



Septembre 2010

# MOCOPo : Mesure et mOdélisation de la Congestion et de la Pollution

Annexe technique

de la réponse à l'appel à proposition « **gestion du trafic et des mobilités** » du groupe 2 du PREDIT

Sous thème : « **Compréhension et évaluation des phénomènes de mobilité et de trafic** »

## **Projet présenté par**

L'institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS)

Laboratoires LICIT (mixte avec l'ENTPE) , LTE et LEPSIS (mixte avec le LCPC)

## **En partenariat avec**

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)-

Laboratoires MI et LEPSIS (mixte avec l'INRETS),

Le laboratoire CERIA (ENPC/ EDF R&D)

Le laboratoire NeCS (INRIA/ CNRS/ INPG)

Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers LRPC-A (CETE de l'Ouest - MEEDM)

ASCOPARG,

Le CERTU

La Direction Interdépartementale des Routes Centre Est DIR-CE

## **Coordonatrice du projet**

**Christine BUISSON** INRETS

## **Responsables scientifiques du projet pour chaque partenaire**

**Dimitri DAUCHER** LCPC

**Christian SEIGNEUR** CERIA

**Carlos CANUDAS de WIT** NECS-INRIA

**Claire CHAPPAZ** ASCOPARG

**Tiphaine BRETIN** CERTU

**Philippe MANSUY** DIR CE

## **Résumé**

---

<b>Nom du projet</b>	MOCOPo (Mesure et mOdélisation de la COngestion et de la POLLution).
<b>Durée du projet</b>	36 mois

### **Objectifs**

Le projet MOCOPo vise à améliorer la modélisation de la congestion et des nuisances associées sur les autoroutes urbaines. Il permettra ainsi de mieux comprendre et évaluer l'efficacité des dispositifs de régulation du trafic.

Les autoroutes urbaines sont un lieu très utilisé des réseaux urbains, très souvent siège de congestions récurrentes. Ces congestions induisent à la fois des pertes de temps et des consommations inutiles d'énergies non renouvelable, des pollutions (GES, particules, NOx), des impacts sur la sécurité routière. Le site de la rocade intérieure sud de Grenoble est particulièrement fréquemment le lieu de congestions.

Pour lutter contre ces congestions, les opérateurs des réseaux d'autoroutes urbains recourent à des dispositifs de régulation comme la régulation d'accès ou de vitesse dont les mécanismes d'efficacité sont mal perçus pour l'instant. Nous testerons ici si la création de trous par les changements de voies (l'espace laissé vide temporairement devant un véhicule plus lent s'insérant sur une voie plus rapide) est une des origines de la perte de capacité observée aux accès. Nous pourrions ainsi mieux étayer les recommandations pour la mise en place d'une modification géométrique des accès ou d'une régulation. Ceci sera fait par l'utilisation d'un recueil innovant en France : un hélicoptère équipé d'une caméra haute définition, dont les images seront ensuite digitalisées pour connaître ainsi la position de tous les véhicules tous les dixièmes de seconde au moins.

Les nuisances en termes de pollution liées à la congestion sont pour l'instant prises en compte par les modèles d'émission au travers de vitesses moyennes horaires. Notre objectif est également d'aboutir à une conclusion sur la question de savoir si des fréquences d'agrégation plus faibles sur les données de trafic permettent de modéliser mieux les émissions et la pollution. Nous parviendrons à cette conclusion en surmontant une cause classique d'imprécision de ces modèles : la connaissance du parc circulant.

La sécurité routière dans les conduites en files denses sur autoroutes est également une de nos préoccupations. Nous contribuerons donc à bâtir un modèle permettant d'identifier les déviations par rapport à des conditions de sécurité, grâce aux données extrêmement fines recueillies pour mesurer la congestion. Nous transférerons cette méthode au cas plus classique de données boucles dans l'objectif de permettre une identification des situations accidentogènes.

### **Méthode**

La méthode consiste à lier le recueil de données, exceptionnelles par leur précision et leur diversité pour un même site, avec la modélisation, en particulier l'amélioration des modèles existants pour leurs lacunes les plus pénalisantes dans la compréhension de la congestion et des nuisances associées. Des allers-retours constants seront recherchés. Des phases de validation sont explicitement prévues.

Le recueil sera composé de trois tâches : une collecte intensive de données de trajectoires, une mesure de pollution en bord de route combinée avec une détermination très précise du parc circulant, et une collecte de données de trafic sur la route permettant grâce à des magnétomètres (version sans fil, plus maintenable et délivrant plus d'informations, de la classique boucle électromagnétique) de connaître les temps de parcours et la matrice origine destination sur une sous partie du réseau et les conditions de trafic (débits, vitesses) sur l'ensemble de la rocade Sud de Grenoble.

### Retombées attendues

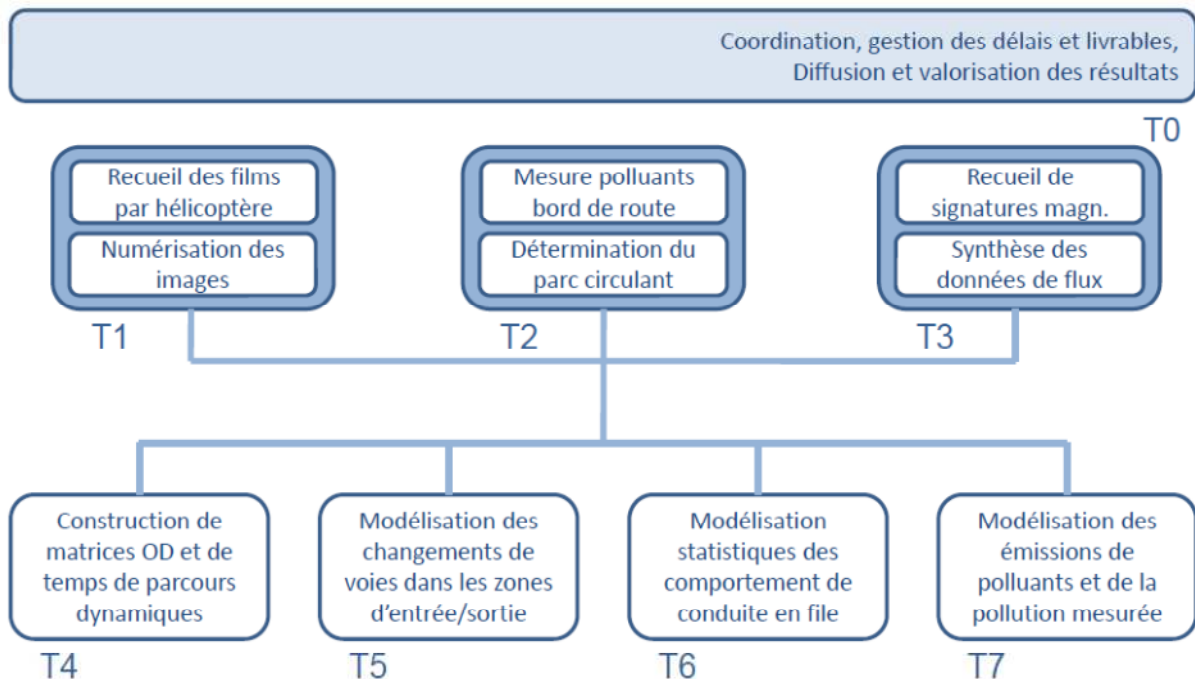
La valorisation qui sera donnée à ce projet consistera tout d'abord à diffuser les données collectées sur un site web, les mettant ainsi à la disposition de la communauté de la recherche. Des publications des résultats seront recherchées, tant en France que dans des revues et congrès internationaux.

Du point de vue opérationnel on peut attendre du projet qu'il contribue à expliquer l'efficacité de la régulation des autoroutes, permettant ainsi de plus fréquemment utiliser ces méthodes. Un rapport produit en fin de période permettra de dégager les recommandations pour la gestion du trafic déduites des recherches menées. On peut également attendre que les modèles d'émission des polluants soient mieux à même de tenir compte de la congestion qu'actuellement.

### Partenaires

PARTENAIRES	Tâches							
	Coord.	Mesures			Modélisation			
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
INRETS (LICIT et LTE)								
Ascoparg								
CEREA								
INRIA								
LCPC (LEPSIS et MI)								
LRPC								
CERTU								
DIR CE								

### Organisation



## Annexe technique

---

### Table des matières :

1	PRESENTATION GENERALE .....	6
2	ETAT DE L'ART ET CONTEXTE.....	6
3	METHODE DE TRAVAIL ET RESULTATS ATTENDUS.....	8
3.1	Introduction .....	8
3.2	Architecture générale .....	8
3.3	Lien avec un autre projet en cours sur la rocade intérieure : Grenoble Trafic Lab (GTL) .....	9
3.4	Tâche 0 : coordination, gestion des délais et des livrables, valorisation des résultats .....	10
3.5	Tâche 1 : collecte de données de trajectoires .....	11
3.6	Tâche 2 : collecte de données de pollution .....	12
3.7	Tâche 3 : construction d'un fichier de données individuelles et collectives de trafic .....	12
3.8	Tâche 4 : Construction de matrices origine destination et de temps de parcours dynamiques.....	13
3.9	Tâche 5 : Modélisation des changements de voies en particulier au voisinage des insertions et dans les zones d'échange .....	14
3.10	Tâche 6 : Modélisation statistique des comportements de conduite en file .....	15
3.11	Tâche 7 : modélisation des émissions et de la pollution .....	16
4	ESTIMATION DU BUDGET ET ORGANISATION TEMPORELLE DU TRAVAIL .....	19
5	DESCRIPTION DES PARTENAIRES .....	21



## 1 PRESENTATION GENERALE

Le projet MOCOPo est présenté par dix<sup>1</sup> partenaires<sup>2</sup> qui reflètent la diversité des questionnements autour de la circulation automobile sur autoroute urbaine. Ces partenaires proviennent en effet des communautés de recherches, d'études et mesures et de gestion de la route. Les thématiques qui sont les leurs sont celles de la congestion, de la pollution et de la sécurité routière.

Le projet MOCOPo fédère ces personnes d'origines et de disciplines diverses sur un objet particulier : la rocade Sud de Grenoble et sur un objectif commun : mieux comprendre la congestion et ses impacts sur la pollution et sur la sécurité routière.

La démarche qui sera suivie est une démarche combinant recueil de données, analyse de ces données et modélisation. On verra par la suite que les recueils proposés sont tous destinés à combler des manques actuels des différents modèles existants. La diffusion sur internet des données collectées sera systématique et permettra d'enrichir la communauté scientifique dans son ensemble.

Au-delà de ces données, les modélisations qui seront développées dans le cadre de MOCOPo permettront, en comblant certaines des lacunes actuelles des modèles, d'améliorer la connaissance d'une part, de mieux comprendre l'efficacité des dispositifs de régulation et de gestion du trafic d'autre part. L'utilisation de ces outils se développe, mais les mécanismes physiques sous-tendant leur efficacité avérée sont encore imparfaitement compris. Leur efficacité est entendue ici aussi bien en termes de diminution de la congestion et des nuisances environnementales qu'en termes d'amélioration de la sécurité routière. Nous produirons un rapport de recommandations sur la gestion du trafic sur autoroute urbaine, basé sur le fruit de nos recherches et de notre connaissance de l'état de l'art.

## 2 ETAT DE L'ART ET CONTEXTE

85 % de la congestion observée en France concerne les réseaux routiers urbains et périurbains (23). Elle est donc rencontrée lors de déplacements de courtes distances. Les infrastructures de type autoroutier que sont les voies rapides urbaines sont particulièrement touchées. Cependant, depuis les années 80-90 et la revitalisation de la politique en faveur des transports collectifs et des modes doux, la congestion automobile a été considérée par certains comme un mal inévitable, l'effort portant surtout sur l'amélioration du service des transports collectifs.

Pourtant, ce n'est pas uniquement par le recours à la construction de nouvelles infrastructures (politique qui fut suivie dans les années 70 et qui conduisit à l'étalement urbain et donc, à long terme, à l'augmentation de la demande automobile) que l'on peut lutter contre les effets les plus néfastes de la congestion. On pense par exemple à la variabilité des temps de parcours du trajet domicile-travail d'un jour à l'autre.

Sur autoroute urbaine en particulier, la régulation de l'écoulement du trafic (régulation d'accès par exemple) permet de réduire significativement la variabilité des temps de parcours. Les mécanismes physiques à l'origine de cette efficacité ne sont pour l'instant pas complètement compris.

---

<sup>1</sup> Ces partenaires sont les laboratoires : LICIT (INRETS/ ENTPE), LEPSIS (INRETS/ LCPC), LTE (INRETS), MI (LCPC), NeCS (INRIA/ CNRS/ INPG), LRPC d'Angers (MEEDEM), l'association Ascoparg (ASsociation pour le COntôle et la Préservection de l'Air en Région Grenobloise), le CERTU (service technique central du MEEDEM) et la Direction interdépartementale des routes Centre Est DIR-CE, gestionnaire du réseau de voies rapides de l'agglomération grenobloise.

<sup>2</sup> Le CETE de Lyon contribuera également au projet. En effet, le LICIT fera appel à l'équipe de recherche associée dont il assure la coordination scientifique dans le cadre du Pôle de compétence et d'innovation : « régulation durable des déplacements ». Par rapport à des versions antérieures du projet, nous avons pris le parti de ne pas le mentionner explicitement parmi les partenaires, dans la mesure où sa contribution est indirecte.

Au-delà de la définition simple de la congestion comme « état du trafic routier où la vitesse pratiquée est significativement inférieure à la vitesse désirée », on peut distinguer plusieurs phases dans l'évolution de la congestion :

- La **création de la congestion** : elle se fait lorsque la capacité de la tête de bouchon devient inférieure à la demande qui se présente.
- La **propagation de la congestion** : tant que la demande reste supérieure à l'offre, la file d'attente s'allonge et peut éventuellement toucher des véhicules qui ne passeront pas au droit de la tête de bouchon.
- La **disparition de la congestion** : celle-ci intervient par soit par l'arrière (lorsque la demande décroît) soit par l'aval lorsque la restriction de capacité disparaît (enlèvement du véhicule accidenté ou dans le cas d'un rampe d'accès, diminution de la demande sur cet accès).

Si la propagation et la disparition de la congestion sont des phénomènes bien prédits par les modèles, les mécanismes d'apparition de la congestion, ainsi que le comportement du trafic à l'intérieur de la congestion sont encore l'objet de recherches, en particulier pour comprendre :

- L'apparition de la congestion (passage d'un régime fluide à un régime congestionné) ;
- les phénomènes d'accordéon (le trafic stoppe puis repart, alternativement) ; l'effet des rampes d'entrées et de sorties sur ces phénomènes est en particulier en cours d'étude.

Parmi toutes les grandeurs mesurables du trafic, les trajectoires des véhicules constituent le meilleur révélateur de leurs comportements effectifs dans le contexte. On appelle mesure de trajectoire la connaissance, dix fois par seconde ou plus, de la position longitudinale et latérale de tous les véhicules présents sur une longueur de voie. On accède ainsi finement à l'ensemble des évolutions spatio temporelles (position, vitesse, changement de voie).

Les trajectoires sont particulièrement intéressantes si elles sont mesurées sur des longueurs de chaussées significatives et pendant des périodes et en des lieux représentatifs. Actuellement, les seules données de trajectoires disponibles (collectées par hélicoptère par TU Delft (NL) ou dans le cadre du programme NGSim (USA)) (24) correspondent à des situations très congestionnées. Ces données ont déjà été utilisées pour comprendre une partie des phénomènes se produisant dans les bouchons.

Les trajectoires des véhicules sont aussi des indicateurs pertinents du placement des véhicules et de l'action des conducteurs par rapport à l'infrastructure. Leur étude permet d'apporter notamment des éléments de réponse sur la dangerosité de la conduite en « pelotons » (collision en chaîne, création de congestion supplémentaire qui pourrait être évitée, ...).

En ce qui concerne la pollution émise par une circulation congestionnée, les modèles actuels de prévision sont basés sur la vitesse moyenne horaire. Or, nous savons que le trafic en congestion peut être de vitesse très variable, et ces quasi arrêts suivis de redémarrage sont potentiellement très polluants. Il est donc particulièrement souhaitable de pouvoir mettre en relation des données de trafic recueillies à une échelle suffisamment fine et détaillée avec des mesures de pollution recueillies en bord de route. Dans le cadre de MOCOPo, ces données seront de deux types : données de vitesses moyennes agrégées sur une minute mais mesurées en certains points et données de vitesse d'itinéraire mesurées par des véhicules équipés.

### 3 METHODE DE TRAVAIL ET RESULTATS ATTENDUS

#### 3.1 INTRODUCTION

Le projet MOCOpo se propose donc de choisir une infrastructure autoroutière particulièrement soumise à la congestion, pour :

- Observer de manière très fine les situations de trafic pouvant conduire à la création de la congestion sur différentes configurations du réseau (section courante, insertion, zone d'entrecroisement de flux) à l'aide d'un hélicoptère équipé d'une caméra haute résolution dont les images seront numérisées ;
- Mesurer la pollution reçue en bord de route et la mettre en lien avec les conditions de trafic ;
- Analyser la congestion et en particulier les effets d'oscillations (ondes d'arrêts / redémarrages) à l'intérieur de la congestion et pour cela disposer de matrice origine destination sur l'ensemble de la zone ;
- Modéliser les phénomènes de changement de voie et la manière dont ils sont impliqués dans l'apparition de la congestion ;
- Modéliser de manière stochastique les comportements pour pouvoir ensuite fournir des indicateurs de risque particulier sur certaines trajectoires ;
- Modéliser l'impact d'une vitesse du trafic faible et variable sur la pollution mesurée,
- Synthétiser les conclusions obtenues dans le cadre de ce projet et l'expertise des membres de l'équipe pour dégager des recommandations sur la mise en œuvre opérationnelle des dispositifs de régulation de l'écoulement et plus généralement de gestion du trafic sur autoroute en tenant compte de leurs effets prévisibles sur la congestion, la sécurité routière et la pollution.

#### 3.2 ARCHITECTURE GENERALE

L'architecture générale du projet de recherche MOCOpo comprend huit tâches, dont une de coordination. Trois tâches sont destinées à recueillir les données (il s'agit de la partie « mesure » dans le schéma ci dessous) et quatre tâches sont dévolues aux activités de modélisation, basées sur les données recueillies par les trois premières tâches.

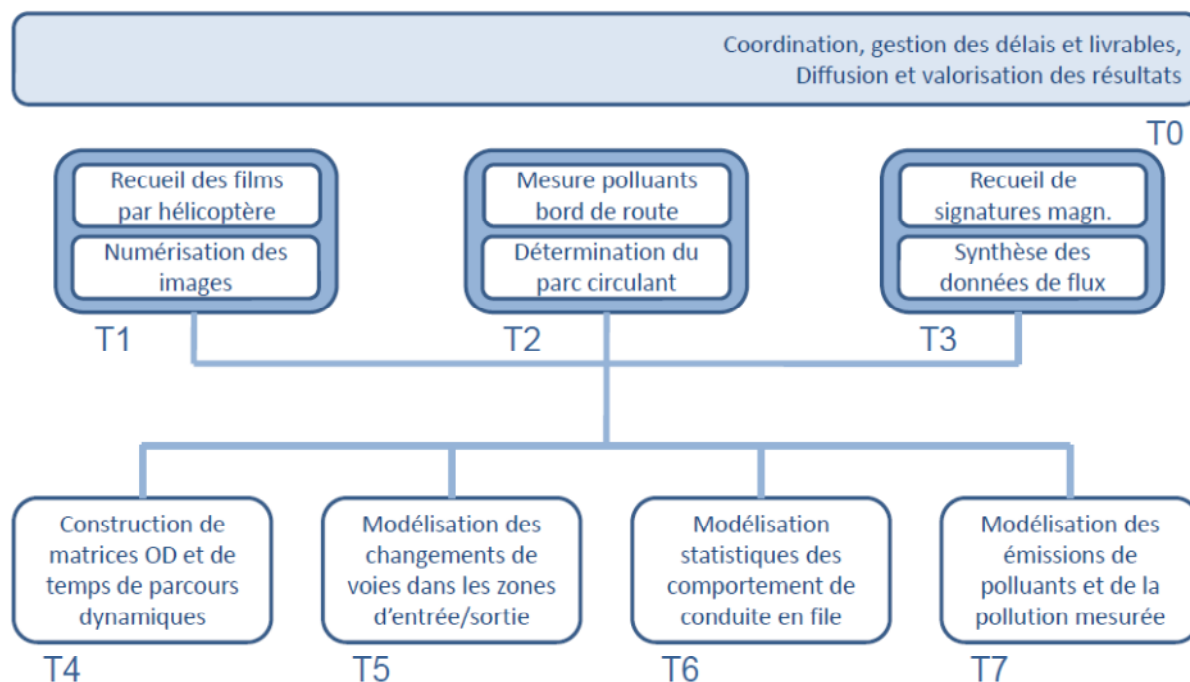


Figure 1 : Représentation de l'organisation fonctionnelle de MOCOpo : la tâche de coordination, des trois tâches de mesure et des quatre tâches de modélisation.



Les données recueillies par les tâches de mesure (T1, T2 et T3) seront utilisées en interne par les tâches de modélisation de MOCOpo. Cette circulation de l'information à l'intérieur de MOCOpo sera favorisée par le fait que les données recueillies, après traitement et mise en forme, seront placées sur le site web de coordination du projet. Ce site web nous permettra également de mettre l'ensemble des mesures recueillies à disposition de la communauté internationale. La figure suivante schématise la circulation de l'information à l'intérieur de MOCOpo. On a également identifié les principaux livrables.

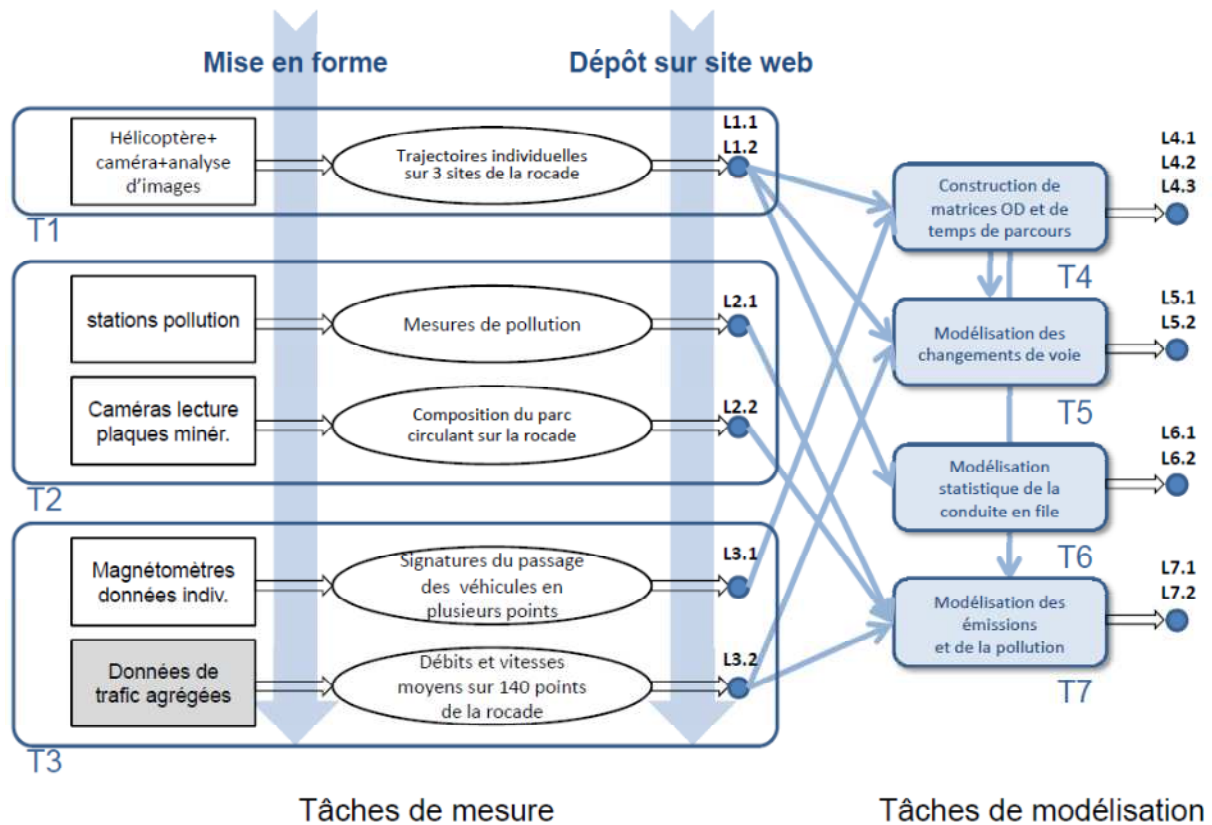


Figure 2 : Représentation de la circulation de l'information à l'intérieur de MOCOpo : les données issues des tâches de mesure sont placées sur le site web puis utilisées par les tâches de modélisation. La circulation de l'information entre tâche est matérialisée par les flèches épaisses. Le numéro du livrable correspondant est associé au point final de chaque tâche. Les données collectées extérieurement à MOCOpo sont figurées en grisé.

### 3.3 LIEN AVEC UN AUTRE PROJET EN COURS SUR LA ROCADÉ INTERIEURE : GRENOBLE TRAFIC LAB (GTL)

L'INRIA Rhône-Alpes, la Direction Interdépartementale des Routes Centre Est et le Conseil Général de l'Isère sont à l'initiative d'un projet d'équipement de la rocade Sud dont l'objectif est d'avoir accès en temps réel à un ensemble cohérent de données de comptage sur la voie courante et les entrées et sorties de la rocade Sud. Cette étape est un pré-requis à la constitution d'indicateurs pertinents pour l'exploitation à partir des données de comptage et à la mise au point d'outils d'aide à la décision. L'avancement du projet GTL le permettant, cette plateforme expérimentale actuellement en cours d'installation sur le terrain, fournira des données trafic pour la partie voie intérieure de la rocade Sud via un site web hébergé à l'INRIA Rhône-Alpes. Ces données seront utilisées dans le cadre de MOCOpo.

### 3.4 TACHE 0 : COORDINATION, GESTION DES DELAIS ET DES LIVRABLES, VALORISATION DES RESULTATS

#### *Coordination*

La relative difficulté de la tâche de coordination et de suivi consiste dans MOCOpo à fédérer des personnes provenant de plusieurs horizons. Plusieurs éléments faciliteront ce travail : tout d'abord le choix d'un site expérimental unique et complexe. Le fait que nombre de laboratoires de MOCOpo (issus du LCPC ou de l'INRETS) soient intégrés dans les différents projets en cours dans le cadre de la nouvelle stratégie de recherche permettant de mettre en œuvre le Grenelle de l'environnement (actions SERRE ou Véronèse) sera également un moyen de créer une communauté et de l'élargir progressivement à l'ensemble du RST.

Une réunion de définition précise du déroulement de l'expérimentation sera organisée sur une journée à Grenoble dès les débuts du projet. Ensuite, chaque année au moins une réunion permettra de fixer le plan et la démarche de rédaction des livrables d'avancement, qui feront l'objet d'une relecture croisée.

La circulation des données à l'intérieur de MOCOpo, illustrée par la figure précédente, permettra également de faire émerger un groupe. En effet, on constate sur cette figure que les livrables des tâches de mesure sont souvent utilisés par plus d'une tâche de modélisation.

Enfin, lorsque la majorité des rapports sur les modèles seront disponibles, une journée-séminaire de présentation des travaux, ouverte sur invitation aux extérieurs, permettra de préparer la synthèse des avancées réalisées sur la modélisation dans le cadre de MOCOpo. Tous les partenaires de MOCOpo participeront à la rédaction de ce rapport de synthèse. Une version diffusable à un plus large public, basée sur cette synthèse et complétée par l'expertise des membres de MOCOpo, sera rédigée. Ce document dégagera des recommandations sur la mise en œuvre opérationnelle des dispositifs de régulation du trafic sur autoroute. En effet, la recherche menée tout au long de MOCOpo sur l'impact de la situation de trafic (vitesse, différence de vitesse entre voies, nombre de changement de voies) sur la congestion, la pollution et la sécurité routière nous permettra de préconiser tel ou tel type de régulation pour différentes configurations de trafic et d'infrastructure.

#### *Gestion des délais et des livrables*

Des réunions régulières permettront de faire le point sur l'avancement des travaux de chacune des tâches. La tâche de coordination permettra également de s'assurer de la tenue des délais dans la mise en route et les progrès des différentes tâches et de rendre les livrables à temps.

#### *Valorisation, politique de publications*

Nous avons prévu deux volets de diffusion dans cette tâche 0 : la définition d'une politique de publications ; et le travail de diffusion à l'extérieur des données et des résultats présentés dans les rapports diffusés sur le site web de MOCOpo.

Pour ceci nous identifierons explicitement les revues et congrès adéquats. La liste en sera dressée dans le premier rapport d'avancement. Une relecture croisée par les différents partenaires pourra être mise en place si les auteurs le demandent. Nous avons explicitement identifié dans le budget de la tâche 0 un financement pour les déplacements en congrès.

Pour l'instant nous avons identifié les principaux congrès suivants :

- Transportation Research Board – TRB (Congrès annuel à Washington, US) ;
- Transportation Research Arena – TRA (Congrès annuel en Europe) ;
- Congrès de traitement du signal – GRETSI (Congrès francophone annuel)
- European Signal Processing Conference – EUPISCO (Congrès européen annuel)

En ce qui concerne les revues, nous viserons :

- Probabilistic engineering mechanics
- Transportation research - part B
- Transportation research - part C
- Transportation research - part D
- Atmospheric Environment.

Le travail de diffusion sur le site web sera fait par le recours à la sous-traitance pour bâtir l'architecture du site. Le site sera ensuite hébergé puis maintenu dans la durée par les équipes de l'INRETS. Le site web sera alimenté par les données issues des tâches de mesure (T1, T2 et T3) ainsi que par les rapports des tâches de modélisation et par le rapport de synthèse. Son financement est associé à la tâche 0 car il est utile à l'ensemble des tâches.

#### *Livrables de la tâche 0*

Des livrables sont prévus en fin de chacune des trois années, correspondant à la présentation des activités et du budget. Le rapport de synthèse sera disponible à l'issue des 36 mois du projet.

### **3.5 TACHE 1 : COLLECTE DE DONNEES DE TRAJECTOIRES**

La collecte de données de trajectoires sera réalisée par la combinaison du recueil d'images vidéos par un hélicoptère et du traitement de ces images vidéo par un logiciel automatique qui permet de connaître la position de tous les véhicules de la voie chaque dixième de seconde (tâche 1.2).

Ce recueil sera réalisée sur trois sites différents, tous situés sur la rocade sud en sens intérieur et permettant de contraster différentes situations de circulation routière de complexité croissante.

- **SITE 1** : le premier site sera un site de section courante sans entrée ni sorties. Il permettra de connaître la manière dont les pelotons se forment et sont ensuite modifiés (dans leurs distances inter-véhiculaires et leurs écarts de vitesses) par leur évolution le long de la voie.
- **SITE 2** : le deuxième site sera un site de convergent, où une rampe d'accès à relativement fort débit génère des perturbations du trafic de la section courante par l'insertion de nombreux véhicules dont la vitesse est éventuellement plus faible.
- **SITE 3** : le dernier site sera celui du Rondeau en sens intérieur. Cette section est alimentée à l'amont par la rocade (deux voies de circulation à gauche) et une rampe d'accès. A l'aval elle débouche sur à gauche une rampe de sortie conduisant à la commune de Seyssinet-Pariset, au centre la connexion avec l'A480 sud, enfin à gauche l'A480 Nord (continuité de l'itinéraire de contournement de Grenoble). Cette configuration induit de nombreux changements de voies obligatoires. C'est la tête du bouchon qui bloque la rocade sud en sens intérieur de manière récurrente. Ceci est donc un site privilégié pour l'observation des changements de voies et leurs conséquences sur la création de la congestion.

La collecte des données de vidéo sera réalisée à l'aide d'un hélicoptère fourni par une société professionnelle offrant des services de vols à la demande. Les données de la caméra seront enregistrées à bord dans leur format natif (pas de perte d'information). La position de l'hélicoptère sera connue par ses coordonnées GPS permettant ainsi de le repositionner avec exactitude entre deux essais.

Nous utiliserons une caméra numérique haute définition dont le nombre de pixels sera de 2500 dans la longueur. Ainsi, on pourra observer une longueur de chaussée de 500 mètres avec une précision de 20 cm par pixel. La caméra retenue produira 15 images par secondes, permettant une précision inégalée sur les trajectoires.

Sur chacun des sites, l'observation aura lieu à la même heure cinq jours successifs. L'enregistrement durera 1 heure sur chacun des sites, les heures étant échelonnées au cours de la journée et choisies après une observation du fonctionnement de la rocade (détermination des heures d'apparition des congestions).

Le traitement d'image vidéo sera réalisé à l'aide d'un logiciel développé par Cambridge Systematics (CS) pour le compte du ministère des transports des Etats Unis (FHWA). L'utilisation de ce logiciel sera facilitée par la collaboration étroite avec l'université Technologique de Delft (Pays Bas), dont un des anciens doctorants effectuera une période postdoctorale de 14 mois au laboratoire LICIT pendant la durée du projet. TU Delft a en effet également développé un algorithme de traitement d'image vidéo et nous bénéficions déjà de l'expertise de cette université dans le choix de la caméra et la définition de la procédure de recueil.

### *Livrables*

Les livrables de la tâche 1 seront d'une part une description du recueil vidéo réalisé (position de l'hélicoptère, position des points observés, dates et heures de recueil, conditions climatiques), d'autre part l'ensemble des trajectoires individuelles des véhicules numérisées (positions de tous les véhicules circulant pendant une heure sur une longueur de 400 à 600 m de la rocade). La numérisation aura lieu pour au moins huit périodes de recueil choisies parmi les quinze heures filmées.

## **3.6 TACHE 2 : COLLECTE DE DONNEES DE POLLUTION**

### *Mesures de pollution*

Deux laboratoires mobiles seront utilisés afin de permettre une mesure simultanée des concentrations de polluants dans l'air et l'enregistrement de paramètres météorologiques (vitesse, direction du vent, température, humidité relative) durant l'année 2010 à raison de 4 campagnes de deux semaines. Les polluants atmosphériques mesurés à l'aide d'analyseurs automatiques (données quart-horaires) seront les suivants : NO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, CO. La station fixe du Rondeau servira de référence aux mesures ponctuelles mobiles. Lors de chacune des campagnes, durant 2 jours, les analyseurs de polluants seront configurés spécifiquement pour fournir des données instantanées dans un but de comparaison aux mesures de trafic.

### *Connaissance détaillée du parc en circulation*

Le calcul d'émissions nécessite une connaissance précise du parc, en grandes catégories (VP, VUL, PL, etc.) mais aussi selon une déclinaison technologique et par taille, et selon les réglementations d'émissions de pollution. Ce dernier point est sans doute le plus sensible et le plus difficile à apprécier correctement.

Le recours à des caméras de lecture de plaque minéralogiques nous permettra d'identifier de l'ordre de 80 % des véhicules. Un croisement avec le fichier des immatriculations nous permettra ensuite de déterminer avec une précision satisfaisante la composition du parc : distributions technologiques des véhicules circulant et selon les réglementations sur les émissions. On comparera ces distributions observées localement aux estimations « nationales » utilisées couramment, et aux estimations par enquête réalisées antérieurement sur Grenoble. On analysera la sensibilité du calcul d'émission à ces hypothèses.

### *Connaissance des vitesses d'itinéraire*

Des véhicules instrumentés seront mis en place pour compléter l'information sur les vitesses moyennes une minute relevée en quelques points (tâche 3.2) par des vitesses sur des itinéraires. Ceci nous permettra, pendant les périodes de recueil de pollution, de disposer d'informations complémentaires sur les conditions de trafic sur une plus grande distance, les véhicules instrumentés se comportant comme la moyenne du flot.

### *Livrables*

L'ensemble des données recueillies sera placé sur le site web du projet, après mise en forme.

## **3.7 TACHE 3 : CONSTRUCTION D'UN FICHIER DE DONNEES INDIVIDUELLES ET COLLECTIVES DE TRAFIC**

### *Signatures magnétiques des véhicules*

La tâche 3 a pour objectif de recueillir des données individuelles et des données de comptage sur la rocade Sud de Grenoble sur les mêmes périodes que les autres tâches de recueil du projet. Les données individuelles seront recueillies à l'aide d'un réseau de magnétomètres sans fils fourni par la société Sensys Networks et permettant d'obtenir les caractéristiques magnétiques de chaque véhicule. Ces capteurs sont de type ponctuel, faiblement intrusifs et présentent l'avantage d'être peu chers et faciles à installer (de l'ordre de 20 minutes).

Les capteurs à magnétomètre seront acquis dans le cadre du projet par le LRPCA et installés par la DIR-CE sur les voies d'entrée et de sortie du Rondeau ainsi que sur les entrées au niveau de Saint Martin d'Hères. L'équipement consistera pour chaque point de mesure en quatre magnétomètres

placés en « T » dans le sens de progression des véhicules. Ceci nous permet d'avoir la date de passage, la longueur et la vitesse des véhicules, ainsi qu'une information très complète sur la répartition des masses métalliques du véhicule, à la fois longitudinalement et latéralement. Les données brutes collectées par ces capteurs transiteront sur le réseau privé de la DIR-CE et seront hébergées sur un serveur à l'INRIA Rhône-Alpes.

#### *Données moyennes de trafic*

Les données de comptage issues des boucles SIREDO actuellement installées seront fournies par la DIR-CE et seront aussi mises à disposition sur le site web. L'INRIA Rhône-Alpes conduit actuellement un projet d'équipement complémentaire dans le cadre du consortium GTL avec les exploitants grenoblois. Si l'état d'avancement du GTL le permet, les données du GTL correspondant aux périodes de recueil seront aussi exploitées.

#### *Livrables*

Les livrables de la tâche 3 seront placés sur le site web du projet MOCOpo. Ceci consistera d'une part (livrable 3.1) en des données individuelles collectées dans le cadre de la tâche 3.1 :

- Date de passage, numéro de voie, longueur et vitesse de chaque véhicule,
- Signature électromagnétique ou caractéristique détaillée du signal recueilli de chaque véhicule.

Par ailleurs, les données moyennes (sur une minute), donnant les débits et vitesses moyennes sur une minute (recueillies soit par les boucles SIREDO de la DIR-CE soit dans le cadre de GTL) seront également placées sur le site web du projet MOCOpo (livrable 3.2).

### **3.8 TACHE 4 : CONSTRUCTION DE MATRICES ORIGINE DESTINATION ET DE TEMPS DE PARCOURS DYNAMIQUES**

L'objectif de la tâche 4 est d'estimer les temps de parcours moyen (TPM) et les matrices origine-destination dynamique (MODD) sur la chaussée intérieure de la Rode Sud de Grenoble.

En condition fluide, le parcours de la Rode Sud depuis l'A41 à l'A480 prend environ 8 minutes pour 10 km de trajet. Ce temps de parcours peut s'allonger à 30 minutes en cas de congestions, celles-ci étant récurrentes sur cet itinéraire. Sur la base de ces observations, les TPM et la MODD seront estimés sur des horizons allant de 10 à 40 minutes en fonction des entrées/sorties considérées et des conditions de circulation. Le choix d'une période d'observation variable permet d'avoir des fenêtres temporelles cohérentes avec le type de données à estimer.

Le signal complexe issu des magnétomètres est plus riche que celui des boucles électromagnétiques classiques. Il est cependant différent d'un groupe de quatre capteurs à un autre suivant les variations de vitesse et de positionnement latéral des véhicules. La première étape consistera à corriger cette déformation du signal s'il est accessible en sortie des capteurs Sensys (LRPC-A).

Pour établir une matrice OD ou un temps de parcours, il faut identifier deux fois un même véhicule sur deux groupes de capteurs successifs. A partir de la date de passage d'un véhicule sur un premier capteur, il faut identifier une fenêtre temporelle pendant laquelle ce véhicule a pu passer sur le capteur suivant. Plus la fenêtre est choisie pertinemment, plus la construction de ces paires de passages est rapide. L'algorithme utilisé pour cette étape utilisera un modèle de trafic alimenté par les données de comptages accessibles sur l'infrastructure. Il sera construit par l'INRIA.

Une fois la fenêtre temporelle déterminée, il faut utiliser des méthodes de comparaison de signal pour réaliser l'appariement proprement dit. Celles développées avec succès pour le signal des boucles (voir les références (17), (18) et (19)) seront adaptées pour le signal plus complexe issu des groupes de quatre magnétomètres. La sensibilité du signal aux variations de température constituera une nouvelle difficulté. Les méthodes proposées seront évaluées sur une base de données de référence constituée dans la tâche 3. (LRPC-A)

Les temps de parcours individuels obtenus à l'issue de cet appariement des paires de véhicules seront filtrés et agrégés pour fournir une estimation des temps de parcours moyens pendant des périodes suffisamment courtes pour refléter les évolutions du trafic, mais suffisamment longues pour

l'échantillon soit représentatif. On examinera si la différenciation des temps de parcours par voie est pertinente. (INRIA))

La matrice OD au niveau du Rondeau (échangeur avec 2 entrées et 3 sorties) sera également calculée. Cette matrice sera également dynamique, calculée pour des périodes à définir soigneusement. (LRPC-A)

A titre de validation, les TPM et la MODD obtenus par le biais des magnétomètres seront comparés à d'autres mesures effectuées sur le terrain. Pour la partie Rondeau, les TPM et la MODD seront extraits sur un horizon de 45 minutes par le LICIT des données vidéo recueillies à l'aide de l'hélicoptère. Pour une comparaison sur une section plus longue en ce qui concerne les TPM, des caméras à lecture de plaque seront utilisées. Ce travail sera effectué par le CETE de Lyon, extérieur aux deux méthodes de détermination utilisées.

### **3.9 TACHE 5 : MODELISATION DES CHANGEMENTS DE VOIES EN PARTICULIER AU VOISINAGE DES INSERTIONS ET DANS LES ZONES D'ECHANGE**

Sur une section de type autoroutier, les usagers réalisent des changements de voies pour deux grandes familles de raisons :

- Changements de voie obligatoires : ce sont ceux destinés à permettre à l'utilisateur de se placer sur la voie qui correspond à l'itinéraire qu'il souhaite réaliser.
- Changements de voie de convenance : destinés à assurer un meilleur confort de conduite, ils peuvent intervenir pour dépasser un véhicule plus lent, pour se rabattre, pour laisser à un véhicule en provenance de la rampe la possibilité de s'insérer sans danger (courtoisie) ...

Même si on peut distinguer ces deux grandes familles de motivations du changement de voie, la propension d'un usager à changer de voie, la manière dont il tient compte (ou non) des autres usagers, le moment et le déroulement du changement de voie sont très variables d'un conducteur à l'autre. Les problèmes de sécurité routière liés aux comportements extrêmes seront traités dans le cadre de la tâche 5.

Notre travail sur la modélisation des changements de voies aura deux composantes : d'une part une validation expérimentale de l'impact des insertions sur le trafic global, d'autre part une modélisation du déroulement du changement de voies.

Dans une perspective de compréhension des mécanismes d'apparition de la congestion, les changements de voies sont des événements clés et on doit développer une mesure de leur impact sur le trafic. En effet, chaque fois que l'utilisateur qui change de voie a une vitesse initiale inférieure à celle de la voie sur laquelle il s'insère, son accélération progressive va créer un « trou » dans le flux, qui conduira à un débit maximal inférieur à la capacité. Un modèle théorique nous a permis de montrer que si le nombre de véhicules qui changent de voies, leur vitesse initiale et le flux sur la voie principale prennent certaines valeurs, les changements de voies peuvent être la cause de congestion durable sur la voie principale.

Opérationnellement ce phénomène est anticipé par les méthodes de régulation d'accès, qui visent à augmenter la vitesse des véhicules qui s'insèrent dans le flux principal. Disposer de données de très bonne qualité et en situation fluide mais dense comme celles qui seront recueillies dans le cadre de MOCOPO nous permettra de valider expérimentalement notre modèle théorique sur l'impact du changement de voie. (Des travaux ont déjà été publiés par le laboratoire dans le cas très congestionné grâce aux données NGSIM).

En effet, la compréhension actuelle est que les trous créés en aval des véhicules qui changent de voies est à l'origine de l'apparition de la congestion dans grand nombre de cas. Ceci serait dû à la différence de vitesse entre celle du changeur et la vitesse moyenne pratiquée sur cette voie. La progressive accélération du changeur conduirait alors à une perte temporaire de capacité, qui n'est jamais compensée si les changements de voies sont nombreux.

Les changements de voie ont été étudiés dans les situations très congestionnées (26), il faut maintenant les regarder en situation de pré congestion, pour comprendre en quoi ils influent sur l'apparition de celle-ci. Les trois sites permettront de contraster la démarche d'analyse et de dégager



les éventuelles similitudes entre les changements de voies contraints et non contraints. Un livrable sera fourni sur cette analyse, qui précèdera le développement du modèle.

Le déroulement du changement de voie est décomposable en plusieurs phases :

- L'analyse par le conducteur de la faisabilité du ChV, ce processus peut déboucher sur la décision de ne rien faire et il est accessible uniquement par des entretiens avec des conducteurs ;
- La décision de changer de voie qui se matérialise par un changement de position latérale ;
- L'évolution latérale qui conduit l'usager de sa voie de départ à sa voie d'arrivée ;
- La relaxation qui permet à l'usager d'avoir progressivement sur sa voie de destination une distance avec son prédécesseur qui soit compatible avec la vitesse pratiquée sur cette voie.

Le LICIT a développé puis validé un modèle de relaxation (26)), (27) (28). Un modèle est également disponible pour la décision de changement de voies, mais il a surtout été développé sur le cas de la conduite sur plusieurs files de vitesses différentes, sans insertion. Il faut maintenant proposer un modèle capable de reproduire d'autres changements de voies (en particulier les changements de voies de courtoisie). Ceci fera l'objet du livrable n°5.1.

On utilisera ensuite les données moyennes synthétisées par la tâche 3 (débits et vitesses), ainsi que la matrice origine destination et les temps de parcours dynamiques calculés dans le cadre de la tâche 4 pour valider le modèle développé (Livrable n°5.2). Ce travail sera fait en cohérence avec la mesure de l'impact sur les changements de voies déjà définie par le laboratoire.

### **3.10 TACHE 6 : MODELISATION STATISTIQUE DES COMPORTEMENTS DE CONDUITE EN FILE**

Nous proposons de nous intéresser à la détection de pelotons de véhicules sur itinéraires à forte circulation présentant des risques d'accidents ou de sur-accidents accrus par rapport au trafic courant. Les zones d'intérêt sont les 2x2 voies à forte circulation (plus de 2000 véhicules par heure) sur lesquelles se produisent généralement des écoulements en « accordéon » avec des variations brutales de vitesse, des trajectoires en « slalom », ... le tout augmentant les risques d'accident. Notons également que la présence d'un ou plusieurs échangeurs à l'intérieur de la zone d'intérêt est un élément susceptible d'accroître la dangerosité des pelotons. Comme on peut le constater un grand nombre de voies rapides urbaines présentent ce type de caractéristiques. Elles se situent donc au cœur du champ d'application de cette étude.

Le but de cette étude est triple. Il s'agit en premier lieu d'étudier les propriétés des pelotons de véhicules dans un cadre mathématique approprié. Puis on proposera plusieurs scénarios de défaillance pour les véhicules appartenant au peloton (ou bien circulant au voisinage de celui-ci), on évaluera leur probabilité d'apparition et on calculera un indice de risque associé. Enfin, en dernier lieu, on proposera des outils pour détecter les pelotons accidentogènes dans le trafic. Ceux-ci seront basés sur des outils simples de mesure existants (i.e. des moyens métrologiques classiques nettement moins sophistiqués que ceux utilisés pour alimenter cette étude).

Le point délicat de ce travail est celui de la modélisation mathématique de l'objet « peloton ». Pour mener à bien cette tâche nous proposons d'étudier les propriétés des processus stochastiques caractérisant divers types de pelotons. Pour cela nous avons besoin d'observer une excellente discrétisation des trajectoires des processus en question. Il est donc nécessaire :

- de disposer de plusieurs dizaines voire centaines de points par trajectoires pour rendre toute analyse statistique crédible ;
- de pouvoir suivre individuellement les trajectoires des éléments constitutifs du peloton.

Ajoutons que pour réaliser cette tâche nous pourrons nous appuyer d'un point de vue méthodologique sur des travaux de modélisation stochastique de trajectoires individuelles de véhicules à partir de données métrologiques précises. Ce travail a été réalisé au Lepsis.

### 3.11 TACHE 7 : MODELISATION DES EMISSIONS ET DE LA POLLUTION

Pour déterminer la pollution reçue en un point donné situé en bord de route, il faut d'une part connaître les émissions issues de la circulation, d'autre part la manière dont ces polluants se diffusent dans l'air et évoluent jusqu'au point de mesure. Cette tâche comportera donc deux volets : un volet **émission**, qui pourra ici, grâce aux données précises collectées en tâche 2 et 3 être fait avec une échelle temporelle très fine et sur la base d'une connaissance détaillée du parc, et un volet **dispersion et transformation photochimique** qui permettra de comparer trois approches différentes.

#### 3.11.1 Volet 7.1 : Calcul des émissions de polluants du trafic, à échelle spatio-temporelle fine et en connaissant précisément le parc circulant

Dans ce volet, le calcul des émissions sera réalisé suivant deux démarches complémentaires : d'une part Ascoparg utilisera un modèle éprouvé, dont les règles d'utilisation sont maintenant bien connues. D'autre part, en utilisant la connaissance très précise du parc, en introduisant deux aspects souvent négligés à savoir la remise en suspension et la pollution non-échappement, le LTE réalisera une modélisation des émissions plus fine.

##### *Sous volet 7.1.1*

ASCOPARG dispose d'un outil de calcul annuel des émissions routières appelé MOCAT (MOdèle de CALcul du Trafic). Il permet, pour un axe routier donné, de calculer les émissions associées pour différents polluants, sur la base d'informations assez peu détaillées sur les trafics

Les facteurs d'émissions utilisés proviennent de la méthodologie COPERT IV (COmputer Program to Estimate pollution from Road Transport). Il s'agit d'un programme européen dans lequel différents organismes de recherche ont contribué à l'élaboration de facteurs d'émissions par sous-catégorie de véhicules.

Dans le cadre de MOCOPO, nous disposerons de données plus fines qu'habituellement sur le trafic (vitesses moyennes sur une minute). Nous pourrions ainsi tester des adaptations de MOCAT à l'échelle temporelle fine et au périmètre de l'étude, pour calculer les émissions à un pas de temps horaire ou quart-horaire compatible avec les outils de modélisation de la qualité de l'air. Les polluants visés sont les NOx, CO, COV, PM10.

Les données de vitesse moyenne, débit et pourcentage de poids lourds seront connues ici à l'échelle de la minute. Ces données seront ensuite agrégées au pas de temps sur lequel se fera la modélisation (heure ou quart d'heure sur quelques journées ciblées). Le projet permettra en effet d'évaluer finement ces données et d'en analyser l'impact sur les calculs d'émission. On examinera en particulier l'incidence de la variabilité temporelle de ces données et la sensibilité des calculs à des hypothèses simplificatrices (situations habituelles des études d'impact, analyse de projets, etc.).

Par ailleurs, la modélisation implique de nombreuses données (composition des parcs, conditions d'usage et de circulation), prises souvent par défaut (données nationales ou régionales). Ici, grâce au travail de relevé de plaques minéralogiques de la tâche 2, nous disposerons d'informations complètes sur 80 % au moins du parc circulant. Par ailleurs la prise en compte des émissions liées à la voie ferrée jouxtant la voie rapide est envisagée. Ceci nécessitera de recueillir les horaires et caractéristiques des matériels.

##### *Sous volet 7.1.2*

La modélisation des émissions sera ici basée sur des outils de type Artemis, à la constitution desquelles le LTE a largement participé. Pour ces outils également, il est important d'avoir une bonne connaissance des vitesses pratiquées, de la composition du parc et du pourcentage de véhicules « froids » ou « chauds ». L'estimation des remises en suspension et des pollutions non échappement est une autre spécificité de ce volet.

On analysera tout d'abord *la variabilité spatio-temporelle* (ou l'hétérogénéité) des trafics observés par la vidéo par rapport aux données des points fixes de comptage. On considérera également l'incidence de l'agrégation des données de comptages selon l'échelle souhaitée pour la modélisation des émissions. En particulier, l'agrégation peut se faire en une valeur sur la période de base (qui



permettra d'analyser avec des outils de type vitesse moyenne), ou en une distribution en 4 classes de trafic / conditions de circulation, qui permettra d'appliquer les outils de type Artemis par situations de trafic.

### *Vitesses de circulation*

Les vitesses seront estimées à partir des quatre types de données disponibles :

- Les vitesses individuelles calculées d'après les trajectoires numérisées issues de l'hélicoptère (tâche 1) ;
- Les vitesses individuelles sur des itinéraires relativement longs (plusieurs centaines de mètres) des véhicules instrumentés utilisés dans la tâche 2 ;
- Les vitesses calculées comme l'inverse des temps de parcours individuels issus du travail (tâche 3.1) d'appariement des signaux des magnétomètres qui seront disponibles sur une sous partie du réseau ;
- Les vitesses moyennes sur une minute mesurées en certains points de l'infrastructure (données issues de la tâche 3.2).

Une attention particulière devra être apportée aux hypothèses et modèles sur les courbes débits - vitesses pour les voies considérées (validité entre les voies et les sens de circulation).

### *Connaissance détaillée du parc en circulation*

Le calcul d'émissions nécessite une connaissance précise du parc, en grandes catégories (VP, VUL, PL, etc.) mais aussi selon une déclinaison technologique et par taille, et selon les réglementations d'émissions de pollution. Ce dernier point est sans doute le plus sensible et le plus difficile à apprécier correctement. La connaissance, grâce aux quatre caméras automatiques de lecture de plaque utilisées dans la tâche 2, de la composition du parc sera à cet égard un atout du projet. On comparera ces distributions observées localement aux estimations « nationales » utilisées couramment, et aux estimations par enquête réalisées antérieurement sur Grenoble.

### *Hypothèses liées au calcul des émissions de démarrage à froid et évaporation*

Il s'agit principalement de construire des statistiques concernant les longueurs de trajet, à partir des hypothèses de l'enquête ménage sur Grenoble et par l'analyse des plaques d'immatriculation (commune « de résidence » du véhicule). On comparera ces hypothèses à celles couramment retenues à l'échelle nationale et on réalisera une analyse de sensibilité à la qualité de ces informations.

### *Émissions particulières non échappement et par re-suspension*

Les émissions de particules par le trafic routier comportent les émissions à l'échappement et les émissions non-échappement. Tandis que les premières ont été considérablement réduites en masse, la contribution des dernières aux émissions totales des transports routiers est actuellement mal quantifiée. Les émissions non-échappement incluent les émissions liées à des phénomènes d'abrasion ou d'usure (freins, pneus, chaussée) et celles engendrées par la mise en suspension de particules par le passage des véhicules.

Des premiers travaux ont montré que les émissions de particules non-échappement (principalement la re suspension) pouvaient représenter une part importante des émissions totales de particules par les transports routiers, particulièrement les plus grosses (de taille supérieure à 2,5  $\mu\text{m}$ ) ou inversement les plus petites (de taille inférieure à 100 nm, appelées nanoparticules). A titre d'exemple, des travaux californiens (30) ont montré que, sous leurs conditions climatiques, les émissions de  $\text{PM}_{10}$  générées par la re suspension sont 10 fois supérieures à celles à l'échappement. En Europe tempérée (10)(32), les contributions des émissions non-échappement aux émissions totales de particules pourraient être de 35 à 50%. Il semble que l'impact de la re suspension soit local et fortement dépendant des conditions climatiques (sécheresse) et d'état des routes (salage, présence ou non d'un revêtement, nettoyage).

On propose d'utiliser les données générées par le projet Movable (mesures de  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$ , de  $\text{NO}_x$  et COV, voire de  $\text{CO}_2$ , données de trafic et données météorologiques) à la détermination des facteurs d'émission pour les émissions particulières non-échappement et pour la re suspension de poussières

par le trafic. Ces facteurs pourront être déterminés en fonction des conditions de trafic et des conditions extérieures (météorologie, salage des routes, ...). Il conviendra également de tenir compte du trafic ferroviaire sur la ligne jouxtant la voie rapide.

Pour cela, les méthodologies précédemment utilisées (10)(33) pourront être développées pour s'appliquer aux sites étudiés et aux données disponibles. Selon les données disponibles sur le trafic et la présence (ou l'absence) de colinéarité entre les jeux de données, les facteurs d'émission pourront être déterminés à la fois pour les véhicules légers et pour les véhicules lourds.

### 3.11.2 Volet 7.2 : Dispersion et transformation photochimique

#### *Sous volet 7.1.2 : Modélisation Sirane : cartographie de la pollution*

L'ASCOPARG propose de réaliser une représentation cartographique des évolutions des NO<sub>x</sub> sur la zone d'étude instrumentée. Pour cela, le modèle urbain de dispersion des polluants SIRANE, développé au laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon et utilisé depuis 2004 par l'ASCOPARG pour réaliser le diagnostic annuel sur l'agglomération grenobloise, sera utilisé.

Le domaine modélisé sera centré sur la zone des mesures de la rocade Sud, entre Le Rondeau et St Martin d'Hères. Les évolutions des concentrations simulées aux emplacements des moyens mobiles seront particulièrement étudiées pour valider le modèle (ces dernières ne seront utilisées que pour la comparaison, et non en entrée du modèle). Les émissions (liées au trafic) seront celles issues du résultat du travail sur les émissions. Pour les champs météorologiques (température, vent, humidité, pression), une comparaison sera établie entre les mesures réalisées par les moyens mobiles engagés et les capteurs fixes du réseau. Cela permettra d'utiliser les mesures les plus fines.

Dans un premier temps, une simulation à échéance horaire sera réalisée pour chaque jour de la campagne de mesure (soit 4x17 jours). Les concentrations simulées seront comparées aux mesures. Une représentation cartographie de la qualité de l'air sera alors réalisée.

Dans un second temps, un focus sera réalisé sur les 4x2 journées au cours desquelles des mesures de la qualité de l'air à haute fréquence seront recueillies. Les émissions seront elles aussi calculées à haute fréquence. Du fait des limitations du modèle (dues à sa conception même : c'est un modèle stationnaire, chaque source est à l'origine d'un panache supposé établi...) les simulations, qui jusqu'à présent n'ont jamais été réalisées à un pas de temps inférieur à l'heure, seront testées pour ces journées à la fréquence de 30 minutes (et sous réserve 15 minutes), ce qui permettra d'obtenir une visualisation de l'évolution temporelle de la distribution du NO<sub>2</sub>.

#### *Sous volet 7.1.2 : Trois modélisations différentes de la photo-chimie et de la dispersion*

Le Cerea propose d'appliquer plusieurs types de modèles pour simuler la pollution atmosphérique liée au trafic routier :

- un modèle stationnaire de dispersion gaussienne avec une représentation simple de la chimie photostationnaire du NO<sub>2</sub> ;
- un modèle de chimie-transport (CTM) à mailles avec une représentation détaillée de la photochimie et
- un modèle hybride de chimie-transport avec bouffées en sous-maille avec une représentation détaillée de la photochimie.

Pour le modèle de dispersion gaussienne, il faudra obtenir la concentration de fond d'O<sub>3</sub> (par exemple du réseau de surveillance d'Ascoparg) pour le calcul des concentrations de NO<sub>2</sub>. Le CTM sous-estimera très probablement les concentrations de polluants de proximité en raison de sa résolution spatiale trop grossière. Le modèle hybride (en cours de développement) combinera les avantages des deux modèles précédents (résolution spatiale fine près de la route et photochimie détaillée).

Les données expérimentales qui seront collectées dans le programme MOCOPo (issues de la tâche 2) seront utilisées pour évaluer ces modèles et, dans une certaine mesure, l'inventaire d'émissions qui dépendra du parc automobile et des facteurs d'émissions. Les résultats des simulations effectuées

avec Sirane et ces trois modèles seront comparés aux mesures (CO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) pour les différents sites et périodes de mesures. Les avantages et inconvénients des différentes approches de modélisation de la qualité de l'air pourront ainsi être documentés. Par ailleurs, il sera intéressant d'évaluer si l'inventaire des émissions reproduit correctement les rapports entre espèces chimiques émises par le trafic routier. Dans ce but, les concentrations de différents polluants quasi-inertes chimiquement (CO, NO<sub>x</sub> et PM) en excès des concentrations de fond seront calculées pour les simulations et les mesures. Ces concentrations en excès représenteront donc l'influence du trafic. L'effet des incertitudes liées à dilution atmosphérique sera alors éliminé en comparant les rapports de ces concentrations en excès simulées et mesurées.

#### 4 ORGANISATION DU TRAVAIL

Le budget du projet est composé pour un tiers environ de coût subventionnables et pour les deux autres tiers, de coûts non subventionnables. Les dépenses correspondront à :

- Des coûts (subventionnables) d'achat ou de location et d'installation de matériel de recueil qui sont concentrés sur les tâches de mesure (T1, T2 et T3) ;
- Des coûts de personnel qui se décomposent de la façon suivante :
  - Du personnel non titulaire pour satisfaire aux besoins spécifiques du projet : principalement numérisation des images filmées par l'hélicoptère et développement de modèles. Ces coûts sont subventionnables.
  - Le temps passé par le personnel de l'ASCOPARG qui est une association loi 1901. Ces coûts seront subventionnés également.
  - Les temps passés par les personnels chercheurs des différents organismes publics qui élaborent les recueils et les modèles et veillent au bon déroulement du projet. Ces coûts ne seront pas subventionnés.
  - Les temps passés par le personnel
- Des coûts de déplacements, justifiés par la mise en place du recueil et la tenue de réunions.
- Des coûts liés à la valorisation du projet (et concentrés sur la tâche 0 dans la présentation) :
  - Construction et alimentation du site web qui permettra de diffuser les mesures réalisées ;
  - Coûts de publication qui correspondent suivant les cas à des déplacements pour participation à des congrès ou pour des traductions.

On trouvera dans l'annexe financière la ventilation de ces coûts suivant les différents partenaires et les différentes tâches.

PARTENAIRES	Tâches							
	Coord.	Mesures			Modélisation			
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
INRETS (LICIT et LTE)								
Ascoparg								
CEREA								
INRIA								
LCPC (LEPSIS et MI)								
LRPC								
CERTU								
DIR CE								

L'organisation temporelle est également détaillée dans l'annexe financière (onglet Calendrier Livrables et Tâches). On reprend ci-dessous une synthèse sur les livrables uniquement

	Descriptif de la tâche	Livrable	Structure responsable (structures impliquées)	Année 1												Année 2												Année 3																																										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																															
T0	Coordination	Rapports d'avancement	LICIT (tous)													X	L0.1a											X	L0.2a											L0.3a											X																			
		Rapports financiers		X	L0.1b											X	L0.2b											L0.3b											X																															
		Rapport de synthèse finale																									L0.4											X																																
		Recommandations opérationnelles pour la gestion du trafic																									L0.5											X																																
T1	Recueil de films video et construction des trajectoires	Site web présentant le recueil	LICIT (MI, DIR-CE)													X	L1.1																																																					
		site web d'accès aux trajectoires individuelles																									X	L1.2																																										
T2	Recueil de données de pollution	site web d'accès aux données de pollution	Ascoparg (LTE, DIR-CE)																								X	L2.1																																										
		site web d'accès à la composition du parc automobile de la rocade Sud																									X	L2.2																																										
T3	Construction du fichier sur le passage des véhicules individuels sur les magnétomètres + Stockage des données agrégées	site web d'accès aux données individuelles des magnétomètres et collectives	INRIA (LRPC, DIR-CE)																								X	L3.1																																										
T4	Construction de matrices OD et de Temps de parcours à partir des caractéristiques magnétiques des véhicules sur les magnétomètres	Rapport présentant l'algorithme de traitement des signatures magnétiques et le modèle utilisé pour l'estimation a priori des temps de parcours	LRPC INRIA																								X	L4.1																																										
		Site web d'accès aux paires de véhicules, aux matrices OD et aux temps de parcours	LRPC INRIA																								X	L4.2																																										
		Rapport présentant la vérification de la matrice OD	CETE de Lyon																																			X	L4.3																															
T5	Modélisation des changements de voies	rapport sur l'analyse des données et la modélisation des changements de voies	LICIT																								X	L5.1																																										
		rapport de validation du modèle de ChV et impact sur la congestion	LICIT																																			X	L5.2																															
T6	Modélisation statistique des comportements de conduite en file	Rapport présentant le modèle stochastique et les résultats sur l'indicateur de risque	LEPSIS																								X	L6.1																																										
		rapport présentant la construction d'un indicateur de risque sur les données individuelles des capteurs fixes	LEPSIS																																														X	L6.2																				
T7	Modélisation des émissions et de la pollution	Rapport sur les émissions prévues	LTE (Ascoparg)																								X	L7.1																																										
		Rapport sur la cartographie des pollutions	LTE (Ascoparg, CEREAs)																																														X	L7.2																				

Les trois tâches de mesure aboutiront sur des livrables avant que les tâches de modélisation ne soient à pleine puissance. Les livrables des tâches 1 à 3 consisteront en des mises à jour du site web du projet. Les rapports sur les avancées de la modélisation en ce qui concerne les différents points abordés seront également placés sur le site web. Le rapport de synthèse sera produit à l'issue des trois années, après un laps de temps permettant l'appropriation croisée des résultats des uns et des autres.

## 5 DESCRIPTION DES PARTENAIRES

**L'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité)** est un établissement public scientifique et technologique, ayant pour mission d'effectuer, de faire effectuer ou d'évaluer toutes recherches et tous développements technologiques consacrés à l'amélioration des systèmes et moyens de transports et de circulation du point de vue technique, économique et social. Trois laboratoires de l'INRETS participent au projet MOCOPO.

Le **Laboratoire Ingénierie Circulation Transport (LICIT)** est une unité mixte de l'INRETS et de l'ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat). Ses sujets de recherches sont la modélisation et la régulation dynamiques des réseaux de transports. Les domaines dans lesquelles s'appliquent ses recherches sont le trafic routier (urbain, péri- et interurbain). L

**Christine BUISSON** est docteur en physique. Elle a rejoint l'équipe du LICIT en 1993. Elle est responsable dans ce laboratoire de la thématique « comprendre, quantifier et réduire la congestion autoroutière ». Elle est membre du comité "Traffic Flow Theory and Characteristics" du "Transportation Research Board", ainsi que du "Steering Committee" de l'action COST TU 0903 "Methods and tools for supporting the use, calibration and validation of traffic simulation models". Elle assure la coordination scientifique de l'équipe de recherche associée « gestion durable des trafic » en cours de montage avec le CETE de Lyon. Elle a participé au volet recherche de nombreuses actions de gestion du trafic (projet d'affichage de temps de parcours Tempo, définition de règles pour la régulation d'accès, mise en place d'indicateurs de congestion...).

**Christine BUISSON** assurera la coordination du projet MOCOPO. Elle dirigera les activités de diffusion des résultats en particulier le site web. Elle interviendra sur la mise en place du recueil de vidéo avec l'hélicoptère et supervisera la numérisation de ces vidéos pour produire les données de trajectoires individuelles. Elle dirigera la tâche 5 de modélisation des changements de voies et effectuera les recherches en partenariat avec Victor Knoop. Sur le sujet de la modélisation des changements de voies, elle sera également la directrice de thèse d'un étudiant(e) à recruter en septembre 2010. Elle sera la principale plume du rapport de synthèse final du projet.

**Victor KNOOP** est actuellement doctorant de l'Université Technologique de Delft (NL) (soutenance de thèse prévue le 2 décembre). Il sera du 1<sup>er</sup> Novembre 2009 au 31 décembre 2010 en post-doctorat au LICIT. Ses recherches doctorales portent sur la modification du comportement au voisinage des zones d'accidents. Elles vont être élargies pendant son séjour au LICIT à la modélisation des changements de voie.

**Le LTE (laboratoire transport environnement)** effectue des recherches, expertises, transferts de connaissances centrés sur l'axe de recherche prioritaire de l'Inrets « Accroître la fiabilité et la durabilité des systèmes de transport », particulièrement dans les deux domaines :

- évaluation et réduction des émissions de gaz à effet de serre et polluants ;
- évaluation et réduction du bruit des transports - approche multi-nuisances.

**Michel ANDRE** est docteur en Ingénierie informatique et ingénieur INSA (spécialité Energie, Environnement). Depuis 1982, il est chercheur à l'INRETS et directeur de recherche au LTE depuis 1998. Ses travaux portent sur la consommation énergétique et les émissions de polluants des véhicules et des transports. Il a été responsable de synthèses internationales sur les caractéristiques du trafic, la mobilité et le transport, dans le cadre d'Actions de Coopération Scientifique et Technique (COST 319 - Air pollution from transport, COST 346 - Emissions and consumption from heavy duty vehicles). Il a contribué à l'élaboration des outils européens d'inventaire des émissions de polluants des transports et participé aux groupes de travail français et internationaux sur les calculs.

**Michel ANDRE** sera principalement en charge pour MOCOPO des travaux visant à questionner et à fiabiliser les hypothèses de trafic (parcs automobiles, conditions de circulation, etc.) pour le calcul des émissions et de la dispersion des polluants (Tâche 7), et à mesurer la sensibilité des calculs à ces hypothèses notamment lorsqu'elles sont prises par défaut (absence de données réelles).

**Aurélie CHARRON** est docteur en Sciences de l'Atmosphère UTC/Mines de Douai depuis décembre 1999. Après une position de chercheur à l'Université de Birmingham, Royaume-Uni (2001-2006), elle a été recrutée comme chargée de Recherche à l'INRETS en décembre 2006. Ses activités actuelles concernent la caractérisation des émissions à l'échappement des transports routiers particulières (HAP, Dioxines et furannes, PM10/PM2.5) et gazeux (COV, benzène).

Dans le cadre de MOCOPO, **Aurélie CHARRON** sera chargée des travaux visant à la détermination des émissions particulières non-échappement.

Le **LEPSIS (Laboratoire Exploitation Perception Simulateurs et Simulations)** est une unité mixte de l'INRETS et du LCPC créée en 2009 pour favoriser l'émergence de solutions innovantes et durables en réponse aux problèmes de mobilité et de sécurité exprimés par les décideurs, les gestionnaires et les usagers des transports routiers. Le LEPSIS traite 4 domaines d'applications : aides au diagnostic de qualité des itinéraires routiers ; aides à l'exploitation des réseaux ; aides à la décision pour la réglementation, les aménagements et les équipements routiers ; enfin, conception et développement de simulateurs de conduite.

**Dimitri DAUCHER** est docteur en Mathématiques appliquées (2005) et agrégé de Mathématiques (1999). Il a été recruté comme chargé de recherche au LCPC en février 2007. Ses activités concernent la modélisation des trajectoires de véhicules et l'influence de la route et de son environnement sur la sécurité routière. Ses recherches portent sur les trajectoires de véhicules isolés en virage et celles de pelotons de véhicules avec notamment des approches probabilistes. Dans le cadre de MOCOPO, Dimitri DAUCHER sera chargé de la modélisation statistique des comportements de conduite en file (Tâche 6) et de ses applications.

**NeCS** est une équipe de recherche INRIA-CNRS-INPG-UJF bi-localisée à l'INRIA Rhône-Alpes (Montbonnot) et à Gipsa-lab (campus de Grenoble). L'équipe NeCS développe de nouvelles approches de commande prenant en compte les composants sans fils de faible coût et les réseaux à reconfiguration dynamique de capteurs et d'actionneurs. L'équipe vise des avancées dans le domaine de la commande des systèmes connectés en réseau par un développement d'outils pour l'automatique combinant les aspects commande, calcul et communication (3C). Une des applications de l'équipe concerne la modélisation, la surveillance et le contrôle des grandes infrastructures routières. Une plateforme expérimentale dénommée « Grenoble Traffic Lab » (GTL) est actuellement en cours de constitution en partenariat avec les exploitants grenoblois.

**Carlos CANUDAS de WIT** est directeur de recherche au CNRS et directeur de l'équipe NeCS. Son expertise scientifique s'articule autour de la commande, de l'identification et du diagnostic des systèmes connectés en réseau. Il est responsable du projet européen FeedNetBack, du projet ANR Connect et intervient dans le projet Aravis du pôle de compétitivité Minologic.

**Denis JACQUET** est docteur de l'INPG en automatique. Ses travaux concernent la modélisation dynamique du trafic et le traitement des données collectées sur l'infrastructure pour constituer des indicateurs pertinents pour l'exploitation. Il intervient dans la constitution du GTL au sein de l'INRIA. Il sera responsable de la tâche 3 de MOCOPO.

**La division Métrologie et Instrumentation (MI)** du LCPC mène des recherches et produit des connaissances sur les systèmes d'instrumentation et leur usage. L'objectif opérationnel à terme est l'instrumentation de différents véhicules destinés à parcourir les infrastructures ou leur environnement afin d'acquérir des images situées dans le visible permettant d'aider les experts à diagnostiquer leur état de santé.

L'équipe drone (**François DERKX et Jean-Luc SORIN**) a déjà réalisé des essais d'auscultation, d'ouvrages (Pont de Tonnay-Charente, Viaduc de la Sioule), de pylônes de grandes hauteurs 42m et 72 m pour le compte d'EDF ainsi que des prises d'images dans la Vallée d'Aspe (Pyrénées) pour le compte de la DIR Atlantique. Elle participe actuellement à trois projets significatifs, en collaboration avec des universitaires, le CNRS et l'ONERA. Les compétences de cette équipe pour les méthodes de survol et de recueil d'images en altitude seront transposées dans le cadre de MOCOPO à la prise d'image avec un hélicoptère.

**L'ASCOPARG** a été créée en 1976, sous forme d'une association loi 1901. C'est l'Observatoire agréé au titre du Code de l'Environnement pour la surveillance et l'information sur l'air dans le sud de l'Isère. Membre de la Fédération ATMO France, ASCOPARG regroupe les principaux acteurs locaux concernés par la qualité de l'air au sein de 4 collèges. La participation des représentants de l'Etat, des Collectivités, des Industriels et du monde associatif garantit l'indépendance de la structure et la transparence de l'information. ASCOPARG surveille aujourd'hui plus de 200 molécules différentes sur le Sud Isère afin de répondre aux attentes des acteurs locaux et du grand public. Après 32 ans au service de la qualité de l'air, l'expertise de l'ASCOPARG est unanimement reconnue tant du point de vue de la production de données que des nouveaux champs d'activités explorés.

L'ERA17 est une équipe de recherche du **Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (LRPCA)**, associée au laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). L'ERA17 effectue ses recherches dans le domaine de l'exploitation et de la sécurité routière. Il propose des outils de suivi de véhicule et de la circulation. Depuis 2005, le but est d'optimiser l'usage et d'étendre les applications des capteurs à boucles qui sont présents en grand nombre sur l'ensemble du réseau routier. Nous nous intéressons au suivi de véhicule par analyse de signature. Les applications visées sont les temps de parcours et matrices O/D."

**Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (LRPCA)** constitue l'équipe de recherche (ERA 17) associée au laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Le LRPCA effectue ses recherches dans le domaine de l'exploitation et de la sécurité routière. Il propose des outils de suivi de véhicule et de la circulation. Depuis 2005, le but est d'optimiser l'usage et d'étendre les applications des capteurs à boucles qui sont présents en grand nombre sur l'ensemble du réseau routier. Nous nous intéressons au suivi de véhicule par analyse de signature. Les applications visées sont les temps de parcours et matrices O/D.

**Cédric LE BASTARD** est docteur de l'Université de Nantes en électronique et traitement du signal. Il a travaillé de 2004 à 2008 pour le LCPC et pour l'IREENA sur les problèmes de résolution temporelle des radars. Depuis 2008, il s'intéresse à l'utilisation pour les problèmes d'exploitation et de sécurité routière de l'information issue des boucles électromagnétiques et autres capteurs magnétiques. Sa participation au projet MOCOPO se concentrera sur les tâches 3 et 4. Il assurera la coordination de cette dernière tâche.

**David GUILBERT** est titulaire d'un DEA en Informatique Industrielle et Automatique option Signal, Image et Décision de l'Université de Lille. Il a travaillé de 2003 à 2005 au CBNBL sur les Systèmes d'Informations Géographiques, de 2005 à 2007 au SNS/ABS en tant que Responsable Informatique. Depuis 2007, il s'intéresse aux problèmes d'exploitation et de sécurité routière à partir des boucles électromagnétiques. Il supervisera la partie installation des magnétomètres en partenariat avec la DIR-CE de la tâche 3 et participera à la tâche 4.

**Marc BRENUGAT** est expert technique des services techniques. Il travaille sur le dépouillement vidéo afin d'associer les signatures électromagnétiques mesurées aux véhicules enregistrés par la vidéo.

**Le CERECA** est un laboratoire commun de l'Ecole des Ponts ParisTech- et d'EDF R&D. Ses activités de recherche sont centrées sur la **pollution de l'air**. Elles couvrent une gamme qui s'étend de la recherche académique jusqu'aux études d'impacts, en passant par la modélisation/prévision du transport réactif de polluants à l'échelle régionale ou encore la modélisation aux petites échelles (pollution urbaine, qualité de l'air intérieur). L'intérêt porté à plusieurs de ces sujets explique l'imbrication du laboratoire dans les programmes d'EDF R&D et ses relations avec les organismes du Réseau Scientifique et Technique du ministère de l'écologie (MEEDDAT) organisées (convention avec la DRI).

**Christian SEIGNEUR**, directeur du Cerea, dirigera les activités du Cerea dans ce projet ; en particulier, il encadrera un doctorant dont le sujet de thèse est la modélisation de l'impact du trafic routier sur la qualité de l'air en proximité des routes. Christian Seigneur est un spécialiste de la modélisation de la qualité de l'air avec les modèles de chimie-transport et il a publié plus d'une centaine d'articles dans des revues scientifiques. Il fait actuellement partie du comité scientifique qui conseille l'U.S. Environmental Protection Agency pour la réglementation du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et il est membre du comité scientifique pour l'étude d'AIRPARIF sur les PM<sub>2,5</sub> en région parisienne.

Le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon (**CETE de Lyon**) est un bureau d'études du MEEDM. Il héberge depuis 2009 un pôle de compétence de d'innovation (PCI) chargé des sujets de gestion durable des trafics. Au sein de ce PCI, une équipe de recherche associée avec l'INRETS est identifiée. Elle sera chargée d'effectuer des recherches sur la modélisation et l'analyse du trafic en lien avec les aspects opérationnels. Dans le cadre de MOCOPO, la participation du CETE de Lyon sera de réaliser la validation des données de matrice OD et de TP en croisant les données issues du travail du LRPC-A et de l'INRIA (à partir des données des magnétomètres) avec les données des caméras. Ceci sera financé directement par le LICIT et aucun budget spécifique n'est demandé. C'est pour cette raison que le CETE de Lyon n'apparaît pas dans la liste des partenaires du projet.

La **Direction Interdépartementale des Routes du Centre Est** et en particulier le SREI de Chambéry, en charge des voies rapides de l'agglomération grenobloise, sont très intéressés aux résultats de cette étude que ce soit parce qu'elle permettra une meilleure compréhension du carrefour du Rondeau ou parce qu'elle permettra à la DIR-CE d'échanger avec ses partenaires locaux sur la pollution mesurée au voisinage de l'infrastructure qu'elle exploite. Les équipements permanents installés sur le lieu de l'expérimentation (les magnétomètres spécifiques



à l'expérience de la tâche 3 de MoCoPo) seront raccordés au réseau de transmission possédé et opéré par la DIR-CE. Le PC d'exploitation sera utilisé pour stocker les données des magnétomètres qui seront ensuite installées sur le serveur web de données de MoCoPo.

**Le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU)** est chargé de mener des études et de faire progresser et diffuser l'expertise sur ces domaines. Le CERTU est intéressé par l'étude des insertions et des zones d'entrecroisement situés sur autoroutes urbaines, en particulier dans le cadre de la refonte de l'ICTAVRU. Les mesures et modélisations de congestion, de pollution et de sécurité routières font explicitement partie des préoccupations mises en avant dans le cadre de cette refonte. **Tiphaine BRETIN** et **Jean-Paul LHUILLIER** participeront donc au suivi de l'avancement des travaux ainsi qu'à l'écriture de la synthèse.

On peut noter la présence de **deux doctorants** au sein de MOCOPO : un au CEREAS (dont la thèse est sur le point de débiter et qui travaillera sur les modèles de pollution) et un au LICIT qui sera recruté en 2010. Ce dernier travaillera sur l'analyse des données trajectoires et la modélisation des changements de voies dans les zones d'insertion.



## Publications récentes de l'équipe en rapport avec le projet MOCOPO :

- (1) Duret, J. Bouffier, and Ch. Buisson, (2009) Onset of congestion due to low speed insertions within a free flow traffic stream: Analytical resolution, submitted to Transportation Research Record
- (2) N. Chiabaut, L. Leclercq and Ch. Buisson, (2009) From heterogeneous drivers to macroscopic pattern in congestion, accepted for publication in Transportation Research Part B.
- (3) A. Duret, Ch. Buisson, N. Chiabaut, (2008) Estimating Individual speed spacing relationship and assessing ability of Newell's car-following model to reproduce trajectories, Transportation Research Record, n°2088, p. 188-197.
- (4) L. Leclercq, N. Chiabaut, J. A. Laval, and Ch. Buisson, (2007) Relaxation phenomenon after changing lanes: an experimental validation with the NGSIM dataset, Transportation Research Record n°1999, p. 79-85.
- (5) André M., Rapone M. (2009) : Analysis and modelling of the pollutant emissions from European cars as regards the driving characteristics and test cycles. Atmospheric Environment 43 986-995 .
- (6) André M., Joumard R., Vidon R., Tassel P., Perret P. (2006) Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. Atm. Envir. 40. 5944-5953, ISSN 1352-2310.
- (7) André M., Garrot B., Roynard Y., Vidon R., Tassel P., Perret P. (2005) Operating conditions of buses in use in the Ile-de-France region of France for the evaluation of pollutants emissions. *Atmospheric Environment* 69, 2411-2420. ISSN 1352-2310.
- (8) André M., Keller M., Sjodin A., Gadrat M., McCrae I. (2008): ARTEMIS: the new European tools for estimating at different scales the pollutant emissions from road transport, TRA, Transport Research Arena, Ljubljana, April 2008
- (9) Andre M., Keller M., Boughedaoui M. (2007) : Artemis : de nouveaux outils de calcul des émissions de polluants des transports routiers. 12<sup>ème</sup> colloque international « Évaluation environnementale et transports : concepts, outils et méthodes », Juin 2007, Genève. 8p.
- (10) Charron, A., and Harrison, R. M., (2005) Fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse (PM<sub>2.5-10</sub>) particulate matter on a heavily trafficked London highway: sources and processes, Environmental Science and Technology 39, pp 7768-7776.
- (11) Rey G., Clair D., Fogli M., Bernardin F., Daucher D. (2008) Méthodologie d'identification de trajectoires critiques en virage et calcul d'un facteur de risque, *Rapport du projet SARI / RADAAR*, 116 p.
- (12) Daucher D., Koita A., Jacob B. (2009) Trajectoires de véhicules et indicateurs de risque routier, *Congrès International ATEC-ITS France, Versailles (Yvelines)*, 4-5 février.
- (13) Daucher D. (2009) Toward a stochastic modelling of vehicles trajectories, *10<sup>th</sup> International Conference On Structural Safety and Reliability ICOSAR2009*, Osaka (Japon), September 13-17, 2009
- (14) Jacquet D., (2008) Freeway Traffic Management Using Linear Programming, 17th IFAC World Congress.
- (15) Jacquet D., Horowitz R. (2006), Input Estimation in Interconnected Systems of Conservation Laws, Application to OD Matrix Estimation, Mathematical Theory of Networks and Systems.
- (16) Jacquet D., Jaglin J., Koenig D. and Canudas de Wit C. (2006) Non-Local Feedback Ramp Metering Controller Design, IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, 2006.
- (17) Ieng S.S. et al. (2008) Travel Time by Using Widespread Inductive Loop Detector Network, presented at the Transportation Research Arena conference.
- (18) Ieng S-S., Grellier, Rivault, Bertrand, Pithon, (2007) On the Inductive Loop Based Vehicle Signature Features Analysis and the Anonymous Vehicle Re-Identification for Travel Times Estimation, presented at the Transportation Research Board conference.
- (19) Guilbert D., Le Bastard C., Bacelar A., A real time dynamic origin-destination matrices estimation from a widespread Inductive Loop Detector (ILD) network, submitted to Transportation Research Arena conference 2010.
- (20) Derx F., Sorin J.-L., Georges E., (2008) Les drones au service des ouvrages d'art. Revue de l'électricité et de l'électronique, pages 48-57, numéro de juin/juillet.
- (21) Derx F., Sorin J.-L., (2008) Inspection des ouvrages d'art par drone. Bilan et perspectives des travaux du LCPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 273 pp 39-56.
- (22) Metni N., Hamel T., Derx F., (2005) A tracking control law for aerial robotic systems with adaptative depth estimation. In proceedings of the 44th Conference on decision and control (CDC'05), p 6078, 6084, Séville, Espagne, 12-15 Décembre.

## Autres références mentionnées dans le texte

- (23) CHAPULUT J.-N., (2004) Evaluation socio-économique des systèmes d'exploitation de la route en milieu urbain, CERTU Août 2004.
- (24) Hranac, R., Margiotta, R., and Alexiadis, V. (2004). Next Generation Simulation (NGSIM) high-level data plan, Report to FHWA, #FHWA-HOP-06-011, FHWA, U.S. Department of Transportation.
- (25) Duret A., Ahn S., Buisson Ch., (2009) Spatio-Temporal Analysis of Impacts of Lane Changing Consistent with Wave Propagation, presented at TRB 2009, paper n°09-2350, 14 p.
- (26) Leclercq, L., Chiabaut, N., Laval, J., Buisson, C. (2007) Relaxation phenomenon after changing lanes: an experimental validation with the NGSIM dataset. Transportation Research Record, 1999, 79-85.
- (27) Laval, J. (2006) Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity. Transportation Research Records, 1988, 86-91.
- (28) Laval, J., Leclercq, L. (2008) Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. Transportation Research Part B, 42(6), 2008, 511-522.
- (29) Leclercq, L., Chiabaut, N., Laval, J., Buisson, C. (2007) Relaxation phenomenon after changing lanes: an experimental validation with the NGSIM dataset. Transportation Research Record, 1999, 79-85.
- (30) Abu-Allaban M., Gillies J.A., Gertler A.W., Clayton R., Proffitt D., (2003) Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles, Atmospheric Environment 37, pp 5283-5293.
- (31) Omstedt G., Bringfelt B., Johansson C., (2005) A model for vehicle-induced non-tailpipe emissions of particles along Swedish roads, Atmospheric Environment 39, pp 6088-6097.
- (32) Querol X., Alastuey A., Ruiz C.R., Artinano B, Hansson H.C, Harrison R.M., Buringh E, ten Brink H.M., Lutz M., Bruckmann P., (2004) Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities, Atmospheric Environment 38, pp6547-6555.
- (33) Thorpe A.J., Harrison, R.M., Boulter P.G., McCrae I.S., (2007) Estimation of particle resuspension source strength on a major London road, Atmospheric Environment 41, pp 8007-8020.

