



HAL
open science

MESures et SIMulation pour une GEstion Optimisée des systèmes de transports

Christine Buisson, Anne-Laure Badin, Aurélie Bousquet, Nicolas Ditchi, Aurélien Duret, Etienne Hans, Virginie Lasserre, Wilhemine Lecointre, Delphine Lejri

► To cite this version:

Christine Buisson, Anne-Laure Badin, Aurélie Bousquet, Nicolas Ditchi, Aurélien Duret, et al.. MESures et SIMulation pour une GEstion Optimisée des systèmes de transports. [Rapport de recherche] Ifsttar, Cerema. 2019. hal-02377147

HAL Id: hal-02377147

<https://hal.science/hal-02377147>

Submitted on 23 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport de synthèse de l'opération de recherche MESSIGEO

MESures et Simulation
pour une GEstion Optimisée des systèmes de transports

Version finale

Novembre 2019

Rédactrice principale :

Christine Buisson^(a)

Principaux contributeurs :

Anne-Laure Badin^(b.1)

Aurélie Bousquet^(b.1, b.2)

Nicolas Ditchi^(b.3, b.4)

Aurélien Duret^(a)

Etienne Hans^(b.1)

Virginie Lasserre^(b.1)

Wilhemine Lecointre^(b.1, b.4)

Delphine Lejri^(b.1, a)

(a) : Licit (Ifsttar – Cosys / Entpe) ;

(b) : Cerema : b.1 : Centre Est ; b.2 : Territoires et Villes ; b.3 : Méditerranée ; b.4 : Ouest.



Remerciements

Outre les principaux contributeurs mentionnés sur la couverture, de nombreuses personnes ont, à différents moments de ce projet, encouragé, soutenu ou contribué, directement ou indirectement, aux réalisations qui sont présentées dans ce rapport. Qu'elles en soient remerciées. Par ordre alphabétique : Frédéric Aliaga, Olivier Ancelet, Céline Ardin, Cecile Bécarie, Sylvain Belloche, Arthur Burianne, Arnaud Can, Luc Charansonney, Frédérique Chaze, Simon Cohen, Thomas Courbon, Valentine Cruesel, Christophe Damas, Anne-Christine Demanny, Vincent Demeules, Nour Eddin El Faouzi, Catherine Gabaude, Marie-Line Gallenne, Ophélie Guyard, Ludovic Leclercq, Joel Lelong, Bruno Levilly, Philippe Mansuy, Frédéric Murard, Clément Morin, Bernard Nativel, Lionel Prévors.

Résumé

Les enjeux que cette collaboration a permis de traiter sont liés à la raréfaction des ressources permettant de construire des nouvelles infrastructures de transports et à la montée de la prise en compte des impacts environnementaux des mobilités. Ceci génère un réel besoin, de la part des gestionnaires de réseaux de transports, d'outils et de méthodes leur permettant de maîtriser la croissance de la demande de déplacements tout en diminuant les impacts de ces déplacements.

Sur ces sujets, l'articulation des recherches conduites à l'IFSTTAR et de l'expertise que possède le CEREMA a donné lieu à une recherche intégrative qui a contribué à élargir les horizons de chacun des deux partenaires.

Les principaux résultats de Messigéo, présentés dans ce rapport final, concernent :

- Amélioration de la compréhension de la propagation des flux dans le système de transport ;
- Quantification des impacts du fonctionnement du système de transports en termes de temps de parcours et d'accessibilité, tout comme sur les niveaux de polluants ;
- Proposition de nouveaux outils de modélisation et de simulation, utilisables dans plus de cas (car ils sont de temps de calcul faible et qu'ils intègrent les effets des régulations) ;
- Consolidation des méthodologies d'évaluation des régulations des autoroutes périurbaines.

Outre une synthèse de ces résultats, ce rapport contient également la liste des publications, les productions les plus significatives, les présentations faites au cours du séminaire de restitution, et des pistes de recherche future.

Abstract

The stakes that were targeted by this collaboration are linked to the rarefaction of resources used to build new transportation infrastructures and to the higher attention paid to the environmental impacts of mobilities. Indeed, transportation network managers have a real need for tools and methods to master the increase of movement demand while reducing the impacts of these moves.

On these topics, the research done in the Ifsttar allied to the expertise of the Cerema gave birth to a form of integrative research that contributed to broaden the horizons of both partners.

The main results of this collaboration are presented in this final report. They comprise:

- Better understanding of flows propagation inside the transportation system;
- Quantification tools for assessing the impacts of this flow in terms of travel time and accessibility as well as pollutants levels;
- Offer of new simulation and modelling tools, that can be used in more situations; (because their calculation time is smaller and they include the effects of regulations);
- Strengthening of the methodologies to assess the regulation of suburban motorways.

In addition to the presentation of those results, the report includes a list of the productions of the collaboration, the most significant productions, the presentations made during the final seminar and directions for future research.

Table des matières

Table des matières.....	3
Résumé des principaux résultats obtenus.....	5
Structuration initiale du travail : les quatre axes	5
Travail concernant l'utilisation des données.....	6
Analyse des effets des régulations	6
Analyse conjointe des données de pollution et de trafic	7
Pour mémoire : analyse des expérimentations avec des véhicules connectés.....	8
Travail concernant le développement de plateformes	8
Simulation dynamique mésoscopique de trafic sur autoroute	8
Plateforme de calcul de temps de parcours multimodal Tempus.....	9
Travail sur la mise en relation des outils d'émissions	
et des outils de simulation dynamique du trafic	10
Conclusions sur les travaux conduits dans le cadre de Messigéo	12
Annexes	13
Liste des documents produits dans le cadre de Messigéo	15
Articles dans des revues internationales.....	15
Communications orales avec acte dans un congrès international.....	15
Articles dans des revues françaises	15
Communications orales avec acte dans un congrès national.....	15
Communications orales sans acte	16
Autres ouvrages ; rapports	17
Programme du séminaire de restitution Messigéo 26 mars 2019	19
Synthèse des débats lors des ateliers du séminaire de restitution Olas – Mésigéo.....	21
1 ^{er} atelier : gestion des déplacements et transports intelligents	21
2 ^{ème} atelier : Nouveaux véhicules et infrastructures : Quels rôles pour les gestionnaires ?	21
3 ^{ème} atelier : nouveaux véhicules et infrastructures : quelles implications	
pour la sécurité routière ?	22
4 ^{ème} atelier : modélisation et simulation	24
5 ^{ème} atelier : information des usagers, consommation, pollution, bruit	25
Directions de recherches face aux bouleversements du système de transports.....	27
Un système de mobilité centré sur les besoins de l'utilisateur :.....	27
La fin des émissions et des accidents	28
Une consommation minimale d'espace, de temps, d'énergie et de coût pour les transports	28
Présentations faites lors du séminaire du 26 mars 2019	29
Sélection de quatre articles produits dans le cadre de Messigéo.....	113

Résumé des principaux résultats obtenus

L'action de recherche Messigéo, conjointe entre le Cerema et l'Ifsttar, commencée en 2015, a couvert plusieurs thématiques dans un objectif commun d'amélioration du système de transports : en faciliter l'usage, en maîtriser les impacts sur la pollution et les temps de parcours par une optimisation de son fonctionnement et le développement d'outils d'évaluation *a priori* et *a posteriori*.

Le travail conduit se caractérise par une volonté forte de mettre les outils développés à disposition d'une large communauté d'utilisateurs. La méthode de diffusion utilisée est adaptée au public visé, et des documentations complètes ont été élaborées pour les accompagner. En plus des outils développés, un grand nombre de rapports a été produit sur ces sujets. Une liste complète des documents produits dans le cadre de Messigéo est disponible en annexe.

Ces travaux, et notamment le développement des outils d'évaluation, ont été possibles grâce à la proximité créée par ce partenariat entre le milieu de l'expertise, proche de l'opérationnel, et celui de la recherche. L'implication de l'Ifsttar et notamment du Licit, a permis d'amener dans les réflexions de l'opération les avancées récentes de la recherche en modélisation et caractérisation du trafic au niveau international. Le Cerema a, de son côté, utilisé son réseau et profité des études auprès des maîtres d'ouvrage pour alimenter les réflexions méthodologiques de Messigéo avec des données et des cas d'études.

L'action de recherche a été historiquement structurée en quatre axes. Le rapport rappelle rapidement ces axes, puis présente de manière synthétique le travail conduit au cours des quatre années du programme. Il distingue d'une part l'analyse des données pour caractériser les impacts du trafic et des stratégies de gestion des déplacements, d'autre part les travaux portant sur les plateformes informatiques.

Structuration initiale du travail : les quatre axes

Le travail a été initialement organisé en quatre axes :

- Axe 1 : Modélisation et simulation dynamique pour la gestion des trafics

Le travail dans cet axe a analysé des observations empiriques pour comprendre les phénomènes de chute de capacité au niveau des convergents et quantifier les effets des régulations des accès. Il a également consisté à développer une plateforme de simulation mésoscopique au temps de calcul réduit, mais de bonne précision. Cette plate-forme intègre des modèles prédictifs d'impact de dispositifs de régulation des vitesses, des accès, et de voies réservées au covoiturage.

- Axe 2 : Optimisation multimodale des flux et des déplacements

Les travaux réalisés dans le cadre de cet axe ont permis d'améliorer les méthodes de calcul d'itinéraires appliquées au système de transport. Ceci a pu être appliqué à des calculs d'accessibilité pour différents modes de déplacements et pour différentes échelles territoriales (locale ou nationale).

- Axe 3 : Caractérisation dynamique des émissions et exposition des populations

Le travail dans cet axe a participé au développement de la chaîne de modélisation trafics / émissions / propagation-dispersion / exposition, dans le but d'alimenter les études sur les impacts sur la santé. En outre, des méthodes d'analyse de données de pollution en lien avec les mesures de trafic ont été développées.

- Axe 4 : Modélisation et simulation des systèmes coopératifs pour la gestion du trafic

Cet axe avait pour ambition d'évaluer les impacts des systèmes coopératifs sur le trafic, d'analyser en simulation le dimensionnement optimal du déploiement de véhicules coopératifs, et d'appliquer les outils proposés à un cas réel de déploiement de systèmes coopératifs.

Le Cerema devait se charger de la préparation des données et du calcul d'indicateurs permettant d'améliorer la calibration des modèles de simulation dynamique en tenant compte des informations transmises par des systèmes coopératifs (C-ITS) et des véhicules déployés dans le cadre de projets. Le cahier des charges de l'ORSI évoquait à ce titre les projets de pré-déploiement C-ITS Scoop@F et Compass4D. Pour ce dernier projet, les données des véhicules se sont révélées inadaptées au projet Messigéo tant en quantité qu'en qualité.

Travail concernant l'utilisation des données

Analyse des effets des régulations

En mettant à profit le fait que plusieurs actions de régulation dynamique de réseaux autoroutiers périurbains français aient été déployées pendant la durée du projet Messigéo, des analyses de données ont été conduites et présentées à de multiples reprises par les différentes équipes impliquées.

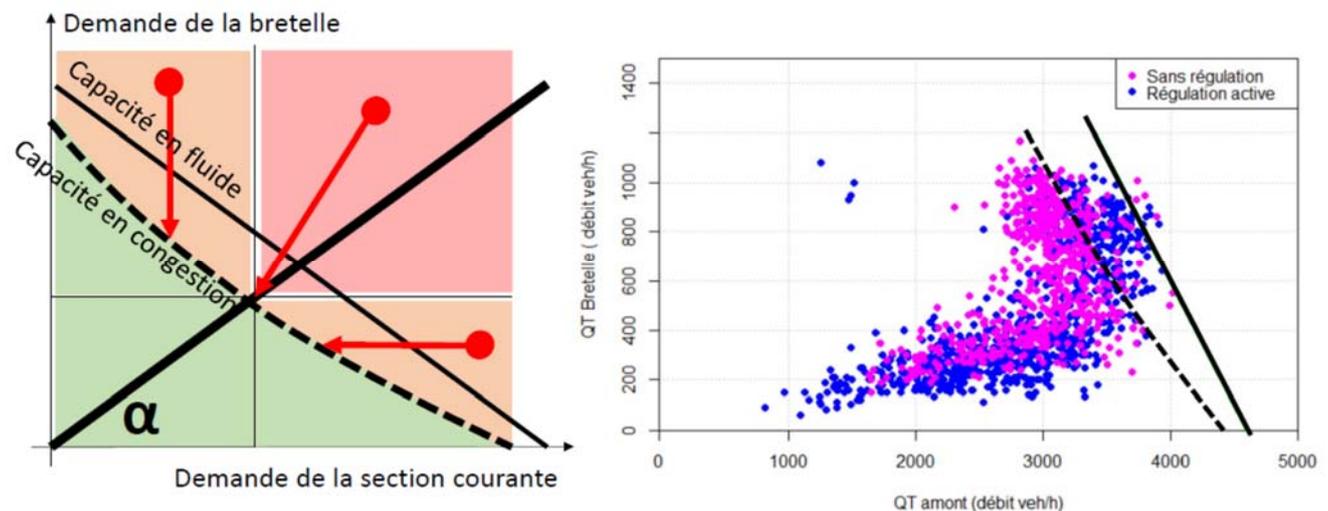


Figure 1 : principes et illustration du fonctionnement d'un convergent. On distingue deux régimes. Le premier est le régime fluide pour lequel la demande totale est inférieure à la capacité. Sur le schéma de gauche, ceci est matérialisé par ligne droite continue correspondant à la « capacité en fluide ». Le second régime est congestionné. Lorsque la congestion est installée, la capacité est réduite (« capacité en congestion »). La figure de droite est obtenue à partir de mesures en aval du convergent de Saint Herblain, sur le périphérique nantais. Chaque point correspond à un débit mesuré pendant une période de 6 minutes, l'abscisse correspond au débit sur le périphérique, l'ordonnée au débit mesuré sur la bretelle.

Ceci a permis plusieurs types d'avancées :

- Mise en regard de la théorie du trafic et des données recueillies sur le terrain. La figure ci-dessus en montre une illustration avec à gauche un schéma de principe issu des travaux de Carlos Daganzo¹ sur le fonctionnement des convergents et, à droite, une figure produite dans le cadre du projet. On constate à droite une accumulation de points en périodes non régulées (points roses) au voisinage de la capacité réduite par la congestion (ligne pointillée). En période régulée, au contraire, plus de points sont associés à un fonctionnement à capacité (la ligne continue noire correspond à une valeur de 4 600 veh/h ce qui est la valeur de la capacité sur cette zone du périphérique nantais). Ceci explique l'efficacité de la régulation d'accès.
- Utilisation de procédures d'évaluation des bénéfices de la régulation d'accès. Ces travaux sur l'évaluation ont été conduits depuis de nombreuses années (plus de 10 ans). La mise en place de la régulation d'accès à Grenoble, grâce à une grande quantité et qualité des mesures de temps de parcours a permis de mettre en œuvre les préconisations issues de ces travaux. On a pu ainsi montrer que les périodes de pointe du matin (6h-10h) de 2018 régulées permettent l'écoulement d'un débit plus élevé et une diminution du temps de parcours total.

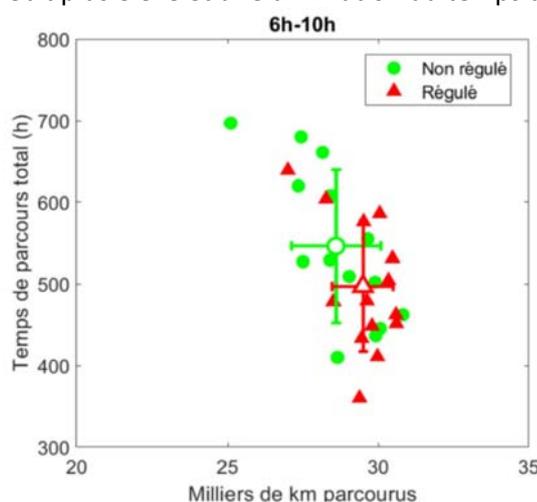


Figure 2 : comparaison de 16 périodes de pointe du matin régulées (triangles rouges) et de 14 périodes non régulées (ronds verts) de janvier à avril 2018.

Analyse conjointe des données de pollution et de trafic

La pollution subie par les riverains des autoroutes périurbaines a de nombreuses causes (pollution d'origine automobile, bien sûr, mais aussi pollution de fond, causée par les activités industrielles, le chauffage urbain, les activités agricoles, ...). La part liée au trafic automobile est prépondérante au voisinage de ces infrastructures. Les conséquences sanitaires de la pollution sont très graves avec plusieurs dizaines de milliers de morts annuellement en France.

Il est donc important de mieux modéliser la chaîne complexe qui, à partir du flux automobile, caractérisé par un débit et une vitesse moyenne (éventuellement par une accélération si on veut / peut descendre au niveau du véhicule), détermine un niveau d'émission. Ces émissions, compte tenu des conditions météorologiques (vent, pluie, température, ensoleillement) seront diffusées dans l'atmosphère, ce qui conduira à la quantité de polluant par m³ d'air.

¹ C.F. Daganzo *The cell transmission model, Part II: Network traffic*. Transportation Research Part B, 29 (2) (1995), pp. 79-93.

Cette concentration sera mesurée par les capteurs disposés par les Associations de Surveillance de la Qualité de l’Air (ASQA). La modélisation de cette chaîne est entachée d’erreurs à chaque étape. On verra dans la seconde partie comment le travail conduit dans le cadre de Messigéo a contribué à mieux interfacer les modèles préexistants pour chaque chaînon de cette chaîne de modélisation.

Notre travail sur les données avait pour but de tester l’hypothèse que l’on puisse relier les variables de débit et de vitesse d’une autoroute (mesurés par les boucles électromagnétiques, des capteurs très largement disponibles) aux niveaux de concentrations mesurées par les ASQA. Il apparaît sur notre première tentative (à Lyon, sur le boulevard périphérique), que le bruit de fond est tel que l’effet de la vitesse est difficile à identifier au-delà du constat que les vitesses moyennes de 100 km/h sont associées à des concentrations plus élevées. Cependant, la méthode a été stabilisée et est maintenant disponible sur une plateforme de partage de code² et nous avons, au cours de 2019, déployé cette méthode à plus grande échelle sur tous les sites où ces données sont conjointement disponibles.

Pour mémoire : analyse des expérimentations avec des véhicules connectés

Notre ambition initiale était d’utiliser les travaux conduits par le Cerema Sud-Ouest dans le cadre du projet scoop pour améliorer le paramétrage et valider le modèle développé au Licit. En effet, la question de l’interaction entre plusieurs véhicules connectés au sein d’un flux est une question importante et, faute de données, les modèles se basent sur des estimations. Compte tenu du faible nombre de véhicules déployés il ne nous a pas été possible de conduire cette partie du projet et de recueil de données à son terme.

Travail concernant le développement de plateformes

Simulation dynamique mésoscopique de trafic sur autoroute

La simulation dynamique est un outil très puissant d’estimation *a priori* des impacts des régulations. En permettant d’en anticiper les bénéfices, elle permet de mieux convaincre les donneurs d’ordre et ainsi contribue à l’amélioration des conditions de déplacement des usagers et à la diminution des nuisances.

Voici quelques caractéristiques des outils disponibles sur le marché :

- Pour ceux qui sont basés sur un calcul individualisé des trajectoires des véhicules (outils dits microscopiques), le réalisme du rendu aide à la conviction. Cependant, la quantité de données nécessaires en entrée et le temps de calcul rendent l’utilisation opérationnelle de ces outils difficile. Notons de plus qu’ils sont accessibles dans le cas de licences, qui peuvent être coûteuses.
- Ceci n’est pas le cas pour les outils dynamiques de simulation macroscopique pour lesquels les temps de calculs sont plus faibles. Cependant, l’absence d’individualisation de traitement des véhicules rend difficile la reproduction des effets des régulations.

Il apparaît donc nécessaire de disposer d’outils d’échelle intermédiaire, où les véhicules sont traités individuellement, mais où leurs seules variables calculées sont les dates d’entrée et de sortie de chaque tronçon. Ces outils sont appelés mésoscopiques.

Sur la base de développements initiés au Licit et poursuivis au Cerema Centre Est (Département Mobilité), la plateforme mésoscopique Stream est maintenant disponible et stabilisée. Elle est utilisée dans plusieurs centres du Cerema gratuitement.

² Valentine Creusel, Septembre 2018, https://github.com/valine6/Combined_traffic_pollution_study.

Dans le cadre de Messigéo, plusieurs développements ont permis de lui intégrer les résultats d'analyse de données sur les effets des régulations. La figure suivante présente les résultats obtenus pour les autoroutes autour de Strasbourg pour la situation actuelle.

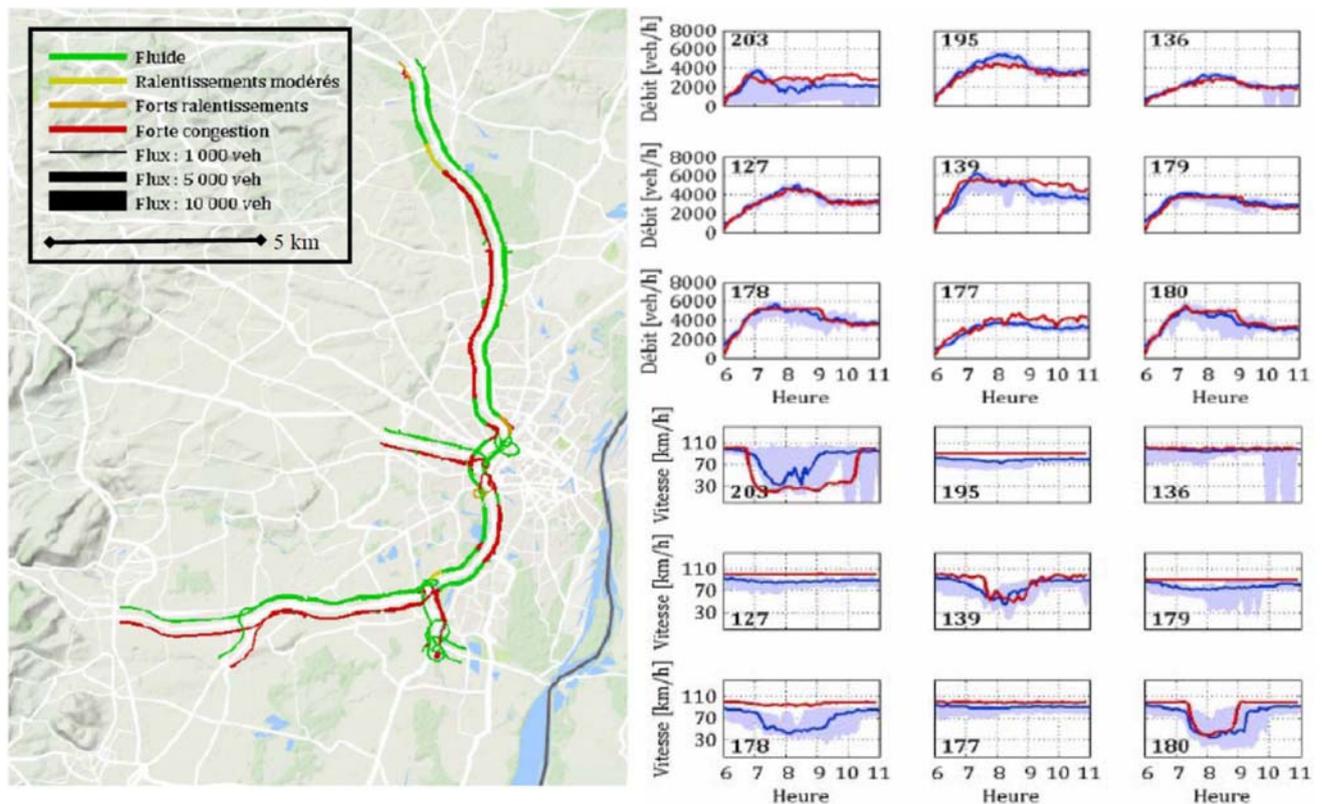


Figure 3 : Simulation avec la plateforme Stream de la situation actuelle. A gauche, représentation cartographique des états de trafic simulés ; à droite observations sur neuf boucles. Le trait rouge représente les valeurs simulées pour la situation moyenne, le trait bleu les valeurs moyennes observées et la bande bleu clair représente l'enveloppe de toutes les situations observées. En haut sont présentés les débits, en bas les vitesses.

Plateforme de calcul de temps de parcours multimodal Tempus

Le développement de cette plateforme s'est appuyé sur les développements qui avaient été conduits au Licit depuis la fin des années 2000 dans le cadre de plusieurs doctorats (A. Bousquet, R. Billot, R. Delhome). Cette plateforme Tempus avait été proposée en open source suite à des développements de la société Oslandia.

L'idée d'origine était de proposer un outil capable de proposer un calcul de temps de parcours multimodal, qui chaîne différentes parties monomodales d'itinéraires et différents itinéraires conduits pendant différents moments de la journée en utilisant potentiellement la totalité des modes urbains. Les algorithmes d'optimisation d'itinéraires de Tempus ont donc été conçus dès le départ pour intégrer les informations de temps de parcours des transports collectifs (tous les types de transports publics urbains et interurbains), des véhicules motorisés et du vélo – y compris les voitures ou vélos en libre-service – ainsi que de la marche.

Dans le cadre de Messigéo, l'objectif était de valoriser ce travail en permettant de l'appliquer plus facilement et à plus de cas d'utilisation, en particulier à la question de l'accessibilité des différents points d'un espace urbain grâce aux différents modes de transports. Deux applications ont été mises en œuvre. La première a pour but de qualifier la desserte du territoire national par le réseau ferroviaire au travers du calcul d'indicateurs sur l'offre de transport dont certains utilisent un calcul d'itinéraire (temps de parcours, nombre

de dessertes directes ou avec correspondances, etc.). La seconde a pour but de calculer des isochrones multimodales depuis différents points d'un réseau urbain et a été déployée sur les données de l'Île-de-France, en particulier pour évaluer la qualité de desserte du territoire francilien par les transports collectifs. C'est ce qu'illustre la figure suivante.

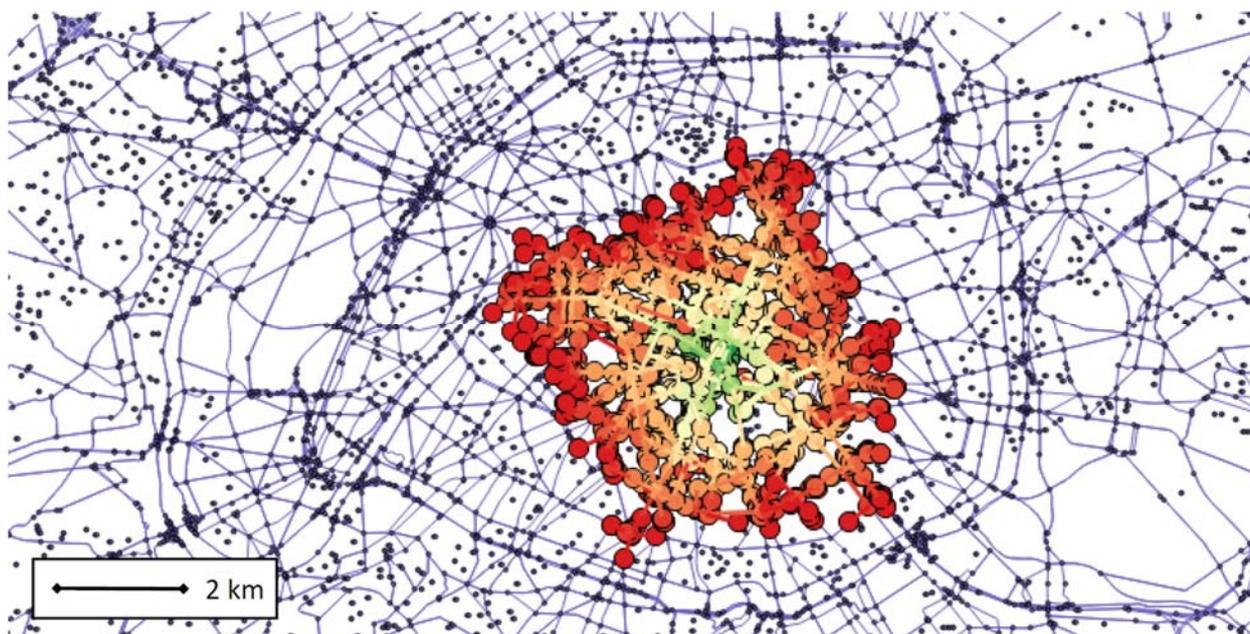


Figure 4 : isochrones des déplacements en transports collectifs par rapport à la station Saint Michel pour les déplacements dans Paris intra-muros. (source : Tempus Cerema³, A. Bousquet).

Travail sur la mise en relation des outils d'émissions et des outils de simulation dynamique du trafic

Nous avons vu page 7 l'importance d'une meilleure maîtrise de la chaîne de modélisation de trafic, des émissions qu'il génère et de la dispersion de ces polluants dans l'atmosphère. Or, le trafic peut être modélisé à différentes échelles, comme nous venons de le voir. De plus, plusieurs outils de modélisation des émissions coexistent, adaptés à ces différentes échelles de représentation du trafic.

Il a donc été décidé par le Licit, il y a plusieurs années, dans le cadre du projet COERT-P financé par l'Ademe, de développer une plateforme permettant un couplage entre modèle de trafic et d'émission et baptisée Traps (pour "Traffic Related Air Pollution Simulator"). Des données issues de simulations microscopiques du trafic routier (que ce soit les trajectoires des véhicules dans l'espace-temps ou des données agrégées du type de celles produites par les boucles électromagnétiques) alimentent de manière flexible plusieurs modèles d'émission parmi les plus connus et utilisés : Copert (y compris sa nouvelle version : Copert5), Phem et HBEFA.

Le travail conduit dans le cadre de Messigéo (sur financement Cerema) a permis de continuer sur cette base. Premièrement, la plateforme Traps permet maintenant d'exploiter les résultats de simulation mésoscopique (issus de la plateforme Stream que nous venons d'évoquer). L'intégration des différentes catégories de vignettes Crit'Air est également réalisée.

³ Accessible ici : [https://github.com/CEREMA/territoires-ville.TempusAccess/wiki/\(Fr\)-Exemples-de-rendus-cartographiques](https://github.com/CEREMA/territoires-ville.TempusAccess/wiki/(Fr)-Exemples-de-rendus-cartographiques)

Surtout, différents types d'agrégation des résultats sont maintenant possibles que ce soit par type de véhicule, par segment (voir un exemple sur la figure suivante) ou encore à l'échelle d'une zone de la ville.



Figure 5 : carte des émissions liées au trafic, à l'échelle du segment. (Source : Traps, Cerema-Licit, D. Lejri, A. Buriante).

Une présentation de l'outil à un premier groupe d'utilisateurs a été menée fin 2018. Ceci sera étendu à l'avenir avec des formations des utilisateurs des différents centres du Cerema.

Conclusions sur les travaux conduits dans le cadre de Messigéo

L'ensemble des travaux conduits a donc permis :

- D'améliorer la compréhension du système de transport,
- De quantifier ses impacts en termes de temps de parcours et d'accessibilité, tout comme sur les niveaux de polluants,
- De proposer des nouveaux outils de modélisation et de simulation, utilisables dans plus de cas (car ils sont de temps de calcul faible et qu'ils intègrent les effets des régulations),
- Enfin, de consolider les méthodologies d'évaluation des régulations des autoroutes péri-urbaines.

Le travail technique n'est pas fini et sera poursuivi sur deux points au moins :

- Déploiement de la méthode de confrontation des données de trafic et des données de pollution, pour tenter de mettre en évidence l'effet de la vitesse moyenne et de la proportion de poids lourd sur les niveaux de polluants ;
- Poursuite des collaborations autour des méthodes de modélisation et de régulation des systèmes autoroutiers :
 - Participation régulière aux journées « simulation dynamique des déplacements » (D Lejri et Ch Buisson ont participé à la journée organisée en octobre 2019 par le Cerema SO, la journée 2020 sera organisée par Cerema TV et le LICIT à Marne la Vallée)
 - Evaluation de la régulation d'accès à Grenoble avec en cours un article en revue internationale à comité de lecture (Transportation research Part C).

Au-delà de ce travail sur des sujets spécifiques, les échanges entre les deux établissements sur les questions de trafic routier et de déplacements sont nombreux (participation du Cerema à l'enseignement piloté par le Licit, échanges et co-encadrement d'étudiants de l'ENTPE ou autre, réponses conjointes à des demandes de la DGITM ou de la MARRN, etc...). Cependant, lors de la journée de restitution, il a été convenu entre les participants que ces collaborations doivent à l'avenir prendre une forme plus souple que par le passé.

On trouvera en annexe la liste des productions, du côté du Cerema, comme du côté de l'Ifsttar. Certaines présentations ou articles sont en outre annexés au rapport. On trouvera également le programme du séminaire de restitution et les présentations.

En parallèle à ces travaux et concomitamment, l'auteur de ses lignes a pu participer à un groupe européen qui a produit ce qui en jargon de Bruxelles est dénommé "position paper". Ce type de rapport est destiné à inspirer la communauté européenne lors du lancement d'appels à projets de recherches. En présenter une synthèse traduite, en cette période où l'émergence de nouvelles mobilités et de nouveaux véhicules doit nous orienter collectivement vers de nouvelles recherches, nous a semblé utile dans le cadre de ce rapport. Cette traduction est donc également proposée en annexe.

Annexes

1. Liste des documents produits dans le cadre de Messigéo
2. Programme du séminaire de transfert organisé à la Défense le 26 mars 2019
3. Conclusions des discussions lors de ce séminaire sur les pistes de recherche futures sur les sujets de gestion et d'évaluation et de simulation des déplacements
4. Directions de recherches face aux bouleversements du système de transports (inspirés par un "position paper" d'Ectri)
5. Présentations faites lors du séminaire du 26 mars 2019
6. Sélection de quatre articles produits dans le cadre de Messigéo
 1. Badin, Anne-Laure, Clavel, Aurore, Vittoz, Thérèse, Sorand, Carine, Lejri, Delphine, Leclercq, Ludovic, Olny, Xavier. 2017. Combining microscopic traffic modelling and three pollutant emission modellings to assess modifications of traffic supply and demand. *Journal Earth Science and Geotechnical Engineering*, vol. 7, pages 175–190.
 2. Ditchi, Nicolas, Courbon, Thomas. 2016. Improve highway ramp metering modelling with real data. Présenté à 11th ITS European Congress, juin, Glasgow, UK.
 3. Buisson, Christine, Nativel, Bernard, Lejri, Delphine, Badin, Anne-Laure, 2018, Effets du trafic routier sur la pollution au dioxyde d'azote : vers la mise en évidence de l'impact de la vitesse moyenne à partir de données collectées sur le périphérique de Lyon pendant 30 mois, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.
 4. Aliaga, Frédéric, Buisson, Christine, Mansuy, Philippe, Coutard, Philippe, Creusel, Valentine. 2018. Evaluation de la régulation de cinq accès de la rocade de Grenoble, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.

Liste des documents produits dans le cadre de Messigéo

Synthèse numérique : un article dans une revue et une communication avec actes à l'international ; une vingtaine de présentations orales dont neuf avec actes et 9 documents internes ou rapports. Une publication dans une revue internationale est en outre en cours de préparation.

Nota : les documents indiqués **en gras** sont annexés à ce rapport, car ils ont été jugés particulièrement illustratifs.

Articles dans des revues internationales

(Badin et al, 2017) **Badin, Anne-Laure, Clavel, Aurore, Vittoz, Thérèse, Sorand, Carine, Lejri, Delphine, Leclercq, Ludovic, Olny, Xavier. 2017. Combining microscopic traffic modelling and three pollutant emission modellings to assess modifications of traffic supply and demand. Journal Earth Science and Geotechnical Engineering, vol. 7, pages 175–190.**

(Buisson, Aliaga, 2020) Buisson, Christine, Aliaga, Frédéric. 2020. Assessment of ramp metering in Grenoble. *To be submitted* to Transportation Research Part C, EN PREPARATION.

Communications orales avec acte dans un congrès international

(Ditchi, Courbon, 2017) **Ditchi, Nicolas, Courbon, Thomas. 2016. Improve highway ramp metering modelling with real data. Présenté à 11th ITS European Congress, juin, Glasgow, UK.**

Articles dans des revues françaises

(Buisson et al, 2019) Buisson, Christine, Charansonney, Luc, Creusel, Valentine. 2019. Ce que la data change à l'exploitation routière, TEC Transport environnement circulation, 240, Janvier-Mars, pages 50-51.

Communications orales avec acte dans un congrès national

(Buisson, Guyard, 2017) Buisson, Christine, Guyard, Ophélie. 2017. Indicateurs de congestion, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.

(Courbon, Hans, 2017) Courbon, Thomas, Hans, Etienne. 2017. Valorisation des bases de données trafic pour la prévision de la congestion. Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.

(Troubetzky, Hans, 2017) Troubetzky, Sylvain, Hans, Etienne. 2017. Mise en place d'une régulation des vitesses sur la rocade Est de Lyon. Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.

(Buisson et al, 2018) **Buisson, Christine, Nativel, Bernard, Lejri, Delphine, Badin, Anne-Laure. 2018. Effets du trafic routier sur la pollution au dioxyde d'azote : vers la mise en évidence de l'impact de la vitesse moyenne à partir de données collectées sur le périphérique de Lyon pendant 30 mois, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.**

(Hans et al, 2018) Hans, Etienne, Courbon, Thomas, Lopez, Clélia. 2018. Caractérisation automatique des motifs de congestion à partir de données boucles sur des réseaux périurbains. Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.

- (Hans, 2018) Hans, Etienne. 2018. Simulation mésoscopique sur de larges réseaux périurbains. Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.
- (Ancelet, Hans, 2018) Ancelet, Olivier, Hans, Etienne. 2018. Évaluation du fonctionnement des entrecroisements sur voies structurantes d'agglomération. Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.
- (Lopez et al, 2018) Lopez, Clélia, Hans, Etienne, Courbon, Thomas. 2018. Caractérisation automatique des motifs de congestion à partir de données boucles sur des réseaux périurbains. 1ères Rencontres Francophones Transport Mobilité, juin, Vaulx-en-Velin, France.
- (Buisson et al, 2019) Buisson, Christine, Charansonney, Luc, Creusel, Valentine. 2019. Mutations de l'exploitation routière induites par la nouvelle industrie de la donnée routière Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.
- (Aliaga et al, 2019) Aliaga, Frédéric, Buisson, Christine, Mansuy, Philippe, Coutard, Philippe, Creusel, Valentine. 2018. Evaluation de la régulation de cinq accès de la rocade de Grenoble, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.**

Communications orales sans acte

- (Bousquet, Billot, 2014) Bousquet, Aurélie, Billot, Romain. 2014. Plateforme TEMPUS pour le calcul d'itinéraires - Architecture et algorithmes. Présenté à FOSS4G, mai.
- (Badin, Lejri, 2016) Badin, Anne-Laure, Lejri, Delphine. 2016. Axe 3 : Caractérisation dynamique des émissions et exposition des populations - Présentation lors du séminaire Messigéo, septembre.
- (Bousquet, 2017) Bousquet, Aurélie. 2017. GTFS Analyst - Outil cartographique de connaissance de l'offre de transport collectif, Présentation au groupe de travail données d'offre de transport, mai.
- (Hans, Laharotte, 2017) Hans, Etienne, Laharotte, Pierre-Antoine. 2017. Données GPS et voyageurs pour la régulation des lignes de bus. Journée « Nouveaux recueils de données de mobilité et usages », COTITA, mars, Bron, France.
- (Mansuy et al., 2017) Mansuy, Philippe, Jacquet, Denis, Buisson, Christine. 2017. Mise en œuvre de Régulation d'accès sur la rocade sud de Grenoble, Congrès ATEC-ITS, 23 - 24 janvier, Montrouge, France.
- (Bousquet, Jaillet, 2018) Bousquet, Aurélie, Jaillet, Alexis. 2018. TempusAccess : Un logiciel d'analyse de l'offre de transport et de calcul d'accessibilité - Principes de développement, fonctionnalités et applications sur l'open-data de la SNCF et du STIF. Présenté aux Journées Transports Déplacements du Cerema, juin, Nantes, France.
- (Ditchi, 2018) Ditchi, Nicolas. 2018. Régulation des accès sur Toulon et utilisation des données dans Aimsum. Présenté aux Journées Transports Déplacements du Cerema, juin, Nantes, France.
- (Bousquet, 2018) Bousquet, Aurélie. 2018. Tempus : Plateforme de calcul d'itinéraires dans un réseau de transport - Un projet logiciel open-source cofinancé par l'Ifsttar, le Cerema et Oslandia. Présenté au groupe de travail Données d'offre de transport, janvier.
- (Hans, 2019) Hans, Etienne. 2019. Méthode d'évaluation des trafics sur voies réservées : Théorie et évaluation. Journée « Quelles évolutions dans la méthodologie de conception des projets routiers », COTITA, janvier, Bron, France.

Autres ouvrages ; rapports

- (Badin, Lejri, 2016) Badin, Anne-Laure, Lejri, Delphine. 2015. Compte rendu du séminaire Messigeo des 12 et 13 octobre 2015, non publié.
- (Chauvin, 2016) Chauvin, Louis. 2016. Transfert de développements concernant des outils de modélisation des émissions de polluants atmosphériques par le trafic routier - Travail de fin d'études, 64 pages, Cerema et ENTPE, juin.
- (Clavel, 2016) Clavel, Aurore. 2016. Développement d'outil de modélisation couplé entre trafic routier et émissions de polluants - Stage de mise en situation professionnelle, 127 pages, Cerema et ENTPE, août.
- (Ditchi, 2017) Ditchi, Nicolas. 2017. ORSI MESSIGEO : Axe 1 Modélisation et simulation dynamique pour la gestion des trafics - Régulation dynamique coordonnée des accès autoroutiers à Toulon, 22 pages, Cerema, février.
- (Badin, 2018) Badin, Anne-Laure. 2018, TRAPS Exemple de traitement dans TRAPS de données issues d'un modèle de trafic statique (TRANSCAD), 19 pages, Cerema, octobre.
- (Bousquet, Caubel, 2018) Bousquet, Aurélie, Caubel, David. 2015. Mesurer l'accessibilité multimodale des territoires - Etat des lieux et analyse des pratiques, 73 pages. Cerema, mars.
- (Badin, 2018) Badin, Anne-Laure. 2018. Note sur la modélisation de la qualité de l'air, avril, 8 pages, non publié.
- (Hans, 2018) Hans, Etienne. 2018. Guide à l'usage des utilisateurs et développeurs de la plateforme Stream, 62 pages, non publié.
- (Hans, 2019) Hans, Etienne et coauteurs. 2019. Guide Théorie du trafic sur voie réservée. *En cours d'édition.*

Programme du séminaire de restitution Messigeo 26 mars 2019

13:30	13:40	Introduction		Virginie	Lasserre ⁴	Cerema CE
13:40	14:15	Axe 1	Introduction à la régulation d'accès (RA)	Nicolas	Ditchi	Cerema Ouest
			RA sur le tunnel de Toulon	Nicolas	Ditchi	Cerema Ouest
			RA sur le périphérique de Nantes	Wilhemine	Lecointre	Cerema Ouest
			RA sur la rocade Sud de Grenoble	Christine	Buisson	Cerema CE
14:15	14:35	Axe 1	Méthodes et outils pour l'aide à la mise en place de P ² GT	Etienne	Hans	Cerema CE
14:35	14:55		Monter une start-up de simulation dynamique : pourquoi, pour qui ?	Aurélien	Duret	Licit Ifsttar-ENTPE
14:55	15:15	Axe 2	Présentation de l'outil d'analyse de l'offre de transport Tempus	Aurélie	Bousquet	Cerema TV
15:15	15:45	Pause				
15:45	16:00	Axe 3	Analyses croisées de données concentration de pollution et trafic	Christine	Buisson	Licit Ifsttar-ENTPE
16:00	16:15		Chaine de modélisation : trafic et émission de polluants	Delphine	Lejri	Licit Ifsttar-ENTPE
16:15	16:35	Axe 4	Travail sur des données d'expérimentations avec des véhicules connectés	Christine	Buisson	Licit Ifsttar-ENTPE
16:35	17:15	Atelier de recueil d'idées : Quels sujets aborder dans la future coopération entre le Cerema et l'Ifsttar sur les questions de modélisation et de régulation du trafic et des déplacements ? Contributions par post-it sur les sujets suivants :				
		(1) gestion des déplacements et transports intelligents (Frédéric Murard) (2) nouveaux véhicules - nouvelles infrastructures : quel rôle pour le gestionnaire ? (Lionel Prevors) (3) nouveaux véhicules - nouvelles infras : quelles implications pour la sécurité routière ? (Catherine Gabaude) (4) modélisation et simulation (Christophe Damas) (5) autres sujets : information des usagers, consommation, pollution, bruit, ... (Christine Buisson)				
17:15	17:25	Les attentes de la DGITM		Clément	Morin	DGITM
17:25	17:30	Conclusions et clôture		M.-Line	Gallenne	Ifsttar DS

⁴ Nota : Seul l'auteur qui a présenté est indiqué ici, mais l'ensemble des auteurs des présentations sont précisés sur les transparents concaténés ci-après.

Synthèse des débats lors des ateliers du séminaire de restitution Olas – Mèssigéo

1^{er} atelier : gestion des déplacements et transports intelligents

Animation et synthèse : Frédéric Murard (Cerema)

Un atelier qui a permis de faire émerger de nombreux thèmes, dont certains seront redondants avec ceux issus des autres ateliers, puisque la définition des transports intelligents est très « vaste » dans l'esprit des contributeurs. On reparle donc capteurs, véhicules, données, exploitants, sécurité, véhicule autonome, etc...

1. Les ITS pourraient permettre de remplacer les capteurs « classiques » de trafic et de remplacer les méthodes de prévision de trafic

- IA + images vidéos comme nouveau capteur de trafic QTV
- IA + images vidéos comme outils d'analyse de trajectoires
- big data « états de trafic sur un réseau » + machine learning comme nouvelle façon de prévoir l'évolution des conditions de circulation (vs modèles)

2. Les ITS pourraient permettre un monitoring des déplacements temps réel et à grande échelle

- les véhicules ou « utilisateurs ITS » au sens large (y-compris piétons avec smartphone allumé) comme fournisseurs de données temps réel de déplacements
- quelles conditions de mise à disposition des données en open data dans le cadre RGPD ?
- la mise à disposition de données massives = possibilités de traitement et de construction d'indicateurs/d'évaluation en continu vs évaluation a posteriori ponctuelles

3. Les ITS au service des exploitants et de l'optimum collectif des déplacements vs l'optimum individuel

- quel impact d'une pénétration croissante des consignes « waze » sur l'utilisation des réseaux, quel besoin de « régulation » ?
- quelle utilisation des ITS pour de nouvelles mesures de gestion des déplacements ? Péages positifs, récompenses aux usagers en cas de suivi des consignes de déplacements, « forçage » du respect des consignes via les véhicules ITS (régulation de vitesse par exemple),...
- Les ITS et le risque de dégradation des conditions de déplacements
- quel moyen de diffusion de l'information aux usagers dans les véhicules sans dégrader l'attention ?
- Quelles règles pour la circulation des véhicules autonomes dans un flux sans dégrader les conditions de déplacement des autres usagers : inter-distances, arrêts, ...

2^{ème} atelier : Nouveaux véhicules et infrastructures : Quels rôles pour les gestionnaires ?

Animation et synthèse : Lionel Prévors (Cerema)

Un consensus s'est rapidement dégagé sur les données générées par les équipements des différents gestionnaires. Ainsi, les sujets formats, structures de stockage et de diffusion, publics visés, émergent en premier, rapidement suivis par les sujets CNIL-RGPD et cyber sécurité. Avec les data, viennent les sujets exploitation, qui comment et pourquoi. Qui agrège et comment ? Par exemple, comment définir des standards pour les indicateurs, comment tenir un tableau de bord temps réel pour les gestionnaires et pour le suivi du trafic en temps réel.

Les équipements, leurs types, fiabilités et intérêts complémentaires (Boucles, PMV, LAPI, DAI, Bluetooth mais aussi UBR, OBU,...) sont évidemment au cœur des préoccupations des gestionnaires pour garantir le bon fonctionnement de leurs réseaux. Un point important qui conditionne le déploiement de services C-ITS, les feux connectés en capacité de recevoir des phases adaptées à l'évolution du trafic routier (exemple de Gertrude à Bordeaux)

Avec les C-ITS comme les PMV virtuels (IVS in vehicle signage), la question peut se poser de la pertinence des investissements sur certains matériels (PMV). Avec les services, arrivent les questions d'interface HM et la compréhension des messages, la disponibilité des usagers et les questions de sécurité routière.

Il y a des sujets Intelligence artificielle, apprentissage profond, soit pour faire du prédictif, soit pour détecter/analyser rapidement des situations sur la base de signaux faibles remontés par les différents capteurs. Il y a des sujets fusion de données et utilisation pour un centre de décision à la manière des centres de commandements ou de gestion de crise.

Un axe de réflexion se dégage sur les infrastructures électriques utilisables par des PL (Alim par le sol ou pantographe), infrastructures de coordination pour la mise en œuvre de platoon PL. Ce qui implique que le sujet des smartgrids énergétiques soit résolu...

Concernant les stratégies de gestion de trafic, comment sont arbitrées les décisions visant à rendre un service au plus grand nombre versus favoriser une certaine catégorie d'usagers par exemple. Comment anticiper les changements de comportement des usagers ?

Sur les VDTPC, pourrait-on imaginer que le gestionnaire prenne la main dans certaines situations. À qui devrait revenir la charge de mettre en place et d'entretenir les matériels nécessaires au déploiement des VDTPC (qui du budget peinture pour la signalisation...)

3^{ème} atelier : nouveaux véhicules et infrastructures : quelles implications pour la sécurité routière ?

Animation et synthèse : Catherine Gabaude (Ifsttar)

Un atelier qui a permis de faire émerger des idées rapidement regroupées autour de 5 thèmes :

1. Les véhicules connectés génèrent de nouvelles données qui offrent de nouvelles opportunités en matière de régulation du trafic

- Les véhicules et les infras communicants offrent une vision augmentée du trafic → des approches nouvelles à développer, des données à exploiter pour anticiper les phénomènes et améliorer la sécurité routière
- Mieux prendre en compte les reports de trafic : Prise en compte de l'impact des applications type Waze (adaptation à la capacité et à la sécurité des voies choisies)
- Les nouveaux engins de mobilité peuvent représenter de nouvelles sources de données de mobilité (ex. trottinettes électriques géolocalisables et géolocalisées). Etudier la possibilité d'intégrer ces données dans des modèles de gestion de trafic multimodes et ainsi se donner la possibilité de repérer des éventuels points noirs en matière d'accidentalité ?
- Penser les modèles de trafic en incluant les comportements humains (Modélisation centrée utilisateur).

- Partir des analyses détaillées d'accident pour définir les règles de fonctionnement des véhicules communicants (conditions limites)
- Les impératifs de sécurité et de fluidité sont souvent antinomiques (réduire les espacements inter-véhiculaires pour augmenter les capacités sur les voies) → trouver un compromis, tendre vers une fluidité lente.
- Evolution des règles de circulation et détournement d'usage des voies (circulation sur BAU) : faire un bilan sérieux sur la sécurité de telles décisions (comprendre, éclairer la décision publique).

2. Changer le bilan de l'insécurité routière en renouvelant les méthodes d'étude de l'accidentologie

- Des discontinuités dans le trafic (bouchon, ralentissement, accélération) qui génère de l'insécurité routière. Le développement d'ADAS semble prometteur pour réduire cette insécurité mais comment s'assurer que les véhicules communicants améliorent bien la situation ? Comment profiter des opportunités offertes par les véhicules communicants pour mieux gérer la question des queues de bouchon.
- Les véhicules communicants voire autonome permettent de remonter de nouvelles données qui renseignent la survenue d'incidents ou presque accidents : collecter et analyser ces données, s'assurer que l'on ne multiplie pas les situations incidentelles voire accidentelles, comprendre les conditions de survenue des incidents...
- ADAS et détection d'usagers vulnérables : quels modes de détection intelligents serait-il opportun d'intégrer dans les véhicules connectés pour mieux limiter les collisions : ouverture de portière, angles morts, tourne à droite bandes cyclables...).

3. Le couplage des données issues des véhicules et des infra offre de nouvelles opportunités

- Les ADAS vont permettre la remontée d'infos pour la maintenance prédictive des routes.
- Les nouvelles infra intelligentes vont permettre de mieux décrire les comportements des usagers (exemple des feux intelligents connectés). Quelles incidences vont-elles avoir sur les comportements des usagers, quels changements va-t-on observer dans les interactions entre usagers...

4. Un changement de paradigme autour de la data

- Donner confiance dans les données : rassurer les usagers sur le bon usage et la fiabilité des données transmises
- Partage de la data, appropriation par la société
- Observer les données sur des périodes différentes : évaluation à court terme pour évaluer l'efficacité des mesures de régulation du trafic mais nécessité de réaliser des évaluations à plus long terme pour observer leurs effets sur la sécurité routière (faut-il aller sur la création d'un observatoire de données et non uniquement d'un observatoire des mesures comme ceci a été doré et déjà mis en œuvre au Cerema ?).

5. Nouveaux véhicules, nouvelles infra : apparition possible de nouveaux conflits d'usage, il faut anticiper !

- Impact du véhicule autonome sur les comportements des autres usagers (confiance, méfiance).
- Comment remonter les infos de trafic temps réel aux usagers en préservant leur sécurité (problématique d'interaction voire de coopération-humain-machine ; trop d'information peut créer de l'insécurité). Faciliter les interactions entre usagers grâce aux véhicules communicants ?

- Face à la future multiplication des informations fournies (via écrans) à tous les usagers dont les conducteurs, comment assurer la sécurité des autres usagers ? (sécurité aux tiers). Le travail réalisé sur la cohérence des règles routières doit être poursuivi pour réfléchir à la transmission de messages aux usagers.
- Véhicules communicants : comment informer tous les utilisateurs ? (PL, VL, 2RM, Vélo...), comment informer les usagers sur les nouvelles potentialités offertes ? Comment mieux assurer la sécurité des piétons ? (au regard des engins urbains : bus, camions...).
- Repenser les modèles d'analyse et de compréhension des interactions entre usagers.
- Les VA doivent-ils adopter un comportement adapté au code de la route ou au mode de fonctionnement de son utilisateur ?
- Etudier la cohabitation entre véhicules autonomes, automatisés et les véhicules « classiques ».

4^{ème} atelier : modélisation et simulation

Animation et synthèse : Christophe Damas (Cerema)

5 thèmes ont émergé de l'atelier :

- Data
- Domaine d'emploi, fiabilité, erreur
- Véhicule autonome, véhicule électrique et nouveaux usages
- Modèles dynamiques régionaux
- Modélisation pour petites agglomérations et territoires peu denses
- Modélisation et aléas climatiques

1. Data

Constat : Les données sont stratégiques pour la modélisation. Propositions :

- renforcer les compétences en open data et en modèles de données ouverts
- travailler sur l'utilisation de nouvelles sources de données (données « massives » notamment)
- réaliser des interfaces entre les modèles pour favoriser l'interopérabilité, par exemple entre le statique et le dynamique
- utiliser, réaliser ou faire réaliser les API dans des langages maîtrisés par le plus grand nombre (ex. Python)
- favoriser les approches open-source

2. Domaine d'emploi des modèles, chaîne de modélisation et fiabilité.

Constat : Différents outils se complètent les un aux autres pour répondre à des questions très variées. Certains indicateurs résultent ainsi de l'application successive de plusieurs modélisations. La fiabilité du résultat final pose alors question. Propositions :

- maintenir, affiner l'expertise sur le domaine d'emploi des différents modèles (cas d'usage)
- vulgariser davantage à destination des utilisateurs et des commanditaires
- collecter de la donnée pour comparer/valider les modèles (cas tests)
- cerner les marges d'erreur des différents outils.

3. Véhicule autonomes, véhicule électrique et nouveaux usages

Constat : Le véhicule autonome, le véhicule électrique et les nouveaux usages (covoiturage, véhicules partagés...) offrent de nouvelles perspectives. Cependant, on connaît peu les impacts qu'ils peuvent avoir sur les déplacements. Propositions :

- identifier les questionnements (impacts sur le choix modal, circulation à vide, recharge des véhicules...)
- proposer des méthodes basées sur la modélisation et la simulation pour y répondre
- prise en compte de ces véhicules et nouveaux usages dans la chaîne de modélisation.

4. Modèles dynamiques d'agglomération ou régionaux

Constat : Ces modèles sont stratégiques pour évaluer des projets ou des mesures de gestion du trafic sur de grandes zones ou de longs corridors. Propositions :

- Investir le sujet de l'affectation à large échelle,
- Investir l'approche macro-dynamique (réseau simplifié mais demande dynamique).

5. Modélisation pour petites agglomérations et territoires peu denses

Constat : Les modèles standards sont peu adaptés à ces territoires : absence d'enquête déplacement, coût de développement initial élevé et absence de personnel pour maintenir les outils. Proposition :

- Développer des outils/méthodes spécifiques adaptés à ces territoires et leurs enjeux.

6. Modélisation et aléas climatiques

Constat : Sujet peu traité mais qui prend tout son sens dans une société qui fonctionne en flux tendu. Proposition :

- Développer des approches pour modéliser l'impact des aléas climatiques sur le fonctionnement des réseaux de transport.

5^{ème} atelier : information des usagers, consommation, pollution, bruit

Animation et synthèse : Christine Buisson (Ifsttar)

Beaucoup des idées présentées dans cet atelier tournent autour de la nécessité de mieux prendre en compte les impacts négatifs des déplacements et de la nécessité de proposer une approche globale qui permette d'aborder les problèmes de manière multicritère. La question de l'adaptation nécessaire de nos méthodes (évaluation, simulation, optimisation, ...) pour préparer la transition écologique et climatique a aussi été évoquée.

Directions de recherches face aux bouleversements du système de transports

Le groupe de travail “traffic management” d’ECTRI (une association européenne de centres de recherche sur les transports)⁵ a rédigé un rapport de 6 pages⁶ présentant les besoins de recherche en gestion des transports pour un avenir avec zéro accident, zéro congestion et zéro émission. Ce qui suit en est une traduction synthétique. Les erreurs ou omissions sont de mon seul fait.

La vision commune est que le futur système de transport doit mettre tout en œuvre pour que les objectifs suivants deviennent une réalité :

- Un système de mobilité centré sur les besoins de l'utilisateur ;
- La fin des émissions et des accidents ;
- Une consommation minimale d'espace, de temps, d'énergie et de coût pour les transports.

Chacun des points ci-dessus entraîne plusieurs directions de recherches complémentaires qui doivent être explorées.

Un système de mobilité centré sur les besoins de l'utilisateur :

Le fait de centrer la mobilité sur les besoins de l'utilisateur implique de passer d'une gestion du trafic à une gestion des déplacements. Pour cela l'information de l'utilisateur doit être multimodale et permettre à l'utilisateur de choisir les critères de hiérarchisation et de choix qui lui conviennent. L'objectif d'atteindre un optimum collectif et pas uniquement une collection d'optimums individuels⁷ passe par une information qui soit transparente et exacte, mais aussi attractive pour que l'utilisateur puisse agir pour le bien collectif.

Mais, pour que des stratégies de gestion des déplacements puissent être déployées correctement, il faut, comme nous l'avons vu dans la première partie, que des outils de modélisation permettent une prédiction fiable des évolutions du système de transports. Ce système n'est plus vu comme regroupant plusieurs modes transportant chacun un flux, mais comme un ensemble intégré et multimodal offrant un service de déplacement à des usagers potentiellement versatiles dans leurs choix.

Pour cela nos modèles doivent devenir complètement multimodaux : tenir compte des motivations des choix modaux, des différents itinéraires disponibles pour chaque mode et des dynamiques des demandes propres à chaque mode. Ceci implique aussi d'avoir une modélisation des temps de connexion entre modes.

La phase de transition qui s'ouvre devant nous nous oblige à prendre en compte les déplacements motorisés et non motorisés, automatisés et non automatisés, collectifs et individuels. La variété des comportements sur l'espace partagé qu'est la voirie urbaine nécessite des approches nouvelles, avec en particulier une meilleure reproduction de l'aléa des processus modélisés. De plus, la prise en compte de la connectivité est importante et doit prendre en compte la complexité de la transmission d'information.

⁵ <https://www.ectri.org/>

⁶ Ce document est accessible ici : http://www.ectri.org/wp-content/uploads/2018/12/2018-12_ECTRI-TGTRAFFIC-MANAGEMENT_Transport-Challenge_2020-2050_Final.pdf il a été rédigé par un groupe piloté par Wolfgang Ponweiser (AIT, Vienne, Autriche) et comprenant : Johan Olstam (VTI, Linköping, Suède), Ioannis Papamichail (TUC, Chania, Grèce), Peter Wagner (DLR, Berlin, Allemagne), Christine Buisson (Ifsttar – Entpe, Lyon, France).

⁷ Sur ce sujet on annexe à ce rapport un bref article publié dans TEC et produit non pas en collaboration avec le Cerema, mais avec la Ville de Paris (Luc Charansonney).

La fin des émissions et des accidents

Trop souvent, les modèles considèrent les êtres humains comme des contrôleurs potentiellement fautifs ou même totalement déterministes. La modélisation de l'(in-)sécurité routière est du coup très difficile. Pour prévoir les effets des nouveaux véhicules et des nouveaux modes de déplacements sur la sécurité une telle modélisation doit être considérablement améliorée, notamment pour les interactions entre véhicules automatisés et véhicules conduits par des êtres humains.

De plus, pour bénéficier du plein potentiel des véhicules automatisés, l'utilisation intensive des nouvelles données disponibles est nécessaire en temps réel, de manière à alimenter une régulation dynamique réactive.

Pour l'objectif de réduire drastiquement les émissions, il faut être capable de combiner dans des modèles complets les différents types de motorisation et de modes (motorisés ou non) et de mieux intégrer les différentes sources de pollution et leurs évolutions dans l'atmosphère.

Une consommation minimale d'espace, de temps, d'énergie et de coût pour les transports

Quel que soit le mode de transport, sa congestion est toujours causée par un excès de demande par rapport à l'offre. Pour la réduire on peut soit diminuer la demande, soit augmenter l'offre, soit diminuer l'espace-temps nécessaire pour réaliser un déplacement. Devant l'augmentation des pratiques alternatives, il convient d'élargir notre approche de la congestion, en particulier pour le vélo, qui est un mode déjà à saturation dans certaines villes européennes.

Une méthode de contrôle possible dans l'avenir avec des véhicules automatisés et connectés peut être d'attribuer à chaque véhicule, pour les goulots d'étranglement les plus générateurs de congestion, une date de passage. Par ailleurs, si les véhicules ne sont plus conduits par leurs occupants il peut être possible de conserver la même heure d'arrivée tout en jouant sur l'ordonnancement dans l'espace-temps de tous les véhicules.

Les flottes de véhicules partagés posent également de nouvelles questions : elles permettent de diminuer l'espace utilisé pour stocker les véhicules puisqu'elles en augmentent le temps de service. Pour avoir une évaluation complète des impacts des évolutions de rupture du système de transport il importe de valoriser cet espace gagné. Il faut également tenir compte des effets sur le temps de parcours, comme nous le faisons actuellement, mais aussi intégrer les consommations d'énergie, la production de polluants et les coûts individuels et collectifs ; et ce sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules.

Présentations faites lors du séminaire du 26 mars 2019

ORSI MESSIGEO

Mesures et Simulation pour une Gestion Optimisée des systèmes de transport

Séminaire de restitution - Introduction

Virginie Lasserre

Cerema Centre-Est

26 mars 2019 – La Défense

4 axes de travail collaboratif

Licit-Cerema

Fruit d'une collaboration entre le monde de la recherche
(→ Licit) et le milieu opérationnel (→ Cerema)

- Licit : théorie du trafic, modélisation
- Cerema : compétences et en charge d'études territoriales => apport de données et cas d'études

Travaux de deux types :

- Analyse et traitement de données empiriques
- Développement de plateformes informatiques

Sur 4 ans : 900 jours Cerema + 26 k€ dépensés

- 2015 à 2018

- Analyse de données empiriques & développement de 3 outils
« maison » Licit - Cerema :

Stream, Tempus et Traps

- Implication du Licit et du Cerema

→ 900 jours de contribution Cerema

- Achat de prestations de développement de Tempus (axe 2) et de Traps (axe 3)

→ 26 k€

Axe 1 : les effets des mesures de régulation du trafic

- Analyse de données terrain : les effets de la régulation
d'accès sur :

- Le tunnel de Toulon → ***Nicolas Ditchi***
- Le périphérique de Nantes → ***Wilhémine Lecointre***
- La rocade sud de Grenoble → ***F. Aliaga / Ch. Buisson***

- Développement de fonctionnalités complémentaires dans
l'outil de simulation dynamique Stream

→ ***Etienne Hans***

Axe 2 : un outil d'analyse de l'offre de transport

- Développement de fonctionnalités complémentaires dans l'outil Tempus, pour améliorer les méthodes de calcul d'itinéraires
- Deux applications terrain

→ **Aurélie Bousquet**

Axe 3 : trafics et émission / concentration de polluants

- Analyse croisée de mesures terrain de concentration de pollution et de trafic

→ **Christine Buisson**

- Chaîne de modélisation : trafic et émission de polluants Traps

→ **Delphine Lejri**

Axe 4 : systèmes coopératifs pour la gestion de trafic

- Travail sur des données issues d'expérimentations avec des véhicules connectés

→ **Arthur Burianne, Christine Buisson**

La suite de la coopération

Licit - Cerema ?

Des ateliers, en fin de journée, pour recueillir des idées, notamment en modélisation et simulation / analyse de données terrain

Merci de votre participation

Virginie LASSERRE
Virginie.lasserre@cerema.fr

Christine BUISSON
Christine.BUISSON@ifsttar.fr

Cerema Centre-Est

26 mars 2019 – La Défense



Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019



MESSIGEO Axe 1

Introduction aux principes de la régulation
d'accès

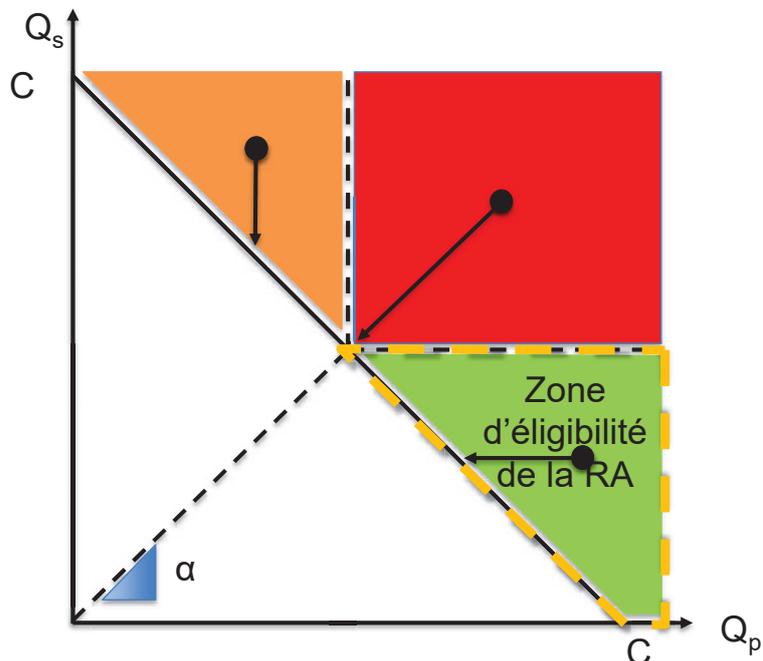
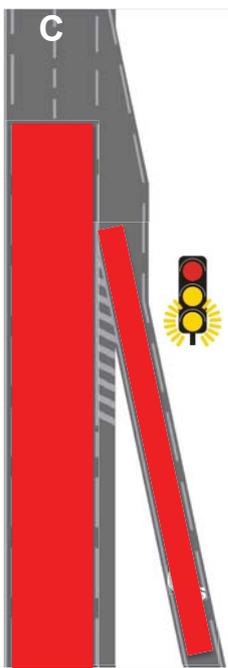
Principe de la régulation d'accès

- La régulation d'accès limite le débit provenant d'une bretelle d'entrée d'autoroute (généralement urbaine)
- Très répandue dans le monde, son utilisation en France est relativement limitée.
- Un algorithme est massivement utilisé : Alinéa (*)
- Elle fonctionne grâce à deux effets :
 - Maintien de la zone de convergence des flux dans un état de trafic fluide
 - Atténuation des variations du débit entrant

(*) : Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., & Blommeville, J.-M. (1991). ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record*, 1320, 58-64.

Fonctionnement d'un convergent

- Modèle de Daganzo



Fonctionnement d'un convergent

- Chute de « capacité » liée au débit de décharge en sortie de congestion
- L'objectif de la RA est de réduire voir supprimer cette baisse afin que les débits écoulés soient plus élevés

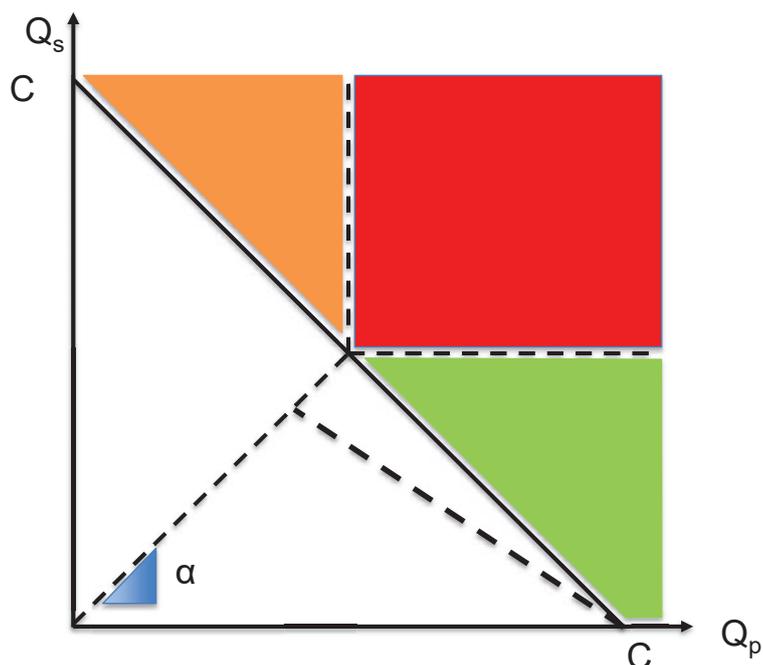


Schéma simplifié 1 – Sans régulation d'accès

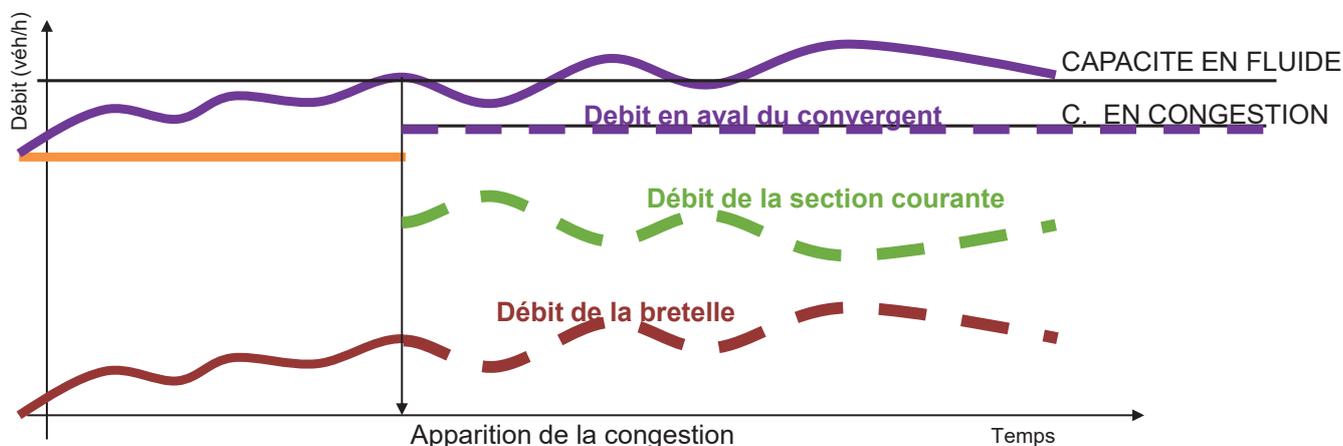


Schéma simplifié 2 – Avec régulation d'accès

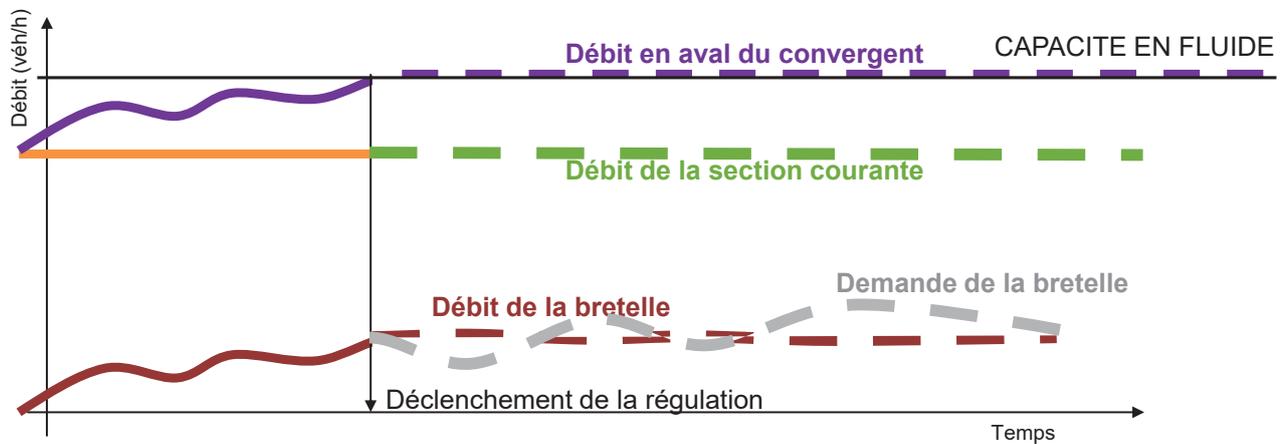
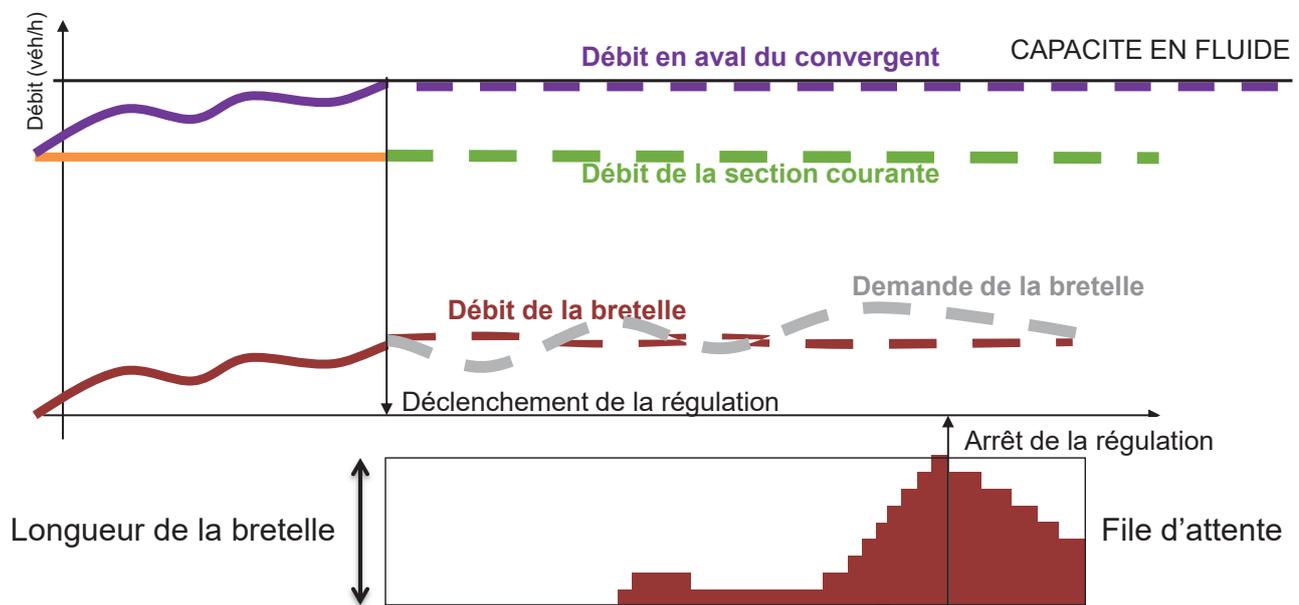


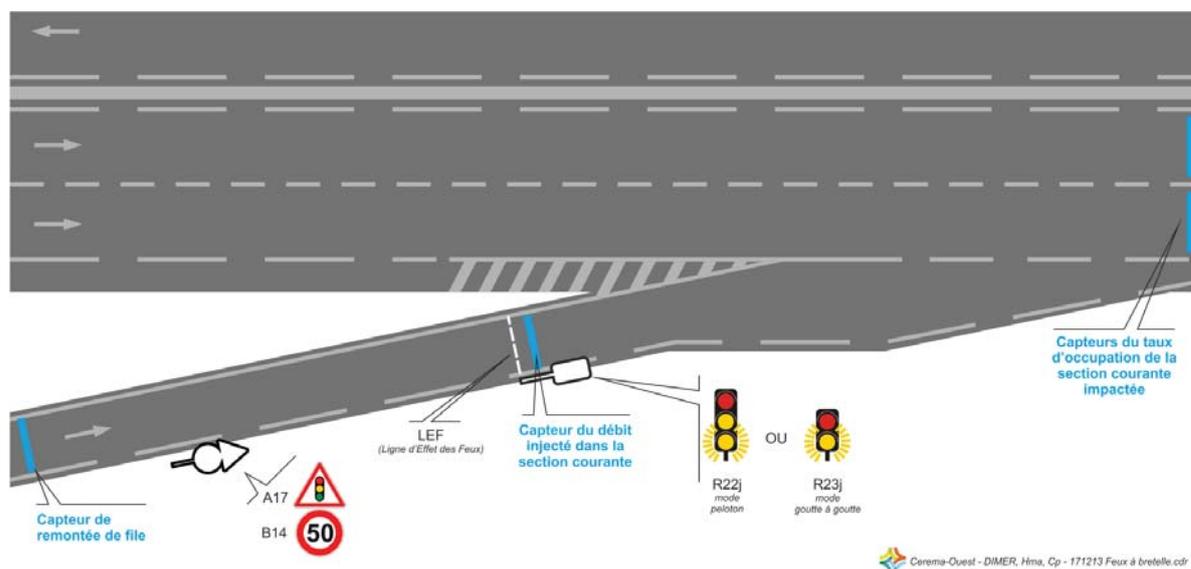
Schéma simplifié 2 – Avec régulation d'accès – file d'attente



Gestion de la bretelle

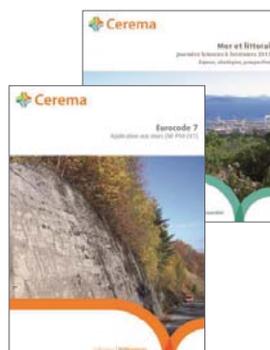
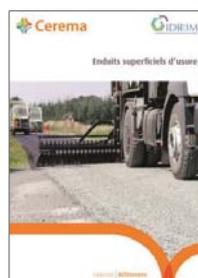
- Eviter les impacts sur le réseau urbain
- Détecteur en fin de bretelle
- Mécanismes de vidage de la bretelle
 - Cas simple : suspension de la RA (cycle complet au jaune clignotant) pendant un ou plusieurs cycles lorsque la congestion dépasse le détecteur
 - Cas complexe : gestion de la file d'attente et adaptation de la RA (ajustement des jaunes clignotants minimums, vidage avec augmentation progressive des durées de jaune clignotant)
- Impact sur la section courante

Equipement des accès pour la régulation



Merci de votre attention

Nicolas DITCHI - Cerema
Christine BUISSON - IFSTTAR



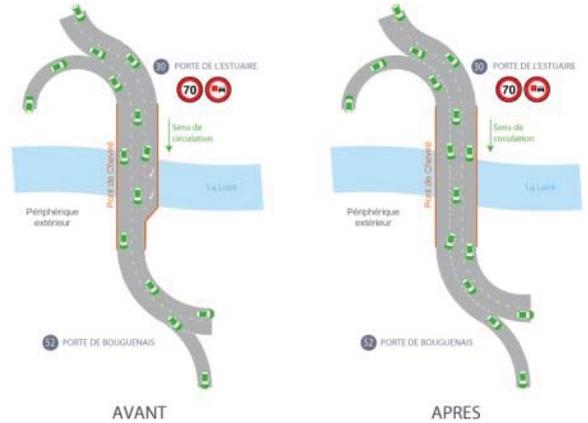
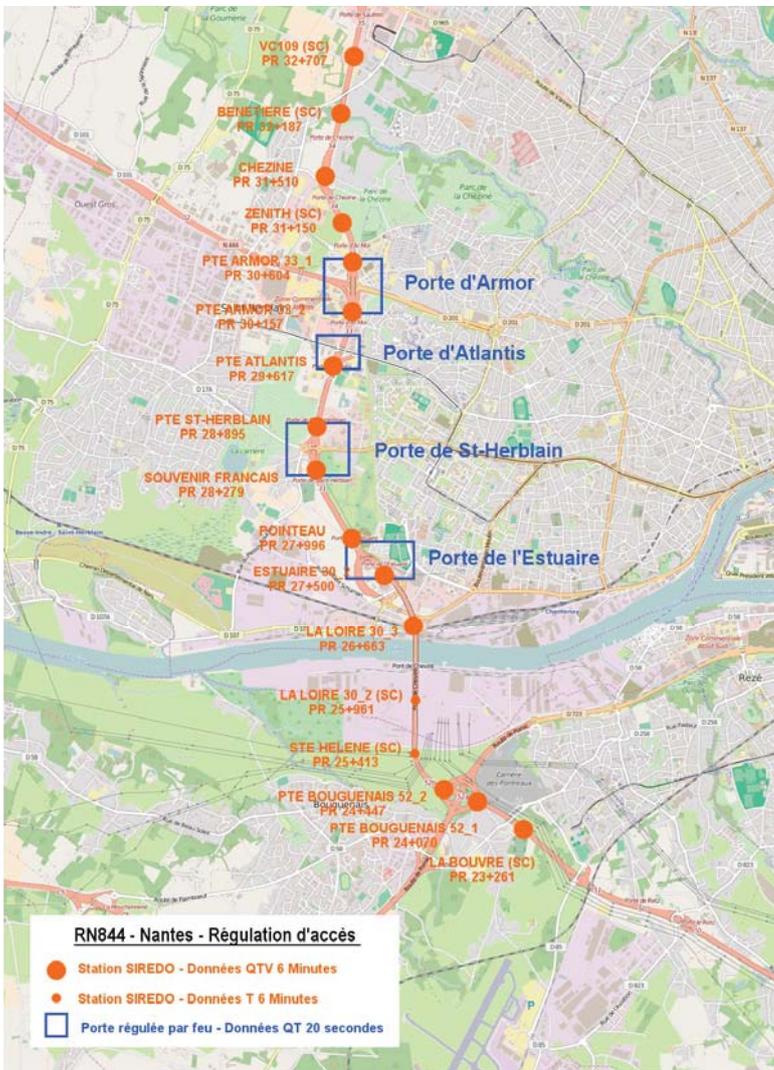
ORSI Messigeo Séminaire de clôture

Régulation d'accès sur le périphérique de Nantes

Secteur d'étude

Régulation : mars 2015

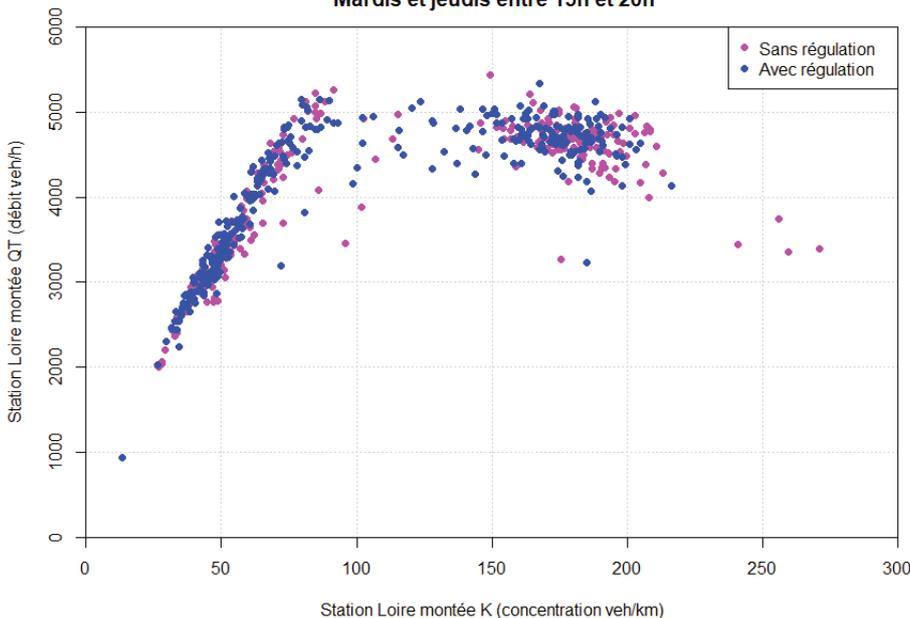
VAE : septembre 2015



1- Porte de l'Estuaire sans VAE

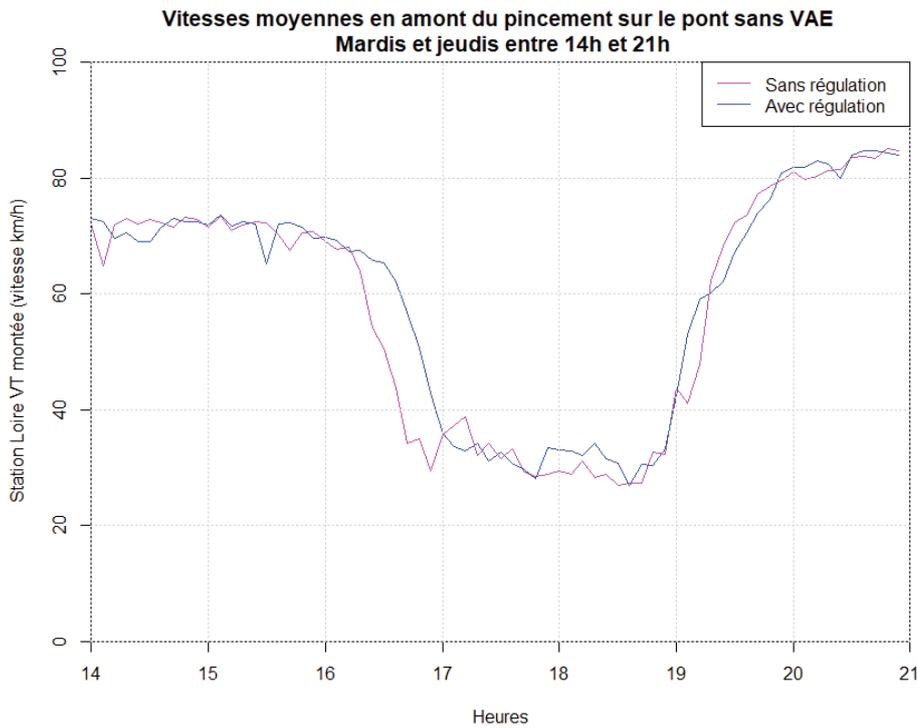
Effet sur la capacité

Diagramme fondamental en amont du pincement sur le pont sans VAE
Mardis et jeudis entre 15h et 20h



1- Porte de l'Estuaire sans VAF

Effet sur les vitesses

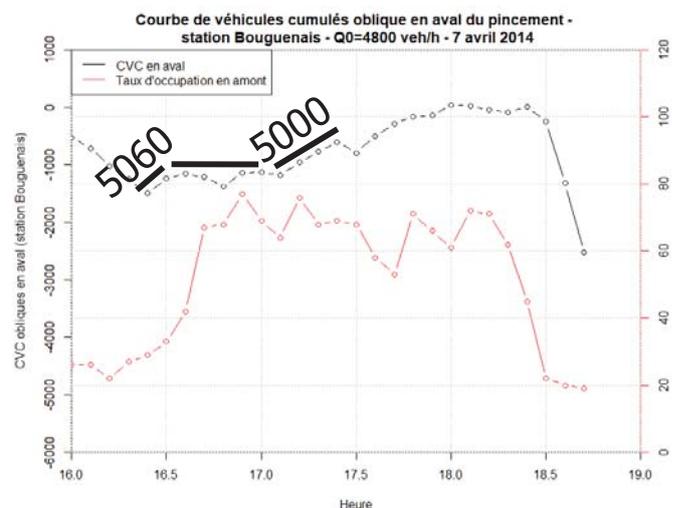
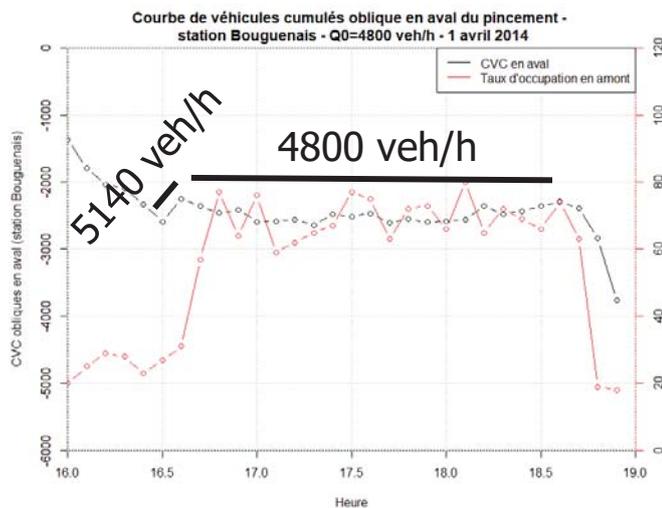


Conditions : avec algorithme de régulation mis au point après 18 mai 2015
Vitesse sur Souvenir_VL > 10 et vitesse sur Bouguenais > 50
Moyenne des mardis et jeudis sur station Loire_montée

4

1- Porte de l'Estuaire sans VAF

Effet sur la capacité (CVC obliques) – sans régulation



Débit fluide : ~ 5100 veh/h

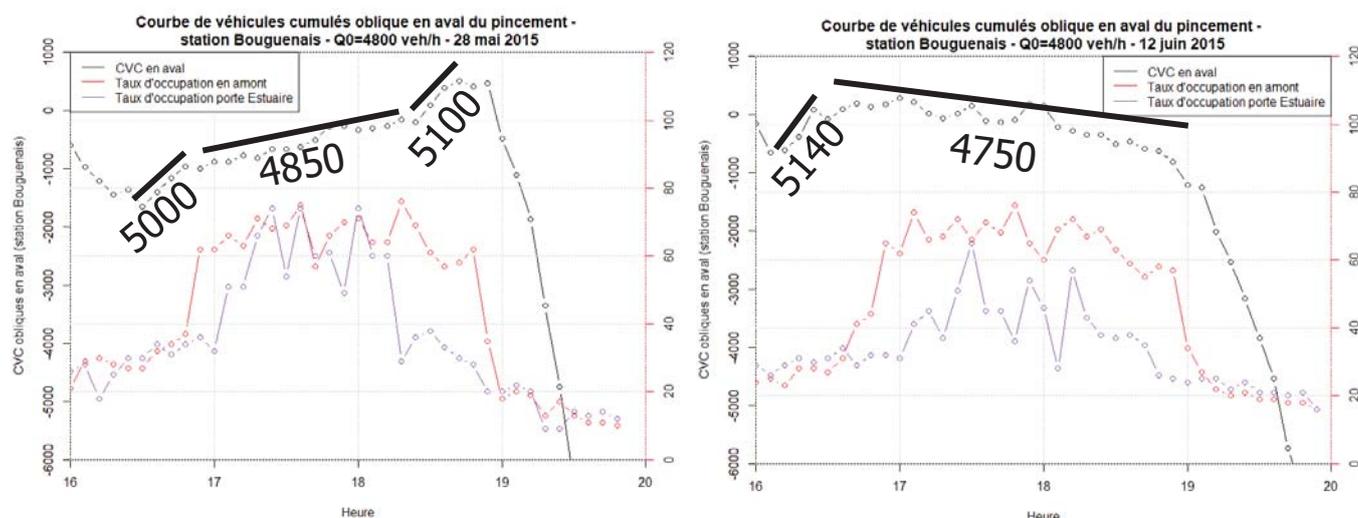
Débit congestion : ~ 4800 veh/h



5

1- Porte de l'Estuaire sans VAF

Effet sur la capacité (CVC obliques) – avec régulation



Débit fluide : ~ 5100 veh/h

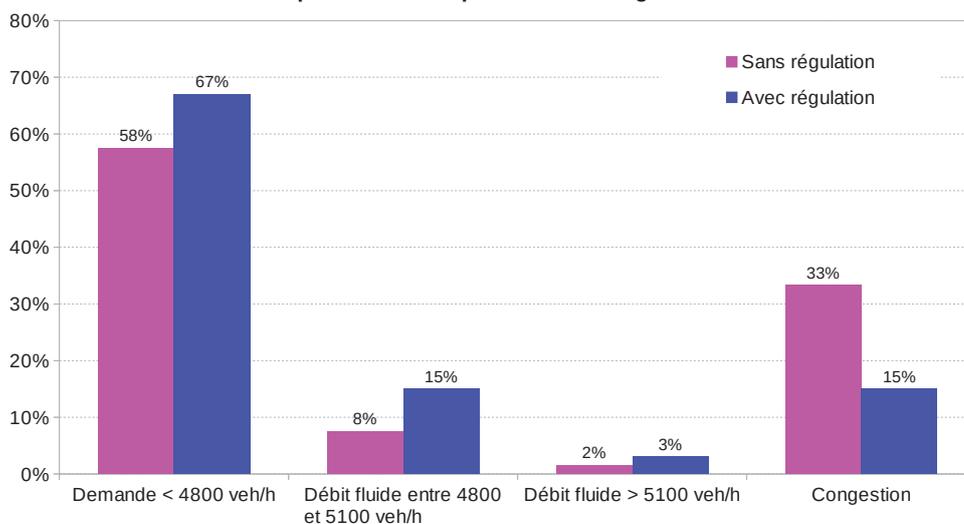
Débit congestion : ~ 4800 veh/h



1- Porte de l'Estuaire sans VAF

Effet sur la congestion

Distribution des périodes de 6min entre 16h et 17h selon les débits écoulés en aval du pincement et la présence de congestion en amont



**Réduction de ~ 20 % des périodes de congestion sur une heure
=> retard d'apparition de la congestion de ~ 12min**



Conditions : avec algorithme de régulation mis au point après 18 mai 2015
Vitesse sur Souvenir_VL > 10 et vitesse sur Bouguenais > 50, fluide si TT < 40 % sur Loire_montée
Moyenne des débits des mardis et jeudis sur station Loire_montée et Bouguenais

2- Porte de Saint-Herblain avec VAE

Effet sur les vitesses

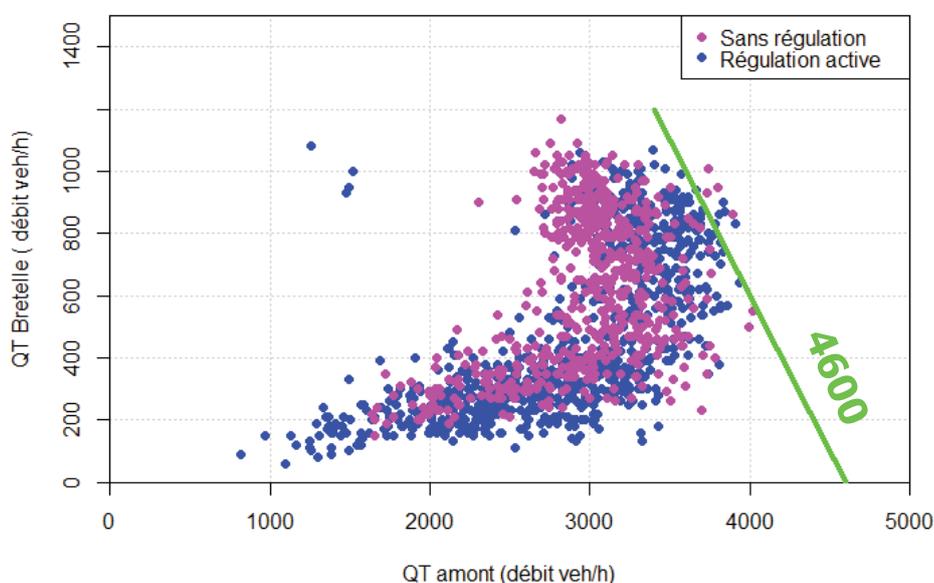
Vitesses moyennes en aval de la porte de Saint-Herblain avec VAE
Mardis et jeudis entre 15h et 20h - sans congestion sur Estuaire



2- Porte de Saint-Herblain avec VAE

Effet sur le convergent

Diagramme de Daganzo sur la porte de St-Herblain avec VAE
Jours ouvrés entre 15h et 20h



3- Conclusions

Bilan des effets observés sur la capacité

- Pas d'augmentation visible de la capacité nominale d'écoulement
- Capacité en régime fluide maintenue beaucoup plus fréquemment
- Augmentation de capacité sur la période globale de congestion

Merci de votre attention

MESSIGEO Axe 1

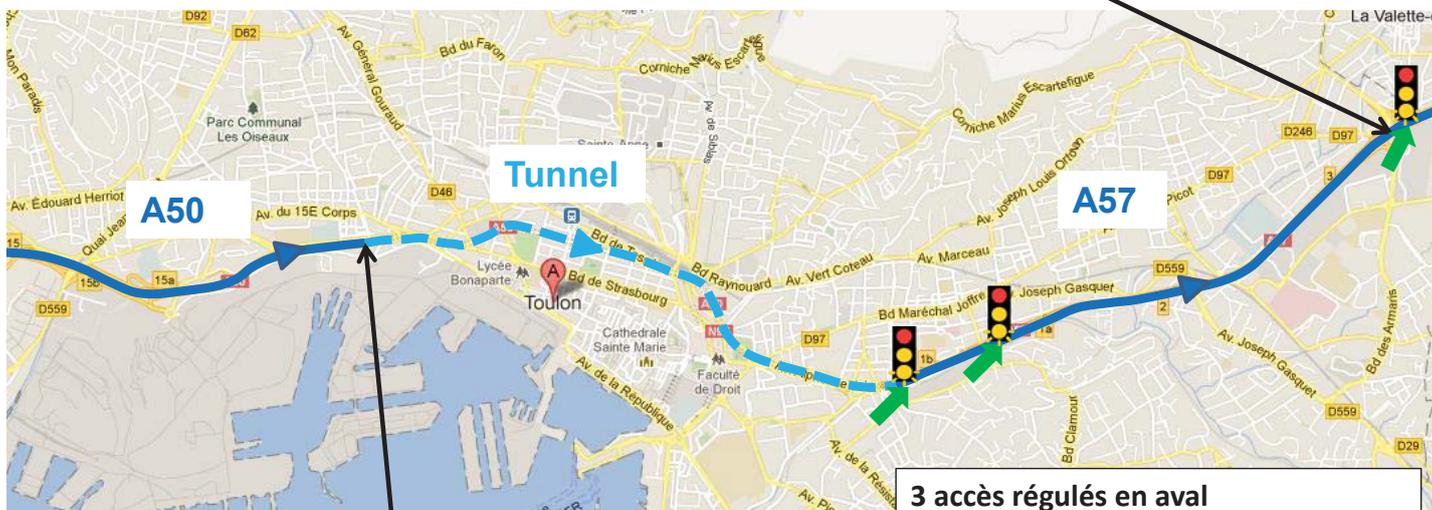
Régulation d'accès sur Toulon et utilisation des données dans AIMSUN

26/03/2019

Séminaire de restitution MESSIGEO : Axe1

Contexte

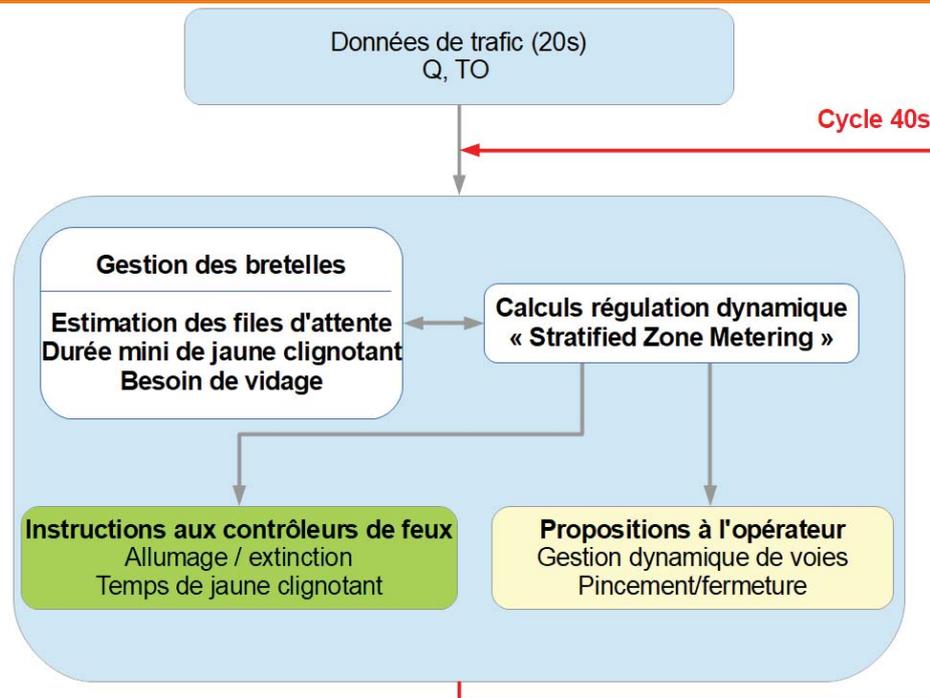
Régulation d'un accès double : gestion de conflit et régulation d'accès



Gestion dynamique de voies en entrée du tunnel :
Réduction d'une voie ou fermeture totale

3 accès régulés en aval
Gestion des files d'attente

Algorithme de régulation



- Pour en savoir plus : à paraître une fiche dans la collection « Gestion dynamique du trafic »

Données archivées

- Chaque jour un fichier XML de déroulement de la régulation sur chaque cycle de 40s généré et archivé
- Contient :
 - Les données de trafic agrégées à 40s des 52 boucles utilisées par l'algorithme

```
111941 <pointsMesure code="a50pr69065Yf1y" qt="990.0" tt="5.5" vt="69.0"/>
111942 <pointsMesure code="a50pr69065Yf2y" qt="630.0" tt="3.5" vt="78.5"/>
111943 <pointsMesure code="a57pr00148Yf1y" qt="630.0" tt="3.5" vt="80.0"/>
111944 <pointsMesure code="a57pr00148Yf2y" qt="1080.0" tt="5.0" vt="85.5"/>
```

- Les informations de gestion dynamique du trafic

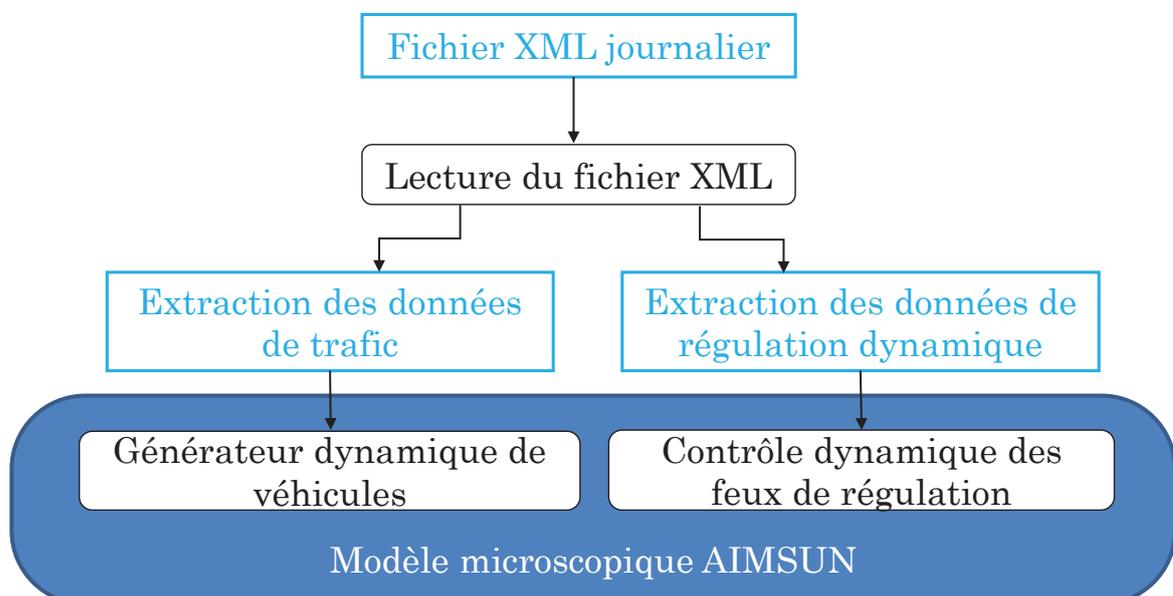
```
69927 <zones code="1_4" x="0.0" b="5000.0" s="0.0" a="2220.0" u="0.0" v="0.0" m="2780.0" n="3.0">
69928 <bretelles code="Leon_Bourgeois" vert="12.0" n="125.0" r="600.0" rPrime="600.0" rSeconde="0.0" v="0.0" etat="M1" c1="0.0"
69929 </zones>
69930 <zones code="1_5" x="0.0" b="6000.0" s="0.0" a="2700.0" u="0.0" v="0.0" m="3300.0" n="3.0">
69931 <bretelles code="Benoit_Malon" vert="11.0" n="4.0" r="571.484848484848" rPrime="571.484848484848" rSeconde="0.0" v="0.0"
69932 </zones>
```

Objectifs

- Créer un outil qui puisse utiliser les informations du fichier XML pour:
 - Rejouer une journée en simulation microscopique (AIMSUN) : assimilation de données
 - Utilisation de l'API (Application Programming Interface)
 - Identifier :
 - Les paramètres clés à calibrer
 - Les limites d'une telle approche
 - Les possibilités d'amélioration
 - Améliorer les évaluations a priori des régulations d'accès

Développement spécifique

- Utilisation de l'API AIMSUN (Python)

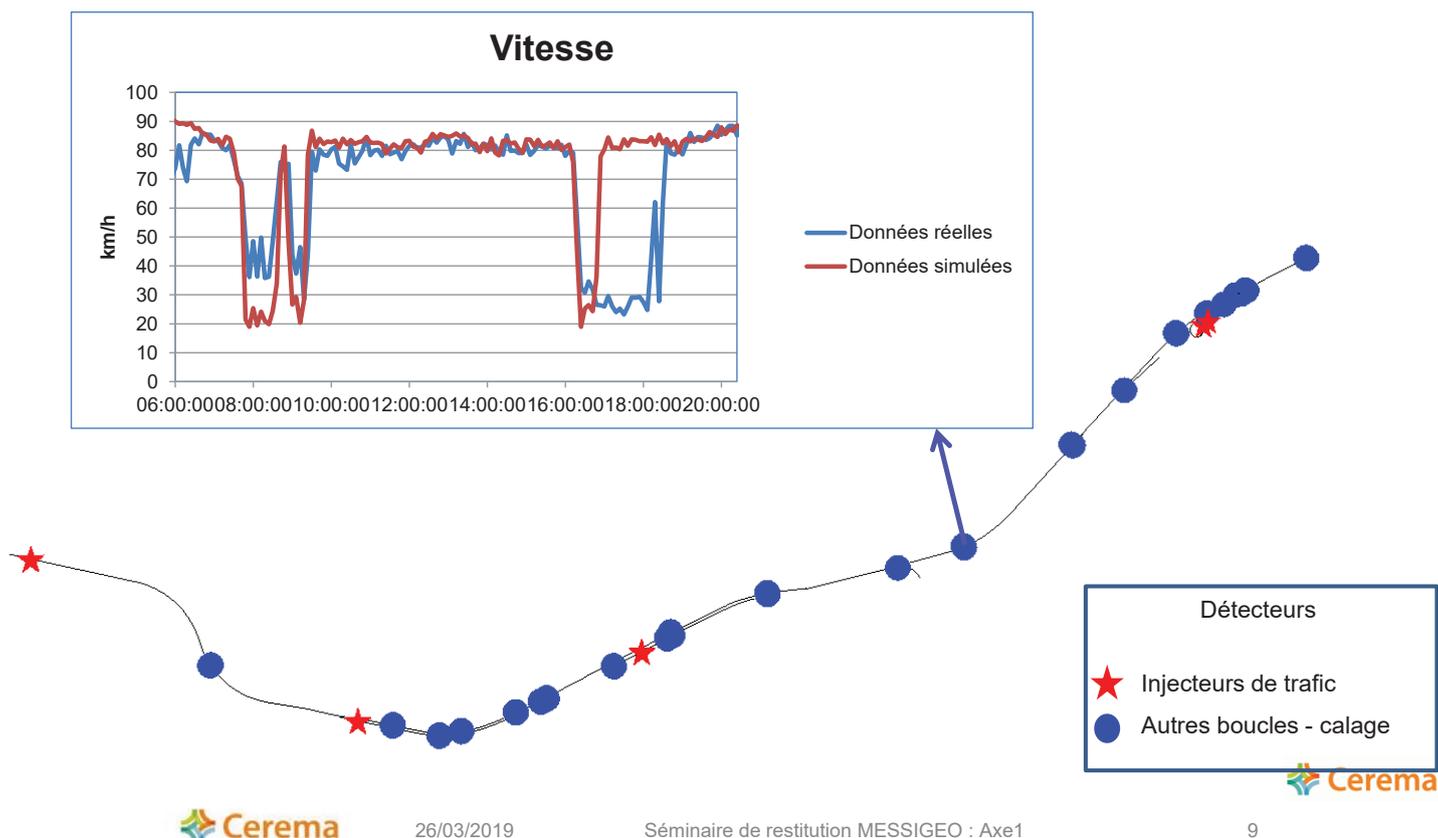




Calage

- Utilisation des données « boucles » non utilisées pour injecter le trafic:
 - Pour comparer les données réelles et simulées notamment la vitesse pour la reproduction des congestions sur la section courante
- Des paramètres « clés » à cibler en simulation microscopique pour:
 - Reproduire les capacités globales du réseau
 - Reproduire les niveaux d'écoulement au niveau des convergents
- Une grande quantité de données disponibles (environ 2 ans de données archivées)

Exemple de résultats



Limites

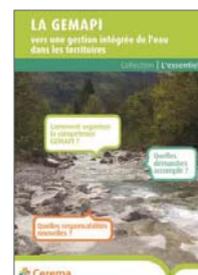
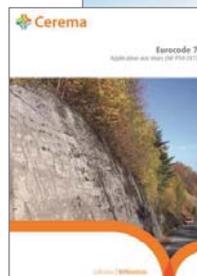
- En lien avec le modèle:
 - Respect des feux :
 - Par défaut : les périodes de rouge et de jaune fixe sont respectées dans la simulation
 - Il faudrait étudier la corrélation entre durée de jaune clignotant et les débits mesurés juste en aval du feu → augmenter les durées de vert dans le modèle (que faire pour une évaluation a priori?)
 - Pas de contrainte de capacité en sortie:
 - On note des débits aval légèrement différents en PPM et PPS
- En lien avec les données:
 - Comptage en congestion:
 - Pour les détecteurs amont des bretelles régulées → non représentatif de la demande
 - Perte de fiabilité sur les mesures
 - Pas d'information sur les PL

Conclusions

- Intérêts de la démarche d'assimilation de données
 - Pourrait être appliquée à d'autres sites de régulation d'accès (sous réserve de disposer de données similaires)
 - Pourrait être utilisée en temps réel pour de la prévision court terme ou de l'estimation de temps de parcours
 - Pourrait être étendue à d'autres types de données:
 - LAPI, Bluetooth, FCD
- Evaluation a priori, simulation microscopique
 - Importance de la qualité des données de trafic
 - Des hypothèses à faire ou des tests de sensibilité (par ex respect des feux)
 - Intérêt du module API : permet d'implémenter l'algorithme tel que prévu sur le terrain → fiabiliser et tester

Merci de votre attention

Nicolas DITCHI

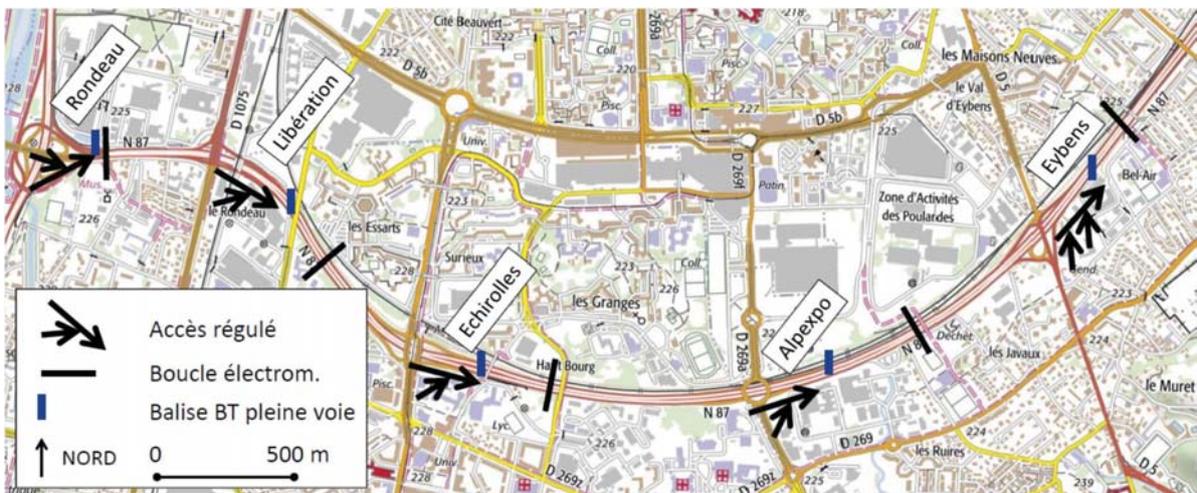


Evaluation des effets sur le trafic de la régulation de cinq accès de la rocade sud de Grenoble

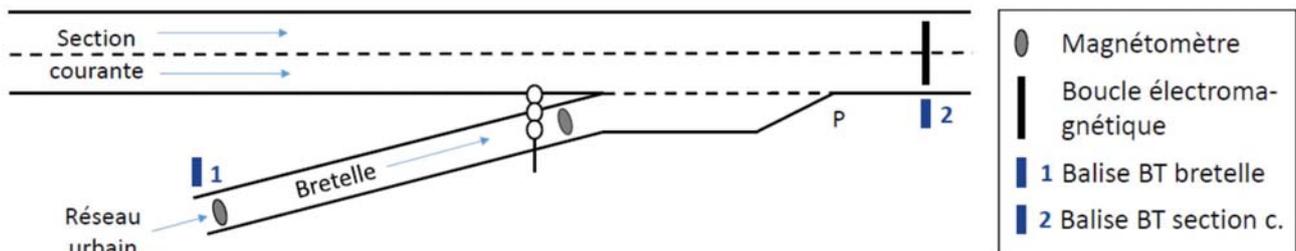
Frédéric Aliaga et Christine Buisson

Article présenté à l'ATEC 2019, repris dans le rapport.

Localisation du site expérimental et zone concernée



Equipement des accès pour la régulation



3

Périodes de mesure :

- Janvier-avril 2018
- 14 jours non régulés, 16 jours régulés
- Heure de pointe du matin : 6h-10h

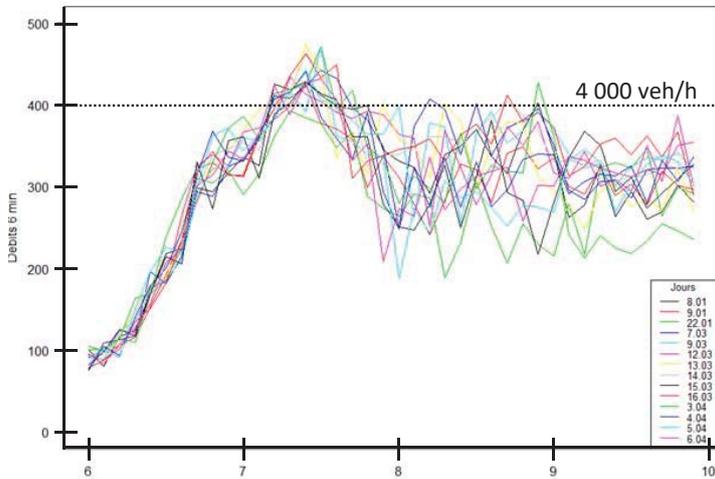
Données :

Nom de la variable	Appareillage utilisé	Fréquence de calcul	Points de mesure
Débit section courante	Boucles électromagnétiques	6 minutes	Rondeau, Libération, Echirolles, Alpexpo
Débit bretelle	Magnétomètres	6 minutes	Libération, Echirolles, Alpexpo, Eybens
TP section courante	Différence dates d'entrée et de sortie	Données indiv. filtrées et agrégées 6 minutes	Rondeau – Libération, Libération – Echirolles, Echirolles – Alpexpo, Alpexpo – Eybens
TP bretelle	Différence dates d'entrée et de sortie	Données indiv. filtrées et agrégées 6 minutes	Libération, Echirolles, Alpexpo, Eybens

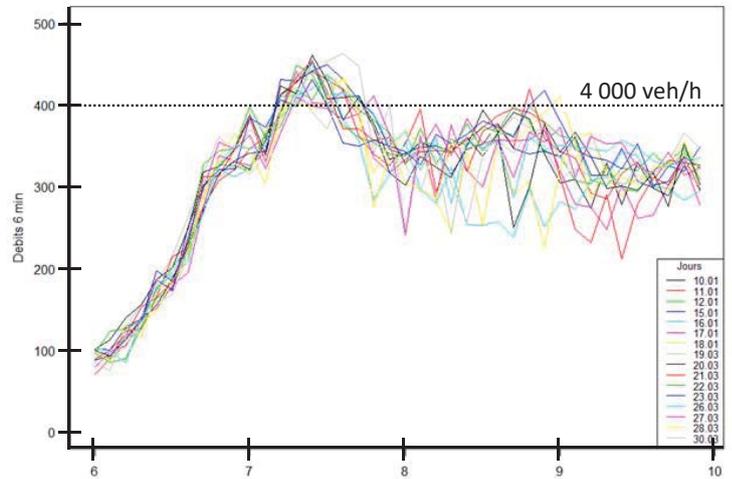
4

Exemple de données : Débits 6 minutes HPM mesurés à Echirolles

14 périodes non régulées



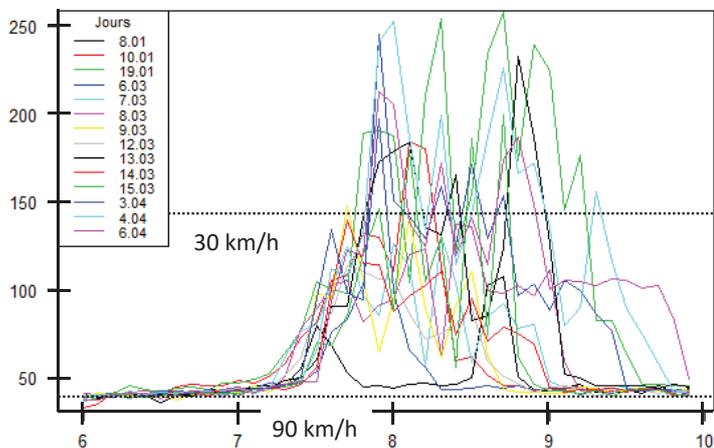
16 périodes régulées



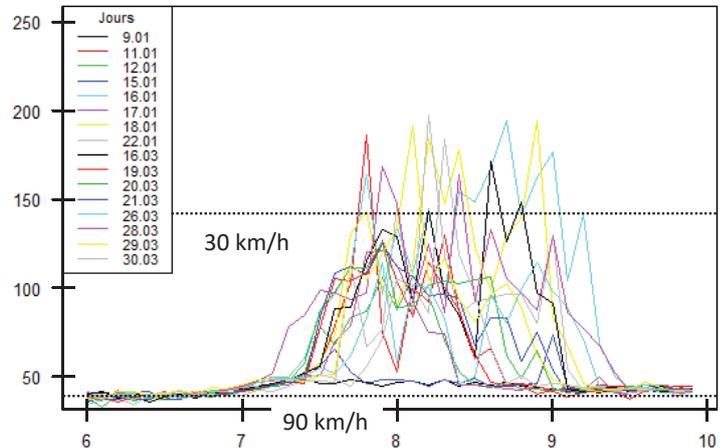
5

Exemple de données : Temps de parcours 6 minutes HPM Libération-Echirolles (section courante)

14 périodes non régulées

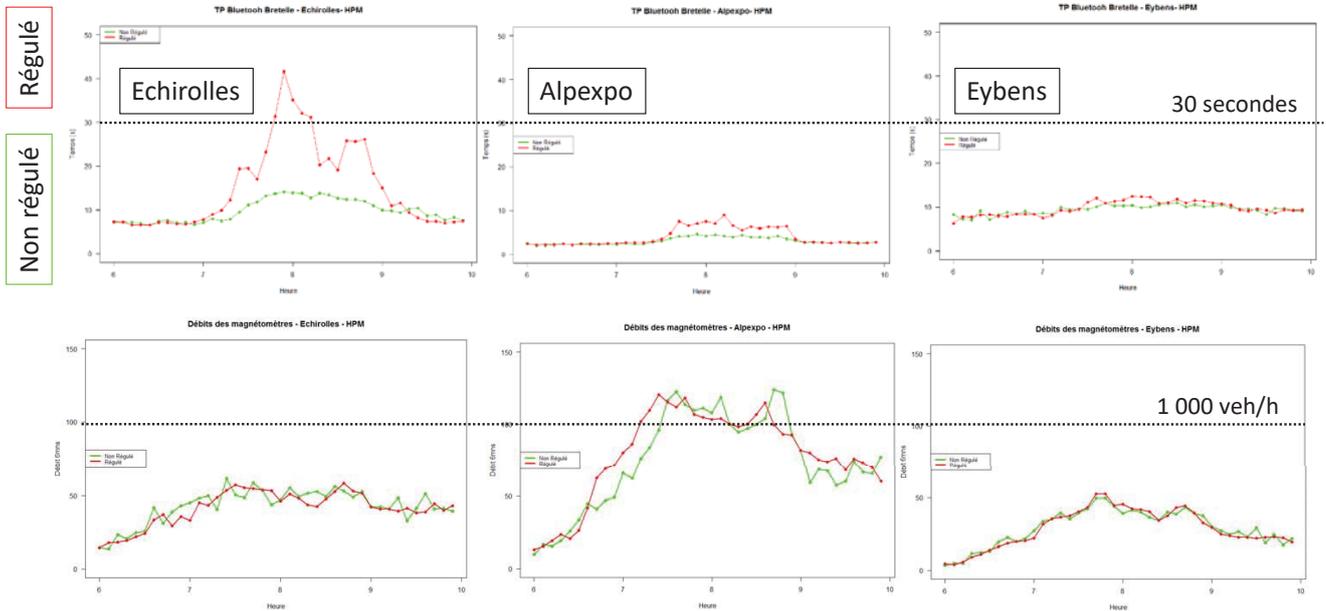


16 périodes régulées



6

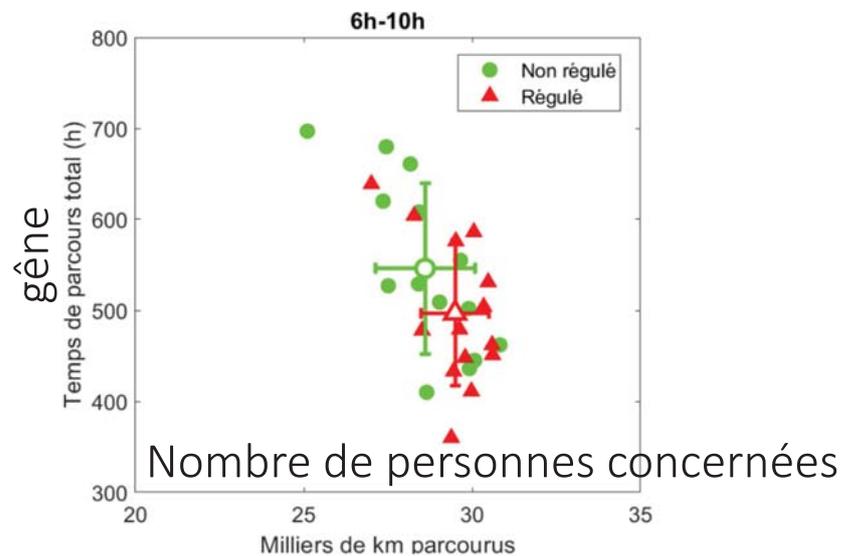
Exemple de données : Temps de parcours (en haut) et débits (en bas) 6 minutes HPM sur 3 bretelles



Principes de l'évaluation a posteriori des actions de gestion du trafic

- Différentier
 - L'évaluation du bon fonctionnement du système (pas fait ici)
 - L'évaluation du service général rendu à l'ensemble des usagers
 - L'évaluation du service rendu à chaque usager

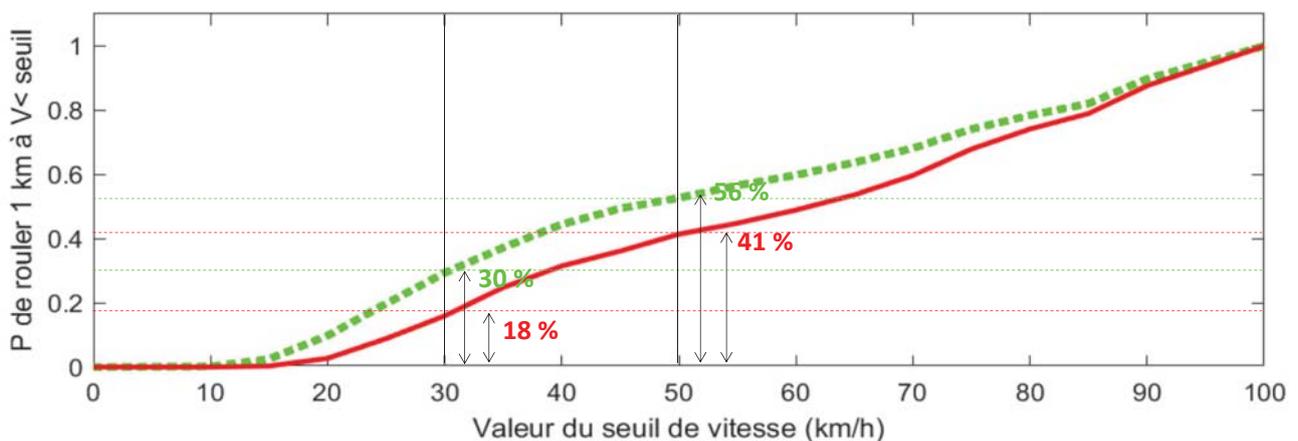
Service rendu à l'ensemble des usagers :
quantifier la gêne et le nombre de personnes concernées



9

Efficacité de la régulation d'accès
pour un usager moyen de la RN87 le matin

Proportion de km parcourus en HPM pour différents seuils de vitesse



- Un effet significatif de réduction de la congestion.

10

Ce dont nous n'avons pas parlé :

- Évaluation de l'effet sur le trafic pendant les heures de pointe du soir :
 - Très peu de congestion dans les périodes non régulées
 - D'où un effet négligeable de la régulation
- Évaluation du respect des feux des bretelles par les usagers
- Effets sur la sécurité routière (au moins dans un premier temps, des collisions arrières aux feux des bretelles ont été constatées)
- Pérennité du dispositif dans le temps

11



Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019



Merci de votre attention !

Frédéric Aliaga et Christine Buisson

frederic.aliaga@cerema.fr

christine.buisson@ifsttar.fr



Séminaire de restitution de l'ORSI Messigeo

Méthodes et outils pour l'aide à la mise en place de projets de gestion du trafic



La Défense, mardi 26 mars 2019

Etienne Hans, Cerema Centre-Est, Département Mobilités

Orsi : Opération de recherche stratégique incitative

Messigeo : Mesures et Simulation pour une Gestion Optimisée de systèmes de transport

Vision d'ensemble

13:00	13:30	Accueil café				
13:30	13:40	Introduction		Virginie	Lasserre	Cerema CE
13:40	14:15	Axe 1	Introduction à la régulation d'accès RA sur le tunnel de Toulon	Nicolas	Ditchi	Cerema Ouest
			RA sur le périphérique de Nantes	Nicolas	Ditchi	Cerema Ouest
			RA sur la rocade Sud de Grenoble	Wilhemine	Lecointre	Cerema Ouest
14:15	14:35		Méthodes et outils pour l'aide à la mise en place de projets de gestion du trafic	Etienne	Hans	Cerema CE
14:35	14:55		Monter une start-up de simulation dynamique : pourquoi, pour qui ?	Aurélien	Duret	Licit Ifsttar-ENTPE
14:55	15:15	Axe 2	Présentation de l'outil d'analyse de l'offre de transport Tempus	Aurélien	Bousquet	Cerema TV
15:15	15:45	Pause café				
15:45	16:00	Axe 3	Analyses croisées de mesures de concentration de pollution et de trafic	Christine	Buisson	Licit Ifsttar-ENTPE
16:00	16:15		Chaine de modélisation : trafic et émission de polluants	Delphine	Lejri	Licit Ifsttar-ENTPE
16:15	16:35	Axe 4	Travail sur des données issues d'expérimentations avec des véhicules connectés	Arthur	Burianne	Licit Ifsttar-ENTPE
16:35	17:15	Atelier de recueil d'idées : Quels sujets aborder dans la future coopération entre le Cerema et l'Ifsttar sur les questions de modélisation et de régulation du trafic et des déplacements ? Les participants sont invités à contribuer sur les quatre thèmes suivants successivement : (1) gestion des déplacements et transports intelligents (2) nouveaux véhicules - nouvelles infra : quelle rôle pour le gestionnaire ? (3) nouveaux véhicules - nouvelles infra : quelles implications pour la sécurité routière ? (4) modélisation et simulation Animateurs : B. Levilly, L. Prevors, F. Murard, C. Gabaude, Ch. Buisson, S. Belloche.				
17:15	17:20	Les attentes de la DGITM (à confirmer)		Stanislas	de Romond	DGITM
17:15	17:20	Conclusions et clôture		Marie-Line	Gallenne	Ifsttar DS-PAPP

Partie 1 – Évaluation a priori de l'effet des projets de gestion du trafic par la simulation dynamique :

Stream

- Développement

- Utilisation

Partie 2 – Bénéfices collatéraux de l'ORSI Messigeo par la collaboration IFSTTAR-CEREMA

- Diagnostics automatiques

- Méthodes analytiques de fonctionnement d'une infrastructure

Partie 1

Évaluation a priori de l'effet des projets de gestion du trafic par la simulation dynamique

Pour évaluer des mesures de gestion de trafic

Régulation dynamique des accès



Régulation dynamique des vitesses



Interdiction dépassement PL

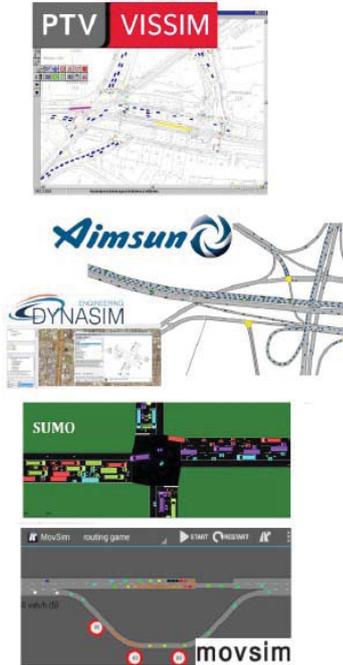


Gestion dynamique de voies



Un outil de simulation dynamique mésoscopique

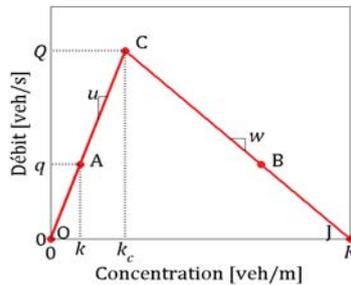
Existence de nombreux logiciels de simulation microscopique du trafic ...



... basés sur le comportement individuel des usagers.



Or, des modèles macroscopiques basés sur peu de paramètres existent pour décrire le trafic dans son ensemble.



En particulier, le modèle LWR se base sur un diagramme fondamental défini par la concentration, la vitesse libre et la concentration maximale des véhicules à l'arrêt.

Le Cerema et l'Ifsttar développent un outil dynamique simplifié basé sur ce modèle.

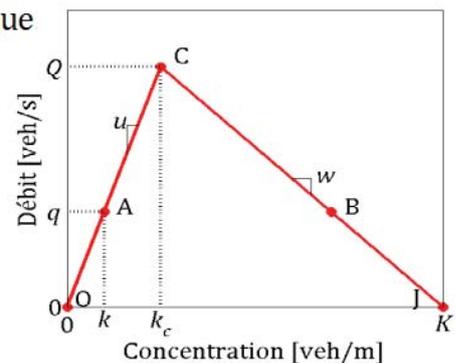
Résolution événementielle du modèle LWR



Résolution mésoscopique (événementielle) sur un réseau :

- Un événement = passage d'un véhicule à un nœud
- Les événements sont traités dans l'ordre chronologique
- $t_{\text{passage}} = \max(t_{\text{arrivée}}, t_{\text{départ_possible}})$

$$\begin{cases} t_{\text{arrivée}}(n) = t_{\text{passage}}(n) + L / u & \text{FLUIDE} \\ t_{\text{départ_possible}}(n) = t_{\text{passage}}(n - L \cdot K) + L / w & \text{CONGESTION} \end{cases}$$



Résolution événementielle du modèle LWR



Inconvénients :

- Prise en compte non-explicite de certains phénomènes micro (variabilité des vitesses, changements de voie, etc.)
- Certaines évolutions sont inenvisageables / extrêmement coûteuses

Avantages :

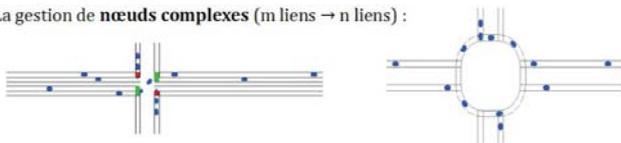
- Prise en compte de caractéristiques macro et maîtrise totale des phénomènes
- Temps de calcul proportionnel au nombre de nœuds traversés par les véhicules au cours de la simulation
- Accès direct au temps de parcours des véhicules (par lien, par OD)
- Accès au code source (nombreux développements possibles)

Aménagements intégrables dans le modèle

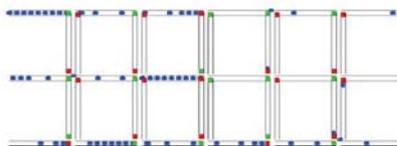
La gestion de plusieurs classes de véhicules :



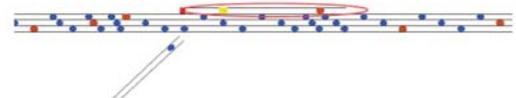
La gestion de nœuds complexes (m liens → n liens) :



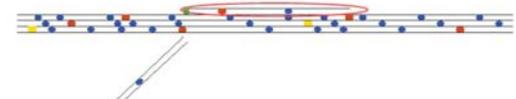
La gestion dynamique de l'affectation des véhicules sur le réseau :



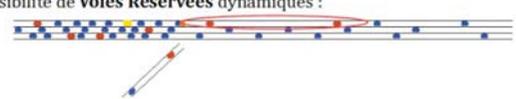
La possibilité de Voies Auxiliaires Réservées dynamiques :



La possibilité de Voies Auxiliaires dynamiques :



La possibilité de Voies Réservées dynamiques :



Régulation dynamique des accès



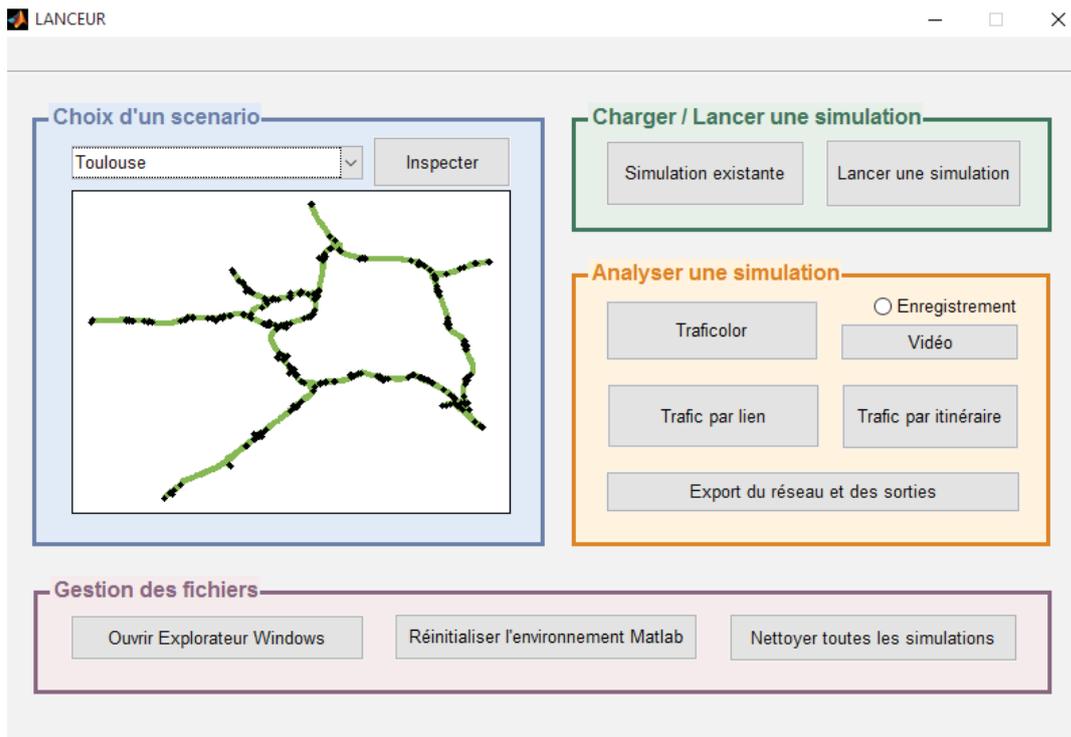
Régulation dynamique des vitesses



Gestion dynamique de voies

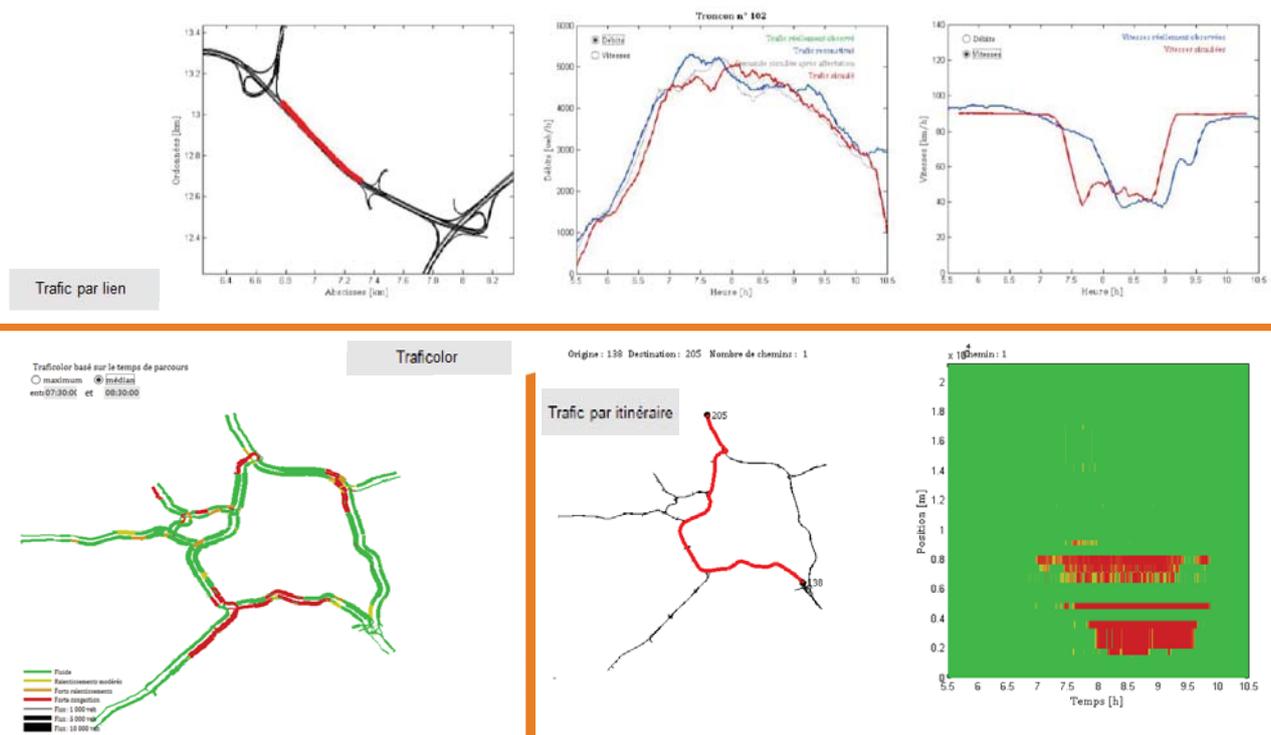


Interface graphique pour utilisateur du simulateur



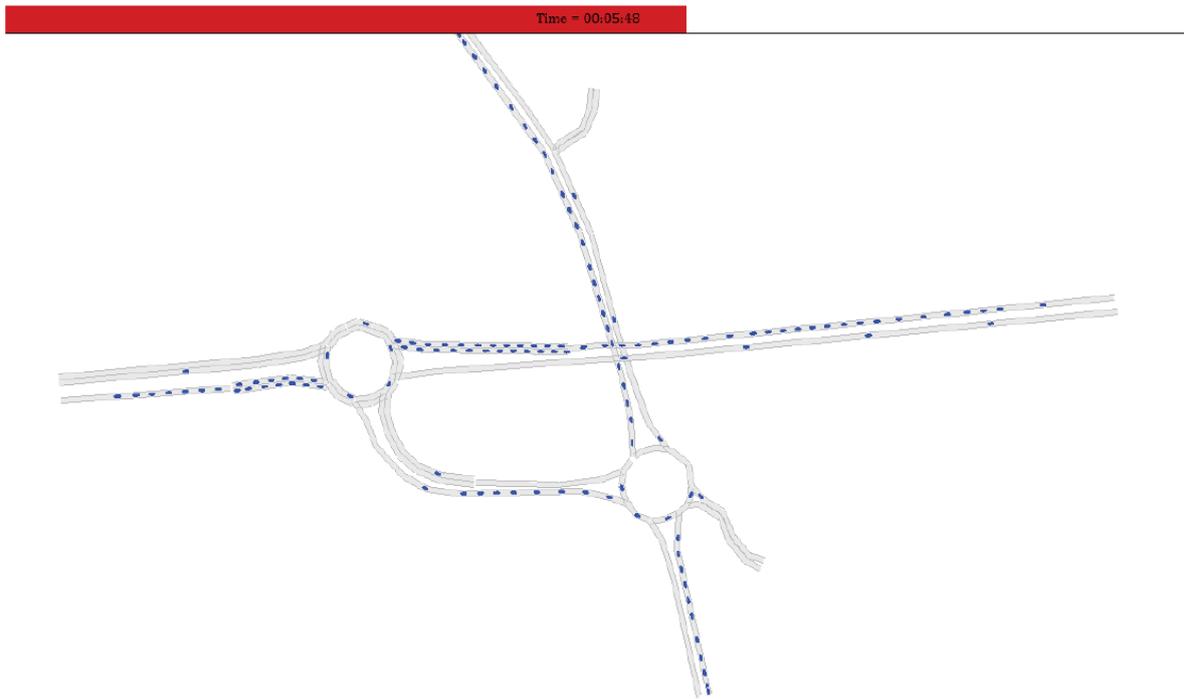
Axe 1 – Méthodes et outils en support des projets de gestion de trafic

Les sorties du modèle

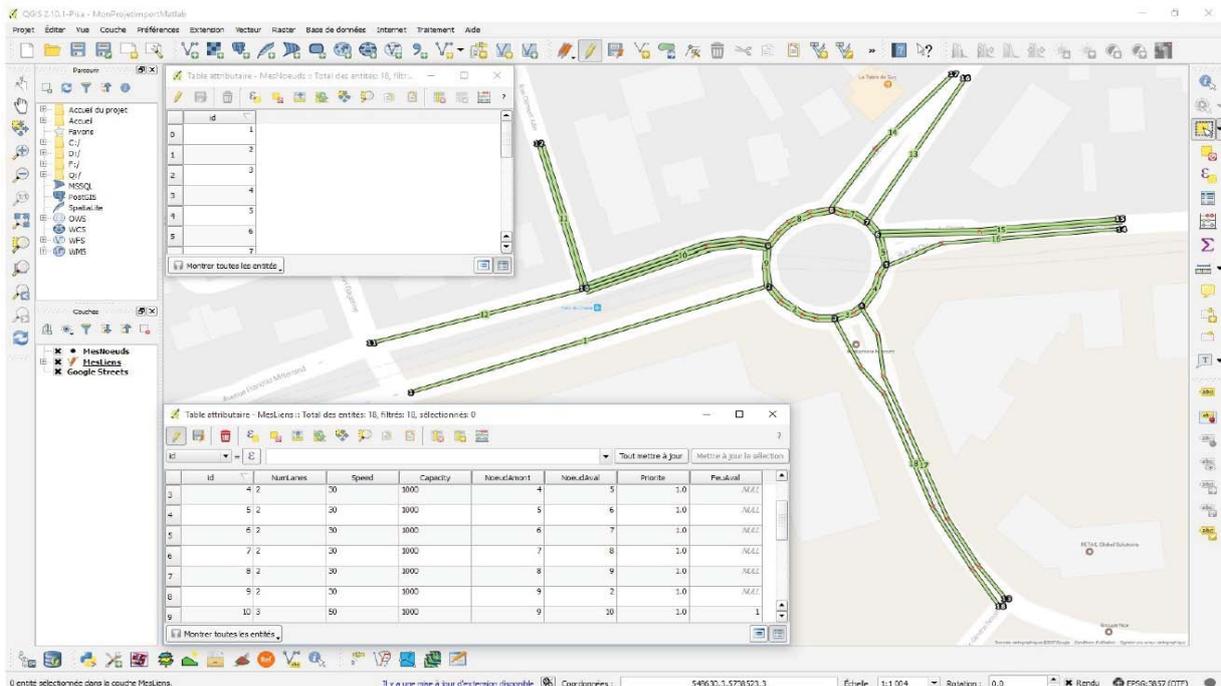


Axe 1 – Méthodes et outils en support des projets de gestion de trafic

Les sorties du modèle



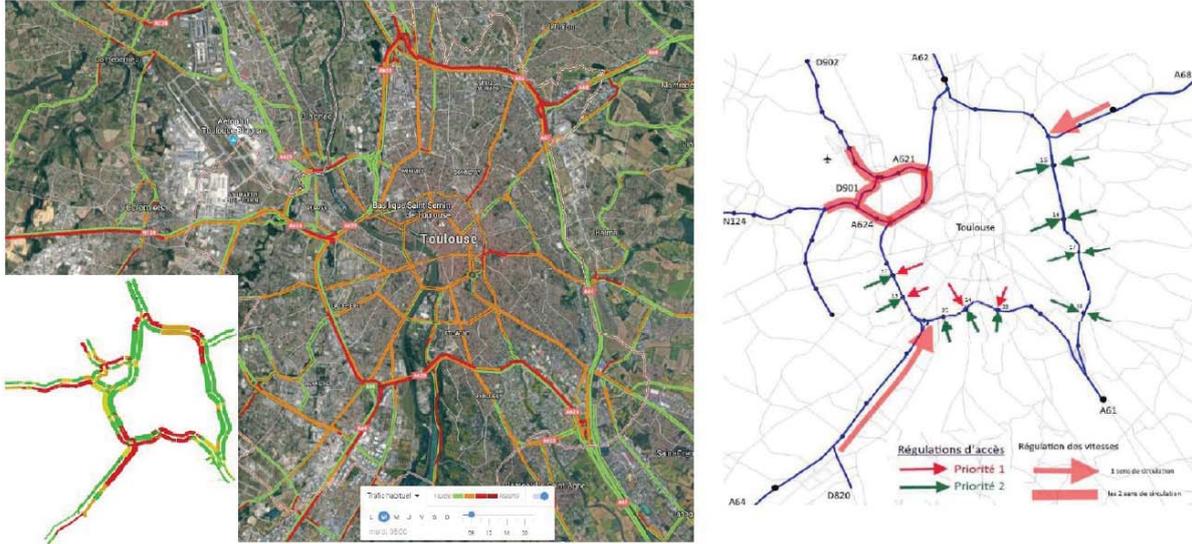
Couplage à une interface d'édition de réseau sous Qgis



Application : SDAGT de Toulouse

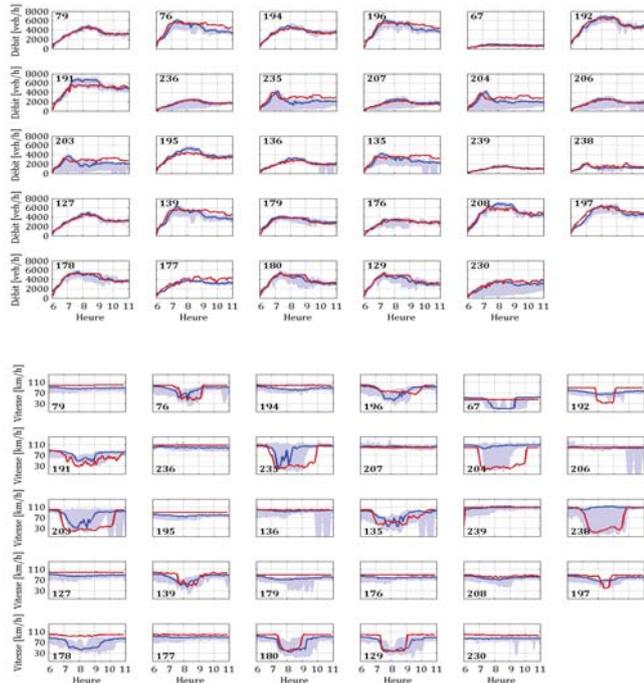
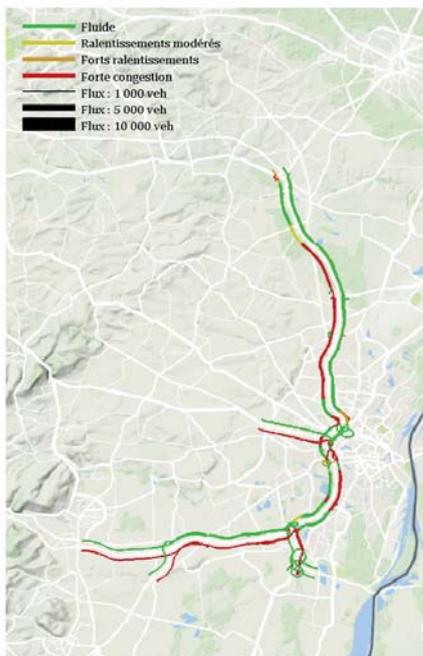
L'outil a été utilisé pour la phase 3 (évaluation des mesures par simulation) du SDAGT de Toulouse.

Il a été calé à partir de données boucles en situation de référence. Des mesures y ont ensuite été intégrées pour être comparées à cette référence.



Application : requalification d'A35 à Strasbourg

Scénario de référence sur la période 7h - 9h.



Valorisations

Communications en conférences

- Hans, E., 2018. Simulation mésoscopique sur de larges réseaux périurbains. Congrès ATEC-ITS, 24 - 25 janvier, Montrouge, France.

Ouvrages

- Guide Théorie du trafic sur voie réservée. En cours d'édition.
- Hans, E., 2018, Guide à l'usage des utilisateurs et développeurs de la plate-forme Stream. 62p., non publié.

Études opérationnelles

- Étude en simulation du Schéma directeur d'agglomération pour la gestion du trafic (SDAGT) de Toulouse : Réalisation de l'étude, 2017, Cerema, pour le compte de la DIR Sud-Ouest.
- Étude en simulation dans le cadre de la requalification d'A4-A35 à Strasbourg : Réalisation de l'étude, 2017, Cerema, pour le compte de la DREAL Grand Est.
- Étude d'un alternat à la Charité-sur-Loire, 2017, Cerema, pour le compte de la DIR Centre-Est.

Diffusion de Stream au Cerema et à l'Ifsttar

Ce qui a été fait

- 15 utilisateurs formés au Cerema, 5 utilisateurs à l'Ifsttar
- des codes sources stables et ouverts aux utilisateurs
- un guide support à l'usage des utilisateurs et développeurs de la plate-forme Stream

Les limites, et ce qui reste à faire

- Des utilisateurs au Cerema pas complètement autonomes (ils le sont une fois le modèle mis en place)
- un code sous Matlab, logiciel payant, au langage non maîtrisé par tous, ce qui freine la diffusion de l'outil dans les antennes du Cerema, et auprès des DIR
- un simulateur avec des limites (divergent problématique à cause des sections en mono-*pipe*, gestion des événements empêchant de considérer des véhicules aux caractéristiques différentes)
- Une stratégie autour de cet outil à définir (changement de langage, mise en open source, interopérabilité avec d'autres logiciels comme Symuvia, partage avec d'autres acteurs) ?

Partie 2

Bénéfices collatéraux de l'ORSI Messigeo par la collaboration IFSTTAR-CEREMA

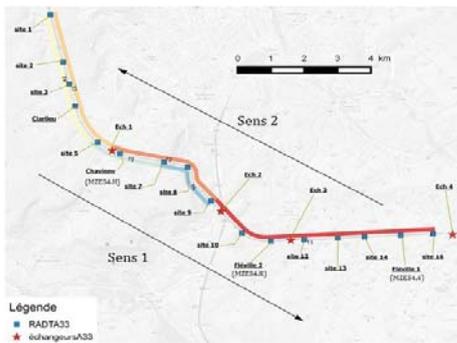
Partie 2

Bénéfices collatéraux de l'ORSI Messigeo par la collaboration IFSTTAR-CEREMA

- Analyse de données automatisée pour le diagnostic de réseau

Contexte : des réseaux et des données

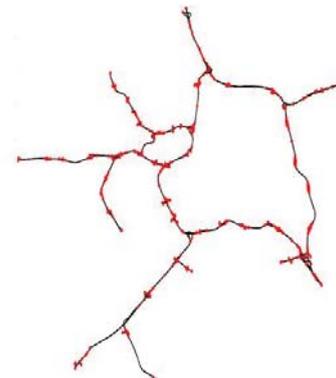
- Grande similarité des réseaux des DIR
- Grande quantité de données des stations de comptage
- Des phases de diagnostic de fonctionnement du réseau lourdes et coûteuses
→ Possibilité d'automatiser le processus



(a) A33 à Nancy



(b) A4-A35 à Strasbourg



(c) Réseau ERATO à Toulouse

Analyse isolée d'une station de comptage

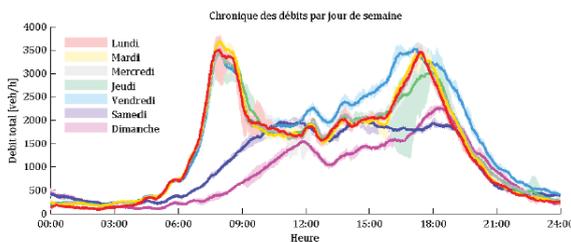
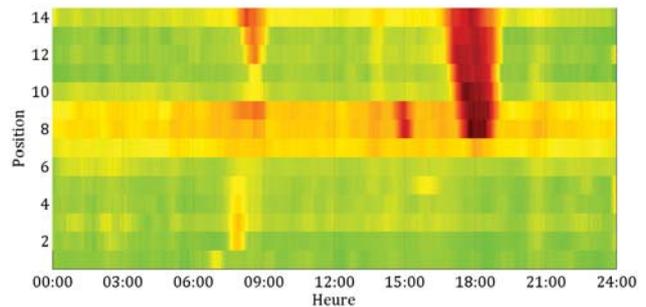
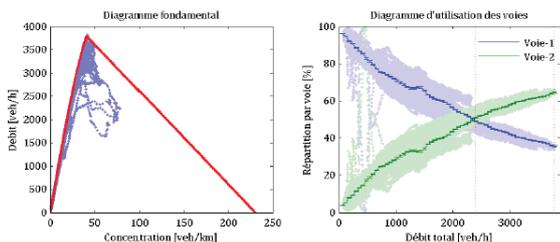
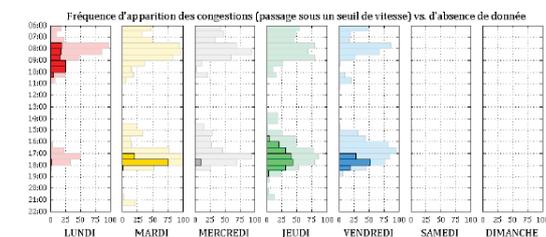


Tableau de bord avec les indicateurs classiques

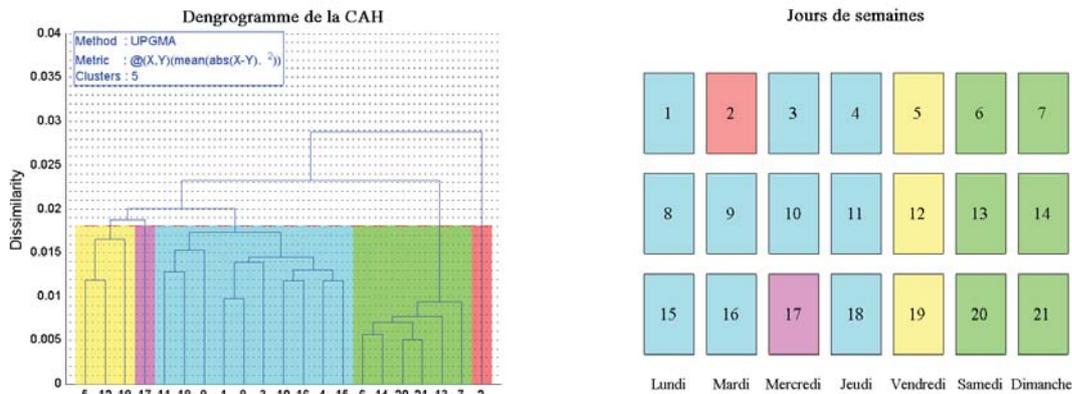
- Chroniques journalières
- Planning de congestion
- Diagramme fondamental
- Diagramme d'utilisation des voies

Diagramme espace-temps en vitesse :

- Une autre visualisation classique du fonctionnement d'une infrastructure
- Pratique pour des infrastructures linéaires mais compliqué pour des réseaux maillés



Méthode de classification des jours (CAH)

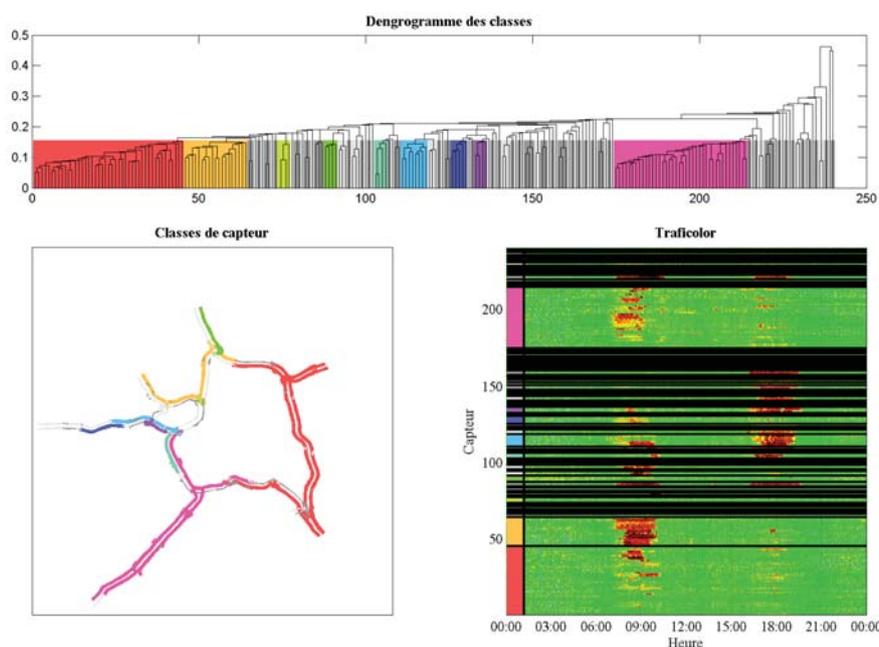


Bonne classification compréhensible :

- Les week-ends très fluides
- Les vendredi très saturés dans les deux sens de circulation
- Les jours de semaine congestionnés : deux jours de congestion exceptionnelle

Méthode de classification de zones (CASHOR*)

* Classification Ascendante Spatiale Hiérarchique d'Objets de Réseau



Partie 2

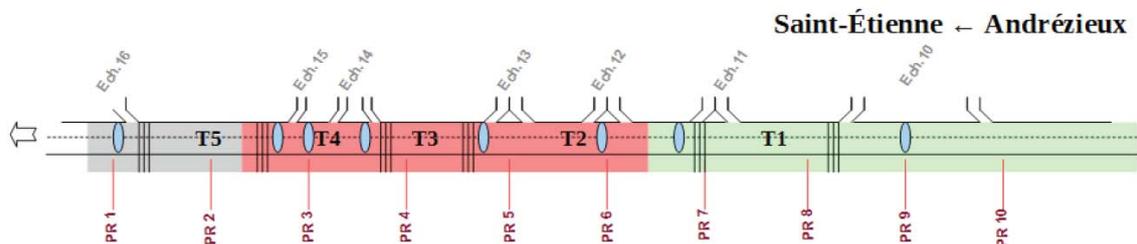
Bénéfices collatéraux de l'ORSI Messigeo par la collaboration IFSTTAR-CEREMA

- Analyse de données automatisée pour le diagnostic de réseau
- Paramétrage de régulation dynamique des vitesses

Application aux études préalables de régulation des vitesses

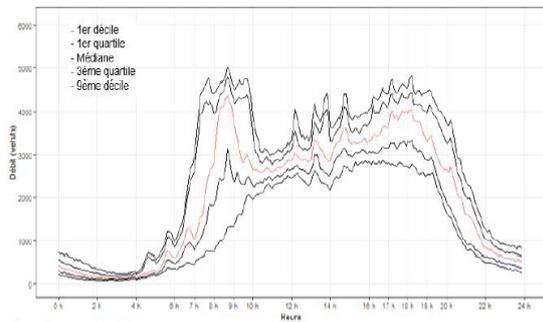
Traficolor : Il permet de déterminer les zones congestionnées

DF et DUV : Ils permettent de calibrer l'algorithme 1

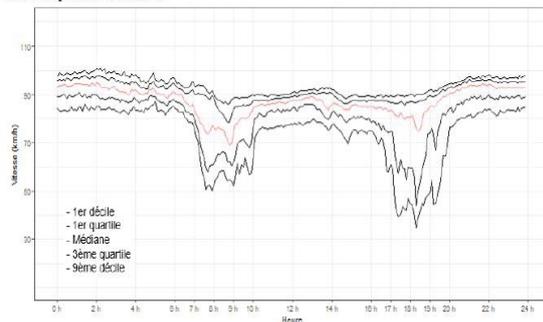


Sens	Section	Boucle de référence Algorithme 1	Paramétrage Algorithme 1					Boucle de référence Algorithme 2
			Da1	Cx	Vc	Df	Da2	
1	T1	PR 9+000	2520	4140	90	0,8	3300	PR 6+700
1	T2	PR 6+700	3960	4680	85	0,8	3750	PR 4+850
1	T3	PR 4+850	2880	3180	70	0,8	2550	PR 3+500
1	T4	PR 3+500	2160	2820	85	0,8	2260	PR 2+750
1	T5	PR 2+750 (à réparer)	-	-	-	-	-	PR 1+000

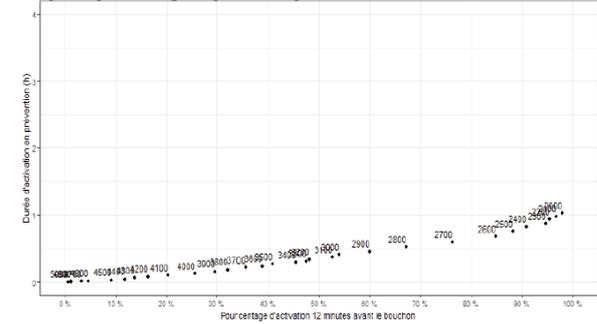
Estimation du paramétrage d'une régulation des vitesses par l'analyse des données historiques



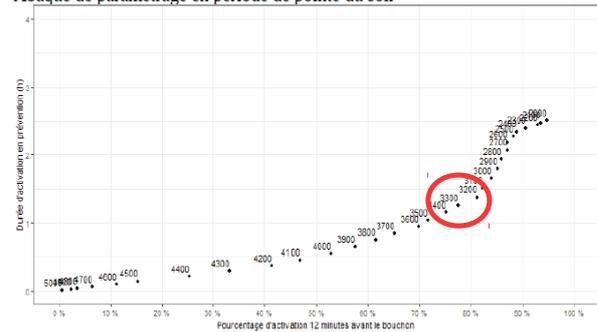
Chroniques de vitesses



Abaque de paramétrage en période de pointe du matin



Abaque de paramétrage en période de pointe du soir



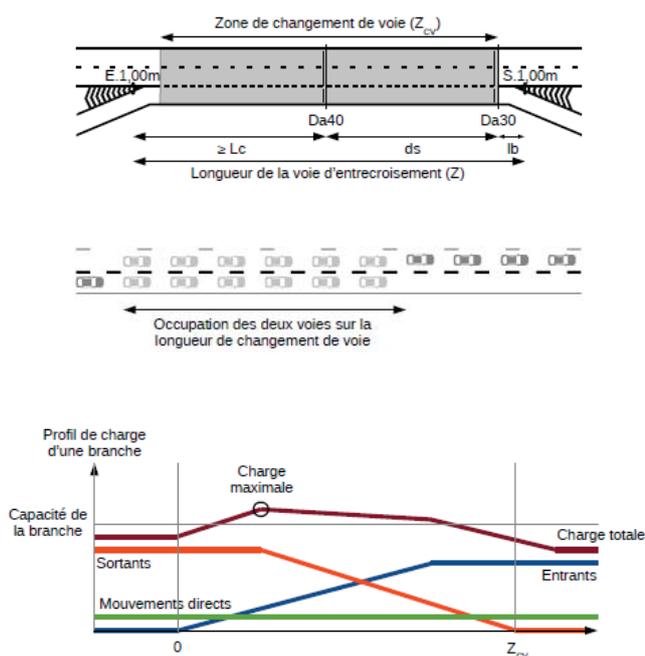
*source : Paramétrage de l'algorithme de prévention de congestion de la régulation dynamique des vitesses de l'A72 à Saint-Etienne, 2018, par Nicolas Pelé

Partie 2

Bénéfices collatéraux de l'ORSI Messigeo par la collaboration IFSTTAR-CEREMA

- Analyse de données automatisée pour le diagnostic de réseau
- Paramétrage de régulation dynamique des vitesses
- Élaboration de modèles de flux simplifiés pour le calcul à la main

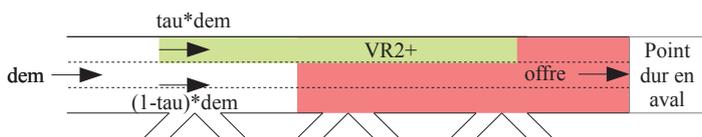
Estimation du fonctionnement d'un d'entrecroisement



- besoin d'une méthode générique et simple de calcul du fonctionnement d'un entrecroisement complexe
- Cadre de refonte du guide des accès sur VSA
- Hypothèse d'un changement de voie non ponctuel d'un usager
- Hypothèse qu'un usager occupe les deux voies de circulation pendant ce changement de voie
- on appelle charge le débit résultant de l'occupation de la voie par les véhicules, même ceux changeant de voie
- Calcul de la charge sur chaque voie par une hypothèse d'uniformité de la position de changement de voie le long de l'entrecroisement
- Calcul de la charge totale de l'infrastructure, avec détection de dépassement de la capacité d'une voie de l'entrecroisement

*source : Guide Voies structurantes d'agglomération : Fonctionnement des accès

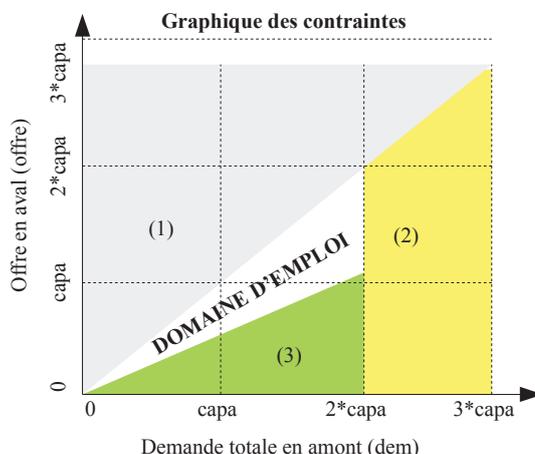
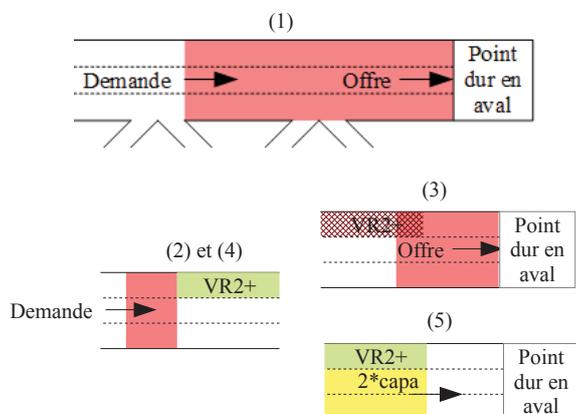
Estimation de la pertinence d'une voie réservée par flux



Notations

- dem : Demande de trafic en amont de la VSA (veh/h)
- offre : capacité du point dur en aval (veh/h)
- capa : capacité d'une voie de la section courante (veh/h)
- tau : taux de covoiturage (V2+) par rapport à tous les véhicules

Illustration des contraintes



Graphique des contraintes

Les trois conditions principales indiquées précédemment peuvent être tracées dans un graphique (dem, offre). Les zones en couleur sont les zones interdites car signifiant que les trois conditions ne sont pas respectées. Il apparaît que le domaine d'emploi de la VR2+ dépend du taux de covoiturage qu'il est possible d'obtenir sur l'infrastructure concernée.

Valorisations

Communications en conférences

- Hans, E., 2019. Méthode d'évaluation des trafics sur voies réservées : Théorie et évaluation. Journée « Quelles évolutions dans la méthodologie de conception des projets routiers », COTITA, 31 janvier, Bron, France.
- Ancelet, O., Hans, E., 2018. Évaluation du fonctionnement des entrecroisements sur voies structurantes d'agglomération. Congrès ATEC-ITS, 24 - 25 janvier, Montrouge, France.
- Hans, E., Courbon, T., Lopez, C., 2018. Caractérisation automatique des motifs de congestion à partir de données boucles sur des réseaux périurbains. **Congrès ATEC-ITS**, 24 - 25 janvier, Montrouge, France.
- Lopez, C., Hans, E., Courbon, T., 2018. Caractérisation automatique des motifs de congestion à partir de données boucles sur des réseaux périurbains. **1ères Rencontres Francophones Transport Mobilité**, 6 - 8 juin, Vaulx-en-Velin, France.
- Courbon, T., Hans, E., 2017. Valorisation des bases de données trafic pour la prévision de la congestion. **Congrès ATEC-ITS**, 24 - 25 avril, Montrouge, France.
- Troubetzky, S., Hans, E., 2017. Mise en place d'une régulation des vitesses sur la rocade Est de Lyon. **Congrès ATEC-ITS**, 24 - 25 avril, Montrouge, France.

Ouvrages

- Guide Voies structurantes d'agglomération : Fonctionnement des accès. En cours d'édition.
- Guide Théorie du trafic sur voie réservée. En cours d'édition.

Études opérationnelles

- Régulation dynamique des vitesses sur A72 : Conception d'une nouvelle méthodologie de paramétrage de l'algorithme par l'exploitant, 2018, Cerema, pour le compte de la DIR Centre-Est.
- Étude d'opportunité d'une voie réservée au covoiturage sur A43 par la simulation dynamique : Évaluation d'un scénario de voie réservée en sens contraire, 2018, Cerema, pour la DIR Centre-Est.
- Régulation dynamique des vitesses sur RN346 : Évaluation a posteriori, 2018, Cerema, pour le compte de la **DIR Centre-Est**.
- Régulation dynamique des vitesses sur A72 : Détermination du sectionnement et paramétrage de l'algorithme, 2017, Cerema, pour le compte de la **DIR Centre-Est**.
- Régulation dynamique des vitesses sur RN201 : Détermination du sectionnement et paramétrage de l'algorithme, 2017, Cerema, pour le compte de la **DIR Centre-Est**.
- Système d'Aide à la Gestion de Trafic SAGACITE : suivi de la conception du système intégrant les algorithmes de régulation des vitesses et contrôle des sorties, 2016, Cerema, pour le compte de la **DIR Centre-Est**.
- Régulation dynamique des vitesses sur A33 : Avis sur le sectionnement et paramétrage de l'algorithme, 2016, Cerema, pour le compte de la **DIR Est**.
- Régulation dynamique des vitesses sur A63 : Paramétrage de l'algorithme, 2016, Cerema, pour le compte de la **DIR Atlantique**.

Quelques sujets pour construire la stratégie de demain

Poursuite d'un espace de collaboration entre services publics

- Collaboration Ifsttar – Cerema : fondamentale pour le transfert opérationnel
- Intégration des exploitants (DIR, services déconcentrés, collectivités) dans la collaboration

Généraliser une logique produit

- Tempus, Stream, Traps, bien d'autres codes métier, Symuvia
- Penser interopérabilité par des formats de données standards
- Capitaliser méthodes, simulateurs, traitements de données par des codes informatiques (privilégier le langage python, et les rendus sous Qgis pour faciliter le partage)
- Coordonner les rédacteurs de guide avec les développeurs d'outils
- Les thématiques : couplage statique-dynamique, couplage trafic-émission, ZFE, algo (VR2+, VA)

Une stratégie et des principes à acter

- Le partage de la propriété intellectuelle entre Cerema et Ifsttar
- Choix d'une logique open source (loi Le Maire), ou un modèle de rente
- Des développements internes et isolés, ou des partenariats avec des acteurs privés

Séminaire de restitution de l'ORSI Messigeo
Méthodes et outils pour l'aide à la mise en place
de projets de gestion du trafic



La Défense, mardi 26 mars 2019

Etienne Hans, Cerema Centre-Est Département Mobilités

Orsi : Opération de recherche stratégique incitative

Messigeo : Mesures et Simulation pour une Gestion Optimisée de systèmes de transport



Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019



LABORATOIRE D'INGÉNIERIE
CIRCULATION TRANSPORTS

**MONTER UNE STARTUP
DE SIMULATION DYNAMIQUE**

—
POURQUOI, COMMENT, POUR QUI?

Aurélien DURET
Aurelien.DURET@ifsttar.fr



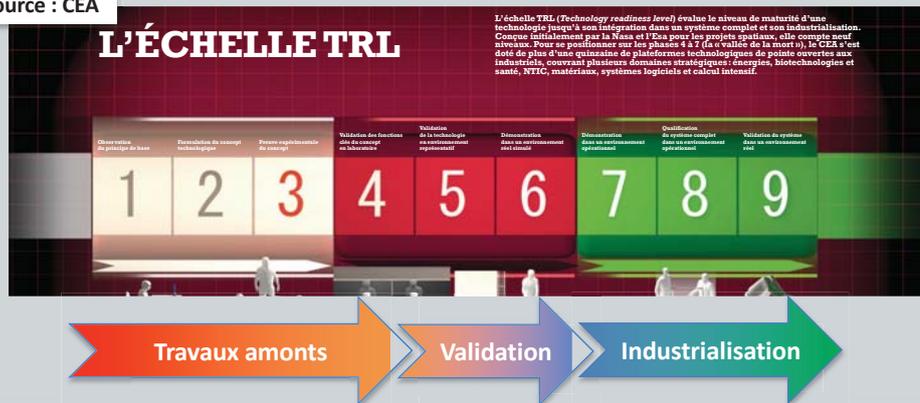
IFSTTAR

Valorisation de travaux de R & I

IFSTTAR et CEREMA

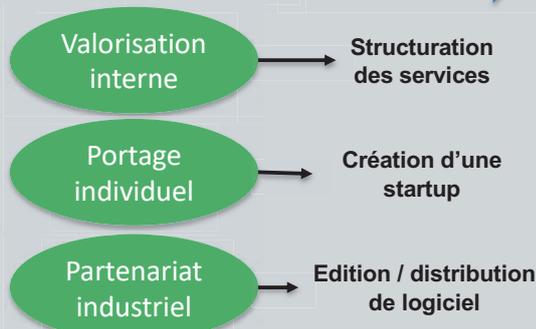
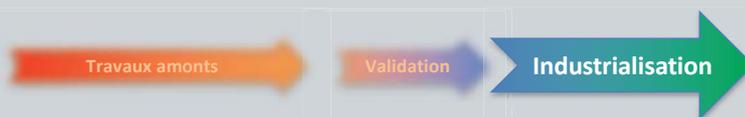
- Production de recherche et d'innovation
- Des solutions testées en « laboratoire »
- Comment valoriser les nouvelles solutions ?
→ Cela dépend du niveau de leur **maturités technologiques**

Source : CEA

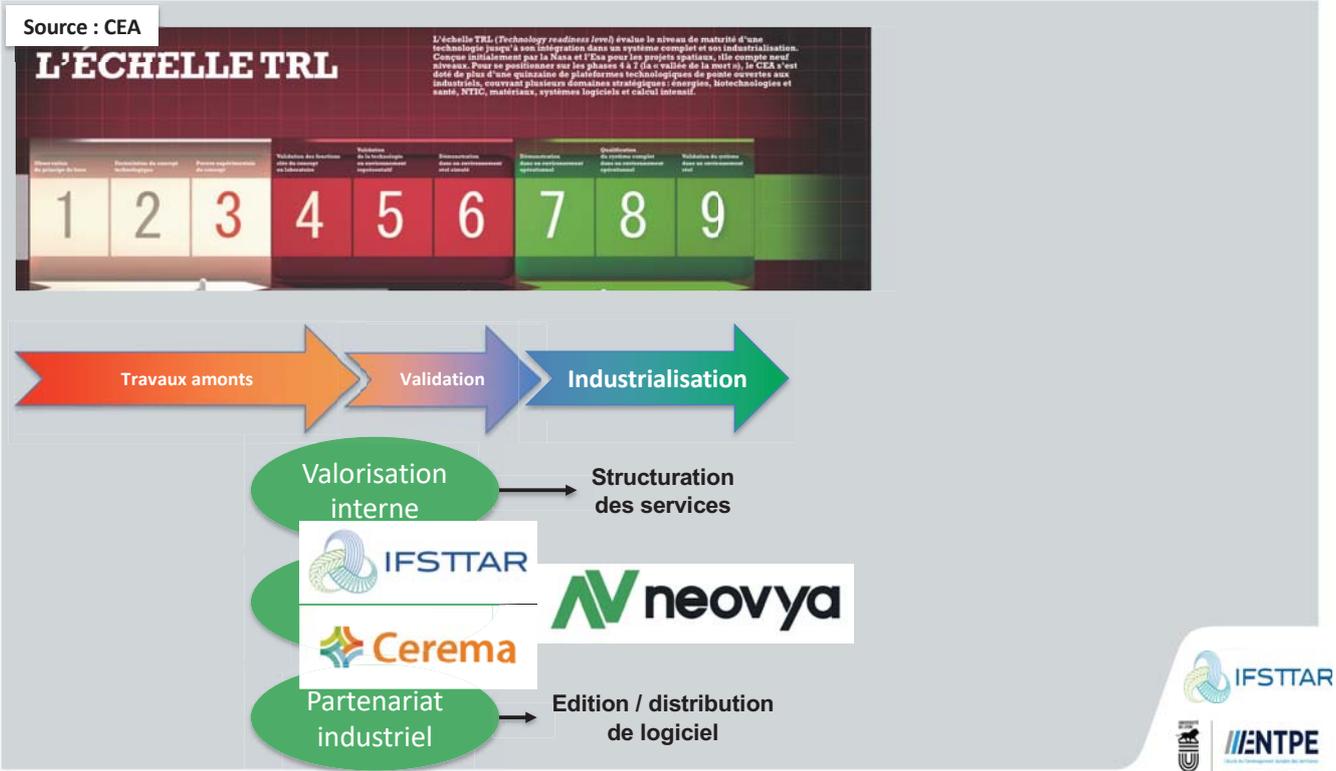


3 formes de valorisation

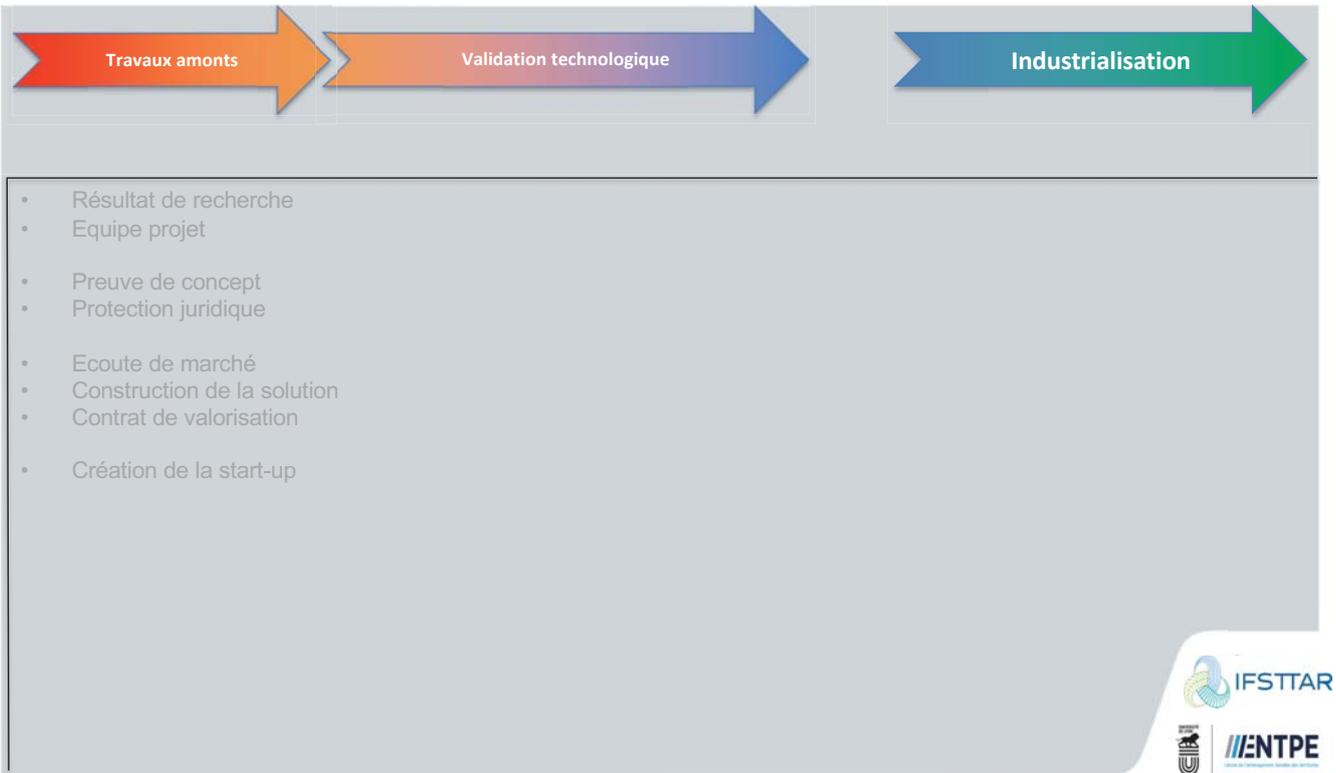
Source : CEA



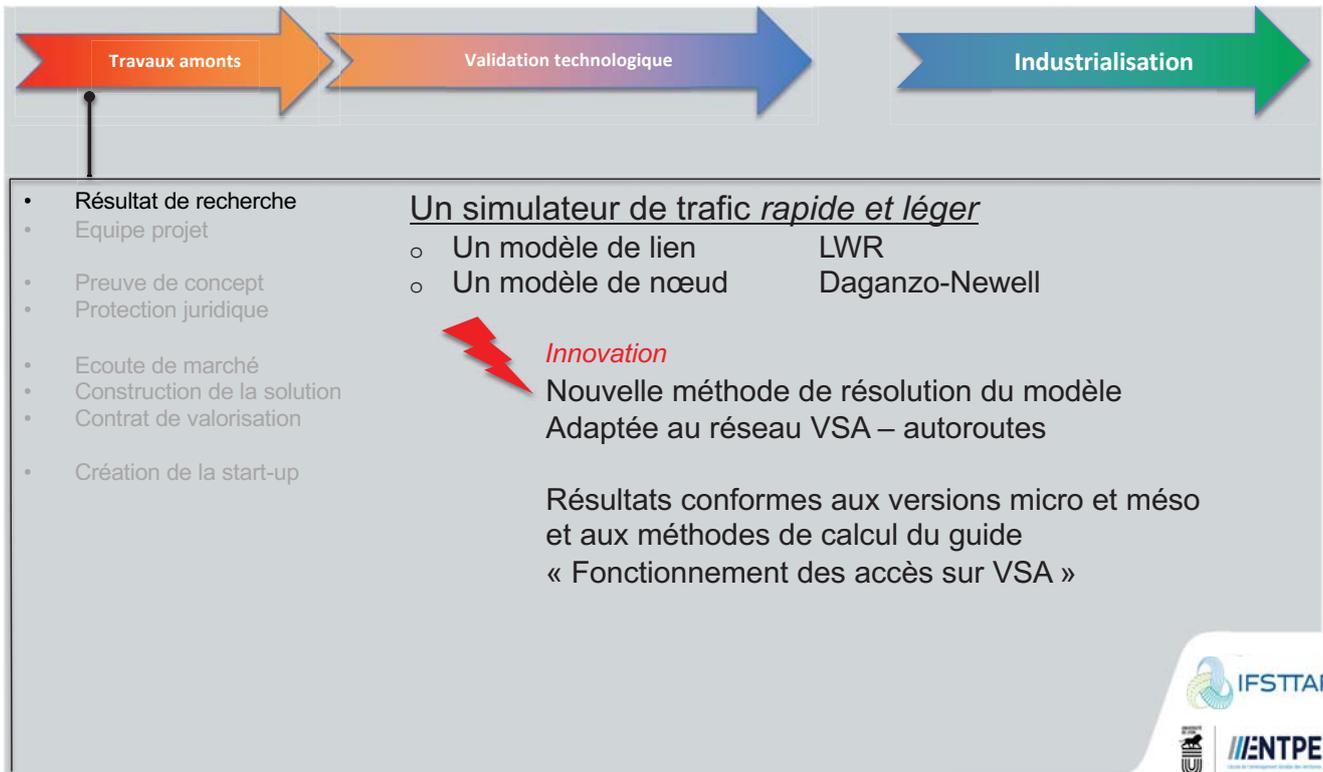
Focus sur la création d'une startup



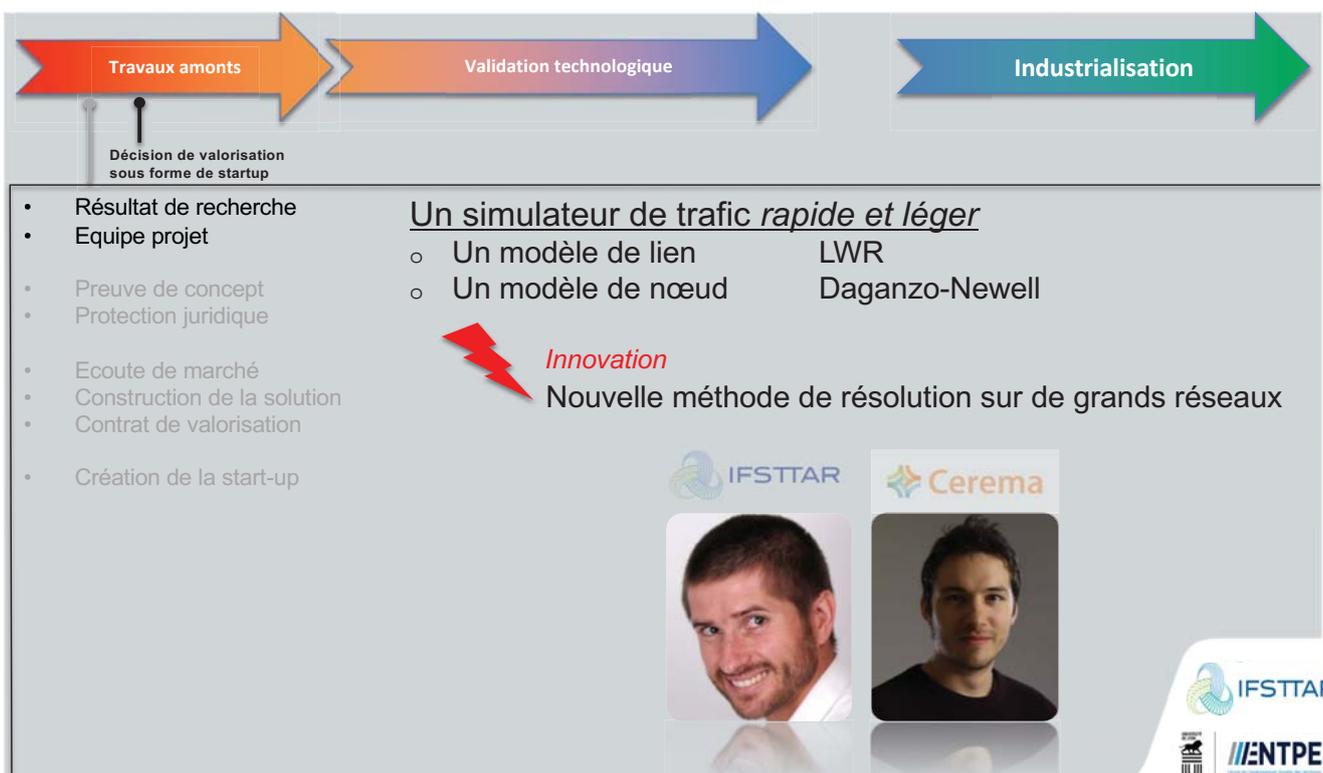
Processus de création de neovya



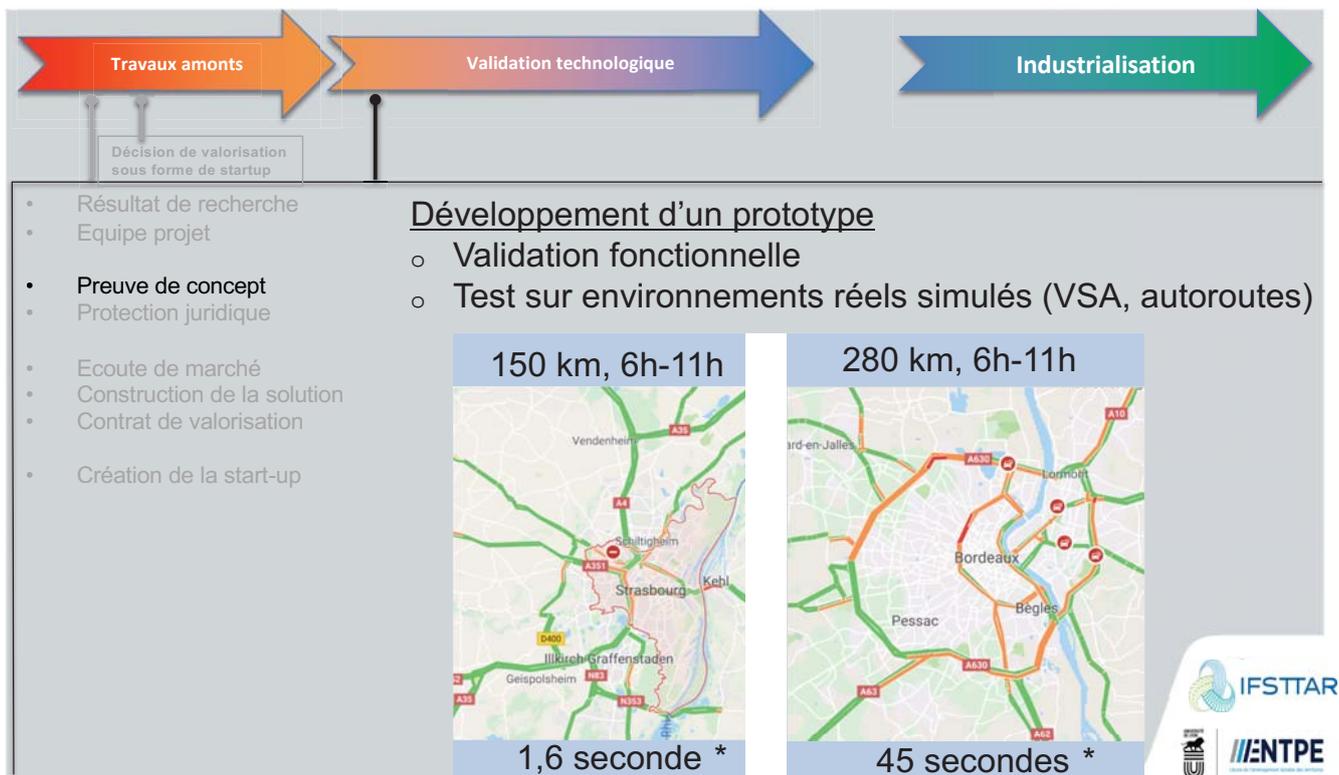
Processus de création de



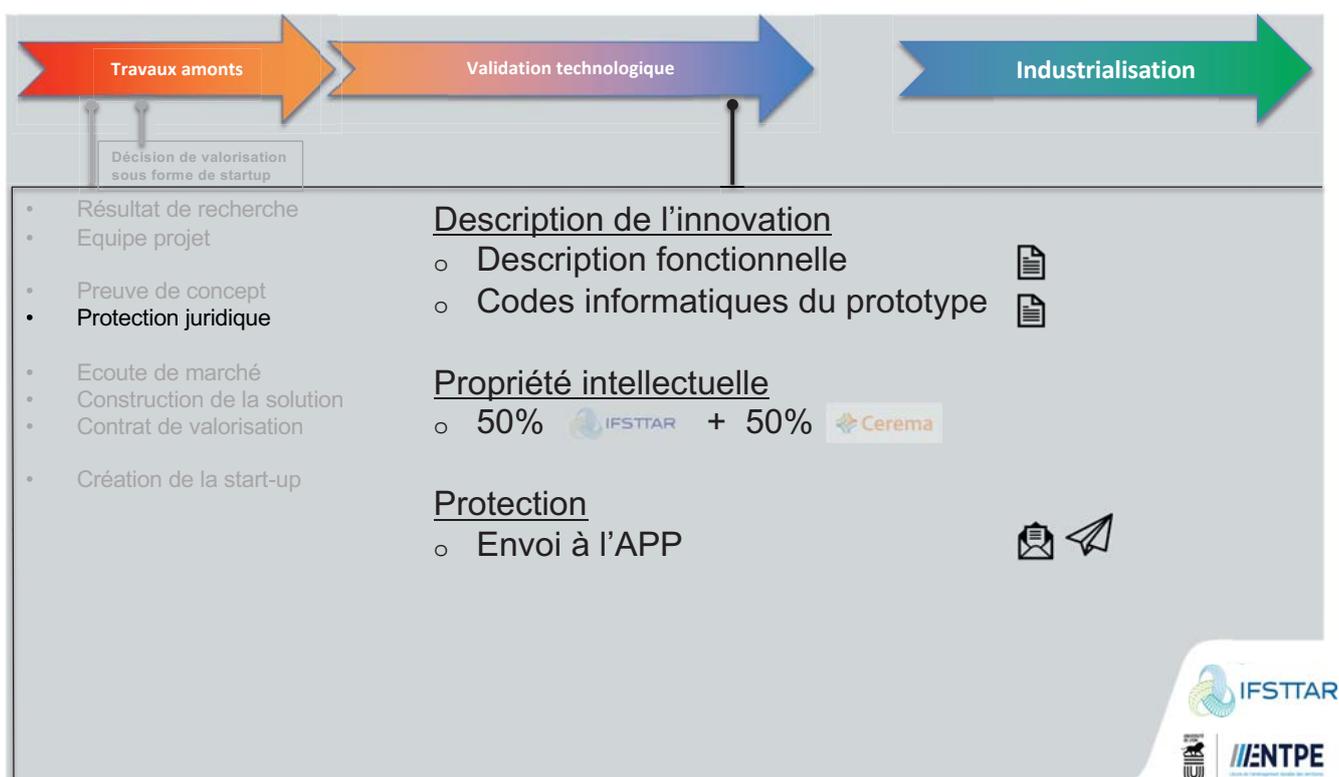
Processus de création de



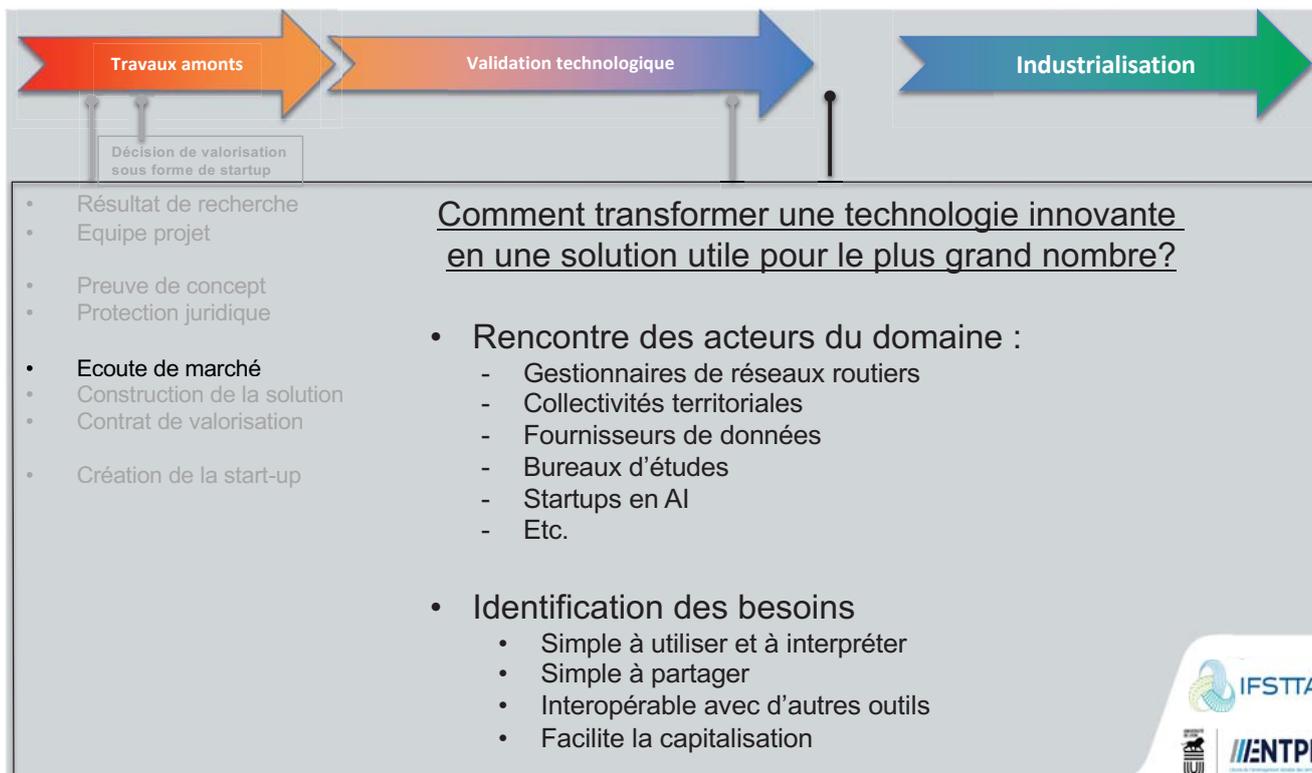
Processus de création de



Processus de création de



Processus de création de



Solution proposée : simulateur en web service



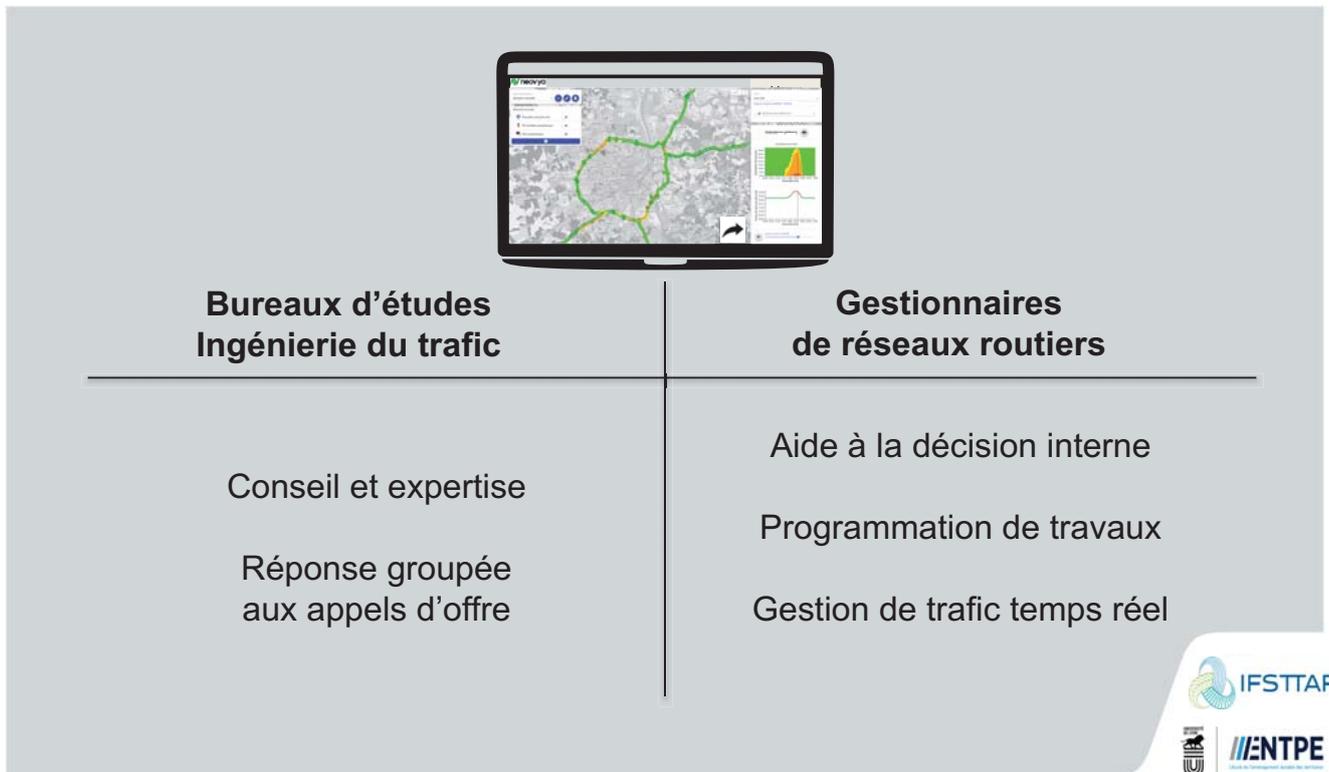
Solution proposée : simulateur en web service



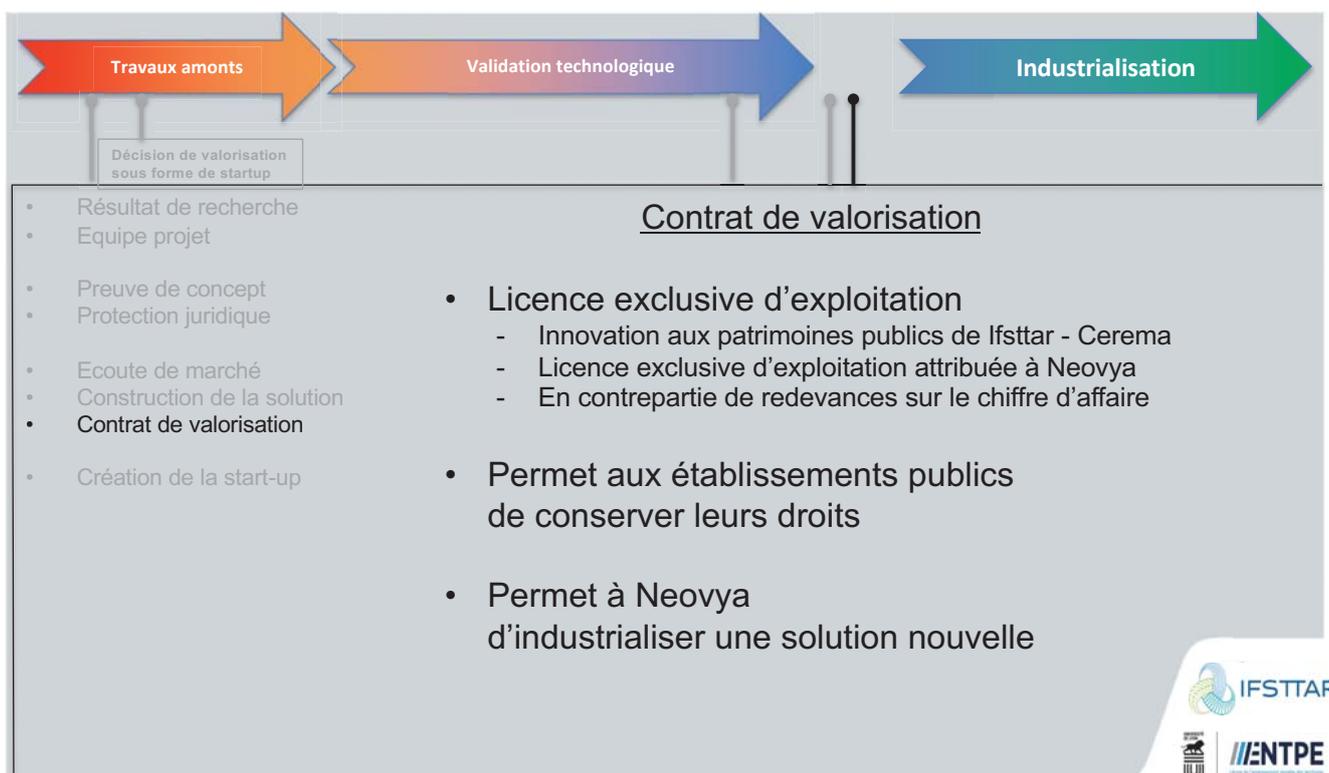
Solution proposée : simulateur en web service



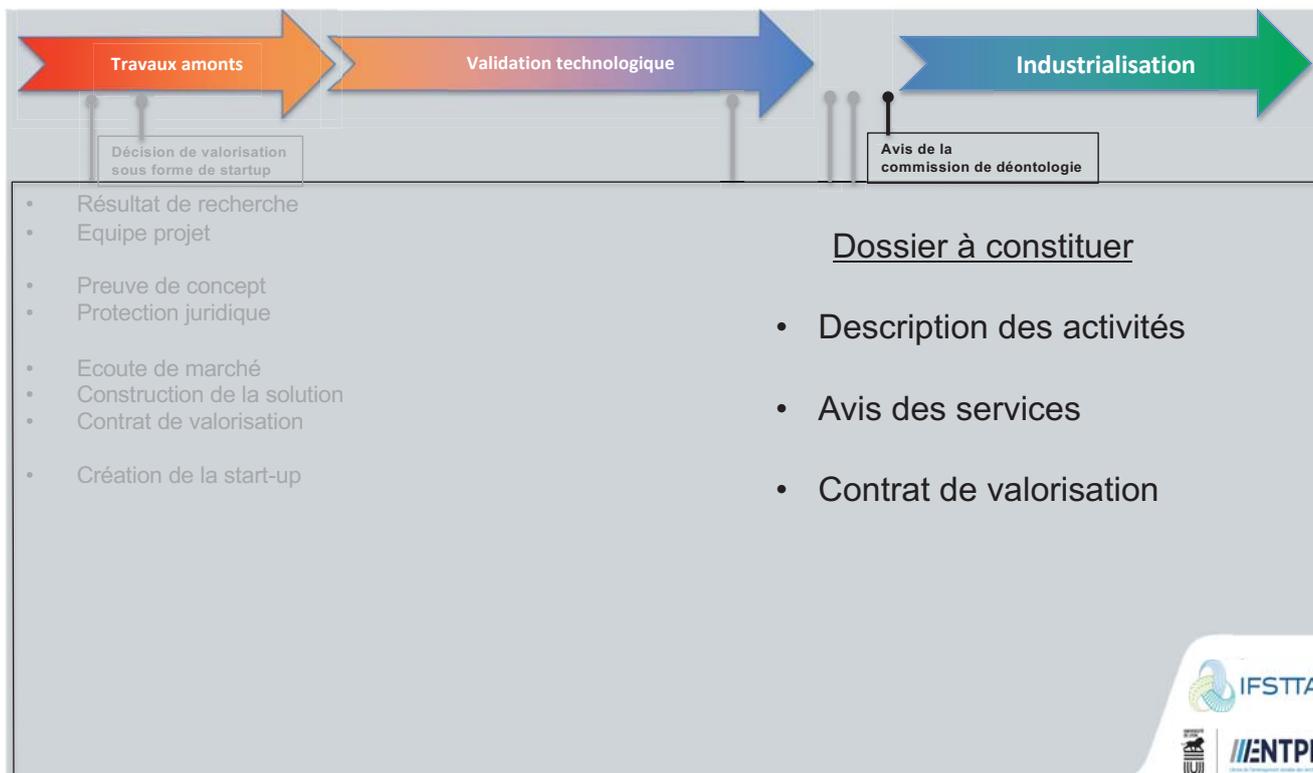
Solution proposée : simulateur en web service



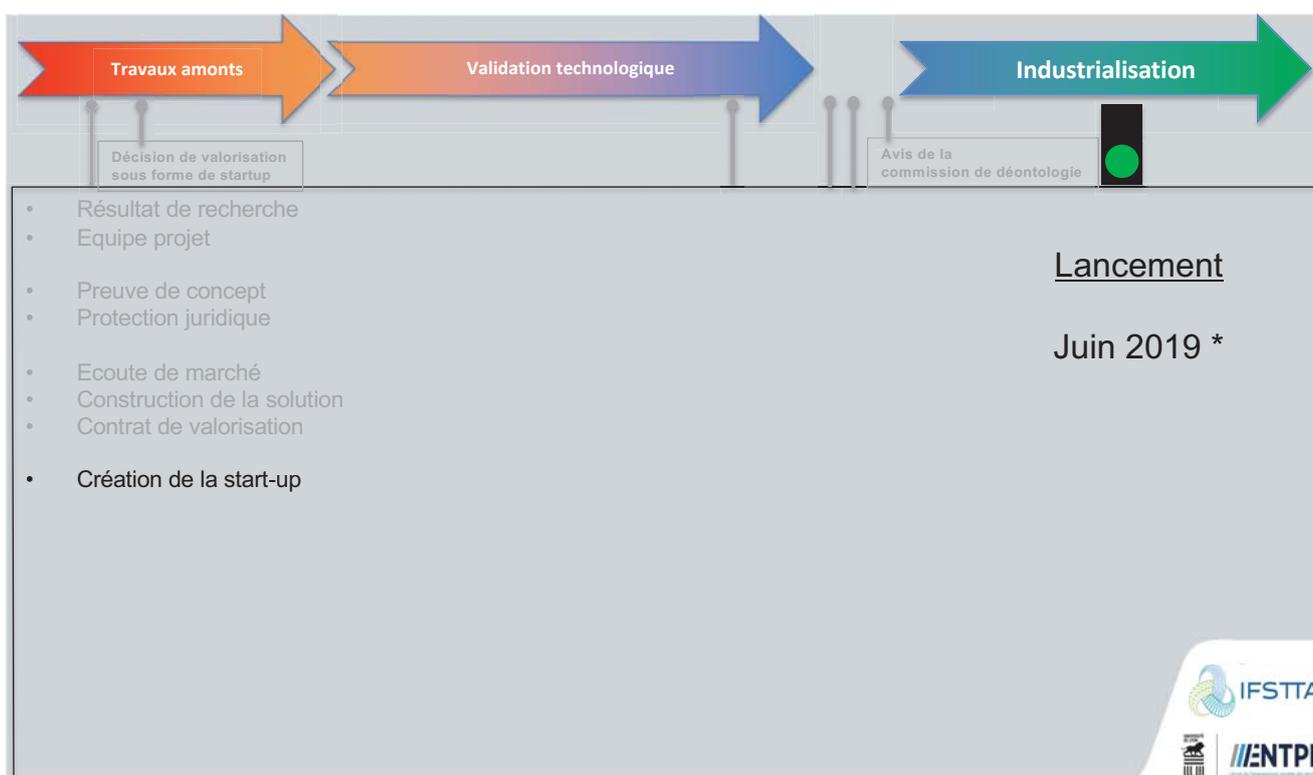
Processus de création de



Processus de création de



Processus de création de



* La date de lancement est conditionné à un avis positif de la commission de déontologie

Au démarrage : un site web prêt à l'emploi



Activités au démarrage



**Bureaux d'études
Ingénierie du trafic**

**Gestionnaires
de réseaux routiers**

Réponse à des AO

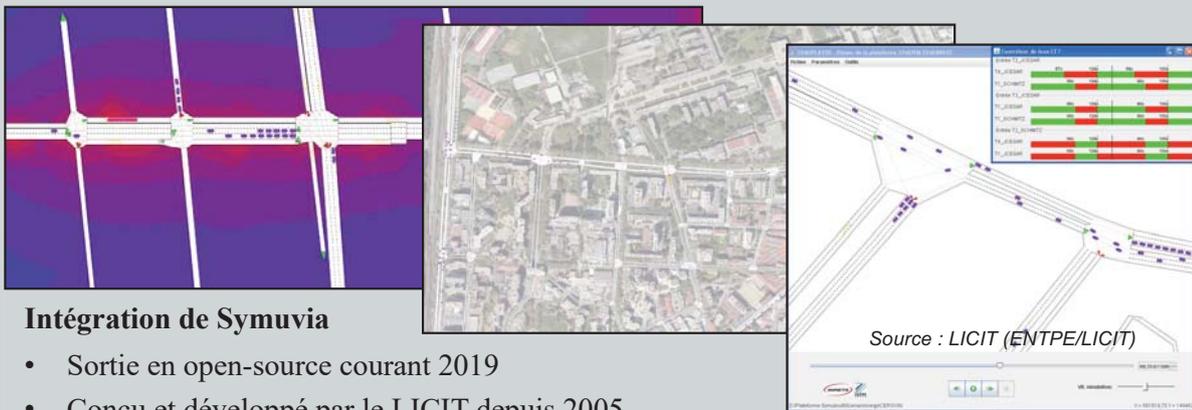
Mise en place de simulateur

Co-traitance
Sous-traitance

marché de l'innovation
Appel d'offre



Techno : développement futurs



Intégration de Symuvia

- Sortie en open-source courant 2019
- Conçu et développé par le LICIT depuis 2005
- Supports de plusieurs dizaines de projets de recherche et d'innovation

Intégration d'autres modèles

- Modèle statique
- Modèle d'émission de bruit et d'émission de polluant

Interopérabilité avec les solutions de simulation existantes



Collaborations stratégiques

Avec le Cerema

- Collaborations sur prestation de service
 - Co-développement de solutions innovantes?
- vers une montée au capital

Avec l'Ifsttar

- Intégration de Symuvia
 - Collaboration dans des AAP de recherche
- vers une montée au capital





LABORATOIRE D'INGÉNIERIE
CIRCULATION TRANSPORTS

MONTER UNE STARTUP DE SIMULATION DYNAMIQUE

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Aurélien DURET
Aurelien.DURET@ifsttar.fr



IFSTTAR

MESSIGEO, séminaire de cloture, 26 mars 2019



Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019



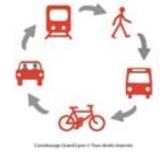
Messigéo Axe 2 : projet  **TEMPUS**

Application des algorithmes d'optimisation d'itinéraires
développés à l'IFSTTAR
à l'analyse de l'offre de transport et de l'accessibilité des territoires

Aurélien Bousquet, Cerema Territoires et Ville

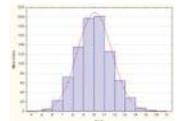
Algorithmes développés par l'IFSTTAR

Optimisation d'itinéraires multimodaux simples et chaînés / avec contraintes sur les mouvements tournants (Thèse d'Aurélié Bousquet)



Optimisation d'itinéraires pour les véhicules électriques (Thèse de Fouad Baouche)

Optimisation d'itinéraires tenant compte de la fiabilité du temps de parcours (Thèse de Raphaël Delhomme)



=> Nécessité d'une plateforme intégratrice pour ces algorithmes, pour les tester sur différents jeux de données et les comparer (complexité, temps de calcul, espace mémoire nécessaire, qualité de la solution générée...).



Aurélié Bousquet, Cerema Territoires et Ville
Projet Tempus – 26/03/2019

Bibliothèque de calcul en C++

Efficacité d'un langage compilé : le C++

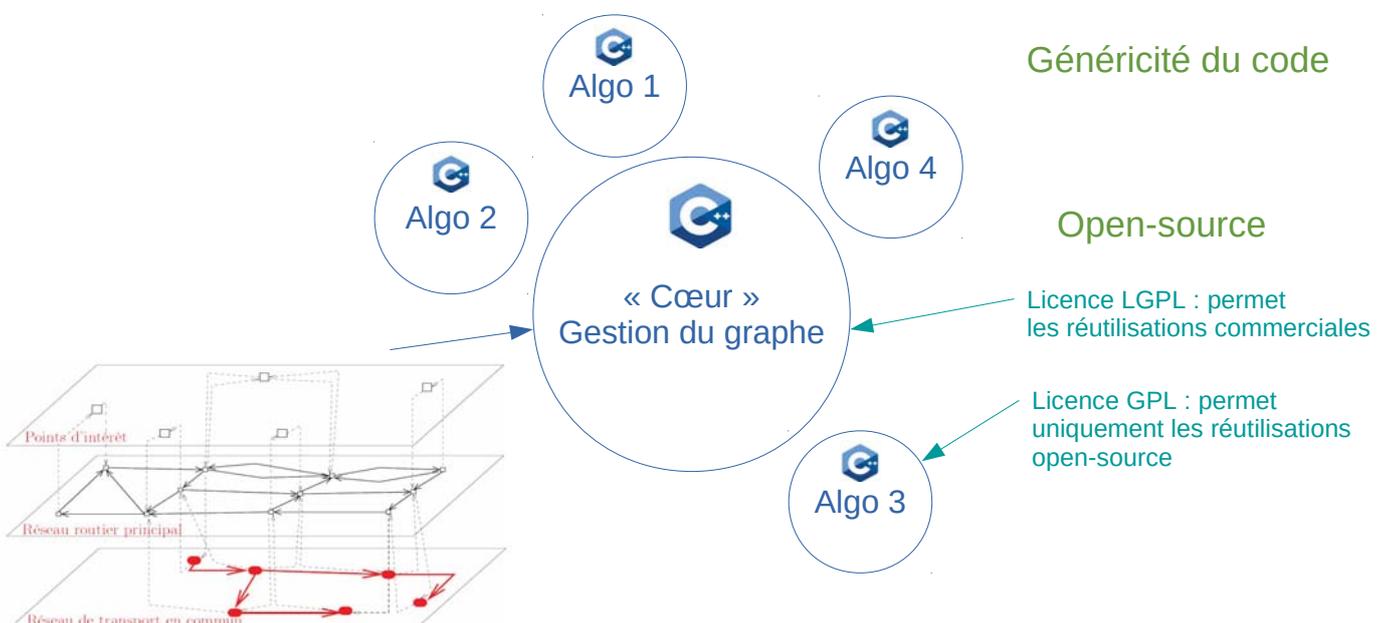
Modularité du code

Généricité du code

Open-source

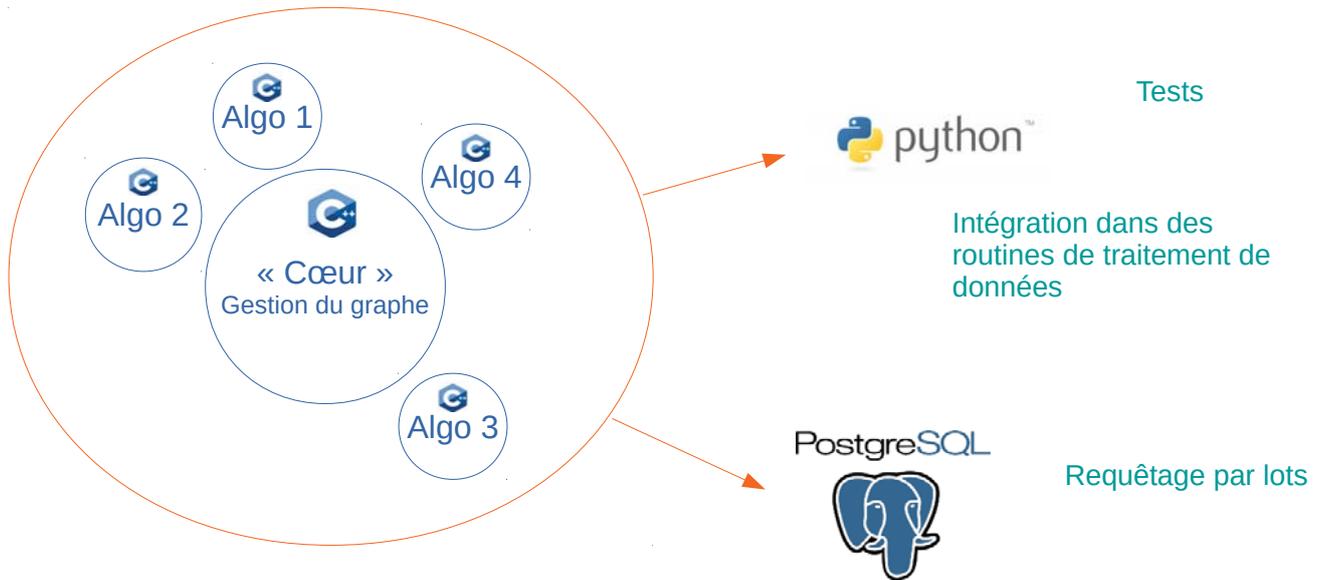
Licence LGPL : permet les réutilisations commerciales

Licence GPL : permet uniquement les réutilisations open-source

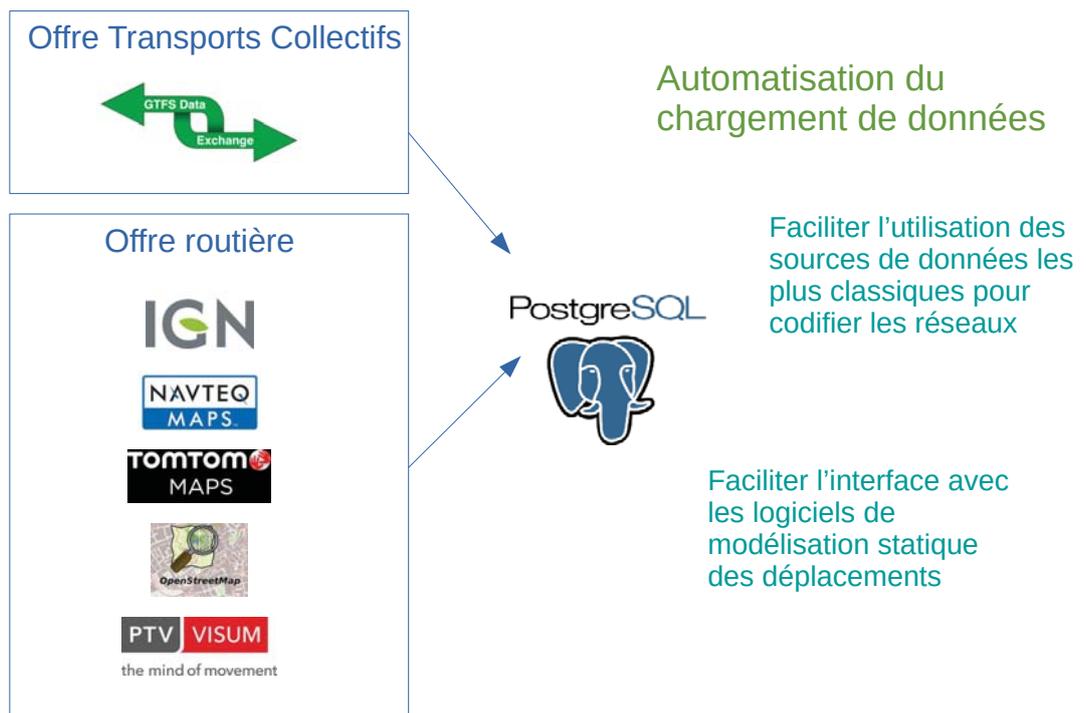


Aurélié Bousquet, Cerema Territoires et Ville
Projet Tempus – 26/03/2019

API pour faciliter la réutilisation du code



Outil de chargement de données

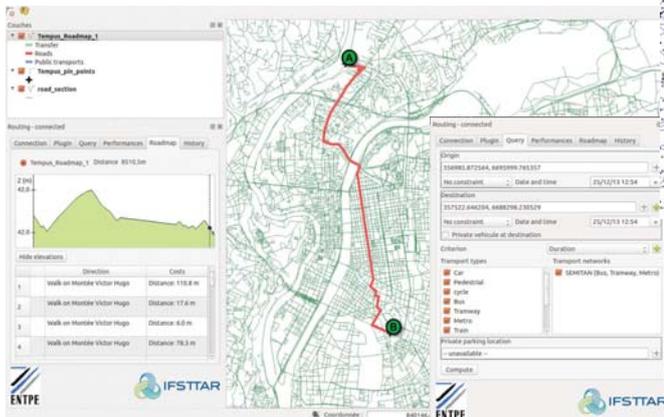


Interfaces : deux plugins QGIS



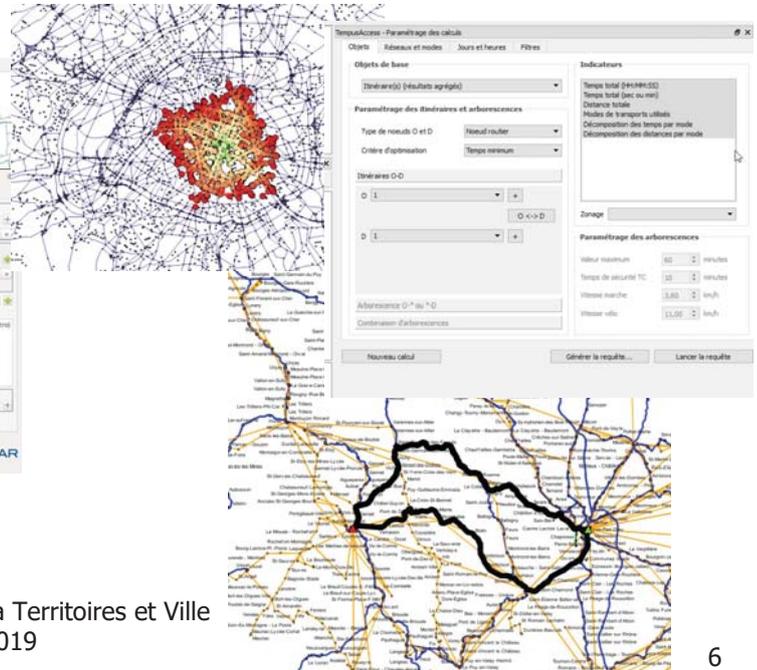
Plugin Tempus

Requêtage point à point avec feuille de route (démonstrateur)



Plugin TempusAccess

Requêtage d'indicateurs d'offre de transport et d'accessibilité des territoires



Aurélie Bousquet, Cerema Territoires et Ville
Projet Tempus – 26/03/2019

6

TempusAccess pour l'analyse de l'offre ferroviaire

Demande de la DGITM/DST/FCD/MAOT :

<p>Avoir un regard plus fin sur l'offre actuelle par l'analyse des fichiers open-data de la SNCF pour alimenter les discussions sur l'offre entre la MAOT et la SNCF</p>	<p>Disposer d'indicateurs sur les arrêts, les sections entre arrêts et les lignes. Connaître l'offre sur une OD, en distinguant les trajets directs de ceux avec correspondances, les omnibus des trains directs, etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Déclinaison par période horaire, par jour (ou type de jour) • Déclinaison par sous-territoire
<p>Disposer d'un outil facile d'utilisation, ergonomique</p>	<p>Pas d'a priori sur la forme du logiciel, mais pas un outil en ligne de commande</p>
<p>Des données de qualité et les plus exhaustives possibles</p>	<p>Fusion des fichiers TER et IC et correction des problèmes les plus importants constatés (position des arrêts, redondances d'offre...)</p>



Aurélie Bousquet, Cerema Territoires et Ville
Projet Tempus – 26/03/2019

7

TempusAccess pour calculer des isochrones

Demande de la DRIEA

Simplification du processus de production	Limiter le nombre de logiciels : actuellement VISUM + QGIS + SAS + Macros Excel / Python
Amélioration des indicateurs	<ul style="list-style-type: none">• Isochrones intermodales• Précision géographique• Horaires élargis...
Externalisation d'une partie de la production dans des services de l'État partenaires	<ul style="list-style-type: none">• Aide à la prise en main• Future autonomie

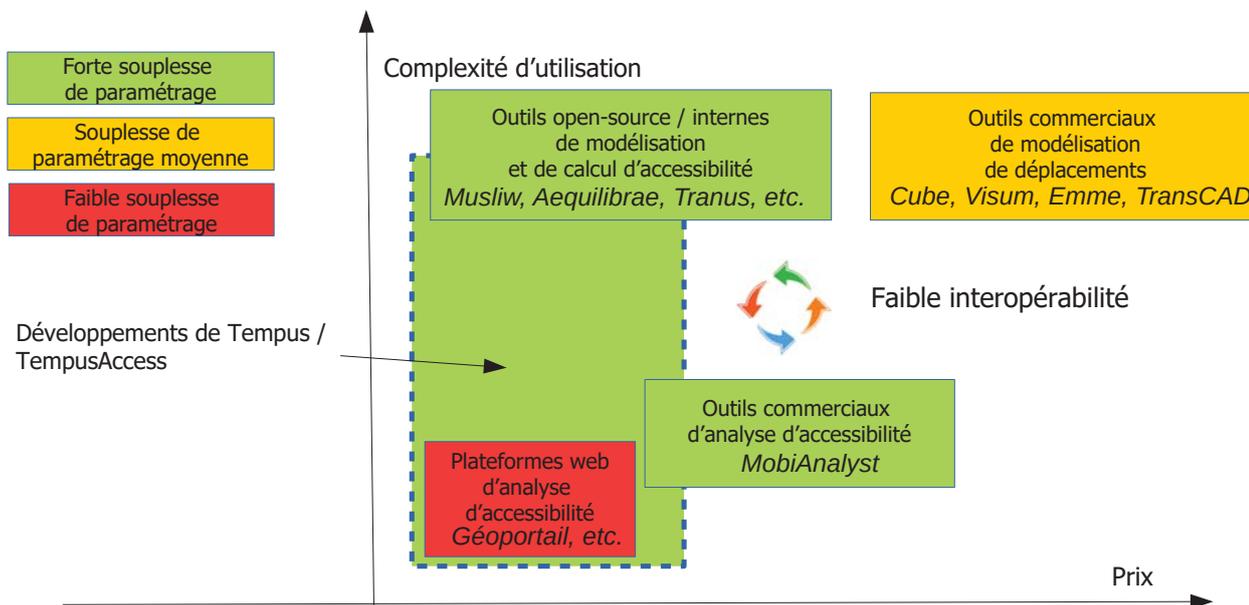
Financement

La licence open-source a permis de mutualiser les développements et les sources de financement des prestations externalisées (réalisés par Oslandia) :

- DGITM au titre du financement de l'ORSI Messigeo ;
- DGITM/MAOT ;
- DRIEA ;
- IFSTTAR ;
- Mappy ;
- SNCF.

Travaux en régie du Cerema.

Positionnement de TempusAccess dans l'offre logicielle actuelle



Suites possibles

Au Cerema :

- Déploiement auprès des chargés d'études.

Au ministère :

- Poursuivre le déploiement opérationnel de l'outil à la DRIEA et à la MAOT :
 - Débuggage et formations.
- Demande de la DREAL Corse
 - Besoins recoupant ceux de la DRIEA et de la MAOT ;
 - Déploiement de l'outil envisagé en 2019.

Dans les collectivités :

- Demande de la Métropole de Montpellier au Cerema :
 - Étudier les possibilités de rendre 100 % open-source la chaîne logicielle du modèle à 4 étapes de l'agglomération ;
 - Étape manquante : affectation
 - Test de différentes solutions logicielles dont Tempus.

Merci de votre attention

Pour en savoir plus :

<https://github.com/CEREMA/territoires-ville.TempusAccess/wiki>

Effets du trafic routier sur la pollution au dioxyde d'azote :

Peut-on mettre en évidence l'impact de la vitesse moyenne du trafic sur la concentration en NO₂ relevée sur le périphérique de Lyon ?

Christine Buisson, avec la collaboration de

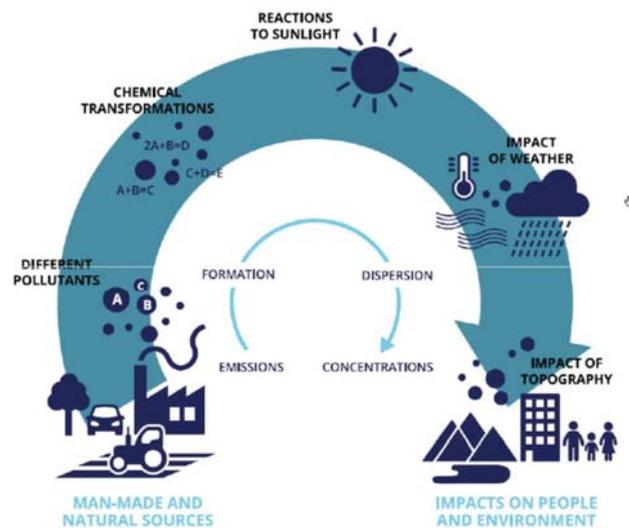
Delphine Lejri, Anne-Laure Badin, Bernard Nativel, Valentine Creusel

Article présenté à l'ATEC 2018, repris dans le rapport.



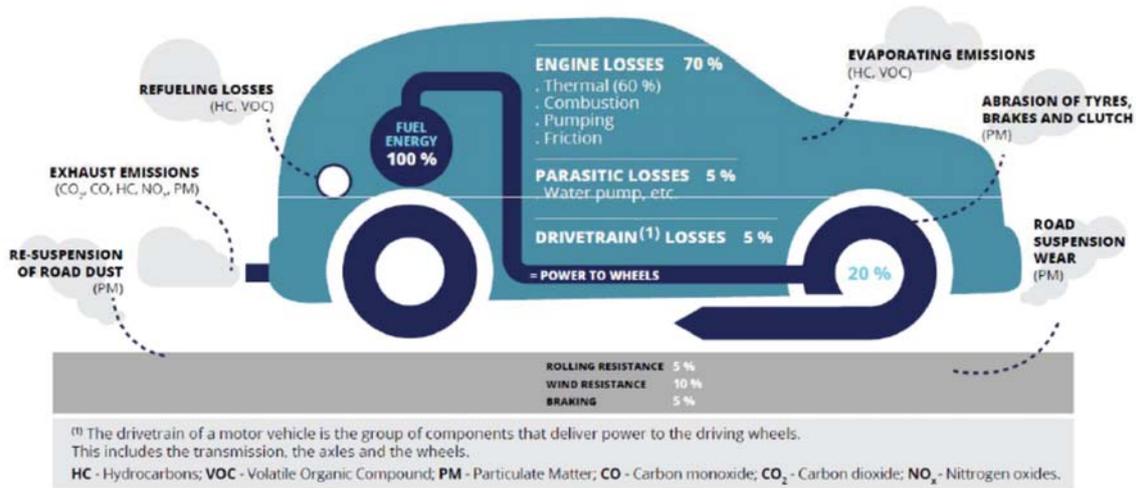
« Lyon suffoque on veut respirer » ; mars 2019, Lyon 4^{ème}, entrée Est du tunnel de la Croix Rouse, auteur inconnu, photo ChB

La pollution de l'air : un phénomène complexe...



Source: EEA – 2016, Explaining road transport emissions, a non technical guide

...même si on se limite aux émissions des véhicules !



Pour estimer l'impact d'une action de politique des déplacements sur le niveau de pollution

Deux options :

- Estimation *a priori* : modélisation de la chaîne complète, des trafics jusqu'aux concentrations.

Inconvénient : cumul d'hypothèses intermédiaires, chacune avec ses incertitudes.

- Evaluation *a posteriori* : peut être faite sur des observations avant/après.

Inconvénient : pas de pouvoir prédictif, base de données à étendre.

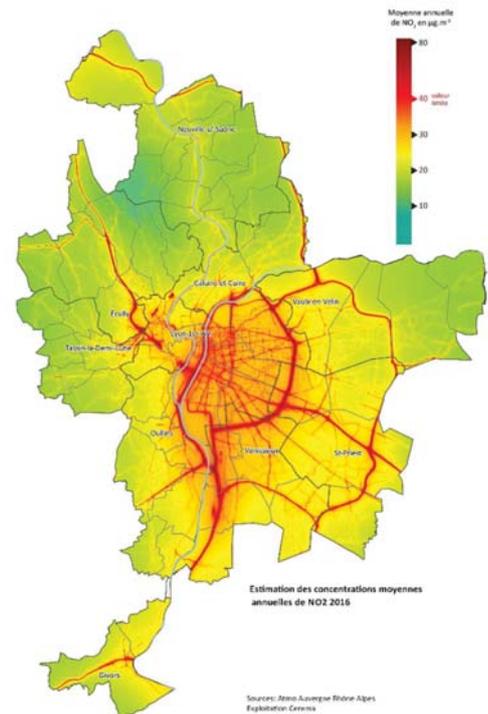
► **Besoin d'amélioration des connaissances des différents mécanismes**

Evaluation *a priori* : basée sur une modélisation

- Permet des prévisions, avec des représentations cartographiques.

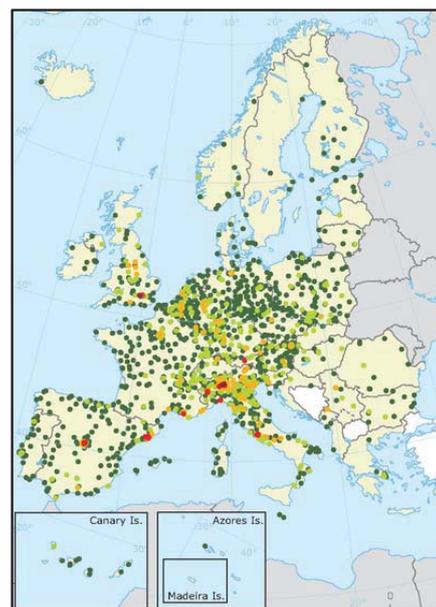
Exemple : estimations
des concentrations moyennes annuelles
de NO₂ sur l'agglomération lyonnaise en
2016

(source AirRhôneAlpes)



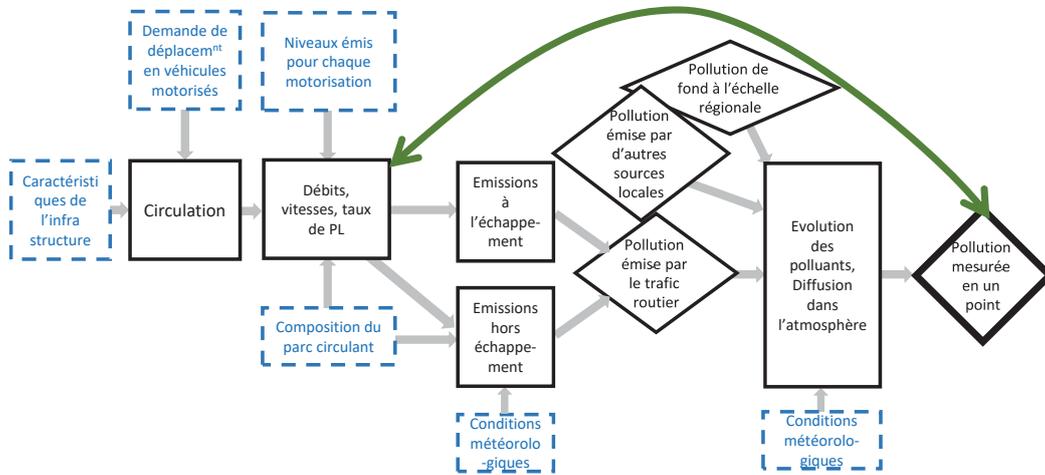
Evaluation *a posteriori* :

- Basée sur les concentrations de polluants mesurées par les stations de surveillance de la qualité de l'air (En France : 600 stations environ, dont 110 à proximité du trafic)
- Besoin de croiser ces données avec une source sur les conditions de trafic pour :
 - Une meilleure compréhension globale,
 - Puis analyse des effets des politiques de déplacements
- Dans la littérature, analyse de la dépendance au débit, rarement à la vitesse.



Carte des niveaux moyens annuels
de NO₂ en Europe (2015)
●● : niveaux supérieurs à la
réglementation

Notre démarche : tenter d'*enjamber* la modélisation complète



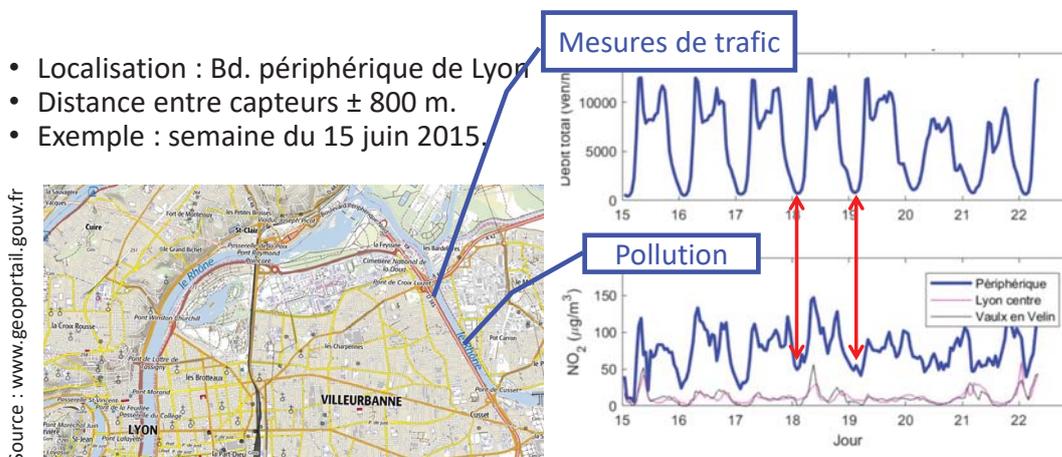
Démarche adoptée

- Utiliser des sources multiples de données :
 - Pollution **on choisit le NO₂, mesuré au bord du périph. lyonnais**
 - Trafic **vitesse, débit, classement des véhicules par longueur**
 - Météorologie **vitesse du vent, température, pluviométrie**
- Sur une période longue : du 01 01 2015 au 31 05 2017

Volume de données horaires collectées

Période :		
du 01 01 2015 au 30 05 2017	24 heures par jour	21 168 périodes
Nature de la donnée	Lieux de recueil	Nombre de données disponibles
Concentrations de NO ₂	Périphérique, Lyon centre, Vaulx en Velin	18 001
Trafic (Débit, Vitesse moyenne, taux de Poids lourds)	Sens Nord Sud, sens Sud Nord, total des deux sens	20 869
Météorologie (Vitesse et direction du vent, pluviométrie)	Saint Exupéry	20 785
Combinaison des trois sources de données		17 621 périodes <i>(83,2 %)</i>

Evolution des niveaux de NO₂ et du débit total

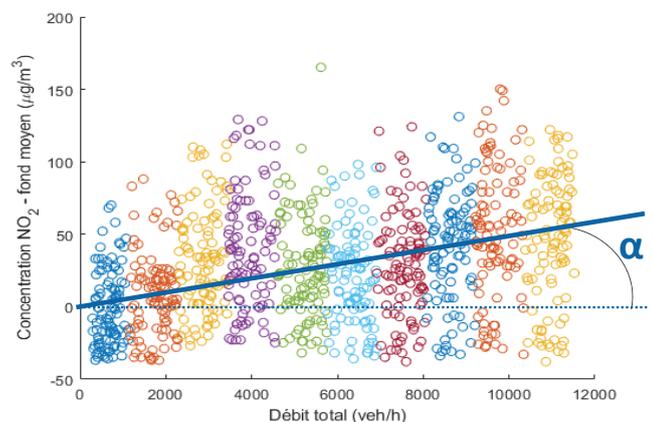


Pour identifier les effets du trafic,
il faut soustraire une concentration de fond. Laquelle ?

- Plusieurs stations de mesure urbaine de NO_2 sont disponibles, mais elles sont lointaines.
 - La nuit, le capteur du périphérique indique un niveau de pollution très élevé, de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - Pour soustraire à notre signal (le niveau de NO_2 observé) :
 - une valeur de fond et
 - les éventuelles dérives du capteur,
- **Nous choisissons d'ôter au niveau de NO_2 de chaque heure, le niveau moyen de NO_2 observé la nuit sur ce capteur**
(débit total inférieur à 1000 veh/h, entre 22h et 5h)

Le niveau de NO_2 (mesure de jour moins fond nocturne)
est-il linéairement croissant avec le débit total ?

- En toute rigueur, les résultats ne sont pas significatifs statistiquement (trop de phénomènes annexes ?)
- Cependant, nous poursuivons pour l'instant avec notre hypothèse :
un véhicule moyen parcourant une longueur donnée devant le capteur, dans des conditions de trafic et météorologiques identiques, génère, en moyenne, le même niveau de NO_2 mesuré dans l'air.
- Notons α le ratio de concentration moyen par véhicule moyen utilisant le périphérique

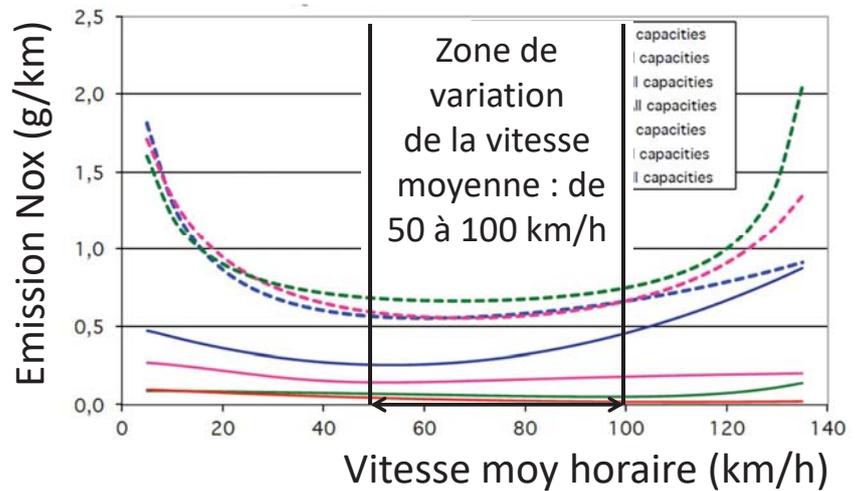


Existe-t-il une dépendance de α à la vitesse moyenne horaire ?

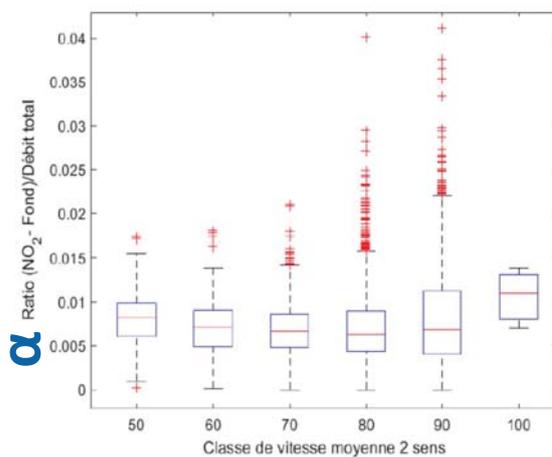
α est le ratio de concentration moyenne de NO₂ par véhicule utilisant le périphérique

Rappel : les courbes mesurées à l'échappement indiquent une tendance en « U »

Exemple des courbes Copert4 pour les émissions de NOx



Réponse : il semblerait bien...



... Mais cela reste à confirmer !

Conclusions et recherches futures

- Du point de vue scientifique, il faudrait intégrer à nos analyses :
 - La composition du parc
 - La météorologie, notamment l'ensoleillement et le vent (vitesse, direction)
 - Les effets de persistance des concentrations dans l'air
- Besoin de s'abstraire des effets de fond et de topologie
- Une campagne d'inventaire des sites où sont disponibles :
 - Des données de pollution mesurées par une ASQA
 - Des données de trafic de type Siredo
- La méthode d'analyse des données est disponible et partagée



Christine Buisson,
Delphine Lejri,
Anne-Laure Badin,
Bernard Nativel,
Valentine Creusel

christine.buisson@ifsttar.fr



ORSI MESSIGEO

Axe 3 Caractérisation dynamique des émissions et exposition des populations

Approche « modèles »

Anne-Laure Badin, Delphine Lejri
26 mars 2019

Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019

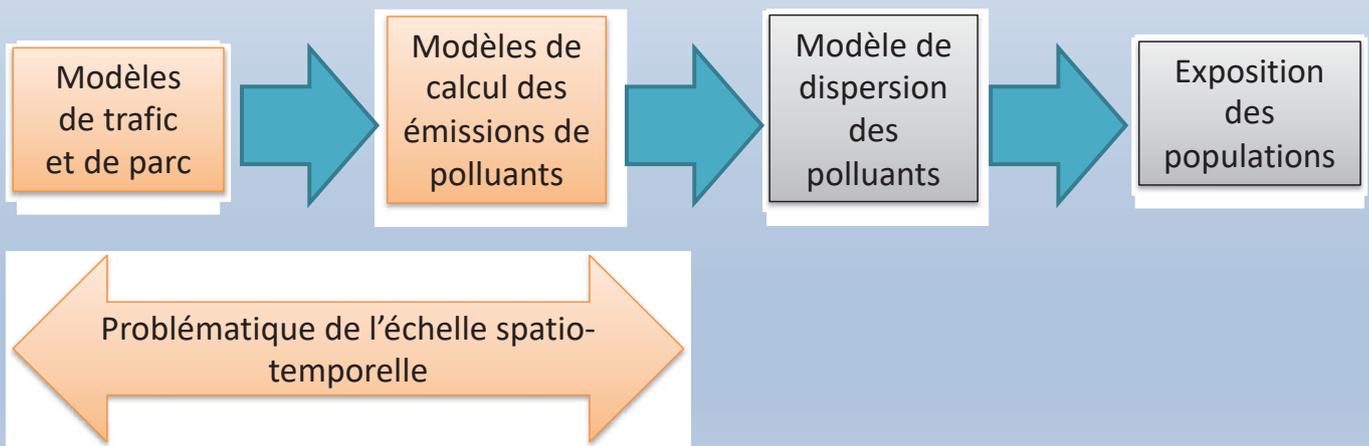


Contexte

- **Enjeu sanitaire et climatique réaffirmé**
 - Contentieux européen PM_{10} , NO_2 : une dizaine de zones urbaines concernées
 - Espérance de vie réduite : 800 000 morts prématurées en 2015 en Europe (OMS)
- **Le transport routier : une source majeure de pollution, mais aussi un levier d'action identifié**
 - Évolution des technologies de véhicules et aides à la conduite
 - Évolution des comportements de mobilité : covoiturage, transports publics, ...
 - Mesures de gestion du trafic : régulation du trafic, péage urbain, zone de circulation restreinte, ..

Objectifs de l'axe 3

- Améliorer les chaînes de modélisation pour mieux prendre en compte les variations spatio-temporelles des trafics



Objectifs de l'axe 3

- Améliorer les chaînes de modélisation pour mieux prendre en compte les variations spatio temporelles des trafics
 - Adapter les outils de modélisation pour répondre aux demandes actuelles
 - Améliorer et faciliter le couplage entre modèles dynamique de trafic et d'émissions
 - Comparer différentes chaînes de modélisation
 - *Rechercher des éléments de validation des chaînes de modélisation mises en œuvre*

Adaptation des outils

Module de couplage TRAPS

Traffic Related Air Pollution Simulator



Intervenant - date

Outil de couplage

- Pourquoi calculer des émissions de polluants?
 - Inventaire d'émissions
 - Pour prédire la qualité de l'air (prospections),
 - Pour évaluer ex ante et ex post les politiques de transports
- Différents niveaux de description du trafic pour alimenter les modèles d'émissions
 - Besoin de prendre en compte la dynamique du trafic : congestion, gestion dynamique des vitesses, ...
 - Besoin de prendre en compte l'affectation dynamique du trafic : choix d'itinéraires, report modal, ...

Outil de couplage : historique



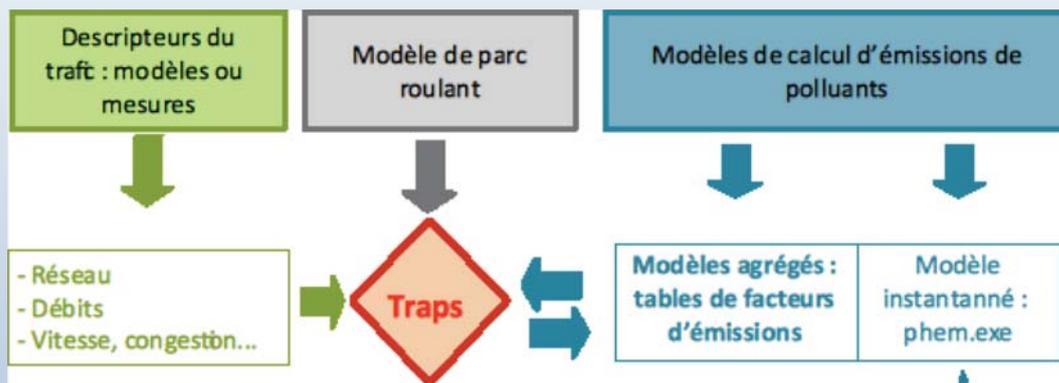
- pensé dans le cadre du projet de recherche Cohérence des échelles de représentation du trafic et pollution (2012-2015)

- développé par un prestataire SI (ITLink) sur financements de CoERT-P, du Cerema ITM et de l'ORSI Messiege

- conçu pour faciliter les couplages entre modèles dynamiques de trafic et modélisation des émissions de polluants

- adapté pour : couplages avec des modèles mésoscopiques et statiques de trafic et avec la nouvelle version de Copert

Outil de couplage : principes



Interface **ouverte sur les outils**, format “en briques” permettant d’intégrer de nouveaux formats de données, les mises à jours des modèles, etc.

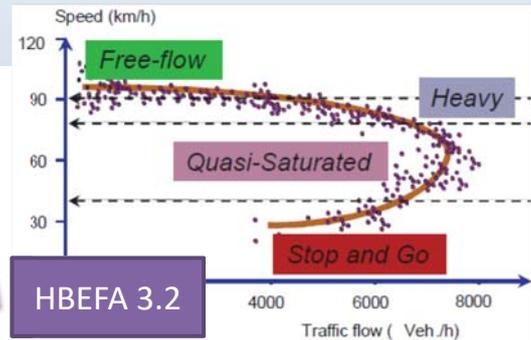
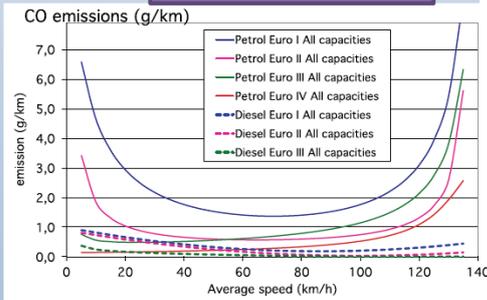
- Nécessite de travailler avec soin en **gardant une trace de toutes les hypothèses (méta données)**

Outil de couplage : modèles d'émissions

- Agrégé (continu ou discret)

➤ États de trafic moyen sur un lien et une période

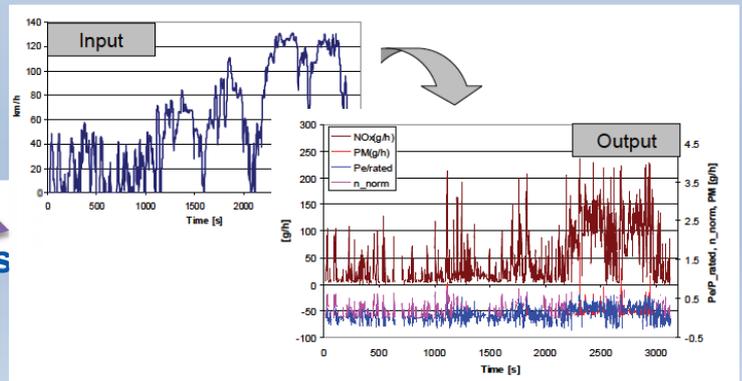
COPERT IV et V



HBEFA 3.2

- Modèle instantané
- Trajectoires des véhicules

PHEM v11



Outil de couplage : résultats

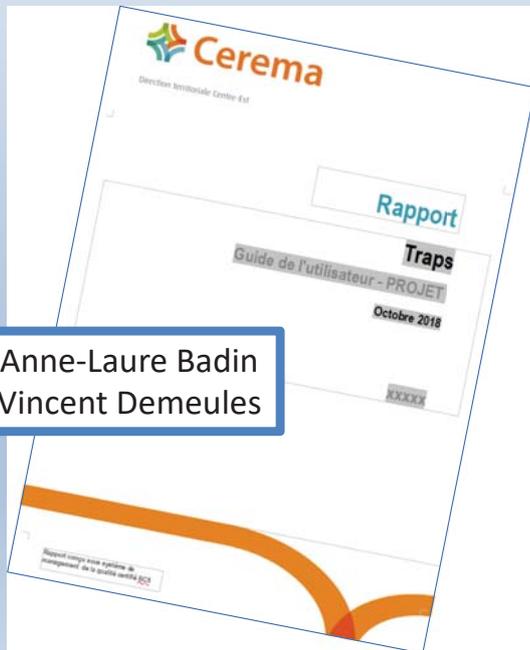


Format géographique (shape) privilégié car il permet de :

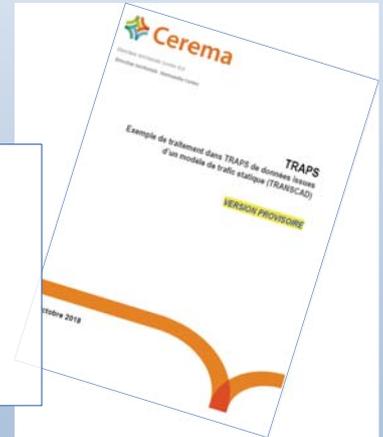
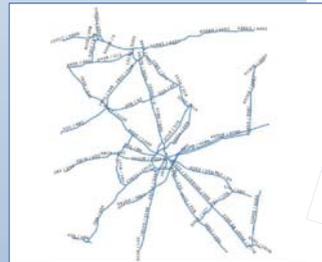
- Produire des cartes, des vidéos...
- Organiser le stockage des données pour des exploitations ultérieures (base de données)

Outil de couplage : formation

- Première démonstration (octobre 2018) et TD Préparation de documents, jeux de données...



Données
de trafic
statiques



Données
de trafic
dynamiques



Outil de couplage

- Perspectives
 - Organiser le travail en réseau (partage de jeux de données, organiser la base de données,...)
 - Formation
 - Evolutions techniques
 - Sur-émissions à froid, à l'évaporation
 - Prise en compte des pentes
 - Conversion de parcs

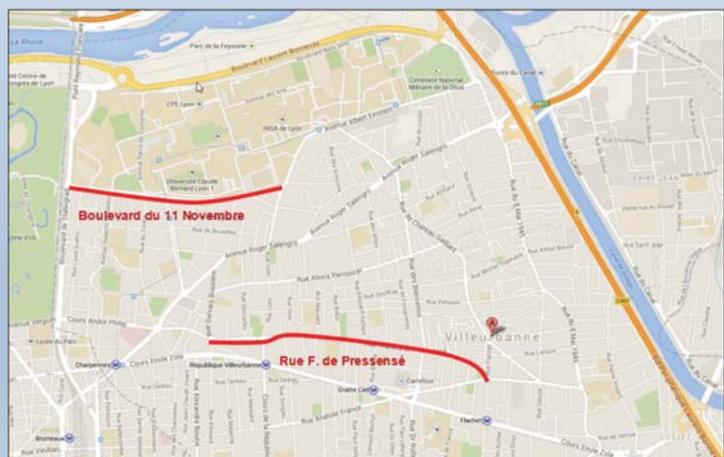
Comparaison de chaînes de modélisation



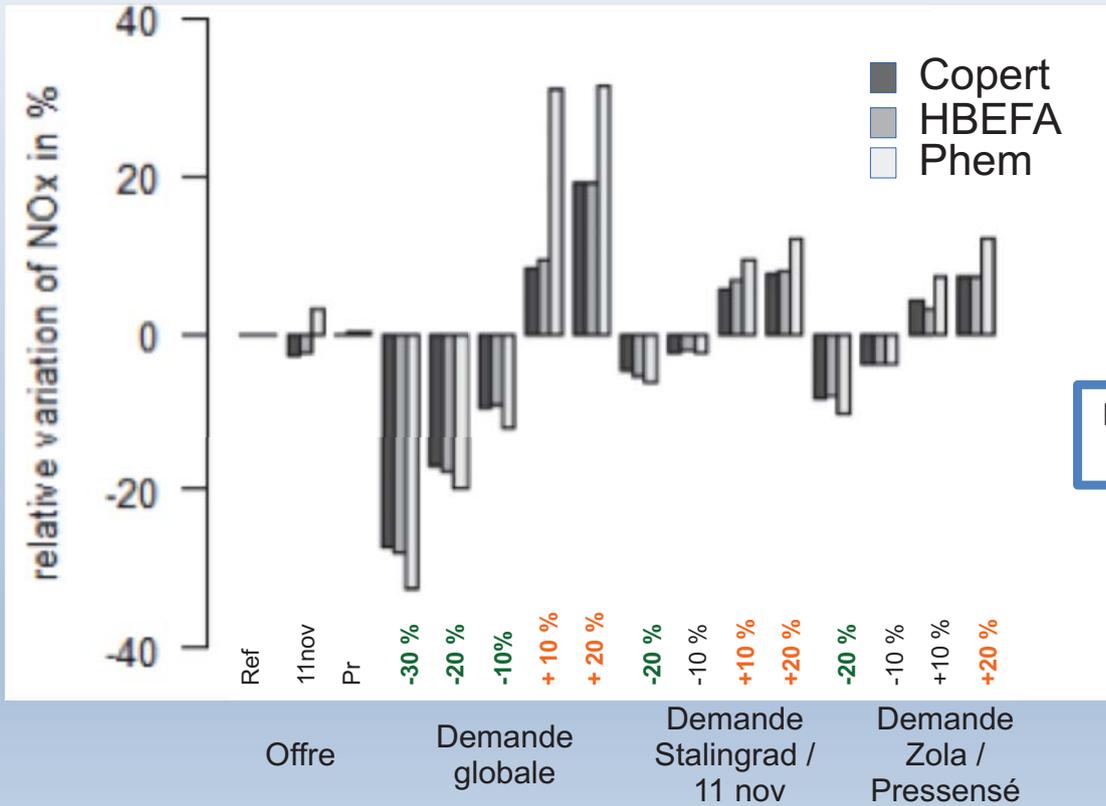
Intervenant - date

Etudes sur le Tonkin : simulation micro

- Simulation dynamique de trafic sur le Tonkin (Aimsun)
 - Scénarios de modification de la demande (globale ou sur certaines OD structurantes)
 - Scénarios de modification de l'offre

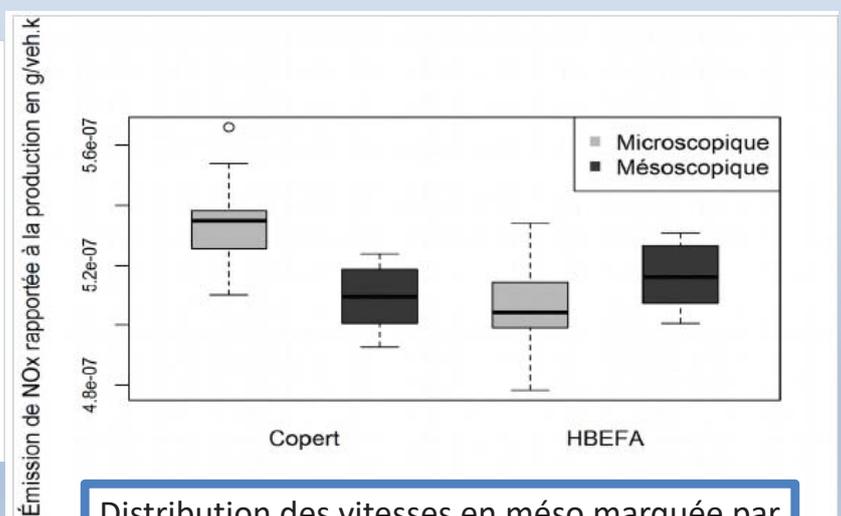
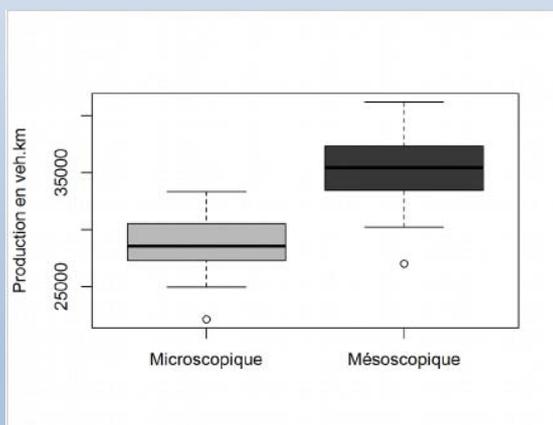


Etudes sur le Tonkin : simulation micro



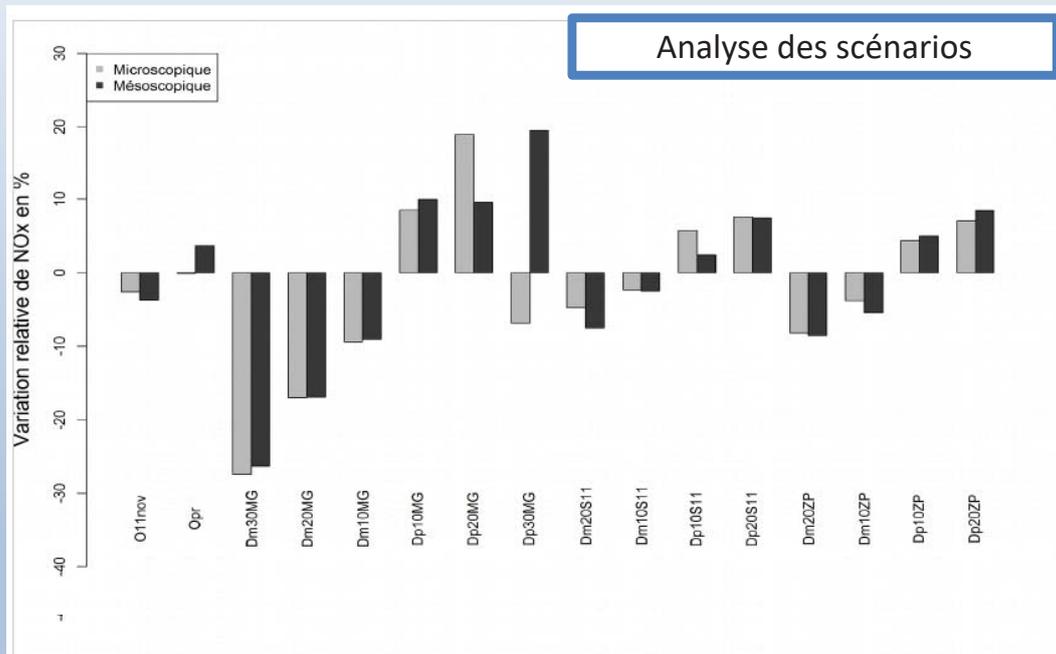
Etudes sur le Tonkin : simulation méso

- A partir de la simulation microscopique, mise en œuvre du plugin de trafic mésoscopique.



Distribution des vitesses en méso marquée par deux modes : 0-4 et 52-56 km/h
Vitesse moyenne supérieure

Etudes sur le Tonkin : simulation méso



Manque une validation expérimentale pour privilégier une chaîne de modélisation...

Animation

- Séminaire d'échanges entre équipes trafic – équipes émissions sur les modèles et les données
- Partage de ressources bibliographiques
- Communications : TAP, Cotita, ATEC ITS, ..

Merci à Vincent Demeules, Karine Muller-Perriand et Clotilde Malan

LICIT – Ifsttar/Bron et ENTPE

25 avenue François Mitterrand

69675 Bron Cedex

delphine.lejri@entpe.fr



Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019



Travail sur des données issues
d'expérimentations
avec des véhicules connectés

Arthur Burianne, Cécile Bécarie et Christine Buisson

Objectif initial de Messigéo sur cet axe

- Evaluer les impacts des systèmes coopératifs sur le trafic,
- Analyser en simulation le dimensionnement optimal du déploiement de véhicules coopératifs,
- Appliquer les outils proposés à un cas réel de déploiement de systèmes coopératifs.

Ainsi, le cahier des charges de l'ORSI évoquait à ce titre les projets de pré-déploiement C-ITS Scoop@F et Compass4D.

Les données des véhicules se sont révélées inadaptées au projet Messigéo tant en quantité qu'en qualité.



illustration des capacités du simulateur

Séminaire Scoop 5-6 avril 2018
Arthur Burianne – Cécile Bécarie



IFSTAR LICIT



Séminaire de restitution **Messigéo**
La Défense – 26 mars 2019



Merci de votre attention !

Arthur Burianne, Cécile Bécarie et Christine Buisson

arthur.burianne@ifsttar.fr

cecile.becarie@ifsttar.fr

christine.buisson@ifsttar.fr



ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires



Sélection d'articles produits dans le cadre de Messigéo

1. Badin, Anne-Laure, Clavel, Aurore, Vittoz, Thérèse, Sorand, Carine, Lejri, Delphine, Leclercq, Ludovic, Olny, Xavier. 2017. Combining microscopic traffic modelling and three pollutant emission modellings to assess modifications of traffic supply and demand. *Journal Earth Science and Geotechnical Engineering*, vol. 7, pages 175–190.
2. Ditchi, Nicolas, Courbon, Thomas. 2016. Improve highway ramp metering modelling with real data. Présenté à 11th ITS European Congress, juin, Glasgow, UK.
3. Buisson, Christine, Nativel, Bernard, Lejri, Delphine, Badin, Anne-Laure, 2018, Effets du trafic routier sur la pollution au dioxyde d'azote : vers la mise en évidence de l'impact de la vitesse moyenne à partir de données collectées sur le périphérique de Lyon pendant 30 mois, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.
4. Aliaga, Frédéric, Buisson, Christine, Mansuy, Philippe, Coutard, Philippe, Creusel, Valentine. 2018. Evaluation de la régulation de cinq accès de la rocade de Grenoble, Congrès ATEC-ITS, janvier, Montrouge, France.

Combining microscopic traffic modelling and 3 pollutant emission modellings to assess modifications of traffic supply and demand

Anne-Laure Badin¹, Aurore Clavel¹, Thérèse Vittoz¹, Caroline Sorand¹,
Delphine Lejri², Ludovic Leclerc² and Xavier Olny¹

Abstract

Traffic management definition and assessment strategies rely on results from successive stages of modelling: from traffic to air pollution concentrations. The objective of this study was to improve this modelling process. Combining microscopic traffic modelling and 3 pollutant emission modellings was performed: two using aggregated traffic estimates (HBEFA, Copert) and the other using vehicle trajectory (Phem). The studied area is part of the Lyon urban area (6,2 km², 2091 road sections). Traffic and emissions were simulated for 16 scenario resulting from modifications of supply or demand (traffic calibration on the afternoon rush hour). Copert and HBEFA estimations show many similarities and differences with Phem. Ranking of scenarios on the basis of their variation to the reference was performed and analysed. Copert and HBEFA provide the same ranking. To focus on the analysis of two scenarios, difference of NO_x emissions per link were mapped (only the higher variations). The relevance of dealing with both the network and the links spatial scales to assess the impact of the scenario was clearly shown.

Keywords: dynamic traffic modelling, traffic management, emissions, scenario, sensitivity

1 Introduction

Health impact of air pollution is largely referenced; road traffic is one of the main source of some pollutants (NO_x, particulate matter) (Pascal et Medina 2012). Local air quality results from the combination of regional air quality and local emissions of pollutants. As road traffic is a major source of pollution, policies

¹ Cerema CE, Bron, 69500, Bron

² COSYS-LICIT, IFSTTAR, ENTPE, Université de Lyon, 69000, France

aiming at improving air quality target it. Pollutants emissions from road traffic depend in particular on volumes of traffic, vehicle fleet and vehicle dynamic. Thus policies aim at having an impact on these parameters, by improving car fleet renewal, promoting public transport and car sharing, and implementing traffic management. Implementation of traffic management and promotion of public transport and car sharing could be efficient more rapidly than car renewal. In order to define operational policies and measures impacting traffic, their efficiency needs to be assessed. Stakeholders require this assessment to base their decision on it. Analysis and ranking of scenarios regarding their impact on air pollution and health therefore has to be performed.

In France, these assessments are commonly conducted on the basis of results of traffic static modelling; these studies are performed to assess the impact of a new road on air quality. Temporal and spatial precisions of those modellings are quite insufficient to assess the impact of traffic management measures. Thus it is needed to develop some methods using dynamic traffic modelling as input of emissions modellings. The mid term aim of our work is to define a methodology to assess traffic management strategies regarding their environmental impacts.

We have performed couplings of results from a microscopic dynamic modelling with pollutant emissions modellings. Different modifications of traffic supply and demand were modeled and analyzed in terms of traffic and environmental impacts. Some analyses of these results are presented in this paper.

2 Methods

The studied area

The studied area is part of the Lyon urban area (6,2 km², 2091 road sections). It is considered as an urban area. Speed limits are, respectively, 50, 30 and 70 km/h, for 89, 10 and 1% of the links.

The microscopic traffic simulations

The microscopic traffic simulations were modeled with Aimsun (Transport Simulation System, s. d.) for 1 hour (the traffic was loaded 15 min before the beginning of the simulation, on an empty network). Real data of the 5-6 PM period were used for the calibration. The reference simulation was sufficiently stabilized to allow the assessment of the sensitivity to supply and demand variations. Its own variability was assessed (10 runs performed).

The studied scenarios

To assess sensitivity of the joint modellings, 16 scenarios of modified traffic supply and demand were simulated (table 1).

The following mean traffic parameters were recorded: flow (veh/h), density

(veh/km), total run distance (km). Microscopic traffic simulation is stochastic, so in order to qualify the variability of the estimated traffic parameters, the simulation of the reference was repeated 10 times with a random seed pace (sec/km), total run time (h), mean speed (km/h). Results are presented in the table 2.

The modelling of pollutant emissions

The configuration of the emission modellings benefited from previous works: i, the development of an information system called TRAPS (Traffic Related Air Pollution Simulator), that establishes the link between modellings of traffic and emissions, ii, TRAPS calibration with appropriated fleet composition and traffic situation iii, sensibility analyses that settled an optimal time aggregation of 15 min, and the use of mean spatial speed.

Pollutant emissions were calculated using: Copert IV, HBEFA and PHEM (Hausberger, Stefan). Only exhaust emissions were calculated, and cold start excess emissions were not taken into account. Fuel consumption (FC) and the following pollutants: CO, NO_x, hydrocarbons (HC) were considered.

As any aggregated emission model, Copert IV uses mean driving speed and total travelled distance for a given time period to predict the related exhaust emissions. The total emissions are calculated as the product of the travelled production (vehicle.distance) and the unitary emission factors (expressed in g.km⁻¹). Unitary emission factors consist of speed-continuous functions that have been constructed over driving cycles of about 6mn-length, which are representative of encountered traffic conditions. These unitary emission functions are defined for each vehicle technology. The unitary emission functions of a specific vehicle category (passenger cars, light commercial vehicles, heavy duty vehicles or buses) are obtained by operating a weighted average of the vehicle technologies that compose the category.

Table 1: description of the simulated scenarios

Simulation Reference	Description	Named as Ref
Supply modification	Capacity of the street called <i>bvd du 11 novembre</i> was reduced to 400 vehicles/hour (instead of 1300)	O11nov
	The street called <i>rue Francis de Pressensé</i> was settled as a one way street; journeys from west to east were made impossible	OPr
Modification of the overall matrix of demand: for all the O-D the number of journeys increase / decrease in the given proportion	- 30%	Dm30MG
	- 20%	Dm20MG
	- 10%	Dm10MG
	+ 10%	Dp10MG
	+ 20%	Dp20MG
Modification of part of the matrix of demand	+ 30%	Dp30MG
	Demand modification of the O-D submatrix constituted from the O-D that use the streets called <i>bvd Stalingrad</i> and <i>bvd du 11 novembre</i>	Dm20S11
	- 20%	Dm10S11
	- 10%	Dp10S11
	+ 10%	Dp20S11
Modification of part of the matrix of demand	+ 20%	
	Demand modification of the O-D submatrix constituted from the O-D that use the streets called <i>bvd Emile Zola</i> and <i>rue Francis de Pressensé</i>	Dm20ZP
	- 20%	Dm10ZP
	- 10%	Dp10ZP
	+ 10%	Dp20ZP
	+ 20%	

Table 2: traffic parameters mean and SD for 10 replicates of the reference scenario

	Unit	Mean value	Standard deviation
Traffic flow	veh/h	13747	156
Density	veh/km	8,0	0,4
Traveled total distance	km	29588	522
Mean speed	km/h	25,1	0,6

Copert IV (Ntziachristos et al., 2009) has been widely used in most European Countries to elaborate the national emission inventories, but it is also extensively used for network emission modelling (Borge et al., 2012; Samaras, Christos et al., 2014). However, its use at spatial scales lower than the driving cycles is subject to questions, since the speed distribution might differ and lose representativeness over too small samples or specific traffic conditions (e.g. in the vicinity of intersections).

HBEFA is another aggregated emission model. It provides emission factors, i.e.

the specific emission in g/km for all current vehicle categories (PC, LDV, HDV, buses and motor cycles), each divided into different technologies segments, for a wide variety of traffic situations. Traffic situations were not provided by the microscopic traffic modelling. Thus, a conversion method was defined to estimate the traffic situation from the mean speed occurring on the links and some characteristics of the link. Then, emissions are calculated with the HBEFA methodology.

PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) calculates the fuel consumption and emissions of vehicles based on the vehicle longitudinal dynamics and on-engine emissions maps, with a 1s time resolution. The model provides an estimate of the engine power of a vehicle at each time step (1s), based on its speed time series and road gradient. The engine speed is estimated based on the transmission ratios and a gear shift model. The model also includes transient correction functions, and a cold start tool, to finally provide the evolution with time of fuel consumption and emissions of CO, CO₂, HC, NO_x, NO, particle mass (PM). Cold start emissions will be however disregarded in this paper.

PHEM has been coupled with dynamic traffic platforms at several occasions, in order to test the impact on emissions of road traffic strategies that modifies the vehicle kinematics behavior. However, the inadequacy between its required high traffic data resolution and the available dynamic traffic model outputs, which are much less refined, is subject to debate.

Data analysis has been performed using Rdata project (R Core Team, 2015) and Qgis (QGIS Development Team).

3 Results

Comparison of emission modellings

Ranges of pollutant emissions and fuel consumption differ between emission modellings as illustrated on figure 1. Range of PHEM estimated emissions is much larger than ranges of emissions calculated with mean speed models. Moreover PHEM estimates are always higher than Copert and HBEFA estimates: from 1.4 to 2 times the Copert estimates, and from 1.5 to 2.8 the HBEFA estimates.

A better consideration of the diversity of speeds by PHEM could explain part of the variability of estimated environmental parameters.

The higher estimations of environmental parameters with PHEM could result from the vehicle acceleration calibration of the traffic modelling. Indeed, the modelling may not necessarily be well calibrated for environmental impact assessment. This was identified in the CoERT-P project.

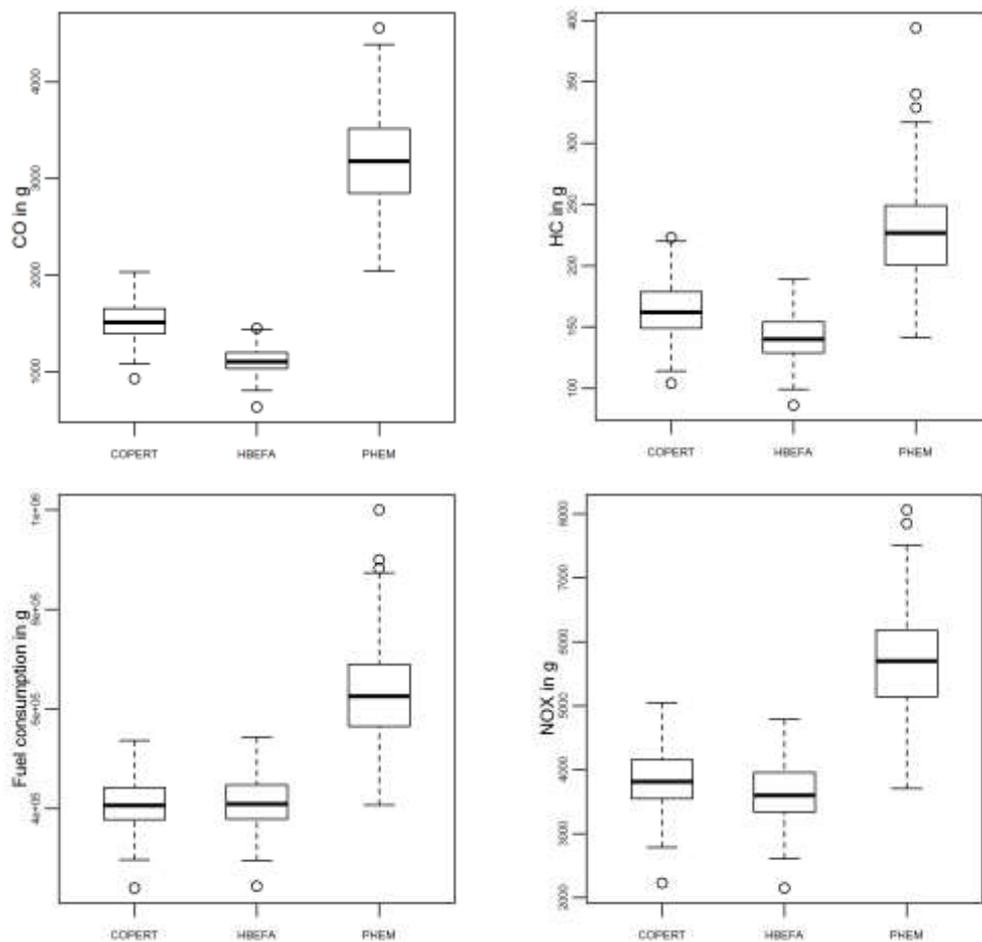


Figure 1: boxplot of the environmental parameters calculated with the different emission modellings for all the scenarios for the 4 periods of 15 min aggregated at the network scale

Table 3: global traffic estimates for the reference and all the scenarios

Scenario	Production in 1h (veh.km)	Production relative to ref	Spatial mean speed in m/s (over the 4 periods) (range)
ref	29 240	-	5.2-5.9
O11nov	28 230	-3%	3.9-5.2
OPr	29 010	-1%	5.1-5.6
Dm30MG	22 130	-24%	6.5-7.6
Dm20MG	24 987	-15%	6.2-6.8
Dm10MG	26 789	-8%	5.7-6.1
Dp10MG	31 100	6%	4.2-5.1
Dp20MG	33 370	14%	3.9-4.3
Dp30MG	25 570	-13%	1.3-3.6
Dm20S11	28 550	-2%	5.3-5.7
Dm10S11	28 370	-3%	5.2-6.8
Dp10S11	30 520	4%	4.7-5.4
Dp20S11	30 780	5%	4.6-5.0
Dm20ZP	28 150	-4%	5.3-5.7
Dm10ZP	27 290	-7%	5.3-6.6
Dp10ZP	30 160	3%	4.6-5.3
Dp20ZP	30 910	6%	4.6-5.3

Comparisons of all the scenarios at the network scale

The table 3 presents the traffic global estimates. Traffic production varies from 22 130 to 33 370 veh.km for two scenarios that impact the global OD matrix, respectively the Dm30MG and the Dp20MG scenario. Surprisingly, the scenario that impacts the most the demand (Dp30MG) do not show the greater production; mean speeds are much lower than for other scenarios: 1.3 to 3.6 m/s. In this scenario, grid lock occurred, no more vehicle could enter the network. Thus this scenario was considered to be out of the traffic legitimate domain we do not further consider it in this study. Regarding all the other scenarios, mean speed ranges from 3.9 m/s for both O11nov / Dp20MG to 7.6 m/s for the Dm30MG scenario.

Comparison of scenarios is first performed using the aggregation of environmental parameters on the overall network; the relative difference to the reference scenario is considered.

Relative difference of scenario to the reference ranges from -35% to 49%, respectively for HC Dm30MG and HC Dp10MG scenarios, both being Phem estimates. The ranking of scenarios from the less emissive to the more emissive is similar whatever environmental parameters is considered when considering HBEFA and Copert estimates, and it is the same regarding the Phem NOx estimates: Dm10ZP, O11nov, Dm10S11, OPr, Dp10ZP, Dp10S11, Dp20ZP, Dp20S11, Dp10MG, Dp20MG.

Whereas Phem NO_x estimates rank scenarios as all Copert and HBEFA environmental estimates, Phem estimates of HC, fuel consumption or CO rank differently the scenarios (figure 2). The HC and FC appear to evolve in the same way whereas CO evolves differently. As an example, Dp10MG is the most emissive scenario regarding HC (+48%) and is expected to lead to the higher fuel consumption (+42%), whereas it leads to only +5% of CO emissions.

Whatever method is used for emissions estimations, pollutant emissions and fuel consumption are significantly (more than 5% of difference relative to the reference values) higher in the followings scenarios, from the higher to the lesser increase: Dp20MG, Dp10MG, Dp20S11, Dp20ZP, Dp10S11, and significantly lower in the following scenarios, from the higher to the lesser decrease: Dm30MG, Dm20MG, Dm10MG, Dm20ZP, Dm20S11.

Minor relative differences are noticed for the following scenarios: Dm10ZP (-4% whatever the parameters and emissions modelling used), O11nov (from -3 to 4%), Dm10S11 (from -6 to -2%), OpR (from -1 to 0%), Dp10ZP (from 3 to 9%).

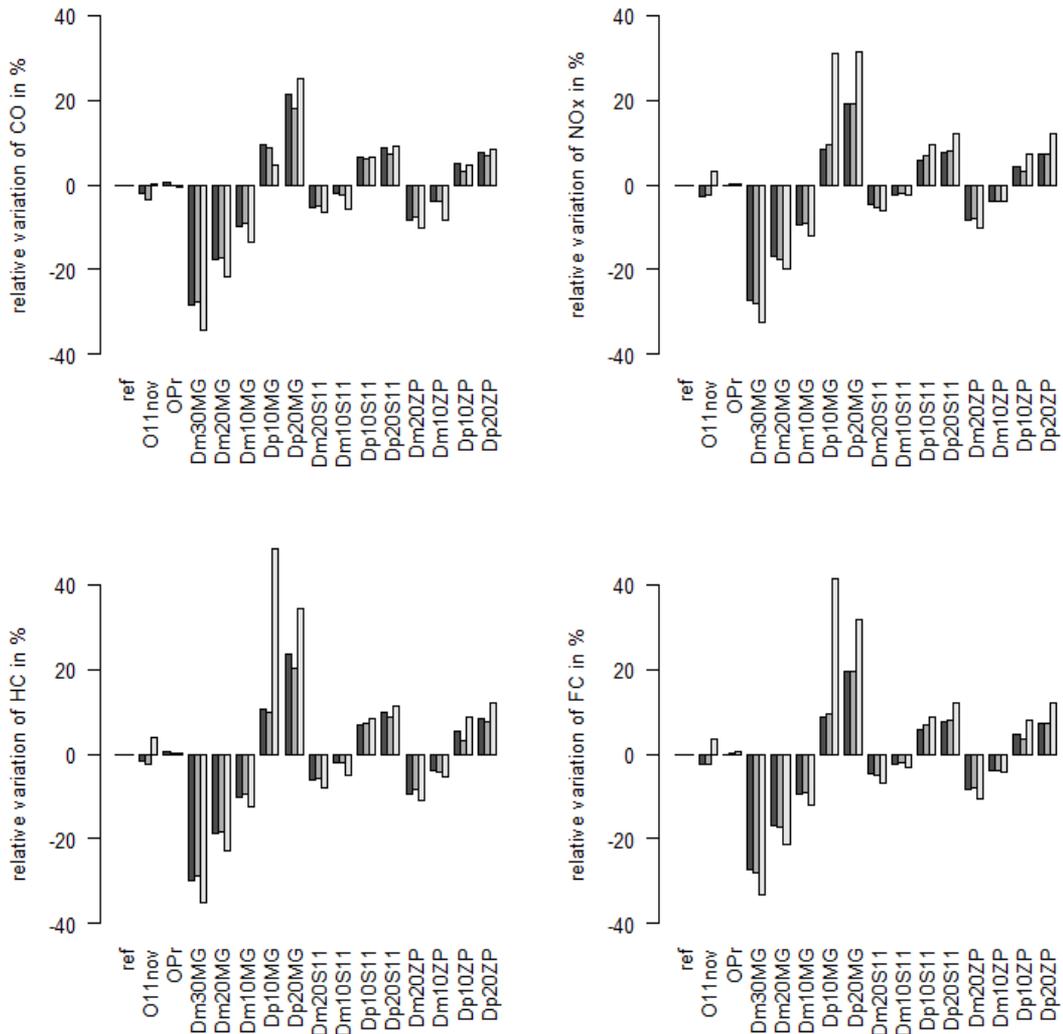


Figure 2: relative variation of the environmental parameters calculated for each scenario to the reference scenario. The darker grey: Copert, medium grey: HBEFA, light grey: Phem estimations.

Analysis of two scenarios on the basis of the difference of NOx emission between scenario and reference over the 2091 links

Focus was directed on the analysis of NOx emissions in the following analysis. We have chosen to further analyze two scenarios that have presented moderate variations of emissions at the network scale: Dm20ZP and the O11nov scenarios. Their variations of environmental parameters rank from -8 to -11% and -3 to +4% to the reference scenario, respectively. Both are quite realistic scenarios that could be analyzed as part of a transport local policy.

Maps are presented in the figures 3 and 4. As to highlight the major trends, a selection of the links that show the higher difference in NO_x emissions between scenario and reference was performed. D is defined as $D = \text{NO}_x \text{ emissions of the scenario} - \text{NO}_x \text{ emissions of the reference}$. Figured links have absolute value of $D > 10 \text{ g of NO}_x / \text{h/ link}$. This means that Positive D means more emissions (figured in solid line); negative D means less emissions (dashed line). All links and nodes are included in the analysis, whereas only links are figured. Details of the distribution of D regarding the threshold of 10 g and the quantiles 0.05 and 0.95 are provided in table 4.



Figure 3: impact of the O11nov scenario on the estimated NOx emissions. NOx emissions of the reference scenario is figured in ligh grey, major differences of O11nov to the reference in dark. More explanations of method in the text.

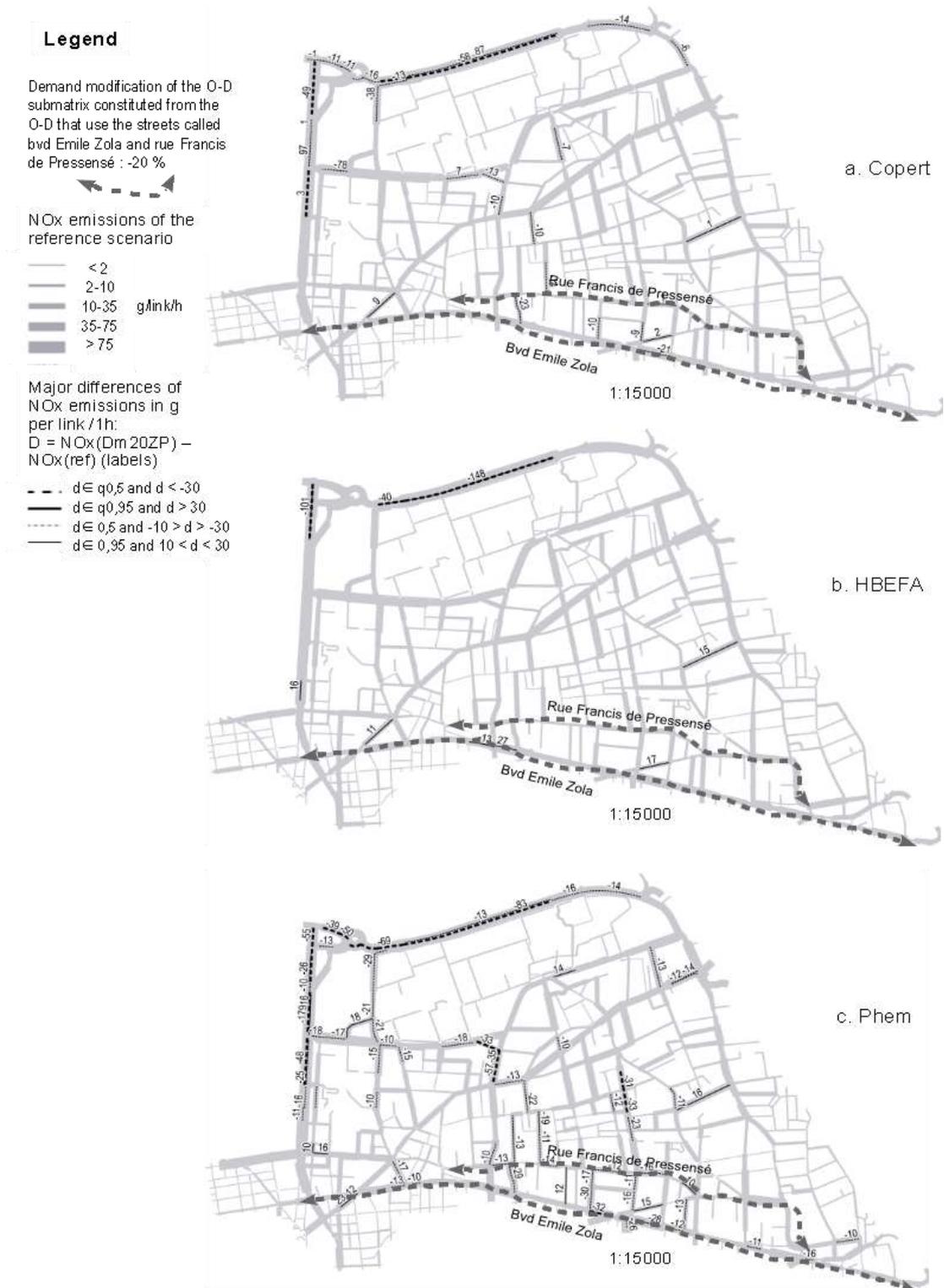


Figure 4: impact of the Dm20ZP scenario on the estimated NOx emissions. NOx emissions of the reference scenario is figured in ligh grey, major differences of O11nov to the reference in dark. More explanations of method in the text.

Table 4: absolute differences of NOx emissions between scenarios and reference taken into account in different subsets of data, q0.05 and q0.95 are quantiles of the differences (D) of emissions of the 2091 links and nodes. a, NOx emissions are summed over the different subsets of links (in g / h); b, percents are given relatively to the sum of negative and positive differences of emissions; c, number of links per subsets

		Sum of NOx emissions differences in the following subsets						Values of difference of NOx emissions per link (in g/h)		
		D < -10	D < q0.05	D < 0	D > 0	D > q0.95	D > 10	Quantile 0.05	Quantile 0.95	
Dm20ZP – ref	Copert	a	-625	-1072	-1698	428	318	47	-3.67	1.14
		b	37%	63%	100%	100%	74%	11%		
		c	29	106	921	515	105	4		
Dm20ZP – ref	HBEF A	a	-666	-1090	-1661	474	368	98	-3.54	1.17
		b	40%	66%	100%	100%	78%	21%		
		c	29	106	919	514	106	7		
Dm20ZP – ref	Phem	a	-1732	-2007	-3078	742	542	171	-7.30	1.90
		b	56%	65%	100%	100%	73%	23%		
		c	73	106	932	516	106	13		
O11Nov – ref	Copert	a	-1271	-1622	-2301	1899	1457	1101	-5.10	4.07
		b	55%	70%	100%	100%	77%	58%		
		c	56	106	766	681	106	51		
O11Nov – ref	HBEF A	a	-1215	-1637	-2289	1915	1508	1150	-5.22	4.18
		b	53%	72%	100%	100%	79%	60%		
		c	48	106	771	672	106	51		
O11Nov – ref	Phem	a	-2197	-2357	-3423	4135	3189	3094	-8.81	9.17
		b	64%	69%	100%	100%	77%	75%		
		c	89	106	769	698	106	96		

The table 4 shows the quantities of NOx emissions that are generated or avoided thanks to the scenarios over different subsets of links. Regarding the two studied scenarios, quantiles 0.05 and 0.95 of NOx differences are very similar for Copert and HBEFA resulting estimates (maximal difference of 0.13), whereas absolute values of these quantiles are higher for Phem. The distribution of differences of NOx emissions is thus more dispersed. Phem calculations result in more frequent large differences between scenarios and reference.

The proportions of links with less emissions (ie negative D) over the links with supplementary emissions (ie positive D) are different for the two studied scenarios: 1.8 for the Dm20ZP and 1.1 for the O11nov (ratio similar whatever emissions modelling used).

At least 63% of the emissions variation are taken into account when considering 5% of the links included in one of the tails of the distribution of D (with values of difference inferior to quantile 0.05, or superior to quantile 0.95). It reaches 79% for the O11Nov scenario estimated with HBEFA. More than 200 links are considered ($2 \times 0.05 \times 2091$ links and nodes).

More than 200 links represented on the map may result in a confusing map, thus

we have applied a threshold at 10 g/link on D. When applying this threshold value, the number of links is reduced to 33 to 185 and the representativeness of these links as supporting a large amount of NO_x variation is also reduced up to 11%. The two scenarios present noticeable differences: i, in terms of number of links having a D > 10 (33 to 86 for Dm20ZP, 99 to 185 for O11Nov), ii, the representativeness of the subset is more reduced in the case of Dm20ZP (11% to 23% of the positive emissions, and 37% to 56% of the negative emissions) than in the case of O11Nov, in which the reduction due to the threshold still represents more than the half of the emission variations. These differences must result from the scenario design. One is a very local operation, O11Nov, resulting in high local variation of emissions. The Dpm20ZP scenario induced a much more global variation; indeed it affects two very long and travelled roads of Villeurbanne. It must trigger an impact on the overall urban area but with less intense variation per link than the O11Nov scenario (ie less links showing differences > 10).

The analysis of maps (figures 3 and 4) show some similarities and some dissimilarities. As previously presented, more links are figured for the O11Nov than the for the Dm20ZP. More links are figured when Phem was the modelling used. Each modelling highlights some links that do not appear in the other. For each scenario, some links are figured whatever the emissions modelling is used. The larger solid and dashed dark lines highlight the difference of emissions that are higher than 30 g. For instance, this helps to identify the links that would support major variation of pollution, especially noticeable on the Op11nov map (figure 3).

4 Discussion

Several environmental parameters were calculated with 3 different emissions modellings on the basis of a microscopic dynamic modelling of a French urban network. As far as we know, very few studies reported that kind of data (Borge et al., 2012).

Investigating various spatial scales

Air quality results from phenomena that occur at different spatial scales. Emissions from traffic are local, but emitted pollutants can be transported far away from their sources. This supports the idea of analysing scenarios with different levels of spatial aggregation.

Interestingly, the analysis of the two selected scenario is very different at the two considered scales. At the network scale, no clear conclusion could be drawn for the O11nov scenario. But when highlighting the links that represent the higher variations, impact of the O11nov scenario could be clearly noticed on some roads whose emissions were largely modified. . No aggregation was performed at the road scale, the two directions of traffic were considered. So, for some roads emissions increase on the links of one direction, and decrease on the links of the opposite direction. Aggregation has to be performed to provide better clarity

concerning the variation of the emissions in a given road. Dispersion phenomena, largely influenced by the weather, and population allocation must also be taken into account in the future methodology.

Does the choice of the modelling of pollutants influence the scenario ranking?

Whereas estimations of emissions largely differ between the two aggregated modellings (Copert and HBEFA) and the instantaneous modelling (Phem), the differences of scenario emissions relative to the reference emissions are much less significant.

As a stakeholder could procede, we have conduced an analysis by ranking the scenarios from the less emissive to the more emissive one. Rankings based on fuel consumption and pollutant estimates were performed. Whatever environmental parameter considered, the two aggregated modellings provided the same ranking of scenarios. Part of the rankings based on Phem estimates could be similar or different depending on the environment parameters considered (HC and FC *vs* CO *vs* NO_x).

As Phem considers vehicle trajectories and speed, it might be more sensitive to variations of traffic condition and speed variation. Further investigations of the traffic dynamic in those scenarios would provide explanations, but has not been performed yet.

Combining a dynamic traffic modelling and emissions modellings

This study is one stage of development of a much longer line of modelling that goes from the traffic characterization to the health impact assessment. The analysis of the microscopic simulation results would allow to further characterize the traffic conditions.

Comparisons between emissions modellings were made possible because ensuring consistency of emissions factors, vehicle fleets and other hypothesis were performed previously in the CoERT-P project. To improve the combining of dynamic traffic modelling and emissions modelling, other developments are needed: integration of the fleet of heavy duty vehicles, and calculation of cold start excess emissions. These developments would integrate the TRAPS interface.

A weak representativeness of accelerations for the traffic simulation is suspected to explain the high values of Phem estimates. The mean speed used for Copert and HBEFA calculations might be more realistic. Previous work have already discussed the relevance of combining microscopic traffic simulation with estimations of environmental parameters (Vieira da Rocha et al, 2015).

Ranking of scenarios on the basis of relative difference to the reference is often used. However, accurate estimations of real pollutant emissions are needed because they enter the calculations of pollutant concentrations. Monitoring air pollution can only be performed on pollutants concentrations.

In order to valuate the emissions estimations and their trends, comparisons with measures would be necessary. Following this idea, experimentations could be designed on the basis of the results of modelling. Locations for the measuring apparatus and period of observation could be defined thanks to modelling results.

This is one perspective of this work.

Dynamic traffic modellings are usually made for dealing with rush hours and their constraints. However, pollutant emissions in each hour of the day contribute to the air quality. Thus, methodologies of traffic modellings have to evolve to also take into account environmental requirements and not only traffic management ones.

Acknowledgments

This work was supported by the PREDIT IV fund of the French ministry of environment and transport (Medde). The authors are grateful to F. Golay for preliminary work, to M. André, and O. Charnay for useful help for data analysis, and L. Chauvin for proofreading.

References

- [1] Borge R., I. de Miguel, D. de la Paz, J. Lumbreras, J. Pérez & E. Rodríguez (2012): Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain). *Atmospheric Environment*, 62, p 461–471.
- [2] Ntziachristos L., D. Gkatzoflias, K. Chariton & Z. Samaras (2009): COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model - In “Information Technologies in Environmental Engineering”, Ioannis N Athanasiadis, Andrea E Rizzoli, Pericles A Mitkas et Jorge Marx Gómez, Berlin, 491–504.
- [3] Samaras C., L. Ntziachristos & Z. Samaras (2014): COPERT Micro : a tool to calculate the vehicle emissions in urban areas, Paris, France, 14-17 April, 2014, Transport Research Arena, 10.
- [4] COPERT 4 (version 4.10) (2012): Emisia. <http://emisias.com/copert>.
- [5] Hausberger S (s. d.): PHEM (version 11.2.17): Graz University of Technology.
- [6] HBEFA (version expert version 3.1v5) (2014): Infrac: <http://www.hbefa.net/e/index.html>.
- [7] QGIS Development Team (2016): QGIS Geographic Information System, Open Source Geospatial Foundation.
- [8] R Core Team (2015): R: A language and environment for statistical computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- [9] Transport Simulation System (s. d.): Aimsun, Transport Simulation System: <https://www.aimsun.com/>
- [10] Vieira da Rocha T., L. Leclercq, M. Montanino, C. Parzani, V. Punzo, B. Ciuffo & D. Villegas (2015): Does traffic-related calibration of car-following models provide accurate estimations of vehicle emissions?, *Transportation Research Part D*, 34(c), 267–280.

Paper number EU-TP0200

Improve highway ramp metering modelling with real data

Nicolas DITCHI^{1*}, Thomas COURBON²

1. Cerema Direction Territoriale Ouest, France
2. Cerema Direction Territoriale Méditerranée, France

Abstract

This paper presents the approach used to calibrate a microsimulation AIMSUN model developed to study a real time traffic management project deployed to prevent congestion on the A50 highway Toulon tunnel. The model is comprised of the highway, and 4 ramps with ramp metering systems. It was designed to test and evaluate the management strategies efficiency. Using the AIMSUN programming capabilities, real data was injected into the simulation run to match the real situation for both vehicle arrivals and activation of metering lights. It was possible to control vehicle generation using real traffic data produced by loop detectors. The ramp metering lights were also set to match statuses computed by the traffic management system. This was done to allow us to replicate real life traffic conditions and to visualise the congestion building process.

Keywords:

Traffic management, microsimulation, traffic data

Context

Dynamic Traffic management operations are more and more used to optimize road network where capacity that can't be increased by expensive infrastructure investments. In order to improve the beforehand evaluation quality, efforts have to be made to better understand the phenomena linked to dynamic traffic management (variable speed limit, ramp metering, lane management, etc...) and to develop evaluation tools based for example on dynamic traffic simulation models. In order to contribute to these actions, we have developed an innovative approach using AIMSUN microsimulation tools to implement traffic generation and dynamic traffic management based on 40 seconds aggregated real data.

Improve highway ramp metering modelling with real data

Site, system description and data used

Real world project

Since 19 March 2014, when the second tube (South tube) of the underground road crossing Toulon opened, the A50 and A57 motorways have been linked by a two-lane thoroughfare. The project was ordered by the DREAL PACA, the Provence-Alpes-Côte-d'Azur regional directorate of the French ministry of Ecology, Sustainable development, Transport and Housing.

The opening of this tunnel depended on the implementation of a dynamic traffic management system, as required by the security authorities in order to avoid any congestion inside the tunnel, irrespective of the traffic flow conditions.

In response to this demand the Cerema, Centre for studies and expertise on Risks, Environment, Mobility, and Urban and Country, conducted traffic surveys and dynamic modelling of the highway section to anticipate the situation when the tunnel opened, and to define the measures to be taken. A system was designed to coordinate access to the four insertion ramps after the tunnel and the dynamic control of the entry lanes of the south tube.

This dynamic traffic control system, designed by SETEC ITS and validated by Cerema, is mainly based on measurements taken by traffic loop detectors that are interfaced with the tunnel's centralised technical control system.

The system started up on 20 March 2014, the day after the tunnel was opened.

System Description

The system's functionality was proposed by Cerema. The system automatically controls the metering lights downstream of the south tube in a coordinated manner, and allows for more restrictive measures like blocking one tunnel lane (funneling) or closing it completely, if the other dynamic control measures were insufficient.



Figure 1 – Situation plan

Moreover, the furthest metered ramp is made up of two slip roads that simultaneously join the main section. These two entries received special treatment, consisting of the alternating control of the regulation of each of the slip roads, to avoid conflicts between incoming traffic.

Improve highway ramp metering modelling with real data

Coupling the access regulation measures and the dynamic lane control in the same system was a particularly innovative option.

The detailed specifications of the dynamic control algorithms were written by SETEC ITS in collaboration with Cerema. The regulation principles are based on the Minnesota SZM (Stratified Zone Metering) algorithm, which was significantly supplemented to meet the specific needs of the project. The algorithms were tested and enhanced using the AIMSUN microscopic simulation tool, in which they were implemented.

It consists in a cyclic algorithm based on aggregate traffic data for 40-second periods (flow rates and occupancy rates) from electromagnetic loops.

It provides:

- queue management on each regulated slip road
- traffic lights control to regulate the access roads downstream of the South tube: on, off, regulation and queue dumps (in order to limit impacts on the urban network)
- alternating control between the two access roads
- suggesting actions to the tunnel operators in order to control access to the tunnel (funneling or closure)

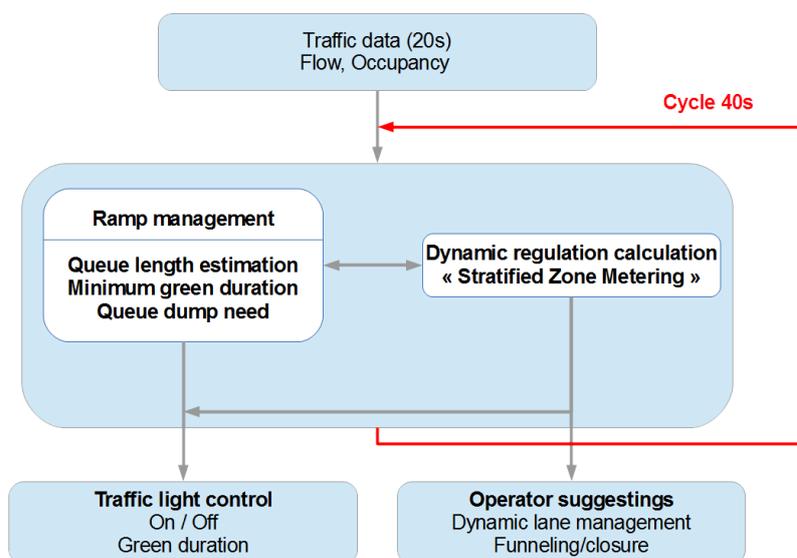


Figure 2 - Principle of the algorithm

The cycle of the dynamic control algorithm matches the cycle of the traffic lights. The cycle lasts 40 seconds.

Improve highway ramp metering modelling with real data

Data used

All the 40 seconds aggregated data are periodically stored in an XML files in the dynamic regulation server hosted in the road operator. These file contains, for a complete day:

- All the traffic data used as input for the traffic management algorithm (flows and occupancy)
- All the states calculated by the algorithm (traffic light controls, green duration, etc...)

Data quality

As the aim of a simulation model calibrated in-line using real life data is to reproduce a real life traffic situation, one should take extra precautions with respect to the quality of the traffic data used as inputs. In the presented case, the loop detectors were brand new and have been controlled right before being put into service. If the study has been carried on an existing section of road with older detectors, a verification of their accuracy would have been required to ensure the desired data quality.

Microsimulation tools and Advanced Programming Interface used

Introduction

The aim of this work is to use these detailed real data in an AIMSUN microsimulation models of the dynamic traffic management area. Basically this type of model is based on a description of traffic demand that comes from static models or specific Origin Destination survey. Here we want to be able to reproduce the traffic demand of each day of the stored data.

In order to do this, a Python program was developed using the AIMSUN Application Programming Interface (API). Its aim is to communicate the vehicle-based simulators with external applications in order to test and evaluate Advanced Transport Telematic Applications.

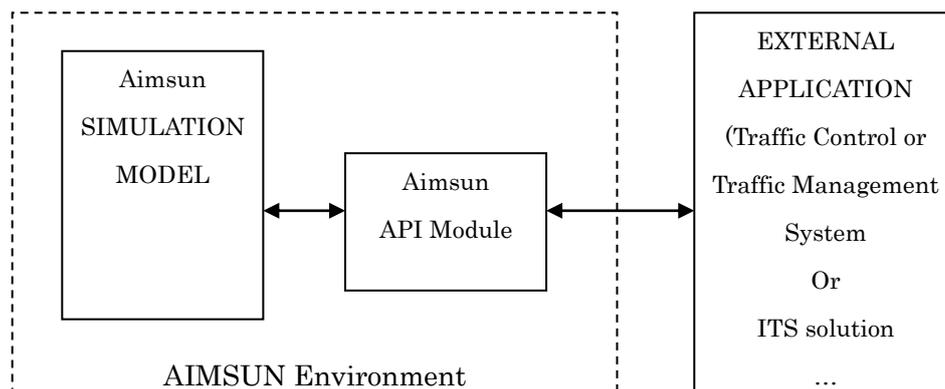


Figure 3 – AIMSUN API Module principle

Improve highway ramp metering modelling with real data

Developments using the API

This work has been done with the high level free and open-source programming language Python fully compatible with the AIMSUN API module.

The python script is divided in three main parts:

- The XML file reader that retrieves the chronological traffic data and the ramp metering traffic lights status.
- The dynamic vehicle generator module based on 40 seconds aggregated real traffic data that puts in the microsimulation models the number of vehicles at each cycle of the algorithm and at each entry of the simulation model
- The dynamic control system modules that gives every 40 seconds the parameters to the simulated ramp meterings (on/off traffic lights, green duration)

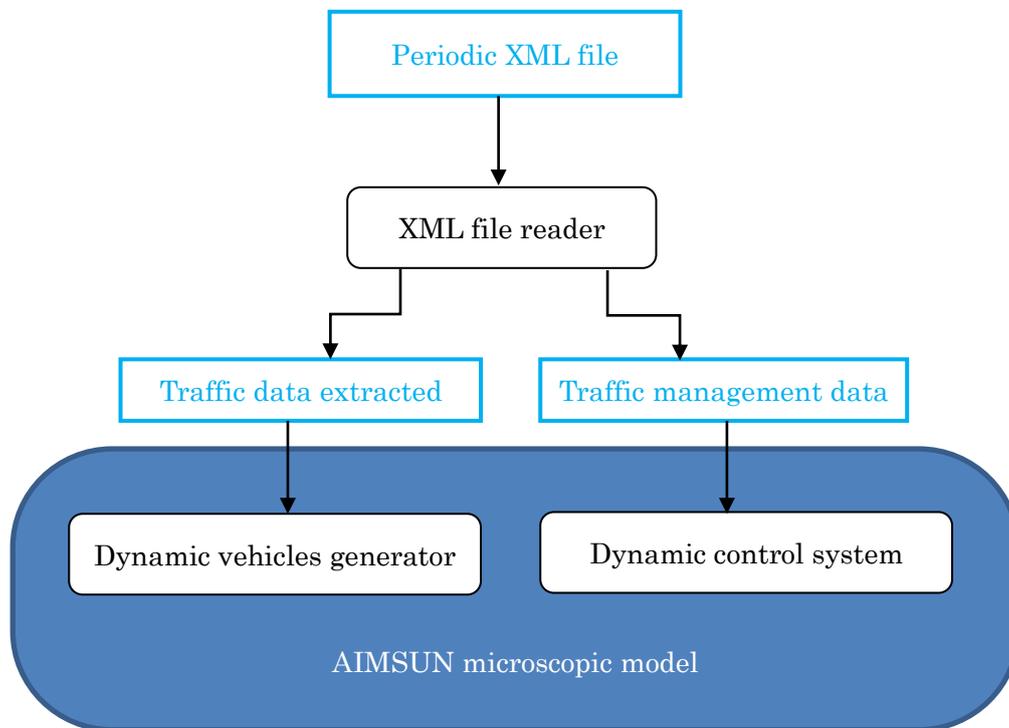


Figure 4 – Development architecture

The goal was to be able to replay a real life situation as recorded by the system loop detectors. Once the data have been loaded into the program memory the only remaining difficulty is to deliver the input data to the AIMSUN microscopic model at the right time during the course of the simulation run. This was especially tricky for the ramp metering traffic lights status. Indeed, whereas the traffic data are aggregated with a fixed interval of 40 seconds, the traffic lights pattern is computed and updated every 40 seconds by the traffic management algorithm, and the computed pattern may exceed 40 seconds.

The ramp metering capabilities by the AIMSUN model weren't suitable for this use case and we had to implement our own to be executed in parallel to the simulation model.

Improve highway ramp metering modelling with real data

Settings of the AIMSUN model

Providing the data needed to update the traffic light status and to generate the vehicles is not the only step needed. As for any microscopic traffic model, it has to be calibrated for a number of parameters in order to reproduce the real life situation:

- Microsimulation global parameters (e.g.: driver reaction time, vehicles acceleration, freeflow speed and so on...)
- Local parameters especially on the merging section (cooperation between vehicles, lane changing, aggressiveness, etc ...)
- Behaviour and respect for traffic lights.

This is done using real time data that are not used for the vehicles generation. As the studied highway section is equipped with 52 loop detectors and only 8 (2 for each insertion) are used for the vehicles generation, a lot of data can be used to carry a proper calibration of the traffic model.

Parameters are adjusted until the model can reliably reproduce the onset of congestion. The real occupancy and speed data is used to characterize the congestion and is compared to the simulated data to validate the model.

Future work

Now that the basic infrastructure has been implemented, this work can easily be used in various other use cases. Obvious prime candidates would be other ramp metering systems, since those setups often have good traffic detectors density. Even if in this case the data used to replay the real life situation were only traffic flow and traffic lights status, it is possible to inject many other traffic data sources: per vehicle origin-destination obtained thanks to ALPR or Bluetooth traffic studies, vehicle speeds and so on...

By incorporating other types of data, this work can be extended to:

- Intersection or highway interchange studies;
- Traffic management strategy evaluations.

References

1. N. Ditchi, O. Nau (2015) *Feedback On The Dynamic Regulation On A57 After Opening The Toulon South Tube*, 22nd ITS World Congress, Bordeaux, ERTICO (ITS Europe).
2. N. Ditchi, O. Nau (2013) *2e tube du tunnel de Toulon – La régulation dynamique du trafic*, Paris, 40^{ème} Congrès ATEXPO (ATEC ITS).
3. N. Geroliminis, A. Srivastava, P. Michalopoulos (2011), *Development of the next generation stratified ramp metering algorithm based on freeway density*, Minneapolis, Departement of civil engineering University of Minnesota
4. P. Michalopoulos, J. Hourdos, W. Xin (2005) *Evaluation and Improvement of the stratified ramp metering algorithm Through microscopic simulation*, Minneapolis, Departement of civil engineering University of Minnesota
5. Lau, R. (1996) *Ramp Metering Algorithm*. Minnesota Department of Transportation, St Paul, (MnDOT)

Effets du trafic sur la pollution au dioxyde d'azote : vers la mise en évidence de l'impact de la vitesse moyenne à partir de données collectées pendant 30 mois

Communication présentée au congrès de l'ATEC
Rencontres De la Mobilité Intelligente
Montrouge, 24 et 25 janvier 2018

Christine Buisson ^(1,a)

Delphine Lejri ⁽¹⁾

Anne-Laure Badin ⁽²⁾

Bernard Nativel ⁽¹⁾

(1) Université de Lyon, ENTPE, IFSTTAR, LICIT, UMR_T 9401, F-69518, LYON, France

(2) Cerema, Direction Centre-Est, 46 avenue St Théobald – BP 128, F-38081, L'Isle d'Abeau, France. (a) Auteure à contacter : christine.buisson@ifsttar.fr

Introduction

Le trafic routier est bien identifié par les politiques publiques comme un levier pour améliorer la qualité de l'air. Ainsi, bien comprendre les liens entre dynamique de trafic et dynamique des niveaux de pollution est important pour penser des mesures qui amélioreront la qualité de l'air avec la meilleure efficacité. L'originalité de notre étude est de se centrer sur le lien entre les concentrations de polluants observées en bord de voies et l'état du trafic.

Elle est motivée par le fait que le lien entre vitesse pratiquée et niveaux de pollutions est complexe et qu'il est reproduit par des modèles basés sur plusieurs sources de données d'entrée incertaines : composition des parcs roulants, proportion de véhicules circulant avec un moteur non chaud, vitesses pratiquées, émissions de polluants par les véhicules selon leur vitesses, dispersion et chimie des polluants, etc... Si la vitesse du flux de véhicules a une influence forte sur les niveaux de pollution, alors, c'est sur les niveaux de pollution mesurés en bords de voie que cette influence doit être le plus perceptible. Notre idée est donc de tenter de s'affranchir des étapes de modélisation et de voir si on peut mettre en évidence cette influence à partir des données mesurées.

L'objectif de cet article est de présenter la constitution et les premières analyses d'une base de données très complète associant des données descriptives du trafic d'une autoroute urbaine très circulée (avec un débit total de 130 000 véhicules les jours ouvrés), à Lyon et de la pollution relevée à sa proximité immédiate. L'intérêt de cette base de données est qu'elle associe des données de pollution (PM₁₀ et NO₂, même si seules les données de NO₂ seront analysées ici), des données de trafic (débit, vitesse moyenne, pourcentage de poids lourds, mesurées par sens) et des données sur les conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, température, pluviométrie). Ces données sont disponibles de janvier 2015 à juin 2017 avec une période d'agrégation de 1 heure. Au total, plus de 14 000 données appariées sur des périodes d'une heure sont disponibles, ce qui nous permet des analyses sur des segmentations de l'échantillon.

Peu d'études ont jusqu'ici porté sur des échantillons de cette taille et combinant toutes ces informations. Pourtant, il est admis largement que la vitesse pratiquée impacte directement les émissions de polluants des véhicules circulant sur l'infrastructure. La pollution générée par le trafic est due majoritairement à des phénomènes de combustion des carburants mais aussi à l'évaporation d'une partie des carburants et à l'usure des pièces des véhicules ou de la chaussée. Une fois émis, le devenir des polluants résulte de phénomènes de dispersion, et de transformations physicochimiques. Les concentrations mesurées en bord de route sont donc le résultat de nombreux processus liés aux sources de polluants (trafic, mais aussi chauffage, industrie, ...), et aux conditions météorologiques.

Nous pensons que ces travaux permettront de mieux qualifier l'impact des mesures agissant sur le trafic automobile sur les niveaux de polluants exposant les populations.

Le reste de cet article présentera tout d'abord une revue de la littérature sur le sujet, avant de présenter de manière complète les données associées dans notre base de données. Les premières analyses réalisées seront ensuite présentées, avant de définir des pistes de recherche futures qui pourront être conduites sur cette base de données.

Etat de l'art

Observation des concentrations en oxydes d'azote en France et en Europe

Le trafic routier représente une source majeure de pollution atmosphérique, en particulier d'oxydes d'azote (monoxyde d'azote NO et dioxyde d'azote NO₂). Ceux-ci sont formés par oxydation de l'azote atmosphérique (N₂) lors des combustions de carburants et de combustibles fossiles. Les transports routiers en sont le principal émetteur avec 57% des émissions (Citepa, rapport Secten 2016).

À forte concentration dans l'air, le NO₂ est un gaz toxique et irritant pour les yeux et les voies respiratoires. Chez les asthmatiques, il augmente la fréquence et la gravité des crises ; chez l'enfant, il favorise les infections pulmonaires. Les effets chroniques spécifiques de ce polluant sont difficiles à mettre en évidence du fait de la présence dans l'air d'autres polluants avec lesquels il est corrélé, (WHO, 2013).

Les niveaux de pollution aux NO_x sont globalement en baisse depuis plusieurs années, notamment grâce aux diminutions des émissions du secteur des transports. En effet, le renouvellement du parc de véhicules, l'équipement progressif des véhicules en pots catalytiques et le développement d'autres technologies de réduction ont permis des avancées qui ont contrebalancé l'intensification du trafic et l'accroissement du parc. La baisse des émissions du secteur des transports est aussi à mettre en parallèle de la mise en place de normes européennes d'émissions sur les véhicules. Malgré cela, en 2016, 16 agglomérations françaises présentent encore des niveaux moyens annuels dépassant les normes de qualité de l'air pour la protection de la santé définies au niveau européen (MTES, 2017). En France, le dispositif de surveillance de la qualité de l'air repose sur plus de 600 stations fixes de mesures des polluants sur le territoire. Certaines de ces stations sont spécifiquement disposées à proximité des infrastructures de transport routier majeures (stations sous influence du trafic). Les concentrations moyennes annuelles à ces stations sont 2 fois plus élevées pour le NO₂ par rapport au fond urbain (MTES, 2017).

Les niveaux de pollution de l'air en proximité du trafic sont ainsi surveillés en continu sur 1530 stations de mesure sous influence trafic en Europe et 111 en France (sur un total de stations référencées en 2016 respectivement, de 6112 et 630) (LCSQA et MTES, communication personnelle).

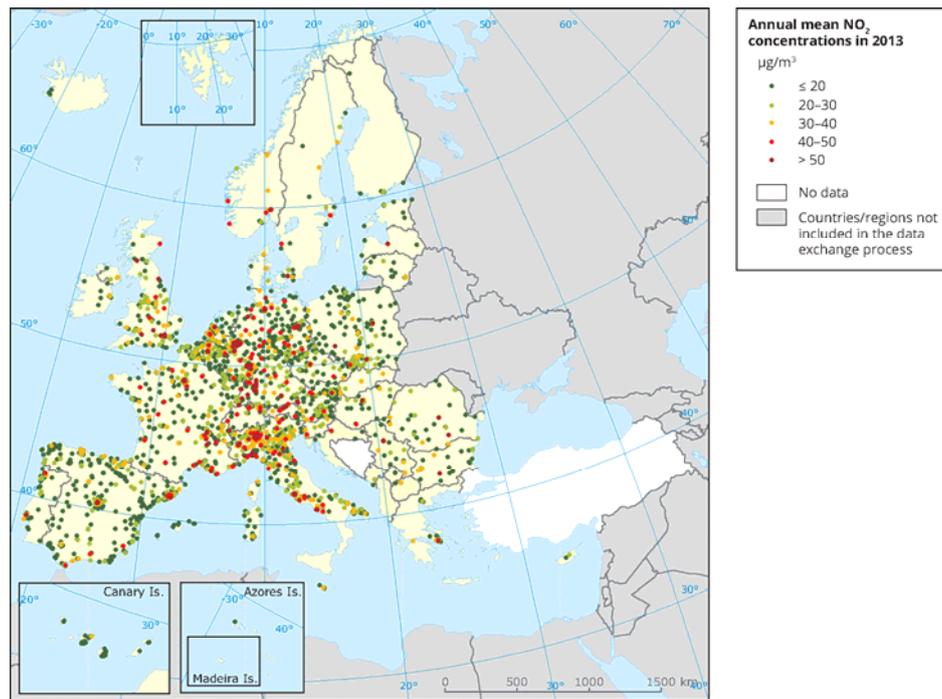


Figure 1 : observation en Europe des concentrations NO_2 en Europe : répartition des points de mesure et valeurs relevées (source : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/airbase-exchange-of-information-6>).

Les concentrations dans l'air de NO_x mesurées aux stations sous influence trafic ont fait l'objet de divers traitements associées ou non à des variables de trafic. (Carslaw, 2005) propose une analyse statistique de ces concentrations de NO_x à Londres de 1997 à 2003. Il met en évidence la diminution globale des concentrations en NO_x et une augmentation notable du ratio NO_2/NO_x . Ici cette augmentation s'explique par l'introduction de filtres à particules dans le parc automobile et plus particulièrement sur les bus de la ville. En Suisse, une étude portant sur une période allant de 1992 en 2004 montre des tendances encore plus marquées : les niveaux de NO_x (et de NO) ont diminué de 26% sur cette période alors que les niveaux de NO_2 ont augmenté de 23% (Hueglin et al., 2006). Cette évolution remarquable suggère la difficulté qu'ont de nombreuses villes européennes à respecter les seuils fixés par la réglementation européenne, en particulier la moyenne annuelle de NO_2 , limitée à $40\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Carslaw et al., 2011). La figure précédente illustre ces écarts à la réglementation.

Lien entre le trafic et les concentrations de NO_x observées

Le dépassement répété des seuils réglementaires de NO_2 pousse à identifier des principales sources et à comprendre les mécanismes d'émissions et de dispersion. Ainsi, (Hueglin et al., 2006) propose d'utiliser les concentrations en bordure de voie pour en déduire des facteurs d'émissions de NO_x en conditions réelles, après calage, pour une année de données, sur les facteurs d'émissions définis par la méthodologie HBEFA (Handbook emission factors for road transport). Les auteurs remarquent que les deux jeux de facteurs d'émissions conduisent aux mêmes évolutions annuelles. (Richmond-Bryant et al., 2017) opère une régression sur ces données permettant de décrire la variabilité spatiale des concentrations en fonction de la distance à la voie. (Wang et al., 2016) conclue que les stations fixes ne reproduisent pas assez précisément la variabilité temporelle liée au trafic routier et utilise des campagnes de mesures complémentaires pour les confronter à des concentrations de NO_2 modélisées.

La relation entre variables descriptives du trafic et émissions de polluants a été analysée dans le cadre de travaux de recherche menés en Europe (MEET, 1999). Ces derniers ont conduit à définir la vitesse moyenne des cycles de conduite comme un paramètre essentiel des émissions de polluants comme des consommations de carburant. Dès lors, à l'échelle d'un flux de véhicules, on suppose que les émissions de polluants peuvent être déduites à partir de la vitesse moyenne pratiquée par

l'ensemble des véhicules et du volume de trafic. (André and Hammarström, 2000) montre la sensibilité de l'évaluation des émissions de polluants à ce paramètre de vitesse moyenne.

Impact de mesures restrictives sur le trafic routier sur les niveaux d'émission et / ou de concentration

Ainsi, cette corrélation entre vitesse pratiquée et émissions permet d'envisager la réduction de vitesse comme une des principales mesures de réduction des émissions de polluants et donc d'amélioration de la qualité de l'air. Diverses études récentes se proposent d'en évaluer les effets par la simulation et/ou par la mesure et aboutissent à des conclusions variées.

Le passage de la vitesse limite de 90 à 70 km/h sur le périphérique de Madrid a été par exemple accompagné d'une modélisation pour en étudier l'impact sur les émissions de polluants. (Perez-Prada and Monzon, 2017) prévoient que la baisse du volume de trafic de 13 % (report de trafic lié à l'augmentation des temps de parcours) conduirait à une diminution des émissions de NO_x de 16.4% au niveau de l'infrastructure. Nous soulignons ici que cette étude ne tient pas compte des émissions produites par ce trafic reporté sur les autres infrastructures, et que cette diminution des niveaux de polluants n'a pas été évaluée expérimentalement.

(Keuken et al., 2010) a suivi la mise en œuvre de réductions des vitesses limites à Amsterdam et Rotterdam (passage de 100 à 80 km/h). Les auteurs caractérisent l'impact de ces mesures sur les concentrations mesurées d'une part et sur les conditions de trafic observées d'autre part. Leur analyse des niveaux de pollution mesurés avant/après, permet d'extraire la contribution de la mesure en termes d'émissions de polluants. Dans ce cas, l'article conclue à une nette diminution des émissions de NO_x (de 30% à 32%). L'analyse des effets de la mesure sur les temps passés en congestion conduit à l'évaluation de la baisse des émissions de NO_x (de 21 à 24%).

Ces résultats sont pourtant nuancés par (Bel and Rosell, 2013) qui étudie le passage à 80 km/h en 2008 sur les axes fortement congestionnés menant à Barcelone (partant de 120 ou 100 km/h). L'analyse des données expérimentales montre une augmentation des concentrations de NO_x de quelques pourcents (1.7 à 3.2%). (Bel et al., 2015) préconise de mettre en place une régulation dynamique de la vitesse, qui induit une réduction des concentrations de NO_x de 16 à 17.1% et diminue le risque de dépassement des niveaux de concentrations seuil de NO_x.

En France, à notre connaissance, deux mesures de réduction des vitesses ont fait l'objet d'une évaluation ex post de la qualité de l'air. L'une sur le périphérique de Rennes et l'autre sur l'A7 au droit de Valence.

Sur le périphérique de Rennes, la réduction des vitesses était de 20 km/h (passage de 110 à 90 km/h au Nord/Est et de 90 ou 80 à 70 km/h au Sud/Ouest). Des mesures de trafic et de concentrations de polluants avant et après ont permis d'évaluer la mesure (Air Breizh, 2016). Une réelle diminution de vitesses a été mesurée, de l'ordre de 10km/h sans report significatif entre les axes et sans amélioration en termes de temps de parcours. L'analyse des concentrations de NO_x mesurées au cours de deux campagnes estivales a montré une diminution significative de la pollution grâce à la réduction des vitesses au niveau du point de mesure Nord (passage de 110 à 90km/h) mais aucune tendance nette sur le point de mesures Sud (passage de 90km/h à 70km/h). L'analyse a porté sur 17 couples de jours de météo et de trafic comparables.

Sur l'A7 au droit de Valence, la vitesse a été abaissée à 90 km/h en juin 2016 pour une durée d'expérimentation d'un an. Des premiers éléments d'évaluation ont été présentés par Atmo Auvergne Rhône-Alpes en mai 2017, sur la base de calcul d'émissions et d'une comparaison des concentrations de polluants en différents points de mesures, en amont et au niveau de la zone de réduction de vitesses. Deux scénarios d'évolution des émissions ont été établis, l'un pessimiste, l'autre optimiste. Cette méthodologie conduit à évaluer des gains en émissions de NO₂ de -11 à -13%. Les premières analyses des concentrations mesurées indiquent une stabilité ou une diminution des concentrations entre le point de mesure amont et ceux sur la zone de réduction des vitesses, cependant ces premiers résultats restent à consolider.

Directions de recherches à explorer

Ainsi des méthodes d'analyses de données variées sont mises en œuvre, sans méthodologie établie. En particulier, il est intéressant de souligner que la mise en œuvre de modélisations des émissions et de la dispersion des polluants ne s'accompagne pas, dans les travaux que nous avons reportés (et pour autant que notre revue de la littérature soit exhaustive) d'une étude de validation expérimentale sur les mesures de concentrations.

Ceci peut s'expliquer par la complexité de la chaîne des phénomènes qui conduit aux concentrations mesurées en un point. Cette complexité est illustrée par la figure suivante. Nous nous proposons, grâce à la base de données dont nous disposons, d'étudier, par l'analyse statistique, les liens entre les phénomènes de trafic et les mesures de polluants. Ceci nécessite de connaître non seulement le trafic localement et la pollution mais aussi des variables qui permettent d'isoler les effets des autres phénomènes intervenant dans les niveaux de pollution : météorologie, niveau de fond de polluant, etc...

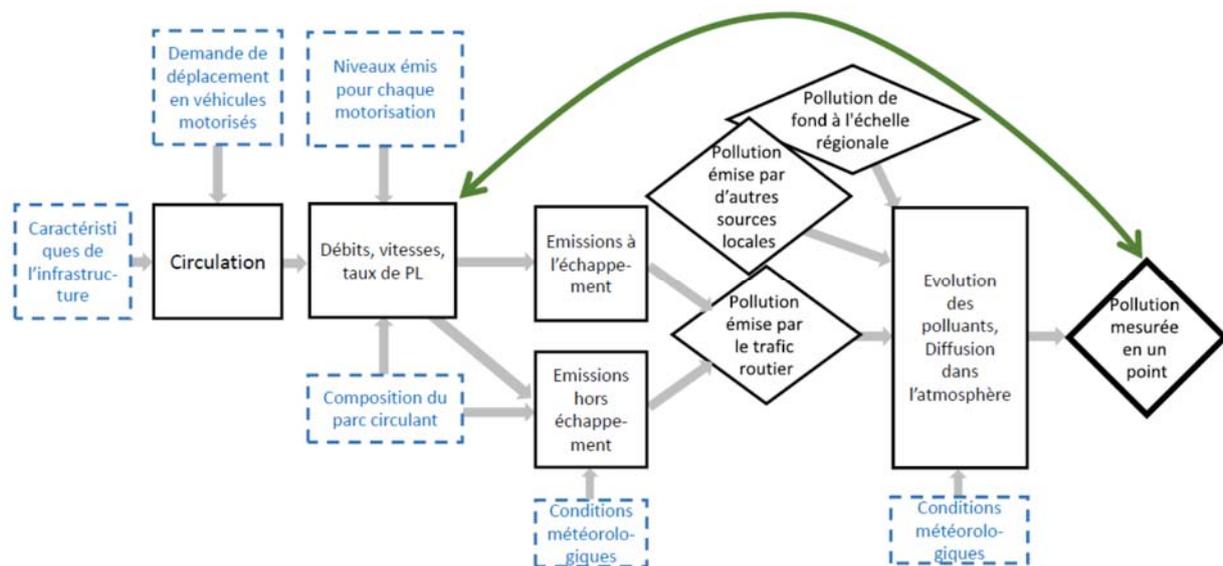


Figure 2 : Schéma des différentes contributions au niveau de polluants mesurés en bord de route (source : auteurs). NB : la dimension temporelle est volontairement absente de ce schéma mais ne doit pas, en toute rigueur, être écartée de l'analyse.

Données collectées

Comme nous l'avons indiqué, la base de données est particulièrement riche puisqu'elle contient des données de pollution, de trafic et de météorologie. La nature précise des données produites par les différentes sources va être maintenant détaillée. La figure 3 présente les différents capteurs utilisés, tous situés en bordure ou à proximité de la route départementale 383, soit le périphérique Est de Lyon.

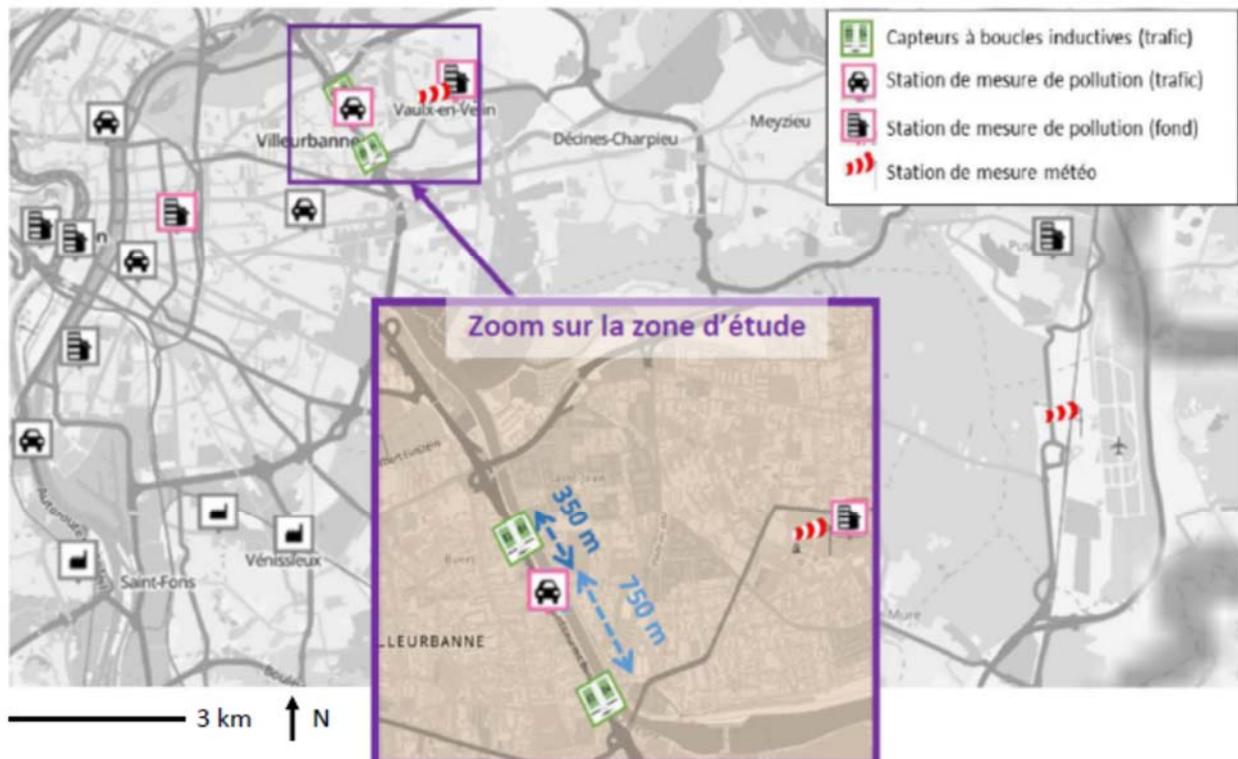


Figure 3 : Localisation des capteurs utilisés pour recueillir les données. (Source : ATMO Rhône Alpes et auteurs).

Concentrations de polluants

Ces données sont collectées et nous ont été mises à disposition par Atmo Auvergne Rhône Alpes (association agréée de surveillance de la qualité de l'air de la région¹). Différents types de stations de mesures sont utilisées pour la surveillance de la qualité de l'air. Dans notre étude, nous avons utilisé les données recueillies par 3 stations :

- une station sous influence trafic, installée sur une aire de repos de l'autoroute. La distance entre la station et l'axe central de l'autoroute est de 20 mètres ;
- une station de fond urbain située au centre de Lyon ;
- une station de fond urbain située à Vaulx en Velin.

Les données recueillies sont des concentrations de polluants, c'est à dire des masses de polluants (PM_{10} $PM_{2,5}$ NO et NO_2) exprimée en μg par m^3 d'air, pour chaque heure.

Données de trafic

Ces données nous ont été procurées par CORALY (Coordination et Régulation du trafic de l'Agglomération Lyonnaise²). Elles sont issues de boucles électromagnétiques. Le principe de fonctionnement de ces boucles est décrit entre autres dans (Buisson et Lesort, 2010). Il est basé sur la détection du passage de la masse métallique des véhicules. Chaque voie est équipée et au niveau le plus désagrégé, on peut réaliser des mesures individuelles. Dans le cadre de notre étude, on utilise des données horaires.

En plaçant deux boucles successivement, on peut avoir accès non seulement au nombre de véhicules par heure (débit), mais aussi à la vitesse de chacune que l'on utilise pour calculer (par moyenne harmonique) la vitesse moyenne des véhicules de chaque sens pendant une heure. La seconde boucle permet également de déterminer la longueur de chaque véhicule, que l'on utilise ensuite pour calculer un taux de poids lourds (par la détermination de la proportion de véhicules plus longs que 9 m passés au point de mesure pendant une heure.

¹ <http://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/> .

² <http://www.coralys.com/>

La station de recueil que nous utiliserons ici est celle de Cusset, située à 300 m au nord du capteur de pollution précédemment décrit. Aucune entrée ni sortie n'est présente entre ces deux sources de données, pollution d'une part, trafic de l'autre. Le nombre de véhicules observés est donc identique sur les deux points.

Quelques mots sur la précision des données : il est généralement admis que le débit est connu avec une précision de l'ordre de 10% et que les vitesses sont mesurées avec une autant plus grande erreur qu'elles sont faibles (entre 5% pour 100 km/h jusqu'à 15 % pour des vitesses de 20 km/h).

Données de météorologie

Plusieurs sources de données nous sont accessibles : les données publiques du site de Météo France³ et celles recueillies par notre collègue Dominique Dumortier, chercheur au département Génie Civil et Bâtiments avec un capteur situé à Vaulx en Velin sur le toit de l'ENTPE. Ces dernières donnent accès à l'ensoleillement, à la température à la vitesse et à la direction du vent ainsi qu'à l'humidité relative. Pour avoir accès aux données de pluviométrie, nous utilisons les données Météo France recueillies à Saint Exupéry, aéroport principal de l'agglomération.

Synthèse sur la quantité des données disponibles

Le tableau suivant récapitule les sources et les nombres de données utilisées.

Période : du 01 01 2015 au 30 05 2017	24 heures par jour	21 168 périodes
Nature de la donnée	Lieux de recueil	Nombre de données disponibles (indisponibles)
Concentrations de NO ₂	Périphérique, Lyon centre, Vaulx en Velin	18 001 (3 167)
Trafic (Débit, Vitesse moyenne, taux de Poids lourds)	Sens Nord Sud, sens Sud Nord, total des deux sens.	20 869 (299)
Météorologie (Vitesse et direction du vent, pluviométrie)	Saint Exupéry	20 785 (383)
Combinaison des trois sources de données		17 621 (3 547)

Tableau 1 : récapitulatif des périodes de disponibilité des données.

Premières analyses de données

Dans cette partie nous présenterons nos analyses préliminaires. Notre démarche est construite en deux temps. Tout d'abord, nous cherchons à séparer les effets du trafic des autres effets qui influent la concentration mesurée de polluants, en soustrayant le niveau de fond de concentration du signal, qui lui, est supposé être lié au trafic. Nous pouvons ainsi construire un ratio de concentration moyen par véhicule, qui ensuite peut être analysé en fonction des différents facteurs influençant : la vitesse et le taux de poids lourds principalement.

Passage de la concentration mesurée au ratio de concentration par véhicule circulant

Plusieurs possibilités existent pour supprimer le niveau de fond de pollution qui préexiste avant qu'un véhicule ne circule et émette des polluants, qui seront dispersés dans l'air avant d'être détecté par le capteur :

- La première solution consisterait à retirer de chaque mesure de NO₂ relevée auprès du périphérique, le niveau de polluant relevé à l'une ou l'autre des stations situées en milieu urbain dont nous disposons (Lyon centre ou Vaulx en Velin). Nous écartons cette solution, car nous observons sur la figure 4 que même pendant les périodes de nuit, lorsque les niveaux observés dans ces deux stations urbaines sont très faibles, les niveaux correspondants observés à proximité du périphérique sont significatifs.

³ <http://www.meteofrance.com/>

- La seconde solution consiste à considérer que le fond est le niveau moyen mesuré pendant les périodes pour lesquelles les conditions d'ensoleillement ne permettent pas la création de NO₂ à partir du NO de combustion du moteur (la nuit, de 22h à 5h) et lorsque le débit est très faible (inférieur à 1000 veh/h dans les deux sens). La valeur moyenne de la concentration de NO₂ observée pendant les 2424 périodes répondant à ces critères est de 44,8 µg/m³, avec un très fort écart type (de 24 µg/m³). Cette solution n'est donc pas idéale, mais nous la retenons toutefois.

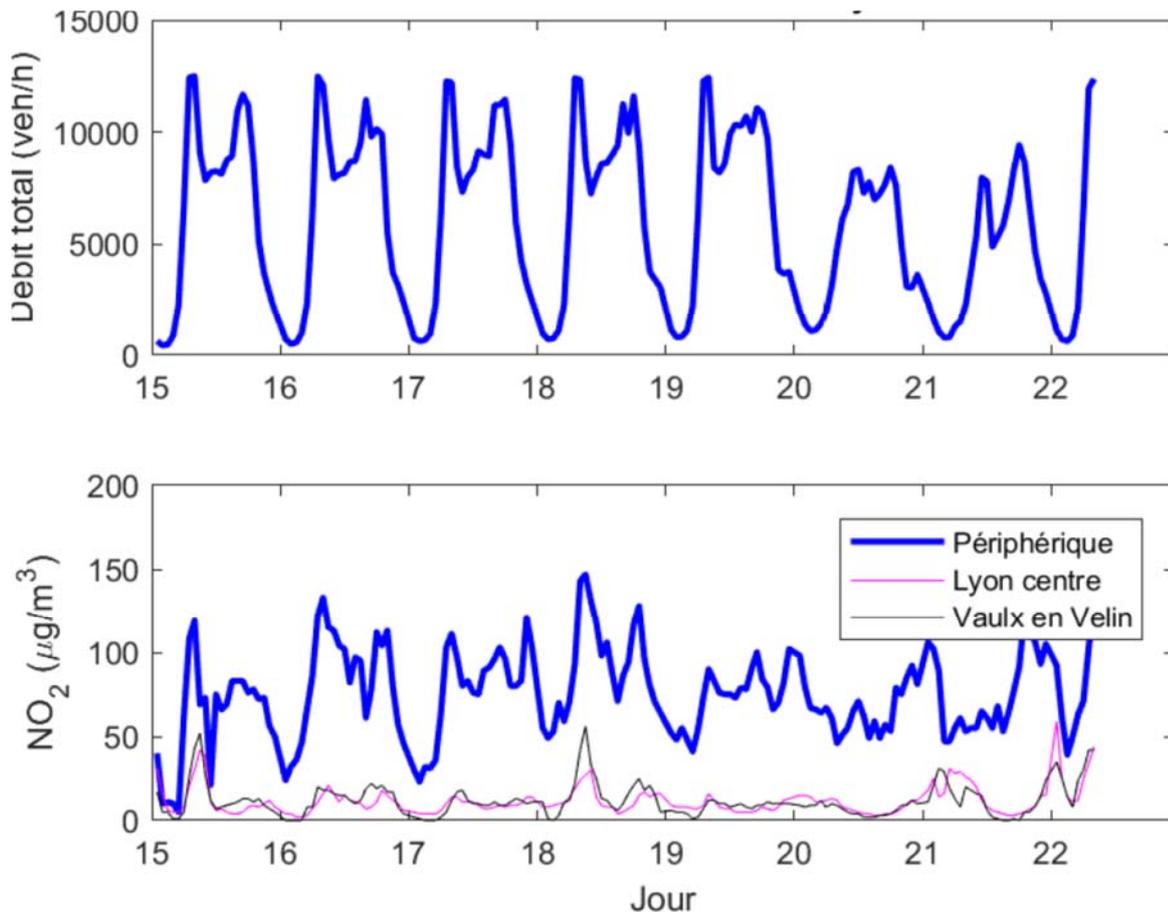


Figure 4 : évolution au cours de la semaine du 15 juin 2015 du débit total (en haut) et des niveaux de NO₂ observés. On constate que même pendant les périodes de très faible trafic (nuits) le niveau observé sur le capteur du périphérique est toujours plus important que les niveaux des deux stations de fond urbain.

Par la suite, nous analysons le lien entre le débit de trafic et le niveau de NO₂ mesuré au bord du périphérique (auquel nous avons soustrait ce fond moyen nocturne de 44,8 µg/m³. La figure suivante montre qu'il existe une relation de proportionnalité des concentrations avec le débit, même si d'autres phénomènes doivent être inclus dans nos explications (un très piètre coefficient de détermination R² de 0,1 confirme la faiblesse de la corrélation).

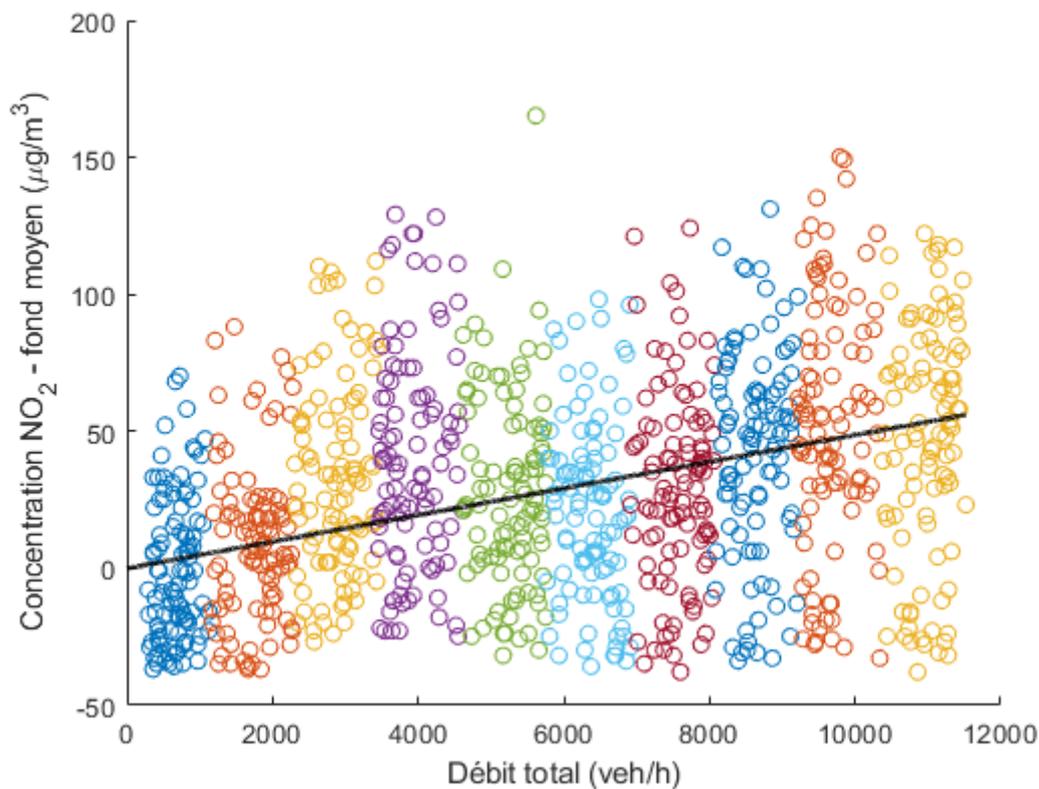


Figure 5 : sélection de 100 observations des couples (débit total, concentration NO_2 mesurée - fond moyen calculé) pour chacune des 10 classes de débits. La droite correspond à un ajustement linéaire avec valeur nulle à l'origine et une pente de $0.004863 \mu\text{g.h/veh.m}^3$.

Une interprétation de ce résultat peut être qu'en moyenne et indépendamment des conditions de trafic et de météorologie, s'il y a pendant une heure un véhicule circulant sur le périphérique lyonnais, cette circulation produit une émission qui résulte en une masse de NO_2 mesurée par le capteur de $4,9 \text{ ng par m}^3$ d'air. Notons que l'hypothèse d'indépendance de ce chiffre vis-à-vis des conditions de trafic et des conditions météorologie est très probablement fautive et doit être relaxée, comme nous allons le faire dans la partie suivante.

Analyse de l'effet de la vitesse des véhicules

Notre hypothèse est que ce ratio est lié à la vitesse des véhicules. Notons que comme nous l'avons vu dans la première partie, il est clair qu'il y a un lien au niveau des émissions individuelles. Ici il s'agit de mettre en évidence un lien au niveau des niveaux de concentrations dans l'atmosphère c'est-à-dire après diffusion et évolutions des espèces chimiques.

D'autres facteurs importants expliquant les émissions sont sans aucun doute le taux de poids lourds et la météorologie (vent, luminosité, température, ...). Nous avons donc pour une première approche, essayé d'éliminer les variations les plus importantes en sélectionnant les données recueillies :

- De 7 h du matin à 20 h ;
- Avec une proportion de poids lourds plus faible que 10 % ;
- Avec une vitesse du vent supérieure à 4 m/s .

Ensuite, nous regroupons les observations par classe de vitesse de 10 km/h en nous basant sur la vitesse moyenne horaire dans les deux sens. On obtient ainsi figure suivante, où les traits rouges symbolisent la médiane des observations et les traits bleus de part et d'autre les premiers et troisièmes quartiles.

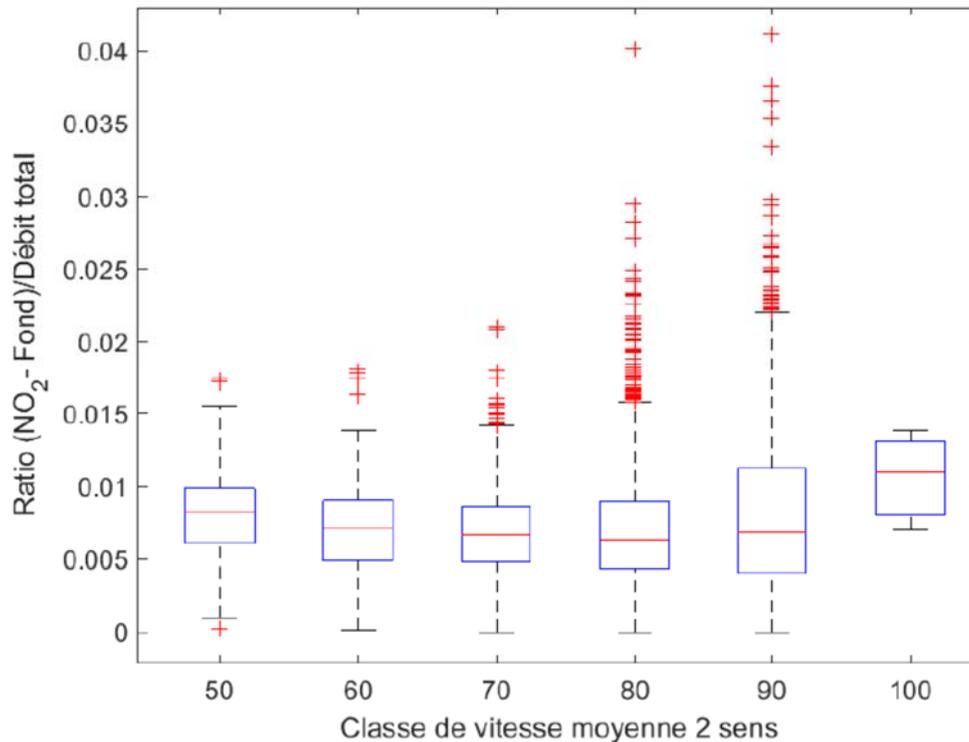


Figure 6 : boîte à moustache représentant les valeurs positives du ratio entre le niveau de concentration mesurée en NO₂ (auquel on a enlevé les valeurs de fond observées pendant la nuit pour des débits inférieures à 1000 veh/h) divisé par le débit total et les classes de vitesses.

Même s'ils semblent à première vue confirmer la forme en « U » type des modèles d'émission, ces résultats ne sont pas suffisamment significatifs pour que nous puissions tirer, à ce stade des affirmations définitives.

Conclusions et perspectives

La construction d'une base de données fusionnant trois sources différentes d'information (pollution, trafic routier et météorologie) est un préalable indispensable pour conduire des études expérimentales non pas sur les émissions comme cela est fait habituellement mais sur les concentrations. Ce premier travail a été présenté ici et les données sont maintenant disponibles sur simple demande.

Comme nous l'avons montré dans notre revue de la littérature, ceci peut contribuer à compléter les études actuellement conduites sur les mesures de réduction de la vitesse car celles-ci sont actuellement basées sur des résultats de simulation.

Cependant, le chemin est encore long pour parvenir sur la base de nos données ou de bases de données semblables à des conclusions définitives sur l'effet de la vitesse moyenne sur les niveaux moyens de pollution recueillis dans l'atmosphère correspondant à la circulation d'un véhicule. Il nous faut poursuivre la réflexion sur le niveau de fond, affermir notre idée qu'en conditions identiques, le niveau de concentration est linéairement proportionnel au nombre de véhicules circulants. Il nous faudra également segmenter par nature de conditions météorologiques, ainsi qu'en fonction du taux de poids lourd.

Nous allons dans les prochains mois poursuivre ces travaux qui sont à notre sens une des contributions nécessaires pour que l'on dispose d'outils fiables de quantification de l'impact des conditions et du volume de trafic sur la pollution et l'exposition des populations.

Références

- Air Breizh, 2016. Impact de la réduction de la vitesse sur la qualité de l'air à proximité de la rocade rennais dans le cadre de l'expérimentation.
- André, M., Hammarström, U., 2000. Driving speeds in Europe for pollutant emissions estimation. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 5, 321–335. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(00\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(00)00002-X)
- Atmo Auvergne Rhône-Alpes, 2017. Impact sur la qualité de l'air de la limitation de vitesse sur l'A7 au droit de Valence.
- Bel, G., Bolancé, C., Rosell, J., 2015. The environmental effects of changing speed limits : A quantile regression approach. *Transp. Res. Part D* 36, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.003>
- Bel, G., Rosell, J., 2013. Effects of the 80 km/h and variable speed limits on air pollution in the metropolitan area of barcelona. *Transp. Res. Part D* 23, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.04.005>
- Buisson, Ch., Lesort, J.-B., 2010, Comprendre le trafic routier, méthodes et calculs, 110 p. Certu, collection dossiers.
- Carslaw, D.C., 2005. Evidence of an increasing NO₂ / NO_x emissions ratio from road traffic emissions. *Atmos. Environ.* 39, 4793–4802. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.023>
- Carslaw, D.C., Beevers, S.D., Tate, J.E., Westmoreland, E.J., Williams, M.L., 2011. Recent evidence concerning higher NO_x emissions from passenger cars and light duty vehicles. *Atmos. Environ.* 45, 7053–7063. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.063>
- Citepa, 2017. Rapport d'inventaire national au format SECTEN (secteurs économiques et énergie) relatif aux émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - séries sectorielles et analyses étendues.
- Hueglin, C., Buchmann, B., Weber, R.O., 2006. Long-term observation of real-world road traffic emission factors on a motorway in Switzerland. *Atmos. Environ.* 40, 3696–3709. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.020>
- Keuken, M.P., Jonkers, S., Wilmink, I.R., Wesseling, J., 2010. Reduced NO_x and PM₁₀ emissions on urban motorways in The Netherlands by 80 km/h speed management. *Sci. Total Environ.* 408, 2517–2526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.008>
- MEET, 1999. Projet Report SE / 491 / 98 Methodology for calculating transport emissions.
- MTEs, 2017. Bilan national de la qualité de l'air en 2016. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2669/1097/bilan-qualite-lair-france-2016.html>
- Perez-prada, F., Monzon, A., 2017. Ex-post environmental and traffic assessment of a speed reduction strategy in Madrid ' s inner ring-road. *J. Transp. Geogr.* 58, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.018>
- Richmond-Bryant, J., Chris Owen, R., Graham, S., Snyder, M., McDow, S., Oakes, M., Kimbrough, S., 2017. Estimation of on-road NO₂ concentrations, NO₂/NO_x ratios, and related roadway gradients from near-road monitoring data. *Air Qual. Atmos. Heal.* 10, 611–625. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0455-7>
- Sayegh, A., Tate, J.E., Ropkins, K., 2016. Understanding how roadside concentrations of NO_x are influenced by the background levels, traffic density, and meteorological conditions using Boosted Regression Trees. *Atmos. Environ.* 127, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.024>
- Wang, A., Fallah-Shorshani, M., Xu, J., Hatzopoulou, M., 2016. Characterizing near-road air pollution using local-scale emission and dispersion models and validation against in-situ measurements. *Atmos. Environ.* 142, 452–464. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.020>
- WHO, 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project.

Evaluation de la régulation de cinq accès de la rocade de Grenoble

Frédéric Aliaga, Cerema Centre Est,
Christine Buisson, Licit (Ifsttar-Cosys / ENTPE)¹,
Philippe Mansuy, DIR Centre Est,
Philippe Coutard, DIR Centre Est
Valentine Creusel, Dreal Grand Est

Article pour les rencontres de la mobilité intelligente, ATEC, 23-24 janvier 2019, Montrouge.

Dans cet article nous analysons l'impact de la mise en place de la régulation d'accès sur la rocade sud de Grenoble (sens extérieur) par la Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est. Cette analyse est basée sur un ensemble très complet de données de débit et de temps de parcours. Ceci nous permet de mettre en évidence un impact positif significatif en heure de pointe du matin. L'article s'organise de la manière suivante : description du réseau et des données puis présentation de la méthode d'analyse des données. La dernière partie est consacrée aux résultats et à leur discussion, avant une conclusion.

Description des données et du réseau

Localisation du site expérimental et zone concernée

L'agglomération de Grenoble regroupe plus de 500 000 habitants et son réseau autoroutier est composé, pour la partie la plus centrale, de deux voies à caractère autoroutier à deux fois deux voies (l'A480 et la RN 87). Ces deux axes se rejoignent en un seul point, au niveau de l'échangeur du Rondeau. Ainsi, le réseau n'est pas maillé. Pour une ville de cette taille, la congestion est donc importante.

La Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est (DIR-CE) est en charge de la gestion de la RN87 (dite aussi rocade sud) dont le trafic moyen journalier annuel est de 97 100 véh/j entre Rondeau et Libération. Au vu de la congestion, la DIR Centre Est a décidé de mettre en place une régulation d'accès sur cinq accès répartis sur cinq kilomètres de cette rocade, sur la chaussée extérieure (Ouest vers Est), (Mansuy, Jacquet, & Buisson, 2017).

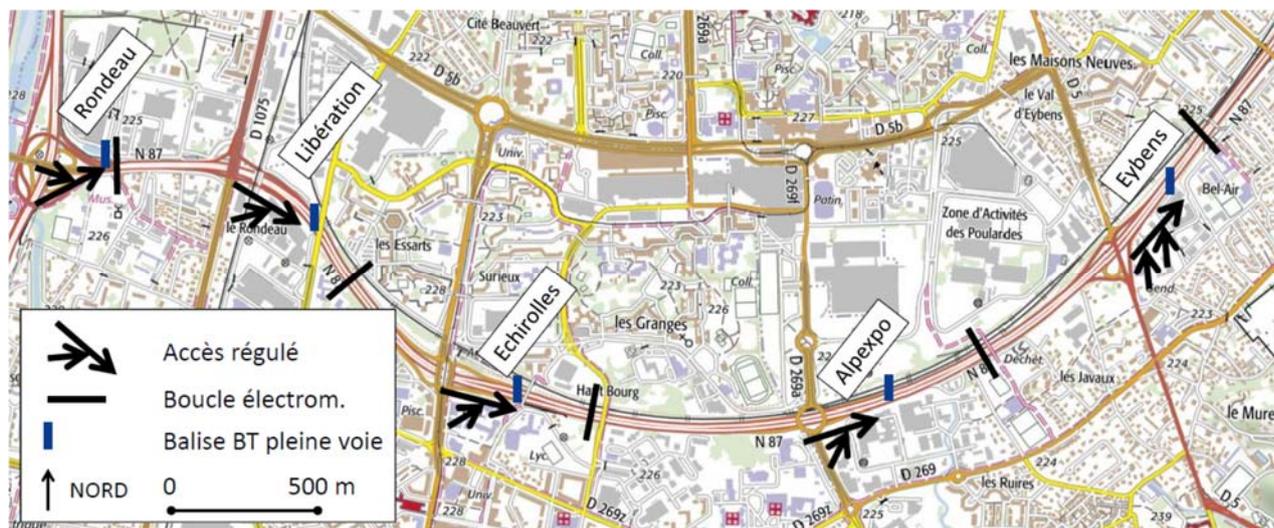


Figure 1 : carte de la zone régulée sur la rocade sud de Grenoble. Deux échangeurs sont particuliers : à l'échangeur du Rondeau le trafic secondaire rejoint l'autoroute par la gauche ; à l'échangeur d'Eybens, deux bretelles permettent de rejoindre l'autoroute, une pour les usagers venant de la partie nord du réseau urbain, la seconde pour ceux provenant du sud. (Source : www.geoportail.fr).

Principe de fonctionnement de la régulation d'accès

Le principe de la régulation d'accès mise en place est de réguler le débit issu de la bretelle d'accès par feu à deux phases (rouge et jaune clignotant). La figure suivante présente les équipements que l'on

¹ Auteur correspondant : christine.buisson@ifsttar.fr

retrouve sur chacune des cinq bretelles. L'objectif de la régulation d'accès est de maximiser l'offre de l'infrastructure en maintenant le plus longtemps possible une situation fluide sur un convergent.

En effet, il est admis dans la littérature, sur la base de nombreux cas expérimentaux, que si la congestion s'installe sur un convergent, sa capacité devient alors de 3 à 20 % inférieure à ce qu'elle est en situation fluide. Ce phénomène est appelé "capacity drop" ou chute de capacité. Il semble dû au fait que le flux congestionné, dont la vitesse est faible, connaît une accélération progressive à l'aval du bouchon, avec une augmentation graduelle de la distance entre véhicules.

Dans l'objectif de maintenir la capacité nominale, dès que la demande de trafic sur la section courante est supérieure à un seuil, on applique un cycle de feux à l'aval de cette bretelle (grâce au feu qui y est placé). Une file d'attente se forme alors sur la bretelle. Le feu étant situé à l'extrémité de la bretelle et en amont de la zone d'accélération, on garantit que la vitesse des véhicules venant de la bretelle soit suffisante pour que leur insertion dans le trafic de la section courante ne perturbe pas ce trafic². Ainsi on maintient un trafic fluide sur la section courante et donc un fonctionnement optimal, car si la file d'attente se formait la capacité serait réduite (à cause du "capacity drop").

Lorsque la file d'attente sur la bretelle est trop longue et qu'elle menace de remonter sur le réseau urbain, elle est détectée par le magnétomètre (1) placé en début de bretelle (voir Figure 2). Le cycle du feu est alors réglé pour que les périodes de vert soient plus longues et que la file d'attente se vide progressivement. Il peut y avoir alors (comme en l'absence de régulation d'accès) création de congestion sur la section courante. Mais, pendant toute la période où la bretelle a été régulée, l'autoroute a écoulé un trafic fluide, donc avec un débit supérieur, ce qui bénéficie aux usagers de l'autoroute. Par ailleurs, comme nous le verrons par la suite, les temps perdus sur la bretelle à cause du feu de régulation sont relativement faibles.

De plus, le fait d'installer sur la bretelle un feu dont le cycle est généralement court permet d'uniformiser les entrées et d'éviter les à-coups de la demande. En effet, lorsque la bretelle est située en aval d'un carrefour à feu urbain (ce qui est le cas de plusieurs des entrées concernées à Grenoble) la demande sur la bretelle est une alternance de trafic élevé (un véhicule toute les 2 secondes) et de trafic nul pendant le reste du cycle. Le cycle court du feu de la bretelle permet de « hacher » la demande avec par exemple un flux continu d'un véhicule toutes les 6 secondes, au lieu d'un débit de 20 véhicules pendant 40 secondes suivi d'un débit nul pendant les 80 secondes suivantes. Le débit moyen de la bretelle est le même, mais le trafic de la section courante est beaucoup moins perturbé. C'est l'effet d'écrêtage de la demande.

Pour régler la durée du cycle et du vert du feu placé en aval de la bretelle, on utilise dans notre cas l'un des algorithmes les plus répandus dans le monde pour la régulation d'accès : ALINEA (Papageorgiou, et al., 1991). Cet algorithme vise à ce que le flux qui s'écoule de la bretelle soit adapté de manière dynamique à la capacité résiduelle de la voie principale.

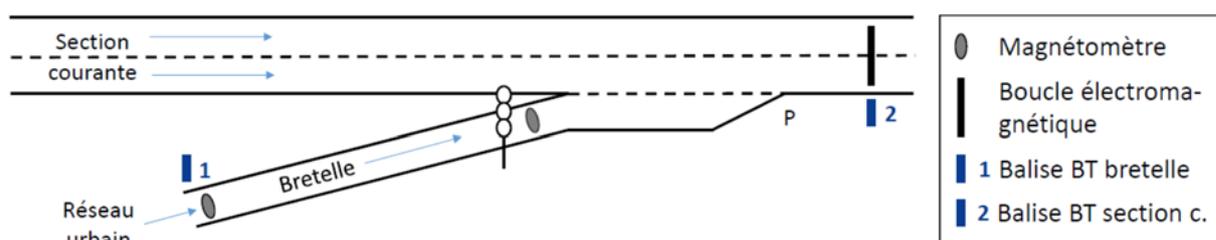


Figure 2 : équipements présents sur chacune des bretelles régulées au cours de l'expérimentation de régulation d'accès à Grenoble : une boucle électromagnétique est située en aval du convergent. Un capteur Bluetooth (1) permet de dater l'entrée sur la bretelle de véhicules équipés, un second capteur par accès (2) permet de dater la sortie de ces mêmes véhicules et de ceux qui ont été détecté sur l'échangeur précédent. On détermine ainsi les valeurs de temps de parcours par section et par bretelles. Les magnétomètres permettent de déterminer les débits sur les bretelles. Les boucles électromagnétiques, préexistantes entre chaque échangeur, sont utilisées dans notre étude pour déterminer les débits. Un couple de magnétomètres par voie est positionné en bout de bretelle et est utilisé par l'algorithme de régulation d'accès pour optimiser, avec ALINEA, le cycle du feu. (Source : auteurs)

² Dans notre cas, de plus, la vitesse maximale autorisée sur la section courante est de 70 km/h lorsque la régulation d'accès est active.

Rappel des principes de l'évaluation de la gestion dynamique des déplacements

Evaluer l'impact d'une stratégie quelconque consiste à apporter une réponse à la question suivante : « dans quelle mesure les bénéfices procurés par cette stratégie répondent-ils aux objectifs qui lui ont été assignés ? » (Certu, 2004). Ceci conduit tout évaluateur à chercher à résoudre deux groupes de questions :

- Quel(s) indicateur(s) adopter, qui permette(nt) de quantifier la satisfaction des objectifs.
- Comment définir des périodes avec et sans application de la stratégie qui soient similaires *toutes choses égales par ailleurs* ?

Ces deux questions seront abordées dans la partie suivante : tout d'abord la définition des indicateurs compte tenu des données disponibles, puis la composition de la base de comparaison.

Méthode d'analyse des données

Choix des indicateurs et méthode de calcul à partir des variables mesurées

La réponse à la première question, dans le cas de la congestion et comme nous l'avons montré antérieurement (Buisson & Guyard, 2017), passe par la combinaison de deux indicateurs au moins :

- Un indicateur destiné à mesurer l'intensité de la congestion, typiquement le temps de parcours moyen ou le temps total perdu ;
- Un indicateur destiné à mesurer l'amplitude de la congestion, c'est-à-dire le nombre d'usagers touchés, typiquement le débit total pendant l'heure de pointe ou le nombre de kilomètres parcourus.

Pour mener à bien le calcul de ces deux familles d'indicateurs nous disposons de données géographiques et de description du réseau (longueur des tronçons, position des feux et des capteurs). Nous avons également accès à la main courante, ce qui nous permet d'identifier les périodes avec incidents (qui n'ont pas été traitées ici) et les périodes d'activation de la régulation.

Nom de la variable	Appareillage utilisé	Fréquence de calcul	Points de mesure
Débit en section courante $Q_s(t)$	Boucles électromagnétiques	6 minutes	Rondeau ($s = 1$) Libération ($s = 2$) Echirolles ($s = 3$) Alpexpo ($s = 4$)
Débit sur la bretelle $Q_b(t)$	Magnétomètres	6 minutes (par souci d'homogénéité, mais une période plus courte serait possible)	Libération ($b = 2$) Echirolles ($b = 3$) Alpexpo ($b = 4$) Eybens ($b = 5$)
Temps de parcours de la section courante $Tp_s(t)$	Différence entre la date de détection de l'appareil BT embarqué par le capteur BT en entrée de tronçon et sa date de détection par le capteur BT en entrée du tronçon aval	Données individuelles, filtrées et agrégées par périodes de 6 minutes voir (Aliaga, 2019)	Rondeau - Libération ($s = 1$) Libération - Echirolles ($s = 2$) Echirolles - Alpexpo ($s = 3$) Alpexpo - Eybens ($s = 4$)
Temps de parcours de la bretelle $Tp_b(t)$	Différence entre la date de détection de l'appareil BT embarqué par le capteur BT en entrée de bretelle et sa date de détection par le capteur BT en entrée du tronçon aval	Données individuelles, filtrées et agrégées par périodes de 6 minutes voir (Aliaga, 2019)	Libération ($b = 2$) Echirolles ($b = 3$) Alpexpo ($b = 4$) Eybens ($b = 5$)

Tableau 1 : variables utilisées pour calculer les indicateurs, appareillage utilisé, fréquence d'agrégation et localisation des données disponibles.

De plus, les capteurs nous donnent accès aux données décrites dans le Tableau 1. Nous ne rentrons pas ici dans la description du travail de filtrage, de correction des données aberrantes et de l'interpolation des données manquantes. Le lecteur intéressé se reportera à (Aliaga, 2019). Les méthodes statistiques les plus reconnues ont été utilisées et la qualité de la correction des données a été systématiquement testée sur des échantillons sans erreur.

On notera dans ce tableau que bien que 5 accès soient indiqués comme régulés dans la Figure 1, nous ne mentionnons ici que les accès 2 à 5. En effet, le premier accès, celui du Rondeau, présente deux particularités qui nous ont conduits à l'écartier de la suite de l'étude. Tout d'abord, le feu de régulation est placé sur une bretelle qui rejoint l'autoroute par la gauche (ce qui est inhabituel). Ensuite, pendant un nombre significatif (une petite moitié) de périodes de pointes utilisées par la suite, cet accès n'a pas été régulé. Enfin, cet accès est placé en limite amont de la zone pour laquelle nous avons accès aux données, or les effets d'une régulation se font sentir en amont du convergent régulé.

Les figures suivantes présentent les évolutions des différentes variables en section courante pour les périodes avec et sans régulation. Pour notre étude, nous nous sommes systématiquement attachés aux périodes de pointe, en choisissant une durée unique de 4 heures. L'heure de pointe du matin (HPM) est considérée entre 6h et 9h54 et l'heure de pointe du soir (HPS) est considérée entre 16h et 19h54. Chaque heure de pointe correspond donc à 40 périodes de mesure.

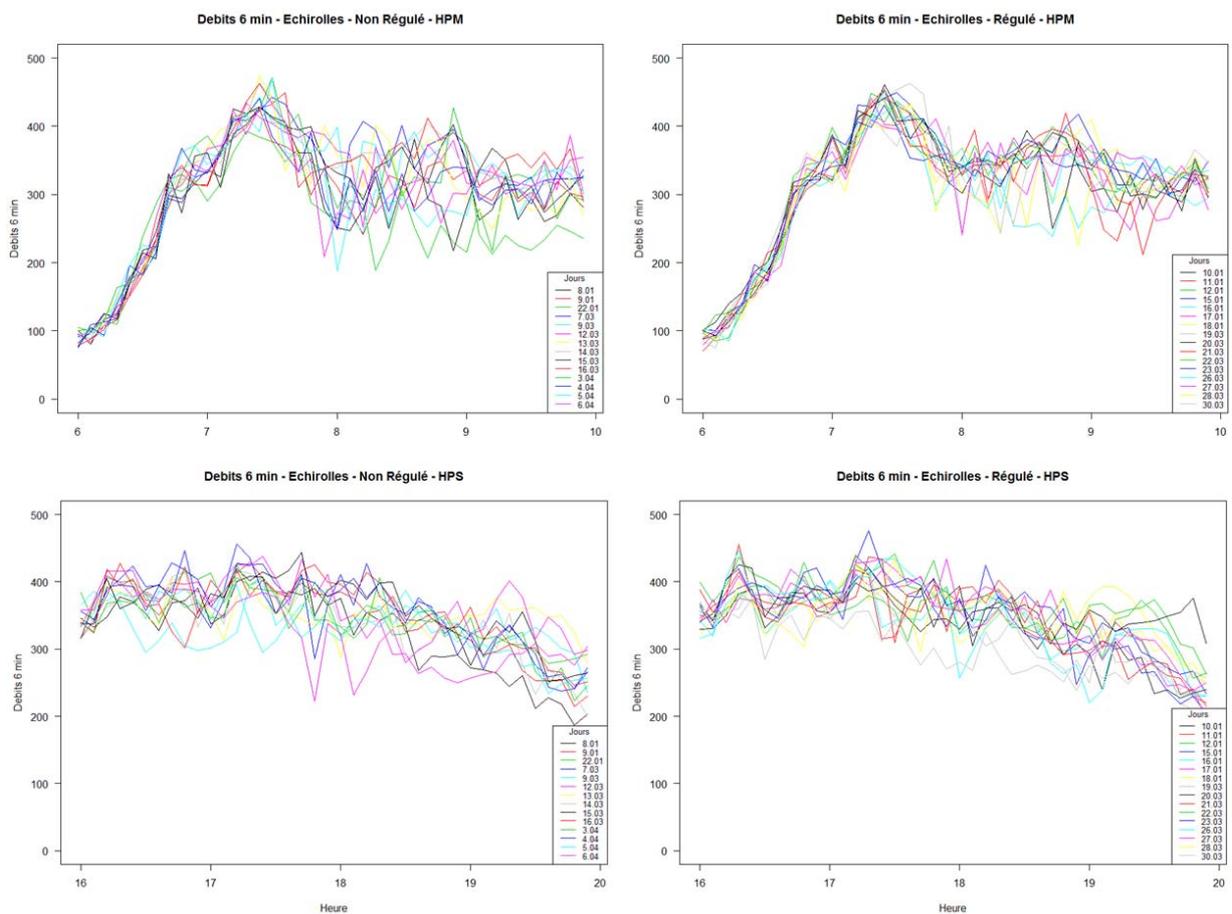


Figure 3 : évolution du débit par période de 6 minutes sur la section d'Echirolles sans régulation (à gauche) avec régulation (à droite) en heure de pointe du matin (en haut) et en heure de pointe du soir (en bas). (Source : auteurs)

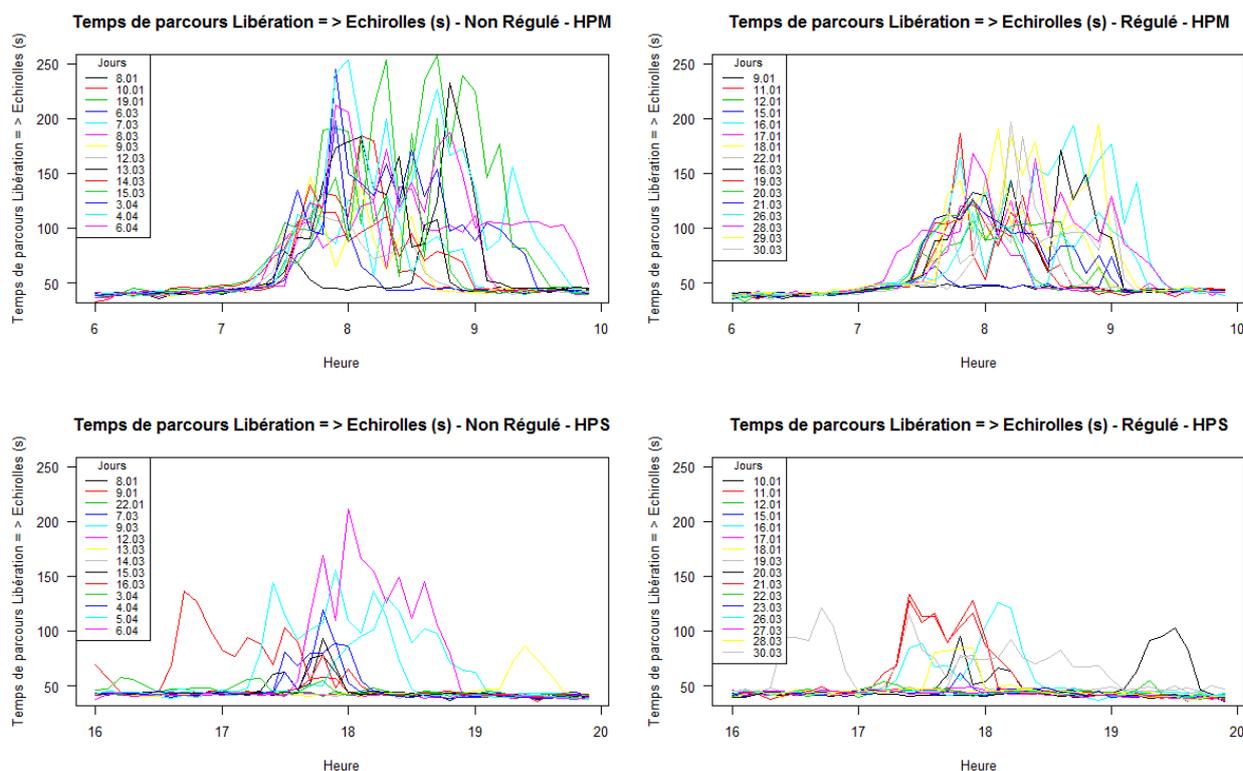


Figure 4 : évolution des temps de parcours moyens entre la balise BT de Libération et celle d'Echirolles par période de 6 minutes sans régulation (à gauche) avec régulation (à droite) en heure de pointe du matin (en haut) et en heure de pointe du soir (en bas). (Source : auteurs)

Une première analyse des temps de parcours du tronçon central permet de constater que la congestion est significativement plus importante le matin que l'après-midi. Nous avons retenu pour cet article³ les deux principaux indicateurs suivants :

- Pour l'amplitude nous utilisons la distance totale parcourue en section courante, sur les quatre sections, pendant toute l'heure de pointe soit 40 périodes de 6 minutes :

$$D_{tot}^{HP} = \sum_{t=1}^{40} \sum_{s=1}^4 L_s \times Q_s(t) \quad (1)$$

Où L_s est la longueur respective des sections s et HP désigne soit HPM soit HPS.

- Pour l'intensité de la congestion, nous utiliserons le temps de parcours, soit individuel soit total ; en séparant, dans un premier temps, ce qui se passe sur les bretelles de ce qui se passe sur la section courante, avant de combiner les deux valeurs de temps total passé pour permettre une évaluation globale de l'impact de la régulation d'accès.

Un autre indicateur intéressant est la proportion de kilomètres parcourus à une vitesse inférieure à un seuil parmi tous les kilomètres parcourus pendant une période de pointe. Par exemple si 2 000 véhicules parcourent 4 kilomètres à 80 km/h et que 1 000 véhicules parcourent 2 kilomètres à 20 km/h, le nombre total de kilomètres parcourus est de $4 \times 2000 + 2 \times 1000 = 10\,000$. Parmi ces 10 000 kilomètres, 2 000 soit 20 % ont été parcourus à une vitesse inférieure ou égale à 20 km/h.

Nous présentons également d'autres résultats dans la partie suivante, notamment sur la variabilité des vitesses. Définissons tout d'abord les périodes que nous utilisons pour comparer la situation avec et sans régulation d'accès.

Choix des périodes avec et sans régulation d'accès pour l'évaluation de son effet sur la congestion

Pour réaliser une comparaison dont les conclusions puissent apporter des éléments probants sur l'efficacité ou l'inefficacité de la stratégie étudiée, il convient de définir deux échantillons comparables, pour lesquels

³ D'autres ont été calculés, ils sont présentés dans (Aliaga, 2019).

la seule différence est la mise en place ou non de la mesure que l'on cherche à évaluer. Deux méthodes sont possibles :

- Choisir un ensemble de jours avec régulation active en 2018 (par exemple les 20 premiers jours ouvrables de janvier 2018) d'une part, les jours identiques d'une année antérieure d'autre part.
- Mettre en œuvre la régulation d'accès une semaine sur deux pendant 8 semaines de la même année.

Pour choisir entre ces deux méthodes, il faut définir celle qui permet la plus grande similitude entre ces échantillons en ce qui concerne la demande et l'offre du réseau. La figure suivante montre les valeurs moyennes de débit et de vitesse sur la boucle d'Eybens pour les cinq années de 2014 à 2018 (en enlevant les jours régulés pour cette année-là). Des résultats similaires sont obtenus pour les autres boucles du parcours. Nous en déduisons qu'il n'est pas possible d'utiliser la première méthode, les observations de chaque année étant spécifiques. Nous choisissons donc un échantillon composé uniquement de jours de 2018.

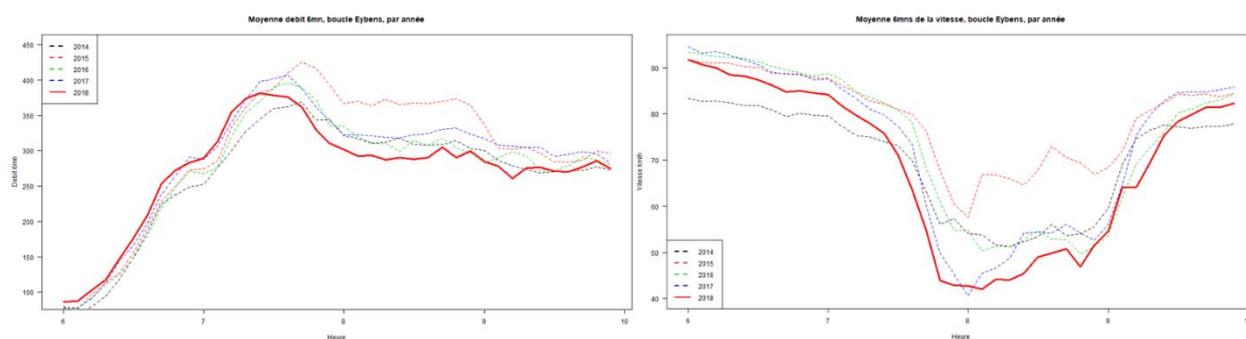


Figure 5 : comparaison des valeurs moyennes sur chaque période sur plusieurs jours similaires des valeurs de débits (6 minutes) à gauche et des valeurs moyennes de vitesse (km/h) à droite des années 2014 à 2018. (Source : auteurs)

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, nous retenons pour chaque heure de pointe une période de 4 heures, soit de 6h à 9h54 pour le matin, soit de 16h à 19h54 pour l'après-midi. Pour le matin, nous avons sélectionné un total de 14 périodes de pointe sans régulation et de 16 avec régulation, ainsi que pour l'après-midi. Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des jours retenus. Ce sont des jours pour lesquels il n'y a pas de situation particulière indiquée par la main courante.

Jours sans régulation						Jours avec régulation					
Matin			Après-midi			Matin			Après-midi		
Date	Km par-courus (km)	TP total (h)	Date	Km par-courus (km)	TP total (h)	Date	Km par-courus (km)	TP total (h)	Date	Km par-courus (km)	TP total (h)
8/1	28 600	410	8/1	30 900	389	10/1	29 300	360	9/1	31 800	429
9/1	27 500	527	10/1	33 600	402	11/1 (*)	29 600	479	11/1	33 200	498
22/1	25 100	697	19/1	33 800	411	12/1	29 700	448	12/1	34 400	420
7/3	29 900	436	6/3	34 100	450	15/1	29 900	411	15/1	32 700	400
9/3	29 900	502	7/3	31 800	482	16/1	27 000	639	16/1	32 000	470
12/3	29 700	555	8/3	33 000	384	17/1	28 500	478	17/1	32 500	407
13/3	29 000	509	9/3	33 700	407	18/1	28 200	604	18/1	33 200	414
14/3	30 100	445	12/3	32 200	387	19/3	30 400	531	19/3	31 000	478
15/3	27 400	620	13/3	33 900	412	20/3	30 000	586	20/3	33 800	426
16/3	30 800	462	14/3	34 000	511	21/3	29 400	433	21/3	32 500	468
3/4	28 400	529	15/3	32 000	401	22/3 (**)	30 500	462	22/3	34 000	416
4/4	28 400	608	3/4	34 100	454	23/3	30 600	451	23/3	34 000	417
5/4	27 400	680	4/4	31 800	521	26/3	30 300	504	26/3	32 000	402
6/4	28 200	661	6/4	32 400	610	27/3	29 500	576	27/3	34 200	405
						28/3	29 600	515	28/3	33 900	491
						30/3	29 300	482	30/3	28 500	483
Moy.	28 600	546		32 950	444		29 493	497		32 950	432
E. type	1 479	94		1 073	66		1 004	80		1 042	32
Vitesse moy. (km/h)		52,4			74,1			59,3			76,3

Tableau 2 : liste des jours de 2018 retenus pour l'évaluation. (*) la régulation d'accès n'était pas effective sur les deux accès d'Eybens ; (**) : la régulation d'accès n'était pas effective sur celui des deux accès d'Eybens situés le plus en aval. Pour chaque jour, on a reporté le nombre de kilomètres parcourus et le temps total passé en circulation, qui est donné en heures. (Source : auteurs)

Pour se faire une première idée des différences entre les différents types de période, les valeurs moyennes et les écarts-types sont indiqués pour les kilomètres parcourus (variable définie par l'équation de la page 5) et les temps totaux passés. On constate que les périodes de l'après-midi correspondent à des périodes beaucoup plus circulées (avec plus de 10 % de kilomètres parcourus supplémentaires par rapport au matin, pour la même durée), avec un temps total passé bien inférieur, comme en témoignent les vitesses moyennes.

Au sein de chaque période de pointe, la régulation d'accès est active tant qu'il existe une bretelle sur laquelle la file d'attente n'est pas suffisamment longue pour que le feu soit toujours mis au vert. La figure suivante présente en cumulé sur les 16 périodes régulées le matin et les 16 périodes régulées l'après-midi le pourcentage qui est régulé, pour chacune des périodes de 6 minutes. Elle présente aussi la comparaison des débits, entre les 14 périodes non régulées et les 16 périodes régulées pour le matin et l'après-midi.

Il se confirme que, en ce qui concerne le débit écoulé, les deux échantillons sont globalement similaires. En effet, seulement trois périodes sont statistiquement différentes le matin et aucune l'après-midi. Notons que la valeur présentée de débit est le débit 6 minutes pondéré par les longueurs de section c'est-à-dire calculé par la formule suivante (destinée à synthétiser ce qui se produit sur l'ensemble de la zone concernée) :

$$\bar{Q}(t) = \frac{\sum_{s=1}^5 Q_s(t) \times L_s}{\sum_{s=1}^5 L_s} \quad (2)$$

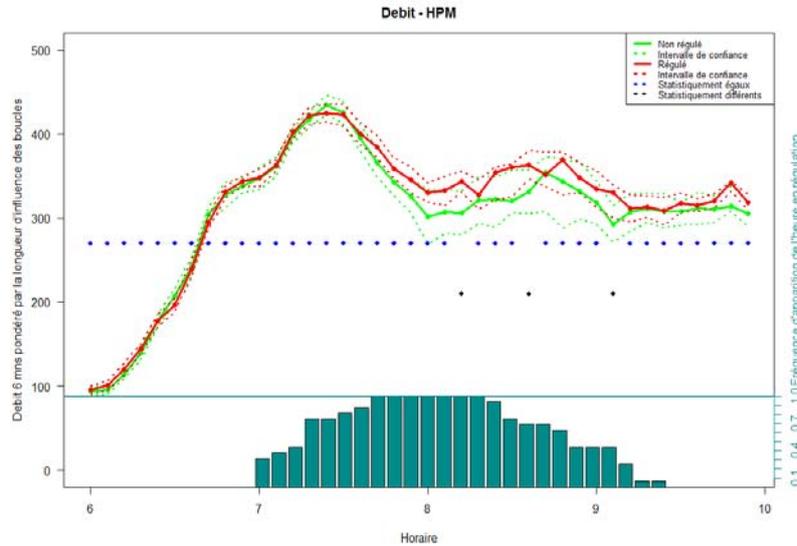


Figure 6 : évolution du débit moyen pondéré en heure de pointe du matin. On constate que les deux échantillons sont statistiquement significativement différents dans un petit nombre de périodes. En bas est présenté la fraction, parmi les 40 périodes des 16 jours régulés, des périodes pendant lesquelles la régulation est activée. (Source : auteurs)

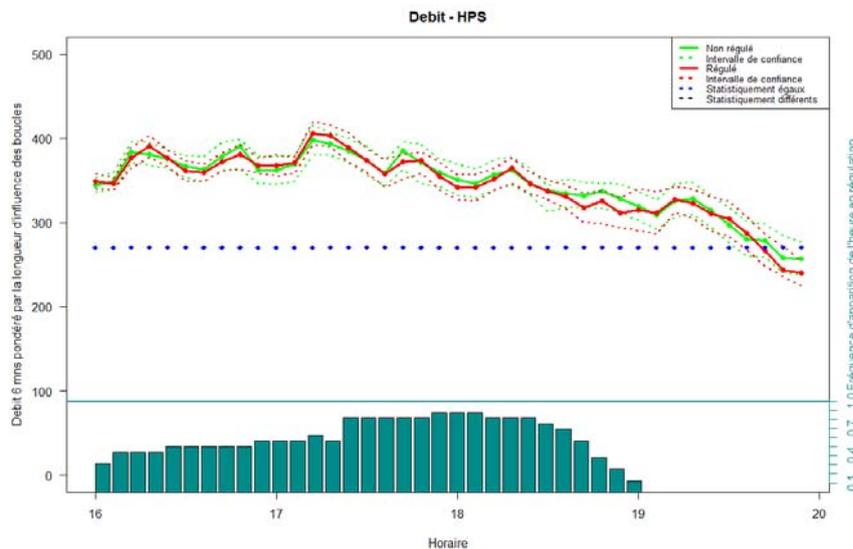


Figure 7 : évolution du débit moyen pondéré en heure de pointe du matin. On constate que les deux échantillons sont statistiquement significativement différents dans un petit nombre de périodes. En bas est présenté la fraction, parmi les 40 périodes des 16 jours régulés, des périodes pendant lesquelles la régulation est activée. (Source : auteurs)

Présentation des résultats et discussion

Sur la base du travail rigoureux de remplacement des données manquantes, de définition des indicateurs et de constitution des deux échantillons, il est maintenant possible de conduire l'évaluation proprement dite et d'en tirer quelques conclusions.

Effet de la régulation d'accès sur les temps de parcours totaux perdus en section courante

La figure suivante présente les moyennes des valeurs de temps de parcours total perdu en section courante. On constate que la régulation d'accès baisse de manière statistiquement significative les temps de parcours en début d'heure de pointe pour quatre périodes de 6 minutes, de 7h18 à 7h54, soit à la période de montée en charge du réseau. C'est parfaitement cohérent par rapport à ce que nous avons expliqué sur le fonctionnement de la régulation d'accès, qui en effet retarde l'apparition de la congestion. Nous l'avons vu, la régulation est levée lorsque la file d'attente sur la bretelle est trop longue, entraînant une situation de congestion sur la section courante.

Ainsi, dans la deuxième partie de l'heure de pointe du matin, à partir de 8h, la différence entre les moyennes n'est pas statistiquement significative, en raison de la grande variabilité des situations d'un

jour à l'autre (reflétée par un écart-type élevé). Soulignons cependant, que les valeurs moyennes sont toujours supérieures, jusqu'à la fin complète de l'heure de pointe (vers 9h).

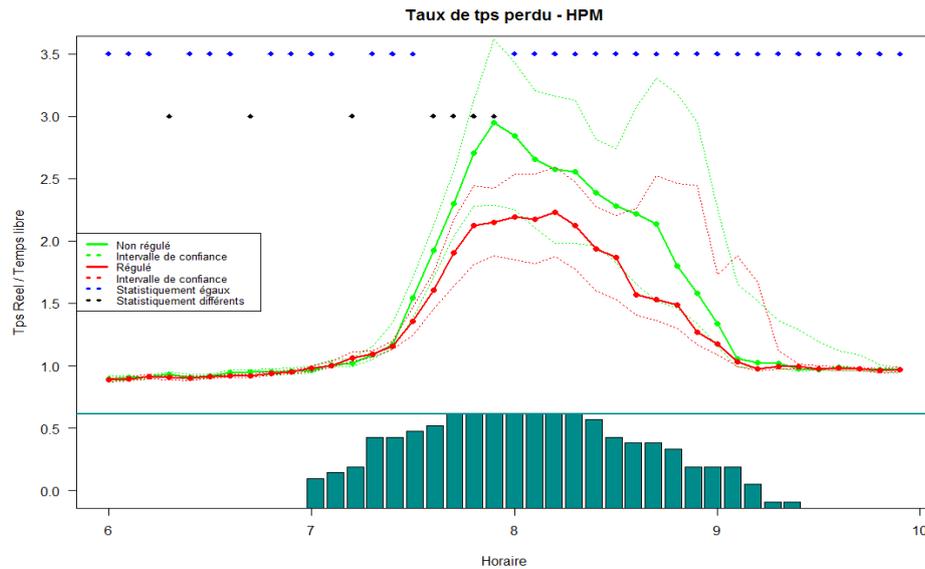


Figure 8 : évolution, en période de pointe du matin, des temps de parcours moyens des périodes régulées et non régulées sur l'ensemble du temps. (Source : auteurs)

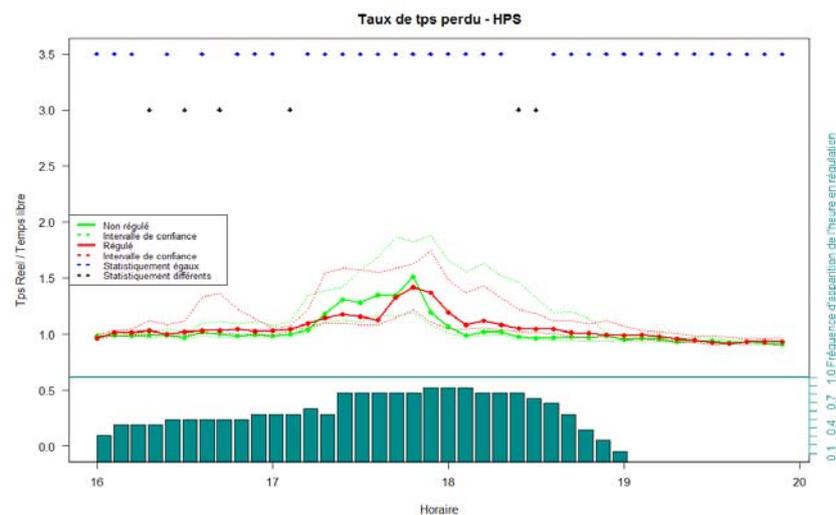


Figure 9 : évolution, en période de pointe du soir, des temps de parcours moyens des périodes régulées et non régulées sur l'ensemble du temps. (Source : auteurs)

Sur la période de pointe du soir, les valeurs de temps total passé sont beaucoup plus faibles, déjà sur la moyenne des périodes non régulées (en vert). La régulation n'apporte pas de différence significative.

Effet de la régulation d'accès sur les variabilités des vitesses d'un jour à l'autre

Ce constat de congestion plus importante et d'effets plus significatifs de la régulation le matin que l'après-midi sur la section courante se confirme lorsque l'on regarde les variabilités de vitesses. Ces variabilités sont calculées comme l'écart-type de toutes les valeurs individuelles (après filtrage) de temps de parcours mesurées au cours d'une des 4 heures d'une des périodes de recueil, matin ou après-midi et avec ou sans régulation.

La figure suivante présente les valeurs obtenues le matin et l'après-midi pour les quatre sections étudiées (rappelons que les temps de parcours, et donc les vitesses, sont calculées comme la différence des dates de détection par les balises Bluetooth placées en sortie et en entrée). On constate tout d'abord (et c'est cohérent avec la remarque précédente sur une plus forte congestion le matin), que les valeurs d'écart-type sont plus élevées le matin que l'après-midi. De plus, le matin, en début d'heure de pointe, les périodes non régulées (en vert) ont des variabilités beaucoup plus importantes que pendant les périodes régulées en rouge. Ceci confirme un effet de la régulation d'accès en début d'heure de pointe.

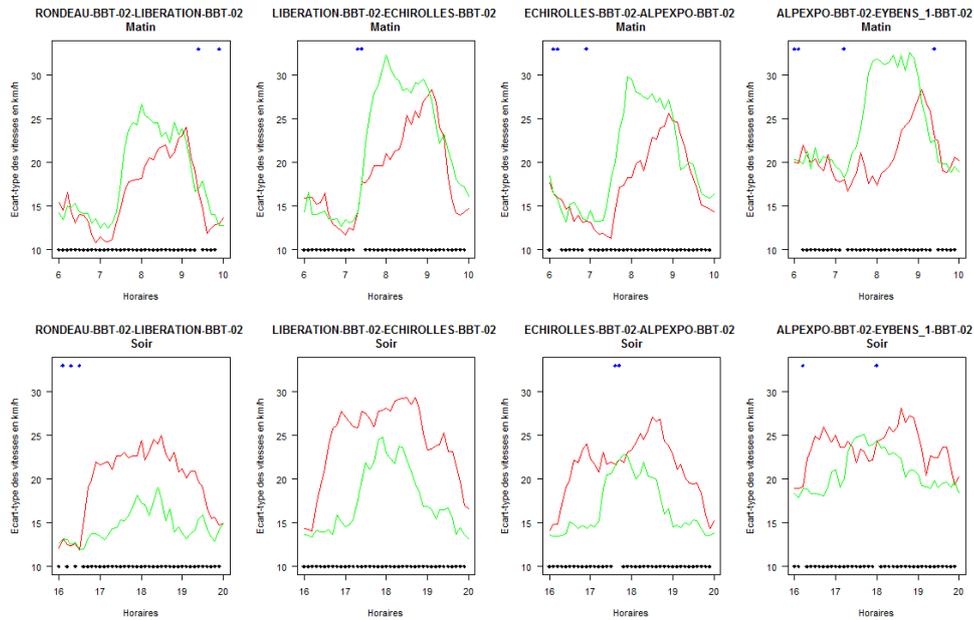


Figure 10 : variabilité des vitesses de parcours des quatre sections étudiées. En rouge les moyennes sur les périodes régulées, en vert les périodes non régulées. (Source : auteurs)

Effet de la régulation d'accès sur les temps de parcours des bretelles

Pour évaluer de manière complète l'impact de la régulation d'accès sur la congestion, il est important de quantifier le retard induit par la présence de feux sur les bretelles. La figure suivante montre que les temps de parcours sont différents (et plus élevés) en heure de pointe du matin régulée par rapport à la période du matin non régulée surtout sur la bretelle d'Alpexpo. Il y a même une période, celle de 7h54 pour laquelle le temps de parcours moyen est supérieur à 40 secondes.

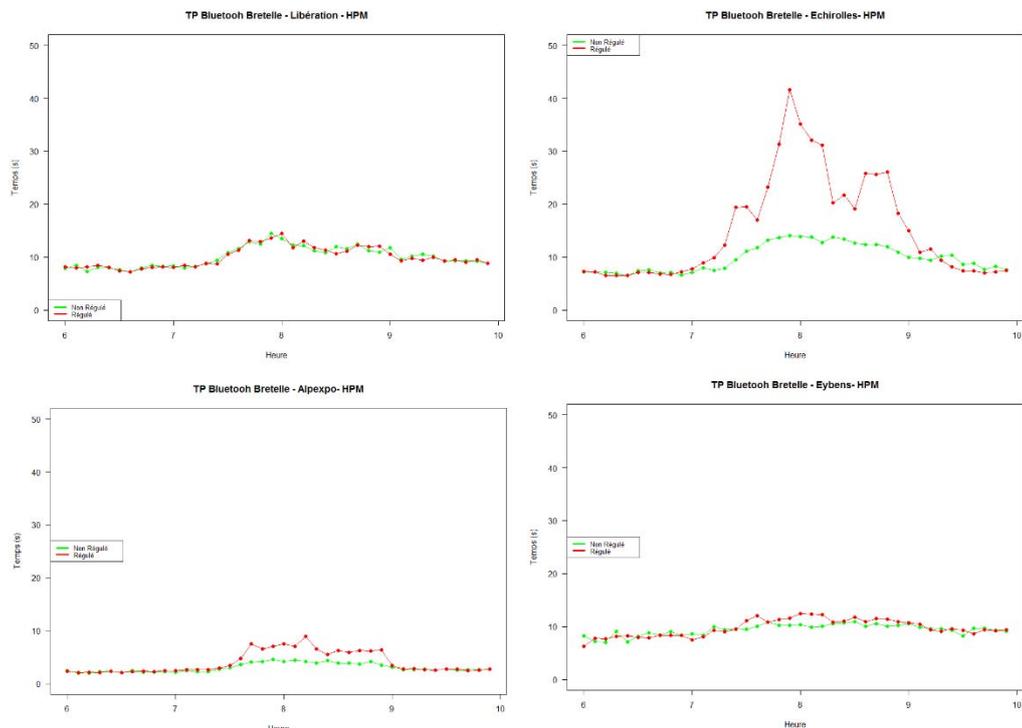


Figure 11 : temps de parcours moyens mesurés par les balises Bluetooth des bretelles (situation non régulée en vert, régulée en rouge), des quatre principales bretelles étudiées, en heure de pointe du matin. (Source : auteurs)

Ceci est à rapprocher de la figure suivante, qui montre les débits pour ces périodes sur les quatre bretelles dont nous avons présenté ci-dessus les temps de parcours. Sur cette figure, on constate que les débits de ces bretelles sont faibles, puisque la valeur la plus élevée est observée avec le magnétomètre de la bretelle d'Alpexpo, pour laquelle le temps de parcours est relativement faible.

Par contre, à Echirolles, où le temps de parcours est le plus élevé, on a des débits inférieurs à 600 veh/h. Au total, en moyenne sur les 16 périodes de pointe du matin, le temps perdu total est de 6 heures sur les quatre bretelles étudiées. Ceci est à rapprocher des effets significatifs de réduction du temps de parcours en section courante où le gain moyen est de 50 heures au total.

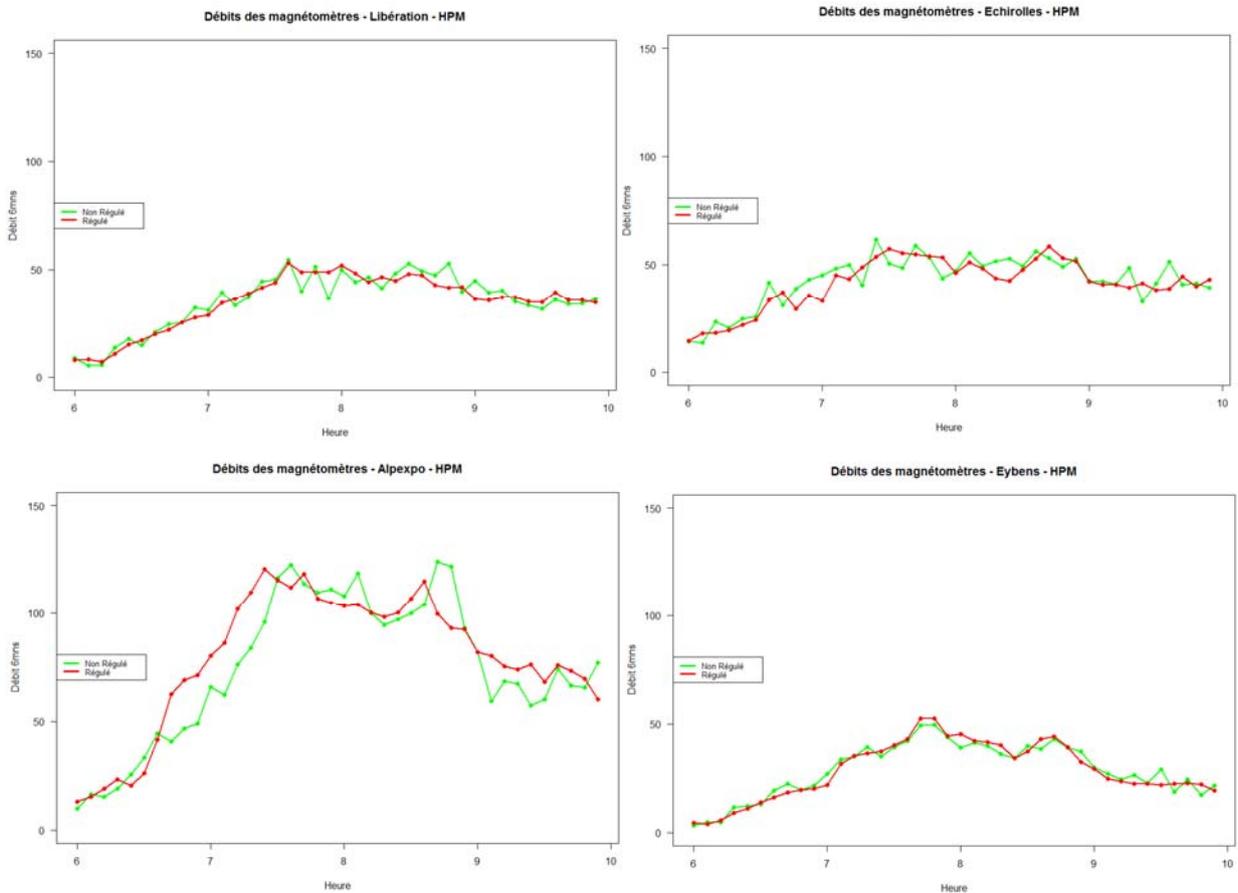


Figure 12 : débits moyens mesurés par les capteurs magnétomètres sur les bretelles, en heure de pointe du matin. (Source : auteurs)

Effet de la régulation d'accès sur les pourcentages de kilomètres parcourus en congestion

Pour calculer un pourcentage de kilomètres parcourus en congestion pour une heure de pointe (du matin ou du soir), on utilise pour chaque jour le temps de parcours de chaque section pendant chaque période de 6 minutes (calculé sur la base des temps de parcours mesurés par les balises Bluetooth) et le débit de chaque section chaque pendant chaque période de 6 minutes, avec des seuils de définition de la congestion qui varient de 10 km/h à 60 km/h. L'équation suivante résume ceci de manière plus synthétique :

$$P(v < Seuil)^{HP} = \frac{\sum_{t=1}^{40} \sum_{s=1}^4 Q_s(t) \times T p_s(t) \times Echelon_{s,t}(T p_s(t) | L_s / Seuil)}{\sum_{t=1}^{40} \sum_{s=1}^4 Q_s(t) \times T p_s(t)} \quad (3)$$

Où $Echelon_{s,t}(T p_s(t) | L_s / Seuil)$ vaut 1 si la valeur de temps de parcours est supérieure à la longueur de la section divisée par la vitesse de seuil et 0 sinon.

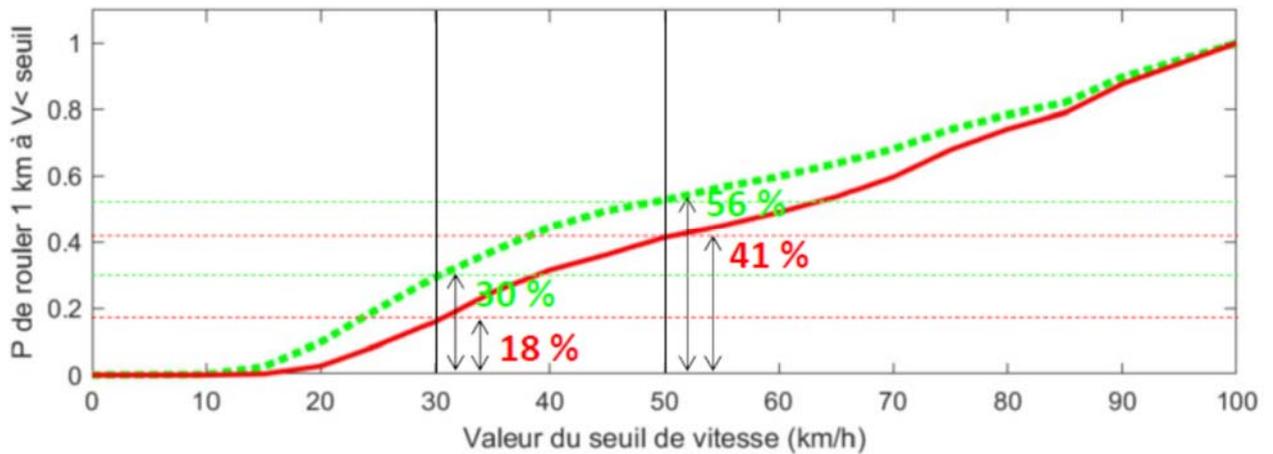


Figure 13 : probabilité de parcourir un kilomètre entre le Rondeau et Eybens sur la rocade sud de Grenoble entre 6 heures et 10 heures, à une vitesse inférieure à une valeur seuil. En vert, valeur obtenue pour les jours sans régulation, en rouge les jours où la régulation a été activée. Pour une valeur de seuil de 30 kilomètres heures, par exemple, sur toute la durée de l'heure de pointe du matin, quelle que soit l'heure du parcours et la zone parcourue, si la régulation n'est pas activée, la probabilité de parcourir un kilomètre à une vitesse plus faible que 30 km/h est de 30 %. Les jours où la régulation a été activée, cette probabilité est de 18 %. Si le seuil est de 50 km/h, les probabilités sont respectivement de 56 et 41 %. (Source : auteurs)

La figure suivante présente les mêmes pourcentages mais en heure de pointe du soir. De nouveau, on identifie bien que la congestion est plus faible que le matin. Il se confirme une nouvelle fois que la régulation d'accès n'a pas du tout le même impact qu'en heure de pointe du matin, puisque la courbe rouge est plus proche de la courbe verte.

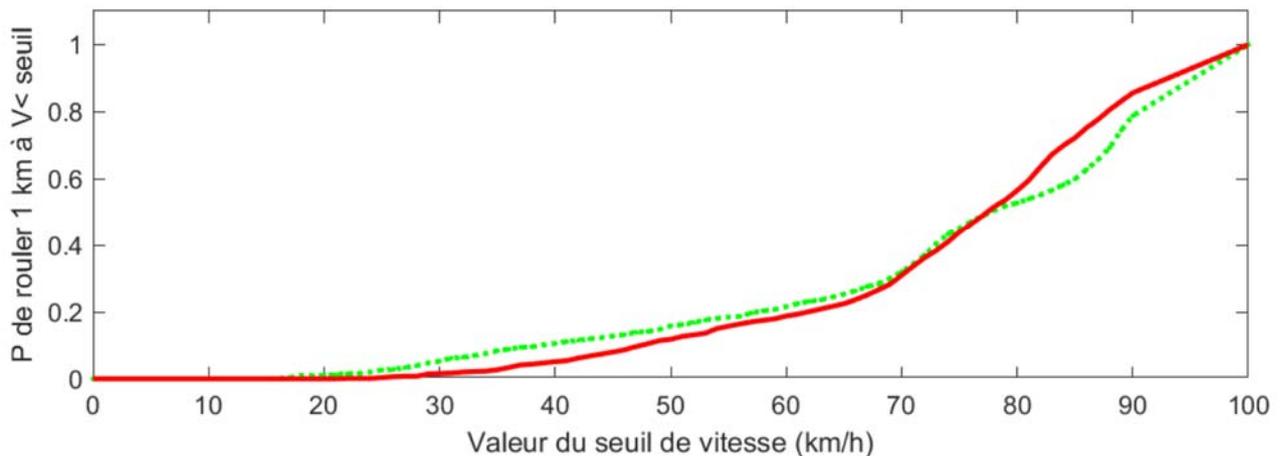


Figure 14 : probabilité de parcourir un kilomètre entre le Rondeau et Eybens sur la rocade sud de Grenoble entre 6 heures et 10 heures, à une vitesse inférieure à une valeur seuil. En vert, valeur obtenue pour les jours sans régulation, en rouge les jours où la régulation a été activée. (Source : auteurs)

Analyse conjointe de l'effet de la régulation d'accès sur les deux grandeurs caractéristiques de la congestion : l'amplitude et la dureté

La présentation précédente est convaincante pour mettre en évidence que le temps de parcours est plus faible les jours où la régulation a été activée par rapport aux jours sans régulation. Cependant, la demande totale peut être différente de manière extérieure (à cause d'événements modifiant le volume et la répartition de la matrice origine destination), et être la seule cause de ces différences de temps de parcours. Pour affermir donc nos conclusions sur l'effet de la régulation d'accès, il nous faut donc comparer les jours régulés aux jours non régulés, en utilisant simultanément les deux grandeurs que nous avons défini page 5, pour caractériser respectivement l'amplitude et la dureté de la congestion.

La figure suivante présente donc autant de points que de périodes de pointe du matin à gauche, de l'après-midi à droite correspondant au nombre total de kilomètres parcourus en abscisse et à la somme des temps totaux passés sur l'autoroute en ordonnée. On constate que le matin, il y a significativement plus en période non régulée (en vert) de points avec un temps perdu élevé et des kilomètres parcourus faibles, qu'en période régulée (en rouge). Notons au passage que la diminution des kilomètres parcourus lorsque les temps de parcours sont très élevés s'explique par le fait que probablement les usagers empruntent d'autres itinéraires. Une fois de plus, la conclusion en ce qui concerne la période de l'après-midi est qu'il y a moins de congestion que le matin, qu'il y ait ou non régulation, et que l'effet de la régulation n'est pas important.

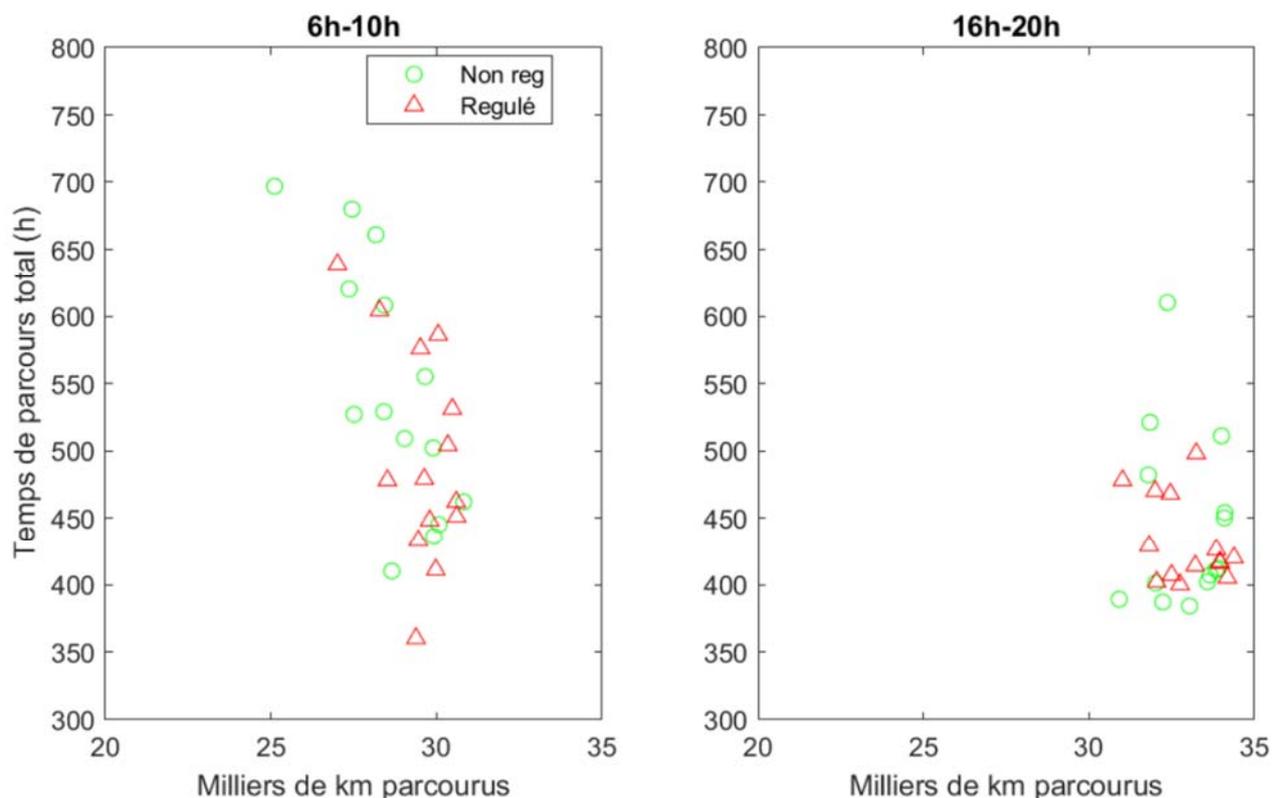


Figure 15 : valeurs des temps de parcours totaux et des kilomètres parcourus en heure de pointe du matin (à gauche), du soir (à droite). On constate que le matin, en période non régulée (en vert), il y a plus de points avec un temps perdu élevé et des kilomètres parcourus faibles, qu'en période régulée (en rouge). (Source : auteurs)

Ceci confirme l'efficacité de la régulation d'accès en période du matin. En effet, elle permet d'écouler un débit supérieur, tout en maintenant un temps perdu plus faible.

Conclusions

Nous avons vu que pendant les périodes de pointe du soir, la régulation d'accès ne permet pas de réduire une congestion déjà faible. Nous recommandons, pour maintenir une bonne image du dispositif auprès des usagers, de ne plus l'appliquer en fin de journée. Par contre, la régulation d'accès a un effet très positif en période de pointe du matin, comme nous l'avons démontré précédemment.

Le bénéfice global de la régulation d'accès sur un jour moyen peut être quantifié en un chiffre global en retranchant de l'impact sur le temps total passé sur la section courante les temps totaux passés sur les bretelles. On obtient en moyenne un gain de 44 heures de temps passé par tous les usagers par heure de pointe du matin, qu'il faut multiplier par le nombre de jours annuels pendant lesquels la régulation peut être activée.

Il y a 249 jours ouvrés par exemple en 2018, mais 80 d'entre eux correspondent aux congés scolaires, périodes moins congestionnées (absentes de notre échantillon). On peut donc estimer qu'il est possible de gagner de l'ordre de $44 \times 169 \cong 7\,500$ heures de temps de parcours pour l'ensemble des usagers en une année. Si on considère que la valorisation des temps de parcours peut être faite à partir de l'estimation du rapport Boiteux II (11 €/heure), on arrive à un total de plus de 80 000 € gagnés par an.

Au-delà de ce résultat très satisfaisant, cet article a également illustré l'application d'une méthode rigoureuse d'évaluation d'une stratégie de gestion du trafic.

Références

- Aliaga, F. (2019). Evaluation de la régulation d'accès sur la RN87 à Grenoble : méthode de traitement et analyse des données. Lyon: Cerema.
- Buisson, C., & Guyard, O. (2017). Indicateurs de congestion. *Rencontres de la Mobilité Intelligente, ATEC*.
- Certu. (2004). Evaluation des projets d'exploitation sur les principaux axes d'exploitation - Schéma directeur d'exploitation de la route - réseau de niveau 1. Lyon : Certu.
- Mansuy, P., Jacquet, D., & Buisson, C. (2017). Mise en oeuvre de la régulation d'accès sur la rocade sud de Grenoble. *Rencontres de la Mobilité Intelligente, ATEC, Montrouge*.
- Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., & Blosseville, J.-M. (1991). ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record, 1320*, 58-64.

