

Régulation dynamique des vitesses

Proposition et test d'un algorithme en temps réel

Aurélien Duret
Sébastien Plantier



**Régulation dynamique
des réseaux de transport**

ERA38 IFSTTAR
Gestion durable des trafics

CEREMA
Direction territoriale Centre-Est
PCI Régulation Dynamique des Réseaux de Transports

Sommaire

Contexte de la régulation dynamique des vitesses.....	3
Saturation des réseaux existants.....	3
Recours à la régulation des vitesses.....	3
Objectif du papier.....	3
Organisation du papier.....	3
Principes fondamentaux.....	5
Le DF d'une section.....	5
Le niveau d'utilisation des voies.....	6
L'effet de la régulation des vitesses.....	7
Proposition d'un algorithme.....	8
Algorithme général de régulation des vitesses.....	8
Les données d'entrée.....	9
Algorithme élémentaire 1 : « Prévention de la congestion ».....	10
Algorithme élémentaire 2 : « Protection d'une queue de bouchon ».....	14
Algorithme élémentaire 3 : « Protection d'un événement ».....	16
Choix de la vitesse finale de régulation.....	16
Harmonisation spatiale des vitesses.....	16
Application sur l'A31, Thionville.....	19
Présentation du site.....	19
Lieux des stations de comptage.....	19
Test sur les données historiques.....	19
Conclusion sur la pertinence de la mesure.....	20
Conclusion.....	22
Principaux résultats.....	22
Limites de l'étude.....	22
Annexe.....	23

Contexte de la régulation dynamique des vitesses

Saturation des réseaux existants

L'usage des réseaux de transports routiers ne cesse de s'accroître en même temps que ralentit le rythme de construction de nouvelles infrastructures. Les exploitants routiers ont donc recours à de nouveaux dispositifs de gestion de trafic afin d'optimiser la capacité des réseaux existants. Dans ce contexte, les mesures de régulation dynamique des vitesses se déploient progressivement en France sur les infrastructures majeures du réseau routier national : principalement les autoroutes et les voies structurantes d'agglomération.

Recours à la régulation des vitesses

La régulation dynamique des vitesses a plusieurs objectifs : optimiser la capacité du réseau routier ; diminuer les quantités de polluants liés au trafic automobile ; et améliorer la sécurité des usagers. Pour que cette mesure soit le plus adaptée aux conditions courantes de circulation, elle repose généralement sur un algorithme qui active et désactive la mesure de régulation en fonction des trafics mesurés en temps réel par les stations de comptage. Cet algorithme est une clé essentielle du succès d'une mesure de régulation dynamique des vitesses. Or, aujourd'hui, il n'existe pas d'algorithme de référence en France et très peu de communication est faite autour des algorithmes existants.

Objectif du papier

L'objectif de ce papier est de présenter un algorithme complet de régulation dynamique des vitesses, visant à la fois :

- à prévenir de l'apparition d'une congestion lorsque le réseau approche de la capacité ;
- à protéger la queue d'un bouchon déjà formé et éviter ainsi les situations de sur-accident.

Organisation du papier

L'algorithme repose sur les fondamentaux de la théorie du trafic et sur notre connaissance actuelle de la régulation dynamique des vitesses sur les caractéristiques de l'écoulement.

Dans un premier temps, les notions essentielles de théorie du trafic sont présentées, ainsi que les effets attendus d'une mesure de régulation dynamique des vitesses. À partir de ces effets attendus, une description détaillée de l'algorithme est proposée. Cette description comprend :

- Les lieux des stations de comptage de référence de l'algorithme ;
- Les données de trafic en entrée de l'algorithme : les débits et/ou les vitesses selon les stations ;
- Les paramètres de l'algorithme : tous ont un sens physique connu (vitesse critique, capacité, etc.) et sont faciles à mesure sur le terrain et donc à caler ;
- Les formules de l'algorithme, qui sont simples et faciles à interpréter ;
- Les vitesses préconisées en sortie de l'algorithme ;

La Direction Interdépartementale des Routes Est (DIR Est) va prochainement mettre en place une mesure de régulation dynamique des vitesses sur l'A31, au niveau de la traversée de Thionville. L'algorithme de régulation dynamique des vitesses, présenté dans ce papier, a été calé et testé sur des jeux de données historiques de trafic de l'A31. Les résultats des tests confirment la pertinence de

Contexte de la régulation dynamique des vitesses (suite)

Organisation du papier (suite)

l'algorithme (activation aux bonnes périodes de la journée), sa robustesse et sa stabilité dans le temps (pas d'activations / désactivations intempestives).
L'algorithme a été proposé à la DIR Est et sera intégré au PC d'exploitation de l'A31 dès l'automne prochain : un retour opérationnel est donc attendu pour le mois de janvier 2014.

Principes fondamentaux

Afin de réguler au mieux la circulation automobile, il s'agit de comprendre finement la manière dont s'écoule le trafic routier d'une part, et de comprendre les mécanismes d'efficacité de la régulation dynamique des vitesses d'autre part. C'est l'objet de cette première partie.

Le DF d'une section

Le diagramme fondamental permet de représenter les états d'équilibres du trafic sur une section routière. Il est divisé en 2 parties, une partie dite fluide et l'autre dite congestionnée. Le maximum de la courbe appelé point critique sépare ces deux régimes. Il est le plus fréquemment représenté le plan débit-concentration qui permet de lire un certain nombre de grandeurs caractéristiques du trafic.

Ces grandeurs sont :

- La vitesse libre, qui correspond à la vitesse qu'aurait le trafic s'il n'y avait aucun obstacle à son écoulement,
- La capacité maximale qui correspond au débit maximal qui peut passer en ce point sans engendrer de congestion,
- La concentration critique qui correspond au nombre de voitures par kilomètre au-delà duquel on bascule en congestion,
- La concentration maximale qui correspond au nombre maximal de véhicules par kilomètre que l'on peut stocker.
- La vitesse critique, qui est la vitesse au point de basculement entre le régime fluide et le régime congestionné. Cette vitesse (km/h) est obtenue en faisant le rapport entre la concentration critique (veh/km) et la capacité maximale (veh/h).

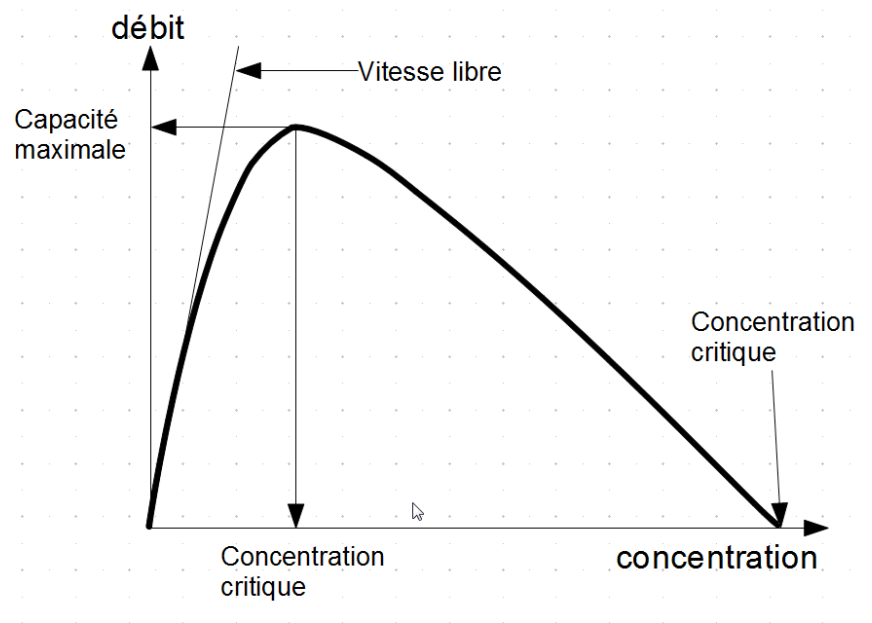


Diagramme fondamental sur une section à plusieurs voies

Principes fondamentaux (suite)

Le DF d'une section (suite)

Les observations empiriques ont montré que cette vision présente un défaut : elle agrège toutes les voies de circulation alors qu'en réalité, le trafic circule parallèlement sur plusieurs voies.

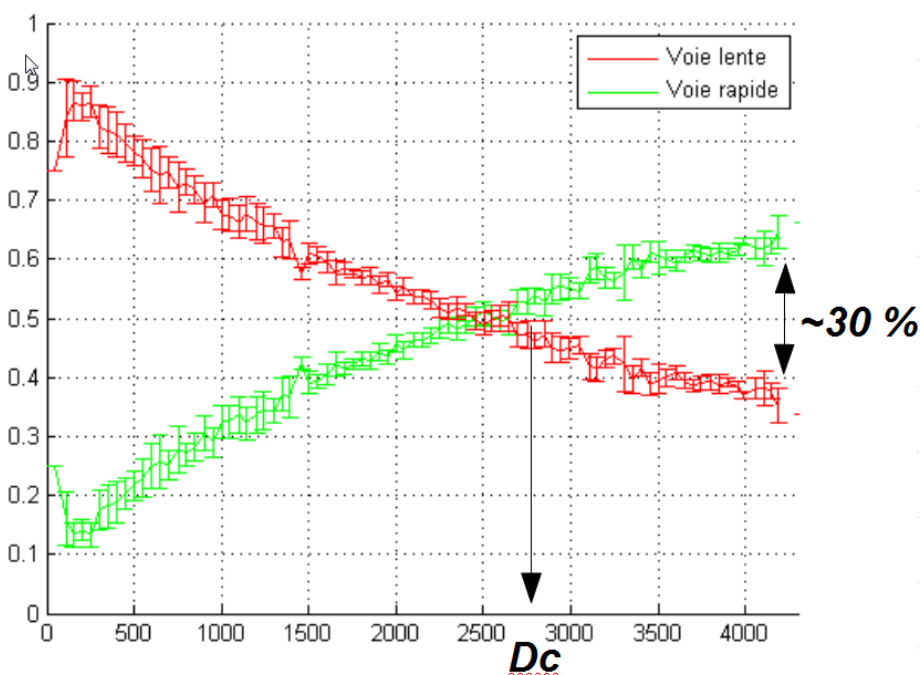
Une autre manière plus exacte d'analyser le fonctionnement de la section est donc d'étudier conjointement les diagrammes fondamentaux de chacune des voies ainsi que les niveaux d'utilisation de chacune des voies.

Le niveau d'utilisation des voies

Pour clarifier le propos, on se repose ici sur une section à deux voies, mais il est possible de le transposer à une section à trois voies.

Sur une section à deux voies, la principale différence entre la voie de gauche et la voie de droite est la vitesse. L'observation nous montre qu'une autre caractéristique différencie ces deux voies de circulation : on observe rarement les mêmes débits qui s'écoulent sur les deux voies. Plus précisément, les voies accueillent un niveau (pourcentage) de débit qui dépend principalement de la demande totale sur la section.

Ce phénomène peut être représenté de manière simplifiée par la figure suivante.



Niveaux d'utilisation des voies sur une section à 2 voies

On constate que pour des demandes de trafic faibles (<1000 veh/h), la majorité des véhicules circule sur la voie lente. À mesure que la demande totale augmente, la voie rapide accueille une proportion de trafic de plus en plus importante. Aux alentours d'une valeur de demande D_c (~2500 veh/h), les deux voies de

Principes fondamentaux (suite)

Le niveau d'utilisation des voies (suite) circulation accueillent une proportion de trafic équivalente. Et pour une demande au-delà de cette valeur, la voie rapide accueille une proportion de trafic plus importante que la voie lente.

Par conséquent, lorsque la demande de trafic est très élevée, la voie rapide accueille une proportion de véhicules plus élevée et elle atteint sa capacité la première (donc avant la voie lente).

Origine de la « chute de capacité » Dès lors que la voie rapide atteint sa capacité, les conditions de circulation se dégradent et les vitesses baissent sur cette voie. L'activité de changement de voie cause une dégradation des conditions de circulation sur la voie lente également, et c'est finalement la section entière qui congestionne.

En résumé, le fait que la voie rapide atteigne sa capacité avant la voie lente induit un « manque à gagner » puisqu'une part de la capacité de la voie lente n'est pas consommée. C'est donc un phénomène de « chute de capacité ».

L'effet de la régulation des vitesses

La régulation des vitesses peut être activée pour améliorer les conditions de circulation en anticipant l'apparition d'une congestion. C'est son **action préventive**. Elle peut également être utilisée pour protéger une queue de bouchon déjà formée sur le réseau, ou protéger un événement (accident, objet sur la voirie, etc.). C'est son **action curative**.

Ces deux actions sont présentées rapidement ici. C'est sur ces principes que repose l'algorithme proposé dans la partie suivante.

Action préventive Des observations empiriques ont montré que la régulation dynamique des vitesses agit en « homogénéisant » les conditions de circulation. Pour être plus précis, lorsque la régulation dynamique des vitesses est activée, les véhicules se répartissent de manière plus équitable entre les deux voies de circulation. Par conséquent, la voie lente est plus utilisée et sa capacité est davantage « consommée ».

En résumé, l'objectif de la régulation des vitesses est donc d'améliorer les conditions de circulation de circulation en augmentant la capacité du réseau lorsque les conditions de trafic deviennent critiques. Étant donné l'effet de cette régulation sur les conditions de circulation, il est pertinent de l'activer dès lors que la voie lente paraît être moins utilisée que la voie rapide.

Action curative Dès lors qu'un incident apparaît sur le réseau (congestion, accident, etc.), il est utile de prévenir les automobilistes en amont pour qu'il adapte leur comportement de conduite en conséquence, et pour éviter les situations de sur-incident. En cas d'incident et en complément des informations données aux usagers sur la nature de l'incident, la régulation dynamique des vitesses peut-être utilisée pour abaisser progressivement la vitesse à l'approche de l'incident et ainsi garantir des conditions de circulation apaisées et sécurisées.

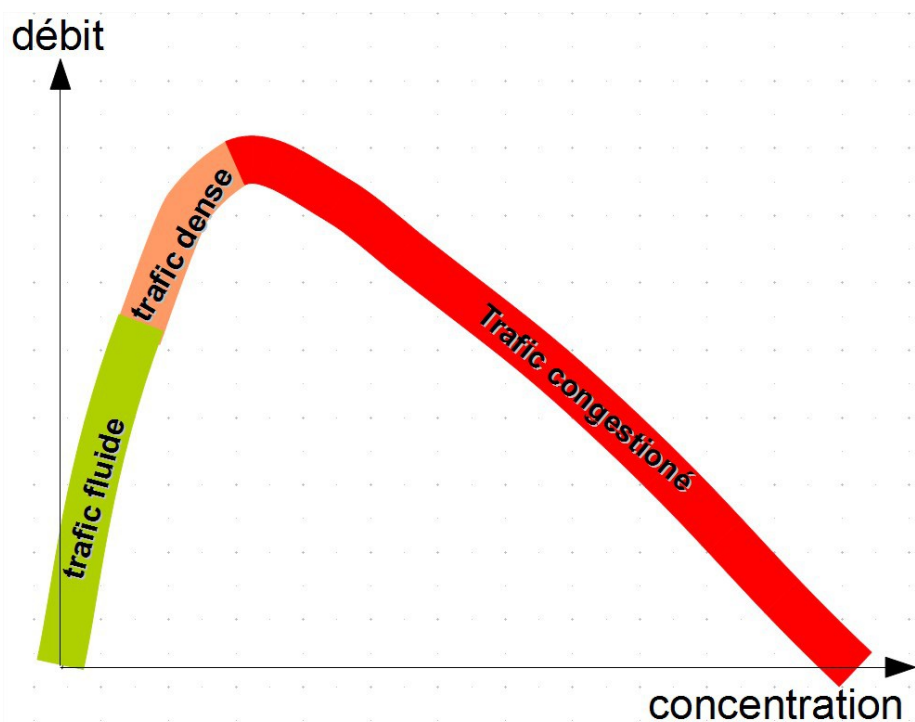
Proposition d'un algorithme

Algorithme général de régulation des vitesses

Dans le cadre de l'évaluation a priori de la régulation des vitesses, des scénarios de régulation ont été testés avec un logiciel de simulation dynamique microscopique. Au cours de ces tests, la régulation dynamique des vitesses s'activait et se désactivait sur les plages horaires prédéfinies. Afin d'optimiser les périodes de régulation, il faut des règles d'activation et de désactivation adaptées **aux conditions de trafic en temps réel**.

Les règles d'activation et de désactivation sont liées à l'objectif de la régulation des vitesses. On peut distinguer **trois objectifs** :

- prévenir l'apparition d'une **congestion** lorsque le trafic est dense, mais encore fluide. On diminue alors la vitesse afin d'optimiser la capacité de la section régulée ;
- protéger la **queue d'un bouchon** lorsque le trafic est congestionné. On diminue alors la vitesse des véhicules en amont du bouchon afin de diminuer le différentiel de vitesse entre les véhicules approchant la queue de bouchon et les véhicules présents dans le bouchon ;
- protéger un **événement** prédéfini par le gestionnaire de trafic. Cette section est généralement le lieu d'un événement non récurrent (accident, travaux temporaires, présence d'objet ou d'animaux). On diminue alors la vitesse afin de sécuriser la section au sein de laquelle l'événement se produit.



Situation de trafic régulée par l'algorithme

Ces trois algorithmes proposent chacun une vitesse de régulation optimale par tronçon. Pour finalement connaître la vitesse de régulation sur chaque tronçon, un **algorithme de choix de vitesse optimale** puis **un algorithme d'harmonisation**

Proposition d'un algorithme (suite)

Algorithme général de régulation des vitesses (suite)

des vitesses est proposé afin de garantir une cohérence des vitesses sur l'ensemble de la zone de régulation.

Ceci est résumé dans la figure suivante.

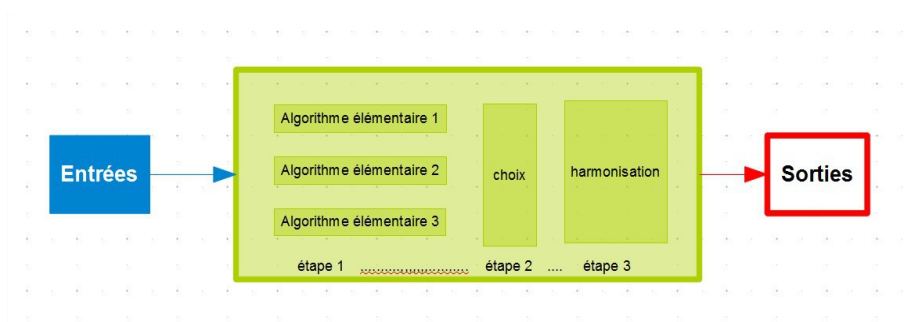


Schéma simplifié de l'algorithme général de régulation dynamique des vitesses

Un schéma plus détaillé est fourni en annexe de ce document.

La section « Les données d'entrée » page 9 liste l'ensemble des paramètres et des variables d'entrée de l'algorithme générale.

Les sections pages 10, 14 et 16 détaillent les règles de calcul des trois algorithmes élémentaires de régulation.

La section «Choix de la vitesse finale de régulation» page 16 détaille l'algorithme de choix de vitesse de régulation de chaque tronçon de régulation.

La section «Harmonisation spatiale des vitesses» page 16 détaille les règles d'harmonisation des vitesses sur l'ensemble d'une zone de régulation.

Les données d'entrée

On distingue trois sources de données d'entrée pour l'algorithme général.

Données « stations de comptage »

Ce sont les données dynamiques de trafic, remontées en temps réel depuis les stations de comptage de la zone de régulation. Pour chaque station de comptage, les données remontées sont :

- les mesures de débits et de vitesses ;
- agrégées par sens (toutes voies) ;
- agrégées par périodes de 6 minutes.

Ces informations sont actualisées toutes les six minutes. Par souci de cohérence entre les données d'entrée du module de régulation et les algorithmes du module, nous préconisons une fréquence d'actualisation de l'algorithme de six minutes également. Néanmoins, cette valeur par défaut devra être modifiable par l'exploitant.

Données « événements »

Ce sont les informations en temps réel relatives aux événements repérés par l'opérateur de trafic et qui nécessitent un abaissement de vitesse sur un ou plusieurs tronçons de la zone de régulation. Ces informations sont :

- le sens de circulation concerné par l'événement ;

Proposition d'un algorithme (suite)

Les données d'entrée (suite)

- le PR de l'événement ;
- la vitesse prescrite par le gestionnaire de trafic au droit de l'événement.

Données « Tronçons » Ce sont des données statiques (paramètres) contenant les informations des tronçons de la zone de régulation. Ces données sont définies hors ligne avant l'implémentation de la régulation des vitesses. Ces données pourront évoluer en fonction de l'évolution de la politique d'exploitation définie par la DIR Est (modification des paramètres de régulation, ajout de tronçon à réguler, etc.).

Ils incluent :

- n° du tronçon (chaque tronçon est numéroté de 1 à n dans le sens croissant des PR),
- le PR de début de tronçon,
- le PR de fin de tronçon,
- n° du tronçon amont,
- n° du tronçon aval,
- capteur de référence n°1, qui servira à l'algorithme élémentaire n°1,
- capteur de référence n°2, qui servira à l'algorithme élémentaire n°2,
- D_c , débit de croisement du tronçon au-delà duquel la voie lente est moins utilisée que la voie rapide ;
- C_x , capacité maximale observée sur le tronçon ;
- V_c , la vitesse critique en deçà de laquelle le tronçon est congestionné.

À partir des données d'entrée, **trois algorithmes élémentaires** vont calculer parallèlement les vitesses préconisées pour chaque tronçon, afin :

- de prévenir de l'apparition de la congestion ;
- de protéger la queue d'un bouchon déjà formé sur le réseau et détecté par les boucles ;
- de protéger un événement présent sur le réseau et renseigné par le gestionnaire de trafic.

Algorithme élémentaire 1 : « Prévention de la congestion »

L'objectif est de prévenir l'apparition de la congestion en optimisant la capacité des tronçons régulés.

Les diagnostics des tronçons de régulation ont montré que sur un tronçon i , lorsque le débit de demande D_i devient supérieur à un débit de croisement

D_{c_i} (à caler en fonction des niveaux d'utilisation des voies), la voie lente devient moins utilisée que la voie rapide et n'est donc pas utilisée au maximum de sa capacité. Des expériences antérieures ont montré que la préconisation d'une vitesse inférieure à la vitesse réglementaire peut permettre de contrecarrer ce phénomène.

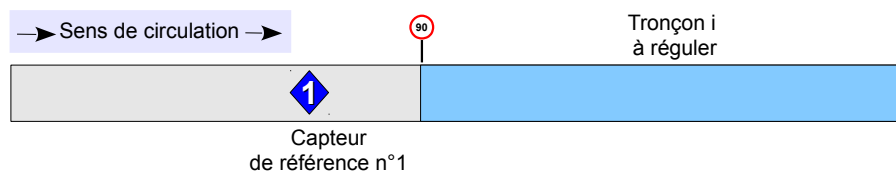
Proposition d'un algorithme (suite)

Algorithme élémentaire 1 : « Prévention de la congestion » (suite)

C'est sur ce principe que repose ici la condition d'activation de la mesure de régulation des vitesses sur le tronçon i .

Principes Cet algorithme s'applique à chaque tronçon i .

Chaque tronçon dispose d'un capteur de référence en amont (capteur numéro 1 du tronçon i) sur lequel on mesure la demande qui va se présenter sur le tronçon. Ce capteur est noté $Capteur_i^1$.



Positionnement du capteur de référence n°1

Données d'entrée Pour le tronçon i , les données d'entrées sont :

- $Capteur_i^1$, c'est le nom du capteur de référence n°1 du tronçon i , situé en amont du tronçon.
- D_i^1 , c'est la demande mesurée sur le $Capteur_i^1$ au pas de temps t , exprimée en véhicule par heure.
- $V_i^1(t)$, c'est la vitesse mesurée sur le $Capteur_i^1$ au pas de temps t , exprimée en kilomètre par heure.
- Dc_i , c'est le débit de croisement du tronçon i au-delà duquel la voie lente est sous-utilisée, exprimé en véhicule par heure.
- Cx_i , c'est la capacité observée sur le tronçon i , exprimée en véhicule par heure.
- Vc_i , c'est la vitesse critique du tronçon i en deçà de laquelle le tronçon est congestionné, exprimée en kilomètre par heure.

Calculs Non-activation

À chaque pas de temps t ,

si la demande $D_i^1(t)$ est inférieure au débit de croisement et la vitesse

$V_i^1(t)$ est supérieure à la vitesse critique Vc_i ,

alors on ne régule pas, car la situation est fluide et la demande de trafic est faible, le risque de basculer en congestion est donc inexistant.

Proposition d'un algorithme (suite)

Algorithme élémentaire 1 : « Prévention de la congestion » (suite)

	Langage	formulation mathématique
<i>Si</i>	La demande $D_i^1(t)$ est inférieure au débit de croisement Dc_i	$D_i^1(t) < Dc_i$
<i>Et si</i>	La vitesse $V_i^1(t)$ est supérieure à la vitesse critique Vc_i	$V_i^1(t) > Vc_i$
<i>Alors</i>	la vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire.	$V_i^{precl}(t) = V_i^{reglementaire}$

Activation avec diminution de 20km/h

À chaque pas de temps t ,

si, la demande $D_i^1(t)$ est supérieure au débit de croisement Dc_i du tronçon i

et si, la demande $D_i^1(t)$ est inférieure à $0,9 \cdot Cx_i$ du tronçon i

et si, la vitesse $V_i^1(t)$ est supérieure à Vc_i du tronçon i

alors la vitesse préconisée à t sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire diminuée de 20 km/h.

	Langage	formulation mathématique
<i>Si</i>	La demande $D_i^1(t)$ est supérieure au débit de croisement Dc_i	$D_i^1(t) > Dc_i$
<i>Et si</i>	La demande $D_i^1(t)$ est inférieure à la capacité Cx_i	$D_i^1(t) < 0,9 \cdot Cx_i$
<i>Et si</i>	La vitesse $V_i^1(t)$ est supérieure à la vitesse critique Vc_i	$V_i^1(t) > Vc_i$
<i>Alors</i>	la vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire diminuée de 20 km/h.	$V_i^{precl}(t) = V_i^{reglementaire} - 20 \text{ km/h}$

Proposition d'un algorithme (suite)

Algorithme élémentaire 1 : « Prévention de la congestion » (suite)

Diminution de 30km/h (optionnelle¹)

Si la demande D_i^1 est supérieure à 90% de la capacité Cx_i du tronçon i ,
alors la vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire diminuée de 30 km/h.

	Langage	formulation mathématique
<i>Si</i>	La demande D_i^1 est supérieure à 90 % de la capacité observée Cx_i	$D_i^1(t) > 0,9 \cdot Cx_i$
<i>Et si</i>	La vitesse $V_i^1(t)$ est supérieure à la vitesse critique Vc_i	$V_i^1(t) > Vc_i$
<i>Alors</i>	la vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire diminuée de 30 km/h.	$V_i^{precl}(t) = V_i^{reglementaire} - 30 \text{ km/h}$

Désactivation de la régulation

Si la demande $D_i^1(t)$ est inférieure au débit de croisement Dc_i du tronçon i sur les K^2 dernières périodes de 6 minutes,
et si la vitesse $V_i^1(t)$ est supérieure à Vc_i sur les trois dernières périodes de 6 minutes,
alors la régulation des vitesses devient inactive sur le tronçon i .

	Langage	formulation mathématique
<i>Si</i>	La demande $D_i^1(t)$ est inférieure au débit de croisement Dc_i sur les trois dernières périodes de 6 minutes,	$D_i^1(t) < Dc_i$
<i>Et si</i>	La vitesse $V_i^1(t)$ est supérieure à la vitesse critique Vc_i sur les trois dernières périodes de 6 minutes,	$V_i^1(t) > Vc_i$
<i>Alors</i>	la vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire.	$V_i^{precl}(t) = V_i^{reglementaire}$

- 1 Ici, nous présentons les conditions pour une diminution de vitesse de 30 km/h. Cette baisse importante peut être mal perçue par les usagers, raison pour laquelle nous la présentons comme une option.
- 2 K est donc un paramètre du module de régulation et nous préconisons $K=3$ comme valeur par défaut (testé sur des données réelles).

Algorithme élémentaire 2 : « Protection d'une queue de bouchon »

Principes

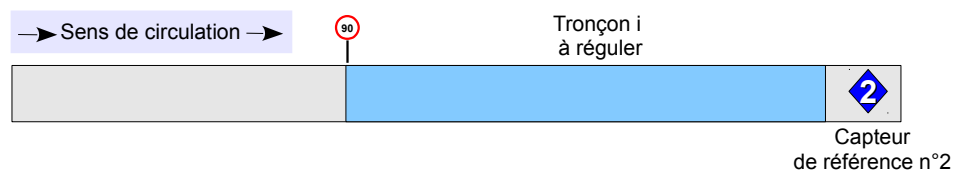
L'objectif est de diminuer progressivement les vitesses des véhicules arrivant sur la queue d'un bouchon déjà formé sur le réseau.

Pour chaque tronçon i , la première étape consiste à détecter automatiquement la présence d'un bouchon en aval du tronçon.

Cet algorithme s'applique à chaque tronçon i .

Chaque tronçon dispose d'un capteur de référence en aval (capteur numéro 2 du tronçon i) sur lequel on mesure l'état de trafic en aval du tronçon de régulation.

Ce capteur est noté $Capteur_i^2$.



Positionnement du capteur de référence n°2

L'algorithme de régulation adapte la vitesse du tronçon i à la vitesse mesurée en aval du tronçon par le capteur $Capteur_i^2$.

On considère qu'il y a la présence d'un bouchon (ralentissement) en aval du tronçon i si la vitesse mesurée par le capteur $Capteur_i^2$ est inférieure à la vitesse critique vitesse V_{c_i} du tronçon i .

À chaque pas de temps t , on mesure donc la vitesse $V_i^2(t)$ sur un capteur immédiatement en aval du tronçon i . Si la vitesse $V_i^2(t)$ est inférieure à la vitesse critique V_{c_i} , on réduit la vitesse préconisée du tronçon i à l'instant t à la vitesse juste supérieure parmi 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h.

Données d'entrée

Pour le tronçon i , les données d'entrées sont :

- $Capteur_i^2$, c'est le nom du capteur de référence n° 2 du tronçon i , situé en aval du tronçon. Ce capteur mesure les conditions de trafic en aval du tronçon.
- $V_i^2(t)$, c'est la vitesse mesurée par le capteur $Capteur_i^2$, exprimée en kilomètres par heure.
- V_{c_i} , c'est la vitesse critique du tronçon i en deçà de laquelle le tronçon est congestionné, exprimée en kilomètres par heure.
- L , c'est la liste des vitesses de régulation possibles.

Calculs

Non-activation de la régulation

Au pas de temps t ,

Si la vitesse $V_i^2(t)$ est supérieure à la vitesse critique V_{c_i} du tronçon i , alors on ne régule pas, car aucune congestion n'est détectée en aval du tronçon.

Activation de la régulation : diminution de la vitesse

Au pas de temps t ,

Si la vitesse $V_i^2(t)$ est inférieure à la vitesse critique V_{c_i} du tronçon i ,

Proposition d'un algorithme (suite)

Algorithme élémentaire 2 : « Protection d'une queue de bouchon » (suite)

alors la vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse immédiatement supérieure à celle du bouchon parmi les vitesses suivantes : 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h.

Ces conditions se traduisent simplement dans le tableau suivant :

	Langage	formulation mathématique
<i>Si</i>	la vitesse $V_i^2(t)$ mesurée en aval du tronçon i est inférieure à la vitesse critique V_{c_i} .	$V_i^2(t) < V_{c_i}$
<i>Alors</i>	on réduit la vitesse préconisée du tronçon i à la vitesse immédiatement supérieure à celle du bouchon parmi la liste L des vitesses de régulation possible. Par défaut, cette liste de vitesse est [70 km/h, 90 km/h]. Elle est un paramètre du module et l'exploitant doit pouvoir la modifier/compléter par la suite.	$V_i^{prec2}(t) = 70\text{km/h ou } 90\text{km/h}$

Retour à la normale

On considère qu'il n'y a plus de bouchon en aval du tronçon i si la vitesse moyenne $V_i^2(t)$ pratiquée par les véhicules en aval du tronçon i est supérieure à la vitesse critique V_{c_i} . Dans ce cas, la vitesse préconisée devient égale à la vitesse réglementaire de la section.

	Langage	formulation mathématique
<i>Et si</i>	La vitesse $V_i^2(t)$ est supérieure à la vitesse critique V_{c_i} .	$V_i^2(t) > V_{c_i}$
<i>Alors</i>	La vitesse préconisée sur le tronçon i est égale à la vitesse réglementaire.	$V_i^{precl}(t) = V_i^{reglementaire}$

Les capteurs de référence 2 de chaque tronçon ainsi que les valeurs des vitesses critiques sont résumés en annexe 4 du rapport.

Pour cet algorithme élémentaire, les valeurs des paramètres d'entrée de chaque tronçon ont été calées au cours de la phase de diagnostic, puis ajustées au cours de tests sur les données historiques. Elles sont disponibles en annexe 4 du rapport.

Algorithme élémentaire 3 : « Protection d'un événement »

L'objectif est de diminuer progressivement les vitesses des véhicules arrivant sur événement présent sur le réseau et nécessitant une baisse de vitesse sur un événement.

Principes Afin de « protéger » un événement déjà présent dans un tronçon et éviter les situations accidentogènes, l'algorithme réduit la vitesse du tronçon. Cet algorithme repose sur un principe analogue à l'algorithme « protection de queue de bouchon » (régulation des vitesses en amont de l'événement).

Données d'entrée Les informations relatives à l'événement sont directement renseignées par l'opérateur de trafic dans le module de RDV :

- $Sens$: le sens du lieu de l'événement (ex : sens 1) ;
- PR : le PR du lieu l'événement (ex : PR 332+660) ;
- V^{even} : la vitesse préconisée par l'opérateur sur le lieu de l'événement (ex : 50km/h) ;
- la nature de l'événement (peut être renseignée par ailleurs dans la main courante).

Calculs L'algorithme se déroule alors en 2 étapes :

étape 1 : **identification du tronçon de l'événement**

Étape 2 : **calcul de la vitesse préconisée sur le tronçon n (dernier tronçon)**

Cette vitesse $V_i^{prec3}(t)$ est la vitesse juste supérieure à V^{even} parmi les vitesses suivantes : 50km/h, 70km/h, 90km/h (et 110km/h sur le tronçon limité à 110km/h).

Choix de la vitesse finale de régulation

Les trois algorithmes élémentaires aboutissent à trois vitesses potentielles de régulation par tronçon. Un algorithme d'harmonisation spatiale est proposé afin d'arbitrer entre ces trois vitesses : c'est la vitesse la plus contraignante qui l'emporte.

La vitesse de régulation optimale $V_i^{opt}(t)$ est définie pour chaque tronçon i à l'instant t comme le minimum des vitesses de régulation préconisées par chacun des algorithmes élémentaires.

$$V_i^{opt}(t) = \min(V_i^{prec1}(t), V_i^{prec2}(t), V_i^{prec3}(t))$$

Harmonisation spatiale des vitesses

La neuvième partie de l'IISR³ préconise « Les vitesses maximales autorisées sur la section à réguler peuvent être réduites temporairement par paliers de 10 km/h ou de 20 km/h. Le palier de dégressivité ne doit pas être supérieur à 20 km/h sur deux panneaux successifs ou, dans le temps, sur un même panneau. ». Lorsque la vitesse de régulation de chaque tronçon a été choisie, l'étape d'harmonisation spatiale corrige la vitesse de chaque tronçon afin de respecter cette préconisation, en évitant une baisse de vitesse supérieure à 20 km/h.

Les objectifs sous-jacents à cette étape sont d'assurer :

- la sécurité et la lisibilité de l'itinéraire

3 Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière (9ème partie, Article 178, section B), arrêté du 6 décembre 2011 (annexe 3) modifiant l'arrêté du 24 novembre 1967 relatif à la signalisation des routes et autoroutes.

Proposition d'un algorithme (suite)

Harmonisation spatiale des vitesses (suite)

- l'acceptabilité de la mesure de régulation
- la transparence des consignes de vitesses pour le gestionnaire de trafic (cause → conséquence).

De l'aval vers l'amont

Dans un premier temps, l'algorithme balaye les tronçons de la section de régulation, de l'aval vers l'amont.

- On commence par le dernier tronçon (tronçon n) auquel on applique la vitesse de régulation préconisée (\leq vitesse réglementaire) :

$$V_n = V_n^{opt} .$$

- On poursuit par le tronçon n-1 pour lequel le différentiel de vitesse avec le tronçon n ne doit pas dépasser 20 km/h :

$$V_{n-1} = \min(V_{n-1}^{opt}, V_n + 20\text{km/h})$$

- ...

- On termine par le premier tronçon :

$$V_1 = \min(V_1^{opt}, V_2 + 20\text{km/h})$$

De l'amont vers l'aval

Dans un second temps, l'algorithme de régulation balaye les tronçons de la section de régulation, de l'amont vers l'aval.

- Pour le premier tronçon, l'algorithme vérifie que le différentiel de vitesse entre la vitesse réglementaire et la vitesse de régulation du premier tronçon (tronçon 1) est inférieur à 20 km/h. Si ce n'est pas le cas, on a :

$$V_1 = \max(V_1^{opt}; V_{reglem} - 20\text{km/h}) .$$

- On poursuit par le tronçon n pour lequel le différentiel de vitesse avec le tronçon n-1 ne doit pas dépasser 20 km/h :

$$V_n = \max(V_n^{opt}, V_{n-1} - 20\text{km/h})$$

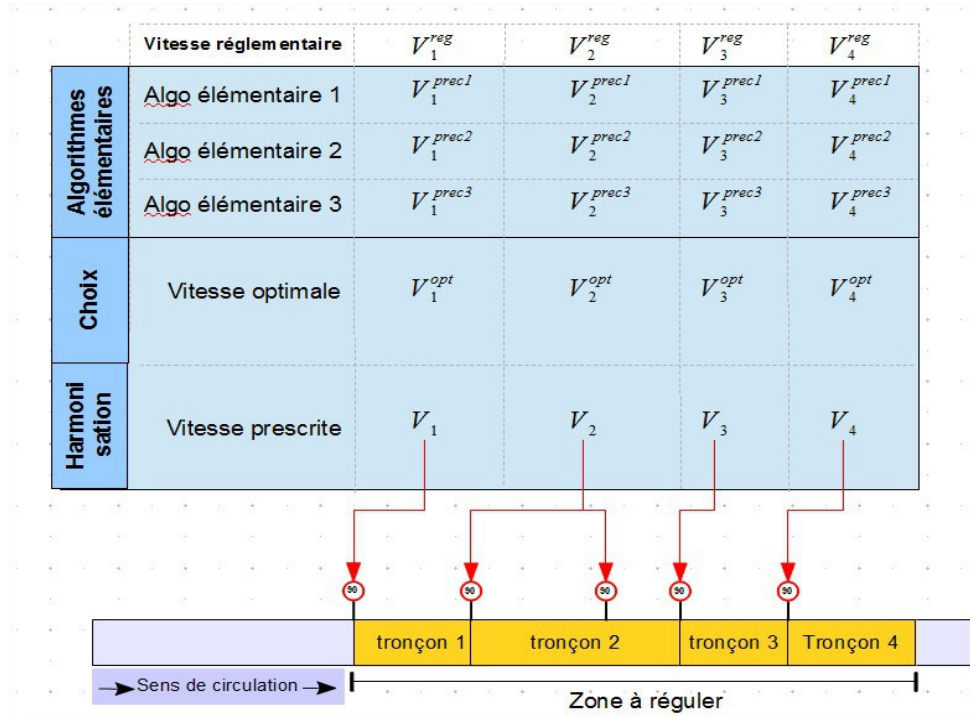
- ...

On termine par le dernier tronçon :

$$V_1 = \min(V_1^{opt}, V_2 + 20\text{km/h})$$

Proposition d'un algorithme (suite)

Harmonisation spatiale des vitesses (suite)



Processus de mise en cohérence des vitesses de régulation sur plusieurs tronçons successifs

Application sur l'A31, Thionville

Présentation du site La section à réguler est située entre Richemont et Thionville, dans les deux sens de circulation. Par souci de concision dans ce papier, nous présentons la démarche de travail et les principaux résultats uniquement pour le sens en direction de Thionville, et sur un seul tronçon.

Lieux des stations de comptage Ce tronçon de 4,5 km est composé de deux voies de circulation. Il comporte deux échangeurs (37,1 et 37,2) présentant chacun une entrée et une sortie. Plusieurs stations de comptage sont réparties le long du tronçon. Une station en amont du tronçon (R7), 4 stations au sein du tronçon (R6, R5, R4, R3) et une station en aval du tronçon (R2).

Test sur les données historiques À partir de l'ensemble de ces stations, un premier travail a consisté à caler les paramètres de l'algorithme de régulation des vitesses, paramètres qui conditionnent les périodes d'activation et de désactivation de la mesure de régulation dynamique. Pour rappel, ces paramètres peuvent être facilement estimés à partir de données de comptage classiques, de débit et de vitesse, voie par voie, agrégées par période de une ou six minutes.

Cette étape de calage a permis d'estimer :

- le débit de croisement Q_c à 2700 veh/h
- la capacité C_x de la section à 3700 veh/h
- la vitesse critique V_c à 75 km/h.

Cette étape a permis également de définir R5 comme la station de référence de l'algorithme 1 et R2 comme la station de référence de l'algorithme 2.

L'algorithme calé a été appliqué à 7 jours de données de trafic (entre le 19 mars 2013 et le 28 mars 2013) en excluant les jours de week-end. Les résultats sont résumés dans la table suivante.

	Algorithme 1 - préventif			Algorithme 2 – curatif		
	Activation	Désactivation	consigne	Activation	Désactivation	consigne
19/03/13	16h12	18h48	-20 km/h			
20/03/13	16h06	19h30	-20 km/h	12h12	14h36	-20 km/h
21/03/13	16h12	19h36	-20 km/h			
25/03/13	16h12	19h30	-20 km/h			
27/03/13	16h12	19h18	-20 km/h			
28/03/13	16h00	19h48	-20 km/h			

Conclusion sur la pertinence de la mesure

On constate que l'algorithme active automatiquement la régulation des vitesses tous les soirs de semaine à partir de 16h. D'un jour à l'autre, l'heure d'activation de la régulation est très régulière (entre 16h et 16h12). Cela correspond à une demande de déplacement, pendulaire et régulière, au début de la période de fin de travail. Sur cette période d'activation, la consigne est systématiquement limitée à -20km/h. L'heure de désactivation de la mesure de régulation est bien plus variable d'un jour à l'autre, comprise entre 18h48 et 19h48. Cela s'explique simplement par l'allure de la demande de trafic sur le tronçon, bien moins régulièrement en fin de période de pointe. Au final, on conclut que la régulation « préventive » s'active correctement pendant la période de pointe du soir, en fonction des conditions courantes de trafic, avec une consigne de diminution de vitesse de 20 km/h.

Dans les jeux de données disponibles, un événement de congestion en aval du tronçon était présent le 20 mars 2013. La comparaison des résultats de l'algorithme de régulation (activation entre 12h12 et 14h36) est cohérente avec la main courante d'exploitation. En effet, la main courante signale un trafic légèrement perturbé à partir de 11h, et une congestion sévère à partir de 12h16. À cette heure, les vitesses passent en dessous de 30km/h. L'extrait de la main courante indique plusieurs événements successifs sur cette partie du réseau, avec d'abord un chantier sur ouvrage à partir de 11h, puis des états de trafic dégradés à partir de 12h16 et enfin un accident matériel entre 14h et 15h30.

Historique des événements

Nom	Description	Date de début	Date de fin
AUT - 28/03/2013 13:50:51	Autre Obstacle sur chaussée - A31 (+) PR 322,000 - 28/03/2013 13:50	28/03/2013 13:50	28/03/2013 14:00
AUT - 28/03/2013 13:23:32	Autre Obstacle sur chaussée - A31 (+) PR 328,000 - 28/03/2013 13:23	28/03/2013 13:23	28/03/2013 14:00
CHA - 27/03/2013 21:29:22	Chantier Labo - A31 (-) PR 324,600 - 27/03/2013 21:29	27/03/2013 21:29	28/03/2013 05:20
CHA - 25/03/2013 20:43:47	Chantier Glissières (réparation d'urgence) - A31 (+) PR 326,000 - 25/03/2013 20:43	25/03/2013 20:43	26/03/2013 02:42
CHA - 21/03/2013 13:32:59	Chantier Enrobés - A31 (+) PR 325,000 - 21/03/2013 13:32	21/03/2013 13:32	23/03/2013 05:57
CHA - 21/03/2013 09:08:34	Chantier Enrobés - A31 (+) PR 324,000 - 21/03/2013 09:08	21/03/2013 09:08	23/03/2013 05:57
ACC - 20/03/2013 13:59:56	Accident Matériel - A31 (-) PR 320,900 - 20/03/2013 13:59	20/03/2013 13:59	20/03/2013 15:23
BOU - 20/03/2013 12:16:35	Etat de trafic - A31 (-) PR 326,000 - 20/03/2013 12:16	20/03/2013 12:16	20/03/2013 15:23
CHA - 20/03/2013 11:03:53	Chantier OA - A31 (-) PR 323,600 - 20/03/2013 11:03	20/03/2013 11:03	20/03/2013 15:22

Extrait de la main courante

En appliquant l'algorithme de protection de queue de bouchon, nous obtenons les résultats suivants :

- activation de la régulation dynamique des vitesses à 12h12 avec une consigne de 90km/h.
- désactivation de la régulation dynamique des vitesses à 14h42

Cette période d'activation est parfaitement conforme à la chronologie des événements renseignés dans la main courante :

- début de chantier à 11h03 : l'algorithme active la régulation des vitesses une heure après le début du chantier, temps nécessaire pour la formation de la congestion et sa remontée jusqu'au capteur 2. Les vitesses mesurées oscillent alors autour de 20 km/h.
- Fin de chantier à 15h22 : l'algorithme désactive la régulation 40 minutes avant la fin de chantier. Cela s'explique par le fait que l'accident est situé en aval du tronçon. En effet l'accident a lieu au PR 320 dans le sens nord-sud (PR décroissant) alors même que le tronçon 11 se finit au PR 323+670. Il semble logique que 20 minutes avant la fin complète d'événement, le tronçon situé 3 km en amont de l'accident ne soit plus impacté. Au besoin, il est envisageable

de poursuivre la mesure de régulation dynamique des vitesses par l'activation de l'algorithme 3 (événement renseigné par un opérateur).

Toutes ces consignes semblent donc très cohérentes avec l'objectif de régulation dynamique des vitesses en vue de la protection des queues de bouchon, et confirment la pertinence des critères d'activation et de désactivation.

Conclusion

Le papier propose un algorithme de régulation dynamique des vitesses, se déclenchant en fonction des conditions courantes du trafic. Les algorithmes sont élaborés sur la base de l'expérience du PCI RDRT et ses connaissances théoriques et empiriques des écoulements de trafic dont la vitesse est régulée.

Principaux résultats

L'algorithme complet permet d'anticiper l'apparition d'une congestion lorsque le réseau est très chargé ; de protéger la queue d'un bouchon en diminuant progressivement les vitesses en amont ; et de protéger tout autre événement détecté par l'exploitant.

Les algorithmes ont été testés sur des données de trafic récentes (7 jours de semaine). On montre que l'algorithme complet est stable sur ces données et qu'il ne s'active pas de manière intempestive. Il se déclenche pendant les périodes de trafic chargées des jours de semaine, le matin uniquement dans le sens 1 et le soir uniquement dans le sens 2. L'algorithme se déclenche correctement sur un incident détecté en aval du tronçon le 20 mars 2013.

Limites de l'étude

Dans ce papier, un algorithme d'harmonisation des vitesses est proposé afin de lisser celles-ci entre les tronçons successifs d'une zone de régulation. L'algorithme d'harmonisation n'a pas pu être testé sur les données historiques, car les zones de régulation actuellement définies ne sont composées que d'un seul tronçon.

Si l'algorithme complet semble stable et pertinent, idéalement, il aurait fallu le tester sur des données représentatives de l'ensemble des situations que la DIR Est souhaite réguler. Les délais de l'étude et la qualité des données de trafic ne l'ont pas permis. Nous préconisons donc l'utilisation du module de régulation des vitesses en mode « semi-automatique » sur chaque situation nouvelle rencontrée par l'exploitant.

Annexe

