



**HAL**  
open science

## Le contrôle d'accès généralisé sur les autoroutes de l'île de France : études en simulation et sur site réel

Habib Haj Salem, Moussa Boukhniher, H. Mabrouk, S. Mammar

### ► To cite this version:

Habib Haj Salem, Moussa Boukhniher, H. Mabrouk, S. Mammar. Le contrôle d'accès généralisé sur les autoroutes de l'île de France : études en simulation et sur site réel. MOSIM'10, 8ème Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation, May 2010, Hammamet, Tunisie. pp.10P. hal-00615227

**HAL Id: hal-00615227**

**<https://hal.science/hal-00615227>**

Submitted on 18 Aug 2011

**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.

# LE CONTROLE D'ACCÈS GÉNÉRALISÉE SUR LES AUTOROUTES DE L'ÎLE DE FRANCE : ÉTUDES EN SIMULATION ET SUR SITE RÉEL

H. HAJ SALEM<sup>1</sup>, M. BOUKHNIFER<sup>2</sup>

(1) INRETS/GRETIA  
2, Rue de la Butte Verte, Le DESCARTES 2  
F-93166 Noisy-Le-Grand Cedex France  
[haj-salem@inrets.fr](mailto:haj-salem@inrets.fr),

(2) ESTACA : Laboratoire Commande et Systèmes  
34, rue Victor Hugo - 92 300 Levallois-Perret, France  
[moussa.boukhnifer@estaca.fr](mailto:moussa.boukhnifer@estaca.fr)

MABROUK H.<sup>3</sup>, S. MAMMAR<sup>4</sup>,

(3) ISTLS, 12 Rue Abdallah Inb Zoubeir, 4000 Sousse  
Tunisie ; [hechmi\\_marouk@yahoo.fr](mailto:hechmi_marouk@yahoo.fr)

(4) SETRA/CSTR/CEI, 46 Av Aristide Briand BP 100,  
9225 Bagneux Cedex, France  
[Salim.Mammar@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Salim.Mammar@developpement-durable.gouv.fr)

**RÉSUMÉ :** *Ce papier est focalisé sur la description des résultats de l'évaluation de l'impact de la régulation d'accès généralisée sur la partie Est du réseau autoroutier de l'Île de France (IDF) en simulation et sur site réel en utilisant la stratégie locale ALINEA (Asservissement Linéaire d'entrée sur Autoroute) et coordonnée OASIS. Le site étudié comprend les autoroutes A86, A3, A4, A6BY dans les deux sens de circulation. La première étape a consisté à une étude en simulation et la seconde étape a été consacrée à l'évaluation sur site réel. Les résultats en simulation et sur site réel indiquent une nette amélioration des conditions du trafic en utilisant la stratégie de régulation ALINEA.*

**MOTS-CLÉS :** *Coordination, boucle ouverte, boucle fermée, optimisation, contrôle optimal hiérarchique.*

## 1 INTRODUCTION

L'objectif du contrôle d'accès est de réguler les débits des rampes par des feux tricolores afin de préserver la capacité de l'autoroute limitant ainsi l'apparition des congestions au voisinage des accès. Les stratégies existantes se décomposent en deux types : les stratégies feux fixe où la valeur du cycle des feux est calculée hors ligne en utilisant les données historiques (Wattleworth, 1965) et les stratégies adaptatives où le cycle des feux est calculé en utilisant les mesures en temps réel (Haj-Salem *et al.* 1988). Pour les stratégies adaptatives, on distingue deux types : isolées et coordonnées. Les stratégies isolées utilisent les mesures en temps réel uniquement au voisinage de l'accès contrôlé (Masher *et al.*, 1975), alors que la commande générée par les stratégies coordonnées prend en compte la totalité des conditions du trafic sur l'axe ou le réseau régulé en utilisant toutes les mesures en temps réel de la zone régulée. Quelles soient locales ou coordonnées, le développement de ces stratégies adaptatives est basé généralement sur l'application de plusieurs types d'approches : automatique (e.g ALINEA) ; analyse des systèmes complexes, les réseaux de neurones (Zhang et Ritchie, 1997), la logique floue (Vukanovic et Ernhofner, 2006). Selon la formulation mathématique du problème et la méthode de résolution choisie, les commandes générées peuvent être en boucle ouverte ou en boucle fermée et en particulier le cas des stratégies coordonnées. En effet, les approches utilisées pour le développement de ces stratégies incluent les approches multivariées (Papageorgiou *et al.*, 1990a, 1990b; Diakaki and Papageorgiou, 1994), le contrôle optimal (Zhang and Recker, 1999; Bellemans *et al.*, 2002; Hegyi *et al.*, 2003; Zhang and Levinson, 2004;

Gomes and Horowitz, 2006) et les approches heuristiques (Hourdakis et Michalopoulos, 2002; Hadi, 2005). Ce papier est focalisé d'une part, sur la description du développement de la stratégie de coordination OASIS, «*Optimal Advanced System for Integrated Strategies*», (Haj-Salem, 1998, Kotsialos *et al.* 2002) basée sur l'application de la théorie de la commande optimale des systèmes non linéaires et présentée ci-dessous et d'autre part sur l'évaluation en simulation et sur site réel de la stratégie ALINEA. Les performances d'OASIS ont été étudiées uniquement en simulation et comparées par rapport à la régulation locale ALINEA. Ce contre temps est dû à des contraintes de développement du logiciel de régulation d'accès du système d'exploitation SIRIUS. Cette étude est décomposée en deux étapes. La première a été focalisée sur l'étude en simulation des deux stratégies afin d'évaluer l'impact sur le trafic du contrôle isolé et coordonné. La seconde étape a été dédiée à l'évaluation sur le site réel de la stratégie adaptative ALINEA. Pour des raisons de coût de développement, la stratégie OASIS n'a pu être implantée dans le système d'exploitation du réseau autoroutier de l'Île de France (SIRIUS).

Cet article est organisé comme suit : les sections 2, 3 et 4 sont dédiées à la description du site suivie par celle du modèle utilisé et celle des stratégies testées. Dans la section 5 les critères d'évaluation sont décrits. Les résultats obtenus en simulation et sur site réel sont commentés dans les sections 6 et 7. La section 8 est dédiée à une analyse comparative des performances d'ALINEA en simulation et sur site réel.

## 2 DESCRIPTION DU SITE SIMULÉ

Le réseau simulé (voir figure 1) est constitué par le réseau autoroutier Est de l'Île de France. Il comprend l'autoroute A1Y, A3W et A3Y, A4W, A4Y, A86I et A86E, A6BY et une partie d'A6W au voisinage d'A86. La longueur totale du réseau simulé est d'environ 145 km, comprenant 70 accès dont 50 sont contrôlables. Les longueurs respectives de chacun des axes du réseau sont : A1Y : 7 km ; A3Y : 12 km ; A3W : 13 km ; A4W : 12 km ; A4Y : 15 km ; A86E : 37 km ; A86I : 38 km ; A6bY : 9 km et A6bW : 3 km.

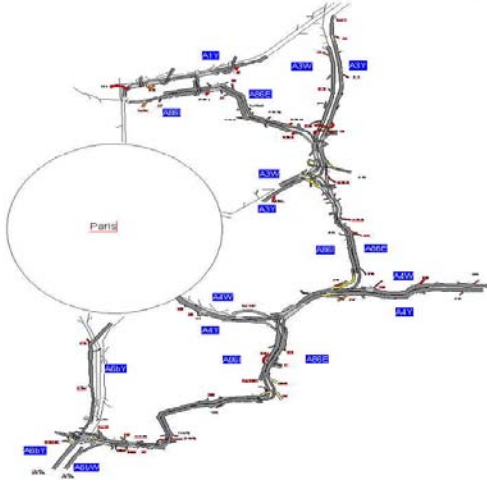


Figure 1. Réseau simulé

Tous le réseau autoroutier de la DIRIF est équipé de boucles électromagnétiques installées tous les 500 m environ. Elles permettent la mesure, du débit (Q), du taux d'occupation (TO) du trafic. Des doubles boucles sont implantées tous les 3 ou 4 km pour la mesure de la vitesse. Un système de recueil est intégré dans le système d'exploitation SIRIUS. Il prend en charge le recueil des données en temps réel et le stockage dans une base de données du trafic consultable en différé.

## 3 DESCRIPTION SOMMAIRE DU MODELE DU TRAFIC

Le modèle de simulation utilisé s'appelle METACOR « Modèle d'Écoulement du Trafic sur un CORridor », Elloumi & al., 1994. METACOR intègre deux types de modèles : 1<sup>er</sup> ordre pour simuler le réseau urbain et second ordre pour simuler le réseau autoroutier. Ce sont deux modèles dynamiques de simulation macroscopique du trafic dans un corridor (un réseau urbain et un réseau autoroutier). Le réseau est représenté par un graphe orienté comprenant des nœuds et des tronçons (origines, destinations, liaisons). Pour un tronçon autoroutier, la propagation du trafic est régie par les équations discrétisées où  $r$  est la densité,  $q$  le débit et  $v$  la vitesse et  $U$  les commandes possibles :

$$\rho_{m,s}(k+1) = \rho_{m,s}(k) + \frac{T}{\Delta} [U_{m,s}(k)q_{m,s-1}(k) - U_{m,s}(k)q_{m,s}(k)] \quad (1)$$

$$q_{m,s}(k) = \rho_{m,s}(k) V_{m,s}(k) \quad (2)$$

$$V_{m,s}(k+1) = V_{m,s}(k) + \frac{T}{\tau} \{V[\rho_{m,s}] - V_{m,s}(k)\} + \frac{T}{\Delta} [V_{m,s-1}(k) - V_{m,s}(k)]V_{m,s}(k) - \frac{vT}{\tau\Delta} \frac{\rho_{m,s+1}(k) - \rho_{m,s}(k)}{\rho_{m,s}(k) + \kappa} \quad (3)$$

$$V_{m,s}(k+1) = U_{m,s} [V_{m,s}(k+1)] \quad (4)$$

$$V[\rho_{m,s}(k)] = V_{f,m} \exp \left[ -\frac{1}{a} \left( \frac{\rho_{m,s}(k)}{\rho_{cr,m}} \right)^a \right] \quad (5)$$

avec ( $m$ ), l'indice du tronçon, ( $T$ ) le pas de discrétisation temporelle ; ( $\Delta$ ) la longueur d'un segment, ( $s$ ) l'indice du segment et ( $k$ ) le pas de temps actuel, et  $V_{f,m}$ ,  $\rho_{cr,m}$ ,  $v$ ,  $\tau$  sont les paramètres du modèle à calibrer en utilisant des données réelles du site simulé. Les origines alimentant le réseau sont modélisées par un modèle de file d'attente. Soient  $d_o(k)$  la demande à l'origine et  $q_o(k)$  le débit sortant de la rampe et entrant sur l'autoroute. La file d'attente s'écrit :

$$LQ(k+1) = LQ(k) + T[d_o(k) - q_o(k)] \quad (6)$$

Dans l'équation (1)  $U(\cdot)$  sont les commandes avec la contrainte :  $U_{min} \leq U(\cdot) \leq U_{max} = 1$ .

## 4 DESCRIPTION DES STRATÉGIES TESTÉES

### 4.1 ALINEA

ALINEA (Haj-salem & al., 1988, 1990, 1995) est une stratégie de régulation d'accès isolé. Elle est basée sur la théorie des asservissements des systèmes linéaires.

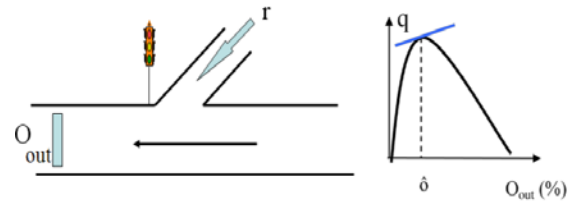


Figure 2. Implantation de la stratégie ALINEA

Le fonctionnement d'ALINEA consiste à maintenir la densité sur la section aval du convergent au voisinage de sa capacité. La consigne choisie est proche de la densité critique correspond à une utilisation optimale de la capacité offerte par l'autoroute.

La loi de commande ALINEA s'écrit :

$$r(k) = r(k-1) + K_R [O(k) - \hat{O}_{cr}(k)] \quad (7)$$

$K_R$  : Constante positive d'ALINEA (gain de la boucle)

$\hat{O}_{cr}$  : Taux d'occupation critique de la station en aval de l'accès, exprimé en (%)

$O(k)$  : Taux d'occupation de la station aval à l'instant  $kT$ , exprimé en (%)

$r(k-1)$  : Débit de la rampe d'accès durant le cycle précédent ( $k-1$ ), exprimé en nombre de véhicule

$r(k)$  : Débit de la rampe d'accès durant le cycle présent ( $k$ ), exprimé en nombre de véhicule

La commande est soumise à des contraintes :

- Si la durée de vert calculée est inférieure à la durée du vert minimum, elle est ramenée à la durée de vert minimum.
- Si la durée de vert calculée est supérieure à la durée du vert maximum, elle est ramenée à la durée du cycle (escamotage du rouge).

#### 4.2 Stratégie coordonnée : OASIS

##### 4.2.1 Formulation mathématique du problème

La formulation mathématique du problème dans le cas discret est la suivante :

$$\text{Soit } x(k+1) = F[x(k), u(k), d(k)] \quad (8)$$

conditions initiales  $x(0) = x_0$

Avec

- $k$  = pas de discrétisation
- $x(k)^T = [\rho(k) \ v(k) \ LQ(k)]^T$
- $\rho(k)$  = densité
- $v(k)$  = vitesse à l'instant  $k$
- $LQ(k)$  = longueur des queues aux origines
- $u(k)$  = variable de contrôle (e.g. Contrôle d'accès, guidage etc.)

$$\text{avec la contrainte : } U_{\min} \leq u(k) \leq U_{\max} \quad (9)$$

$d(k)$  = perturbation et les profils de demandes aux origines supposées connues

L'équation (8) correspond au modèle METACOR décrit ci-dessus (de l'équation (1) à l'équation (6)).

Considérons le critère  $J$  correspondant à un indice de performance défini sous sa forme générale comme :

$$J = \vartheta(K) + \sum_{k=0}^{K-1} \varphi[x(k), u(k)] \quad (10)$$

Avec  $\vartheta$  et  $\varphi$  des fonctions doublement dérivables et  $K$  le dernier pas de temps. La formulation générale du problème du contrôle optimal dans le cas discret s'écrit alors comme :

Minimiser le critère  $J$

Assujetti à :  $x(k+1) = F[x(k), u(k), d(k)], x(0) = x_0$   
et  $U_{\min} < u(k) < U_{\max}$

Quelle que soit la stratégie mise en place, généralement l'objectif de la régulation est de minimiser le temps passé dans le système ainsi que le temps d'attente aux queues. Pour la régulation d'accès, la fonction critère ( $J$ ) à optimiser est définie comme :

$$J = \sum_{k=0}^K \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S T \Delta_{m,s} \rho_{m,s}(k) + \sum_{k=0}^K \sum_{o=1}^O T \cdot LQ_o(k) + \sum_{k=0}^K \sum_{o=1}^O T \cdot A_o [LQ(k) - LQ_o^{\max}]^2$$

Les trois termes correspondent respectivement au temps passé sur le réseau, le temps d'attente sur les rampes et le dépassement de la capacité des rampes régulées. En effet,  $A_0 = 1$  si  $LQ > LQ_o^{\max}$  et  $A_0 = 0$  sinon

Les étapes de l'algorithme (Papageorgiou *et al.*, 1995) pour la résolution numérique du problème posé sont :

**Etape 1 :** Itération = 0, Définir une trajectoire de commande initiale  $U_0(k), k=0, \dots, K$

**Etape 2 :** Résoudre (4) en utilisant l'état initial pour obtenir  $x(k+1)$  ; en utilisant  $x(k+1)$  et  $u(k)$  résoudre (10) à partir de la condition finale pour obtenir  $\lambda(k+1)$  ;  $k=0 ; \dots, k=K$ .

**Etape 3 :** En Utilisant  $x(k+1), u(k)$  et  $\lambda(k+1)$ , calculer les gradients  $g(k), k=0, \dots, K$

**Etape 4 :** Rechercher la direction de descente en utilisant les signes du gradient et modifier les commandes en conséquence

**Etape 5 :** Si  $(J^{i+1} - J^i) / J^i < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  fixé alors stop) Sinon allez à l'étape 2

La résolution de ce problème d'optimisation nous fournit une trajectoire de commande en boucle ouverte. Afin de générer une commande en boucle fermée, la technique de l'horizon glissant est appliquée.

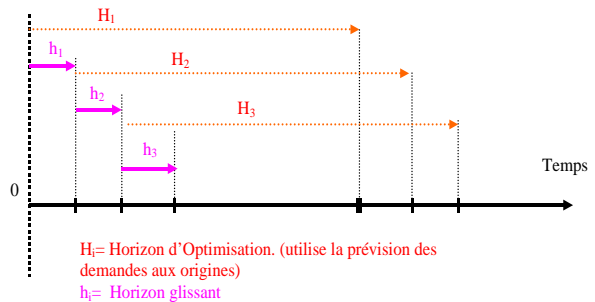


Figure 3. Principe de l'horizon glissant

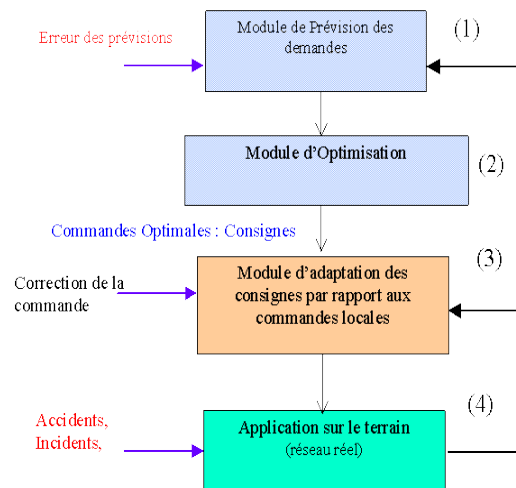


Figure 4. Structure du contrôle hiérarchique

Le bouclage correspond au changement de l'état initial au début de chaque optimisation et qui correspond aux mesures recueillies en temps réel intégrant les effets de la régulation. Les figures 3 et 4, indiquent le principe de fonctionnement de l'horizon glissant. Au démarrage ( $t=0$ ), l'optimisation est exécutée sur  $H_1$ . Les résultats de l'optimisation correspondent aux trajectoires optimales

des commandes du système en boucle ouverte. Ces commandes sont appliquées uniquement pendant l'horizon  $h_1$ . A la fin de  $h_1$ , l'optimisation est relancée pour recalculer de nouveau les nouvelles trajectoires des commandes en partant de la situation initiale réelle (mesures) en  $h_1$  ; c'est le bouclage par « retour d'état ». Les deux horizons  $H$  et  $h$  doivent être calibrés.

On distingue 3 modules principaux :

**Module de prévision des demandes aux origines** : Il permet de fixer les profils des demandes aux origines sur l'horizon d'optimisation. L'algorithme de prévision utilisé n'exige pas une précision importante. Généralement un simple lissage de l'historique sur la même période d'optimisation suffit amplement.

**Module d'optimisation** : Il correspond à l'algorithme d'optimisation décrit précédemment. L'horizon  $H$  est fonction de la taille du réseau et la taille du problème à résoudre (nombre d'accès) Il peut varier entre 1 ou 2 heures au maximum. Le résultat de l'optimisation fournit les trajectoires des commandes optimales.

**Module d'adaptation** : Il consiste à adapter les commandes optimales issues du précédent module. Cette adaptation se traduit par la prise en compte des commandes uniquement sur un horizon ( $h < H$ ), l'horizon  $h$  varie généralement entre 6 –30 minutes. Il est paramétrable et il dépend du changement des conditions du trafic sur le réseau. Les deux paramètres  $H$  et  $h$  doivent être optimisés lors de la mise en place de l'algorithme.

En outre, dans le module d'adaptation, les trajectoires des commandes issues de l'optimisation dépendent de la précision du module de prévisions. La fonction première de ce module est de corriger les commandes obtenues en fonction des erreurs de prévision.

La stratégie de contrôle OASIS intègre trois types de stratégies :

1. Régulation coordonnée des accès classiques et des convergents autoroutiers (Autoroute/autoroute)
2. Guidage des usagers sur le réseau
3. Régulation des vitesses

Les trois types de stratégies peuvent être testés simultanément ou séparément. Dans la présente étude, uniquement la stratégie de régulation d'accès coordonnée est testée et évaluée.

## 5 DEFINITIONS DES CRITÈRES D'ÉVALUATION

Les critères d'évaluation choisis pour la simulation et sur site réel correspondent à ceux utilisés couramment par les exploitants. On distingue :

- Le Temps Total Passé dans le réseau (TTP)

C'est le temps total passé par tous les véhicules dans le système. Ce critère comprend le temps passé sur l'autoroute plus celui des rampes. Exprimé en (véh\*h), le TTP est calculé selon :  $TTP = T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \rho_i(k) \Delta_i$

- Distance Parcourue Totale (DPT)

C'est la distance parcourue par tous les véhicules dans le système. Elle est exprimée en (véh.km). Le critère (DPT) est calculé selon:  $DTP = T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N q_i(k) \Delta_i$  ; Où  $q_i$  est exprimé en (véh/h) est le débit mesuré de la station (i). Les autres variables sont les mêmes que celles du critère TTP.

- Vitesse moyenne généralisée :

C'est la vitesse moyenne généralisée calculée à partir de la connaissance des indices : distance totale parcourue et le temps total passé dans le système. Le critère (Vm) est exprimé en km/h et il est donné par  $Vm = DPT/TPT$

- Temps de parcours par axe

Ce temps de parcours est celui d'un véhicule fictif injecté au début de l'axe et progressant à la vitesse du flot en utilisant les vitesses mesurées le long du trajet.

- Consommation d'énergie

Exprimée en  $vh \cdot \text{litres}$ , la consommation est calculée selon la relation ci-dessous (Jurvillier, 1982)

$$Cons = \sum_{k=1}^K \frac{T}{100} \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{array}{l} Q_i(k) \left( 4.49 + \frac{122}{V_i(k)} + 0.0016(V_i(k) - 60)^2 \right) \text{ si } V_i(k) > 60 \\ Q_i(k) \left( 4.49 + \frac{122}{V_i(k)} \right) \text{ si } V_i(k) < 60 \end{array} \right.$$

- Cartographie des congestions,

Elle consiste à tracer les courbes des iso-taux d'occupation permettant ainsi d'avoir l'étendu des congestions pour chaque cas.

- Émission de polluant (HC, CO),

Parmi les polluants, les critères considérés ont été restreints à l'émission du monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbure (HC). Le calcul exact de ses critères est assez complexe et nécessite la connaissance approfondie du parc circulant sur le réseau : composition des cylindres du parc, nature de carburant (GO, essence), âges des véhicules, démarrage à froid et à chaud etc. Pour chaque type de véhicule est associé une formule d'émission des polluants HC et CO. Les formules adoptées suivantes sont issues du projet européen « INRESPONSE », (WP9-D91, 1998). Elles sont le résultat d'un étalonnage des valeurs d'émissions moyennes pour un véhicule moyen du parc. Ils sont fournis par le groupe de travail européen MEET (Methodology for calculating Emissions and Energy consumption of Transport (ADEME, 1998). La formulation numérique correspond à :  $E(HC) = 1.2 * DTP + 60 * TTP$

$$E(CO) = 2.3 * DTP + 310 * TTP$$

Avec  $DTP$  et  $TTP$  correspondant respectivement à la Distance Totale Parcourue, exprimée en  $vh \cdot km$  et le Temps Total Passé exprimé en  $vh \cdot h$ .

## 6 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EN SIMULATION

La première étape a consisté à calibrer et valider le modèle METACOR sur le site étudié. Cette étape était la plus lourde et la plus fastidieuse. En effet, le premier

problème rencontré et celui de la disponibilité des données valides du trafic. Compte tenu de la taille importante du réseau étudié, on a procédé par la décomposition du réseau global en sous-réseau. Chacun des sous réseaux a été calibré et validé à l'aide des données réelles. La dernière étape a consisté à l'intégration de tous les sous-réseaux en faisant attention aux conditions limites de chacun.

Après de multiples exécutions, les résultats obtenus sont acceptables. On constate que les propagations dans l'espace et le temps, des congestions dans le réseau sont similaires à celles de la réalité. Les résultats détaillés sont décrits dans Haj-Salem, 2001.

La seconde étape a consisté à l'évaluation de contrôle d'accès isolé (ALINEA) et coordonnée (OASIS). La stratégie de référence est le sans contrôle. Afin d'alléger le papier, on s'est focalisé uniquement sur les résultats importants et en particulier le pic du matin sur A4W (cf. Tableau 1) où les congestions sont les plus importantes. Les résultats détaillés axe par axe sont décrits dans Haj-Salem, 2001.

6h00-13h00	Critères	Sans CA	ALINEA	Gain
A4W	$T.P(vh*h)$	14632	12420	<b>15.1%</b>
	$D.P(vh*km)$	408391	408560	<b>0.0%</b>
	$Vm(km/h)$	35.88	43.32	<b>20.7%</b>
	$CONS(lit)$	11336	10742	<b>5.2%</b>
	$HD(kg)$	1368	1236	<b>9.7%</b>
	$CO(kg)$	5478	4785	<b>12.7%</b>

6h00-13h00	Critères	Sans CA	OASIS	Gain
A4W	$T.P(vh*h)$	14632	7795	<b>46.7%</b>
	$D.P(vh*km)$	408391	408393	<b>0.00%</b>
	$Vm(km/h)$	35.88	59.17	<b>64.9%</b>
	$CONS(lit)$	11336	9449	<b>16.6%</b>
	$HD(kg)$	1368	959	<b>29.9%</b>
	$CO(kg)$	5478	3358	<b>38.7%</b>

Tableau 1. Axe A4W : Résultats pour ALINEA et OASIS

La stratégie ALINEA a permis d'améliorer les conditions du trafic sur les axes critiques du réseau. En fonction des profils des demandes et des critères d'évaluation fixés, ALINEA a permis de réduire le temps passé, sur A4W, d'environ 15% et 17% pendant, respectivement le pic du matin et le pic du soir. Concernant les axes principaux A86I et A86E, des gains significatifs ont été obtenus dans la partie centrale des deux axes, siège des congestions.

En appliquant la stratégie de coordination OASIS, les résultats les gains obtenus sont environ 3 fois supérieurs à ceux d'ALINEA. En particulier, la coordination de la régulation d'accès a permis d'améliorer les conditions du trafic sur tous les axes du réseau. Les gains sur le temps passé sur A4W ont augmenté aussi. Ils sont passés de 15% à 46% pendant le pic du matin. Bien entendu, ces

résultats sont conditionnés par les hypothèses prises lors des tests en simulation et en particulier, les profils prévus des demandes et supposés exacts.

## 7 ÉVALUATION IN-SITUE

Pour des raisons techniques, le réseau expérimental a été limité aux axes autoroutiers A86I/E, A4W/Y et A6bY où la régulation d'accès a été implantées (figure 5). Parmi tous les accès à réguler, uniquement 17 accès ont été équipés. Par ailleurs, pour des raisons de complexité de développement du logiciel, la stratégie OASIS n'a pas été intégrée dans le système d'exploitation. Par conséquent cette évaluation a été limitée à ALINEA.

L'évaluation a porté sur 9 mois de fonctionnement (de Février à Octobre 2008) en utilisant uniquement ALINEA.

Les données utilisées sont extraites de la base des données du système d'exploitation SIRIUS (DIRIF). Elles consistent en des valeurs moyennes du débit, du taux d'occupation et de la vitesse, agrégées sur un intervalle de temps de six minutes pour chaque station du réseau autoroutier.

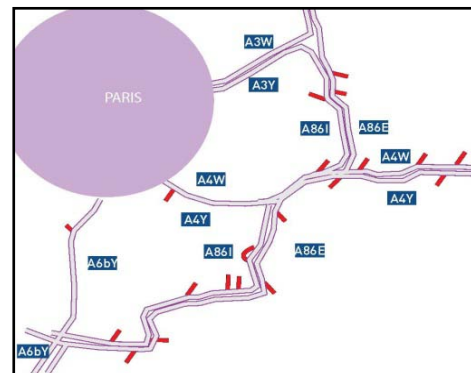


Figure 5. Accès régulés du site

Les critères de sélection des jours pour l'évaluation sont les suivants :

- Jours de semaine hors jours fériés, et en niveau de demande comparable
- Période englobant l'heure de pointe du matin et l'heure de pointe du soir
- Sans précipitations ni autres phénomènes perturbants (neige, verglas)
- Absence d'événements perturbant le secteur (incidents, travaux, ...)

Il s'agit, à partir de ces critères, de sélectionner un nombre de jours, pour chacune des 2 stratégies (Sans Contrôle, ALINEA). Cette procédure nous a délivré deux échantillons de données réelles correspondant à 30 jours pour le sans contrôle et 41 jours pour ALINEA.

Les résultats complets sont largement commentés dans Haj-Salem, 2009. Dans les sections suivantes, un résumé des résultats obtenus sont décrits en se focalisant sur les périodes les plus significatives.

## 7.1 Résultats de l'évaluation

Dans cette section, les résultats de l'évaluation sont présentés axe par axe. Notons que les axes A86/E inclus les données du tronçon commun A4W/Y (partie d'autoroute commune entre A86/E et A4W/Y). Cette évaluation a porté sur trois périodes de la journée : la période totale (6h30-20h), le pic du matin (6h30-10h30) et le pic du soir (15h-20h). Ces périodes ont été choisies en tenant compte du fonctionnement des contrôleurs et en particulier du début et de fin de régulation. Les deux ensembles de jours sont sélectionnés sans accidents.

### 7.1.1 Résultats de l'axe A4W

La figure 6 indique l'évolution temporelle du temps passé et de la distance parcourue pendant la journée moyenne et pour les deux modalités « Sans contrôle » et « ALINEA ».

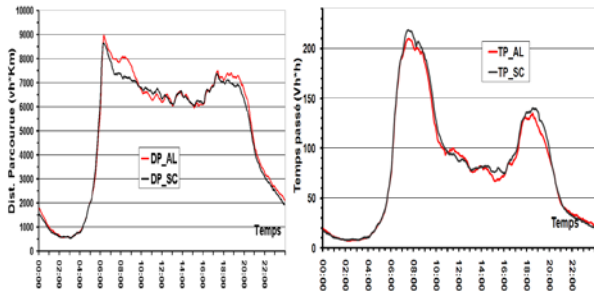


Figure 6. A4W : journée moyenne, évolution du critère Temps Passés et de distance parcourue

6h30-10h30	Critères	SC	ALINEA	Gain (%)
A4W	TP(vh*h)	7363	7078	<b>-3.9</b>
	DP(vh*km)	297830	312901	<b>5.1</b>
	Vmoy(km/h)	40.4	49.5	<b>22.4</b>
	CONS(lit)	4324	4021	<b>-7.0</b>
	HC(kg)	799213	800211	<b>0.1</b>
	CO(kg)	2967729	2914108	<b>-1.8</b>

Tableau 2. Critère trafic de l'axe A4W

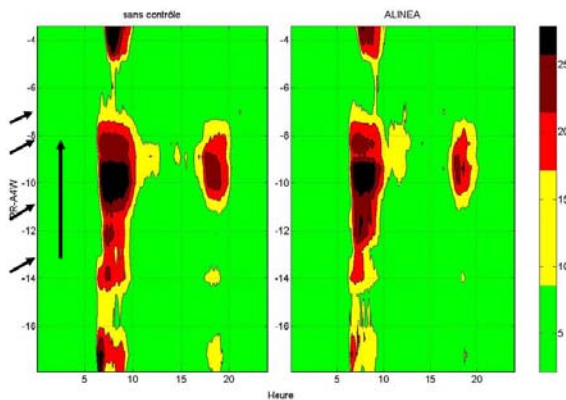


Figure 7. A4W : Cartographies des congestions : Sans contrôle et ALINEA.

Concernant la demande, on remarque que la distance parcourue pendant la période 5h-6h30 est identique pour les deux modalités sans contrôle et ALINEA. Donc, on peut supposer que les demandes pour tous les jours sélectionnés sont semblables.

Sur la figure 6, on observe qualitativement que les deux critères sont améliorés pendant le pic du matin et du soir et plus particulièrement la distance parcourue. Ce constat est confirmé par l'aperçu de la cartographie des congestions (cf. Figure 7). En effet, les courbes des iso-taux d'occupation de niveau élevé ( $TO > 28\%$ , couleur noir) ont une surface plus faible pour ALINEA comparée au sans contrôle. Sur cet axe, les congestions apparaissent en premier au niveau du pont de Nogent puis sur le tronçon commun A4/A86 et au niveau de l'arrivée d'A4W sur le périphérique. Pendant le pic du matin, les trois têtes de bouchon ont tendance à se rejoindre pour former une seule congestion unique couvrant tout l'axe A4W entraînant ainsi une dégradation du fonctionnement de l'infrastructure. Afin de limiter la formation des congestions sur cet axe, on dispose de 4 accès régulés qui sont localisés entre les PR 7.5 et le PR 15 correspondant au tronçon le plus congestionné (pont de Nogent et tronçon commun). Par conséquent la mise en place d'ALINEA, a permis de réduire d'une manière notable l'étendu des congestions. Les résultats quantitatifs sont indiqués dans le Tableau 2 correspondant au pic du matin. Selon la période considérée, les gains en termes de temps passé et distance parcourue varient respectivement entre 3.5% à 6.2%, et 2% à 5.1%. Pendant le pic du matin, période au cours de laquelle les congestions sont le plus sévères, on observe les gains les plus importants. En effet la vitesse moyenne généralisée est améliorée de 22%. Le résultat marquant concerne la distance parcourue. En effet, lors des expérimentations précédentes de régulation d'accès, des gains relativement faibles (entre 0 et 2% maximum) sont obtenus. Or, dans cette évaluation on obtient un gain de 5.1%. L'explication de ce gain important prend ces sources dans l'utilisation simultanée et combinée des GMA (Glissières Mobiles d'Affectation) et de la régulation d'accès.

### 7.1.2 Résultats de l'axe A4Y

Sur cet axe, trois accès sont équipés pour la régulation d'accès localisé au PR 1. (D50), PR8.4 (D45) et PR 14.5 (D194). Cependant, lors de l'expérimentation, uniquement deux accès : D50 et D194 ont été opérationnel. La cartographie des congestions est représentée par la Figure 10, pour les deux modalités : Sans Contrôle et ALINEA.

Pendant le pic du matin, cet axe est fluide ( $To$  moyen  $< 15\%$ ). En revanche, à partir de 16h (pic du soir), la circulation devient dense puis congestionnée. On constate que qualitativement, la mise en place d'ALINEA a réduit d'une manière notable le niveau des congestions. La Figure 8 indique l'évolution temporelle pendant la journée moyenne des deux indices : Temps Passé et Distance Parcourue pour les deux stratégies : Sans contrôle et

ALINEA. On constate que pour ALINEA, les critères Temps Passé et Distance parcourue sont améliorés.

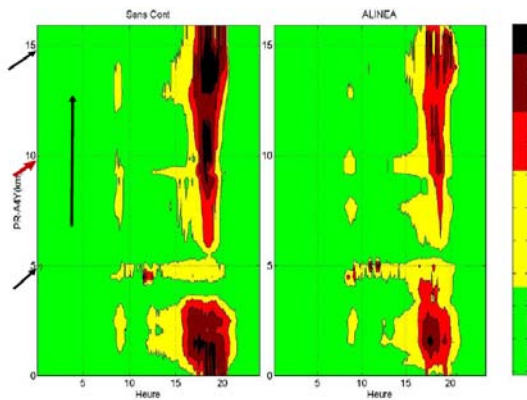


Figure 8. A4Y : Cartographies des congestions : Sans contrôle et ALINEA

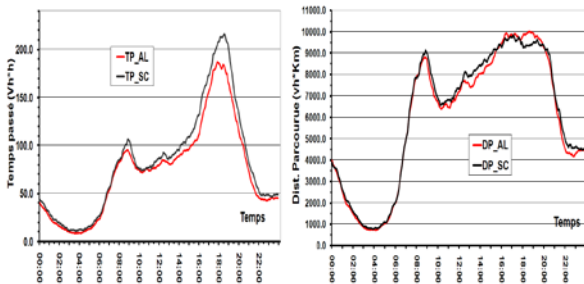


Figure 9. A4Y : journée moyenne, évolution du critère Temps Passés et de distance parcourue

Concernant le niveau de demande pour chaque modalité, on observe qu'elles sont identiques comme c'est indiqué dans la Figure 8. En effet, pendant la tranche horaire 5h-6h30, les deux courbes de la distance parcourue sont superposées.

Les gains obtenus sont indiqués dans les trois tableaux ci-dessous couvrants les trois périodes de la journée. Sur la période 6h30-20h00, les gains obtenus du Temps Passé dans le système sont d'environ 10%. Cependant, pendant le pic du matin, la vitesse moyenne généralisée est d'environ 90 km/h, ce qui traduit un état de trafic fluide.

15h-20h00	Critères	SC	ALINEA	Gain (%)
A4Y	TP(vh*h)	8545	7439	-12.9
	DP(vh*km)	482082	490935	1.8
	Vmoy(km/h)	56.4	66.0	17.0
	CONS(lit)	5257	5328	1.3
	HC(kg)	1091209	1035440	-5.1
	CO(kg)	3757794	3435126	-8.6

Tableau 3. A4Y : Critères trafic

Par conséquent, ALINEA est le plus souvent inactif. En revanche, pendant le pic du soir, ALINEA est très actif (voir tableau 3). Ce qui se traduit par des gains d'environ

13% sur le Temps Passé, 2% sur la Distance Parcourue et de 17% sur la Vitesse moyenne (+10km/h).

### 7.1.3 Résultats de l'axe A86I

Parmi tous les axes considérés, l'axe A86I est le plus long (24 km) et le plus chargé en trafic. Il est aussi le mieux équipé en termes de contrôleurs d'accès. On distingue six accès repartis sur la partie Nord et Sud de l'A86I. On compte 4 accès successifs et opérationnels sur la partie centrale au voisinage du tronc du commun A4/A86. Les deux accès restants sont localisés sur la partie Nord et Sud.

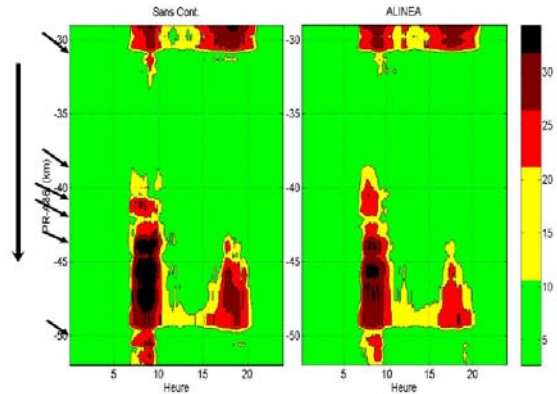


Figure 10. A86I : cartographie des congestions

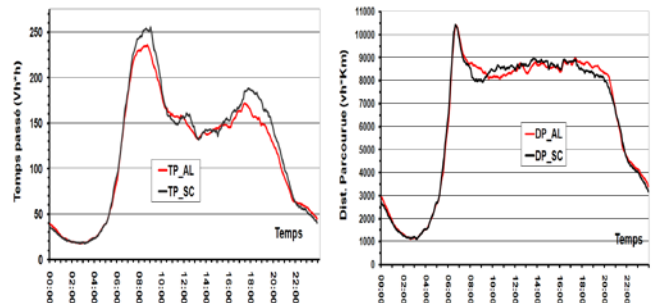


Figure 11. A86I : Évolution temporelle du Temps Passé et de la Distance Parcourue Totale

La Figure 10 indique la cartographie des congestions de la journée moyenne des deux échantillons sélectionnés pour les deux modalités : sans contrôle et ALINEA. On observe deux congestions distinctes : congestions Nord et Sud avec une étendue différenciée pendant le pic du matin et du soir. En effet, l'étendue de la congestion du matin est nettement plus importante que celle du pic du soir.

15h-20h00	Critères	SC	ALINEA	Gain (%)
A86I	TP(vh*h)	8459	7772	-8.1
	DP(vh*km)	435398	441933	1.5
	Vmoy(km/h)	51.5	56.9	10.5
	CONS(lit)	5437	5611	3.2
	HC(kg)	1029997	996626	-3.2
	CO(kg)	3623601	3425694	-5.5

Tableau 4. A86I : Critères trafic



En comparant la cartographie des congestions des deux modalités, on observe qu'avec ALINEA, le niveau de congestion dans le Nord et Sud (surface noire), est nettement plus faible que celle du sans contrôle. Ce constat est confirmé par l'évolution temporelle du temps passé indiquée par la Figure 11. On remarque que, par rapport au sans contrôle et pendant le pic du matin et du soir, la courbe d'évolution du temps passé pour ALINEA est constamment en dessous.

Le tableau 4, indique les résultats obtenus pour la période 15h-20h. En considérant toute la période, avec la stratégie ALINEA, les gains varient entre 5% et 8% selon la période de la journée. Le gain maximum de 8% est obtenu pendant le pic du soir. En revanche, pendant le pic du matin siège de forte congestion, la distance parcourue et la vitesse moyenne sont améliorés respectivement de 1.5% et 17%. Concernant les émissions de polluants, la stratégie ALINEA a permis de les réduire d'environ 5% en moyenne.

**7.1.4 Résultats de l'axe A86E**

La section considérée démarre du PR24 au PR42 soit une longueur totale d'environ 18 km. L'évaluation a porté sur un échantillon de 32 et 45 jours pour respectivement le sans contrôle et ALINEA. La Figure 12 représente la cartographie des congestions pour les deux modalités.

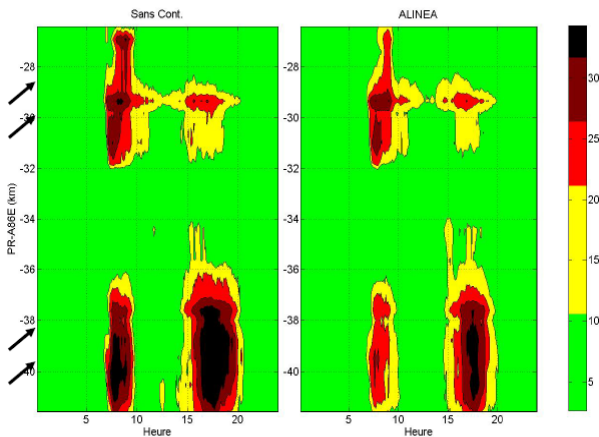


Figure 12. A86E : cartographies des congestions

15h-20h00	Critères	SC	ALINEA	Gain (%)
A86E	TP(vh*h)	8362	7872	<b>-5.9</b>
	DP(vh*km)	355288	380724	<b>7.2</b>
	Vmoy(km/h)	42.5	48.4	<b>13.8</b>
	CONS(lit)	5063	5426	<b>7.2</b>
	HC(kg)	928068	929197	<b>0.1</b>
	CO(kg)	3409395	3316027	<b>-2.7</b>

Tableau 5. A86E : Critères trafic

Comme sur l'axe A86I, on observe deux congestions distinctes au Nord et au Sud. En revanche, on remarque que la congestion pendant le pic du soir est nettement plus étendue dans le temps et l'espace que celle du ma-

tin. En outre, les 4 accès régulés sont bien localisés au niveau des bouchons Nord et Sud (Figure 14).

Comparé au sans contrôle, on constate qu'ALINEA diminue d'une manière significative la durée et l'étendue des deux congestions Nord et Sud. Cette remarque est confirmée par la Figure 13 qui inclut l'évolution temporelle des deux critères : temps passé et distance parcourue. En particulier, avec ALINEA, la distance parcourue est constamment supérieure à celle du sans contrôle.

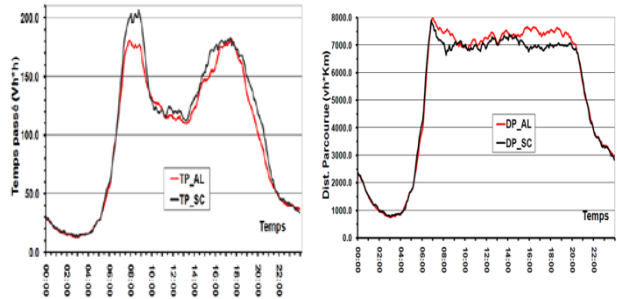


Figure 13. A86E : Évolution temporelle du Temps Passé et de la Distance Parcourue Totale

Dans le tableau 5, sont reportés les critères d'évaluation pour la période du pic du soir (15h-20h). Le résultat marquant est le gain obtenu pour le critère distance parcourue sur l'ensemble de la journée. Ce critère est amélioré d'environ 5%. Pendant le pic du soir, période de forte congestion, ce gain passe à environ 8%. Ce gain important de la distance parcourue est due à l'effet conjugué de la régulation et les GMA. Bien entendu, l'augmentation du nombre de véhicules servis a une répercussion immédiate sur les critères tels que la consommation et les émissions de polluants. En effet, pendant le pic du soir, ces critères sont légèrement dégradés.

**7.1.5 Temps de parcours**

Comme c'est indiqué dans la section critère d'évaluation, le temps de parcours est basé sur l'utilisation de l'algorithme du véhicule fictif. Ce calcul est basé sur les vitesses mesurées et/ou estimées. Donc, c'est un temps de parcours prévu et non instantané. Le tableau 5 récapitule le calcul des temps de parcours pour tous les axes A4W, A4Y, A86I et A86E. Par ailleurs, les résultats du calcul de l'indicateur du risque d'accident sont inclus. Concernant l'indicateur temps de parcours, on remarque qu'avec ALINEA le gain est amélioré (environ 14%) pendant le pic du matin. Concernant le critère trafic/sécurité, le calcul de l'indice du risque indique une nette amélioration pour la stratégie ALINEA (environ 15%) du risque d'accident. Sur l'axe A4Y, l'amélioration du temps de parcours avec ALINEA est importante pendant le pic du soir. Cette période correspond à l'activation continue d'ALINEA. En revanche pendant le pic du matin, compte tenu du trafic fluide, les gains obtenus sont non significatifs. Avec la stratégie ALINEA, le risque d'accident sur A4Y est diminué de moitié environ. Pour l'axe A86I, sur toute la journée on

observe un gain moyen du temps de parcours de la totalité de l'axe A86I d'environ 10%. Cependant, pendant le pic du matin, ce gain passe au environ de 16%. On remarque aussi sur l'axe A86E qu'avec la stratégie ALINEA une diminution notable du temps de parcours. En particulier, pendant la période la plus congestionnée (pic du soir), on constate les gains les plus importants (22%).

6h :30-21h	T.P en Sec		
	Sans	ALINEA	Gain(%)
A4W	725	669	7.7
A4Y	695	621	10.7
A86I	1445	1309	9.4
A86E	1073	893	16.8

Tableau 5. Résultat du calcul des temps de parcours moyens

## 8 COMPARAISON DES RÉSULTATS EN SIMULATION ET SUR SITE RÉEL

On s'est focalisé sur A4W pour la comparaison des résultats de la simulation et sur site car cet axe est très chargé pendant le pic du matin (6h00-13h00). Pour ALINEA, les résultats en simulation pendant cette période indiquent un gain de 15% et 20% pour respectivement le temps passé et la vitesse moyenne. Sur site, les gains obtenus sont respectivement de 4% et 22%. Ces différences sont inhérentes aux hypothèses prises lors de la simulation et en particulier les profils des demandes aux origines ainsi que ceux des pourcentages directionnels aux divergents qui sont les mêmes pour les deux modalités Sans et ALINEA.

Malgré ces hypothèses fortes les gains observés en simulation et sur site réel sont relativement proches. Généralement, les résultats en simulations sont observés en terme de tendance (gain ou perte) plutôt qu'en valeur absolue.

## 9 CONCLUSION

Les résultats décrits dans cet article nous ont montré l'efficacité de la stratégie ALINEA pour la régulation d'accès sur la partie Est des autoroutes de l'Ile de France couvrant une partie d'A86I/E, A4Y/W et A6BY. Ces résultats marquants peuvent être déclinés comme suit :

- Quel que soit l'axe considéré, la régulation d'accès isolé et adaptatif ALINEA a un impact positif sur le trafic et varie selon la période et l'axe considéré. On note une diminution du temps passé entre 3% et 15%, une augmentation de la distance parcourue entre 2% et 12% et de la vitesse moyenne entre 12% et 20%.
- Concernant la consommation en carburant et les émissions de polluants, les modèles appliqués présentent des imprécisions. Par conséquent, ce sont les variations relatives qui sont les plus significatives et non les valeurs absolues calculées. Ceci étant, on observe, selon les

périodes et l'axe considéré, une amélioration moyenne comprise entre 1% et 30%. Les formules utilisées dépendent des deux critères fondamentaux qui sont le temps passé et la distance parcourue. Cependant, on constate que l'amélioration de la distance parcourue augmente naturellement la consommation et l'émission de polluant.

Une fois de plus, la stratégie de régulation d'accès isolée ALINEA a amélioré sensiblement les conditions de circulation sur toutes les composantes du réseau considéré. Compte tenu des résultats positifs et encourageants, la généralisation complète peut être entamée.

On peut noter cependant, la convergence des résultats obtenus en simulation et sur site réel. Ce résultat marquant est le fruit d'un calibrage méticuleux du modèle de simulation sur le site étudié.

La prochaine étape est l'intégration d'une stratégie de coordination dans le système opérationnel SIRIUS. Ces travaux sont en cours et en collaboration avec l'INRETS.

## RÉFÉRENCES

- Jurvillier, J.C. ,1982, « Simulation de temps de parcours et modèle de consommation sur une autoroute urbaine », Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, DART, Arcueil, France .
- Elloumi N. , Haj-Salem H., Papageorgiou M., "A macroscopic modelling tool for urban corridor." *TRISTAN II : TRIennial Symposium on Transportation Analysis*. Capri-Italy. Congress Center June, 23-28, Vol I, pp 135-149, 1994.
- Haj-Salem, H., Blosseville, J.-M., Papageorgiou, M. (1990). ALINEA - A Local Feedback Control Law for on-ramp metering: A real life study. 3rd IEE Intern. Conf. on Road Traffic Control, London, U.K., pp.194-198.
- Zhang, H.M. and Recker, W.W., 1999. On optimal freeway ramp control policies for congested traffic corridors. *Transportation Research Part B*, 33, 417-436.
- Haj Salem H., Mangeas M. (1998)."Application of non-linear optimisation technique for coordinated ramp metering control », *5th World congress ITS*. Korea
- Papageorgiou, M., Marinaki M., 1995, A Feasible direction algorithm for the numerical solution of optimal control problems. Internal report N°1995-4, Technical University of Crete, Greece.
- Haj-Salem, H., Papageorgiou, M., 1995, Ramp Metering Impact on Urban Corridor Traffic : Field Results".

- Transportation Research -A. Vol 29A, No.4, pp 303-319.
- Diakaki, C. and Papageorgiou, M., 1994. Design and Simulation Test of Coordinated Ramp Metering Control (METALINE) for A10-West in Amsterdam. Internal report 1994-2, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece
- Kotsialos, A., Papageorgiou, M., Mangeas, M. and Haj-Salem, H., 2002b. Coordinated and integrated control of motorway networks via nonlinear optimal control. *Transportation Research Part C*, 10, 65-84.
- Haj-Salem H, 2001, *Étude en Simulation de la Régulation d'accès généralisée sur l'IDF* », rapport de convention INRETS/SIER, 2001.
- Gomes, G. and Horowitz, R., 2006. Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model, *Transportation Research Part C*, 14, 244-262.
- INRESPONSE: Deliverable WP9-D91, (1998), "Evaluation Plan and Methodology », *Projet Européen TR1030*.
- ADEME, (1998), « Émission de Polluants et consommation liée à la circulation routière- Paramètres déterminant et méthodes de quantification, "connaître pour agir, guide et cahiers techniques".
- Papageorgiou, M., Blossville, J.M., and Haj-Salem, H., 1990a. Modelling and realtime control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris – Part I: Modeling. *Transportation Research Part A*, 24, 345-359.
- Papageorgiou, M., Blossville, J.M., and Haj-Salem, H., 1990b. Modelling and realtime control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris – Part II: Coordinated on-ramp metering. *Transportation Research Part A*, 24, 361-370.
- Hegyí, A., De Schutter, B. and Hellendoorn, J., 2003. MPC-based optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves in freeway traffic. *Proc. 2003, American Control Conference, Denver, Colorado, USA*.
- Haj Salem, H., Boukhniher, M., 2009, « Évaluation de la régulation d'accès généralisée sur la partie est de l'île de France », *Rapport de Convention INRETS/DIRIF N° 07-23, Mars 2009*.
- Bellemans, T., De Schutter, B. and De Moor B., 2002. Model predictive control with repeated model fitting for ramp metering. *Proc. 5th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Singapore*.
- Cassidy, M.J. and Rudjanakanoknad, J., 2005. Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp. *Transportation Research Part B*, 39, 896-913.
- Chen, O., Hotz, A. and Ben-Akiva, M., 1997. Development and evaluation of a dynamic metering control model. *Preprints of 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems, Chania, Greece, 1162-1168*.
- Elefteriadou, L., Roess, R.P., and Mc Shane, W.R., 1995. Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions. *Transportation Research Record*, 1484, 80-89.
- Gomes, G. and Horowitz, R., 2006. Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model, *Transportation Research Part C*, 14, 244-262.
- Hadi, M.A., 2005. Coordinated traffic responsive ramp metering strategies – An assessment based on previous studies. *Proc. ITS World Congress 2005, San Francisco, CA*.
- Kotsialos, A., Papageorgiou, M., Mangeas, M. and Haj-Salem, H., 2002b. Coordinated and integrated control of motorway networks via nonlinear optimal control. *Transportation Research Part C*, 10, 65-84.
- Kotsialos, A., Papageorgiou, M. and Middelham, F., 2005. Local and optimal coordinated ramp metering for freeway networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 9, 187-203.
- Hourdakis, J. and Michalopoulos, P.G., 2002. Evaluation of ramp control effectiveness in two Twin Cities freeways. *Transportation Research Board 81st Annual Meeting, Washington, D.C., USA*.