaire moyen est de 2 secondes.

- **La distance intervéhiculaire d_i** : c'est la distance qui sépare deux têtes de véhicules successifs à un instant donné. Connaissant les distances intervéhiculaires d_i de N véhicules successifs, il est possible de retrouver la concentration moyenne K par la formule suivante :

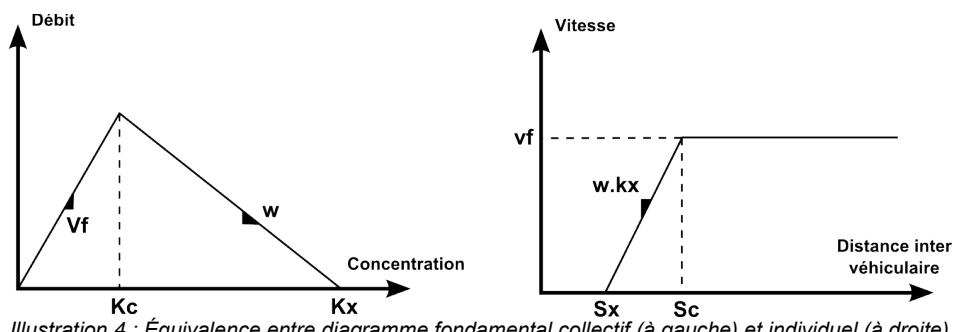
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N d_i$$

Et inversement, lorsque l'on connaît la concentration, on peut estimer la distance intervéhiculaire moyenne. Par exemple, pour une concentration de 100 véhicules par kilomètre, la distance intervéhiculaire moyenne est de 10 mètres.

- **La vitesse individuelle v** : c'est la vitesse instantanée d'un véhicule. Connaissant les vitesses individuelles de N véhicules successifs, la vitesse du flux est la **moyenne harmonique** des vitesses individuelles.

On constate ainsi qu'il existe des « clés de passage » entre les variables collectives et les variables individuelles. Le diagramme fondamental, qui décrit le trafic à l'échelle collective, peut donc également être défini à l'échelle individuelle.

De même que le diagramme fondamental collectif décrit une relation entre le débit et la concentration, le diagramme fondamental individuel décrit la relation entre la distance intervéhiculaire et la vitesse individuelle v . Cette équivalence est illustrée par la figure suivante :



Sur cette figure est représenté à gauche un diagramme fondamental de forme triangulaire défini par trois paramètres : la vitesse libre, la vitesse maximale de remontée de congestion et la concentration maximale. À droite est représentée la version individuelle de ce diagramme fondamental, également définie par trois paramètres analogues.

Cette analogie est remarquable puisque les paramètres prennent ici un sens physique en lien direct avec les comportements de conduite des véhicules.

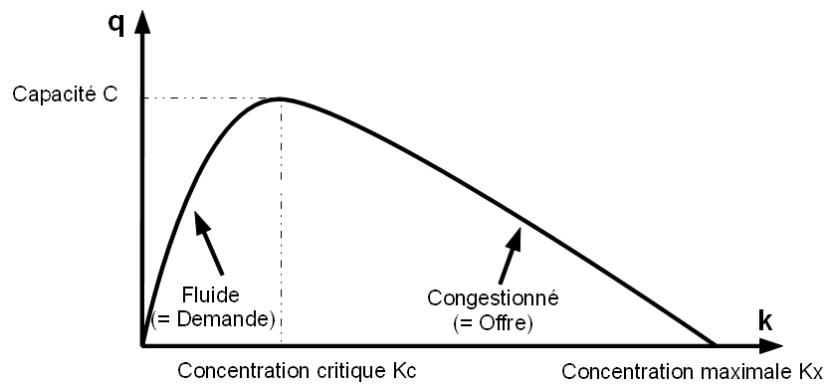
- v_f qui correspond à la vitesse du véhicule lorsqu'il n'est pas gêné (V_f).
- S_x qui correspond à la distance entre deux avantages de véhicules lorsque ces véhicules sont arrêtés (inverse de la concentration maximale K_x).
- $w \cdot k_x$ qui correspond au taux d'accroissement de la vitesse en fonction de la distance intervéhiculaire.
- S_c qui correspond à la distance intervéhiculaire en deçà de laquelle un véhicule est gêné et va adapter sa vitesse à celle de son prédecesseur (K_c).

1.5 Propriétés physiques

Comme indiqué au début du document, il est courant de faire l'analogie entre l'écoulement du trafic et l'écoulement d'un fluide. En effet, les propriétés physiques de l'un et de l'autre sont similaires. Ainsi, l'écoulement du trafic peut se diviser en deux catégories de régimes :

- **un régime fluide.** Ce régime s'observe lorsque la demande de trafic est inférieure à la capacité (aussi appelée offre) de la section. Aucune contrainte ne s'exerce sur le trafic, et l'état de trafic mesuré correspond exactement à la demande. Le débit est alors proportionnel à la concentration et le coefficient de proportionnalité correspond à la vitesse libre de la section (généralement proche de la vitesse réglementaire).
- **un régime congestionné.** Ce régime s'observe lorsque la demande de trafic est supérieure à la capacité d'écoulement de la section. Seule l'offre disponible peut s'écouler, le débit est alors contraint et il décroît à mesure que le trafic se densifie.

L'état de trafic séparant les régimes fluide et congestionné est appelé « état critique », et il correspond au fonctionnement à capacité C . Cette différence de régime traduit d'ailleurs la concavité du diagramme fondamental. Tout ceci est illustré par la figure suivante :



Les paramètres permettant de définir entièrement un diagramme fondamental triangulaire (du type de celui de l'Illustration 2) sont décrits ci-dessous, accompagnés de leur valeur classiquement observée en France pour une section à une voie :

- V_f , la vitesse libre qui est généralement du même ordre que la vitesse réglementaire (entre 30 km/h et 130 km/h) ;
- C , la capacité qui correspond au débit maximum qui peut s'écouler sur la section. Pour une section à une voie, la capacité est généralement de l'ordre de 1 800 véh/h ;
- K_c , la concentration critique (ou densité critique) qui sépare le régime fluide du régime congestionné. Elle est généralement de l'ordre de 25 véhicules par kilomètre. Cette concentration est difficilement observable, car elle correspond à un état de trafic pour lequel les véhicules circulent à une vitesse proche de la vitesse à vide. On peut noter qu'à cette concentration, on compte un véhicule tous les 40 mètres en moyenne ;

- K_x , la concentration maximale (ou densité maximale) qui correspond à la concentration de véhicules dans une file d'attente à l'arrêt, par exemple dans la file d'attente d'un feu au rouge. Elle est généralement comprise entre 120 véh/km et 160 véh/km, selon la présence de poids lourds et selon le comportement des conducteurs. On peut noter que pour une concentration de 140 véh/km, on compte un véhicule tous les 7 mètres environ ;
- w , la vitesse maximale de remontée de congestion. Cette vitesse est négative et correspond à la vitesse maximale de propagation de la congestion. Elle est généralement comprise entre 15 et 20 km/h.

Il est important de noter que seuls trois paramètres parmi les cinq présentés sont nécessaires pour définir entièrement le diagramme fondamental triangulaire, les valeurs des deux autres pouvant alors être déduites. Pour cela, on se sert des deux formules complémentaires :

- $Q=K.V$: en tout point du diagramme fondamental, la vitesse correspond au ratio entre le débit et la concentration.
- $C=K_x \frac{w.V_f}{w+V_f}$: la capacité (sommet du diagramme fondamental) se calcule à partir des paramètres décrivant le régime fluide (V_f) et le régime congestionné (w et K_x).

1.5.a Propagation de la congestion

En plus des états d'équilibre du trafic, le diagramme fondamental donne des informations sur la dynamique du trafic, et plus précisément sur les vitesses de propagation des ondes de choc dans le trafic. Une onde de choc est une frontière qui sépare deux états de trafic dont les concentrations sont différentes. Ces deux états peuvent être fluide/fluide, fluide/congestionné, congestionné/fluide ou congestionné/congestionné.

- Par exemple, lorsqu'un feu tricolore passe du vert au rouge : les véhicules qui arrivent sur la ligne de feu vont s'arrêter les uns derrière les autres en amont de la ligne de feu. On observe alors une onde de choc (correspondant à une baisse de vitesse) qui remonte le trafic à contre-courant.
- Autre exemple, lorsque le feu passe au vert, les véhicules stockés en amont du feu vont successivement redémarrer : on observe une onde de choc (correspondant à une accélération) qui remonte également le trafic à contre-courant.

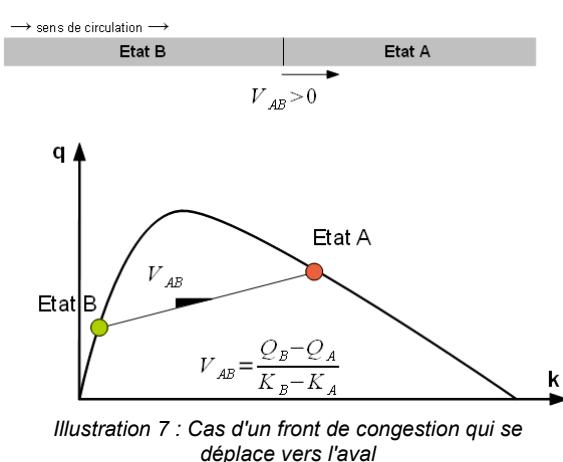
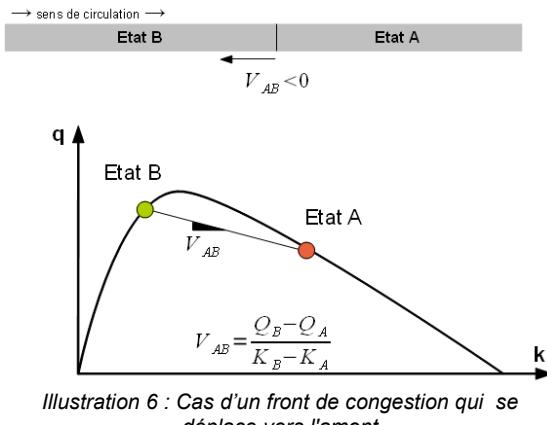
Ces deux exemples illustrent des ondes de choc remontant le trafic à contre-courant, mais d'autres ondes de choc se déplacent dans le sens du courant. Par exemple l'arrière d'une file d'attente sépare un état fluide (en amont de la file) et un état congestionné (dans la file). Lorsque la file d'attente se résorbe, l'onde de choc représentant l'arrière de la congestion se déplace de l'amont vers l'aval, dans le sens de circulation des véhicules.

Les paragraphes suivants détaillent le calcul de la vitesse de propagation d'une onde de choc séparant deux états de trafic à partir du diagramme fondamental.

Pour déterminer la vitesse de propagation, il suffit de considérer les états de trafic A (en aval) et B (en amont) de part et d'autre de l'onde de choc et de les représenter sur le diagramme fondamental de la section. La vitesse de propagation est alors égale à la pente de la corde reliant les points A et B. Cette pente se calcule directement à partir des variables de débit et de concentration des états **A** et **B** par :

$$V_{AB} = \frac{Q_B - Q_A}{K_B - K_A}$$

Ceci est illustré par la figure ci-après.



On remarque ici que si le débit amont Q_B est supérieur au débit aval Q_A , alors la pente de la corde reliant les états A et B est négative : la congestion remonte le trafic à contre-courant et la congestion s'étend vers l'amont du réseau.

A contrario, si le débit amont Q_B est inférieur au débit aval Q_A , alors la pente de la corde reliant les états A et B est positive et la congestion se résorbe.

1.6 Diagramme fondamental d'une section multivoie

Les exemples ci-dessus illustrent le cas d'une section à une voie de circulation.

Dans le cas d'une section multivoie, il est courant de considérer le débit et la concentration de la section dans leur ensemble, sans distinguer le fonctionnement de chacune des voies. Pourtant, sur nos réseaux, nous constatons quotidiennement que les états de trafic diffèrent selon la voie de circulation : les voies de droite ont des vitesses libres plus faibles et accueillent en premier des véhicules lents (PL, etc.). Au contraire, les voies les plus à gauche sont des voies de dépassement où les vitesses sont généralement plus élevées et la proportion de véhicules lents plus faible. Au final, les états d'équilibre de trafic diffèrent largement d'une voie à l'autre, tant en régime fluide (par la présence de véhicules plus lents que d'autres) qu'en régime congestionné (par la présence de poids lourds principalement).

Dans les paragraphes qui suivent, nous expliquons pourquoi il est important de distinguer les différentes voies de circulation pour comprendre et analyser le fonctionnement des sections multivoies.

1.6.a En régime fluide

En régime fluide, les voies possèdent des caractéristiques différentes : les débits et les concentrations diffèrent entre les voies, ce qui traduit également une vitesse des véhicules hétérogène entre les voies. Le débit maximum écoulé sur la voie de droite est inférieur au débit maximum écoulé sur les autres voies.

Dans les études de trafic, sur les sections multivoies, on fait rarement la distinction entre les voies de circulation : on ne représente donc pas les diagrammes fondamentaux par voie, mais seulement la somme de ces diagrammes fondamentaux.

Prenons l'exemple d'une section à deux voies illustré par le schéma ci-dessous :

- sur la voie de gauche, on observe un état de trafic aux caractéristiques $\{q_G; k_G\}$,
- sur la voie de droite, on observe un état de trafic aux caractéristiques $\{q_D; k_D\}$.

La résultante pour les deux voies de circulation aura les caractéristiques $\{q_G+q_D; k_G+k_D\}$. Si V_G est la vitesse sur la voie de gauche, et V_D la vitesse sur la voie de droite, alors la vitesse résultante du flot est :

$$V_{\text{flow}} = \frac{q_G + q_D}{k_G + k_D}$$

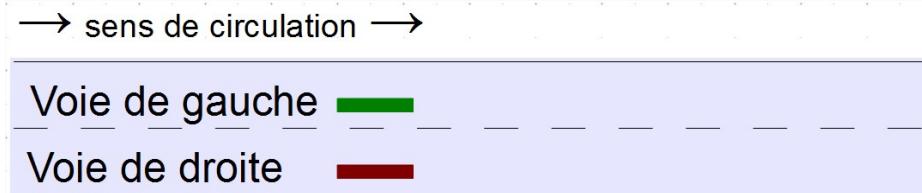


Illustration 8 : Schéma d'une section à deux voies

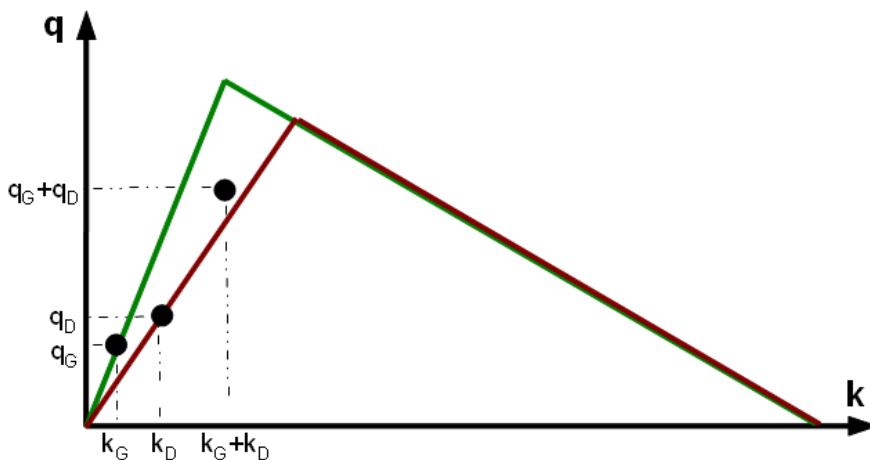


Illustration 9 : État de trafic global ($G+D$) résultant des états de trafic des voies de droite (D) et voie de gauche (G) pour une section à deux voies

1.6.b En régime congestionné

En régime congestionné, les voies ne sont plus indépendantes entre elles : les états de trafic sur les deux voies correspondent généralement aux mêmes vitesses. Dit autrement, dans un bouchon, contrairement aux idées reçues, la voie de droite est souvent aussi rapide que la voie de gauche. En revanche, la composition de trafic sur chacune des voies de circulation peut conduire à une différence de concentration (et donc de débit) entre les deux voies de circulation.

Sur la figure ci-après, on illustre le cas où les concentrations sur les voies de gauche et de droite sont identiques en congestion.

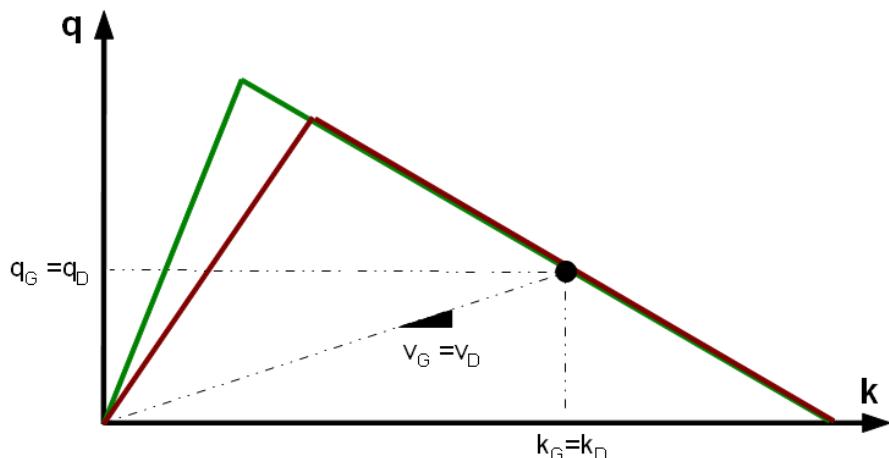


Illustration 10 : Cas où la composition du trafic et les vitesses sont identiques sur les deux voies de circulation

1.7 Mesure des variables du trafic

Pour estimer le diagramme fondamental d'une section, il faut des données de trafic recueillies sur cette section. En France, le ministère de l'Équipement a mis en place dans les années 1990, le **Système informatisé de recueil de données (Siredo)**. Ce système s'appuie sur des stations de comptage par boucles électromagnétiques dites stations SOL2. Plus de 3 000 stations SOL2 ont été déployées en France depuis 1991.

1.7.a Généralités sur les stations SOL2

La station SOL2 est composée de deux parties : une unité de détection et une unité de mesure et de traitement. La station est commandable à distance au moyen d'un langage normalisé, le Langage de commande routier (LCR).

L'unité de détection est généralement **une boucle électromagnétique** constituée de quelques spires de câble de cuivre ordinaire (formant généralement un rectangle dont la grande largeur est perpendiculaire à l'axe de la voie).

Lorsqu'un véhicule passe à la verticale de la boucle, ses parties métalliques créent une perturbation du champ magnétique et induisent un courant électrique dans la boucle. L'analyse de ce courant électrique induit permet de repérer précisément quand le véhicule entre et quand il sort de la zone de détection. On en déduit le nombre de véhicules qui sont passés sur la boucle, autrement dit **le débit**.

En ajoutant une deuxième boucle à une distance connue (généralement de l'ordre de 1,5 m), on peut également calculer **la vitesse** du véhicule.

À partir de ces données individuelles, il est possible de calculer des données agrégées. Le débit **q** de la section est calculé par un bilan du nombre de véhicules passés pendant la période et la vitesse **v** du flot est calculée par moyenne (harmonique) des vitesses individuelles.

Connaissant **v** , la vitesse du flot, et **q** , le débit de la section, on peut alors estimer la concentration **k** par la relation :

$$k = \frac{q}{v}$$

1.7.b Exemples de mesures terrains

Voici quelques exemples réels de mesures obtenues par les stations SOL2 :

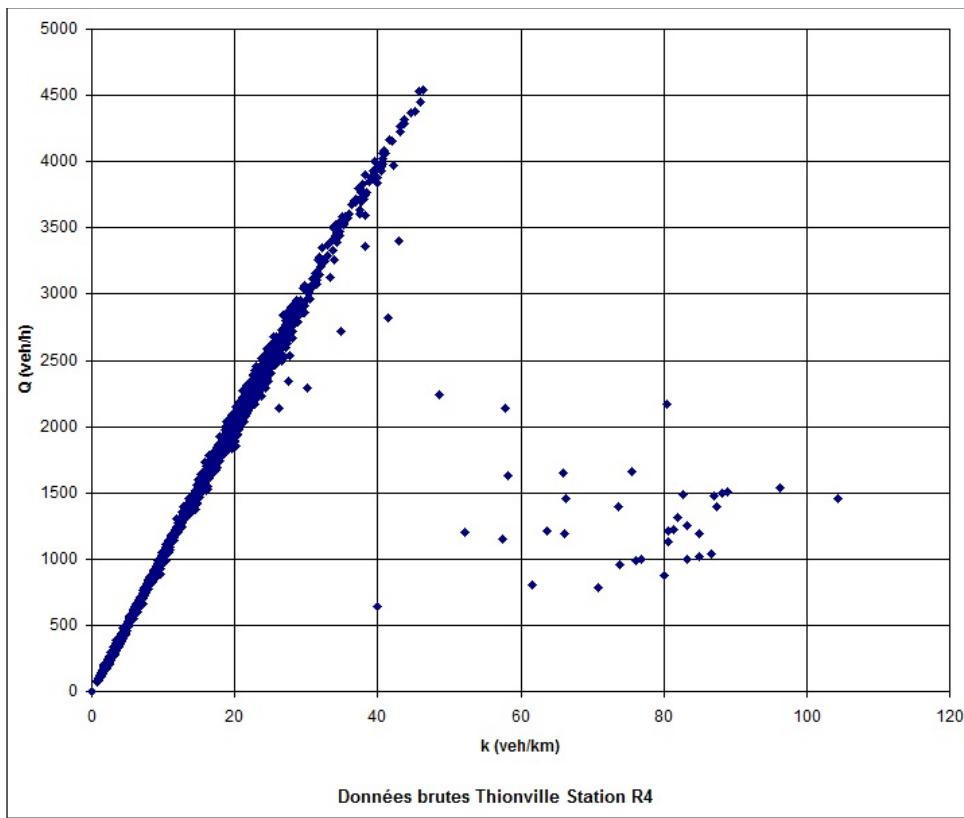


Illustration 11 : Données brutes pour Thionville – Section à deux voies

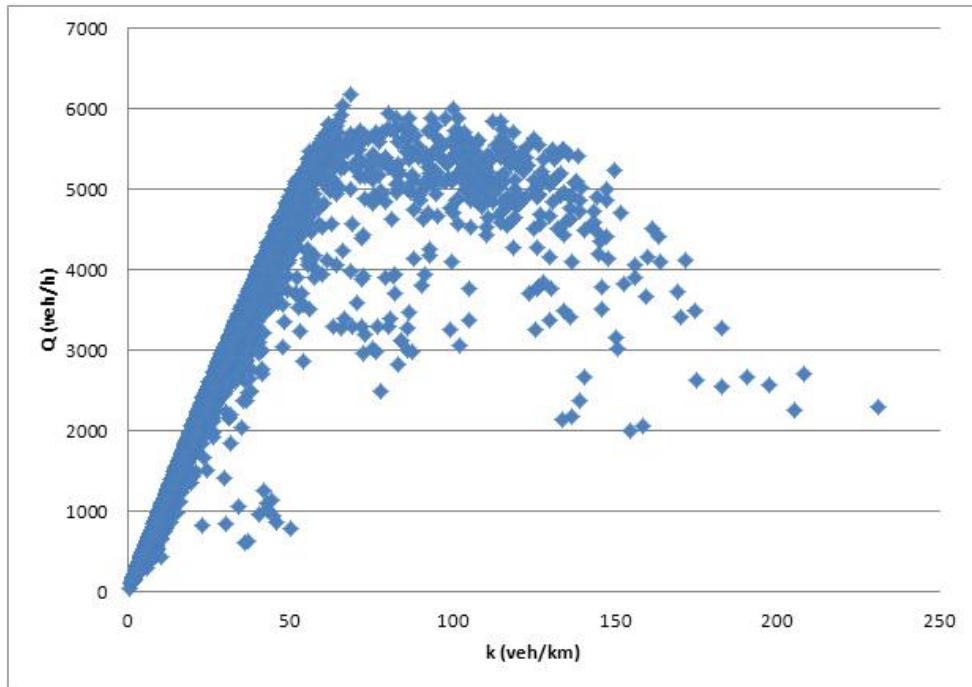


Illustration 12 : Données brutes pour Ternay – Section à trois voies

On constate, contrairement aux diagrammes fondamentaux présentés plus tôt, que les mesures sont dispersées. Il y a au moins quatre raisons à cela :

- les erreurs de mesures : les sources d'erreurs sont nombreuses (défaut d'étalonnage, défaut d'horodatage, les véhicules à cheval sur deux voies, etc.) ;

- l'hétérogénéité des comportements de conduite : chaque conducteur a son comportement propre (vitesse, agressivité, etc.) et la somme de ces hétérogénéités introduit du bruit dans les données mesurées ;
- l'agrégation temporelle des données : les stations SOL2 sont le plus fréquemment paramétrées pour remonter des données agrégées par période de 6 minutes, période au cours de laquelle différents états d'équilibre ont pu être observés ;
- l'agrégation spatiale : les données peuvent être recueillies sur plusieurs voies et agrégées. Les conditions de trafic pouvant être différentes d'une voie à l'autre, ces données agrégées mixent généralement différents états d'équilibre.

Les deux paragraphes suivants reviennent plus précisément sur l'impact des agrégations spatiale et temporelle.

1.7.c Conséquences de l'agrégation temporelle

La généralisation des SOL2 date des années 1990. À cette époque, la transmission et le stockage de grands volumes de données étaient coûteux. Les stations ont donc été paramétrées pour renvoyer une seule mesure de débit et de vitesse par heure, regroupées sous forme de bilans horaires. Ces données recouvriraient des états de trafic très différents et étaient donc inadaptées pour estimer un diagramme fondamental. Avec l'amélioration des technologies (transmission par fibre optique, augmentation des capacités de stockage), les stations ont été paramétrées pour envoyer des données toutes les 6 minutes. Cela permet d'avoir 10 couples de mesure « débit-vitesse » par heure, soit 240 par jour. Si elles sont effectivement plus nombreuses et plus détaillées que les mesures horaires, ces mesures ne correspondent pas nécessairement à des états d'équilibre du trafic (il s'agit d'agrégation de divers états d'équilibre).

Ceci est illustré sur la figure suivante. Considérons une section sur laquelle se sont succédé trois états de trafic pendant une période de 6 minutes. Ces états sont notés **A**, **B** et **C**.

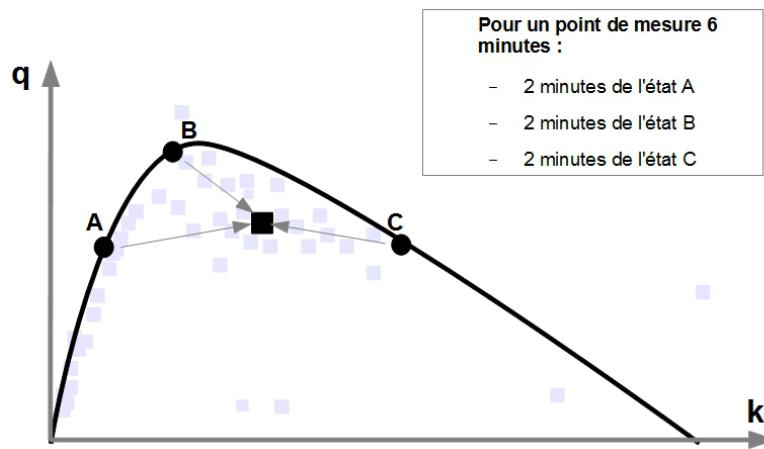


Illustration 13 : Illustration de l'agrégation temporelle

Le couple débit-vitesse résultant de l'agrégation des données ne correspond à aucun des trois états de trafic effectivement observés sur la section.

De plus, le diagramme fondamental étant concave, le point agrégé n'appartient pas au diagramme fondamental de la section. Il se situe nécessairement « en dessous ». Cette propriété est importante et elle sera reprise dans la section suivante.

1.7.d Conséquences de l'agrégation spatiale

Connaître les conditions de trafic voie par voie a peu d'utilité immédiate pour l'exploitation, c'est la raison pour laquelle les mesures sont généralement agrégées par sens de circulation. Elles sont ainsi plus rapidement interprétées et peuvent, par exemple, être représentées par un traficolor. Comme pour l'agrégation temporelle, ces mesures agrégées peuvent recouvrir des états de trafic réels très différents.

Ceci est illustré sur la figure suivante. Considérons une section à deux voies de circulation, avec un état de trafic fluide **A** sur la voie rapide et un état congestionné **B** sur la voie lente.

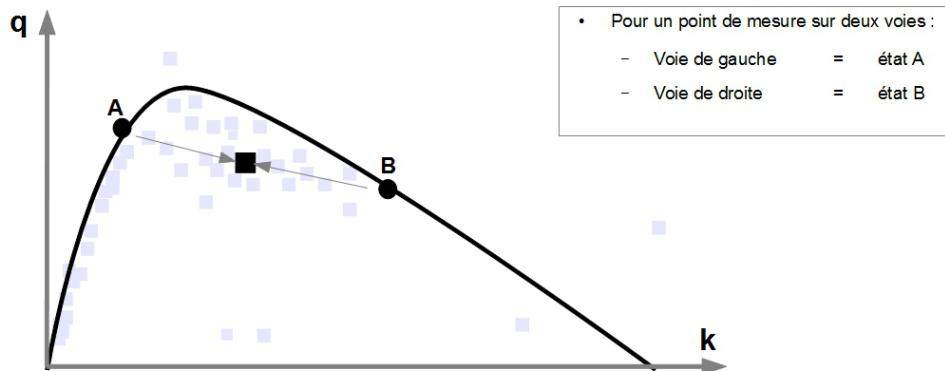


Illustration 14 : Illustration de l'agrégation spatiale

La mesure de trafic agrégeant les états de trafic sur ces deux voies, la valeur résultante ne correspond à aucun état d'équilibre de la section, ni sur la voie lente ni sur la voie rapide. À nouveau, le couple de mesure débit-vitesse est situé « en dessous » du diagramme fondamental à cause de sa concavité.

La section suivante propose une méthode d'estimation du diagramme permettant de réduire ces biais d'agrégation (sans prétendre les éliminer).

1.8 Méthodes d'estimation du diagramme fondamental d'une section

Pour le diagnostic d'un réseau, il est courant de procéder à l'estimation du diagramme fondamental de chacune des sections qui le constituent. Les méthodes « classiques » consistent à s'appuyer sur les données agrégées en leur appliquant des méthodes de régression pour en déduire les paramètres caractéristiques de la section considérée (vitesse libre, capacité, etc.). Or, nous avons vu que ces mesures agrégées sont généralement situées « en dessous » du diagramme fondamental de la section. Ces méthodes d'estimation appliquant une régression sur les données agrégées sont donc généralement à éviter.

En revanche, une **méthode d'estimation considérant l'enveloppe supérieure** du nuage de points débit-vitesse sera plus proche du véritable diagramme fondamental, pourvu qu'elle écarte les points anormaux (cf. Illustration 15).

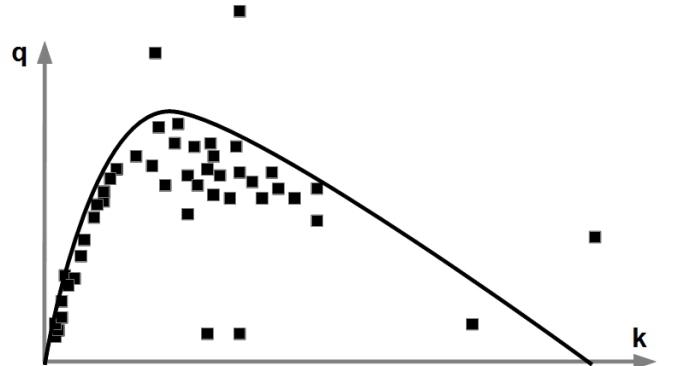


Illustration 15 : Le diagramme fondamental enveloppe les points de mesure

À titre d'illustration, nous présentons ici une méthode d'estimation en trois étapes :

- étape 1 : nettoyage/filtrage des données ;
- étape 2 : sélection des points les plus proches de l'enveloppe ;
- étape 3 : estimation des paramètres du diagramme fondamental.

1.8.a Étape 1 : Nettoyage/filtrage des données

Cette première étape consiste à éliminer les mesures aberrantes.

Pour cela, on peut établir des ordres de grandeur à respecter sur des conditions de trafic réalistes. Par exemple en ne conservant que les vitesses inférieures à 150 km/h et les débits inférieurs à 3 000 véh./h/voie, etc. On peut également proposer des filtres éliminant automatiquement des données à partir de simples règles statistiques.

La figure suivante illustre le résultat d'un filtrage des données : les points de mesure entourés en rouge étant éliminés du jeu de données initial.

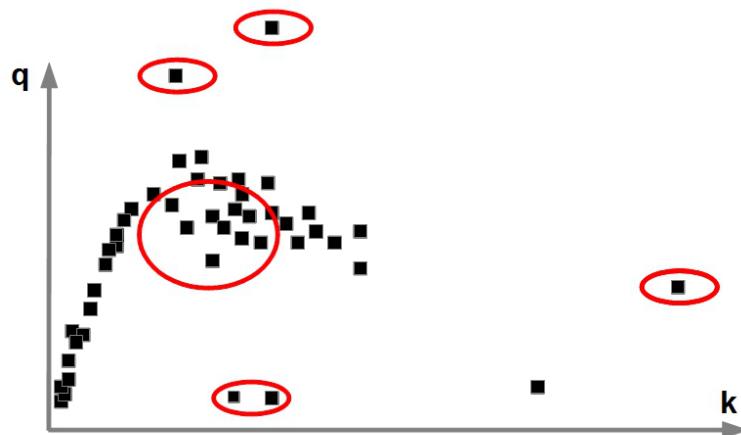


Illustration 16 : Filtrage des données

Les données résultantes peuvent d'ores et déjà faire l'objet d'analyses, par exemple en séparant les données fluides des données congestionnées.

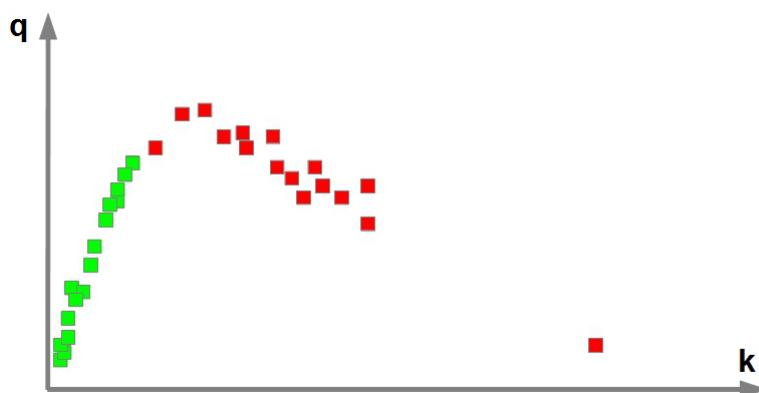


Illustration 17 : Séparation des mesures fluides et congestionnées

1.8.b Étape 2 : Sélection des points de l'enveloppe

La méthode présentée est issue des connaissances actuelles en théorie du trafic et a été proposée par A. Duret (Cete de Lyon, 2013). Elle est donnée ici à titre d'exemple, d'autres méthodes sont possibles pour estimer l'enveloppe du nuage de points débit-vitesse.

Cette méthode nécessite en entrée les mesures de débit, noté Q et exprimé en véhicules/h, et de vitesse, notée V et exprimée en km/h. La méthode qui suit fonctionne quelle que soit la période d'agrégation des données (30 secondes, 1 minute, 6 minutes, 15 minutes, etc.).

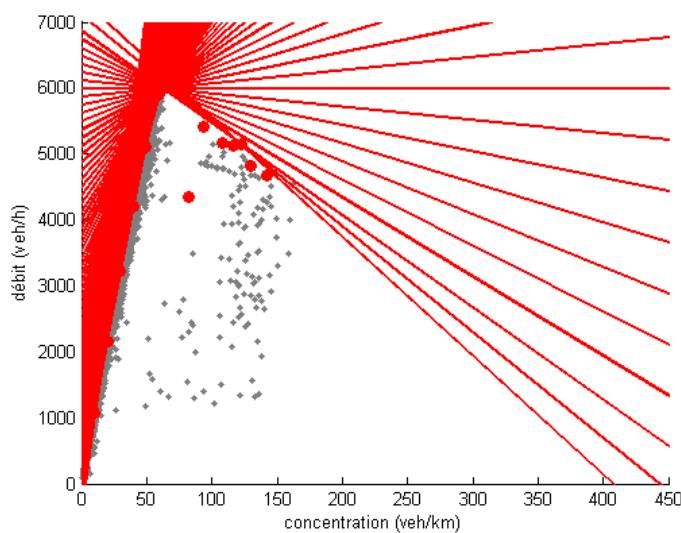
Pour une estimation complète du diagramme fondamental, les données doivent provenir à la fois d'**états fluides et congestionnés**. Lorsque les données d'entrée contiennent trop peu, voire aucune mesure congestionnée, cela signifie que les régimes proches de la capacité ne sont pas atteints et ne peuvent donc pas être estimés. Il n'est pas possible d'estimer la capacité (débit maximal) ni les états d'équilibre en congestion sur la section. La seule partie du diagramme fondamental qui sera correctement estimée sera la partie fluide (dont l'unique paramètre est la vitesse libre).

La méthode d'estimation proposée ici repose sur des propriétés fondamentales de théorie du trafic :

- lorsque le trafic est fluide, les états de trafic se propagent à la vitesse des véhicules qui circulent sur le réseau (souvent proche de la vitesse maximale autorisée) ;
- lorsque le trafic est fortement congestionné, les ondes de choc se propagent à la vitesse des remontées de congestion (vitesses négatives autour de -20 km/h).

On en déduit que les pentes admissibles du diagramme fondamental sont comprises entre -20 et +130 km/h. La méthode consiste à estimer la courbe enveloppe à partir de ce jeu de pentes admissibles.

Pour chacune de ces pentes admissibles u , il s'agit de trouver le couple de mesure (q, v) qui maximise l'ordonnée à l'origine $O(u, q, v)$ de la droite de pente u et passant par le couple de mesure (N. Chiabaut, 2009). Cette méthode est appliquée à l'ensemble des pentes admissibles du diagramme fondamental. Il en résulte un ensemble de droites, comme l'illustre la figure suivante, à partir duquel il est possible d'estimer la courbe enveloppe, concave et proche du diagramme fondamental de la section.



Dessin 1 : Illustration d'estimation du diagramme fondamental

1.8.c Étape 3 : Estimation des paramètres

À partir de l'estimation de la courbe enveloppe, il est possible de déduire l'allure du diagramme fondamental, comme l'illustre la figure suivante.

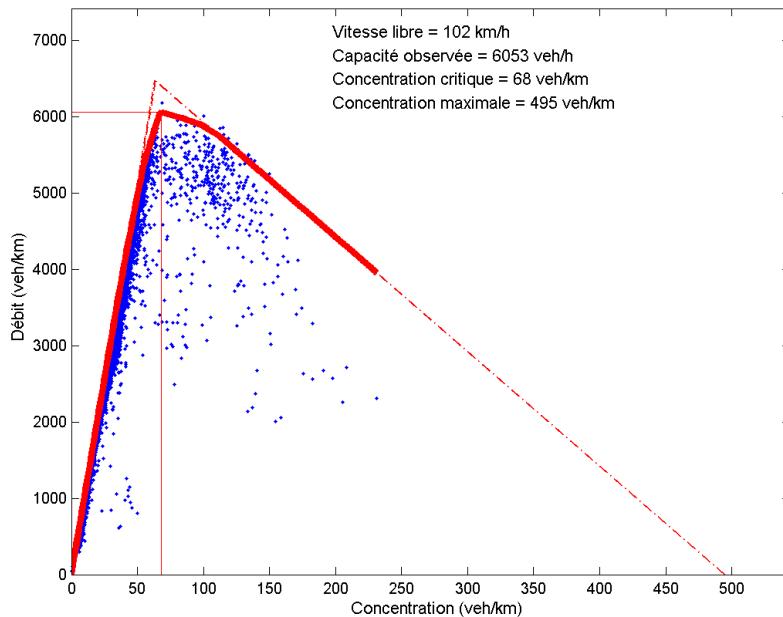


Illustration 18 : Valeurs de paramètres de l'estimation du diagramme fondamental

1.8.d Précautions

Quelle que soit la méthode utilisée pour estimer le diagramme fondamental, il est nécessaire de confronter le résultat obtenu à la configuration géométrique du réseau.

Pour illustrer l'importance de cette analyse, considérons une section présentant une réduction du nombre de voies, avec une boucle électromagnétique située juste en amont du rétrécissement.

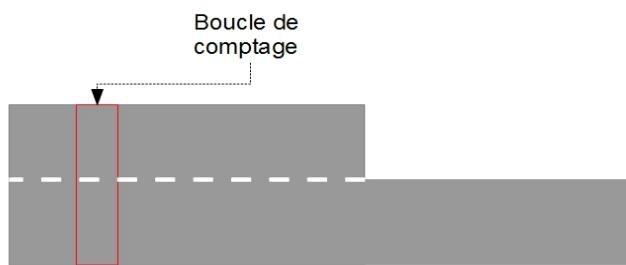
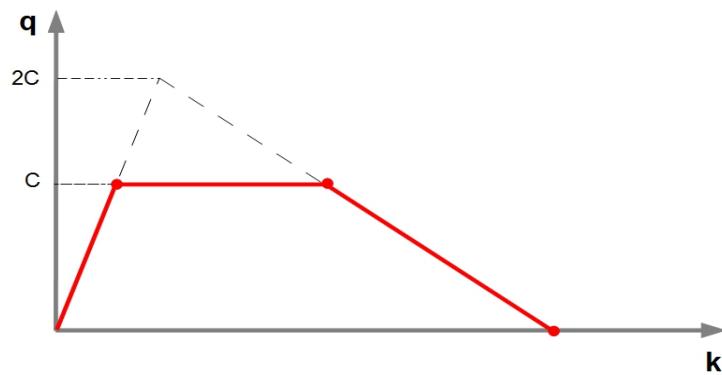


Illustration 19 : Boucle en amont d'un rétrécissement

Dans ce cas, la mesure est faite sur une section à deux voies et de ce fait, le diagramme fondamental théoriquement attendu est celui représenté en pointillé sur la figure suivante. Si la demande est supérieure à la capacité C d'une voie, une congestion va se créer au niveau du rétrécissement et il apparaît rapidement un bouchon sur la partie à deux voies où le débit est alors égal à la capacité C . Le point de mesure étant positionné juste en amont, aucun débit supérieur à la capacité d'une voie n'y sera mesuré. Le diagramme résultant des mesures est représenté en trait plein sur la figure suivante (avec la capacité d'une seule voie, mais la concentration maximale de deux voies).



1.8.e Deux exemples basés sur des données réelles

Ternay

Le nœud de Ternay au sud de Lyon constitue l'échangeur entre les autoroutes A7, A47 et A46. Ce nœud est régulièrement congestionné. Des capteurs de recueil de données sont situés sur différentes branches.



L'autoroute A7 comporte trois voies de circulation au niveau du nœud d'échange.

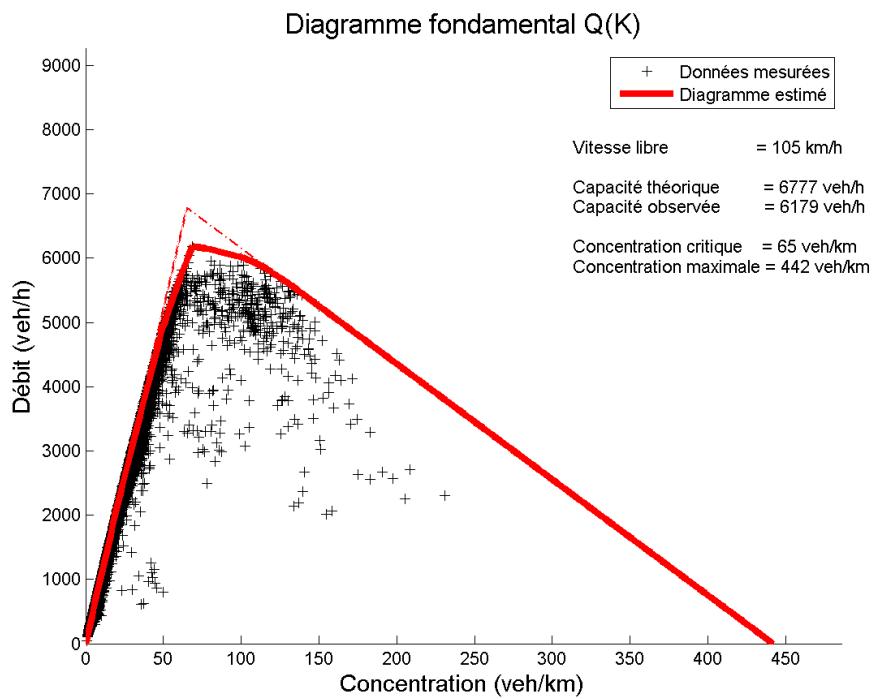


Illustration 22 : Estimation du diagramme fondamental sur A7 toutes voies

Thionville

Sur ce site autoroutier présentant des caractéristiques périurbaines, nous disposons de données voie par voie agrégées par périodes de 1 minute.



Illustration 23 : Situation de l'A31 à Thionville – Source : OpenStreetMap

Le capteur de recueil est situé sur la section courante , à deux voies, de l'A31 dans le sens sud-nord, au nord de l'échangeur 43 (Elange).

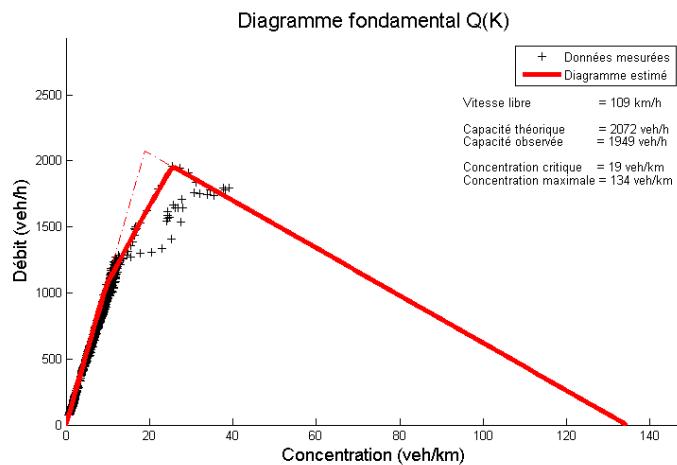


Illustration 24 : Estimation du diagramme fondamental sur la voie lente

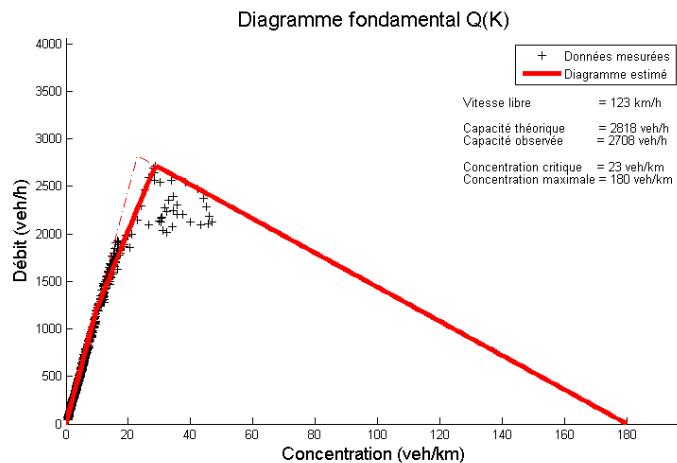


Illustration 25 : Estimation du diagramme fondamental sur la voie rapide

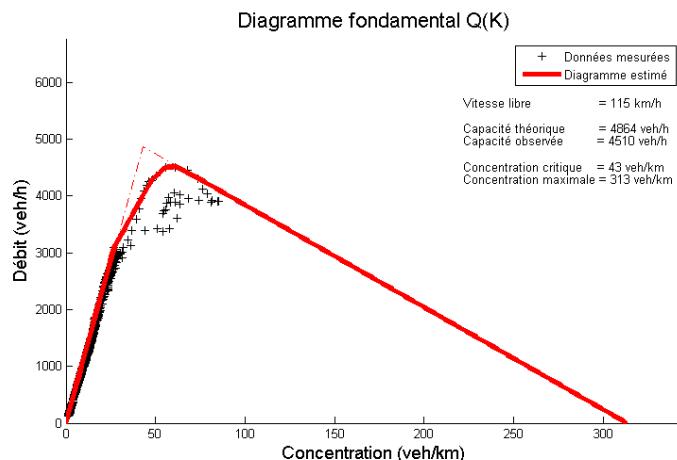


Illustration 26: Estimation du diagramme fondamental sur la section

2 Les phénomènes d'insertion

Sur les infrastructures autoroutières, les insertions de véhicules s'effectuent essentiellement au niveau des convergents. Compte tenu de leurs caractéristiques physiques, de la réduction du nombre de voies entre amont et aval, et de la dynamique locale des véhicules, les convergents peuvent représenter des zones de discontinuité pour l'écoulement du trafic sur l'infrastructure principale. Ce sont des lieux où se forment fréquemment les congestions récurrentes sur les voies structurantes d'agglomération ou autoroutières.

Cette section présente le fonctionnement courant des convergents autoroutiers :

- à l'échelle du véhicule pour comprendre les mécanismes d'insertion ;
- à l'échelle du flot pour comprendre le fonctionnement global d'un convergent en fonction de la demande de trafic qui s'y présente.

Ces notions poseront les bases pour comprendre les mécanismes d'efficacité de la régulation d'accès, présentée dans le second volet de cet ouvrage.

2.1 À l'échelle du véhicule

2.1.a Description de la manœuvre d'insertion

En analysant le fonctionnement du convergent à l'échelle du véhicule, une des principales raisons de l'émergence de la congestion tient au fait que les véhicules issus de la bretelle s'insèrent avec une vitesse généralement plus faible que celles pratiquées sur la section courante.

L'insertion à faible vitesse a pour principal effet de faire ralentir les véhicules circulant sur la voie de droite, lorsque ces derniers se rapprochent d'un véhicule venant de s'insérer, et en phase d'accélération.

Lorsque l'on observe au niveau microscopique les trajectoires de véhicules sur un diagramme espace-temps (cf. figure ci-après), le phénomène d'insertion à vitesse faible se caractérise par une signature bien spécifique.

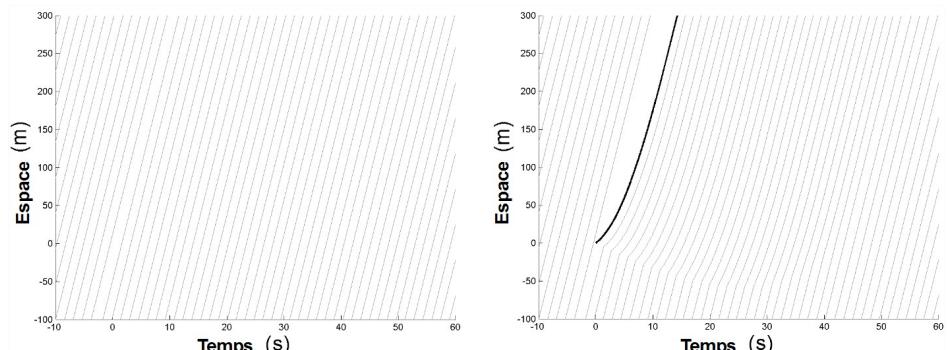


Illustration 27 : Trafic fluide sans insertion (à gauche) et avec insertion (à droite)

Cela se traduit par une perturbation très nette des distances intervéhiculaires avant et après le véhicule venant de s'insérer. Ainsi, en aval de ce dernier, et du fait de sa vitesse plus faible, la distance intervéhiculaire avec le véhicule précédent tend à augmenter, laissant apparaître un vide sur le diagramme des trajectoires. À l'inverse, en amont de ce véhicule, les distances entre les véhicules suivreurs tendent à se réduire. La dynamique de ces véhicules est alors contrainte, et leur vitesse de flot limitée durant un court instant par la vitesse d'insertion.

2.1.b Impact local

Afin de comprendre l'impact d'un phénomène d'insertion d'un point de vue microscopique, nous considérons un flot de la circulation qui s'écoule de manière fluide sur l'infrastructure. Sur une même voie, les véhicules circulent de manière homogène à la vitesse libre et conservent, dans une situation idéale, une distance intervéhiculaire régulière avec leur prédecesseur (figure de gauche).

2.1.c Chute de capacité

Lors d'une insertion simple, en aval du véhicule venant de s'insérer, on observe en revanche l'émergence d'une **zone vide** dans laquelle aucun véhicule ne se trouve. La taille de cette zone vide augmente tant que la vitesse du véhicule en insertion n'atteint pas la vitesse du véhicule prédecesseur.

Cette zone vide correspond ainsi à une chute de capacité sur l'infrastructure.

2.1.d Perturbation locale

Lorsque le véhicule s'insère à basse vitesse sur la section courante, il constraint son premier suiveur à ralentir puis, de proche en proche, peut également **contraindre plusieurs suiveurs à ralentir** à leur tour. Il se crée ainsi une perturbation au sein de l'écoulement fluide, qui peut, dans certaines conditions, conduire à la formation d'une congestion.

À mesure que le véhicule accélère, cette perturbation s'estompe progressivement jusqu'à disparaître. La frontière entre la zone fluide et la zone soumise à la perturbation se caractérise en termes physiques par une **onde de choc**, représentée sur la figure suivante par une ligne rouge.

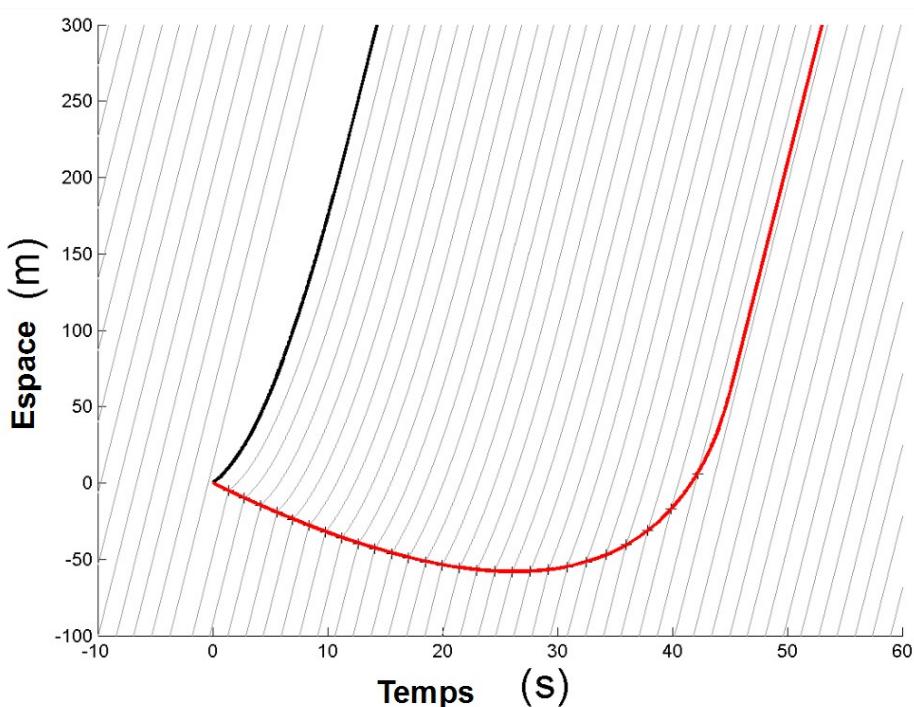


Illustration 28 : Onde de choc (courbe rouge) générée par une insertion à 5 m/s

La trajectoire de l'onde de choc connaît différentes phases depuis sa création jusqu'à sa disparition (ou amortissement).

Dans un premier temps, elle se développe en direction de l'amont, depuis la zone du convergent.

Ensuite, elle passe par un point d'équilibre, au niveau duquel la dynamique de propagation va changer de sens, passant d'une direction vers l'amont à une direction vers l'aval.

L'abscisse de ce point d'équilibre correspond à la distance maximale de la remontée de la perturbation générée par l'insertion.

Sous l'effet de son amortissement progressif, l'onde de choc repart en direction de l'aval pour finalement disparaître complètement.

2.1.e Facteurs de perturbation

La perturbation dépend de la vitesse d'insertion, du niveau d'accélération du véhicule qui s'insère ainsi que des conditions de trafic sur les voies environnantes. Une simple insertion perturbera d'autant plus de véhicules de la section courante que :

- son **débit** est élevé ;
- l'insertion est effectuée à faible **vitesse** ;
- le taux **d'accélération** du véhicule qui s'insère est faible.

En revanche, un faible débit sur la section courante, une vitesse d'insertion élevée et un taux d'accélération élevé limiteront la perturbation générée par l'insertion.

Ainsi, nous connaissons les trois leviers permettant d'améliorer les conditions de circulation au niveau d'un convergent. Le second volet présentera les interactions possibles entre plusieurs insertions successives et les possibilités de contrôler ces interactions par le déploiement d'une mesure de régulation d'accès.

2.2 À l'échelle du flot de véhicules

On s'intéresse ici au même phénomène d'insertion, mais d'un point de vue plus macroscopique. Pour cela, on se repose sur un modèle simplifié introduit à partir des années 1990 par deux chercheurs de l'université de Berkeley, Newell (2002) et Daganzo (1995), puis étudié dans le détail par Chevallier (2008). Ils proposent une description du fonctionnement global d'un convergent en fonction des demandes de trafic qui l'alimentent. Ce modèle permet de déterminer comment les demandes de trafic provenant de deux branches en amont peuvent fusionner en un seul et même flot.

Il peut être qualifié de simple dans le sens où il ne tient pas compte des processus d'insertion individuelle des véhicules au niveau du convergent, mais se place à une échelle d'étude plus globale, dite macroscopique.

Les seules informations nécessaires au modèle pour calculer les débits sur les deux branches du convergent ainsi que le débit total en aval du convergent sont les suivantes :

- les demandes de trafic Q_p (principal) et Q_s (secondaire) sur chaque branche ;
- la capacité C de la section en aval du convergent ;
- le paramètre de partage de capacité α indiquant, dans le cas où les deux branches du convergent saturent, de quelle manière la capacité se partage entre ces deux branches.

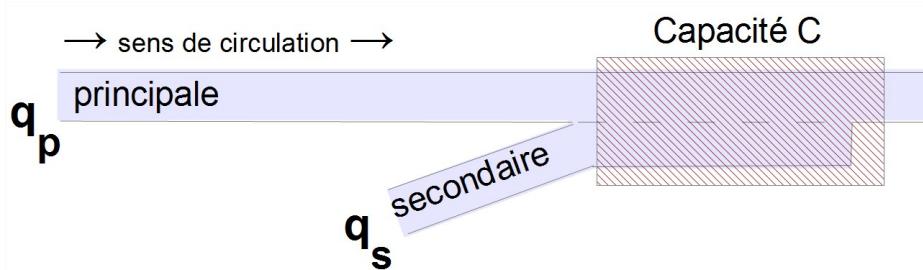
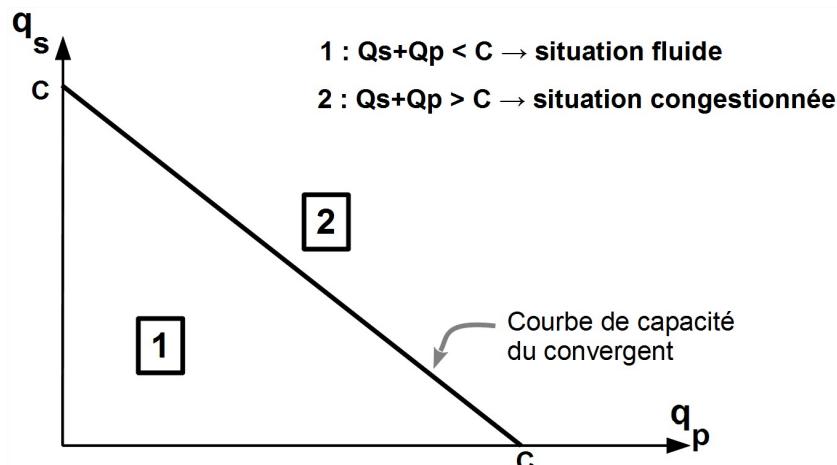


Illustration 29 : Schéma d'un convergent

2.2.a Courbe de capacité

Si on considère que le convergent présente une capacité limitée, alors la somme des débits en provenance des branches en amont du convergent ne peut excéder la valeur C . Ceci peut être représenté dans le plan *débit principal – débit secondaire*, de la manière suivante :



La courbe de capacité d'un convergent se décrit dans un diagramme en deux dimensions, avec :

- en abscisse, la demande Q_p sur la section principale ;
- en ordonnée, la demande Q_s sur la section secondaire.

La courbe de capacité est représentée sur ce diagramme par une section de droite, dont les intersections avec chaque axe (abscisses et ordonnées) sont situées respectivement aux points $(C, 0)$ et $(0, C)$.

La courbe de capacité sépare les deux régimes de fonctionnement possibles du convergent :

- (1) régime fluide, situé en dessous de la courbe ;
- (2) régime congestionné, situé au-dessus de la courbe.

Pour connaître le régime de fonctionnement d'un convergent à l'instant t , il suffit de reporter son point de fonctionnement sur le graphique, dont les coordonnées sont $(Q_p ; Q_s)$.

Selon la position du point, on obtient le régime de fonctionnement du convergent :

- si $Q_p + Q_s < C$ alors le régime est fluide ;
- si $Q_p + Q_s > C$ alors le régime est congestionné.

2.2.b Le paramètre de partage de capacité

Dans le cas d'un régime congestionné, une des questions essentielles est de savoir sur quelle branche amont du convergent la congestion se développe, voire si elle se développe sur les deux branches simultanément.

Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'introduire un paramètre dit « de partage de capacité », noté α . Dans le cas où les deux branches du convergent sont saturées (capacité atteinte), ce paramètre représente le ratio de partage de capacité entre chacune des deux branches, autrement dit le ratio de véhicules en provenance de chaque branche amont, et qui vont s'insérer dans le flot au niveau du convergent.

Lorsqu'une bretelle à une voie converge sur une section courante à une voie, en cas de congestion, une règle d'insertion assez largement répandue chez les automobilistes repose sur le principe de la « fermeture Éclair » : les véhicules arrivant de la bretelle s'insèrent un par un, alternativement avec un véhicule circulant sur la voie principale. Ce principe peut être observé dans de nombreuses configurations (cédez le passage saturé, insertion sur giratoire saturé, etc.).

Dans ce cas de figure, le ratio de partage est égal à : $\alpha = 1$. Graphiquement, ce paramètre correspond à la pente de la droite représentée sur la figure suivante.

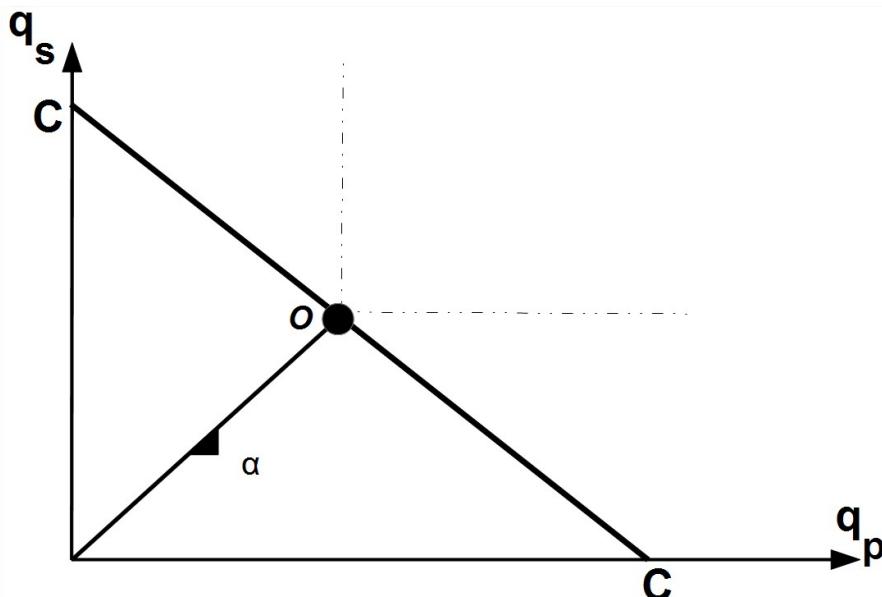


Illustration 31 : Représentation du ratio de voie

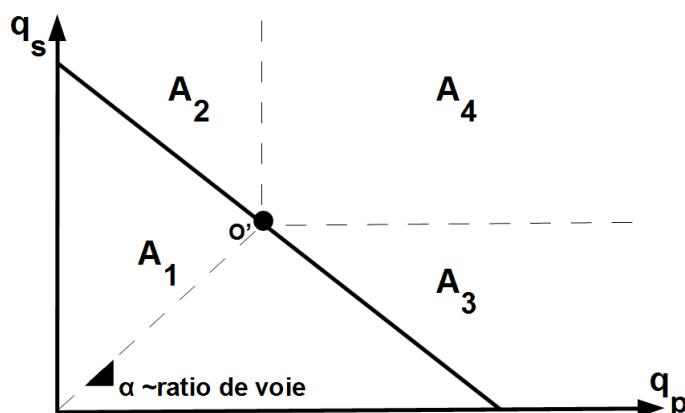
Cette droite permet de réaliser une nouvelle sous-division de l'espace situé au-dessus de la courbe de capacité (partie du graphique caractérisant une situation congestionnée). La première étape consiste à reporter sur la courbe de capacité la position d'un point **O**, caractérisant le fonctionnement par défaut du convergent en situation de congestion sur les deux branches amont.

Pour cela, il s'agit de tracer une droite passant par l'origine, et dont la pente est égale au paramètre α . L'intersection de cette droite avec la courbe de capacité fournit les coordonnées de ce point de fonctionnement par défaut.

La seconde étape consiste ensuite à tracer deux demi-droites orthogonales dans la partie congestionnée du graphique, et dont l'origine est située au point **O**.

2.2.c Règle de report

À partir de la nouvelle sous-division obtenue dans l'étape précédente, on distingue alors graphiquement quatre zones de fonctionnement potentiel du convergent : **A1**, **A2**, **A3** et **A4**.



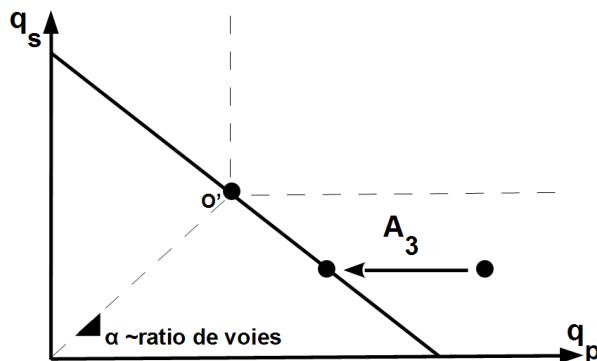
Seule la zone **A1** correspond à un fonctionnement physiquement réaliste du convergent. Les trois autres zones correspondent à un fonctionnement virtuel obtenu en reportant les demandes en entrée (Q_s et Q_p), mais qui ne seront que partiellement satisfaites lors du processus d'insertion, puisque limitées par la capacité.

Ainsi donc, les règles de report sur la courbe de capacité d'un point de fonctionnement virtuel du convergent situé dans l'une de ces trois zones sont les suivantes :

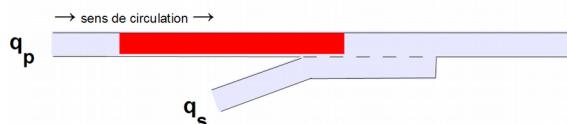
- zone **A2** : le point est reporté sur la courbe de capacité, parallèlement à l'axe des ordonnées ;
- zone **A3** : le point est reporté sur la courbe de capacité, parallèlement à l'axe des abscisses ;
- zone **A4** : le point est reporté sur la courbe de capacité au point O'.

2.2.d Saturation de la branche principale

Dans ce premier exemple, le point de fonctionnement du convergent obtenu à partir des demandes Q_s et Q_p se situe au-delà de la courbe de capacité, dans la zone **A3**.

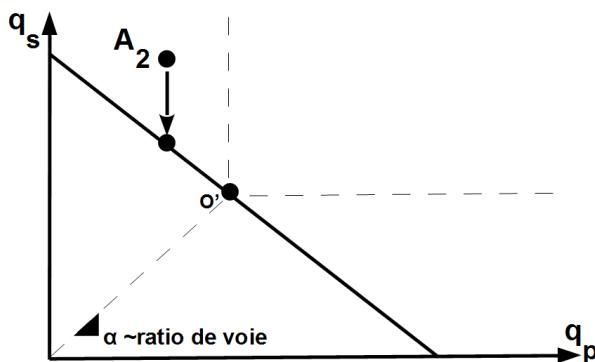


Dans ce cas de figure, le point est reporté sur la courbe de capacité parallèlement à l'axe des abscisses. La demande Q_p n'est pas satisfaite sur la branche principale du convergent, et conduit à la formation d'une congestion.



2.2.e Saturation de la branche secondaire

Dans ce deuxième exemple, le point de fonctionnement du convergent obtenu à partir des demandes Q_s et Q_p se situe au-delà de la courbe de capacité, dans la zone **A2**.



Dans ce cas de figure, le point est reporté sur la courbe de capacité parallèlement à l'axe des ordonnées. La demande Q_s n'est pas satisfaite. Une congestion se forme donc sur la bretelle d'accès.

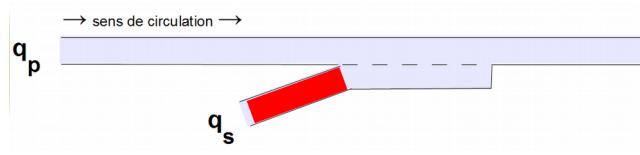
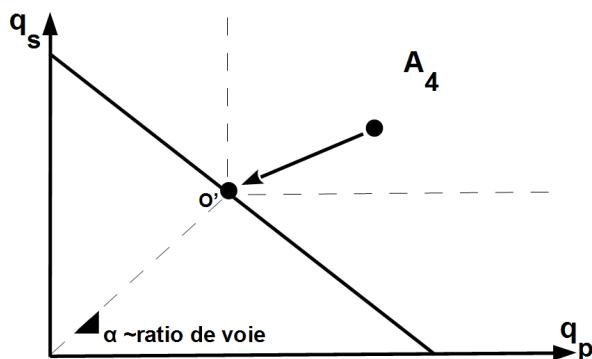


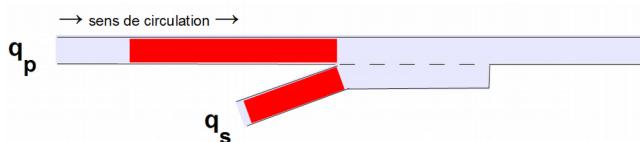
Illustration 32 : Cas d'un convergent dont la bretelle est congestionnée

2.2.f Saturation des branches principale et secondaire

Dans le troisième exemple proposé ci-dessous, le point de fonctionnement du convergent se situe dans la zone A4. Dans ce cas de figure, le point est systématiquement reporté sur la courbe de capacité au point O'.



Cela signifie que la demande n'est pas satisfaite sur aucune branche amont du convergent, impliquant la formation simultanée de deux congestions.



2.3 Phénomènes d'insertion et régulation d'accès

Cette section a présenté le fonctionnement d'un convergent en analysant le processus d'insertion à l'échelle du véhicule, puis en se positionnant d'un point de vue plus macroscopique.

Dans le second volet de cet ouvrage, nous repartirons de ces notions pour comprendre les mécanismes d'efficacité de la stratégie de régulation d'accès, et pour en tirer des conclusions sur ses domaines d'emploi, sa mise en œuvre et son évaluation.

3 Les niveaux d'utilisation des voies

La plupart du temps, les diagrammes fondamentaux sont construits à partir de données agrégées sur une ou plusieurs minutes, et sur l'ensemble des voies pour des sections multivoies. Ces agrégations, temporelles et spatiales, ne permettent pas de rendre compte des états du trafic qui peuvent être différents sur chacune des voies.

Pourtant, des études récentes indiquent que les mécanismes physiques engagés lors du passage de l'état fluide à l'état congestionné sont liés à des caractéristiques spécifiques de chacune des voies au moment qui précède la congestion. En conséquence, il est déterminant de comprendre les caractéristiques transversales du trafic, notamment en étudiant le fonctionnement simultané de chaque voie de circulation.

Cela permet d'expliquer :

- un usage hétérogène de la voirie ;
- l'impact de la présence de PL sur les écoulements ;
- le phénomène de chute de capacité.

3.1 Section à deux voies

3.1.a Observations

À partir de nombreuses observations, on constate que lorsqu'une section à deux voies est peu chargée, le débit est majoritairement sur la voie de droite. Lorsque la section se charge, on passe par un point de croisement (ou demande de croisement), à partir duquel la voie rapide a un débit plus élevé que la voie lente.

Les pourcentages des débits sur voie lente et voie rapide en fonction du débit total de sections à deux voies de l'A6 en France et de l'A44 en Allemagne illustrent ce constat :

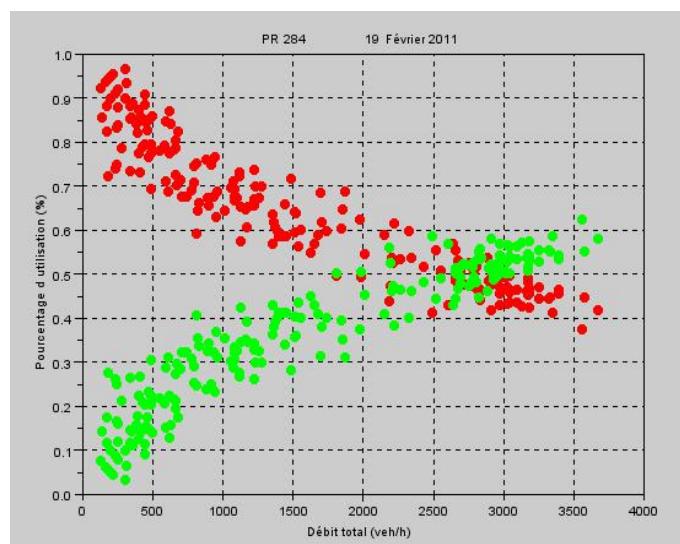


Illustration 33 : Utilisation des voies en fonction du débit total sur une autoroute à deux voies, France (A6)

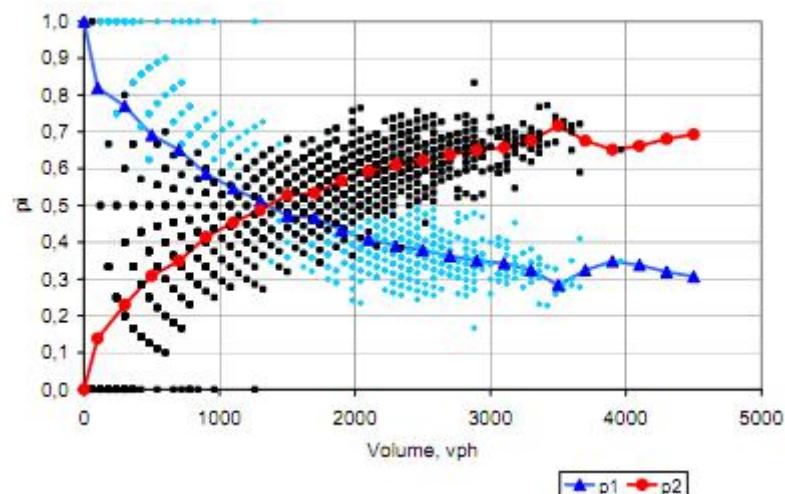


Illustration 34 : Niveau d'utilisation des voies en fonction du débit total sur une autoroute à deux voies, Allemagne (A44)

On peut avancer plusieurs explications à la moindre utilisation relative de la voie de droite lorsque le débit total augmente :

- la présence de PL majoritairement sur la voie de droite ;
- les comportements de dépassement et de non-rabattement sur la voie lente lorsque le trafic augmente.

3.1.b Impact de la règle de dépassement

Lorsque la règle permet le dépassement aussi bien par la gauche que par la droite, on observe une meilleure répartition du trafic sur les deux voies lorsque la section se charge. Au Canada par exemple, où cette règle s'applique, on constate que lorsqu'une section à deux voies se charge, les débits deviennent quasiment identiques sur la voie lente et sur la voie rapide.

La comparaison des pourcentages des débits sur voie lente et voie rapide en fonction du débit total de sections à deux voies au Canada et en Allemagne illustre ce constat.

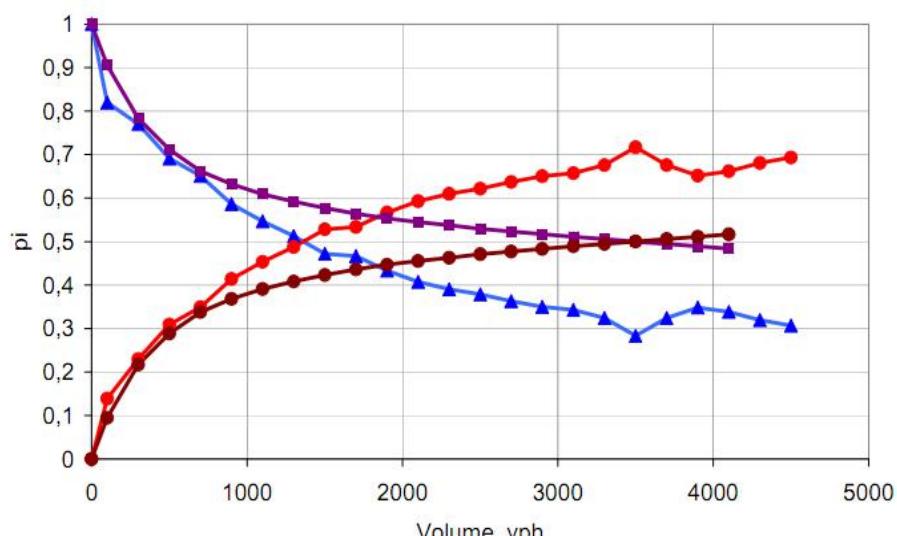


Illustration 35 : Niveaux d'utilisation des voies en fonction du débit total sur des autoroutes à deux voies en Allemagne et au Canada

3.1.c Modèle

Sur les sections à deux voies, on peut proposer un modèle pour représenter le pourcentage de débit par voie en fonction de la demande totale sur la section, avec une demande « de croisement » et une sous-utilisation de la voie de droite lorsque la demande totale est supérieure à la « demande de croisement ».

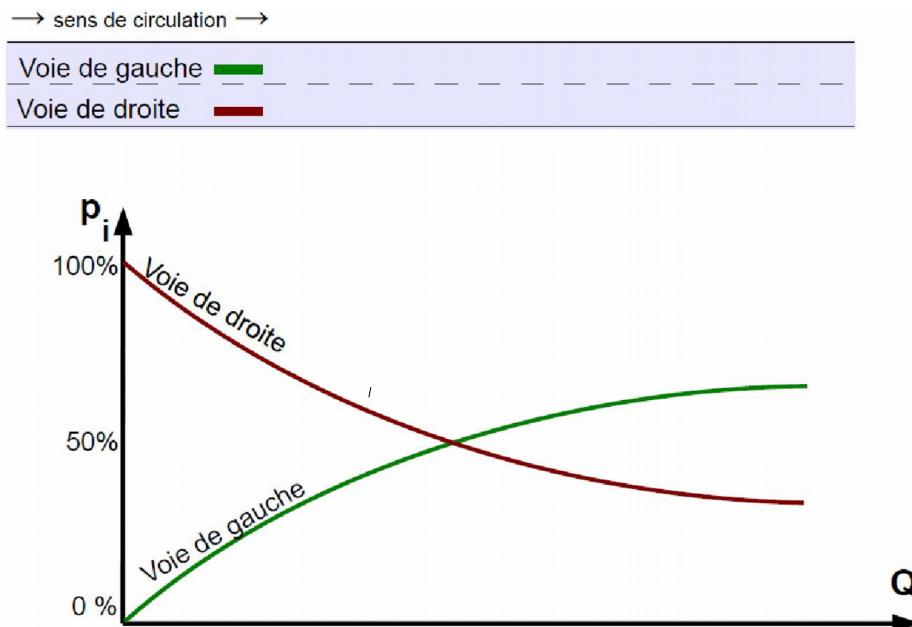


Illustration 36 : Modèle du niveau d'utilisation des voies en fonction du débit total sur une section à deux voies

3.1.d Lien avec le diagramme fondamental

Comme cela a été abordé plus tôt dans cet ouvrage, dans le cas d'une section multivoie, le diagramme fondamental peut être décomposé par voie de circulation. Il est alors possible d'illustrer le lien entre le modèle proposé ci-dessus et le diagramme fondamental.

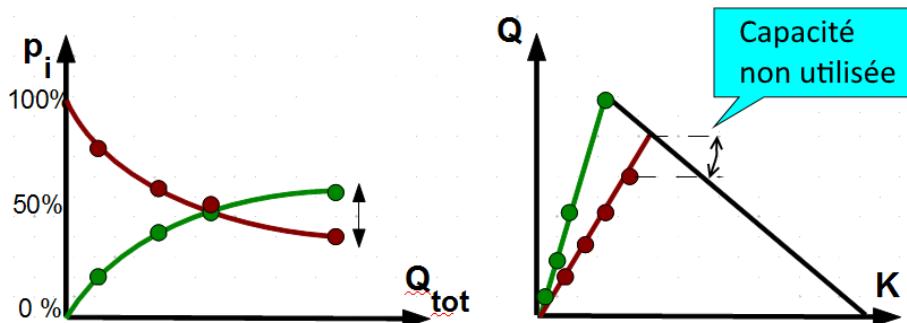


Illustration 37 : Représentation de la chute de capacité due à la sous-utilisation de la voie de droite sur une section à deux voies chargée

3.2 Section à trois voies

Les données individuelles par voie utilisées dans cette partie sont issues d'une campagne de mesures menée au cours de l'été 2007 par le concessionnaire autoroutier des Autoroutes du Sud de la France (ASF) sur trois sites à trois voies de l'autoroute A7 et dans les deux sens de circulation. Les trois sites de recueil sont assez éloignés pour considérer qu'en situation fluide, les conditions de trafic y sont indépendantes. Les bretelles d'entrée et de sortie les plus proches sont à plus de 5 kilomètres des points de mesure.

3.2.a Observations générales

On constate que lorsqu'une section à trois voies est peu chargée (demande faible), le débit est tout de même plus élevé sur la voie centrale que sur la voie de droite, et presque nul sur la voie rapide. Lorsque la section à trois voies se charge, on passe par un point de croisement, à partir duquel la voie rapide a un débit plus élevé que la voie lente. Au terme de cette montée en charge, le débit de la voie rapide peut dépasser le débit de la voie centrale lorsque la charge de la section est maximale.

Les pourcentages des débits sur voie lente, voie centrale et voie rapide en fonction du débit total de sections à trois voies de l'A7 en France et de l'A1 en Allemagne illustrent ce constat.

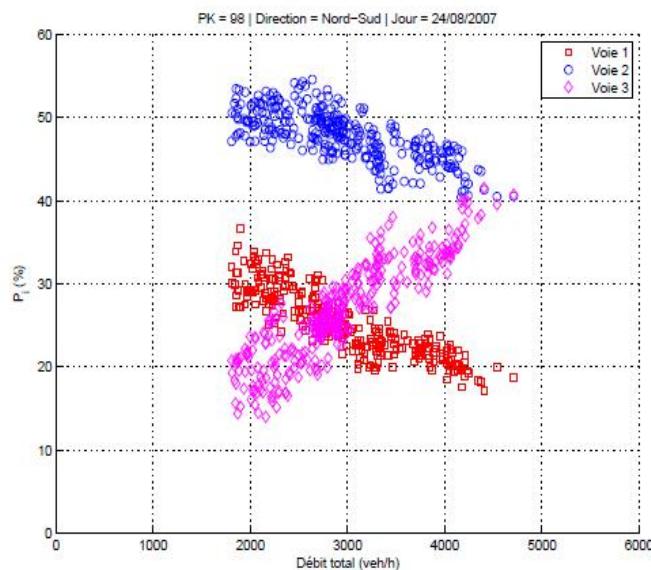


Illustration 38 : Utilisation des voies en fonction du débit total sur une autoroute à trois voies, France (A7)

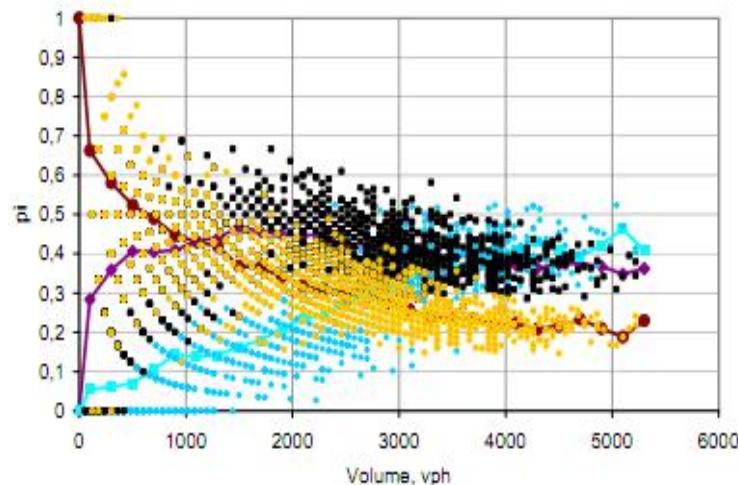


Illustration 39 : Utilisation des voies en fonction du débit total sur une autoroute à trois voies, Allemagne (A1)

Là encore, lorsque la règle permet le dépassement aussi bien par la gauche que par la droite, on observe une meilleure répartition du trafic sur les trois voies lorsque la section se charge. Ainsi au Canada, lorsqu'une section à trois voies se charge, les débits deviennent quasiment identiques sur la voie lente, la voie centrale et la voie rapide.

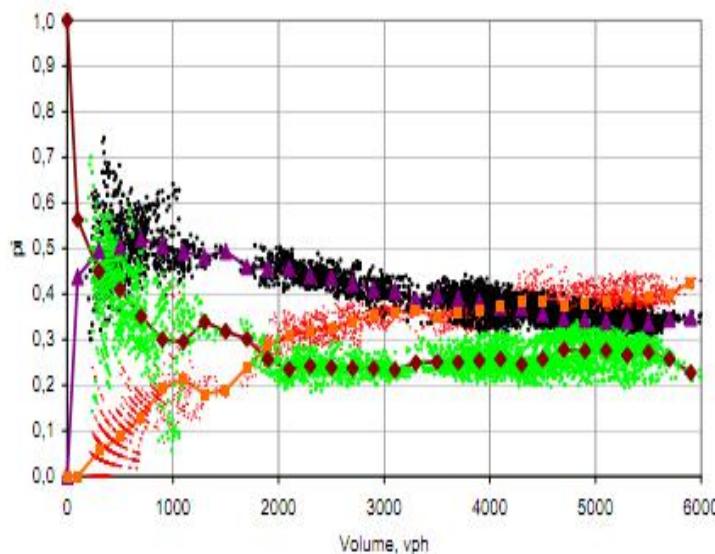


Illustration 40 : Niveau d'utilisation des voies en fonction du débit total sur une autoroute à trois voies, Canada

3.2.b Observations détaillées

Les recueils de données individuelles voie par voie permettent de mieux comprendre les mécanismes explicatifs de ces hétérogénéités.

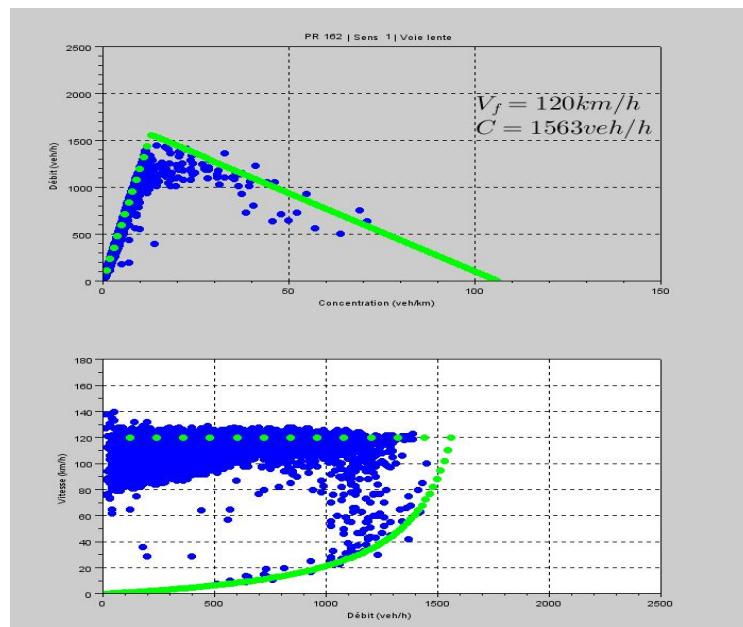


Illustration 41 : Représentations du diagramme fondamental de la voie lente d'une section à trois voies

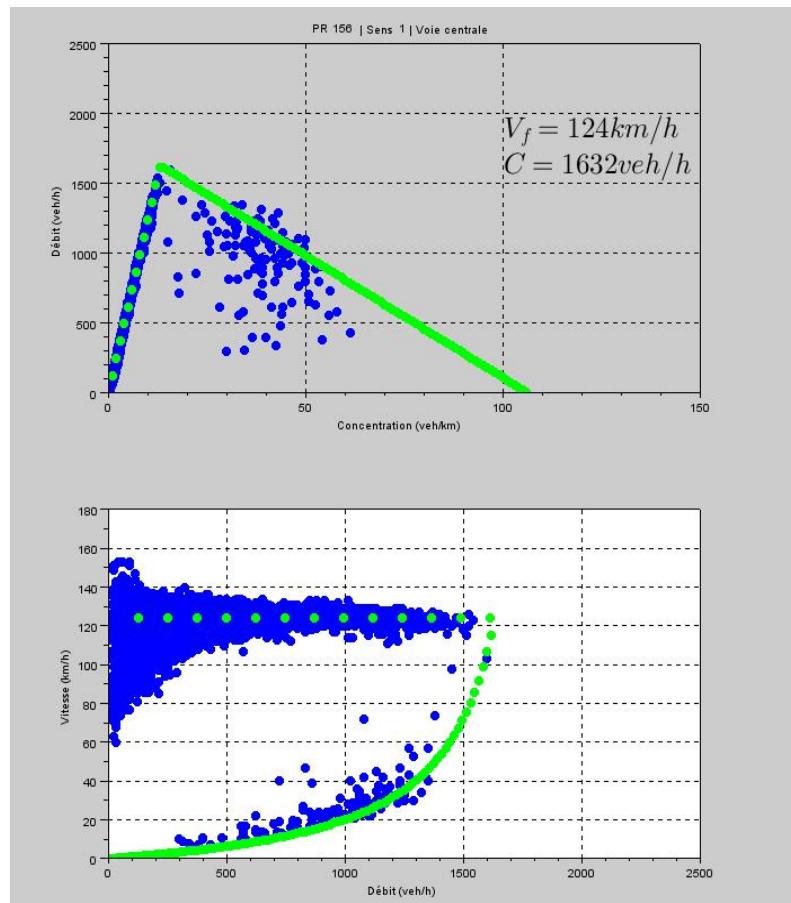


Illustration 42 : Représentations du diagramme fondamental de la voie centrale d'une section à trois voies

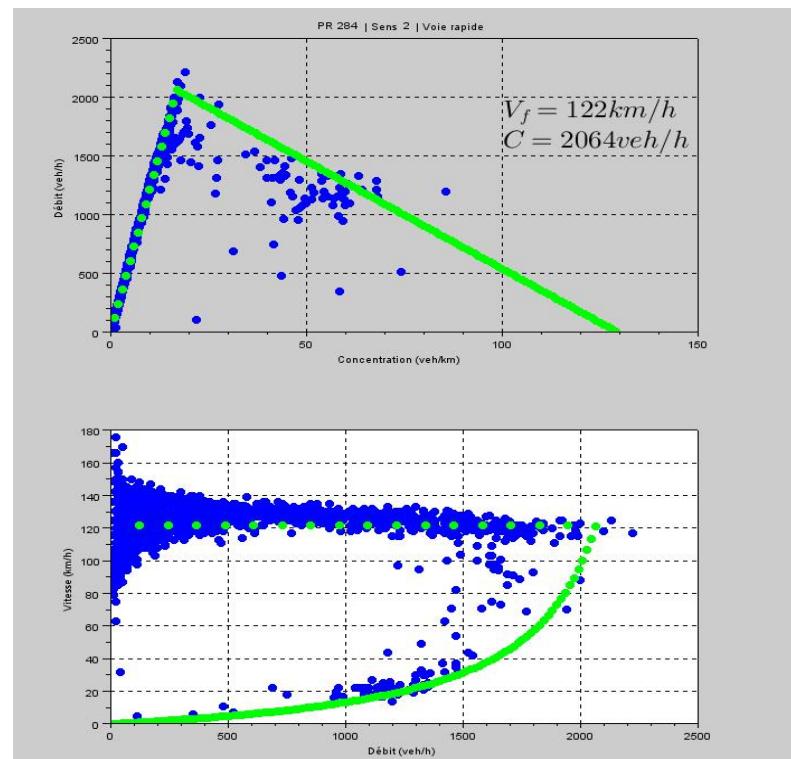


Illustration 43: Représentations du diagramme fondamental de la voie rapide d'une section à trois voies.

La mesure des écarts-types montre que les vitesses des véhicules sur la voie lente sont très hétérogènes. En cas de demande faible, la voie lente est peu chargée, ce qui autorise les véhicules les plus rapides à y circuler. Dès que la demande augmente sur la voie lente, les véhicules les plus rapides tendent à se décaler sur les voies les plus rapides. Cela met en lumière le fait que la vitesse ne semble pas être l'unique déterminant du choix de la voie de circulation et que d'autres facteurs, comme la demande totale, peuvent également influencer ce choix.

Lorsque l'on analyse le lien entre les choix de voie de circulation propres à chaque véhicule et la répartition globale des débits par voie (voir Illustration 38), on peut établir les constats suivants :

- lorsque la demande est très faible, la majorité des véhicules circulent sur la voie de droite, tandis que le trafic est quasiment nul sur la voie de gauche ;
- lorsque le débit total augmente (vers 1 800 véh/h), 50 % des véhicules circulent sur la voie centrale, 30 % circulent sur la voie lente et les 20 % restant circulent sur la voie rapide ;
- lorsque le débit total augmente (vers 2 800 véh/h), les voies lente et rapide supportent une même charge de trafic (autour de 25 %), et la voie centrale supporte alors environ 50 % du trafic total ;
- enfin, lorsque le débit total s'approche des débits maximaux (vers 4 800 véh/h), les voies centrale et rapide supportent la même charge de trafic (autour de 40 %), tandis que la voie lente ne supporte plus que 20 % du trafic.

La répartition particulière des débits sur chaque voie de circulation est donc le résultat macroscopique de choix de voie individuels.

3.2.c Modèle

À partir des observations, on peut proposer un modèle pour représenter le pourcentage de débit par voie en fonction de la demande totale sur une section à trois voies. Par souci de simplicité on retient un schéma linéaire.

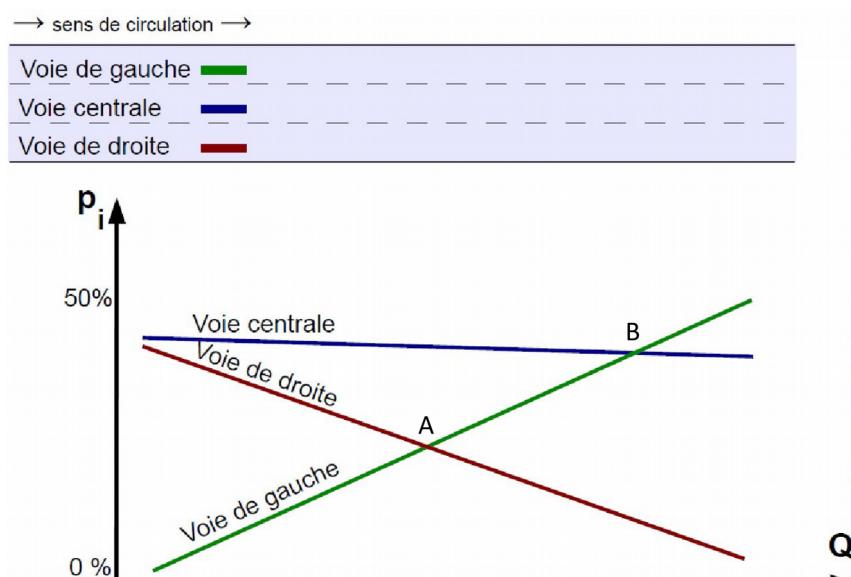


Illustration 44 : Modèle du niveau d'utilisation des voies en fonction du débit total sur une section à trois voies

Le pourcentage de débit sur chaque voie s'écrit alors :

$$p_i = a_i + b_i Q_{tot}$$

- Q_{tot} représente le trafic total pour trois voies de circulation,
- i le numéro de la voie,
- p le pourcentage d'utilisation de la voie,
- a l'ordonnée à l'origine,
- b le coefficient directeur.

Les pentes des droites respectent systématiquement : $b_1 < b_2 < 0 < b_3$. Le schéma peut être caractérisé par deux points **A** et **B**. **A** est le point de coordonnées (Q_A ; p_A) : il correspond au débit total Q_A pour lequel les pourcentages des voies 1 et 3 s'égalisent. De manière équivalente, **B** est le point de coordonnées (Q_B ; p_B) : il correspond au débit total Q_B pour lequel les pourcentages des voies 2 et 3 s'égalisent.

La simplicité de ce schéma linéaire permet de mieux comprendre les implications physiques de la répartition des débits sur chaque voie de circulation. Il est important de noter que les caractéristiques des trois droites (pentes et ordonnées à l'origine) du schéma linéaire peuvent être calculées à partir des coordonnées des deux seuls points A et B. Il est également intéressant de noter que si la proportion de débit par voie est une fonction linéaire du débit total, alors le débit sur une voie est une fonction polynomiale du second degré du débit total.

3.2.d Lien avec le diagramme fondamental

Comme cela a été abordé plus tôt dans cet ouvrage, dans le cas d'une section multivoie, le diagramme fondamental peut être décomposé par voie de circulation.

Il est alors possible d'illustrer le lien entre le modèle proposé ci-dessus et le diagramme fondamental.

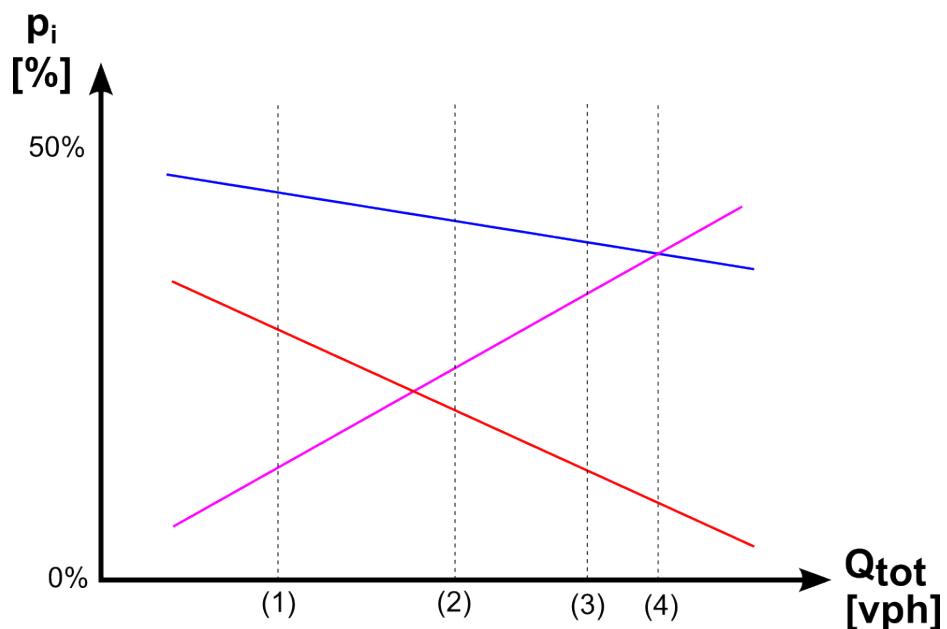


Illustration 45 : Modèle du niveau d'utilisation des voies en fonction du débit total sur une section à trois voies

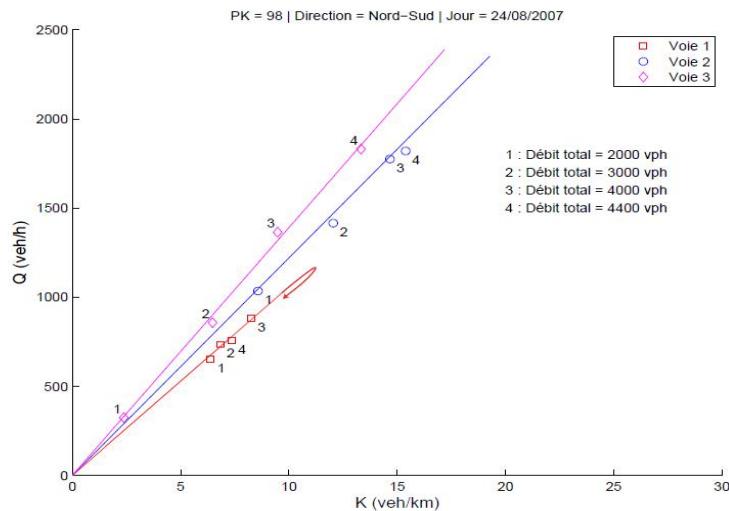


Illustration 46 : Représentation de la chute de capacité due à la sous-utilisation de la voie de droite sur une section à trois voies chargée

On peut expliquer l'allure de ces courbes par la présence de PL majoritairement sur la voie de droite, et par les comportements de dépassement et de non-rabattement sur la voie lente lorsque le trafic augmente.

Le phénomène de « demi-tour » sur la voie de droite (débit sur la voie lente qui baisse après avoir augmenté au fur et à mesure de la montée en charge de la section à trois voies) peut s'expliquer par les comportements de « désertion de la voie lente ». Sur la voie de droite, le débit augmente jusqu'à une valeur maximale (1, 2, 3), puis chute (3, 4) lorsque le débit total continue d'augmenter. Ce phénomène indique que le débit de la voie de droite atteint une valeur maximale Q_1 lorsque le débit total atteint une valeur critique Q_{tot} .

Volet 2 - Impact et domaine d'emploi des dispositifs de régulation

1 La régulation d'accès

1.1 Les causes de la congestion

Nous avons vu dans le premier volet de cet ouvrage l'impact microscopique d'une insertion unique sur le trafic. Il apparaît que la trajectoire du véhicule qui s'insère influence largement l'environnement lors de sa manœuvre, et cet impact dépend essentiellement de trois facteurs : la vitesse du véhicule au moment de son insertion, son niveau d'accélération et le débit sur la section courante.

1.1.a Les insertions à vitesse faible

La chute de capacité d'un convergent est fortement dépendante d'un quatrième phénomène : les insertions à faible vitesse.

En effet, dès lors que le trafic d'une zone de convergence devient dense, on observe des véhicules approchant de la fin de la zone d'insertion sans être parvenus à rejoindre la section courante. Ces véhicules sont alors contraints de ralentir et, généralement, forcent leur insertion. L'écart de vitesse de ces véhicules avec ceux de la section courante est souvent important, soit la pire des configurations car elle maximise :

- la hauteur de remontée de congestion en amont du véhicule ;
- la taille du vide créé en aval du véhicule.

Pour illustrer l'impact d'une unique insertion à vitesse faible, la figure suivante représente une situation d'insertion à vitesse proche de celle des véhicules de la section courante (à gauche) et une situation d'insertion à vitesse présentant un écart important avec celle des véhicules de la section courante (à droite).

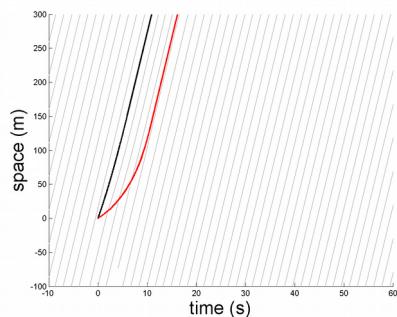


Illustration 47 : Impact d'une insertion à vitesse proche de celle des véhicules de la section courante

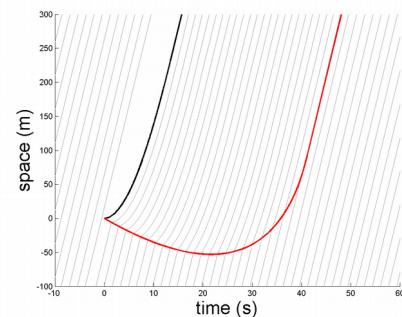


Illustration 48 : Impact d'une insertion à vitesse présentant un écart important avec celle des véhicules de la section courante

1.1.b Les insertions trop proches

On observe sur la figure précédente que la perturbation créée par une insertion unique finit par se résorber avec le temps. Mais lorsqu'un convergent pose un problème de congestion, c'est généralement qu'il présente un débit élevé en provenance de la bretelle, et multiplie les insertions rapprochées.

Sur la gauche de la figure suivante, on observe que les insertions sont suffisamment espacées pour ne pas interagir entre elles. La perturbation de chacune des insertions reste localisée à proximité du lieu de l'insertion.

Sur la droite de la figure, les insertions sont beaucoup plus rapprochées. Même sous l'hypothèse qu'il n'y a pas d'insertion à vitesse faible, on constate que la perturbation d'une de ces insertions n'est pas encore résorbée que se présente déjà l'insertion suivante. On entre alors dans un cercle vicieux où chaque nouvelle insertion augmente l'ampleur de la congestion.

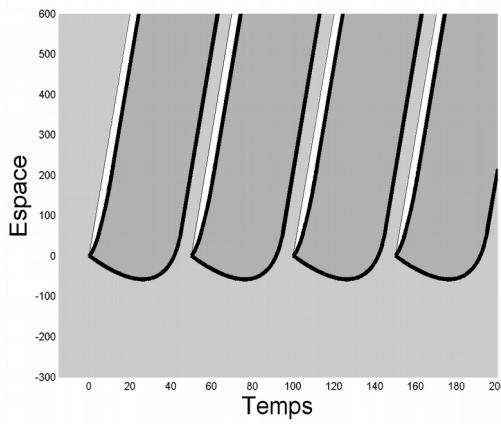


Illustration 50 : Impact d'insertions espacées

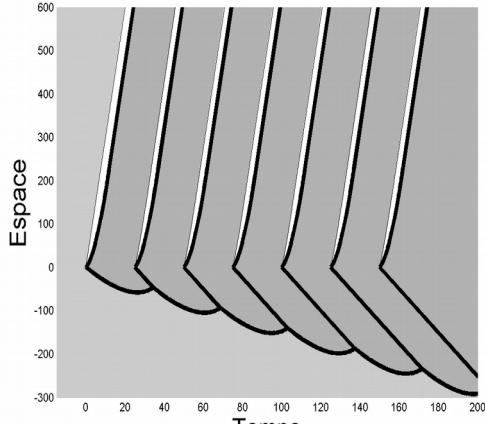


Illustration 49 : Impact d'insertions rapprochées

L'espacement entre deux insertions successives a donc un impact direct sur les conditions d'écoulement de la bretelle.

1.1.c Conclusion

La régulation d'accès, qui consiste à retenir les véhicules au niveau d'un feu, en amont de la bretelle d'accélération, vise à limiter ces deux phénomènes : les situations d'échec d'insertion d'une part, et l'effet cumulatif des insertions rapprochées d'autre part.

1.2 Impacts de la régulation d'accès au niveau microscopique

1.2.a Libération de la voie d'accélération

La mise en place d'une stratégie de régulation d'accès libère la voie d'accélération. Si une file d'attente se forme, sa tête se situe au niveau du feu de régulation mais la bretelle d'accélération reste libre. Ainsi, les véhicules peuvent accélérer avant leur insertion et, du fait d'un différentiel de vitesse réduit avec la section courante, limiter la perturbation due à leur insertion.

1.2.b Augmentation des espaces d'insertion

Nous avons vu que la succession de plusieurs insertions rapprochées entraîne une forte dégradation des conditions de circulation sur le trafic. En effet, les véhicules s'insèrent dans un trafic déjà perturbé par les insertions des véhicules précédents.

La mise en place de la régulation permet d'espacer les insertions les unes des autres. Ainsi, les interactions entre les insertions successives restent limitées et les hauteurs de remontées de file sur la section courante sont moindres.

1.3 Représentation macroscopique

En résumé, la régulation d'accès :

- libère la bretelle pour que les véhicules accélèrent et s'insèrent à haute vitesse, ce qui permet notamment de minimiser le nombre d'échecs d'insertion ;
- espace les insertions.

Ces phénomènes microscopiques individuels peuvent être représentés dans le schéma macroscopique de fonctionnement d'un convergent.

1.3.a Lien avec le modèle de Daganzo

L'impact de l'activation d'une régulation d'accès est résumé par la figure suivante.

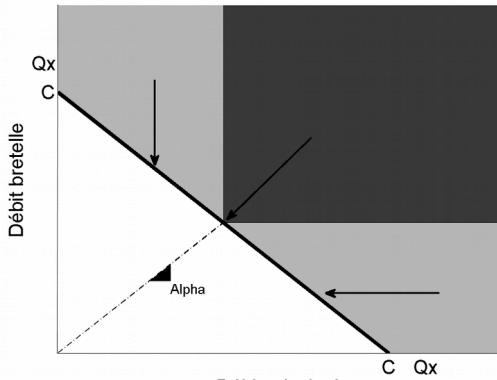


Illustration 51: Modèle macroscopique de fonctionnement d'un convergent sans régulation

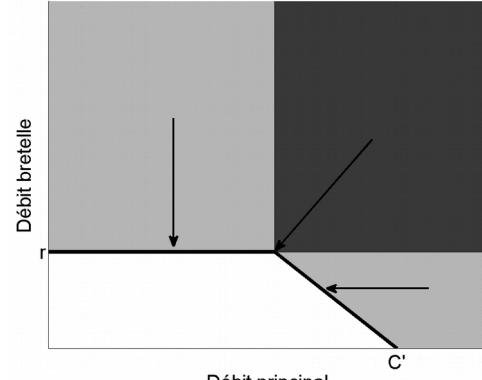


Illustration 52 : Modèle macroscopique de fonctionnement d'un convergent avec régulation

Le schéma de fonctionnement du convergent *sans régulation* est présenté à gauche : on retrouve ce qui est introduit plus haut dans le document.

Le schéma de fonctionnement de convergent *avec régulation* d'accès est présenté à droite. La régulation limite le débit de la bretelle au débit maximal autorisé par le feu de régulation, noté r . Si le débit en provenance de la bretelle est important, alors une part de cette demande est retenue en amont du feu, ce qui libère de la capacité pour la section courante. La section courante est maintenue fluide et on évite une chute de capacité.

1.3.b Domaine d'emploi

Il est difficilement envisageable de maintenir une régulation d'accès sur un convergent dont la bretelle sature d'ores et déjà (partie hachurée de la figure ci-dessous). Par ailleurs, le convergent doit être le lieu d'apparition de congestion pour qu'une régulation d'accès puisse avoir un impact. Le domaine d'emploi privilégié de la régulation d'accès en termes de demande correspond donc au fonctionnement d'un convergent se situant dans le cadran inférieur droit du diagramme ci-dessous.

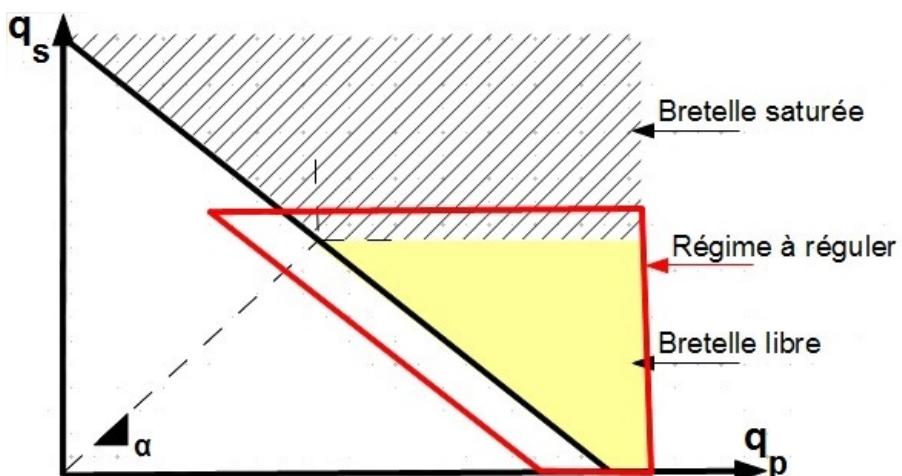


Illustration 53 : Zone de fonctionnement de la régulation d'accès (en rouge)

Ce ne sont pas les seules conditions à remplir pour qu'un site soit éligible à la régulation d'accès. Des conditions géométriques (voie d'accélération/espace de stockage pour la file d'attente) sont également requises.

1.4 Stratégies de régulation

1.4.a Plusieurs approches possibles

Il existe différentes catégories de régulation dynamique d'accès, caractérisées par leur étendue spatiale ou leur algorithme de régulation.

Concernant l'étendue spatiale, on distingue deux catégories de régulation :

- la **stratégie locale** qui vise à réguler une seule bretelle d'accès, indépendamment des autres bretelles ;
- la **stratégie coordonnée**, qui vise à optimiser le fonctionnement global d'un corridor en agissant de manière dynamique et coordonnée sur plusieurs bretelles simultanément, par exemple si la résolution de l'écoulement d'une bretelle perturbe le fonctionnement des bretelles situées en aval, ou, autre exemple, si l'on souhaite répartir la file d'attente sur plusieurs bretelles amont.

Concernant l'algorithme de cycle de feu, on en distingue trois types :

- **stratégie fixe** : le débit lié au cycle de feu reste invariant tout au long de la période d'activation de la régulation ;
- **stratégie historique** : le débit lié au cycle de feu varie au cours de la période d'activation de la régulation, et ce débit est calculé en fonction de données historiques de trafic ;
- **stratégie en temps réel** : le débit lié au cycle de feu varie au cours de la période d'activation de la régulation, et ce débit est calculé directement à partir des données de trafic mesurées en temps réel.

C'est cette dernière stratégie qui permet la meilleure efficacité. C'est également la seule qui soit appliquée actuellement, dans de nombreux pays comme en France (Grenoble, Lille et Paris). Aussi, dans la suite de ce chapitre, seules les régulations dynamiques seront présentées, sur la base de méthodes locale (ALINEA) ou globale (HERO).

1.4.b L'algorithme ALINEA

ALINEA (Asservissement linéaire d'entrée sur autoroute) est un algorithme de régulation en temps réel du trafic d'une bretelle.

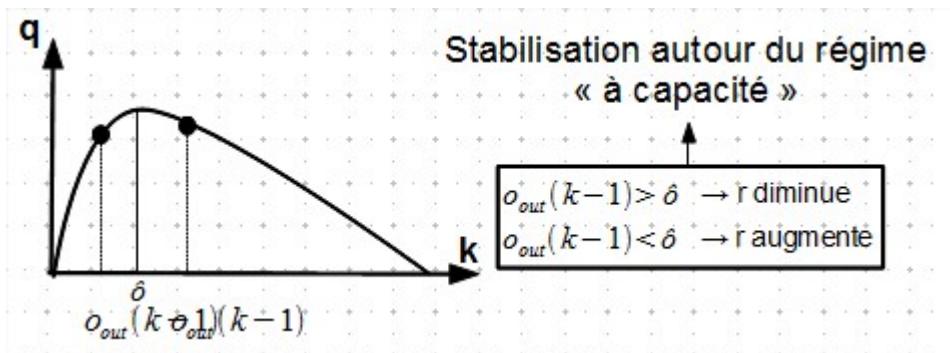


Illustration 54 : Illustration de la stratégie ALINEA

La stratégie ALINEA repose sur le principe suivant : d'après le diagramme fondamental, le fonctionnement optimal de la section courante se situe autour de sa zone à capacité. Le taux d'occupation mesuré y est proche du taux d'occupation critique.

L'objectif de la régulation d'accès est de contrôler le trafic de manière à maintenir un taux d'occupation proche de sa valeur critique immédiatement en aval du convergent. Pour cela, ALINEA est alimentée en temps réel par des données de trafic mesurées juste en aval du convergent :

- si le taux d'occupation est inférieur à sa valeur critique. Le convergent est fluide et peut théoriquement accueillir davantage de véhicules. Par conséquent, le cycle du feu de régulation est modifié de manière à augmenter le débit en provenance de la bretelle ;
- si le taux d'occupation est supérieur à sa valeur critique. Le convergent est saturé et il faut donc réduire le nombre de véhicules qui alimentent le convergent. Par conséquent, le cycle du feu de régulation est modifié de manière à diminuer le débit en provenance de la bretelle.

La stratégie ALINEA est locale (régulation indépendante de chaque bretelle). Une extension à l'échelle d'un corridor a été proposée sous le nom de stratégie HERO (HEuristic Ramp metering coOrdination), qui permet de réguler un corridor complet sur le même principe qu'ALINEA (maintien du régime critique) appliqué à une échelle plus globale intégrant plusieurs bretelles.

2 La régulation des vitesses

La régulation dynamique des vitesses consiste à préconiser temporairement une vitesse maximale plus faible (généralement 110 km/h ou 90 km/h, mais on peut imaginer des pas de 10 km/h) afin de l'adapter aux conditions de trafic. Elle peut être utilisée de deux manières :

- lorsque l'écoulement est fluide, l'objectif est alors de retarder l'apparition de la congestion ;
- lorsque l'écoulement est congestionné, l'objectif est alors d'avancer la date de disparition de la congestion.

La mise en place de cette mesure vise notamment à pallier la sous-utilisation de la voie lente.

2.1 La sous-utilisation de la voie de droite

2.1.a Observation

Il est courant de constater sur les sections à deux voies ou plus, l'installation de la circulation sur les voies les plus rapides alors que la voie lente est inoccupée, du fait de comportements individuels de non-rabattement après dépassement. On observe alors directement une perte de capacité sur la voie lente.

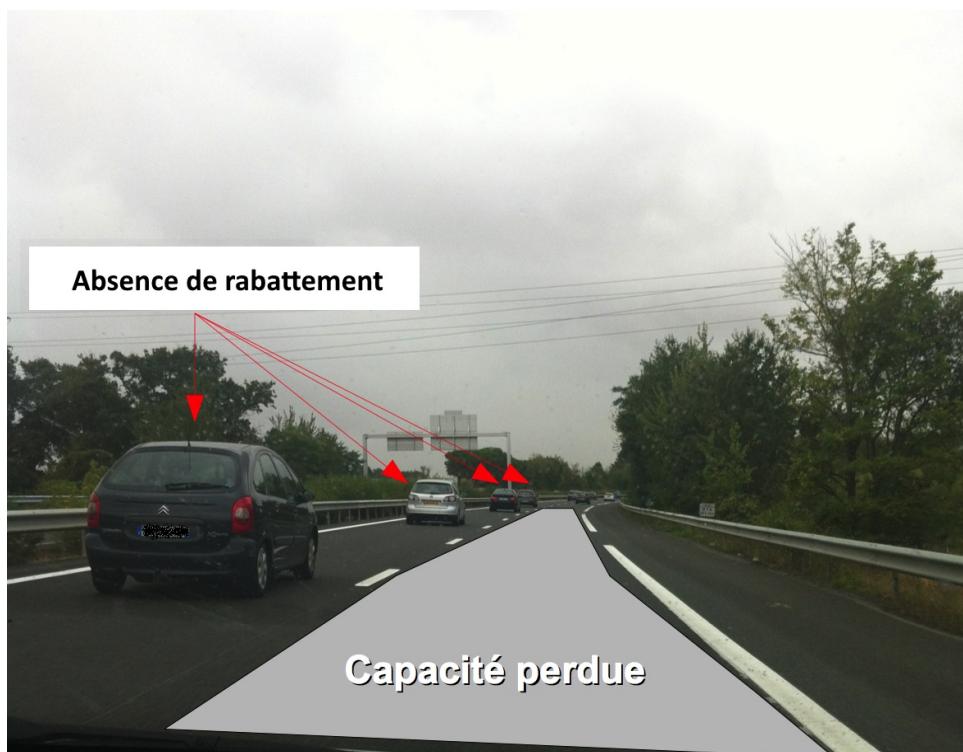


Illustration 55 : Illustration de l'installation d'une circulation sur la voie rapide

L'allure globale de la courbe de répartition des débits sur chaque voie au fur et à mesure de la montée en charge de la section passe par un point de croisement, à partir duquel le débit de la voie lente devient inférieur à celui de la voie rapide.

Cette allure n'est pas observée lorsque la règle de dépassement autorise la circulation en files et le dépassement par la gauche ou par la droite, comme c'est le cas au Canada par exemple.

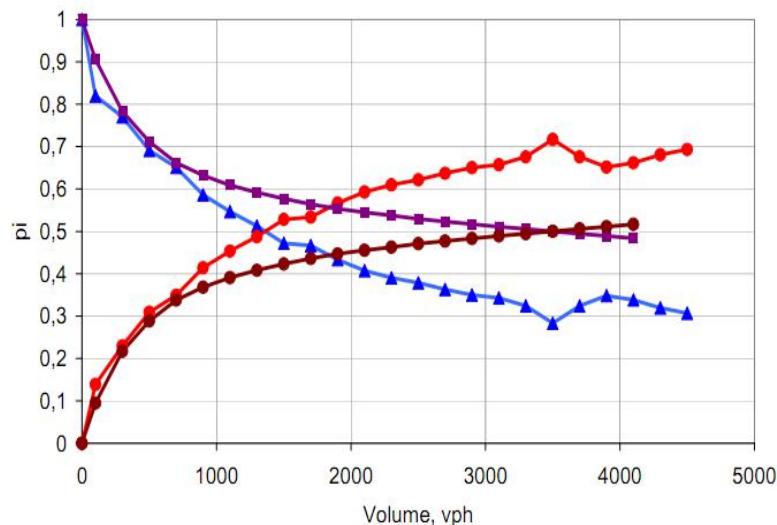


Illustration 56 : Niveaux d'utilisation des voies en fonction du débit total sur des autoroutes à deux voies en Allemagne (courbes rouge et bleue) et au Canada (courbes marron et violette).

2.1.b Analyse comportementale

Nous rappelons ici les principaux éléments vus au paragraphe 3 du premier volet.

La répartition des débits par voie résulte des choix de voie individuels.

En régime fluide et lorsque le débit total est faible, les véhicules rapides circulent sur la voie de droite et utilisent ponctuellement les autres voies pour dépasser les véhicules plus lents. Après chaque manœuvre de dépassement, les véhicules rapides se rabattent généralement sur la voie de droite.

Lorsque le débit total augmente, les véhicules rapides sont davantage contraints dans leurs manœuvres de dépassement par les véhicules déjà présents sur les voies centrale ou de gauche, et finalement, ne se rabattent plus entre deux dépassements. En conséquence, lorsque le débit total est élevé, seuls les véhicules les plus lents utilisent la voie de droite, qui devient alors sous-utilisée.

2.2 Impact de la sous-utilisation de la voie lente

2.2.a Illustration sur une section à deux voies

Comme présenté au chapitre « Les niveaux d'utilisation des voies », on peut établir un lien entre le schéma représentant le pourcentage d'utilisation des voies en fonction du débit total et le diagramme fondamental décomposé par voie.

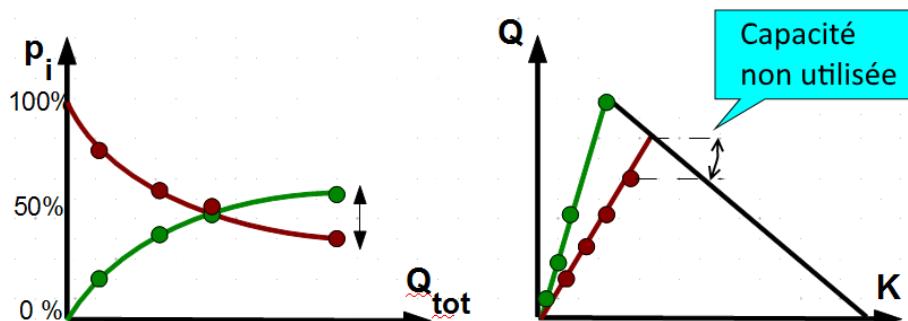


Illustration 57 : Représentation de la chute de capacité due à la sous-utilisation de la voie de droite sur une section à deux voies

2.2.b Illustration sur une section à trois voies

Sur une section à trois voies, on observe non seulement une chute de capacité, mais aussi un effet de « demi-tour » sur la voie lente (débit sur la voie lente qui baisse après avoir augmenté au fur et à mesure de la montée en charge de la section à trois voies).

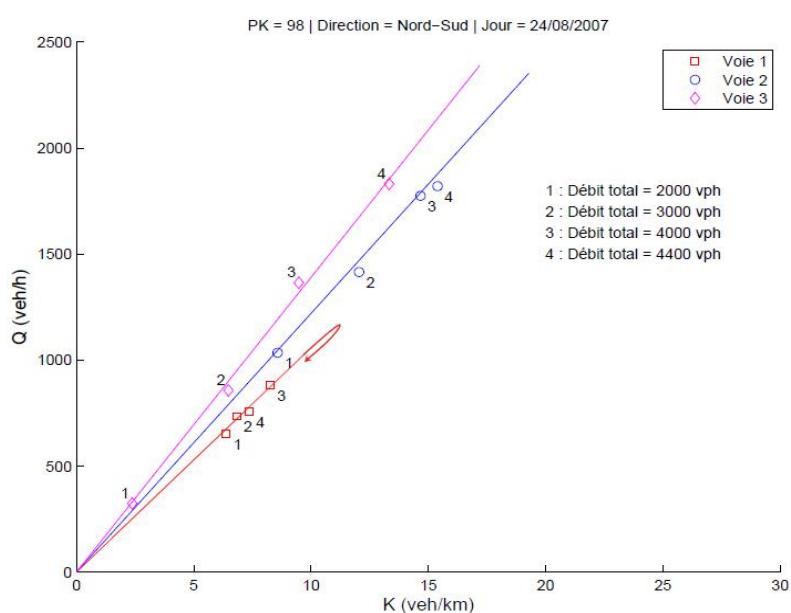
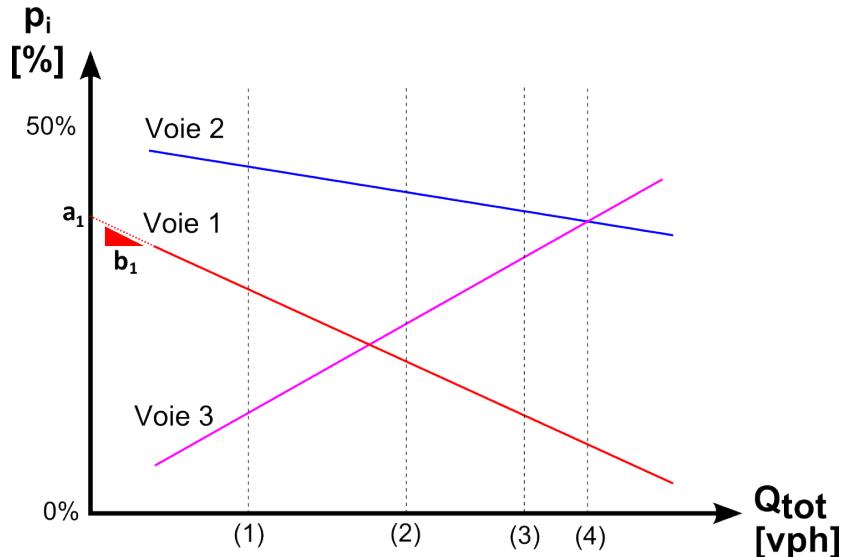


Illustration 59 : Représentation de la chute de capacité due à la sous-utilisation de la voie de droite sur une section à trois voies chargées

2.2.c Calcul de la chute de capacité

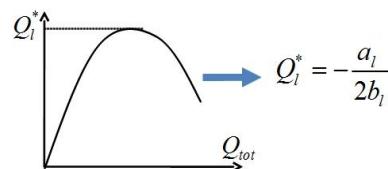
Comme présenté au chapitre « Les niveaux d'utilisation des voies », on peut proposer un modèle linéaire pour représenter le pourcentage de débit sur chaque voie en fonction du débit total. Le débit de la voie lente Q_1 peut s'exprimer comme une fonction du débit total Q_{tot} , cette fonction étant un simple polynôme du second degré.

Le débit de la voie lente s'écrit alors :

$$Q_1 = a_1 Q_{tot} + b_1 Q_{tot}^2 \quad \text{où } Q_{tot} \text{ représente le trafic total pour trois voies de circulation.}$$

Pour ce polynôme, il existe un maximum positif pour Q_l si $a_l > 0$ et $b_l < 0$, comme l'illustre la figure qui suit.

$$Q_l = (a_l + b_l Q_{tot}) \cdot Q_{tot}$$



On peut alors calculer le débit maximum de la voie lente, et noter que du fait de l'effet de « demi-tour », le débit maximum Q_l^* de la voie 1 est atteint alors que les voies 2 et 3 n'ont pas encore atteint leurs capacités respectives.

$$\text{On a : } Q_l^* = \frac{-a_1^2}{4 \cdot b_1}$$

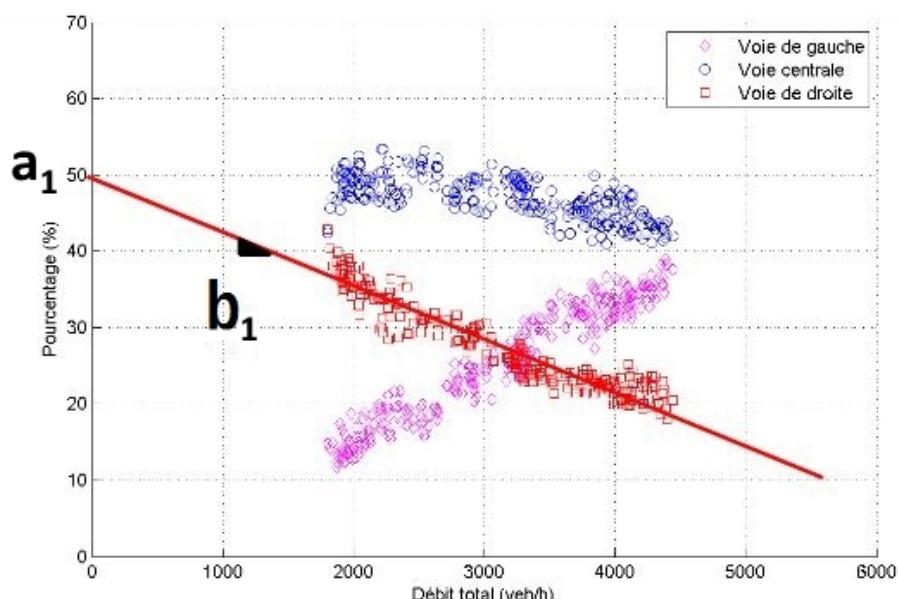


Illustration 60 : Détermination des valeurs de a_1 et b_1 – A6, PR98, sens S>N

2.3 Effet de la régulation des vitesses

2.3.a Impact du trafic PL sans régulation de vitesse

La figure qui suit présente l'histogramme, sur une section de l'autoroute A7, des valeurs de débit maximum observé sur la voie lente Q_l^* en différenciant les jours de semaine des jours de week-end. Les jours de semaine, 70 % des valeurs de Q_l^* sont comprises entre 700 véhicules/h et 800 véhicules/h. Les jours de week-end, lorsque le nombre de PL est plus faible, les valeurs de Q_l^* sont plus élevées et comprises entre 900 véhicules/h et 1 100 véhicules/h.

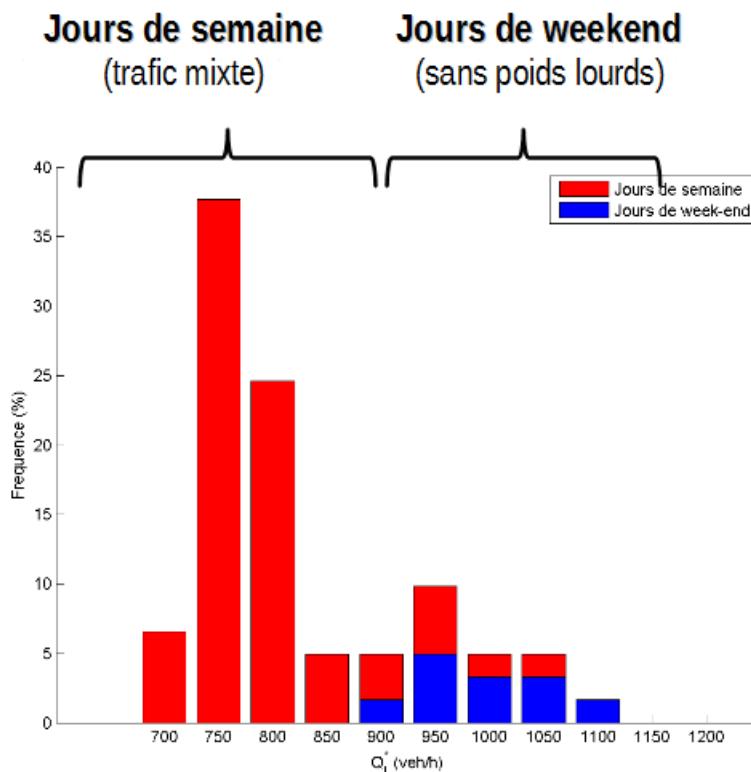


Illustration 61 : Répartition des valeurs de débit maximum observé sur la voie lente d'une section de l'autoroute A7 sans régulation des vitesses

L'interdiction de circuler pour les PL, en place les jours de week-end, permet de limiter le différentiel de vitesses entre les véhicules. Les manœuvres de dépassement sont moins fréquentes et les véhicules rapides ont davantage tendance à se rabattre entre chaque manœuvre de dépassement. Les voies lentes sont plus utilisées, et le débit de la voie de droite est mécaniquement plus élevé.

La présence de PL sur une section autoroutière a donc un impact significatif sur la sous-utilisation de la voie lente, qui voit son débit maximum diminuer (de 20 à 30 % dans l'exemple d'A7).

2.3.b Augmentation du débit liée à la régulation des vitesses

Depuis l'été 2007, un dispositif de régulation des vitesses a été mis en place sur l'A7 afin de retarder l'apparition des congestions lors des périodes de forte demande de trafic.

La figure qui suit présente la répartition des valeurs de débit maximum observé sur la voie lente Q_l^* avec régulation des vitesses, en différenciant les jours de semaine des jours de week-end. Sur cette figure, Q_l^* se répartit de manière homogène entre 850 veh/h et 1 200 veh/h. La comparaison avec la situation sans régulation permet de conclure que le dispositif de régulation des vitesses augmente significativement la valeur de Q_l^* les jours de semaine (quand le trafic PL est normal). Le week-end, quand le trafic PL est faible, on observe également des débits sur la voie lente qui augmentent (jusqu'à 1 200 veh/h).

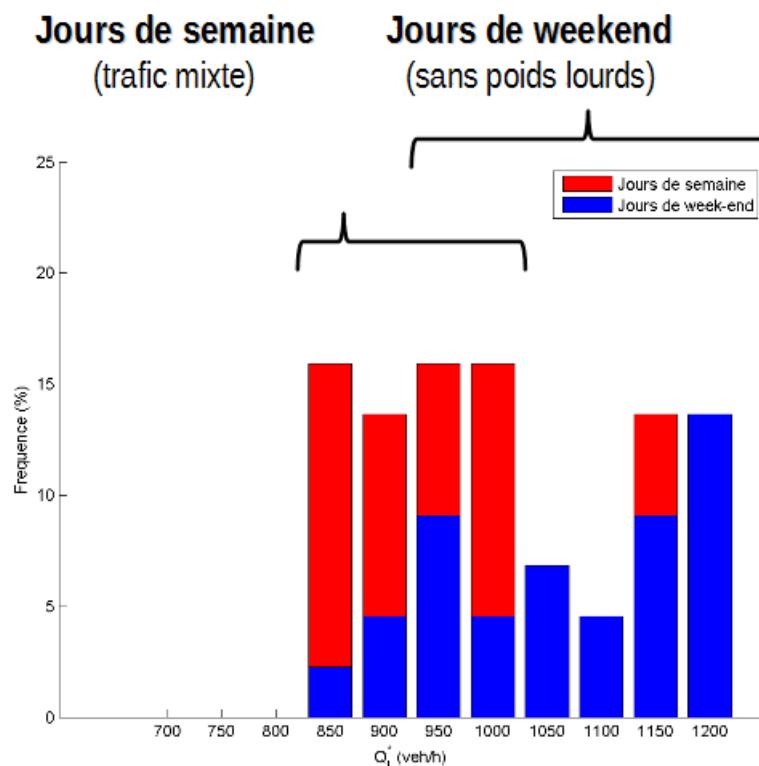


Illustration 62 : Répartition des valeurs de débit maximum observé sur la voie lente d'une section de l'autoroute A7 avec régulation des vitesses

Lorsque la régulation des vitesses est active, la différence de vitesse entre la voie lente et la voie centrale diminue. Les manœuvres d'insertion sur la voie centrale pour effectuer un dépassement en sont facilitées, et les véhicules se rabattent plus régulièrement sur la voie de droite. La régulation des vitesses permet donc une meilleure utilisation de la voie de droite, et retarder ainsi l'apparition de la congestion.

À noter que cet impact est d'autant plus marqué que le nombre de PL est important, mais reste observable même en l'absence de PL.

2.4 Domaine d'emploi

2.4.a En section courante

Lorsque l'analyse des niveaux d'utilisation des voies montre une sous-utilisation de la voie lente, la régulation des vitesses est pertinente.

La régulation des vitesses se prête donc bien aux sections interurbaines connaissant des problèmes réguliers de congestion liés à la demande de trafic, notamment lorsque le nombre de PL est significatif. Elle permet alors de retarder et limiter la congestion.

2.4.b À proximité des convergents

La régulation des vitesses ne semble pas adaptée pour réduire la congestion générée par les demandes importantes de trafic aux convergents.

En effet, les études ont montré que le débit de la section courante et sa répartition par voie sont largement impactés par la présence d'une bretelle d'entrée (sur quelques centaines de mètres au niveau de l'entrée), et que la voie de droite est rarement sous-utilisée au droit du convergent.

Par ailleurs, si la régulation peut permettre de limiter les manœuvres de changement de voie (par homogénéisation des vitesses entre les voies) et réduire les écarts de vitesse lors des insertions (entre le véhicule qui s'insère et ceux qui sont sur la voie de droite), l'impact semble trop limité pour avoir un effet significatif sur la congestion. Cela pourrait expliquer

l'échec de la mise en place d'un dispositif de régulation des vitesses sur le périphérique de Toulouse ou, plus récemment, sur la rocade sud de Grenoble.

2.4.c Des domaines d'emploi connexes

Si la régulation des vitesses n'est pas nécessairement adaptée pour traiter les problèmes de congestion liée à la demande de trafic, elle peut tout de même être mise en place afin de répondre à des objectifs :

- de diminution des nuisances sonores ;
- de diminution des émissions de polluants ;
- de sécurité routière (protection des queues de bouchon, protection suite à un événement).

3 L'interdiction de dépassement pour les poids lourds (IDPL)

Les mesures d'interdiction de dépassement pour les poids lourds visent à limiter l'impact sur les conditions de circulation de ces véhicules plus lents que les autres.

Ce chapitre présente une méthode de modélisation de l'interaction entre véhicules lents et rapides, où les poids lourds sont considérés comme des restrictions de capacité pour le flux de véhicules légers : c'est la théorie dite du « bouchon mobile ».

Elle permet de décrire l'impact de la présence de poids lourds sur l'écoulement des véhicules légers, notamment dans le cas de dépassement de poids lourds entre eux.

Elle permet à contrario de représenter l'impact d'une mesure d'interdiction de dépassement pour les poids lourds, qui va supprimer ces dépassements et la gêne consécutive envers l'écoulement des véhicules légers, et d'en déterminer les grands domaines d'emploi.

3.1 Théorie du bouchon mobile

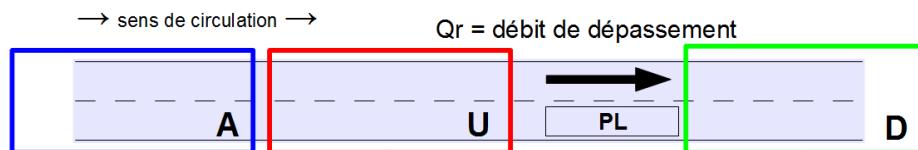
La représentation, au sein du modèle de trafic, d'incidents mobiles entraînant une restriction de capacité pour le trafic environnant fait l'objet de recherches depuis une vingtaine d'années. Ces travaux visent à représenter l'impact des véhicules lents, comme les poids lourds, sur l'écoulement du trafic de véhicules légers, pour qui ces véhicules lents sont modélisés comme des obstacles mobiles.

La première approche a été réalisée sur la base de réflexions phénoménologiques. Elle a été consolidée au sein d'une théorie intégrant les états de trafic attendus dans le modèle d'écoulement en amont et en aval du véhicule lent, ainsi qu'à la hauteur de ce véhicule. Les résultats qui en sont issus sont quelquefois contre-intuitifs, ce qui a valu un certain nombre de débats sur leur phénoménologie. Une synthèse de ces modèles et une explicitation des phénoménologies associées ont été réalisées par [Leclercq, Chanut et Lesort, 2004].

3.1.a Exemple d'un PL lent sur la voie de droite

Considérons une route à deux voies sur laquelle un poids lourd se déplace à la vitesse V_{PL} .

Quand le débit Q_A en amont de ce véhicule est trop élevé et/ou lorsque la différence entre la vitesse de ce véhicule V_{PL} et celle du flux V_A arrivant de l'amont est trop importante, une perturbation de l'écoulement apparaît : une file d'attente se forme sur les deux voies (état U en amont du PL).



Cette file d'attente est constituée de véhicules à une concentration notée K_U , et se déplace à la vitesse du poids lourd V_{PL} .

Le débit pouvant s'écouler à l'aval immédiat du poids lourd correspond à la capacité d'une voie : on le note Q_D .

3.1.b Définition de l'état « gêné »

Lors du dépassement par les VL d'un PL, l'état d'équilibre U de l'éventuelle file d'attente correspond à un débit Q_U égal à la somme :

- du débit de dépassement Q_r du véhicule lent (débit relatif) :

$$Q_r = K_D (V_D - V_{PL})$$

- et du débit Q_{FA} de la file d'attente derrière le véhicule lent :

$$Q_{FA} = K_U \cdot V_{PL}$$

d'où un débit d'équilibre :

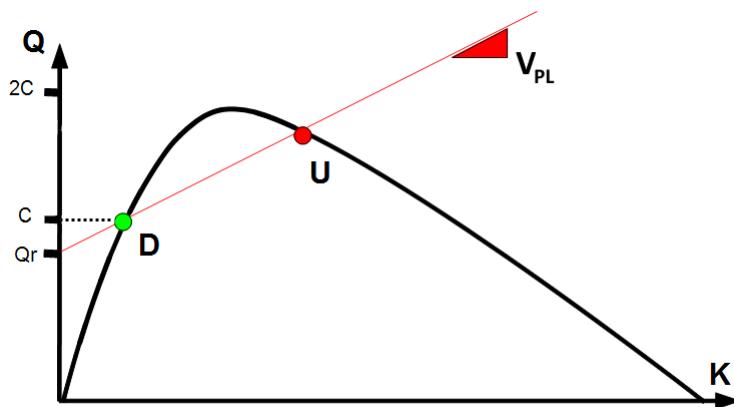
$$Q_U = Q_r + Q_{FA} = K_D (V_D - V_{PL}) + K_U \cdot V_{PL}$$

$$Q_U = Q_D + V_{PL} (K_U - K_D)$$

3.1.c Définition de l'état de la file d'attente

L'état d'équilibre U (K_U , Q_U) est donc situé, sur le diagramme fondamental, à l'intersection de ce diagramme et de la droite passant par le point connu D et de pente V_{PL} .

Par construction, le débit de dépassement Q_r correspond à l'intersection de cette même droite avec l'axe des ordonnées.



3.1.d Type de gêne

La position de l'état de trafic amont A par rapport aux points D et U va définir le type de gêne subie par le flot de véhicules du fait de la présence du poids lourds :

- si le débit Q_A est inférieur à la capacité d'une voie, il n'y a **pas de gêne et pas de file d'attente** (l'état U n'est pas présent) ;
- si le débit Q_A est supérieur à la capacité d'une voie (donc à Q_D), mais inférieur à Q_U (exemple du point A'), alors il y a une **gêne au dépassement** (l'état U en amont du PL apparaît) ; mais cette gêne est **limitée**. En effet, la longueur de la zone d'attente (qui correspond à l'état U) augmente, mais son débit Q_U étant supérieur à celui de la demande Q_A , la queue de la perturbation liée au poids lourd se déplace vers l'aval : elle « suit » la progression du PL ;
- si le débit Q_A est supérieur à Q_D mais également à Q_U , alors il y a une **gêne au dépassement importante**, et on peut parler de **congestion**, car le débit de la zone d'attente Q_U est inférieur à celui de la demande Q_A , et donc la queue de la perturbation liée au poids lourd se déplace vers l'amont.

3.2 Cas particuliers

La théorie présentée ci-avant permet d'analyser quelques cas particuliers.

On représentera les différents types de gêne avec les couleurs suivantes :

- absence de gêne : vert ;
- gêne limitée : jaune ;
- gêne importante : rouge ;

3.2.a Cas d'un PL arrêté

Si un PL est arrêté, alors la pente V_{PL} est nulle.

On retrouve classiquement le cas d'une restriction (fixe) à une voie, et l'état de « gêne limitée » n'existe pas : soit il n'y a **pas de gêne** (exemple A), soit il y a **congestion** (exemple A").

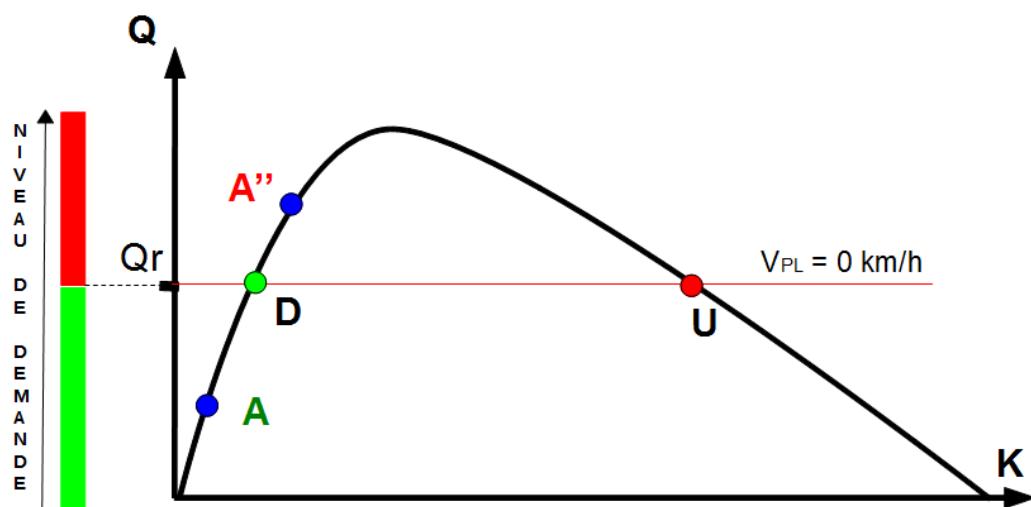
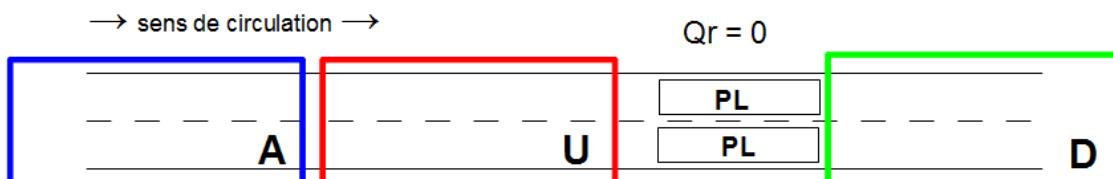


Illustration 63 : Représentation sur le diagramme fondamental du cas d'un PL arrêté

3.2.b Cas d'un PL qui ne parvient pas à dépasser un autre PL

Si un PL tente sans y parvenir de dépasser un autre PL, alors le flux de véhicules rapides ne peut plus dépasser : $Q_D = 0$.



Cela produit une gêne de façon systématique, puisque les véhicules rapides sont contraints de circuler à la vitesse des PL. Cette gêne se transforme en congestion si la demande Q_A est supérieure au débit Q_U (*exemple A''*). Elle reste une gêne limitée si la demande Q_A est inférieure au débit Q_U (*exemple A'*).

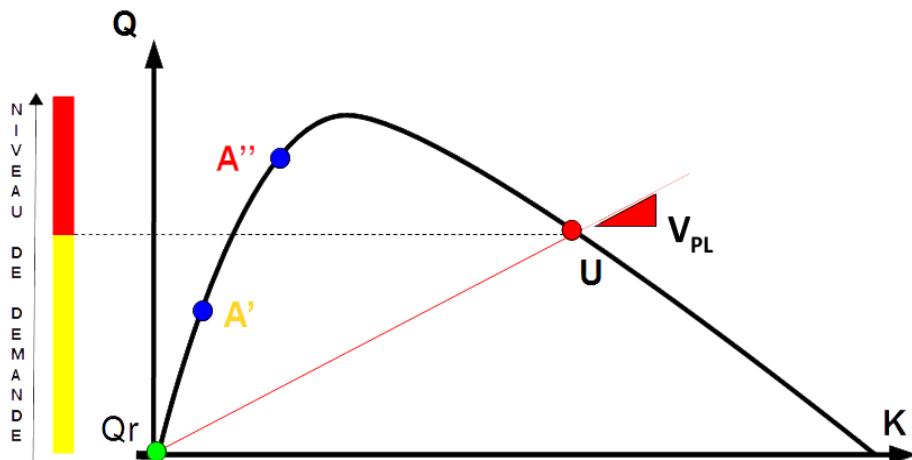


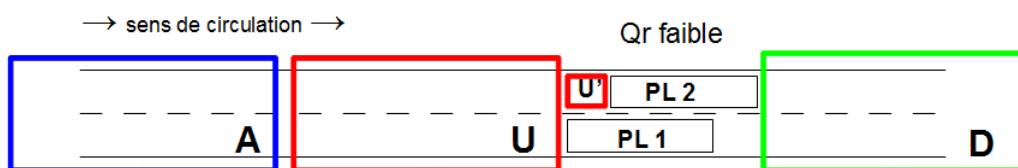
Illustration 64 : Représentation sur le diagramme fondamental du cas d'un PL qui ne parvient pas à doubler un autre PL

3.3 Phénoménologie des trafics lors des dépassements entre PL

Le modèle permet ainsi d'estimer l'impact de la mise en place d'une interdiction de dépassement pour les poids lourds (IDPL).

3.3.a Impact du dépassement de PL entre eux sur une section à deux voies

Sur les sections à deux voies, la mise en place d'une IDPL va limiter les situations où un poids lourd « rapide » (circulant à V_{PL2}), mais plus lent que les véhicules légers, dépasse un poids lourd « lent » (circulant à V_{PL1}), et constraint donc la capacité de dépassement des véhicules en amont :



Dans ce cas, le débit de dépassement du poids lourd rapide Qr' est nul (aucun véhicule ne peut le dépasser) et l'état de trafic U' sur la voie de gauche derrière le poids lourd rapide est obtenu comme sur le graphique précédent (intersection du diagramme fondamental « 1 voie » par une droite passant par $Qr'=0$ et de pente V_{PL2}).

Le débit de dépassement du poids lourd lent correspond alors au débit Qr sur l'axe des ordonnées obtenu par la droite passant par U' et de pente V_{PL1} . Cette construction donne les états de trafic D (en aval des deux poids lourds) et U (en amont des deux poids lourds) pour une section à deux voies.

Dans ce cas, le niveau de demande qui correspond à l'absence de perturbation (niveau de demande vert) est très réduit.

Le niveau de demande de gêne limitée (entre Q_D et Q_U) recouvre une plage importante.

Au-delà d'une demande Q_U (niveau de demande rouge), une congestion apparaît.

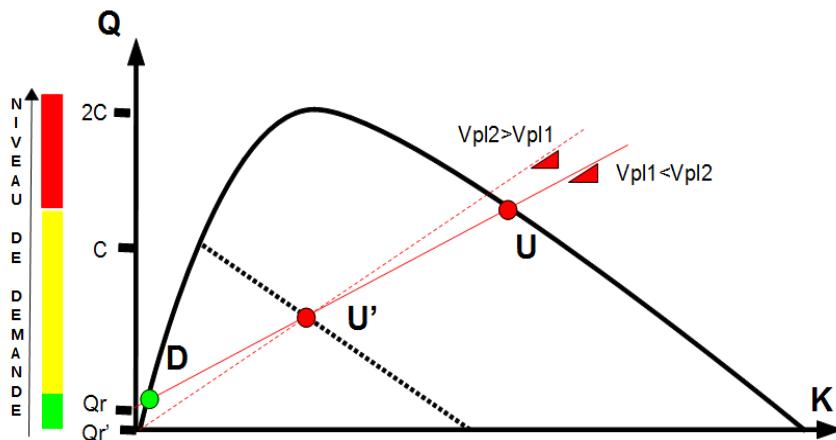
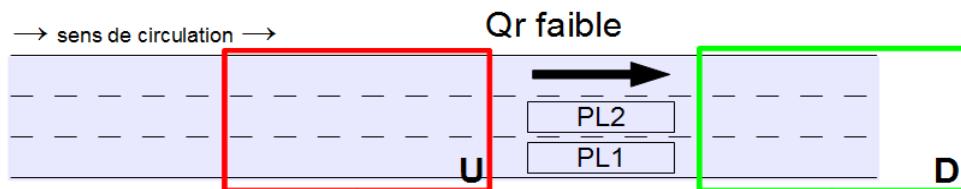


Illustration 65 : Représentation sur le diagramme fondamental de l'impact du dépassement d'un PL par un autre PL sur une section à deux voies

3.3.b Sur une section à trois voies

Pour une section à trois voies, la mise en place d'une IDPL va empêcher les situations où un poids lourd « rapide » (circulant à V_{PL2}), mais plus lent que les véhicules légers, dépasse un poids lourd « lent » (circulant à V_{PL1}), et limite la circulation des VL sur une seule voie.



Dans ce cas, le débit de dépassement du poids lourd rapide Q_r par les VL correspond au débit sur l'axe des ordonnées obtenu par la droite passant par D , point de capacité du diagramme à une voie (et donc état aval sur trois voies) et de pente V_{PL2} . Cette construction permet de déterminer l'état de trafic U de la zone d'attente en amont des deux poids lourds.

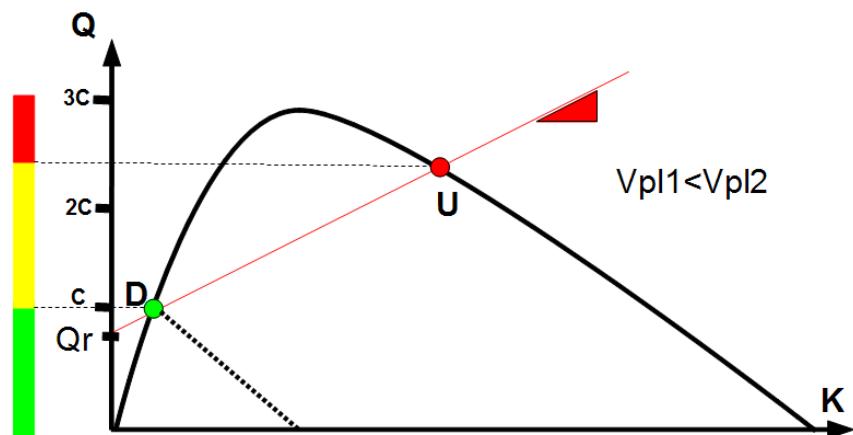


Illustration 66 : Représentation sur le diagramme fondamental de l'impact du dépassement d'un PL par un autre PL sur une section à trois voies

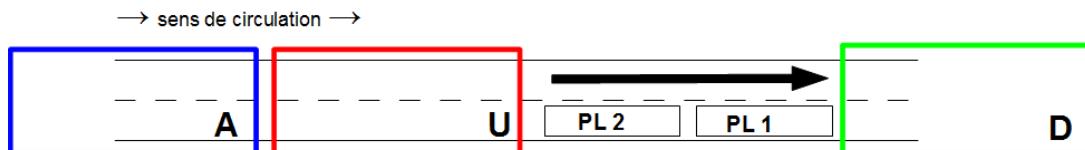
Le niveau de demande qui correspond à une gêne limitée (entre Q_d et Q_u) est assez large (niveau de demande jaune).

Au-delà d'une demande Q_u (niveau de demande rouge), une congestion apparaît.

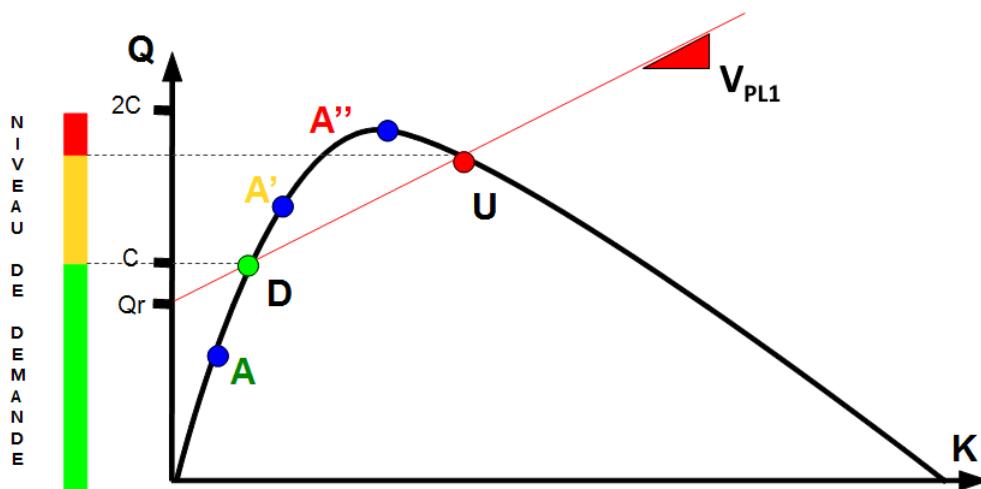
3.4 Impacts de l'IDPL

3.4.a Modélisation de l'IDPL et phénoménologie – section à deux voies

La mise en place d'une IDPL sur une section à deux voies supprime les dépassements entre poids lourds. Les PL les plus rapides sont alors contraints de suivre les PL les plus lents.



On se retrouve dans le cas du simple dépassement par les VL d'un poids lourd de vitesse V_{PL1} , avec une voie toujours disponible pour effectuer ce dépassement.



L'IDPL permet ainsi :

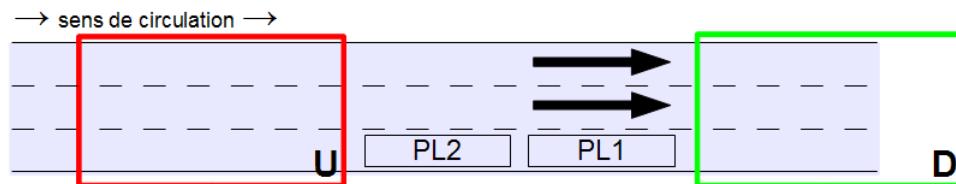
- d'augmenter la zone où il n'y a pas de gêne au dépassement (niveau de demande en vert), donc d'augmenter globalement la capacité de la section ;
- de diminuer la zone de gêne limitée (niveau de demande en jaune), donc de limiter les périodes où une gêne au dépassement des PL apparaîtra ;
- de limiter les périodes où une congestion apparaîtra (niveau de demande en rouge).



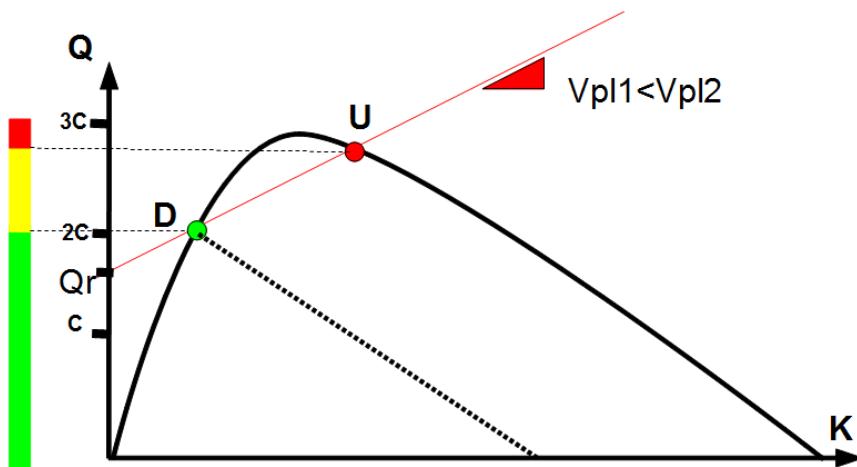
Illustration 67 : Impact de l'interdiction de doubler pour les PL sur une section à deux voies.

3.4.b Modélisation de l'IDPL et phénoménologie – section à trois voies

La mise en place d'une IDPL supprime les dépassements entre poids lourds.

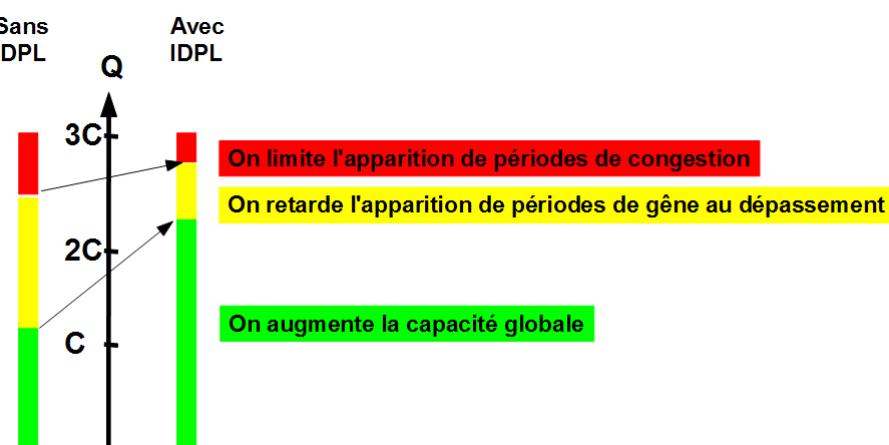


On retrouve le cas du simple dépassement par les VL d'un poids lourd de vitesse V_{PL1} , avec deux voies toujours disponibles pour effectuer ce dépassement.



Comme pour une section à deux voies, l'IDPL sur une section à trois voies permet :

- d'augmenter la zone où il n'y a pas de gêne au dépassement (niveau de demande en vert), donc d'augmenter globalement la capacité de la section ;
- de diminuer la zone où la zone de gêne limitée (niveau de demande en jaune), donc de limiter les périodes où une gêne au dépassement des PL apparaîtra ;
- de limiter les périodes où une congestion apparaîtra (niveau de demande en rouge).



3.5 Domaines d'emploi de l'IDPL

Ces modélisations permettent de mettre en évidence les domaines d'emploi de l'IDPL :

- le **niveau de trafic VL** doit être suffisamment élevé (au moins supérieur à la capacité d'une voie pour une section à trois voies) pour que la présence de PL et leur dépassement entre eux génèrent des perturbations au trafic VL ;
- le **niveau de trafic PL** et **l'hétérogénéité de vitesses entre PL** doivent être suffisamment importants eux aussi pour que la fréquence des dépassements entre PL soit assez élevée ;
- le **différentiel de vitesses entre VL et PL** est également un facteur renforçant l'impact de l'IDPL. La vitesse des PL, lorsqu'elle est faible, renforce la gêne au dépassement. Le niveau de demande pour générer une congestion (niveau de demande en rouge) est plus faible et donc plus souvent atteint. L'IDPL est donc intéressante, en particulier dans les zones de rampes (déclivité positive) où la pente fait ralentir les PL et provoque une augmentation des différentiels de vitesses.

Bibliographie

Buisson Christine, Lesort Jean-Baptiste, *Comprendre le trafic routier*, Éditions du Cerema, 2010.

Chanut Stéphane, *Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic routier hétérogène poids lourds et véhicules légers*, thèse, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

Chevallier Estelle, *Modélisation dynamique du trafic et du bruit au niveau des carrefours giratoires*, thèse, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2008.

Chiabaut Nicolas, *Écoulement du trafic routier et états d'équilibre en congestion*, thèse, université de Lyon, 2009.

Daganzo C.F., *The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory*, Transportation Research Part B : Methodological, 28(4), pages 269-287, 1994

Du Boisberranger Jérémie, Appert-Rolland Cécile, *Relaxation after on-ramps in real data and in cellular automata simulations*, Transportation Research Part C : Emerging Technologies, pages 162-175, 2013

Duret Aurélien, *Hétérogénéités du trafic autoroutier : identification, quantification, modélisation et impact sur l'écoulement*, thèse, université de Lyon, 2010.

Leclercq Ludovic, Chanut Stéphane, Lesort Jean-Baptiste, *Moving Bottlenecks in Lighthill-Whitham-Richards Model: A Unified Theory*, Transportation Research Record, volume 1883, pages 3-13, 2004.

Ma Tingting, Ahn Soyoung, *Comparison of speed-spacing relations under general car-following vs. Lane-changing*, Transportation Research Record, volume 2088, pages 138-147, 2008.

Newell G.F., *A simplified car-following theory: a low-order model*, Transportation Research Part B : Methodological, 36(3), pages 195-205, 2002.

Papageorgiou Markos, Hadj-Salem Habib, Blosseville Jean-Marc, *ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering*, Transportation Research Record, volume 1320, pages 58-64, 1994.

The theory behind traffic flow and dynamic control

This publication summarises current knowledge on the expected effects of dynamic traffic control measures (variable speed limits, ramp metering and overtaking bans for heavy goods vehicles). It is intended primarily for technicians and engineers tasked with assessing how road infrastructure functions, but is equally useful for project owners and road network managers. After first outlining the key principles behind traffic engineering as they apply to control measures, the publication then explores current understanding about the reasons why these measures are effective. This knowledge should help those on the front line take preventive action by adopting innovative operating strategies that work. Moreover, by fostering a better understanding of the mechanisms in play, it should enable them to react to traffic congestion in real time.

Teoría del tráfico y regulación dinámica

Esta obra presenta la síntesis de los conocimientos actuales que conciernen los efectos esperados de las medidas de regulación dinámica del tráfico (límite de velocidad variable, medición de rampas y prohibición de doblar para los camiones). Se dirige principalmente a los técnicos e ingenieros encargados de evaluar el funcionamiento de las infraestructuras viales, pero también a los promotores y gestores. Después de haber introducido los grandes principios de la ingeniería del tráfico que entran en juego en las soluciones de regulación, expone los conocimientos actuales relativos a los mecanismos de eficacia de estas medidas. Estos conocimientos así restituidos permiten actuar en la base de los problemas, aplicando estrategias de explotación innovadoras y pertinentes. También permiten, por una mejor comprensión de los fenómenos, actuar en tiempo real frente a situaciones del tráfico que generan la congestión.

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.

Coordination : Cerema Territoires et ville / service Édition (B. Daval)

Source photo de la couverture : © Laurent Mignaux - Terra

Dépôt légal : août 2018

ISBN : 978-2-37180-275-9

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 « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Théorie du trafic et régulation dynamique

Cet ouvrage présente la synthèse des connaissances actuelles concernant les effets attendus des mesures de régulation dynamique des trafics (régulation des vitesses, régulation des accès et interdiction de doubler pour les poids-lourds). Il s'adresse principalement aux techniciens et ingénieurs chargés d'évaluer le fonctionnement des infrastructures routières, mais aussi aux maîtres d'ouvrage et gestionnaires.

Après avoir introduit les grands principes de l'ingénierie du trafic qui entrent en jeu dans les solutions de régulation, il expose les savoirs actuels relatifs aux mécanismes d'efficacité de ces mesures. Ces connaissances ainsi restituées permettent d'agir en amont des problèmes en mettant en place des stratégies d'exploitation innovantes et pertinentes. Elles permettent également, par une meilleure compréhension des phénomènes, de réagir en temps réel face à des situations de trafic générant de la congestion.

Sur le même thème

Comprendre le trafic routier
2010

Plan de gestion du trafic
dossier 2 : élaboration et utilisation des outils d'aide à la décision
2012

Plan de gestion du trafic
dossier 1 : concepts et organisations
2008

Aménagement et cohésion 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 : 2417-9701

ISBN : 978-2-3780-275-9



9 782371 802759

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Cerema Territoires et ville : 2 rue Antoine charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03 - Tél. +33 (0)4 72 74 58 00

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30