
Études de simulation dynamique de trafic

Guide de réalisation

Cerema

Direction technique Territoires et ville
2, rue Antoine Charial 69003 Lyon
www.cerema.fr

Collection Références

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Remerciements

Ce document propose un bilan des enseignements sur la simulation dynamique tirés des activités opérationnelles des Directions territoriales Méditerranée et Centre Est du Cerema ainsi que des activités conjointes de recherche et de formation de l'IFSTTAR et du Cerema. Ces travaux d'étude ont été conduits au sein de l'ERA 38 (Équipe de recherche associée) de la Direction territoriale Centre Est associée au laboratoire LICIT (IFSTTAR/ENTPE).

Cet ouvrage est une œuvre collective dont la rédaction a été coordonnée par Olivier Richard et Christophe Damas (Cerema - Territoires et Ville).

Ont contribué à la rédaction :

- Olivier Richard, Aurélien Duret, Nicolas Ditchi, Cédric Bariou, Fabrice Golay et Fabien Tshiteya du Cerema ;
- Christine Buisson de l'IFSTTAR.

Les auteurs remercient l'ensemble des relecteurs qui ont contribué à l'enrichissement de cet ouvrage par leurs remarques et apports techniques :

- Anne-Sophie Maurice (Nantes Métropole) ;
- Laurent Chesnot, Bernard Baradel (SCE) ;
- Stéphane Chanut (Cerema - Territoires et Ville) ;
- Christophe Damas (Cerema - Territoires et Ville) ;
- Boris Ly (Cerema - Infrastructures de transport et matériaux) ;
- Wilfried Raballand (Cerema - Territoires et Ville) ;
- Cécile Bécarie (IFSTTAR/LICIT).

Sommaire

■ Introduction	5
----------------	---

PREMIÈRE PARTIE

■ Les questions indispensables à se poser...	8
--	---

DEUXIÈME PARTIE

■ Le déroulement idéal d'une étude	20
------------------------------------	----

TROISIÈME PARTIE

■ Réponses aux questions fréquentes	38
-------------------------------------	----

■ Bibliographie	71
-----------------	----

■ Table des illustrations	73
---------------------------	----

■ Table des matières	75
----------------------	----



Introduction

Dans un contexte d'exigences environnementales toujours plus élevées et de raréfaction des fonds publics, l'évaluation préalable des projets d'infrastructures de transports et d'aménagement de l'espace public occupe une place primordiale. Il en va de même pour les projets d'exploitation et d'optimisation des réseaux de transport.

Parmi les méthodes et les outils disponibles pour contribuer à ces évaluations, la simulation dynamique du trafic rencontre un vrai succès et est de plus en plus couramment utilisée. Ses qualités sont en effet nombreuses : polyvalence des domaines d'utilisation, fort potentiel pour la communication à destination des décideurs et du grand public et facilité apparente de mise en œuvre. Les éditeurs de logiciels de simulation dynamique ont en effet réalisé un important et appréciable travail de développement d'interfaces ergonomiques permettant de coder et de simuler un réseau très rapidement. La simulation dynamique a ainsi depuis longtemps débordé du cadre des laboratoires de recherche pour devenir un outil de base des bureaux d'études spécialisés, des services techniques des grandes collectivités territoriales et de l'État.

Cette facilité d'utilisation est cependant trompeuse, car la simulation dynamique requiert des compétences spécifiques et pointues en ingénierie du trafic, conception des infrastructures et aménagement de l'espace public ainsi qu'une rigueur et un recul par rapport aux limites des résultats propres à toute démarche de modélisation. En effet, la modélisation est une représentation simplifiée de la réalité, mais n'est pas la réalité.

Par ailleurs, des compétences propres à l'outil spécifique que l'on mettra en œuvre sont nécessaires à la fois sur la manipulation de cet outil, mais aussi sur le fonctionnement des modèles qu'il utilise (lois de poursuite, de changement de voies, de priorité, d'affectation, etc.).

Objectifs du guide

L'objet de ce guide est de poser un cadre pour l'utilisation de la simulation dynamique du trafic en précisant son domaine de validité d'une part, et de fournir aux utilisateurs une ressource complète détaillant les règles de l'art de chaque phase d'une étude de simulation d'autre part.

Ce manuel est destiné à un public technique :

- utilisateurs indirects de la simulation dynamique tels que bureaux d'études positionnés en assistance à maîtrise d'ouvrage, services techniques des collectivités et de l'État ayant à commander et suivre de près une étude de simulation dynamique ;
- utilisateurs directs de la simulation dynamique tels que bureaux d'études ou services techniques des collectivités manipulant les logiciels de simulation dynamique.

Le public visé n'est donc pas scientifique (théoriciens de la simulation et développeurs de modèles), ni politique (élus ou services techniques ne connaissant pas la simulation).

Ce manuel s'adresse à des utilisateurs de logiciels commerciaux de simulation dynamique sans cibler de logiciel en particulier. La réalisation d'une étude de simulation dynamique nécessite une très bonne connaissance du logiciel utilisé en plus de la démarche détaillée dans ce manuel qui ne remplace donc pas les guides d'utilisateurs et les formations spécifiques.

Organisation du guide de réalisation

Conçu avec l'ambition d'être pratique, ce manuel est composé de trois parties :

- les questions indispensables : la première partie du document soulève les questions indispensables que doit se poser le prestataire aux différentes étapes

d'une étude en simulation dynamique. On aborde ici les finalités de l'étude et les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir. Cette partie pose des questions dont les réponses détaillées sont proposées dans le reste du document ;

- le déroulement d'une étude idéale : la deuxième partie explicite le déroulement idéal d'une étude de simulation dynamique étape par étape sans entrer toutefois dans tous les détails. Cette partie est conçue pour être lue linéairement ;
- la foire aux questions : cette partie a pour objectifs d'apporter des réponses précises et

opérationnelles à chaque question qui peut se poser au cours d'une étude de simulation dynamique. Chaque réponse est indépendante et peut être lue indépendamment du reste du chapitre, ce qui peut amener certaines redites par rapport à la deuxième partie.

L'objectif des auteurs est à terme de mettre en ligne sur un site internet spécifique l'ensemble des questions et réponses de manière à pouvoir actualiser et compléter cette partie au fur et à mesure des expériences acquises et des questions posées par les utilisateurs.

P R E M I È R E P A R T I E

Les questions indispensables à se poser...



1 ...avant l'étude

1.1. La simulation dynamique est-elle l'outil adéquat ?

Évidente et pourtant souvent oubliée, cette question devrait être un préalable systématique à toute étude de simulation dynamique. En premier lieu, il s'agit d'identifier les objectifs et les questions auxquels l'étude doit répondre afin de savoir si la simulation dynamique est l'approche la plus adaptée.

Schématiquement, la simulation dynamique est un outil permettant de confronter une offre et une demande de déplacements pour prévoir le fonctionnement dynamique d'un réseau. Les indicateurs chiffrés et les visualisations obtenues peuvent ainsi apporter des éléments de réponse à de très nombreuses questions. Dans le contexte global de fonctionnement des réseaux, il y a cependant trois cas de figure principaux où la simulation dynamique n'est pas une approche pertinente :

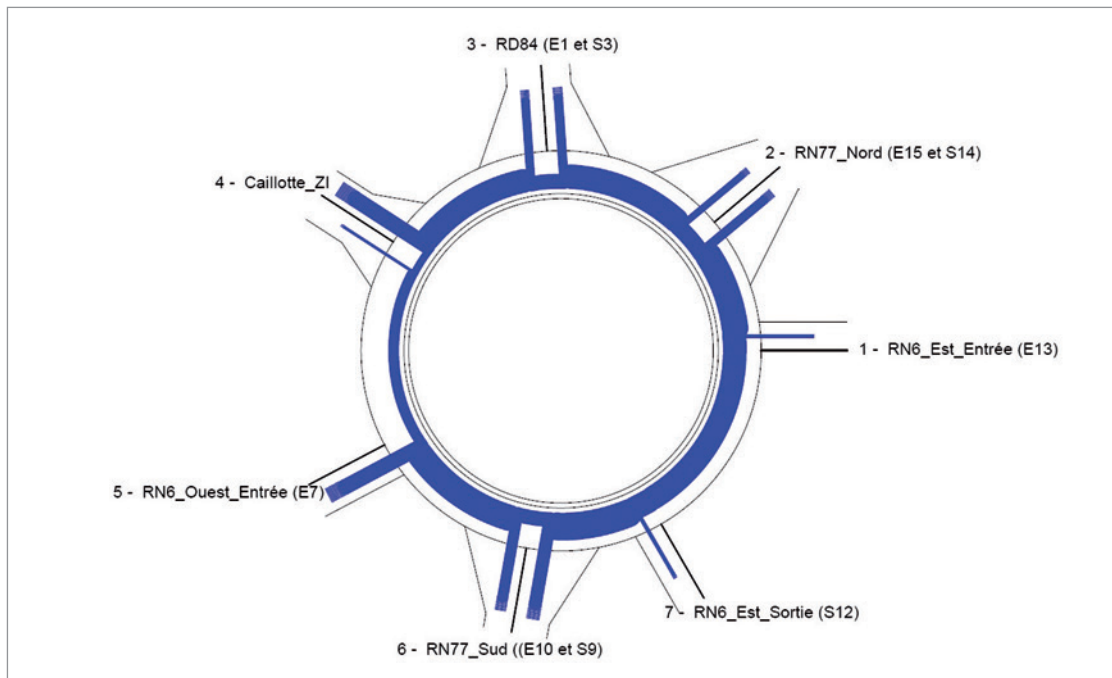
- la simulation dynamique est trop élaborée par rapport à la question posée ;
- la simulation dynamique n'est pas fiable par rapport à la problématique ;
- les ressources nécessaires à la mise en œuvre de la simulation dynamique ne sont pas réunies.

Nous allons maintenant examiner ces trois cas de figure.

■ La simulation dynamique est-elle adaptée à la phase du projet ?

Au début d'un projet, il n'est généralement pas nécessaire de recourir à la simulation dynamique pour deux raisons : les questions posées sur le fonctionnement sont très générales et le projet n'est pas suffisamment défini pour pouvoir être testé en simulation dynamique. En effet, les questions des phases amont concernent généralement l'opportunité et la faisabilité des projets et l'on peut apporter des réponses de manière simplifiée aux premières interrogations sur le fonctionnement. La simulation dynamique n'est par exemple pas utile pour évaluer l'opportunité d'une ligne de tramway ou d'une nouvelle infrastructure, mais elle pourra s'avérer indispensable pendant les phases de conception du projet. On utilise généralement lors de ces phases amont des outils de planification basés sur la modélisation statique des déplacements (*Bonnel 2004*).

Par ailleurs, dans des cas simples d'aménagement comme des giratoires classiques ou des carrefours à feux simples et isolés, l'investissement nécessaire en temps et en moyens pour la mise en œuvre de simulation dynamique ne se justifie pas forcément, puisqu'il existe des méthodes éprouvées et faciles à utiliser telles que le calcul statique de carrefours à feux (*CERTU 2010*) ou des logiciels simples dédiés (*Girabase*).



Représentation d'un giratoire dans Girabase (source : Cerema)

■ La simulation dynamique est-elle pertinente pour les questions posées ?

Une deuxième contre-indication à l'utilisation de la simulation dynamique concerne les limites intrinsèques des outils et de leurs modèles sous-jacents. Comme tout processus de modélisation, la simulation dynamique présente un domaine de validité qui évolue avec les avancées de la recherche et les évolutions des logiciels. Certains phénomènes ne sont pas pris en compte dans les logiciels (la météo par exemple) et d'autres de manière très limitée (la largeur des voies par exemple). Il n'est ainsi pas possible d'utiliser la simulation dynamique pour évaluer les conséquences d'une matinée pluvieuse sur la circulation ou pour tester de manière fine les conséquences d'un changement de profil en long ou en travers d'une route, de manière permanente ou à l'occasion d'un chantier. Enfin, certaines fonctionnalités sont proposées par les logiciels de simulation dynamique, mais le degré de validité des résultats obtenus est difficile à estimer du fait à la fois d'un manque d'expérience et souvent d'un manque de données précises permettant de caler les modèles sous-jacents. C'est le cas notamment de la simulation de la régulation de vitesse et du couplage des modèles de simulation dynamique avec des modèles d'émissions de polluants.

■ Les ressources nécessaires sont-elles disponibles ?

La simulation dynamique requiert un ensemble de ressources dont la disponibilité est indispensable à la réussite de l'étude :

- des compétences techniques ;
- des données ;
- des moyens financiers et du temps.

L'absence d'une de ces ressources peut remettre en cause la possibilité d'utiliser la simulation dynamique.

Compétences

En plus de la maîtrise du logiciel utilisé, les compétences techniques indispensables sont l'ingénierie du trafic ainsi qu'une connaissance globale des principes d'une démarche de modélisation. Une bonne connaissance des mécanismes de fonctionnement des réseaux et d'écoulement du trafic est nécessaire, tout comme la capacité à recueillir, traiter et analyser des données de trafic et de déplacements. L'équipe qui réalise une étude de simulation dynamique doit connaître les démarches de prévisions de trafic et notamment l'interaction entre l'offre et la demande. Enfin, en fonction du sujet de l'étude, l'équipe devra également intégrer des compétences spécifiques sur la conception des aménagements, les carrefours à

feux, l'exploitation des réseaux routiers ou de transport en commun, la régulation dynamique ou encore l'informatique (base de données, programmation).

Données

La simulation dynamique est un outil qui nécessite des données précises et de bonne qualité sur le réseau, la demande de trafic et le fonctionnement actuels, sans lequel les résultats ne présenteront

qu'une précision illusoire. Les données nécessaires seront détaillées dans un paragraphe spécifique (1.3.).

Moyens

Le temps et les moyens financiers nécessaires à la réalisation d'une étude de simulation dynamique dépendent étroitement du périmètre du projet, de sa complexité et du nombre de scénarios à évaluer. Des ordres de grandeur figurent dans le tableau ci-dessous.

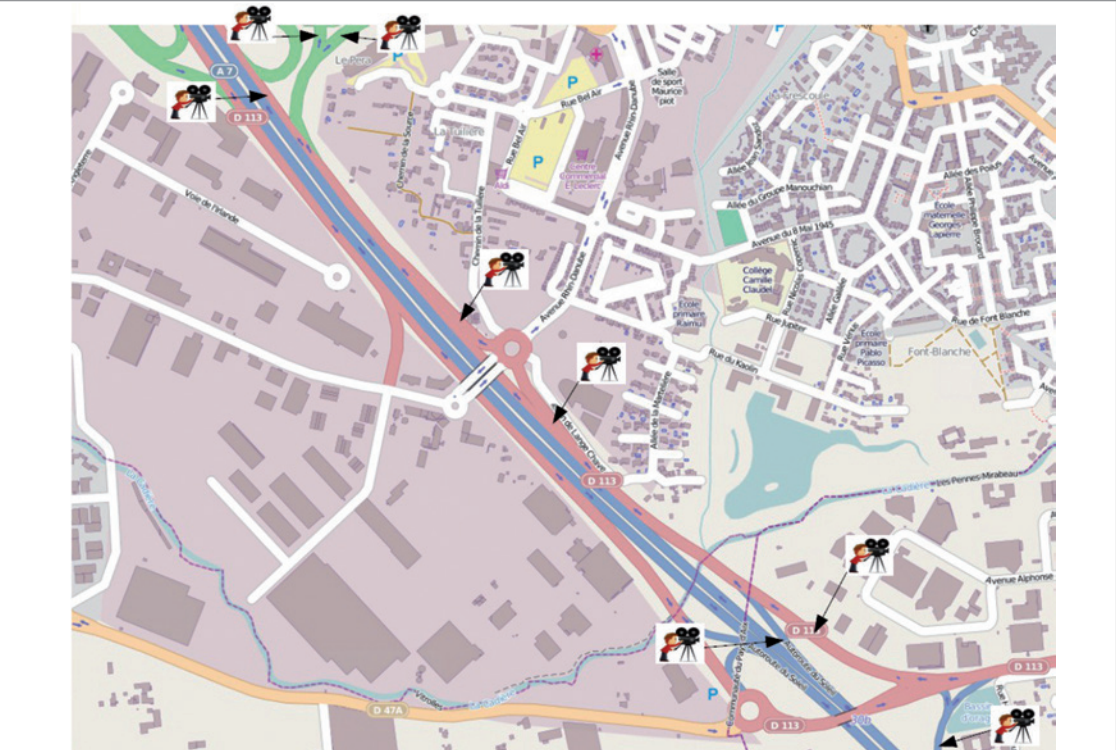
Moyens nécessaires à la réalisation d'une étude en simulation dynamique

Type d'étude	Nombre de scénarios	Délai de réalisation	Ordre de grandeur de coût (TTC)
Un carrefour ou un échangeur simple	2-5	1 à 2 mois	Environ 10 k€
Zone moyennement étendue (de 2 à 4 carrefours/échangeurs)	5-10	3 à 4 mois	Entre 20 et 30 k€
Zone étendue (40 km) avec de nombreux échangeurs/carrefours (une vingtaine)	2-5	10 à 12 mois	Entre 100 et 150 k€

(source : Cerema)

Les ordres de grandeur présentés ci-dessus ne comprennent pas le temps et les moyens nécessaires pour établir un recueil de données spécifiques généralement nécessaire préalablement à l'étude : environ 3 à 5 k€ TTC pour un carrefour simple, 10 à 15 k€ pour une zone plus étendue et le montant

peut encore augmenter en fonction de la taille de la zone, des périodes d'enquêtes, des solutions retenues pour mesurer les données et les indicateurs à recueillir. Les moyens nécessaires à la réalisation d'une étude sont détaillés dans la partie 3, § 1.1. (p.40).



Préparation d'une enquête par relevé automatique de plaques d'immatriculation (source : Cerema, fonds de plan OSM)

■ Quelles sont les autres approches possibles ?

Dans le cas où la simulation dynamique s'avère non adaptée, non pertinente ou non réalisable, il existe d'autres méthodes pouvant apporter des réponses dans le domaine du fonctionnement des réseaux. Elles sont détaillées dans un paragraphe spécifique de la foire aux questions, partie 3, § 1.5. (p. 53).

1.2. Quel est le périmètre spatio-temporel de l'étude ?

La détermination du périmètre spatio-temporel de l'étude présente une importance primordiale, car elle aura une influence directe sur les questions auxquelles la simulation pourra répondre, mais aussi sur la complexité de l'étude et sur les moyens à mettre en œuvre, notamment lors du recueil de données.

La démarche d'élaboration du périmètre spatio-temporel doit se faire en deux temps, tout d'abord on identifie :

- la zone cœur à modéliser comprenant l'ensemble des aménagements susceptibles d'être modifiés lors de l'étude des scénarios ;
- les périodes temporelles critiques pour le fonctionnement des réseaux (périodes de pointe du matin ou du soir, vendredi soir, etc.).

Ce périmètre restreint sera ensuite élargi en se basant sur les grands principes généraux suivants :

- intégration de l'ensemble de l'étendue spatiale de la congestion en situation actuelle et dans les scénarios futurs ;
- intégration pour chaque période de l'ensemble de la période de montée en charge et d'apparition de la congestion, puis de disparition de la congestion en situation actuelle et dans les situations futures ;

- intégration d'un maximum de carrefours interagissant avec le réseau pré-identifié.

Cette démarche théorique peut cependant conduire à des périmètres spatio-temporels trop étendus : les stratégies pour limiter le périmètre sont détaillées dans la partie 2, § 1.1. (p. 23).

Les horizons d'étude sont généralement donnés par la commande initiale. À noter qu'en raison de l'incertitude sur la demande de déplacements à horizons lointains, des simulations dynamiques au-delà de 10 ans n'ont pas vraiment de sens : il est en revanche possible d'effectuer des tests de sensibilité pour différents scénarios d'évolution du trafic. On pourra ainsi analyser des scénarios contrastés d'évolution de la demande pour les horizons lointains et tester l'efficacité de l'aménagement projeté face à ces différentes évolutions possibles de la demande.

1.3. Quelles sont les données nécessaires ?

La simulation dynamique nécessite en entrée un important jeu de données sur l'offre, la demande et le fonctionnement en situation actuelle et pour tous les scénarios à tester. Le processus général de modélisation consiste à caler puis valider le modèle en reproduisant la situation actuelle, et ensuite à modifier certains éléments de l'offre et/ou de demande afin d'évaluer le fonctionnement résultant. Il est donc nécessaire pour la phase de calage/validation de disposer d'éléments précis de fonctionnement sur la période à modéliser. Dans certains cas (travaux neufs notamment) on ne dispose pas de situation actuelle et le processus de calage est modifié. Ce point est traité dans la foire aux questions (partie 3, § 2.2., p. 56).

Sources de données pour la simulation dynamique du trafic

	Situation actuelle	Scénarios
Offre (description du réseau)	Visites terrain/SIG libres ou commerciaux/ cartes et photos aériennes/photos en ligne/ informations exploitants réseaux	Fonds de plan d'aménagement (par exemple format dxf) fourni par le commanditaire ou étude spécifique
Demande de trafic	Recueil de données	Partie de l'étude
Fonctionnement	Visites terrain/interview usagers-exploitants/ recueil données/sites web d'information routière TomTom, Google traffic, v-traffic	Objectif de l'étude

(source : Cerema)

Offre

Concernant l'offre, il faut une description précise du réseau à simuler : géométrie, nombre de voies, connexion entre les voies, vitesses à vide, règles de priorité, plans de feux et dispositifs de régulation. Dans le cas de scénarios impliquant des transports en commun, il faut en plus les lignes, les arrêts, la fréquence, les temps d'arrêt et les vitesses.

Demande

Les données de demande jouent un rôle primordial dans les résultats de la simulation dynamique et

nécessitent une attention particulière. D'une manière générale, il faut disposer de la répartition dynamique de la demande des véhicules légers et des poids lourds tout au long de la période d'étude. Le pas de temps à utiliser dépend du contexte de l'étude. On prend généralement 15 minutes en milieu urbain où les dynamiques de fonctionnement sont très marquées, voire 6 minutes pour une étude très précise de VSA¹. Dans un contexte interurbain ou lorsque les questions sont moins précises, on peut utiliser une demande agrégée par périodes de 30 minutes.

1 Voirie structurante d'agglomération, nouvelle dénomination des VRU (Voies rapides urbaines).



Photo aérienne d'une zone d'étude (source : Cerema, fonds de plan Geoportail)

Lors de la détermination de la demande, il faut bien prendre en compte les deux phénomènes suivants :

- un capteur pendant une période de congestion mesure la capacité de l'infrastructure et non la demande réelle qui est supérieure ;
- la demande future dépend de l'offre. Sur un même carrefour, une restriction ou une augmentation de l'offre va conduire à une diminution ou une augmentation de la demande. Ceci est d'autant plus vrai que l'horizon de prévision est lointain, car, sur le long terme (10-15 ans), c'est l'offre qui gouverne la demande. En effet, les usagers tendent à adapter leurs itinéraires et/ou leurs choix modaux à la capacité des différents axes et modes du réseau. Si ce type de phénomène est primordial pour l'étude, il faudra recourir à un modèle de prévision des trafics (Bonneil 2004).

La demande en situation actuelle est généralement issue d'un recueil de données. La demande en situation future est déterminée à partir de modèles de prévision de trafic ou à partir d'hypothèses d'évolution de la demande actuelle. Il faut généralement faire des hypothèses sur la dynamique de la demande future, non prévue par les modèles de prévisions de trafic. Selon le contexte de l'étude, il faut également quantifier tous les phénomènes susceptibles de modifier significativement le fonctionnement de la zone : présence importante de piétons ou de deux-roues, manœuvres liées au stationnement, véhicules de livraison, etc. Les outils de simulation

dynamique ne prennent pas bien en compte ces phénomènes, certains proposent des modèles spécifiques (deux-roues ou piétons). Les conséquences de ces interactions peuvent généralement être reproduites par des artifices (incidents aléatoires, feu tricolore limitant le débit, etc.).

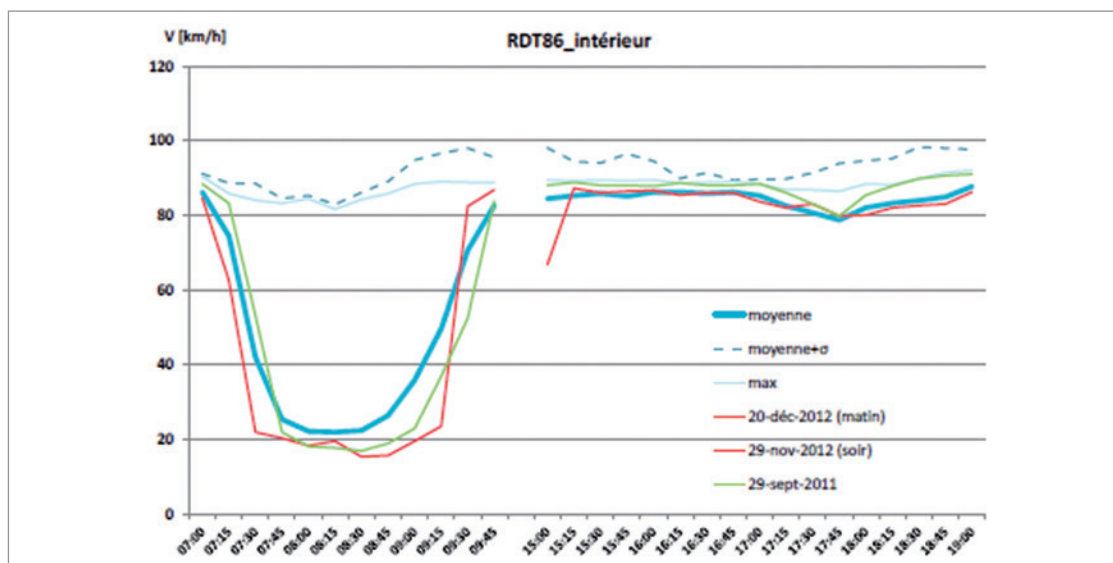
Fonctionnement et diagnostic trafic

La connaissance du fonctionnement en situation actuelle est nécessaire au calage du modèle : les données nécessaires sont liées aux indicateurs que l'on souhaite étudier dans les situations futures.

Le premier niveau consiste à reproduire de manière qualitative une situation connue par des visites terrain, la consultation des sites d'information routière et des interviews d'exploitants ou d'usagers réguliers. L'exploitation des résultats devra dans ce cas être plutôt qualitative.

Le deuxième niveau consiste à reproduire de manière quantitative la situation à modéliser. Pour pouvoir répondre à des questions plus précises, il faut donc des données quantitatives : débits mesurés (notamment dans les zones congestionnées), temps de parcours, vitesses pratiquées, dynamique des congestions (heures d'apparition et durées des congestions, amplitude des remontées de files), etc.

Il faut des données encore plus précises et détaillées pour répondre à des questions spécifiques comme la répartition par voie ou la durée d'attente à un péage par exemple.



Exemple de diagnostic quantitatif de variabilité du trafic (source : PTV/DREAL Pays de la Loire)

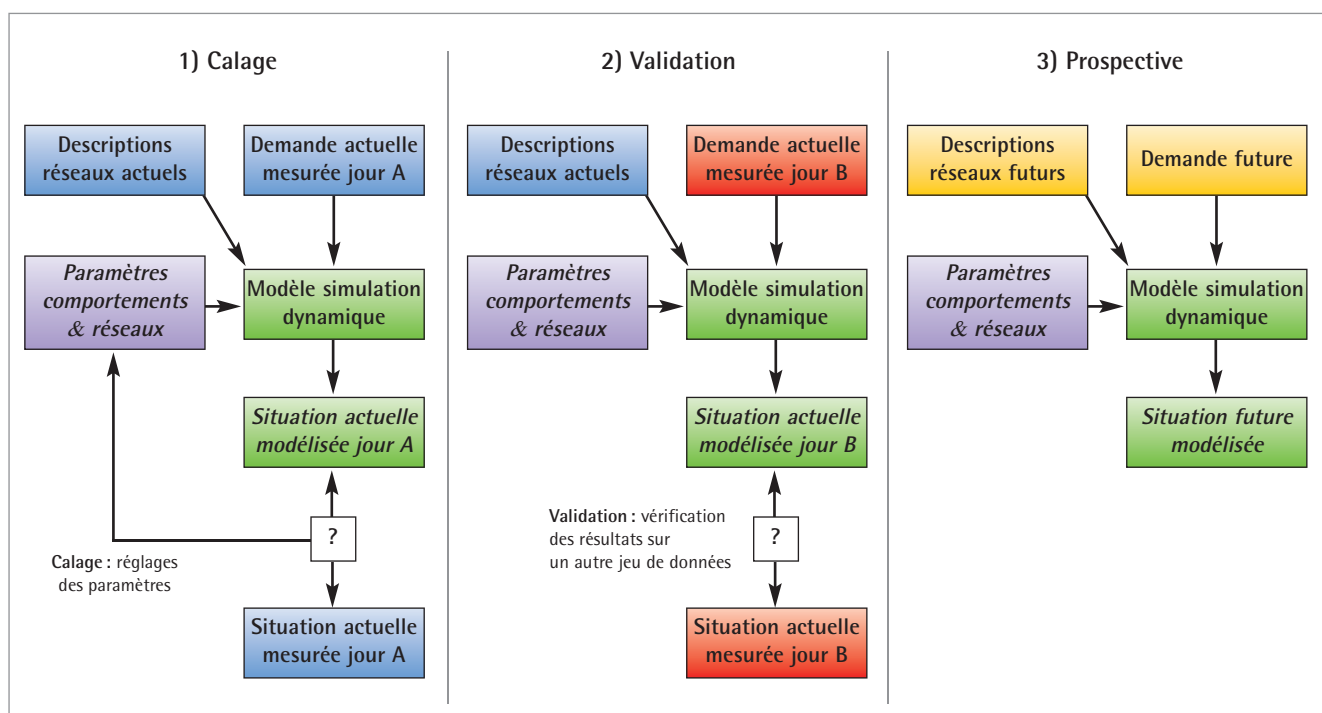
2 ...lors de la réalisation de l'étude

2.1. Mon modèle est-il bien validé ?

Le principe général de la modélisation est de reproduire une situation connue de manière à pouvoir extrapoler une autre situation. Le processus théorique d'une démarche d'évaluation par une modélisation comprend trois étapes : le calage du modèle sur une situation connue, la validation de ce calage et la prospective par la modélisation d'une situation projet (voir illustration ci-dessous). Lors du calage, on règle au mieux les différents paramètres du modèle pour reproduire au plus près le fonctionnement actuel du réseau. On valide les paramètres et le modèle utilisé en les testant avec un autre jeu de données d'entrées (demande différente) et en vérifiant que le modèle permet de reproduire la situation du deuxième jeu de données avec la même marge d'erreur que sur le premier jeu. C'est à l'issue de cette phase que l'on peut normalement utiliser le modèle pour évaluer les nouveaux scénarios d'offre et de demande du projet étudié.

La distinction des deux phases calage/validation n'est pas systématique en simulation dynamique. Il y a par ailleurs différents niveaux d'approfondissement du processus de calage lors de la comparaison entre la situation actuelle et la situation modélisée. Une comparaison uniquement qualitative n'est généralement pas suffisante et il faut recourir à des comparaisons quantitatives d'indicateurs dynamiques (débits, temps de parcours, remontées de files, etc.). Il existe des méthodes statistiques permettant de comparer deux séries de données et d'objectiver la qualité du calage. Le processus de calage est détaillé dans la partie 2, § 2.2. (p. 29), mais il faut retenir que le choix des indicateurs de calage influera sur la pertinence des analyses des scénarios futurs.

Enfin, il existe des cas (travaux neufs notamment) où il n'y a pas de situation actuelle pouvant servir au calage, ce point est étudié dans la troisième partie, § 2.2. (p. 56).



2.2. Mes scénarios sont-ils bien codés ?

À l'issue du travail sur la situation actuelle, le modèle va être utilisé pour tester des scénarios futurs. Avant d'analyser en détail les résultats, il convient de s'assurer de l'absence de grosses erreurs dans le codage de ces scénarios futurs. Certains logiciels de simulation possèdent des outils de recherche d'erreurs de codification du réseau (erreur dans le plan de feux, absence de chemin entre

une origine et une destination, problème de conflit dans un carrefour, etc.). Une visualisation des résultats peut être une première étape pour identifier certains dysfonctionnements du modèle. Dans un second temps, il est nécessaire de vérifier la cohérence des résultats obtenus en effectuant des vérifications de base : analyse des capacités obtenues par la simulation dynamique et comparaison avec les résultats obtenus par d'autres méthodes d'analyse : logiciel Girabase pour les giratoires, calculs de capacité statique pour les carrefours à feux, etc.

3 ...à l'issue de l'étude

3.1. Quelles réponses puis-je apporter ?

Il est très difficile de déterminer mathématiquement une marge d'erreur sur les résultats obtenus via la simulation dynamique. Si les logiciels permettent de calculer de nombreux indicateurs et leur évolution temporelle, il faut faire attention à ne pas donner des résultats avec une précision illusoire.

Deux phénomènes viennent se combiner pour augmenter l'incertitude des résultats :

- incertitudes sur le modèle et ses paramètres ;
- incertitudes sur les données d'entrée.

Par rapport à la première incertitude, il faut revenir à la situation de calage : si l'erreur de reconstitution sur les temps de parcours actuels était de 10%, l'erreur sur la prévision des temps de parcours

futurs ne pourra pas être moindre. Il faut se poser alors la question du niveau de significativité d'un résultat, une modification de temps de parcours de 2% entre deux scénarios n'est ainsi pas forcément significative dans ce même cas d'erreur de reproduction initiale de 10%. La délicate question du niveau de précision des résultats est abordée dans la foire aux questions (partie 3, § 3.3., p.66).

Les données d'entrées et notamment les données de demande présentent une forte incertitude et jouent un rôle significatif dans les résultats obtenus. Il existe une manière simple de traiter cette incertitude en réalisant des tests de sensibilité envisageant différents scénarios avec d'autres hypothèses (demande future avec + ou - 10% par exemple). Cela permet ainsi d'identifier les hypothèses fortes et de donner des fourchettes de résultats.

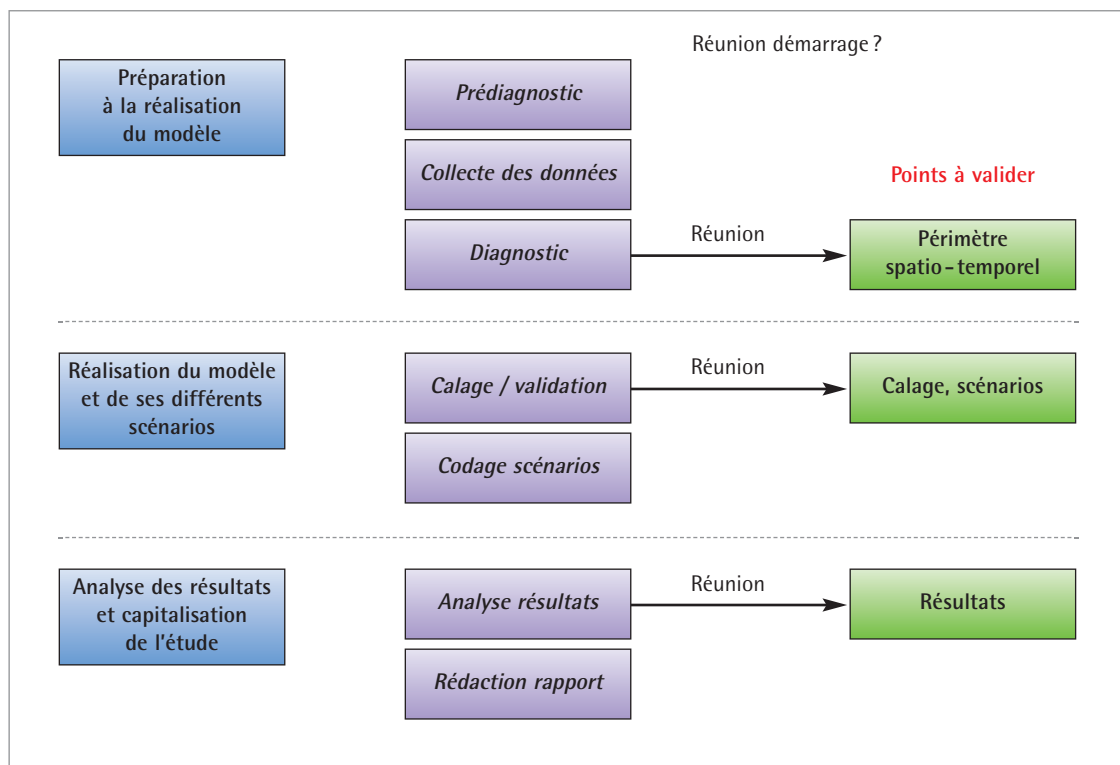
D E U X I È M E P A R T I E

Le déroulement idéal d'une étude



Préalablement à toute étude, il est absolument nécessaire d'identifier les objectifs du projet que l'on cherche à évaluer et les questions auxquelles l'étude doit répondre.

Le schéma ci-dessous explicite les différentes étapes du déroulement idéal d'une étude en simulation dynamique, ainsi que les différentes réunions qu'il est nécessaire de prévoir entre le bureau d'étude qui réalise l'étude et le donneur d'ordre.



Démarche de réalisation d'une étude de simulation dynamique

Préparation à la réalisation du modèle 1

1.1. Définition du périmètre d'étude et des périodes de modélisation (pré-diagnostic)

Le pré-diagnostic a pour objectif de déterminer le périmètre d'études et les périodes de modélisation. Il prépare le recueil de données et le diagnostic initial.

Il faut d'abord identifier la zone cœur de l'étude : réseau qui sera modifié ou impacté directement par les projets à tester. Autour de cette zone centrale, le pré-diagnostic doit aborder trois volets :

- l'étendue spatio-temporelle actuelle de la congestion ;
- les interactions de la zone cœur avec les carrefours adjacents ;
- les conséquences prévisibles des projets à tester en termes de congestion et d'interactions.

Le pré-diagnostic se base sur des visites de terrain, la consultation des sites d'information routière, des entretiens avec les exploitants ou des usagers du réseau, des analyses de la configuration du réseau et des données existantes (compteurs permanents notamment).

Pour les congestions, on cherche à déterminer les lieux actuels de formation et les amplitudes temporelles et spatiales. Les interactions peuvent être directement visibles (remontée de file d'un carrefour sur un autre) ou plus indirectes (carrefour à feu qui génère un trafic pulsé).

Le prestataire doit ensuite estimer les conséquences des projets sur l'étendue spatio-temporelle de la congestion et identifier les éventuelles nouvelles interactions (par exemple l'augmentation de la capacité d'un carrefour de la zone d'étude peut provoquer sur un carrefour en aval des remontées de files qui n'existent pas en situation actuelle).

Le pré-diagnostic demande donc une très bonne appropriation du réseau et de son fonctionnement et des compétences approfondies en trafic et circulation. L'objectif est de déterminer un périmètre et une période d'étude englobant l'ensemble de l'étendue spatio-temporelle actuelle et future de la congestion, et au maximum indépendant en termes de fonctionnement du reste du réseau qui ne sera pas modélisé.

■ Exceptions à la modélisation de l'ensemble de l'étendue spatio-temporelle actuelle et future de la congestion

Les recommandations ci-dessus peuvent conduire à des périmètres spatio-temporels très étendus par rapport aux moyens, données et temps disponibles. Il est possible de restreindre ce périmètre dans certaines circonstances :

- en cas de remontée de file sur une voie ne présentant pas de problèmes de stockage, possibilité de représenter le phénomène par des files d'attente virtuelles² en entrées de réseau et à les prendre en compte dans le calcul des indicateurs de temps passés. Dans le cas de modélisation d'un échangeur par exemple, il n'est pas nécessaire de modéliser 10 km en amont de la voie rapide, une file d'attente virtuelle en entrée du réseau suffit à représenter les retards des véhicules en amont du réseau ;
- dans les cas de scénarios très défavorables en termes de fonctionnement, il n'est pas nécessaire de prévoir la modélisation de l'ensemble de la période de disparition de la congestion, l'analyse soulignera simplement que le scénario étudié est encore saturé en fin de période de simulation.

■ Exceptions à la modélisation de l'ensemble des carrefours interagissant

Imposer des conditions aux limites du périmètre

Le fonctionnement d'un carrefour en milieu urbain est étroitement dépendant de ses voisins et il n'est pas possible de modéliser l'ensemble du réseau.

Pour chaque zone adjacente, la question se pose donc de l'intégrer au périmètre de modélisation ou de modéliser l'interaction en fixant les conditions aux limites du périmètre. Par exemple, le fonctionnement d'un carrefour giratoire dépend de la distribution temporelle des véhicules en entrée : aléatoire ou en peloton du fait de la présence d'un carrefour à feux en amont. On peut soit intégrer le carrefour à feux dans le modèle (mais il faudra connaître les trafics pour l'ensemble des flux ainsi que le plan de feu exact), soit forcer l'arrivée des voitures en peloton via les options du logiciel ou en créant un feu fictif simplifié. Le principe est le même en sortie du modèle : si un carrefour en aval limite le débit d'une voie de sortie du périmètre en situation actuelle ou future, on peut soit intégrer ce carrefour dans le modèle, soit simplement limiter la capacité de la voie sortant de la zone étudiée via les options du logiciel ou en créant un feu fictif simplifié. En résumé, si on fait le choix de limiter l'étendue spatiale du réseau pour alléger le travail de simulation, il conviendra néanmoins que les frontières soient reproduites dans leurs dynamiques ; en entrée de réseau pour la demande et en sortie de réseau pour l'offre.

Découper le réseau

Dans le cas d'une zone d'étude étendue avec des carrefours au fonctionnement indépendant (par exemple les différents échangeurs d'une autoroute

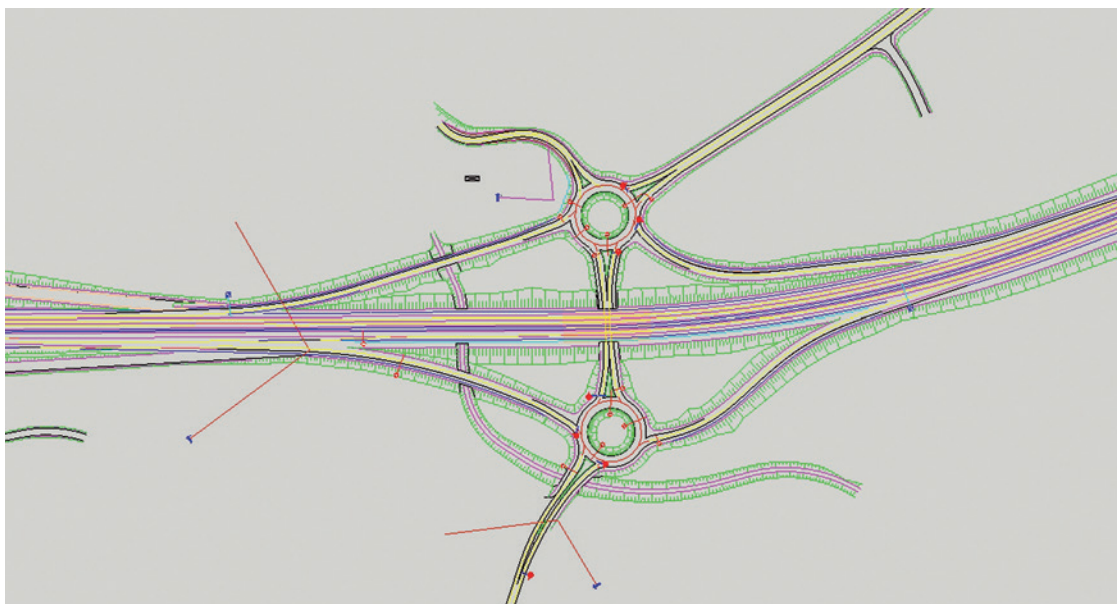
interurbaine), il est possible de réaliser un modèle pour chaque carrefour, ce qui permettra notamment de limiter les temps de calcul et facilitera ainsi le test de différents scénarios.

1.2. Collecte et mise en forme des données nécessaires au codage du réseau

Les données pour le codage du réseau peuvent provenir de trois sources :

- photos aériennes. Elles servent uniquement de fond de plan pour le codage géométrique du réseau ;
- plans type «autocad» de la zone. Ici encore les plans servent uniquement de support visuel. C'est la source de données habituelle pour les réseaux futurs ;
- base de données routières existante (issues des systèmes de guidage, openstreetmap, réseaux de modèles statiques ou dynamiques existants, etc.). La possibilité d'importer différents formats de base de données routières dépend du logiciel utilisé. La base de données va donner un squelette de réseau qu'il va falloir affiner à la main, notamment au niveau des nœuds du réseau.

Il est possible de combiner plusieurs sources de données : photos aériennes pour le rendu et fonds de plan pour le codage précis, notamment du réseau futur.



Plans autocad pour le codage (source : Cerema)

Les règles de priorités (priorité à droite, cédez-le-passage, stop, feux de circulation) seront déterminées à partir de visites terrain ou d'outils de visualisation de la voie publique via internet. Il ne faut pas oublier les données relatives aux feux de circulation. Un relevé terrain peut s'avérer pour ce point insuffisant (plans de feux variables selon la période ou adaptatifs via de la microrégulation). Il faut alors prendre contact avec l'exploitant du carrefour pour récupérer le dossier de programmation du contrôleur du carrefour à feux concerné. Certains logiciels peuvent s'interfacier directement avec des outils spécialisés dans la gestion des plans de feux.

Dans le cas où une modélisation en 3D est souhaitée à des fins de communication, le recueil de données nécessaires est beaucoup plus conséquent et non abordé dans ce manuel (modèle numérique de terrain, modèles de bâti, etc.).

1.3. Collecte et mise en forme des données nécessaires au codage de la demande de trafic

La phase de détermination de la demande aux différents horizons (actuels et futurs) est une phase chronophage, technique et primordiale pour les résultats finaux. Il faut donc y porter une attention particulière. La demande future est obtenue par un travail spécifique détaillé dans la partie 3, § 2.4. (p. 58) et les méthodes de recueil de données sont présentées dans la partie 3, § 1.3. (p. 47).

■ Spécifications de la demande

La demande doit être décrite de manière dynamique, pour représenter le fait que le réseau monte en charge, est congestionné puis se décharge. Il faut que la description de la demande couvre l'ensemble de la période de pointe étudiée. Il faut également que le pas de temps de description de la demande soit suffisamment fin (généralement entre 6 minutes et

30 minutes). La demande doit distinguer impérativement les VL et les PL et intégrer si nécessaire d'autres modes (piétons, transports en commun, deux-roues). La demande actuelle est obtenue à partir d'un recueil spécifique ou élaborée à l'aide d'un modèle statique de déplacements.

■ Description et obtention de la demande

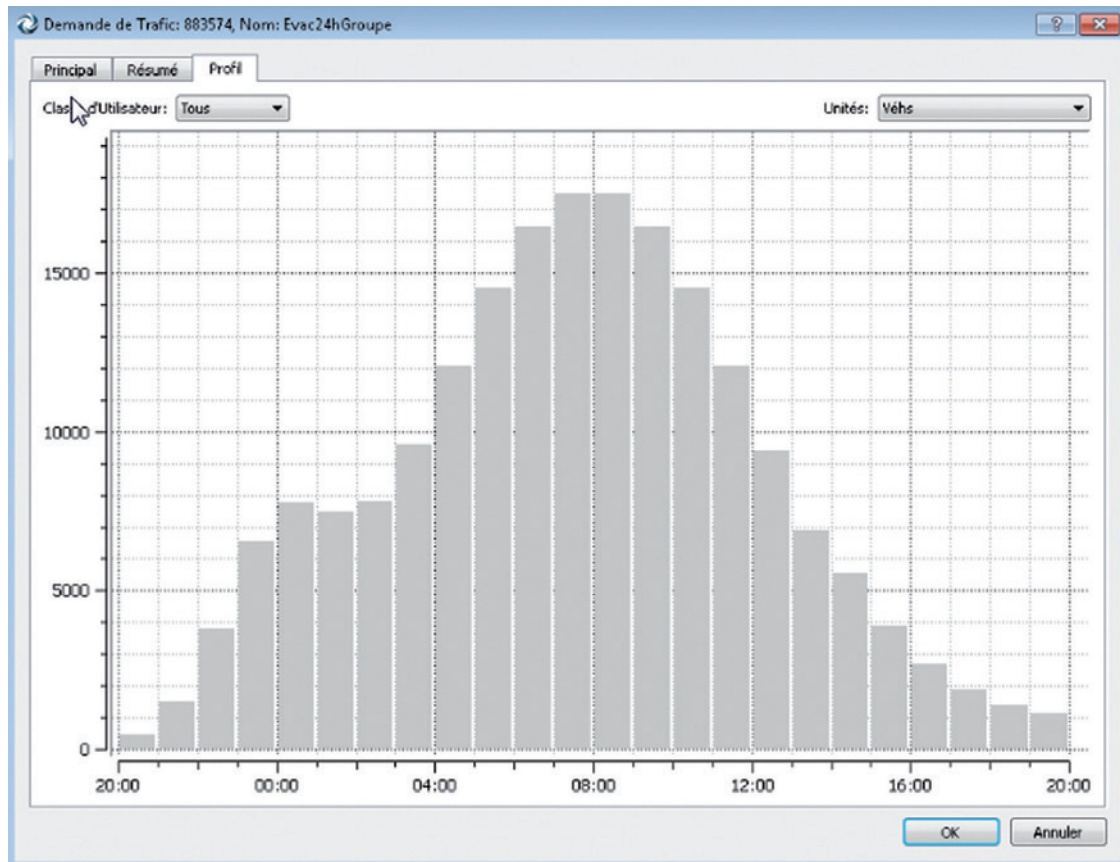
Il existe deux manières de décrire la demande :

- matrices entrées/sorties sur le réseau ;
- volumes en entrées de réseaux et pourcentages directionnels aux carrefours.

La représentation de la demande par matrices entrées/sorties dynamiques est la méthode à privilégier, indispensable dans certains cas (tests de changement d'itinéraires à effectuer). Dans le cas des réseaux relativement simples, cette demande pourra être obtenue directement par enquête par relevé de plaques minéralogiques. Les matrices peuvent également être construites à partir de données de comptages en section et de relevés directionnels à certains carrefours. Plusieurs matrices entrées/sorties pouvant correspondre aux mêmes comptages en section, il est nécessaire de faire des hypothèses complémentaires pour élaborer une matrice à partir de comptages en section. Par ailleurs, les différentes sources de données présentent souvent des incohérences (loi de conservation des véhicules non vérifiée) et il est également nécessaire de faire des hypothèses complémentaires. Ces difficultés techniques induisent un travail conséquent sur cette phase.

Pour résoudre ces difficultés, on utilise parfois une description de la demande par volumes en entrées de réseaux et pourcentages directionnels aux carrefours.

Dans le cas d'une demande fournie par un modèle statique, il faut utiliser une méthode pour la transformer en demande dynamique, généralement à partir d'extrapolations de données observées.



Exemple de profil de demande dynamique (source: Cerema)

■ Points complémentaires d'attention

Mesure de l'offre au lieu de la demande

Dans tous les cas, les capteurs de trafic ne mesurent pas la demande, mais le minimum entre l'offre et la demande. Cela signifie qu'en période fluide, les capteurs mesurent la demande de trafic et qu'en période congestionnée, les capteurs de trafic mesurent le débit d'écoulement. En cas de congestion sur un capteur, il faut utiliser des méthodes complexes et non standardisées pour déterminer la demande réelle et non la demande écoulee, limitée par l'offre.

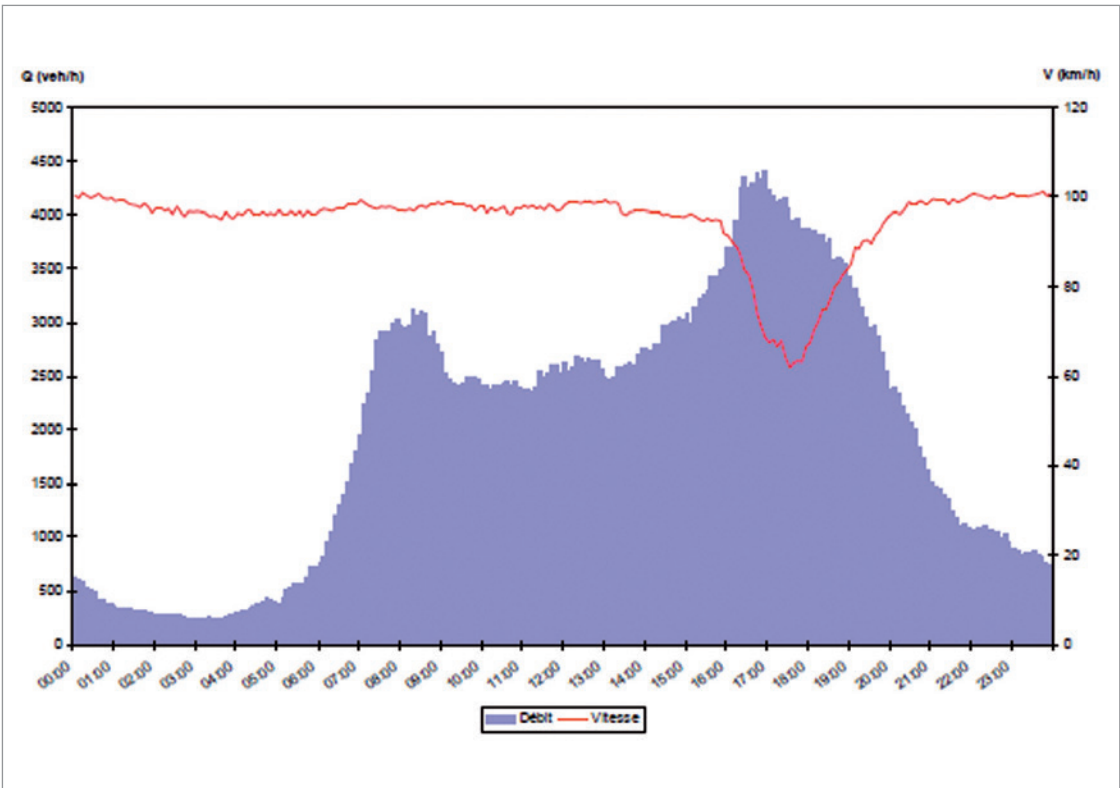
Détermination des itinéraires

Dans le cas de réseaux maillés, la détermination des matrices entrées/sorties doit se combiner avec celle des itinéraires empruntés pour chaque origine-destination. Les logiciels de simulation dynamique proposent des outils pour faciliter cette détermination. Il s'agit d'un point crucial pour les résultats. Le calcul des coefficients d'affectation des différents itinéraires pour chaque couple entrée/sortie est compliqué et très sensible (une mauvaise affectation

des itinéraires peut changer complètement les conditions de circulation). La taille des réseaux simulés a tendance à augmenter grâce à l'augmentation de la capacité de calcul et cette difficulté technique risque de devenir de plus en plus centrale à l'avenir.

1.4. Collecte et analyse des informations nécessaires à l'analyse des conditions actuelles de circulation (diagnostic)

Dans le cas d'une étude sur un réseau existant, il est indispensable de procéder à un diagnostic de fonctionnement approfondi préalablement à la phase de simulation dynamique. Le diagnostic est le prolongement du pré-diagnostic qu'il vient compléter grâce notamment à des recueils et des observations complémentaires. Le diagnostic de fonctionnement comprend un volet quantitatif précis dont les données serviront de base au calage du modèle lors de la reconstitution de la situation actuelle.



Exemple d'analyse quantitative menée au cours du diagnostic de fonctionnement (source : Cerema)

Il est également un travail pédagogique de synthèse qui doit être partagé et validé par le maître d'ouvrage. Une attention particulière doit donc être portée aux rendus, notamment cartographiques. Le diagnostic doit faire la synthèse des connaissances sur l'offre, la demande et les conditions actuelles de fonctionnement.

■ L'offre

Le diagnostic doit présenter les éléments relatifs à l'offre : étendue du réseau, type de voiries, carrefours principaux, etc. Une attention particulière sera portée aux éléments pouvant avoir un impact sur le fonctionnement et donc sur la modélisation : sections en pente, mesures d'exploitation spécifiques, impacts d'autres modes, masques visuels induisant des ralentissements, etc.

■ La demande

Au-delà des données qui seront rentrées dans le modèle lui-même (par exemple matrices entrées/sorties décomposées par période et par type de véhicules), le diagnostic doit synthétiser les infor-

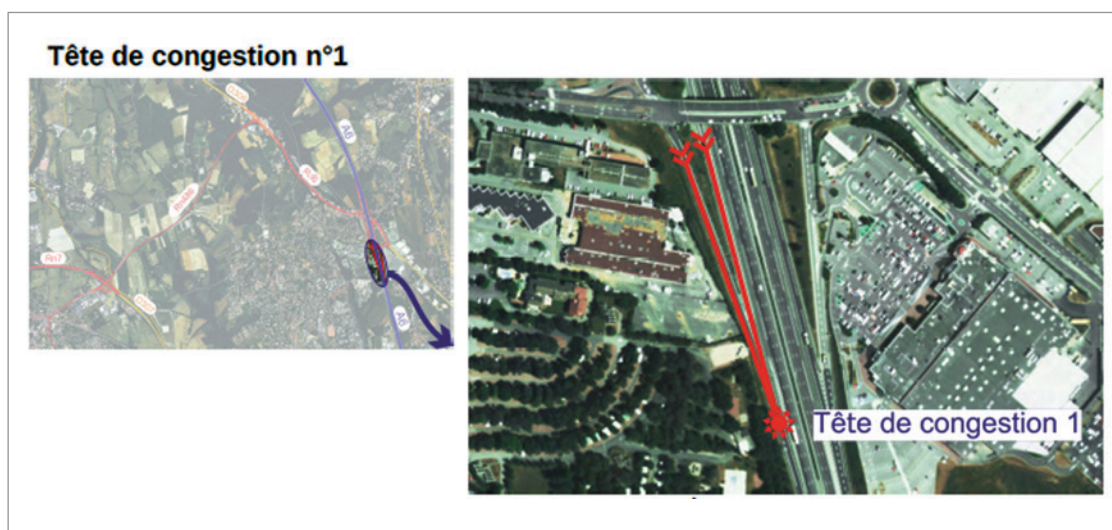
mations et illustrer les grands flux de trafic qui traversent le réseau aux différentes périodes étudiées. Une des difficultés d'établissement de la demande est la variabilité temporelle observée d'un jour ou d'une semaine à l'autre. Le diagnostic doit éclairer ce point pour permettre de définir la situation de référence de calage.

■ Les conditions de circulation

Le diagnostic doit comporter un volet descriptif et un volet explicatif sur les conditions actuelles de circulation. Le volet descriptif est réalisé à partir de l'analyse précise des données disponibles : zones et heures d'apparition de la congestion, étendue spatiale, retour à une situation fluide. Les indicateurs à utiliser sont notamment les vitesses pratiquées, les temps de parcours, les remontées de files, les débits à capacité, etc. Le volet explicatif doit analyser les phénomènes existants et est basé notamment sur les observations terrain et la compréhension du fonctionnement. Il est à noter que la simulation dynamique de la situation actuelle, correctement calée sur les indicateurs mesurés, pourra servir dans un second temps à compléter les premières

explications sur le fonctionnement du réseau. Tout comme pour la demande, une des difficultés de l'analyse des conditions de circulation est leur variabilité temporelle. Le diagnostic doit éclairer

ce point pour permettre d'établir une situation de référence pour le calage ou un panel de situations observées.



Exemple d'analyse qualitative de fonctionnement (source : Cerema, fonds de plan géoportail)

Réalisation du modèle et implémentation ² des différents scénarios projets

2.1. Codage de la situation actuelle

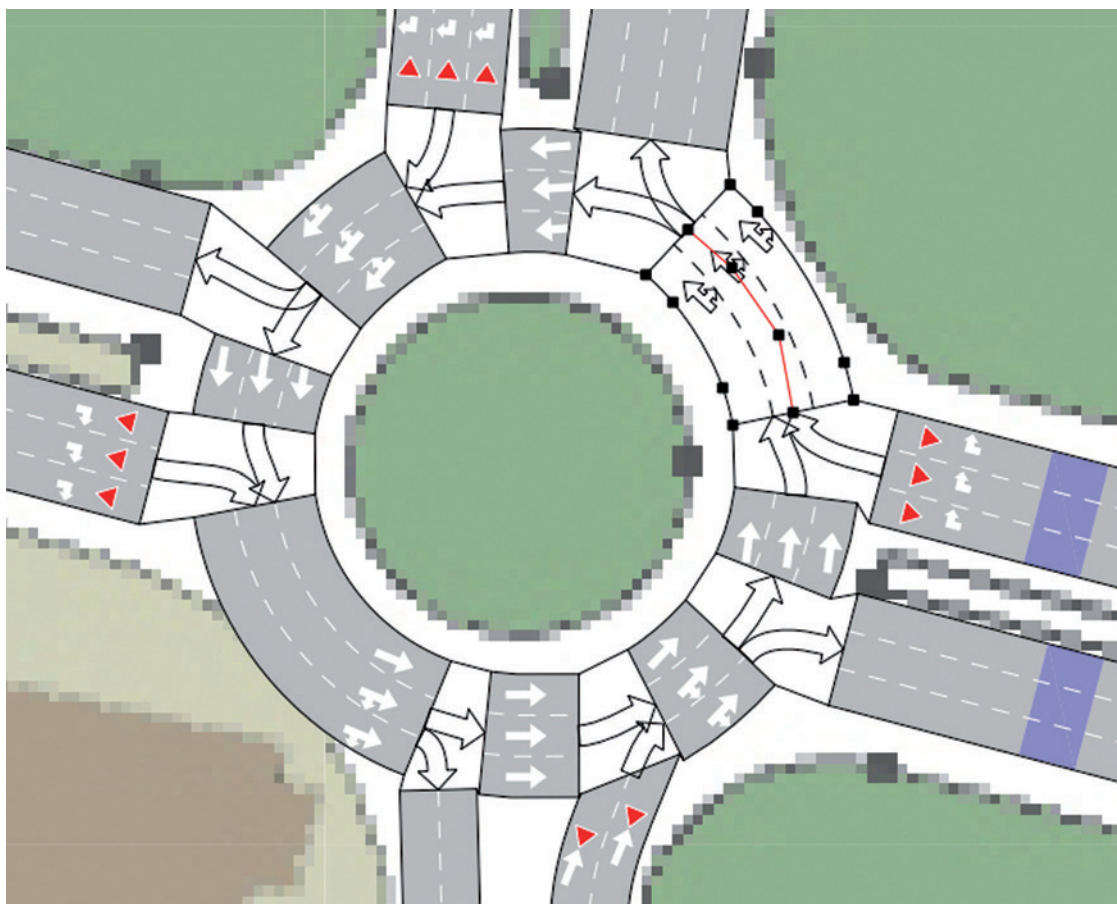
Cette étape consiste à «dessiner» la géométrie du réseau dans l'outil de simulation et à lui attribuer les premiers paramètres par défaut : nombre de voies, vitesses de circulation, description des mouvements tournants, description des régimes de priorité, description des voies réservées, implémentation des plans de feux, etc. Cette phase qui s'apparente à de la simple saisie doit cependant être réalisée par une personne connaissant les modèles implémentés dans l'outil et l'influence de la saisie sur le fonctionnement de la simulation. Il faut également que le codage soit vérifié, de préférence par une autre personne que celle l'ayant effectué.

2.2. Calage et validation

Les étapes de calage et de validation sont déterminantes, c'est sur elles que reposent la fiabilité de l'étude et la solidité de ses conclusions.

■ Calage

L'objectif est d'ajuster la valeur des paramètres de l'outil afin de reproduire le plus fidèlement possible la situation actuelle observée et mesurée sur le terrain. Le calage soulève donc deux questions principales : celle de la méthodologie à suivre pour définir les valeurs des nombreux paramètres de la simulation et celle de la méthode de comparaison entre la situation modélisée et la situation mesurée.



Codage d'un giratoire sous Aimsun (source : Cerema/TSS)

Principes de calage

Le calage demande une connaissance précise du logiciel employé, car les modèles mathématiques sous-jacents et les paramètres à régler diffèrent fortement d'un logiciel à l'autre. Les paramètres sont classés en deux groupes en fonction de leur portée : les paramètres globaux s'appliquent à l'ensemble du réseau (par exemple le temps de réaction des conducteurs) tandis que les autres paramètres sont locaux (par exemple distance de visualisation à un cédez-le-passage). Par ailleurs, les paramètres ayant le plus d'influence sur les résultats de la simulation sont dits «leviers». La démarche théorique de calage consiste à régler d'abord les paramètres globaux puis les paramètres locaux en commençant à chaque fois par les paramètres leviers. Il faut veiller à garder une cohérence de valeurs dans les paramètres locaux utilisés à plusieurs endroits du réseau (par exemple les créneaux nécessaires à une insertion sur une entrée de giratoire).

Le choix des indicateurs de calage

La question du choix des indicateurs de calage est traitée spécifiquement dans la foire aux questions (partie 3, § 1.2., p. 43) mais l'on peut noter que ce choix dépend étroitement des indicateurs qui seront étudiés dans les scénarios. Il est préférable que l'ensemble des indicateurs utilisés lors de l'analyse de la situation projet ait fait l'objet d'un processus de calage.

L'indicateur indispensable de calage est le débit écoulé par pas de temps sur plusieurs points du réseau. Il ne suffit pas d'étudier les débits uniquement en entrée du réseau puisque, par construction de la demande, le débit modélisé en entrée correspond au débit mesuré. On portera une attention particulière aux situations saturées, car le débit représente alors la capacité qu'il est indispensable de bien reproduire. Les temps de parcours entrées-sorties sur le réseau sont d'autres indicateurs classiques et représentatifs des conditions de circulation, tout comme les vitesses pratiquées en différents points du réseau.

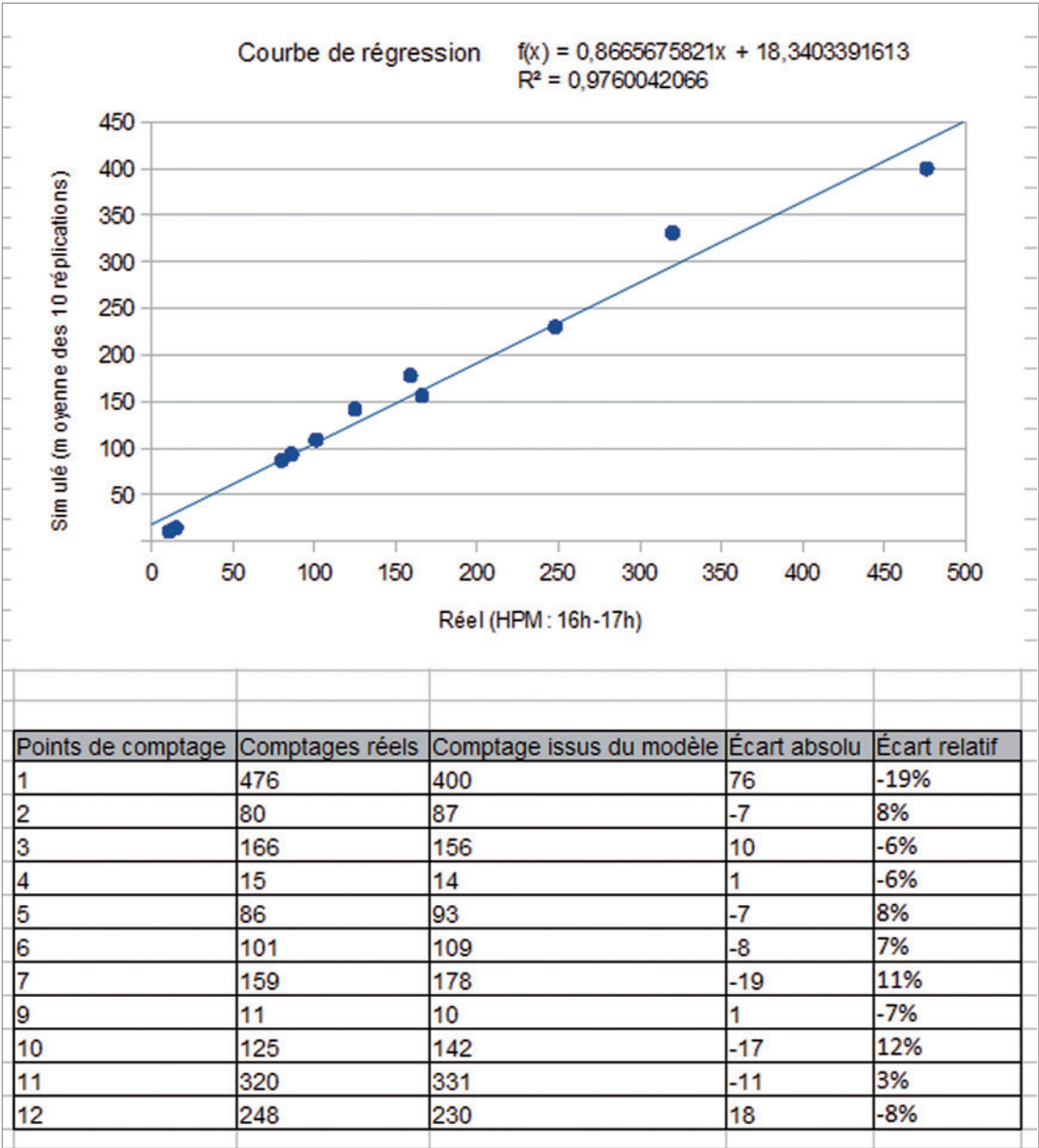
Les réplifications

Les outils de simulation microscopique sont «stochastiques» afin de représenter le caractère

aléatoire des comportements de conduite. Cela signifie que certains paramètres sont répartis selon une loi de probabilité et qu'à chaque simulation, ils sont déterminés par un tirage aléatoire. Ces paramètres stochastiques sont nombreux : tirage des moments de création des véhicules, tirage des paramètres comportementaux des véhicules (paramètres de la loi de poursuite, probabilité de vouloir changer de voie à un instant donné, etc.). Par conséquent, pour un même scénario, deux simulations successives ne donneront pas des résultats identiques. Pour chaque scénario, il faut donc faire plusieurs réplifications (10 conseillées, voir partie 3, § 2.3., p. 56) pour analyser un scénario : la moyenne ou la médiane pour évaluer les tendances du scénario et l'écart-type pour évaluer la stabilité des résultats. Pour vérifier la stabilité des résultats, une solution peut être de faire une réplification supplémentaire et de calculer en quoi la prendre en compte ou non modifie significativement ou non l'écart-type de la distribution des valeurs des résultats des réplifications. Si une seule réplification modifie significativement les caractéristiques de la distribution, alors le nombre de réplifications doit être augmenté.

Comparaison entre situation modélisée et situation réelle

Le diagnostic de fonctionnement actuel doit avoir fourni une approche qualitative et une approche quantitative. Dans la première étape de calage, la comparaison peut être qualitative en vérifiant que le modèle reproduit bien les grands phénomènes identifiés. La comparaison peut ensuite porter sur des grandeurs agrégées (temps de parcours moyen, remontée de files maximale). L'objectif de la simulation dynamique étant de reproduire la dynamique de l'écoulement, la comparaison doit enfin porter sur des séries dynamiques d'indicateurs, par exemple l'évolution du débit écoulé par pas de temps. Cette comparaison entre séries dynamiques peut s'effectuer graphiquement en traçant sur un même graphe les deux courbes, ou sous forme de tableau, mais il est recommandé d'utiliser également les droites de régression et l'indicateur statistique de calage R^2 (coefficient de détermination).



Exemple de comparaison entre les mesures réelles et simulées (source : Cerema)

■ Validation

Le principe de la validation consiste à tester le paramétrage obtenu dans la phase de calage avec d'autres données d'entrées et de vérifier que les marges d'erreur entre les situations observées et modélisées sur le deuxième jeu de données restent du même ordre de grandeur qu'avec le jeu de données ayant servi au calage. Pour effectuer rigoureusement cette démarche, il faut donc disposer de deux jeux distincts de données d'offre et de demande et de fonctionnement associé. Il est cependant rare dans la

pratique de disposer des données et du temps nécessaires à cette validation, mais il est déjà possible par exemple de calibrer le modèle sur les données de la période de pointe du matin et de vérifier son fonctionnement sur la période de pointe du soir.

Problèmes fréquemment rencontrés
au niveau du calage

Il faut noter que le processus de calage n'est pas toujours possible ou ne garantit pas toujours la validité du modèle pour des scénarios futurs, car certains phénomènes de la situation future n'existent

pas dans la situation actuelle. Le calage d'un modèle sur un giratoire par exemple ne garantit pas son utilisation pour tester un carrefour à feux. Le calage aura cependant au moins servi à valider les données de demande. Le cas de l'absence d'une situation de calage est traité dans la troisième partie (§ 2.2., p. 56). Une difficulté importante à reproduire la situation actuelle peut provenir d'une mauvaise correspondance entre demande calculée et conditions de circulation, notamment dans le cas de données élaborées à partir de moyennes sur une période de temps. Cette difficulté est liée à la variabilité de la demande et des conditions de fonctionnement ; elle est également abordée dans la troisième partie (§ 2.1., p. 54).

Enfin, au-delà de l'analyse des indicateurs statistiques, il est toujours nécessaire de visualiser les simulations de la situation actuelle afin de détecter d'éventuels problèmes grossiers (erreurs dans la saisie du réseau, problème sur les trajets des véhicules, erreurs de saisie des plans de feux et des priorités).

2.3. Codage et vérification des différents scénarios projets

On appelle scénario l'ensemble des combinaisons réseau – demande en dehors des situations de calage et de validation. Les scénarios à tester doivent traduire les objectifs initiaux de l'étude et sont définis à un horizon donné. Deux principes importants doivent guider l'élaboration des scénarios à tester :

- l'utilisation préférentielle de la simulation dynamique en comparaison de scénarios plutôt qu'en absolu ;

- la validation par le commanditaire, en lien avec le prestataire, de l'ensemble des hypothèses constitutives du scénario : volume de demande, détails des aménagements et des éventuels dispositifs de régulation envisagés.

Le premier principe conduit souvent à élaborer une situation de référence qui servira de base de comparaison pour les différentes variantes. Cette situation de référence peut notamment être la situation actuelle ou un scénario « au fil de l'eau » (avec uniquement les modifications déjà prévues en dehors du projet).

Le second principe doit conduire le prestataire à bien expliquer au commanditaire les enjeux contenus dans chaque hypothèse, notamment celles sur la demande. Il faut par ailleurs se souvenir du lien existant entre l'offre et la demande. En effet, les phénomènes de réaffectation de trafic à l'échelle d'une zone plus large que la zone d'étude provoquent une modification de la demande liée à une modification de la capacité. Pour faciliter l'analyse et la comparaison des scénarios, on utilise souvent une demande constante pour différents scénarios d'aménagement. Il faut dans ce cas se cantonner à l'analyse comparée des scénarios en termes de capacité et aborder la thématique du fonctionnement avec prudence, puisque la demande liée à un scénario n'a pas pris en compte l'impact de l'offre sur la demande.

En termes méthodologiques, le codage des scénarios projets doit être accompagné de vérifications systématiques permettant de corriger d'éventuelles erreurs de codage : choix des itinéraires empruntés, vérification qualitative et quantitative du fonctionnement des scénarios.

3

Analyse des résultats et capitalisation de l'étude

3.1. Analyse qualitative et quantitative des résultats

L'analyse des résultats doit se faire en s'appuyant sur les deux sorties principales d'un modèle de simulation dynamique : les visualisations des simulations et les indicateurs quantitatifs. Deux grands principes doivent guider l'analyse et la présentation des résultats :

- revenir à l'objectif initial de l'étude pour pouvoir apporter des réponses aux questions posées en début d'étude ;
- procéder de préférence par analyses comparatives de scénarios.

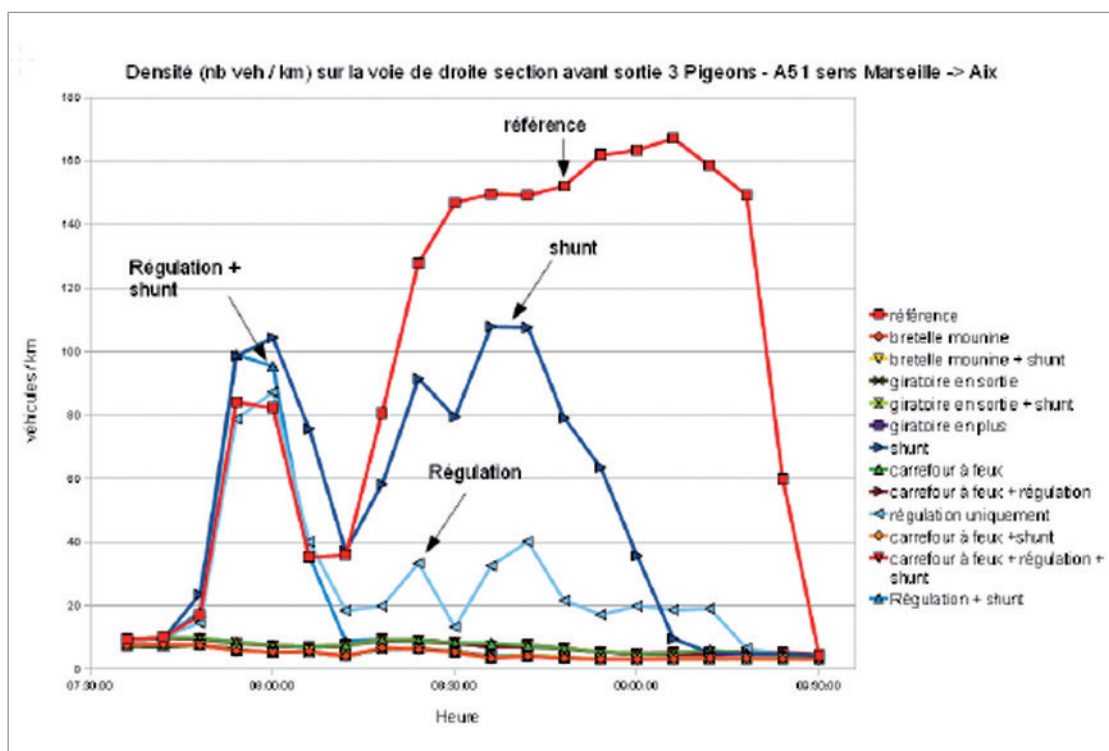
La partie 3 décrit en détail les questions liées à l'analyse des résultats : choix du scénario de référence (§ 3.2., p. 65), choix des indicateurs à étudier (§ 1.2., p. 43), niveau de précision à donner (§ 3.3., p. 66) et règles d'utilisation des visualisations (§ 3.4., p. 67). On présente ci-dessous la démarche - type d'utilisation des deux genres de résultats.

■ Analyse qualitative

Le premier niveau d'analyse des résultats est une description physique du fonctionnement des réseaux ; par exemple : « dans ce scénario, les véhicules en provenance de la branche sud ont du mal à s'insérer sur le giratoire du fait d'un trafic ouest-est important, la remontée de file résultante vient

perturber le fonctionnement du carrefour amont à partir de la moitié de la période de simulation ». Les visualisations doivent permettre de construire cette description et éventuellement de l'illustrer. En effet la visualisation des résultats de la simulation microscopique (en 2D ou 3D) est un atout majeur. Celle-ci permet de comprendre et d'illustrer les phénomènes de trafic. Elle s'adresse aux techniciens mais aussi aux élus ou au grand public grâce à son aspect communicant.

Il faut cependant avoir conscience de plusieurs pièges dans l'utilisation des visualisations. Le premier point le plus important est le fait qu'une visualisation représente les résultats d'une seule réplication qui peut ne pas être représentative des résultats globaux de l'étude. Par ailleurs, la présentation des résultats à des tiers peut conduire à deux comportements opposés, mais préjudiciables : une trop grande confiance dans les résultats ou au contraire une perte de confiance injustifiée. Dans le premier cas, le public oublie devant la visualisation des résultats toutes les hypothèses et imprécisions de l'étude. Dans le second cas, le public observe un comportement atypique de véhicules (priorité non respectée par exemple) et en tire une conclusion hâtive et erronée sur la validité du modèle, la simulation dynamique peut tout à fait être exacte à un niveau d'agrégation global sans être forcément juste au niveau individuel. Dans tous les cas, il s'agit d'être très attentif à la diffusion des visualisations.



Exemple d'exploitation quantitative d'indicateurs (source : Cerema)

■ Analyse quantitative

L'analyse d'indicateurs chiffrés permet d'objectiver les résultats, de quantifier des phénomènes et de faciliter la comparaison de scénarios. Le grand nombre d'indicateurs disponibles (capacité, temps de parcours, durées des congestions, longueurs de remontées de congestion, vitesses moyennes pendant les périodes de congestion, nombre de véhicules touchés par la congestion, retard maximal des véhicules, etc.) permet d'approcher au mieux la question posée. Deux difficultés sont à prendre en compte dans le traitement des données :

- masse trop importante d'information difficile à rendre intelligible ;
- précision illusoire de certains indicateurs.

La quantité d'information potentiellement disponible en sortie de simulation dynamique est très élevée puisqu'en théorie on peut accéder à l'ensemble des trajectoires spatio-temporelles de tous les véhicules pour tous les scénarios et pour toutes les répliques. On peut donc générer à partir de ces données de très nombreux indicateurs caractérisant le fonctionnement des scénarios. Outre les problèmes purement techniques de gestion d'une telle masse de

données, il faut porter une attention particulière à l'élaboration d'indicateurs synthétiques et de cartographies claires pour rendre intelligibles ces données. C'est un enjeu principal de la phase de présentation des résultats.

Par ailleurs, la possibilité de calculer un indicateur ne garantit pas la validité de celui-ci et il faut revenir à l'étape de calage et aux hypothèses en entrée pour connaître le degré de confiance dans un indicateur donné. À titre d'exemple, l'étude de l'évolution des congestions minute par minute n'est pas pertinente si la demande a été codée à l'heure. De la même manière, il est inutile d'étudier la répartition du trafic entre deux files dans un scénario si cet indicateur n'a pas fait l'objet de calage en situation actuelle. C'est pour cette raison qu'il faut bien définir, dès les débuts de l'étude et en interaction entre le commanditaire et le prestataire, les objectifs de la stratégie ou de l'aménagement qui sera étudié en simulation. En effet ces objectifs doivent gouverner le choix des indicateurs. Comme ces indicateurs doivent être utilisés pour le calage de la situation de référence, il est primordial qu'ils soient définis avant le recueil de données de cette situation de calage.

3.2. Rédaction d'un rapport et capitalisation de l'étude

Le rapport constitue le livrable final de l'étude en simulation dynamique. Il doit servir à répondre aux objectifs de l'étude lancée par le commanditaire ; il sera également utile ultérieurement, plusieurs mois ou plusieurs années après l'étude. Il est donc très important de disposer d'un rapport complet présentant le contexte de l'étude, la démarche de l'étude en simulation dynamique avec l'ensemble des hypothèses de travail et les résultats obtenus. Une étude en simulation dynamique passe par plusieurs étapes incontournables. Certaines sont purement techniques (ex. : codification du réseau) et il n'est pas nécessaire de les reprendre dans le rapport. D'autres étapes sont déterminantes pour comprendre la démarche de travail, énoncer les hypothèses de travail, valider le modèle, illustrer les résultats de simulation : elles feront l'objet de chapitres spécifiques dans le rapport d'étude.

Nous proposons le plan générique suivant pour le rapport qui a vocation à être adapté à chaque étude particulière.

Préparation à la modélisation

- Contexte général de l'étude.
- Rappel de la problématique et raisons d'utilisation de la simulation dynamique.
- Diagnostic global actuel (description du réseau, analyse de la demande, description et analyse du fonctionnement en mentionnant les sources sur lesquelles est basé le diagnostic).
- Description et justification du périmètre spatio-temporel de la simulation.
- Description technique des outils (logiciel, version, nombre de répliques).

Le calage/validation du modèle

- Description de la situation de calage (description de la demande utilisée, commentaires sur la fiabilité des données en entrée).
- Description détaillée du processus de calage (liste et hiérarchisation des paramètres utilisés).
- Description détaillée des résultats du processus de calage (qualitatifs, quantitatifs, indicateurs de calage).

- Conclusions sur le processus de calage/validation (domaine de validité du modèle, problèmes résiduels éventuels).

Scénarios testés et analyse

- Description de l'ensemble des scénarios testés (hypothèses de demande, de réseau et de régulation, mise en perspective des hypothèses de demande).
- Résultats des tests (description et justification des indicateurs utilisés, évaluation de leur niveau de confiance, présentation des résultats, analyse qualitative et quantitative détaillée pour chaque scénario).

Synthèse

- Rappel de la question initiale.
- Synthèse du travail réalisé.
- Synthèse des résultats de modélisation et éléments de réponses par rapport à la problématique initiale.

Les outils de simulation dynamique fournissent des volumes de données assez conséquents, ce qui laisse beaucoup de liberté d'analyse et produit potentiellement nombre de tables de résultats et de graphiques. La plus-value réside donc dans l'analyse et l'interprétation des résultats, et non dans la restitution brute des graphiques et des tableaux.

Ces parties pourront être complétées par d'autres parties plus spécifiques dédiées au contexte et à l'étude.

3.3. Points de partage et de validation par le commanditaire

La réalisation d'une étude de simulation dynamique est un travail en coopération entre un prestataire et un commanditaire. Pour s'assurer de la satisfaction de ce dernier vis-à-vis de l'étude, il est nécessaire de partager les résultats de certaines parties du travail et de faire valider certaines étapes clés lors de réunions spécifiques :

- le diagnostic de fonctionnement actuel, le périmètre spatio-temporel de la modélisation et le choix des indicateurs d'analyse ;
- le processus de calage et validation ;
- la présentation des résultats de la simulation et la validation finale de l'étude.

Préalablement au travail de modélisation des scénarios, le commanditaire doit valider la définition précise de ceux-ci (liste des scénarios et détails des hypothèses). L'étape de définition des scénarios peut être abordée lors de la réunion de présentation du calage, lors d'une réunion spécifique, ou se faire à distance. Les premiers résultats pourront conduire à la définition de nouveaux scénarios.

3.4. Éléments indispensables d'une étude

Le présent guide décrit le processus de réalisation d'une étude dans les règles de l'art. Il arrive dans un contexte opérationnel que les données, les moyens et le temps disponibles ne permettent pas de suivre l'ensemble des préconisations. Certaines phases sont

indispensables et doivent être effectuées sous peine d'ôter toute crédibilité aux résultats obtenus :

- analyse préalable de la pertinence de la simulation dynamique pour la question posée ;
- processus de calage du modèle, ou à défaut explications et justifications des paramètres retenus ;
- travail explicite et justifié sur l'élaboration des données de demande ;
- utilisation d'une demande distinguant VL et PL, avec un pas de temps de discrétisation cohérent avec les phénomènes à tester ;
- niveau d'analyse des résultats cohérent avec la précision du calage et de l'élaboration de la demande.

Une méthode efficace de lever des incertitudes sur des données d'entrée (demande notamment) et sur des paramètres utilisés consiste à effectuer des tests de sensibilité des résultats.

T R O I S I È M E P A R T I E

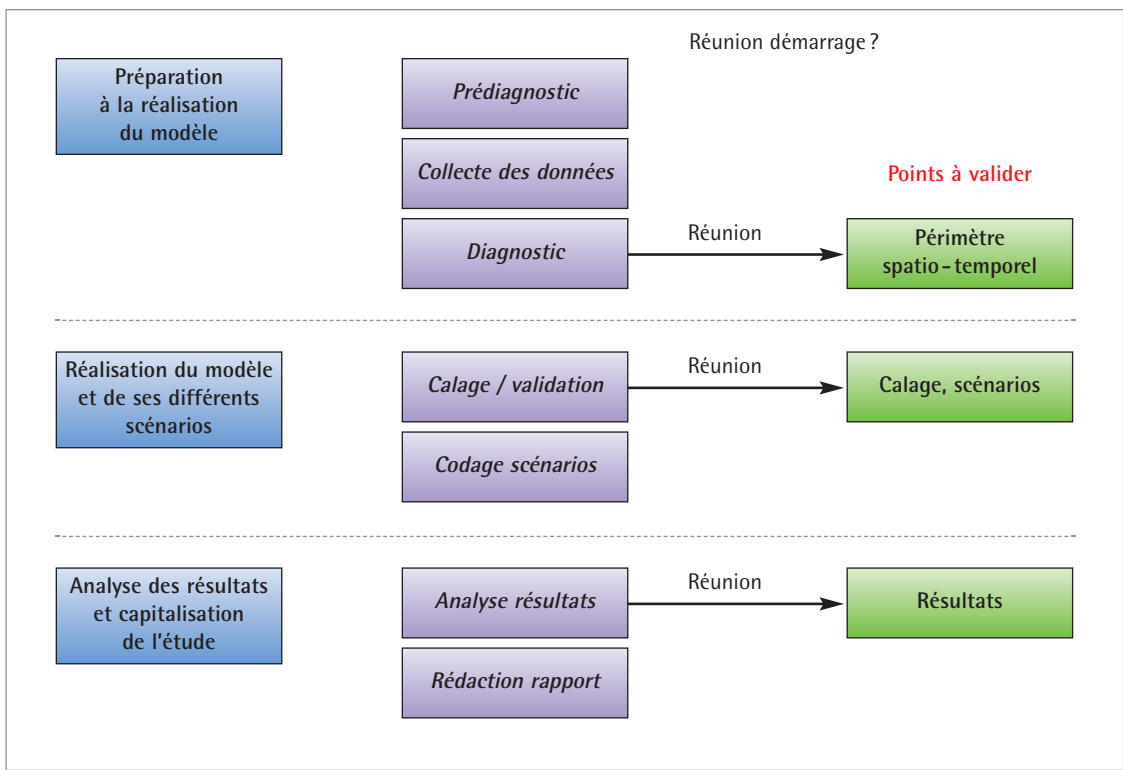
Réponses aux questions fréquentes

Réponses aux questions fréquentes

1 Questions sur la préparation de l'étude

1.1. Combien de temps pour réaliser une étude en simulation dynamique ?

La démarche proposée dans ce guide pour la réalisation d'une étude de simulation dynamique est décrite dans l'illustration ci-dessous :



Démarche de réalisation d'une étude de simulation dynamique

Le temps nécessaire à la réalisation d'une étude de simulation varie en fonction de son étendue spatiale et de sa complexité. Il faut aussi prendre en compte l'expérience sur le logiciel de l'équipe.

On propose dans le tableau ci-après un estimatif des temps à passer en fonction du type d'étude. Les éléments suivants permettent d'estimer le temps à consacrer à chaque phase.

■ Préparation à la réalisation du modèle

Définition du périmètre d'étude et des horizons de modélisation (pré-diagnostic)

Cette étape a un double objectif de définition de la zone d'étude et de la demande de trafic à prendre en compte. La réalisation de cette étape nécessite un à trois jours.

Collecte et mise en forme des données nécessaires au codage du réseau

Les fonds de plans peuvent être fournis par le commanditaire ou disponibles sur des sites web de cartographie numérique. Dans ce cas, la saisie du réseau se fait à la main dans l'outil de simulation dynamique. Le temps qui y sera consacré dépend à la fois de la taille du réseau, de la complexité de la géométrie des différents carrefours et échangeurs et de la facilité de saisie de l'outil choisi. L'ergonomie de l'interface de saisie et l'utilisation d'outils d'import peuvent permettre de réduire la phase de codage au profit de la phase de calage du modèle.

La plupart des logiciels disponibles permettent d'importer directement des réseaux sous format SIG. Le niveau de détail fourni est cependant insuffisant par rapport aux besoins de codification précise des réseaux nécessaires à la réalisation d'un modèle dynamique (nombre de voies, codification des mouvements tournants voie par voie, régime de priorité), mais on obtient un «squelette» du réseau à modéliser. La codification précise des nœuds peut s'avérer chronophage si l'on a besoin de modéliser des carrefours complexes (par exemple un carrefour à feux microrégulé ou avec des priorités aux transports collectifs). La compréhension fine du fonctionnement du carrefour est à prendre en compte et dépend du niveau de détail des documents fournis. Des échanges avec les gestionnaires de réseau ou leurs sous-traitants s'avèrent souvent nécessaires.

Dans tous les cas, il faut prévoir des visites sur le terrain pour recueillir les informations manquantes et valider celles qui ont été saisies. Ces visites serviront aussi par la suite à la réalisation du diagnostic trafic.

Collecte et mise en forme des données nécessaires au codage de la demande

Le temps consacré à intégrer la demande de trafic dépend de la période à simuler (nombre d'heures,

matin, soir, périodes caractéristiques), de son découpage dynamique (données à 6 minutes, 15 minutes, etc.), des types de véhicules à prendre en compte. Il dépend également de la capacité de l'outil retenu à intégrer facilement ces données (saisie manuelle, copier/coller depuis un tableur, import automatique).

Par exemple, si l'on doit simuler une période de trois heures avec des matrices O/D au quart d'heure et deux types de véhicules (VL et PL), il faudra importer ou créer 24 matrices dans l'outil de simulation.

Les données relatives aux transports collectifs sont également à prendre en compte dans certaines études, il faut prévoir du temps pour la collecte et la saisie des informations (itinéraires des lignes, arrêts, temps d'arrêt, horaires). La durée de cette étape dépend une fois de plus de la capacité de l'outil à automatiser l'import de ces données selon leur disponibilité sous forme de base de données et de la qualité des données fournies par le commanditaire de l'étude.

Collecte des informations nécessaires à l'analyse des conditions de circulation (= diagnostic trafic)

Le diagnostic trafic peut être élaboré à partir de données qualitatives issues de rencontres avec les gestionnaires/exploitants, de visites sur le terrain pour observer les phénomènes de trafic et les informations issues des sites d'information routière, ainsi que de données quantitatives issues des enquêtes réalisées. L'analyse et la mise en forme des données peuvent se faire sous forme de cartes, courbes, flux, etc. Le temps à consacrer au diagnostic trafic est de l'ordre de quelques jours.

■ Réalisation du modèle et des scénarios

Calage et validation du modèle

Les étapes de codage/calage puis de validation sont les plus chronophages. Le temps à consacrer dépend :

- des critères de calage fixés au préalable (comparaison données simulées et données réelles, écarts relatifs, absolus, R2, etc.) ;
- de l'expérience de l'équipe en charge de cette phase ;

- des fonctionnalités de l'outil pour faciliter cette étape de calage (import et affichage de données réelles, calcul de courbe de régression, affichage de la qualité du calage par points de mesure, etc.) ;
- de la quantité de paramètres disponibles dans l'outil et à ajuster pour les besoins de l'étude. La phase de calage peut s'avérer plus courte avec un outil disposant de peu de paramètres à calibrer mais laissera moins de latitude pour affiner cette phase de calage. En outre, un tel outil peut s'avérer inadapté pour modéliser une situation particulière (par exemple un carrefour avec des comportements agressifs aux «cédez-le-passage», carrefour à feux présentant un débit de saturation très élevé, etc.) ;
- de la qualité des données disponibles et de leur mise en cohérence.

Le temps à consacrer à l'étape de calage/validation du modèle peut varier entre trois jours pour une étude simple jusqu'à plusieurs dizaines de jours pour une étude plus complexe.

Codage des scénarios

L'étape de codification d'un scénario projet prend peu de temps en comparaison de la phase de calage/validation. Pour l'implémentation, il suffit de

modifier le scénario calé (changement d'un carrefour, modifications géométriques, évolutions de la demande, implémentation d'une stratégie de régulation, etc.). Pour la vérification du scénario, il faut dans un premier temps s'assurer que l'ensemble des répliques se sont déroulées correctement (surveiller les éventuels autoblocages³) et effectuer des vérifications manuelles. Un élément pouvant cependant allonger la durée de cette phase est le temps de calcul qui peut devenir significatif dans le cas de très gros réseaux. Il faut compter entre une demi-journée et trois jours par scénario dans les plus gros réseaux.

■ Analyse des résultats et capitalisation de l'étude

L'analyse des scénarios nécessite un travail préalable pour bien définir le processus et la représentation des indicateurs utilisés. Par ailleurs, la réalisation de documents, de graphiques ou de cartes peut augmenter le temps nécessaire à l'analyse des scénarios. Une grande partie du travail réalisé à cette étape pourra servir à la réalisation de supports de présentation (diaporama et vidéos) et à la rédaction du rapport. En fonction de la complexité de l'étude, il faut compter entre trois et neuf jours pour une étude classique.

3 Un autoblocage est un phénomène de modélisation conduisant à un blocage artificiel du réseau du fait de véhicules se laissant successivement la priorité. Ce phénomène peut se produire dans la réalité en cas de saturation extrême du réseau, mais généralement la situation se débloque par des manœuvres non prévues dans la modélisation (véhicules qui reculent ou qui quittent temporairement leur file pour passer le carrefour). Après avoir identifié et soupesé les risques réels d'autoblocage du réseau, les situations d'autoblocage dans la modélisation doivent donc généralement être éliminées du reste de l'analyse.

Nombre de jours estimatif pour la réalisation d'une étude

Étapes de l'étude	Cas simple	Cas moyen	Cas complexe
Préparation à la réalisation du modèle	Entre 3 et 5 jours	Entre 9 et 11 jours	30 jours
Réalisation du modèle et des scénarios dont : – calage – codage des scénarios (par scénario)	Entre 4 et 6 jours – 3 jours – 0,5 jour	Entre 13 et 18 jours – 8 jours – 1 jour	35 jours – 20 jours – 3 jours
Analyse des résultats et capitalisation	Entre 3 et 5 jours	Entre 8 et 9 jours	Entre 25 et 30 jours
Total	Entre 10 et 16 jours	Entre 30 et 38 jours	Entre 90 et 95 jours
Durée prévisionnelle	1 à 2 mois	3 à 4 mois	10 à 12 mois
Montant prévisionnel	≈ 10 k€ TTC	≈ 20 à 30 k€ TTC	≈ 100 à 150 k€ TTC

(source : Cerema)

Les estimations sont faites sur les hypothèses suivantes :

- cas simple : un carrefour ou un échangeur simple avec un nombre limité de scénarios (2-5) ;
- cas moyen : zone plus étendue avec deux à quatre carrefours/échangeurs éventuellement plus complexes avec un nombre moyen de scénarios (5-10) ;
- cas complexe : zone étendue (40 km) avec de nombreux carrefours/échangeurs (une vingtaine) avec un nombre limité de scénarios (2-5).

Ces estimations sont données à titre indicatif.

1.2. Pourquoi et comment choisir préalablement les indicateurs à analyser ?

Les indicateurs sont des grandeurs physiques calculées soit directement par le modèle, soit ultérieurement par combinaison de ses résultats. Les indicateurs dynamiques peuvent être agrégés par un pas de temps à définir par l'utilisateur, éventuellement sur l'ensemble de la période d'étude pour obtenir une valeur unique. Dans le cas d'un modèle microscopique stochastique, les indicateurs sont calculés pour chaque réplication et il faut alors choisir en plus une méthode d'agrégation par réplication (maximum, moyenne, médiane, etc.).

■ La problématique de l'agrégation

Pour illustrer la problématique de l'agrégation, on peut étudier l'évolution de la vitesse sur un

capteur au cours de la période de simulation. On présente dans les trois graphes ci-après, la valeur dynamique en continu sur la période d'étude pour une réplication, son agrégation par pas de 90 secondes (moyenne par pas de temps) et enfin une deuxième agrégation sur l'ensemble des réplifications (moyenne sur les réplifications des moyennes par pas de temps). On peut enfin calculer un indicateur unique sur l'ensemble de la période d'étude, ici par exemple 55 km/heure en moyenne.

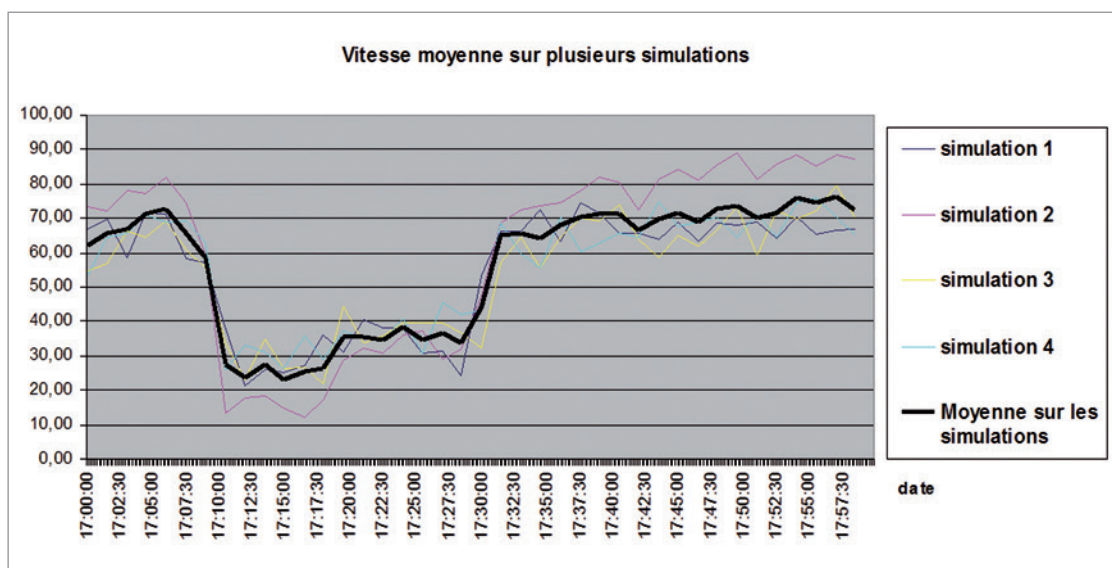
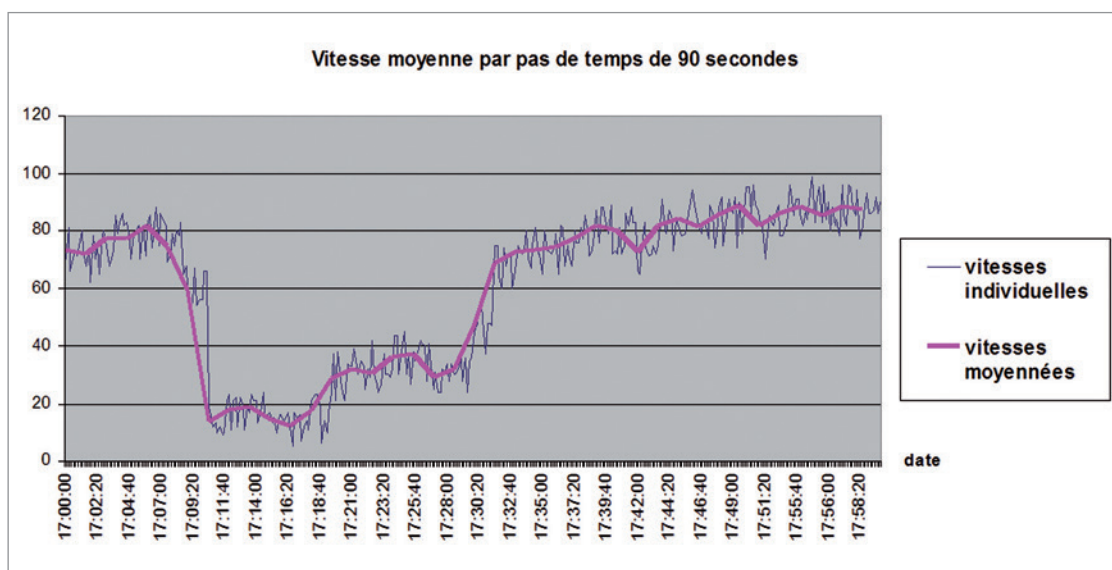
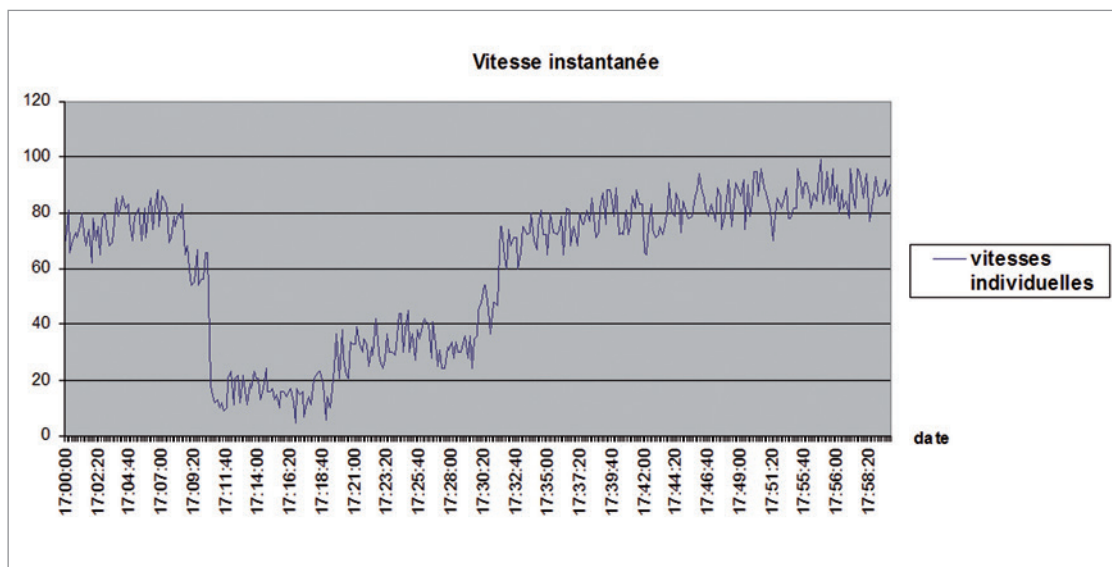
Le choix de la méthode d'agrégation dépend des objectifs.

L'agrégation par réplication

Concernant les réplifications, on étudie en premier lieu la variabilité des résultats en utilisant par exemple l'écart-type sur les réplifications. Une variabilité élevée des résultats peut provenir :

- d'un problème de modélisation avec des valeurs aberrantes sur une réplication donnée (due à un autoblocage par exemple) et on élimine dans ce cas de l'analyse les valeurs de cette réplication ;
- d'une variabilité réelle due à une situation instable en limite de saturation. Cette instabilité doit alors faire l'objet d'une analyse spécifique pour évaluer la crédibilité de ce résultat, notamment par rapport à la variabilité observée de la situation réelle mesurée.

Une fois la variabilité étudiée, on utilise généralement la moyenne sur les réplifications ou éventuellement les valeurs maximales (dans le cas d'études à des fins de sécurité : remontée de file sur un passage à niveau ou dans un tunnel par exemple).



Exemple d'agrégation d'un indicateur

L'agrégation temporelle

La prise en compte de la dynamique de l'écoulement du trafic est l'intérêt central de la simulation dynamique et il faut donc veiller lors du choix de l'agrégation temporelle des indicateurs à conserver cette information pour l'analyse du fonctionnement de la zone. En effet, une valeur moyennée sur une période peut cacher de grandes disparités au cours de la période d'étude. Une agrégation par période de 90 secondes par exemple permet une analyse de la dynamique du système en lissant les variations.

L'incertitude sur la dynamique des indicateurs est cependant assez grande. Il faut donc se rapporter aux résultats obtenus lors du calage, et notamment à la reconstitution de la dynamique de la situation actuelle pour évaluer la fiabilité des résultats. Par ailleurs, la dynamique des indicateurs est étroitement liée à la dynamique de la demande sur laquelle repose toujours une grande incertitude, même lorsque l'on a utilisé un petit pas de description (6 minutes par exemple). Pour toutes ces raisons, il est toujours utile d'analyser également des indicateurs plus agrégés, notamment pour des comparaisons de scénarios.

■ La problématique du choix des indicateurs

Le choix des indicateurs étudiés doit être basé sur deux principes fondamentaux :

- les indicateurs choisis doivent permettre d'apporter des réponses aux questions posées en préalable par le commanditaire de l'étude, en cohérence avec les objectifs du projet étudié ;
- le degré de confiance sur la fiabilité du modèle pour les indicateurs doit être le plus fort possible, idéalement évalué lors du processus de calage du modèle.

Cohérence des indicateurs

avec les objectifs du projet

La simulation dynamique a généralement pour objectif l'évaluation a priori d'un nouveau projet ou d'une nouvelle politique d'exploitation et le choix des indicateurs doit permettre de fournir les éléments nécessaires à cette évaluation. L'évaluation a priori pour savoir si les mesures prévues permettront d'atteindre les objectifs ne peut se baser que sur des indicateurs qui mesurent l'écart à l'objectif.

Par exemple, si on souhaite tester l'interdiction dynamique de doubler pour les poids lourds dans une section en rampe, il est impératif d'avoir calé le modèle en situation actuelle avec les vitesses pratiquées par type de véhicules et par voie, ceci tout au long de la période d'étude.



Interdiction dynamique de doubler pour les PL (source : Cerema)

Fiabilité des indicateurs

Les indicateurs recueillis au cours de l'expérimentation de collecte de données, qui sont utilisés pour le calage, et ceux qui seront la base de la présentation des résultats finaux doivent dans la mesure du possible être identiques. En effet, le calage fixe les paramètres qui permettent d'obtenir la meilleure adéquation entre le modèle et la réalité telle qu'elle est vue au travers des indicateurs de calage mesurés sur le terrain au cours de l'expérimentation. Tous les indicateurs ne peuvent pas cependant être mesurés sur le terrain et il faut alors utiliser des mesures connexes qui traduisent le même phénomène (mesure des vitesses pour évaluer l'heure d'apparition de la congestion par exemple).

Les indicateurs doivent donc être discutés avec le commanditaire dès les premières réunions pour permettre leur recueil, leur utilisation pour le calage et leur exploitation dans l'analyse. Cette discussion sur les indicateurs permettra de bien préciser les objectifs poursuivis par le commanditaire.

■ Exemples d'indicateurs et points d'attention

Comme indiqué précédemment, le choix des indicateurs d'analyse est spécifique à chaque étude et à ses objectifs. On peut cependant donner des exemples d'indicateurs classiquement utilisés par grands types d'études.

Un certain nombre d'indicateurs peuvent parfois être redondants (car corrélés entre eux) et il faut viser la simplicité en ne multipliant pas inutilement les graphiques :

- temps passés et retards par exemple sont équivalents à une constante près (le temps de parcours à vide) ;
- temps de parcours et vitesse moyenne sur un tronçon sont complètement équivalents, l'un étant inversement proportionnel à l'autre ;
- le nombre de véhicules sur une branche d'un carrefour et la remontée de file illustrent généralement le même phénomène : la densité du trafic sur la branche ;
- etc.

4 On n'a directement accès à la capacité via le débit écoulé que lorsque la demande est supérieure à la capacité.

Exemples d'indicateurs en fonction du type d'étude

Politique à évaluer	Exemple d'indicateur	Agrégation temporelle
Comparaison de solutions d'aménagement d'un carrefour	• Capacité globale du carrefour⁴ • Capacité des branches du carrefour • Temps passé (ou retard) total • Temps passé (ou retard) par branche • Remontée de file maximale par branche (ou nombre de véhicules maximal sur la branche) • Remontée de file par branche (ou nombre de véhicules sur la branche)	• Moyenne par heure • Moyenne par heure • Moyenne par heure • Moyenne par heure et par pas de temps (90 s) • Maximum par heure • Moyenne par pas de temps (90 s)
Comparaison de solutions d'aménagement sur une zone urbaine étendue	Éventuellement pour les carrefours les plus importants, indicateurs ci-dessus. • Temps global passé sur le réseau pour l'ensemble des usagers • Temps de parcours sur les couples origine-destination les plus importants	• Somme sur la période • Moyenne sur la période
Évaluation de la modification de la demande sur une zone d'étude	• Temps passé sur le réseau • Temps de parcours global sur les couples origine-destination les plus importants	• Somme sur la période • Moyenne sur la période
Évaluation du risque de remontée de file dans un tunnel ou sur un passage à niveau	• Remontée de file maximale sur la branche • Remontée de file sur la branche	• Maximum sur la période • Moyenne par pas de temps (90 s)
Évaluation d'une politique de régulation dynamique sur une autoroute péri-urbaine	• Temps de parcours sur l'autoroute • Remontée de file sur la bretelle régulée • Date d'apparition de la congestion • Temps global passé sur le réseau pour l'ensemble des usagers • Temps maximal sur la bretelle la plus pénalisée • Débit écoulé	• Moyenne par pas de temps (90 s) • Moyenne par pas de temps (90 s) • À partir de la vitesse par pas de temps

Un certain nombre de phénomènes peuvent interférer artificiellement sur la mesure des indicateurs et perturber l'analyse. Ces phénomènes doivent être connus pour comprendre certaines incohérences apparentes de résultats :

- les vitesses en un point sont facilement mesurables, mais une petite différence entre les situations calées et situations mesurées peut se traduire par un grand écart sur cet indicateur (ralentissement qui atteint un capteur ou s'arrête juste en amont par exemple) ;
- la mesure du nombre de véhicules sur un tronçon est tronquée lorsque la remontée de file dépasse ce tronçon ;
- la mesure d'un temps de parcours sur une origine destination est potentiellement trompeuse lorsque la remontée de file dépasse l'origine ;

- il peut exister des effets de bord en fin de simulation pour les indicateurs basés sur les véhicules terminant leurs trajets (temps de parcours par exemple) ;
- il peut exister des effets d'agrégation temporelle pour les carrefours à feux lorsque le pas de temps n'est pas cohérent avec les cycles de feux.

1.3. Comment organiser un recueil de données spécifique ?

On a détaillé dans la partie 1, § 1.3. (p. 13), partie 2 § 1.2. (p. 24) à § 1.4. (p. 26), les données nécessaires à la réalisation d'une étude de simulation dynamique et que l'on peut récapituler dans le tableau suivant :

Sources de données pour la simulation dynamique

	Situation actuelle	Scénarios projets
Offre (description du réseau)	Visites terrain / Photos aériennes / Photos en ligne / Informations exploitants réseaux et TC	Fonds de plan d'aménagement (par exemple format dxf) fourni par le commanditaire ou étude spécifique
Demande	Recueil de données	Étude spécifique
Fonctionnement actuel	Visites terrain / Interview usagers-exploitants / Recueil données	

(source : Cerema)

Le recueil de données a donc pour objectif de recueillir les éléments nécessaires à l'estimation de la demande et à l'objectivation des conditions de circulation pour servir à la fois au diagnostic de fonctionnement actuel et au calage du modèle de simulation dynamique. On présente ici les grandes familles de méthodes de recueil de données utiles pour la mise en place de la simulation dynamique.

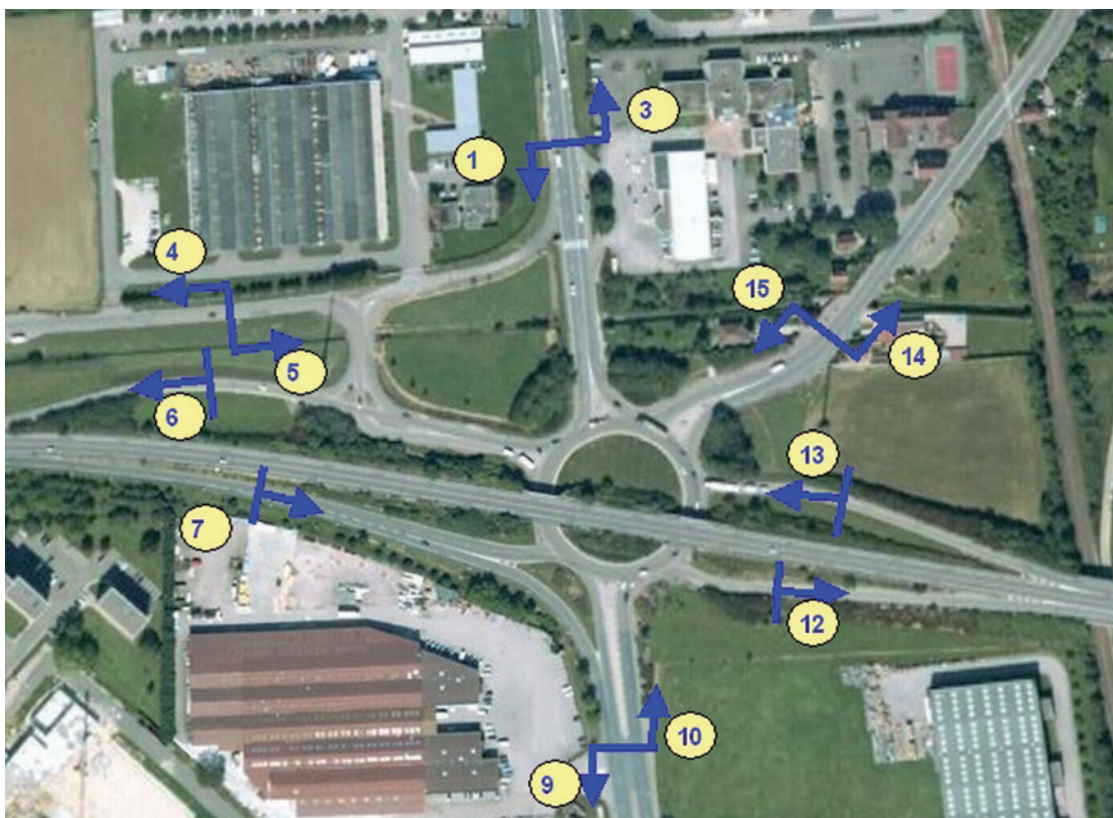
■ Estimer la demande en entrée du modèle

La détermination de la demande en situation actuelle est une étape indispensable à la reconstitution de la situation actuelle. Il est préconisé pour cela d'associer une campagne de comptages automatiques sur une période de temps élargie (deux semaines) à une méthode de recueil de flux origine-destination sur une période plus restreinte (périodes de pointe à simuler) en veillant à la cohérence des données obtenues par les deux types de recueils. Les comptages

automatiques vont permettre de replacer les valeurs de l'enquête dans un plus large contexte et ils vont également fournir des informations sur la variabilité sur plusieurs jours de la demande de trafic.

D'une manière générale, on peut faire les recommandations suivantes sur ce recueil :

- employer un matériel adapté (radar ou plaques magnétiques notamment) pour les postes délicats ;
- localiser les postes le plus possible en dehors de la congestion et prévoir une méthode de redressement si la congestion remonte en amont du poste ;
- choisir la période d'enquête de manière à intégrer l'apparition et la disparition de la congestion ;
- un pas de temps de l'ordre de 15 minutes est un bon compromis entre reconstitution de la dynamique de la demande et difficulté de traitement des données. Pour tester des mesures d'exploitation (comme de la régulation dynamique par exemple), ce pas de temps doit cependant être encore réduit.



Exemple de campagnes de comptage (source : Cerema, fonds de plan Geoportail)

Pour obtenir des flux origine-destination pour la simulation dynamique, il existe deux solutions : les comptages directionnels et l'enquête par relevé de plaques minéralogiques. Il est à noter que les données issues de systèmes « *floating car data* » ne peuvent pas être utilisées comme données d'entrées pour la demande, car on ne dispose pas d'éléments pour faire de redressement. Elles peuvent en revanche se révéler très utiles pour les temps de parcours.

Comptages directionnels

Les comptages directionnels peuvent être effectués manuellement par une équipe d'enquêteurs (chacun gérant un groupe d'origine/destination) ou par relevé par caméra avec exploitation semi-automatique via des logiciels spécialisés de traitement de l'image. Lorsque la configuration du carrefour se prête à l'installation d'une caméra, ce système présente l'avantage de permettre des vérifications sur la demande en cours d'étude et de disposer d'informations sur les comportements (insertions par exemple) et sur le fonctionnement si le champ de prise de vue est suffisamment élargi. Il est à noter cependant que les vidéos font l'objet de restrictions d'usage pour

préserver le respect de la vie privée (conditions d'utilisation des vidéos à définir en conformité avec l'avis de la CNIL). Les comptages directionnels ne sont généralement adaptés qu'à l'étude des carrefours isolés.

Enquête origine-destination par relevé de plaques minéralogiques

L'enquête origine-destination par relevé de plaques minéralogiques peut être effectuée par une équipe d'enquêteurs munis de dictaphones ou par relevé automatique de plaques par caméra. L'enquête OD minéralogique est l'enquête idéale pour la simulation dynamique, car elle permet d'avoir les matrices origine-destination à n'importe quelle agrégation temporelle et d'obtenir en parallèle pour chaque OD une information dynamique de temps de parcours. Il faut cependant noter qu'elle demande une très bonne organisation, un bon dimensionnement du nombre d'enquêteurs et un très bon suivi du déroulement, car les difficultés potentielles sont nombreuses : enquêteur défaillant, erreurs de lecture (notamment dans de mauvaises conditions de visibilité) conduisant à de faux mariages, mauvaise synchronisation des horloges



Enquête par relevé de plaques minéralogiques (source : Cerema)

aux différents postes. Pour le relevé par caméra, les taux de reconnaissance des plaques minéralogiques sont très variables d'un site à l'autre et dépendent de la position de la caméra (inclinaison, angle par rapport au soleil, prise des plaques sur la face avant des véhicules qui devra être préférée à la prise arrière mais ne peut pas toujours être réalisée...). Il est donc important d'avoir une mesure extérieure du débit. Il est souvent d'usage de ne pas relever l'intégralité des plaques minéralogiques pour préserver le respect de la vie privée, mais cela peut conduire également à de faux mariages. Pour relever la plaque entière, il faut prévoir des dispositifs de cryptage des plaques. On relève également souvent des incohérences entre les relevés automatiques et les relevés manuels aux postes. Toutes ces difficultés peuvent conduire à des matrices origine-destination insuffisamment fiables et à des temps de parcours inexploitable. Enfin, l'enquête minéralogique n'est pas adaptée aux zones d'études trop élargies et/ou avec un trafic trop important et il faut dans ces cas spécifiques imaginer d'autres méthodes d'estimation de la demande à partir des comptages. L'enquête minéralogique ne

permet pas par ailleurs de recenser le trafic interne à la zone d'étude surtout en zone urbaine. Les autres jours de recueils (comptages) permettront de redresser les trafics et d'ajuster la demande sur une période non perturbée par l'enquête.

Campagne de comptages automatiques

La campagne de comptages automatiques est généralement indispensable en accompagnement des recueils de flux OD pour avoir des informations sur une période élargie. Les comptages fournissent également des informations sur le fonctionnement via les débits, les vitesses ou les taux d'occupation. Sur des réseaux simples (carrefours à trois branches par exemple) ou sur des réseaux aux caractéristiques autoroutières (avec notamment des échangeurs dénivelés dans lesquels chaque mouvement peut être compté automatiquement sur les bretelles), un relevé exhaustif de l'ensemble des mouvements peut permettre de reconstituer des matrices origine-destination ou fournir les mouvements tournants qui peuvent suffire à la description de la demande pour la simulation dynamique.



Compteurs automatiques de type radar (source : Cerema)

■ Objectiver les conditions de circulation

Le recueil des données de condition de circulation permet de valider la reconstitution de la situation actuelle par la modélisation et donc le réglage des paramètres. La visite terrain aux périodes de pointe est dans tous les cas indispensable et peut faire l'objet d'un reportage photo et/ou vidéo très utile lors de la phase du calage du modèle. En dehors de cet aspect qualitatif, il est également nécessaire d'effectuer des mesures quantitatives automatiques et/ou manuelles :

- relevés de temps de parcours ;
- remontées de files ;
- débits, vitesses.

On détaille ci-dessous les méthodes disponibles pour chacun de ces indicateurs. Il faut noter que le recueil de données lui-même (surtout avec enquêteurs) peut avoir des effets sur les conditions de circulation (effet de curiosité) sur des secteurs proches de la saturation.

Temps de parcours

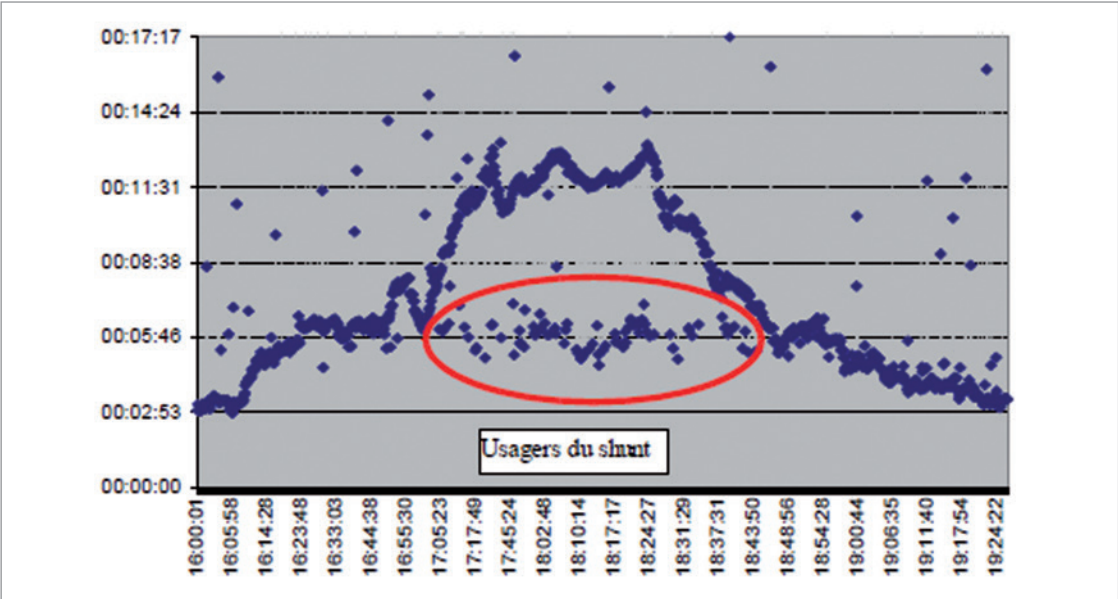
Les enquêtes OD minéralogiques bien menées doivent permettre de disposer de temps de parcours dynamiques et cohérents avec la demande : c'est donc une méthode à privilégier.

Les recueils de temps de parcours par véhicule isolé dans la circulation (par GPS ou simple chronomètre) sont globalement utiles au diagnostic, mais difficilement exploitables de manière quantitative dans la

simulation dynamique du fait du caractère ponctuel de la mesure.

Le développement massif de l'électronique embarquée à bord des véhicules est une nouvelle source de données commercialisées par les opérateurs de manière agrégée (dispositifs de guidage par GPS, systèmes «d'aide à la conduite»). Ces données sont une source très utile pour la simulation dynamique, car elles permettent d'obtenir des temps de parcours globaux ainsi que sur des sections de l'itinéraire à différents moments de la journée. Ces données permettent également d'avoir des informations sur des périodes de temps élargies, ce qui est très précieux pour évaluer la variabilité des temps de parcours. Même s'il faut faire attention à la fiabilité de ces données et notamment la taille des échantillons sur lesquels elles sont calculées, les temps de parcours par «floating car data» (FCD) sont amenés à être plus largement utilisés à l'avenir pour la simulation dynamique.

D'autres méthodes de recueil des temps de parcours existent ou sont en cours de développement et sont basées sur le principe de repérage d'un même véhicule à différents endroits d'un itinéraire : lecture automatisée de plaques d'immatriculation (LAPI), repérage d'identifiants uniques bluetooth d'appareils électroniques, détection de la signature électromagnétique des véhicules par un magnétomètre (assure également le comptage des véhicules). Ces dispositifs sont particulièrement adaptés au recueil de temps de parcours sur des itinéraires linéaires avec peu d'échanges.



Exemple d'exploitation temps de parcours par lecture automatisée de plaques d'immatriculation (source : Cerema)

Remontées de files

Le recueil de remontées de files peut être réalisé par des enquêteurs ou par caméra. C'est un indicateur difficile à recueillir, notamment dans des conditions de circulation «en accordéon». Il faut se limiter au recueil sur des remontées de file «dures» (véhicules à l'arrêt) et limitées spatialement. L'analyse des compteurs automatiques et notamment des vitesses pratiquées peut donner une information précieuse sur la dynamique spatiale des remontées de files (notamment lorsqu'il y a plusieurs capteurs), mais il faut faire attention aux effets de seuil (dans le cas où une file est susceptible de remonter au niveau du capteur).

Débits, vitesses

Les compteurs automatiques fournissent des données intéressantes pour la simulation dynamique, et notamment les débits écoulés et les vitesses. Il faut cependant garder en mémoire que la fiabilité des comptages diminue en situation de forte saturation (vitesse inférieure à 20 km/h notamment).

1.4. Quel type de modèle ?

Il existe trois grands types de modèles dynamiques de trafic : microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques.

Les modèles microscopiques modélisent le flux de trafic en simulant la trajectoire de chaque véhicule sur le réseau.

Les modèles mésoscopiques ont une représentation intermédiaire qui permet de spécifier des comportements de conduite individuels. On trouve notamment dans la littérature des approches de modélisation par peloton ou par événement, un événement étant par exemple défini comme le passage d'un véhicule à un nœud du réseau.

Les approches événementielles sont couramment employées, car les résultats bruts d'un modèle mésoscopique événementiel donnent les temps de passage individuels des véhicules à chaque nœud du réseau. L'avantage de cette approche réside donc dans le fait que chaque véhicule est modélisé individuellement et on peut ainsi lui attribuer un itinéraire donné dans le cas de réseaux maillés comme en modélisation microscopique.

Les modèles macroscopiques modélisent les flux globaux à partir de variables globales (débit, vitesse, concentration) et de quelques équations (conservation des flux et diagramme fondamental reliant le débit et la concentration).

Le tableau suivant détaille les grandes caractéristiques de chaque famille de modèles, étant entendu qu'il existe de nombreuses variantes pour chaque famille de modélisation.

Caractéristiques des différentes familles de modèles

	Demande	Réseau	Modèle	Indicateurs	Temps de calcul
Modèles microscopiques	Prise en compte de différentes catégories de véhicules (VL / PL / TC / piétons / vélo)	Description fine des trajectoires au sein des carrefours, des mouvements tournants, les zones de stockage et de remontée de files d'attente, etc. Pertinent pour des réseaux urbains ou interurbains pas trop étendus	Prise en compte des comportements de conduite (poursuite, insertions, temps de réaction, etc.) Adapté pour faire de l'affectation (voire de l'affectation dynamique)	Tous les types d'indicateurs sont calculables, mais la validité de chaque indicateur est à questionner spécifiquement. Exemple : chronique de temps de parcours pour les PL, nombre de changements de voie, etc.	Temps de calcul proportionnel au temps total des temps passés par les véhicules, modèles stochastiques (plusieurs réplications nécessaires)
Modèles mésoscopiques	Prise en compte délicate de différentes catégories de véhicules (VL / PL / TC)	Définition plus grossière en définissant un réseau comme des liens homogènes connectés entre eux par des nœuds	Généralement la concaténation d'un modèle d'écoulement, d'un modèle de convergent, d'un modèle de divergent et d'un modèle d'affectation	Tout type d'indicateurs, agrégés par liens ou par itinéraires, liés au temps de parcours ou au débit	Temps de calcul proportionnel au nombre d'événements sur un réseau, un événement étant défini comme le passage d'un véhicule à un nœud du réseau
Modèles macroscopiques	Prise en compte délicate de différentes catégories de véhicules. On raisonnera davantage en unités de véhicules particuliers (UVP) pour tenir compte du taux de PL, avec toutes les limites qu'implique cette hypothèse	Définition plus grossière en définissant un réseau comme des liens homogènes connectés entre eux par des nœuds	Modèle agrégé peu performant sur les réseaux très maillés. Dans ce cas, les flux sont séparés à chaque bifurcation du réseau et conduisent à modéliser des fractions de débit qui n'ont plus de sens physique	Tout type d'indicateurs agrégés par liens et liés à la vitesse ou au débit sur les liens. Fiabilité des indicateurs facile à estimer Exemple : temps de parcours sur une section, chronique de débit en aval d'un échangeur	Temps de calcul proportionnel à la taille et à la complexité du réseau ainsi qu'à la durée de simulation

(source : Cerema)

■ Choix d'un modèle

Dans la plupart des cas, le type de modèle est choisi en fonction de l'expérience du modélisateur sur lequel il est formé, et évidemment du logiciel disponible. La plupart des logiciels présents sur le marché sont basés sur des modèles microscopiques et parfois mésoscopiques. Idéalement, le choix de l'échelle de modélisation est un compromis entre la capacité de l'outil à reproduire le fonctionnement du réseau actuel et

futur, les performances de calcul de l'outil, l'échelle du réseau à évaluer et l'expertise du prestataire sur le type de modèle retenu. Il est également possible de combiner les différents types de modèles et d'adopter une démarche hybride, en modélisant un réseau étendu avec un modèle mésoscopique en intégrant de la modélisation microscopique de certains carrefours à l'intérieur de ce réseau. En dehors des considérations de disponibilité d'un logiciel, on peut lister les avantages et inconvénients de chaque type d'approche.

Avantages et inconvénients des différentes familles de modèles

	Demande	Réseau	Calage	Résultats	Temps de calcul
Modèles microscopiques	Prise en compte de différentes catégories de véhicules (VL / PL / TC / piétons / vélo)	Souplesse de modélisation	Calage délicat du fait d'un grand nombre de paramètres non mesurables	Tout type d'indicateur ou de visualisation (y compris 3D) mais fiabilité à vérifier	Temps de calcul pouvant devenir rédhibitoires sur de grands réseaux
Modèles mésoscopiques	Prise en compte délicate de différentes catégories de véhicules	Modélisation simplifiée	Calage facilité par un nombre de paramètres restreint	Indicateurs agrégés par sections mais plus robustes	Temps de calculs restreints
Modèles macroscopiques	Prise en compte délicate de différentes catégories de véhicules	Modélisation simplifiée	Calage facilité par un nombre de paramètres restreint	Indicateurs agrégés par sections mais plus robustes	Temps de calculs restreints

(source : Cerema)

1.5. Quelles autres approches possibles ?

■ Dimensionnement et études de giratoires : Girabase

Girabase est un logiciel de calcul de capacité de carrefour giratoire à partir de trafics directionnels UVP. Cet outil statique est basé sur des formules empiriques et ne permet pas de prendre en compte l'interaction entre plusieurs carrefours, ni les giratoires à feux ou à priorité à droite. Girabase ne permet pas de prendre en compte une demande dynamique. Pour les giratoires standard (en taille et en configuration), Girabase est le meilleur outil disponible. Pour les giratoires particuliers en interaction forte avec les autres carrefours, la simulation dynamique est nécessaire, mais une vérification de cohérence avec les résultats de Girabase peut être utile. Girabase est un outil développé par la DtecTV du Cerema (ex CERTU) et disponible sur le site du Cerema (www.certu-catalogue.fr/girabase-logiciel-version-4-0-1999.html)

■ Dimensionnement et études de carrefours à feux

Le calcul statique de capacité d'un carrefour à feux est basé sur des règles simples: la capacité est proportionnelle à la durée de vert par voie et au nombre de files, une voie écoule généralement

1 800 UVP par heure et les mouvements gênants (tourne à gauche ou à droite) sont pénalisés. Le calcul statique ne permet pas de prendre en compte les interactions avec les autres carrefours et notamment les remontées de files dans le carrefour. Pour des carrefours à feux standard (en taille et en configuration), le calcul statique est la méthode la plus efficace. Pour des carrefours particuliers et pour la prise en compte détaillée des interactions entre différents carrefours ou entre différents modes, la simulation dynamique est la méthode la plus adaptée.

■ Méthodes analytiques

Il est possible de modéliser simplement (à la main ou par un simple tableur) des situations de trafic élémentaires. Ce sont des approches analytiques pour lesquelles la solution du modèle peut être obtenue en se basant uniquement sur des formules, des relations ou des techniques de résolution mathématique. Parmi elles, la méthode des stocks (ou méthode des débits cumulés) permet de calculer de manière analytique les résultats d'une situation de trafic et d'estimer des indicateurs utiles tels que des temps de parcours (chronique, min, max, moyenne), des longueurs de remontées de file ou encore des temps totaux passés sur le réseau. Pour plus de détails sur ces méthodes, le lecteur est renvoyé à la lecture de *Comprendre le trafic routier, méthode et calcul* (Buisson, Lesort, 2010).

2 Questions sur la réalisation de l'étude

2.1. Comment définir une situation de référence pour le calage ?

La situation de calage se définit selon l'objectif de l'étude, il n'y a donc pas de méthode systématique permettant de la définir. La situation de calage correspond au scénario de trafic observé sur le terrain et qui servira à déterminer les valeurs des paramètres de l'outil de simulation, afin qu'il reproduise les conditions de trafic observées sur le terrain. La définition de la situation de référence pour le calage se heurte notamment à la difficulté de la variabilité de la demande de trafic et des conditions de circulation. Ce point est abordé au cours de l'étude lors de la phase de diagnostic (voir partie 2, § 1.4. p. 26).

Dans le cas d'une situation présentant une relative stabilité des conditions de circulation hors événements exceptionnels, la situation de référence peut être un jour spécifique, généralement celui correspondant au recueil de données. C'est la situation la plus facile puisque les données de demande et de fonctionnement ont été recueillies ensemble et sont donc cohérentes. Il faut cependant vérifier que le recueil n'a pas perturbé le fonctionnement et que la journée choisie est représentative de la situation courante, ce qui implique un recueil de données sur une période plus longue.

Dans le cas d'une variabilité plus importante des conditions de circulation, il faut tout d'abord quantifier les variabilités (importance des écarts à la moyenne et nombre de jours s'écartant d'une situation de base). Il faut ensuite essayer d'identifier les causes de la variabilité des conditions de trafic en écartant au maximum les situations exceptionnelles (événements climatiques, accidents). En dehors de ces événements particuliers, deux causes principales peuvent expliquer une variabilité des conditions de circulation : variabilité de la demande ou réseau en limite de saturation pouvant passer rapidement et aléatoirement de l'état fluide à l'état congestionné.

■ Variabilité de la demande

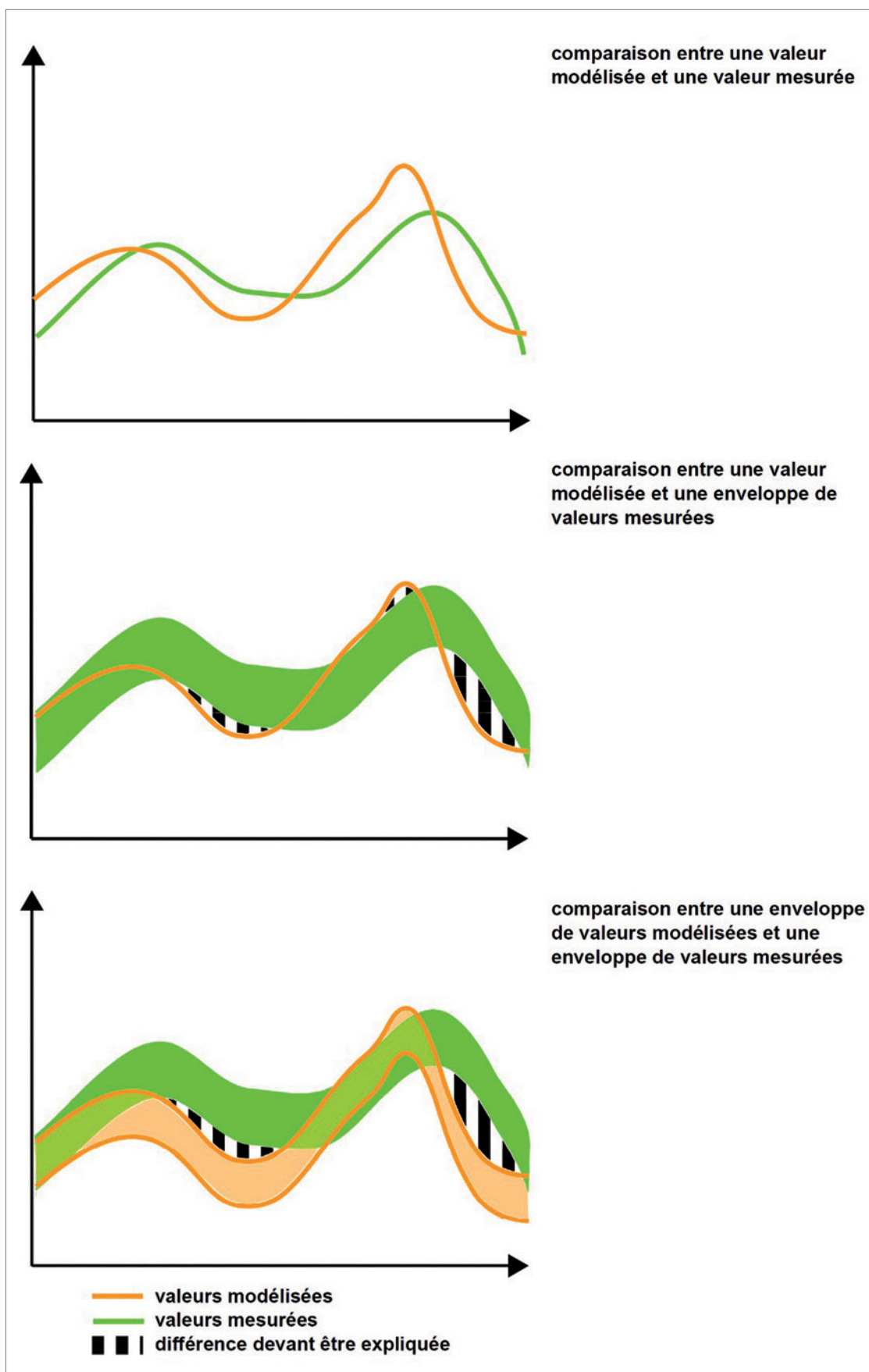
En cas de variabilité de la demande, il peut être nécessaire de définir plusieurs situations de référence pour le calage. Outre le travail supplémentaire provoqué par une telle stratégie, il faudra par ailleurs être capable de mettre en correspondance chaque demande avec les conditions de circulation, ce qui nécessite un travail conséquent d'analyse et de recueil de données. L'utilisation de plusieurs situations de référence (par exemple jour de semaine normal et vendredi soir) ne se justifie que si le changement de la demande provoque un changement significatif de fonctionnement du réseau. Par ailleurs, il faut noter que la reconstitution d'une situation complètement fluide ne présente généralement qu'un intérêt limité pour le calage.

■ Situation en équilibre instable

Dans le cas d'un réseau à limite de capacité et en équilibre instable, la situation de référence ne sera pas uniquement une situation moyenne, mais une enveloppe de situations comprenant un minimum, une moyenne, un maximum et un écart - type (voir schéma ci-après). La phase de calage devra alors intégrer une dimension supplémentaire qui est la variabilité des résultats. Cette approche n'est possible que dans le cas de la modélisation microscopique qui est stochastique, alors que les approches mésoscopiques et macroscopiques sont généralement déterministes.

Dans le schéma ci-après (d'après *Jaume Barcelo 2010*), on représente les trois solutions de comparaison données réelles/données simulées en fonction de la variabilité de la situation actuelle :

- comparaison des résultats simulés agrégés à une situation actuelle agrégée ;
- comparaison des résultats simulés agrégés (rouge) à une enveloppe de situations actuelles mesurées (vert) ;
- comparaison d'une enveloppe de résultats simulés (rouge) à une enveloppe de situations actuelles mesurées (vert).



2.2. Comment faire en l'absence d'une situation de référence pour le calage ?

Dans le cas de travaux neufs ou de grandes modifications du réseau, le prestataire peut ne pas disposer de situation de référence pour le calage du modèle, soit parce qu'il n'y a pas de situation actuelle, soit parce qu'elle est trop différente de la situation future. Par ailleurs, des délais très serrés ou des moyens financiers insuffisants peuvent avoir empêché dans certains cas le recueil de données de demande et de fonctionnement nécessaires au calage.

L'étape de calage est une étape essentielle pour s'assurer de la validité des résultats d'une simulation dynamique. Sans cette étape de calage, il n'est pas sûr que les valeurs des paramètres du modèle permettent de reproduire correctement les trafics qui circulent sur le réseau d'étude.

S'il s'agit d'un problème conjoncturel (manque de moyens ou de temps), il faut tout d'abord alerter le commanditaire pour tenter de le convaincre de procéder à un recueil de données permettant de caler à minima le modèle en s'appuyant si nécessaire sur les recommandations du présent ouvrage. Dans certains cas complexes, il peut être préférable de refuser de mener l'étude en simulation dynamique si le modélisateur considère que le nombre d'hypothèses est si fort que l'outil de simulation dynamique n'apportera pas d'éclairage pour l'évaluation demandée par le commanditaire.

Dans le cas d'un problème structurel (pas de situation de calage), deux solutions sont envisageables :

- recourir à des outils autres que la simulation dynamique. Il existe d'autres outils que la simulation dynamique pouvant fournir des éléments d'aide à la décision et ne nécessitant pas de démarche de calage. Ces méthodes sont abordées dans la foire aux questions (partie 3, § 1.5. p. 53) ;
- mener l'étude en simulation dynamique avec une méthodologie adaptée. Dans ce cas, le calage proprement dit de l'outil de simulation est impossible. Toutefois, il est possible d'ajuster les valeurs de certains paramètres en se reposant sur certaines hypothèses :

- la valeur d'un paramètre peut être **ajustée selon sa signification physique**, si elle est mesurable (ex. : distance à l'arrêt entre les véhicules),
- la valeur d'un paramètre peut également être **déterminée à dire d'expert**, sur la base de l'expérience du modélisateur,
- la valeur d'un paramètre peut également être **fixée par analogie** avec une étude antérieure et présentant des similarités.

Dans tous les cas, il est nécessaire de faire une liste exhaustive des hypothèses faites sur la valeur des paramètres. L'analyse des résultats de la simulation dynamique devra faire l'objet d'encore plus de précautions que dans une étude classique : vérification de la cohérence en visualisation des résultats, vérification de l'ordre de grandeur de résultats (capacité de voies par exemple), analyse prioritairement en comparaison de scénarios et non en résultats absolus. Par ailleurs, une étude de sensibilité aux paramètres clés pourra très utilement venir conforter les analyses menées et donner des éléments sur la variabilité possible des résultats aux hypothèses internes de modélisation.

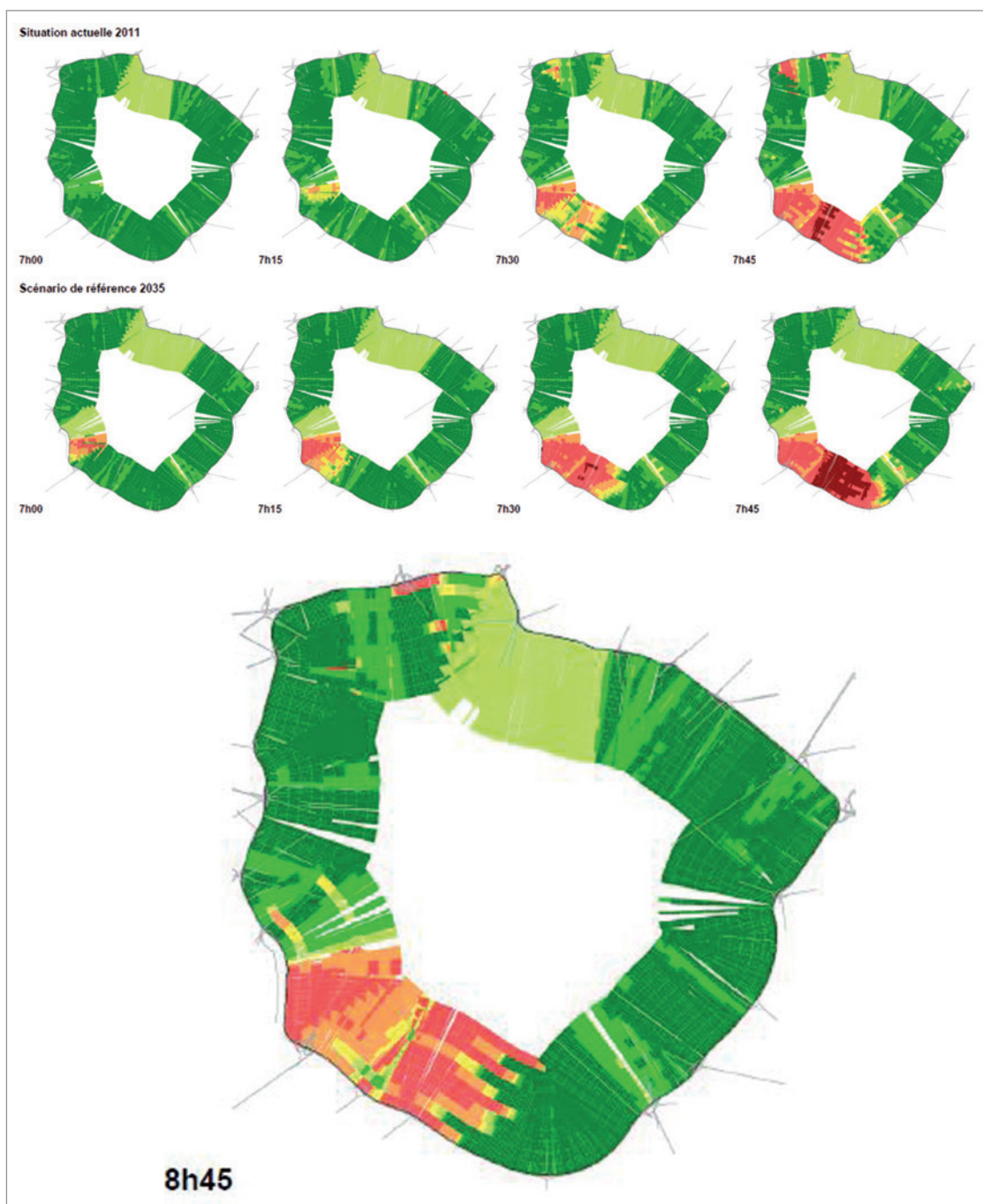
2.3. Combien de réplifications ?

Comme expliqué dans la partie 2, § 2.2. (p. 29) sur le calage les outils de simulation microscopiques sont «stochastiques» afin de représenter le caractère aléatoire des comportements de conduite. Cela signifie que certains paramètres sont répartis selon une loi de probabilité et qu'à chaque simulation ils sont déterminés par un tirage aléatoire. Ces paramètres stochastiques sont nombreux : tirage des moments de création des véhicules, tirage des paramètres comportementaux des véhicules (paramètres de la loi de poursuite, probabilité de vouloir changer de voie à un instant donné, etc.). Par conséquent, pour un même scénario, deux simulations successives ne donneront pas les mêmes résultats. Chaque modélisation correspondant au tirage d'un ensemble des variables aléatoires pour les mêmes hypothèses de réseau et de demande s'appelle une réplification.

Par ailleurs, le trafic routier, et plus généralement les déplacements, sont des phénomènes non linéaires

où une petite augmentation de la demande par exemple peut conduire à une forte congestion non présente pour une demande légèrement inférieure. C'est une des forces des outils de simulation dynamique d'être capables de reproduire ces basculements entre deux situations différentes alors que les conditions initiales sont très semblables. Cependant, ceci s'accompagne d'un certain nombre de recommandations impératives pour les utiliser correctement.

La question du nombre minimal de répliques nécessaire pour obtenir une estimation suffisante de la distribution des comportements est une question actuellement débattue entre spécialistes. Il existe des méthodes complètes, mais coûteuses en temps. A minima, il faut s'assurer que le nombre de répliques soit suffisant pour qu'une nouvelle réplique ne change pas significativement la moyenne et l'écart-type des résultats entre toutes les répliques.



Exemple de représentation de résultats dynamiques sur 10 répliques
(source : PTV / DREAL Pays de la Loire, chaque anneau représente la vitesse sur une réplique)

On peut proposer la méthode suivante : réaliser si c'est envisageable en termes de temps de calcul 10 répliques (ce qui est un bon compromis entre temps de calcul et représentativité statistique) et effectuer une première analyse approfondie de la variabilité des résultats (écart-type, écarts entre les minimums et les maximums). Si l'écart-type est faible et qu'aucune réplique ne s'éloigne significativement de la moyenne, on peut continuer le travail avec 10 répliques.

- Si la variabilité des résultats est importante après avoir écarté les éventuelles répliques divergentes, il faut regarder si la situation réelle actuelle est effectivement instable.
- Si la situation actuelle est instable et dans des proportions similaires à la simulation dynamique, il n'est pas nécessaire d'augmenter le nombre de répliques.
- Si la situation actuelle est instable, mais avec des proportions différentes à la situation de calage, on peut augmenter progressivement le nombre de répliques tout en réinterrogeant le calage.
- Enfin si la situation de calage est stable, il faut en priorité réinterroger le calage avant d'augmenter le nombre de répliques pour faire diminuer la variabilité des résultats.

2.4. Comment déterminer la demande future de déplacements ?

La détermination de la demande future de déplacements est un enjeu majeur pour les résultats globaux de l'étude. En fonction des impacts du projet sur la demande de déplacements et de l'horizon de temps étudié, plusieurs méthodes peuvent être utilisées et, dans certains cas, combinées.

■ Utilisation de la demande actuelle

On utilise dans ce cas la demande élaborée lors de la phase de calage.

■ Évolution de la demande par taux de croissance

On fait évoluer la demande élaborée lors de la phase de calage en appliquant un ou plusieurs taux de

croissance sur les différents flux constituant la demande. Les taux de croissance à utiliser peuvent être notamment déterminés par une analyse de l'historique des comptages sur les différentes branches du réseau étudié. On peut également en milieu interurbain utiliser les taux de croissance du trafic préconisés pour les études de trafic par le projet d'instruction sur les méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains (DGR 2007, annexe 5). En milieu urbain, on peut utiliser les hypothèses issues des objectifs du Plan de déplacements urbain.

■ Modification manuelle de la demande

Dans le cas d'un projet modifiant directement la demande (création d'un pôle générateur de trafic par exemple), on peut modifier directement la demande de trafic actuelle en ajoutant les volumes de trafic induits par le projet. Cela nécessite d'être capable d'estimer, à partir de ratios, la demande générée par le projet et il faut rendre cette demande dynamique avec le même pas de temps que la demande actuelle. On peut par ailleurs ajouter la nouvelle demande de déplacements à la matrice initiale ou à la matrice déjà modifiée par des taux de croissance.

■ Calcul de la demande par un modèle d'affectation

Un modèle d'affectation statique attribue aux déplacements constituant une matrice origine/destination un itinéraire sur le réseau en prenant en compte les caractéristiques (longueur, vitesse, courbes débits-vitesses) de chaque élément du réseau. L'affectation repose généralement sur l'idée que les usagers utilisent les itinéraires dont le coût généralisé (temps et argent, généralement) est minimal. Généralement, la matrice affectée sur le réseau est construite à partir d'enquêtes pour la situation actuelle et modifiée à partir de taux de croissance du trafic. Un modèle d'affectation construit sur un périmètre plus large que la zone d'étude peut donc fournir la demande sur la zone d'étude à simuler dynamiquement. Il faut rendre cette demande dynamique avec le même pas de temps que la demande actuelle, généralement en se basant sur la dynamique de la demande actuelle.

■ Calcul de la demande par un modèle de déplacements

Un modèle de déplacements (*Bonnef 2004*) détermine, à partir de données socio-économiques (répartition de la population et des emplois, principaux pôle générateurs de déplacements) et d'une description fine des réseaux, la demande de déplacements sur le réseau à une période donnée (généralement l'heure de pointe du matin et du soir). En milieu urbain, les modèles les plus répandus sont les modèles multimodaux de déplacements à quatre étapes. Les quatre étapes sont la génération (combien de déplacements sont émis ou attirés par une zone donnée) ; la distribution (détermination

des couples origine/destination) ; le choix modal (pour chaque couple origine/destination combien de déplacement vont utiliser les différents modes) et enfin l'affectation. Un modèle de déplacements construit sur un périmètre plus large que la zone d'étude peut donc fournir la demande sur la zone d'étude à simuler dynamiquement. Il faut rendre cette demande dynamique avec le même pas de temps que la demande actuelle, généralement en se basant sur la dynamique de la demande actuelle.

Dans des cas spécifiques, d'autres méthodes d'élaboration de la demande peuvent être envisagées. Les conditions d'utilisation de chacune des grandes méthodes sont détaillées ci-dessous.

Récapitulatif des différentes méthodes d'estimation de la demande future

Type de méthode	Champ d'utilisation	Avantages	Inconvénients
Utilisation de la demande actuelle	Projet testé sans influence directe sur la demande, avec peu d'impact sur les itinéraires des véhicules et à horizon de temps rapproché.	Demande bien connue et déjà déterminée lors du calage. Facilité de comparer les évolutions dues au projet.	Ne prend en compte aucun des effets du projet sur la demande de déplacement.
Évolution de la demande par taux de croissance	Projet testé sans influence directe sur la demande, avec peu d'impact sur les itinéraires des véhicules et à horizon de temps à moyen terme. Peut servir de test de sensibilité à la demande.	Facilité de mise en œuvre.	Incertitude sur les taux de croissance à retenir et impact fort de ces taux sur les résultats.
Modification manuelle de la demande	Projet d'urbanisme ou d'aménagement ayant pour effet d'ajouter une demande supplémentaire à la demande existante sans modification des itinéraires existants.	Facilité relative de mise en œuvre.	Incertitude sur les ratios de génération à utiliser. Difficulté à connaître la dynamique de la nouvelle demande.
Calcul de la demande par un modèle d'affectation	Projets ayant un impact direct sur les itinéraires des usagers.	Prise en compte directe des changements d'itinéraires et de l'évolution globale de la demande.	Nécessité d'élaborer ou de disposer un modèle d'affectation. Difficulté à connaître la dynamique de la nouvelle demande. Peut conduire à différentes demandes pour les différents scénarios projets et compliquer l'analyse.
Calcul de la demande par un modèle de déplacements	Tout projet ayant un impact significatif sur l'organisation des déplacements.	Prise en compte de la quasi-totalité des éléments pouvant modifier la demande.	Nécessité de disposer d'un modèle de déplacements. Difficulté à connaître la dynamique de la nouvelle demande. La précision d'un modèle sur une zone réduite peut être faible et nécessiter un travail d'adaptation complémentaire.

(source : Cerema)

2.5. Quels tests de sensibilité ?

La phase de réalisation d'une étude de simulation dynamique (après les phases de préparation à la modélisation) consiste à coder le modèle (offre et demande), caler et valider le modèle, puis coder les scénarios futurs. Lors de la phase de codage et calage, le modélisateur doit déterminer les valeurs d'un nombre important de paramètres et lors de la phase de codage des scénarios, le modélisateur doit prendre des hypothèses (hypothèses sur le réseau, sur la demande, etc.). Hypothèses et paramètres constituent un ensemble de variables du modèle.

Tester la sensibilité d'un modèle à ses variables d'entrées permet de quantifier la robustesse des résultats présentés. Les modèles dynamiques de trafic comportent un très grand nombre de variables et, au-delà de l'impact que peut avoir la variation d'une variable d'entrée sur un indicateur donné, il peut parfois s'avérer nécessaire d'utiliser des méthodes d'analyse globale de la sensibilité capables d'estimer les impacts cumulés de modifications de variables.

Dans le cas d'une étude spécifique de sensibilité, une recherche bibliographique ciblée sera nécessaire, car il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la sensibilité d'un modèle (B. Ios 2011). Nous proposons ci-dessous une démarche d'étude de sensibilité.

■ Inventaire des variables

La première phase consiste à recenser de la manière la plus exhaustive possible l'ensemble des variables du modèle (paramètres et hypothèses).

■ Sélection des variables étudiées

Le nombre très important de variables d'un modèle impose de faire un tri pour déterminer celles qui feront partie de l'analyse de sensibilité. En ce qui concerne les paramètres, le choix doit être lié aux enseignements de la démarche de calage (voir partie 2, § 2.2., p. 29). On utilisera d'abord les paramètres globaux ayant le plus d'influence sur les résultats (paramètres leviers), puis éventuellement des paramètres globaux moins influents. Il n'est

a priori pas nécessaire de tester des paramètres n'ayant pas été modifiés lors de la phase de calage. Il est possible également d'intégrer certains paramètres locaux dans des secteurs clés du modèle. Des premiers tests d'élasticité simples peuvent contribuer au processus de sélection des variables à analyser.

En ce qui concerne les hypothèses, le choix des hypothèses à inclure dans les tests de sensibilité devra se faire en lien avec la maîtrise d'ouvrage en fonction de l'incertitude qui pèse sur chaque hypothèse.

■ Choix des intervalles de variation

L'analyse de la sensibilité s'appuyant sur la variation de variables d'entrées, il faut déterminer l'intervalle de variation des variables ainsi que le pas de variation. Dans le cas d'un paramètre ayant un sens physique (temps de réaction ou distance de visibilité par exemple) la détermination de cet intervalle pourra se baser sur la cohérence de la variable qu'il retranscrit. La détermination de l'intervalle doit également se baser sur l'expérience du modélisateur et sur les indications de l'éditeur du logiciel utilisé. Si la variable est une hypothèse, son intervalle de variation peut être caractérisé par le degré d'incertitude vis-à-vis de cette hypothèse.

■ Choix des indicateurs d'analyse

Le choix des indicateurs d'analyse pour les tests de sensibilité doit se baser sur les principes et contraintes suivantes :

- les indicateurs d'analyse doivent être une valeur à une dimension. La simulation dynamique fournit un grand nombre d'indicateurs de manière dynamique sur l'ensemble de la simulation. Pour pouvoir faire des analyses de sensibilité, il faut un indicateur agrégé à une seule valeur ;
- les indicateurs d'analyse doivent être ceux sur lesquels sera basée l'analyse globale de l'étude. La réponse aux questions posées à l'origine de l'étude sera effectuée sur la base de l'analyse de certains indicateurs (voir partie 3, § 1.2., p. 43). Pour évaluer la robustesse des réponses apportées, les tests de sensibilité doivent donc porter sur les mêmes

indicateurs. Par exemple, pour un modèle construit pour évaluer les risques de remontées de files dans un tunnel, on peut choisir comme indicateur la remontée de file maximale au cours de la simulation. Étant donné les temps de calcul nécessaires aux tests de sensibilité, il est nécessaire de limiter le nombre d'indicateurs étudiés (généralement en dessous de 5).

■ Tests unitaires

Le principe des tests unitaires consiste à modifier une seule variable à la fois et à évaluer l'impact de cette variation sur les résultats du modèle. Il faut déterminer à la fois la plage de variation de la variable et le pas de variation. On peut alors analyser la sensibilité du modèle en calculant les effets élémentaires ou la sensibilité du modèle :

Effet élémentaire

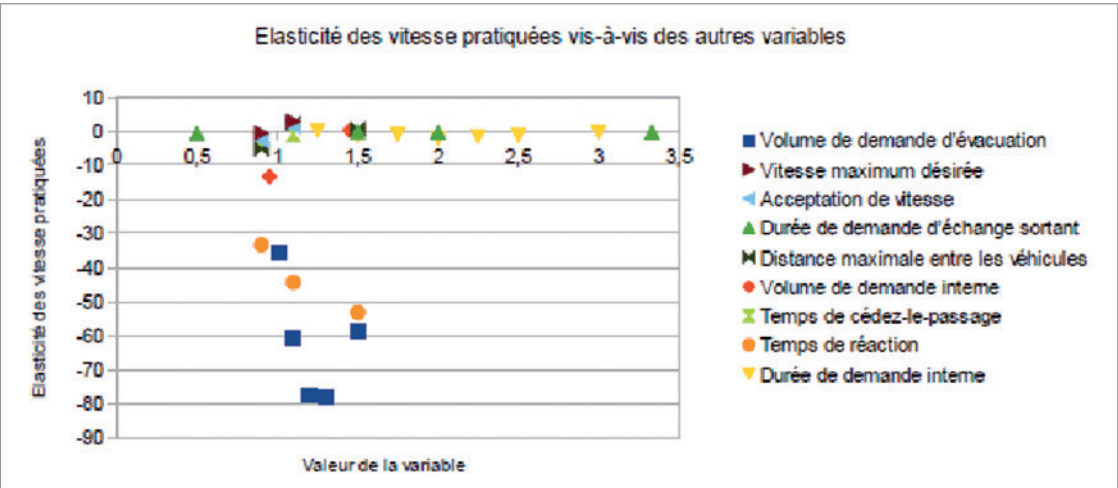
$$\text{Effet élémentaire} = e(x) = \frac{y(x) - y_0}{x - x_0}$$

Où :
x représente la valeur de la variable et x_0 sa valeur à l'état initial ;
y représente la valeur de l'indicateur et y_0 sa valeur à l'état initial.

Élasticité

$$\epsilon(y, x) = \frac{\frac{\Delta(y)}{y}}{\frac{\Delta(x)}{x}} = \frac{x}{y} \cdot \frac{\Delta(y)}{\Delta(x)}$$

x représente la valeur de la variable testée et $\Delta(x)$ sa variation
y représente la valeur de l'indicateur choisi et $\Delta(y)$ sa variation suite à la modification de x.



Exemple de représentation de l'élasticité unitaire d'un modèle
(source : Cerema, extrait de Étude de sensibilité du modèle d'évacuation de Grenoble)

■ Analyse globale

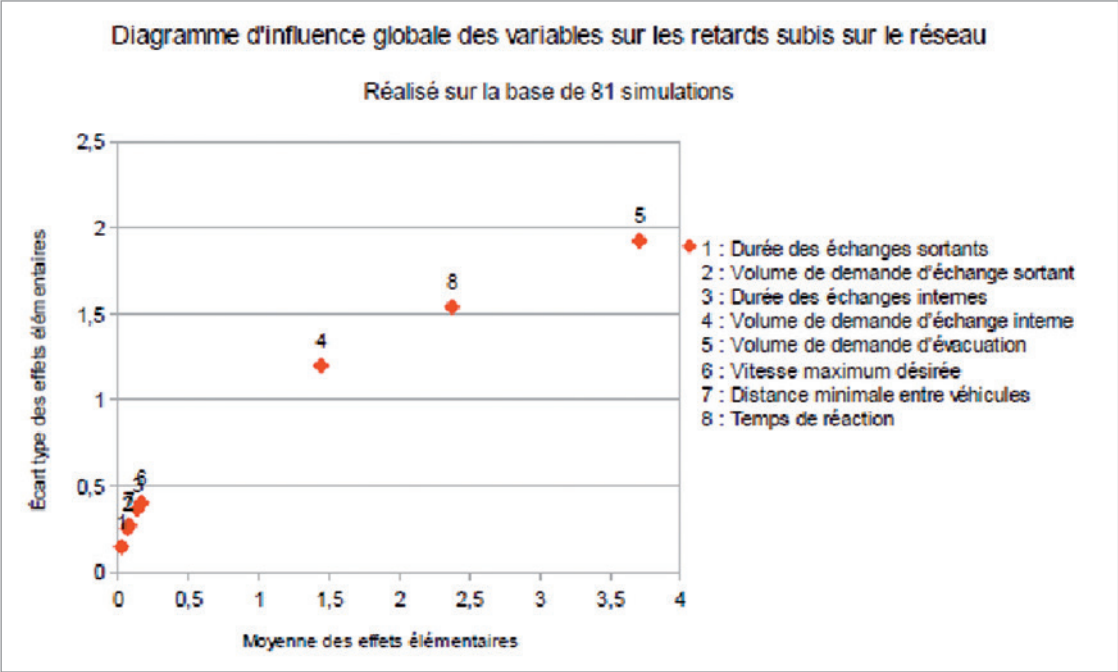
Le calcul de l'élasticité du modèle à une variable ne permet pas de prendre en compte les effets cumulés de modification de plusieurs variables d'entrées simultanément. Il existe des méthodes permettant de déterminer les éventuelles corrélations entre variables. La méthode de Morris (B. Loss 2011) consiste à calculer les moyennes et écarts-types des effets sur un grand nombre de variations aléatoires pour hiérarchiser les influences des variables et leur corrélation. La méthode consiste à

déterminer aléatoirement des «chemins» de variation de variables en modifiant successivement toutes les variables à étudier. Chaque plan d'expérience nécessite p+1 simulations où p est le nombre de variables à tester. On calcule avec cette méthode la moyenne des effets élémentaires pour chaque variable ainsi que l'écart-type correspondant. Cette méthode permet ainsi de classer les variables en trois groupes :

- effets négligeables ;
- effets linéaires et sans interactions ;
- effets non linéaires et/ou avec interactions.

Il est nécessaire dans cette méthode de répéter un nombre important de fois les plans d'expérience. Étant donné que chaque test en simulation dynamique

nécessite une dizaine de réplifications, la méthode de Morris nécessite un nombre très important de modélisations et donc un temps de calcul très significatif.



Exemple de représentation des résultats d'un test de Morris
(source : Cerema, extrait de Étude de sensibilité du modèle d'évacuation de Grenoble)

2.6. Quel couplage avec des modèles environnementaux (air ou bruit) ?

Que ce soit en air ou en bruit, le couplage est techniquement possible. Néanmoins, la validation de la chaîne de modélisation (trafic – émission – propagation/dispersion) et l'estimation des incertitudes associées constituent un verrou scientifique. C'est vrai pour le bruit, où les travaux déjà bien avancés se poursuivent. C'est encore plus vrai pour les polluants atmosphériques, parce que les incertitudes à chaque étape de la chaîne sont nombreuses.

En bruit, le principal verrou scientifique est la recherche d'un ou plusieurs indicateurs acoustiques pertinents. Les indicateurs usuels ($L_{Aeq}(6h-22h)$ ⁵, $L_{Aeq}(22h-6h)$, L_{den} , L_{night} ...) sont souvent critiqués, mais ils possèdent certaines qualités qui les rendent difficilement détrônables : calculables simplement et de manière opérationnelle, mesurables. Des indicateurs dynamiques ont été proposés, et constituent des pistes intéressantes. Ils sont basés

sur une analyse statistique de L_{Aeq15} et calculables grâce à une simulation dynamique de trafic. Ils pourraient par exemple contribuer à traiter la problématique de multi-exposition, ou à expliquer pourquoi pour un même L_{Aeq} le bruit ferroviaire est en général moins gênant que le bruit routier.

Pour les polluants atmosphériques, les verrous scientifiques sont nombreux, à chaque étape de la chaîne de modélisation. Le principal verrou concerne la difficulté à valider les résultats par la mesure : en effet, les sources extérieures au trafic routier ne sont pas maîtrisées, et l'influence de la météo rend difficile toute interprétation des mesures. Des méthodes innovantes sont à trouver. Par ailleurs, il est pour l'instant illusoire de prétendre calculer des concentrations de polluants seconde par seconde : tous les modèles d'émission de polluants, du plus simple au plus compliqué (COPERT, HBEFA, PHEM...), sont en effet uniquement validés sur un trajet (durée entre 5 et 15 minutes), et ce pour un véhicule considéré comme « moyen ».

⁵ L_{Aeq} : niveau sonore moyen sur une période donnée.
 L_{den} : niveau sonore moyen pondéré sur une journée.
 L_{night} : niveau sonore moyen pour la période de nuit.
 $L_{Aeq, 1s}$: niveau sonore instantané

Parmi les autres verrous scientifiques, on peut citer : calcul de la dispersion avec un pas de temps très court associé aux simulations dynamiques de trafic, manque de données pour le calcul des émissions à froid, difficulté à estimer le parc précisément... Il existe par ailleurs un rapport traitant du couplage des modèles dynamiques de trafic et des modèles d'émissions de polluants (SETRA 2012) *Évaluation environnementale des projets de gestion dynamique de trafic : la qualité de l'air*.

Enfin, que ce soit pour l'air ou le bruit, on peut citer deux points de vigilance :

- la validation du modèle dynamique de trafics constitue une étape clé. En particulier, le choix des indicateurs utilisés pour la validation est important.

Il faut bien avoir conscience que les modèles dynamiques de trafics ont été développés... pour prévoir le trafic. Les indicateurs traditionnellement utilisés portent donc sur les capacités, les temps perdus, les débits, les vitesses moyennes, les moments d'apparition ou de disparition de la congestion. L'accélération, importante en particulier pour les modèles d'émission de polluants, n'est pas validée. Par ailleurs, les simulations dynamiques de trafic résultent d'un processus stochastique : il faut donc aussi veiller à travailler sur plusieurs répliques ;

- ne pas négliger les effets induits : un projet d'aménagement peut engendrer des modifications de trafic (débits, vitesses...) sur un secteur bien plus large que le secteur du projet. Il serait dommage de faire un calcul très précis à un endroit en négligeant les autres effets induits qui peuvent être très importants.

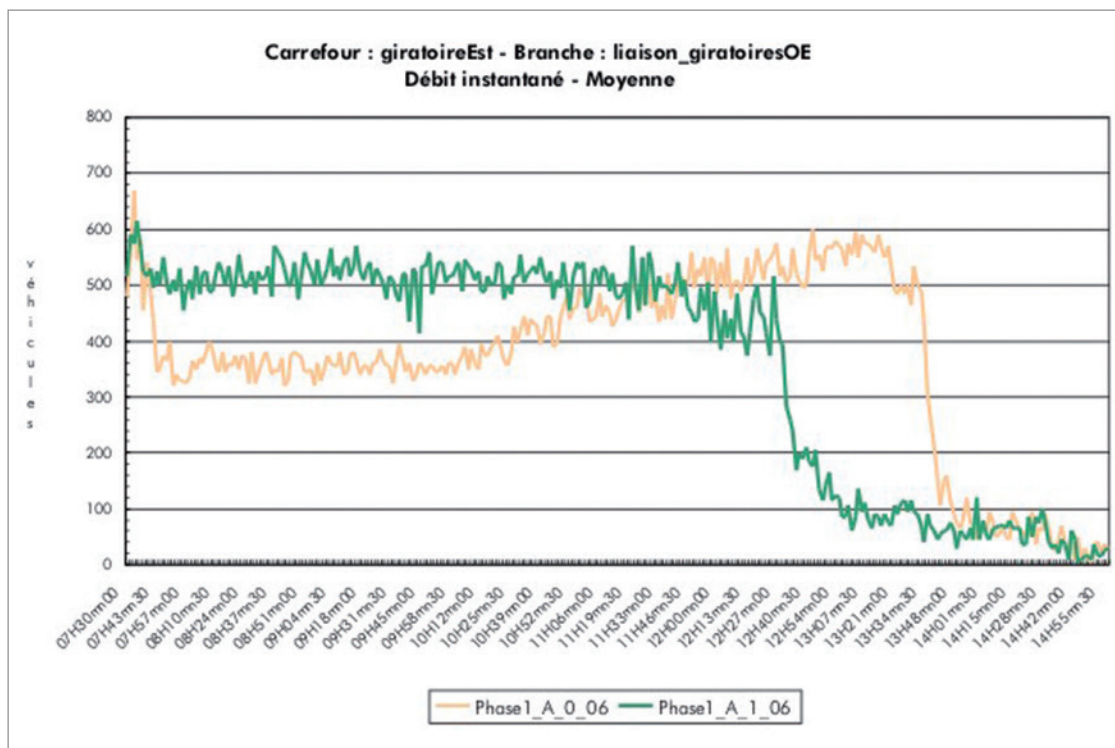
3 Questions sur les résultats

3.1. Quels résultats présenter ?

Comme exposé dans le chapitre consacré au déroulement d'une étude, l'analyse des résultats doit se faire en s'appuyant sur les deux sorties principales d'un modèle de simulation dynamique : les visualisations des simulations et les indicateurs quantitatifs.

Deux grands principes doivent guider l'analyse et la présentation des résultats :

- revenir à l'objectif initial de l'évaluation pour pouvoir apporter des réponses aux questions posées en début d'étude ;
- procéder de préférence par analyses comparatives de scénarios.



Comparaison du débit sur une branche de giratoire dans deux scénarios d'aménagement (source : Cerema)

Par ailleurs, il est fréquent que le commanditaire ait plusieurs objectifs à atteindre, sans qu'il puisse nécessairement établir un classement entre eux. On fera donc un tableau comparatif multicritère entre les différents scénarios.

Le choix des indicateurs est détaillé dans le paragraphe 1.2. (p. 43) car il doit être effectué dès le démarrage de l'étude.

Le paragraphe 3.2. ci-après explique la méthode pour élaborer un scénario de référence pour l'analyse des résultats.

Le paragraphe 3.3. (p. 66) aborde la question du niveau de précision des résultats quantitatifs, tandis que le paragraphe 3.4. (p. 67) traite de la question de l'utilisation des visualisations de la simulation.

3.2. Quel est mon scénario de référence ?

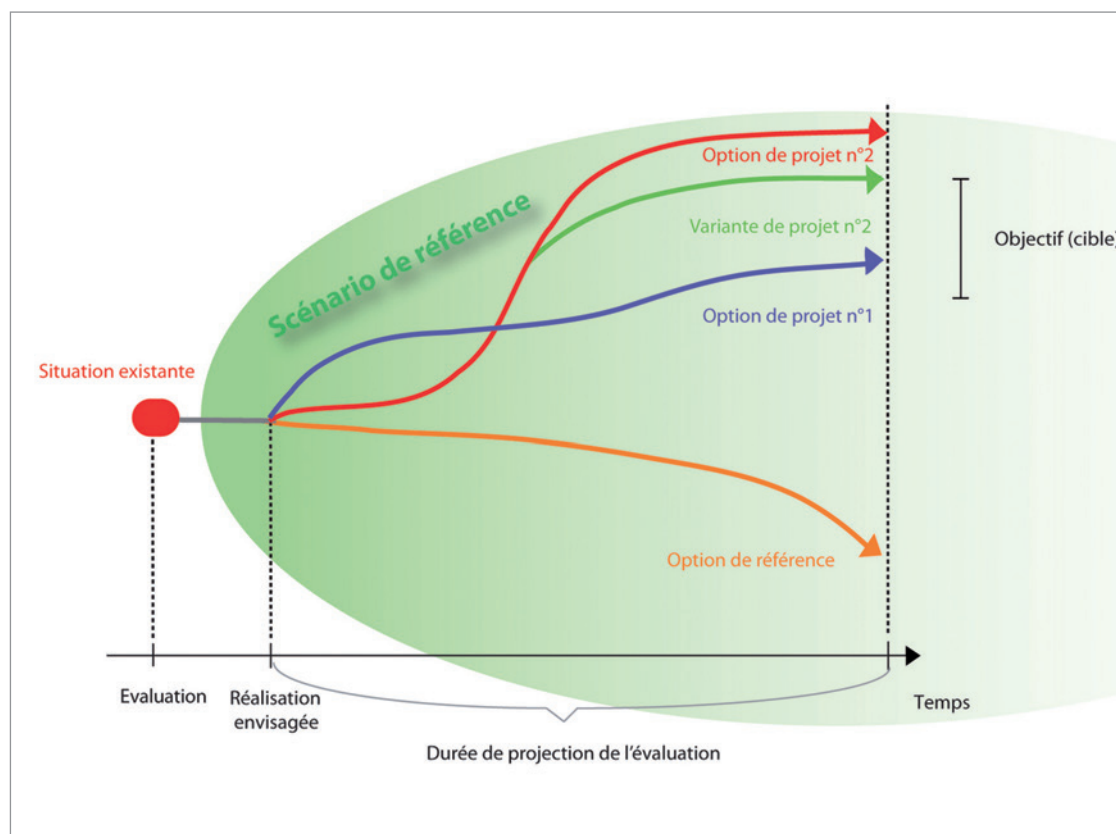
Pour les projets de transport les plus importants, il existe une méthodologie d'évaluation définie dans des instructions officielles éditées par le ministère en charge des transports et dont la dernière version publiée le 16 juin 2014 est nommée référentiel d'évaluation des projets de transport. Si le cadre défini par le référentiel ne peut s'appliquer directement au cas de la simulation dynamique, car les échelles temporelles et spatiales d'évaluation sont très différentes, il est important de connaître ce cadre et le vocabulaire associé, notamment dans le cas où l'étude de simulation dynamique concerne un projet ayant fait l'objet d'une évaluation socio-économique.

Un des principes de base de l'évaluation des projets de transport est la définition d'une situation de référence permettant de mettre en évidence les conséquences propres du projet. Par ailleurs, du fait des incertitudes sur le processus complet de simulation dynamique et de la très grande difficulté

à quantifier ces incertitudes, on présente généralement les résultats de simulations dynamiques de manière relative et non de manière absolue de façon à éliminer l'effet des erreurs systématiques de modélisation. Il est donc nécessaire de définir une situation de référence permettant de comparer les différents scénarios.

Dans le vocabulaire du *référentiel d'évaluation des projets de transport*, on distingue :

- le *scénario de référence* qui vise à formuler des hypothèses claires et fondées relatives au contexte d'évolution future, exogène au projet, sur toute la période d'évaluation (évolution du PIB, hypothèses démographiques, emplois, etc.) ;
- l'*option de référence* qui se définit comme la mise en œuvre des décisions jugées les plus plausibles portant sur le réseau d'infrastructures concernées et son usage, en l'absence de la réalisation du projet, à l'horizon considéré ;
- l'*option de projet* qui est le scénario avec la mise en œuvre du projet qui peut être décomposée en *variantes*.



Vocabulaire du référentiel d'évaluation des projets de transport
(source : Référentiel évaluation des projets de transport, version du 16 juin 2014)

Dans le cadre d'une étude en simulation dynamique, on appellera scénario de référence la combinaison du scénario de l'option de référence et du scénario de référence du référentiel d'évaluation des projets de transport. On explique ci-dessous comment on choisit ce scénario de référence pour la simulation dynamique. D'une manière générale, il faut pouvoir comparer des scénarios sur les mêmes bases, soit en fixant l'offre, soit en fixant la demande.

Dans les cas où seule la demande ou l'offre varie, on pourra utiliser le scénario de la situation actuelle (calé et validé) comme scénario de référence.

Dans le cas d'évaluations où l'offre et la demande varient, on choisira de préférence un scénario « fil de l'eau » avec le réseau actuel et la demande future. Ce scénario correspond généralement à l'option de référence de l'évaluation socio-économique.

Enfin, si ce scénario n'a pas de sens (projet neuf), on choisira le scénario projet le plus probable pour comparer les variantes. Ce scénario correspond à la variante n°1 de l'option du projet de l'évaluation socio-économique.

Lorsque l'on travaille sur des variantes de projet très différentes, il faut parfois prendre en compte l'impact de l'offre sur la demande. Il peut alors être nécessaire de tester plusieurs scénarios : le scénario de référence, le scénario projet avec la même demande que le scénario de référence, et le scénario projet avec la demande actualisée pour prendre en compte la rétroaction de l'offre sur la demande. Cette démarche permet d'isoler les effets liés à la modification de la demande et ceux liés à la modification de l'offre.

3.3. Quels niveaux de précision sur les résultats ?

Les erreurs commises en réalisant une étude de simulation dynamique sont très difficilement quantifiables et sont souvent passées sous silence. Les erreurs potentielles peuvent venir de trois points principaux :

- inadéquation des modèles sous-jacents à reproduire les phénomènes à modéliser ;
- mauvais calage des paramètres du modèle ;
- mauvaise estimation de la demande.

■ Erreurs liées à la modélisation

Concernant le premier point, il faut savoir que la simulation dynamique du trafic est basée sur plusieurs décennies de recherche sur la théorie du trafic et que les différents modèles implémentés dans les logiciels de simulation dynamique ont fait l'objet d'études et de tests approfondis par une communauté internationale de chercheurs. Leur validité sur les situations classiques d'écoulement du trafic est donc largement démontrée. Il faut cependant être plus prudent sur l'utilisation de nouvelles fonctionnalités mettant en œuvre des phénomènes moins bien pris en compte (pour la régulation dynamique notamment) : répartition par voies, changements de files, etc.

Si les modèles sont aptes à reproduire les principales situations de trafic, la qualité de la détermination des valeurs des paramètres du modèle est quant à elle assurée par la démarche de calage dont l'importance a été plusieurs fois soulignée dans ce document.

Le niveau de précision sur les résultats peut donc être approché en se basant sur les résultats de l'étape de calage pour les indicateurs ayant fait l'objet d'une analyse lors de cette étape. Ce niveau de précision peut être différent selon les indicateurs, et s'avérer par exemple meilleur sur les débits que sur les vitesses. Certains indicateurs n'ayant pas fait l'objet de calage peuvent être malgré tout étudiés avec une marge d'erreur plus importante s'ils sont liés à des indicateurs ayant été mesurés sur le terrain (les temps de parcours par exemple si on a évalué la reconstitution de la vitesse sur des capteurs). Enfin, il n'est pas pertinent d'analyser des indicateurs n'ayant pas fait l'objet d'une analyse lors du calage et non liés directement à d'autres indicateurs (par exemple le nombre d'arrêts effectués par un véhicule dans une circulation en accordéon). En cas de difficultés rencontrées lors du calage du modèle, il peut être utile pour l'analyse des résultats d'effectuer des tests de sensibilité aux paramètres principaux du modèle (partie 3, § 2.5. p. 60).

■ Incertitudes liées à la demande

La demande de trafic est généralement l'hypothèse ayant le plus gros impact sur les résultats du modèle

et il est donc nécessaire d'y porter une attention particulière. Dans les scénarios pour lesquels la demande est bien connue (demande actuelle), les résultats sont les plus fiables. Dans les scénarios à plus long terme ou avec un fort impact de l'offre sur la demande, les résultats sont moins fiables et doivent être présentés avec plus de précautions, en réexplicitant les hypothèses de demande retenues. L'approche la plus rigoureuse consiste alors à réaliser des tests de sensibilité à la demande (partie 3, § 2.5. p. 60).

3.4. Quand utiliser les visualisations ?

La visualisation des résultats de la simulation dynamique (le «film» d'évolution de l'écoulement du trafic sur le réseau) est un outil très puissant potentiellement utile lors de différentes phases de la démarche d'étude :

- codage et calage du modèle ;
- analyse des résultats ;
- communication.

■ Codage et calage du modèle

Les visualisations sont utiles pendant la phase de codage et de calage du modèle. Pour un modèle microscopique, il est intéressant de regarder les visualisations pour détecter des erreurs de codification du réseau ou de calage des paramètres :

- topologie : nœuds manquants, mouvements tournants manquants ;
- fonctionnement : problèmes de priorités dans les nœuds, problèmes d'autoblocages entre les nœuds voisins, erreurs dans la saisie des plans de feux.

La validation d'un modèle dynamique ne doit cependant pas reposer sur la seule visualisation des simulations. Par exemple, la vidéo peut montrer des longueurs de files correspondant à la réalité, mais avec une demande et une offre incorrectes.

Si l'on doit réaliser un audit d'une étude de simulation dynamique, la visualisation peut permettre d'estimer les débits sur certains points du réseau (sous réserve que l'affichage de l'heure soit fournie). Par exemple, on peut compter manuellement le nombre de véhicules qui franchissent une ligne de feux et vérifier que les ordres de grandeur sont compatibles avec la littérature.

■ Analyse des résultats

Les visualisations sont aussi utiles pour analyser le fonctionnement d'une zone et permettre une description qualitative du fonctionnement du réseau qui pourra être recoupée par l'expérience du modélisateur et des exploitants du réseau. Le diagnostic de fonctionnement de la situation actuelle peut ainsi être enrichi à l'aide de la visualisation des résultats après calage.



Capture d'écran d'une visualisation 2D (source : Cerema)

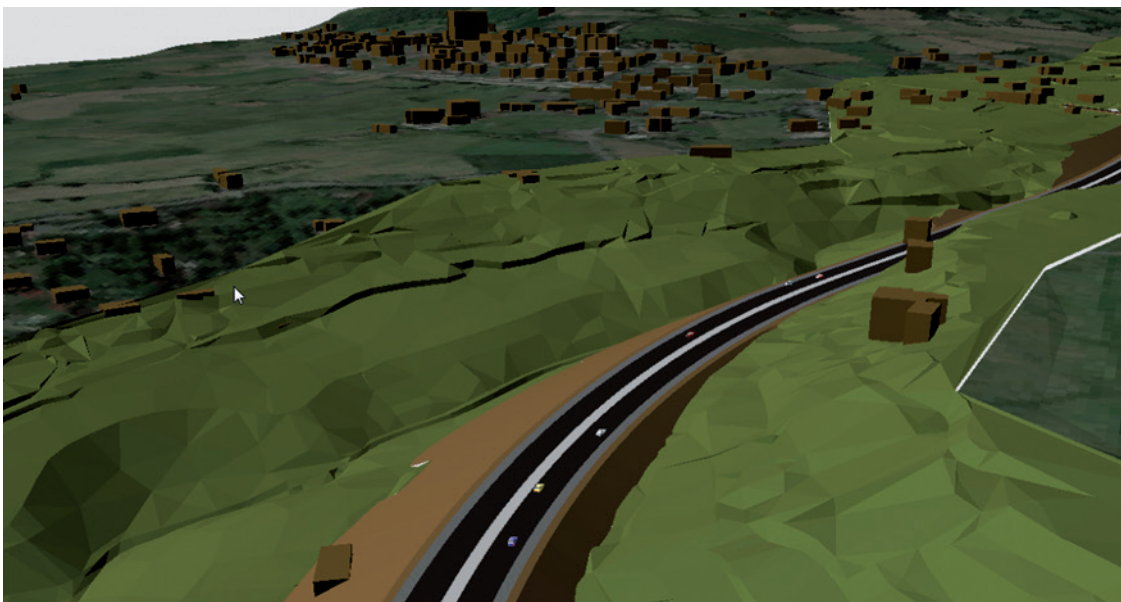
■ Communication

Les visualisations issues d'une simulation microscopique sont directement compréhensibles sans connaissances préalables sur la théorie du trafic et le fonctionnement des réseaux. Comme indiqué dans la partie 2, § 3.1. (p.33), la présentation des résultats à des tiers peut parfois conduire à deux comportements opposés mais préjudiciables : une trop grande confiance dans les résultats ou au contraire une perte de confiance injustifiée. Dans le premier cas, le public oublie devant la visualisation des résultats toutes les hypothèses et imprécisions de l'étude. Dans le second cas, le public observe un comportement atypique de véhicules (priorité non respectée par exemple) et en tire une conclusion hâtive et erronée sur la validité du modèle, la simulation dynamique peut tout à fait être exacte à un niveau d'agrégation global sans être forcément juste au niveau individuel. On peut aller plus loin dans un objectif de communication en présentant des visualisations en trois dimensions. La réalisation de vidéos en 3D est consommatrice de temps puisqu'il faut renseigner les informations de bâti, de pente des tronçons, de décors, etc., mais peut

cependant être utile pour présenter des projets à des élus locaux ou au grand public, lors d'un débat public par exemple. Dans tous les cas, l'utilisation de visualisation pour la communication doit faire l'objet d'un travail spécifique pour identifier la vidéo permettant d'illustrer le message en vérifiant l'absence de tout élément qui viendrait brouiller celui-ci. Il est donc conseillé d'effectuer à l'avance des extraits de vidéos et de ne jamais utiliser en direct les outils intégrés de visualisation des résultats.

■ Le problème de la réplcation

Une vidéo de simulation ne représente qu'une réplcation pendant une période donnée. Il faut donc être prudent dans l'usage de ces visualisations qui ne sont pas forcément représentatives de la moyenne des résultats. Des vidéos peuvent être réalisées sans représenter les véhicules individuellement, mais en illustrant dynamiquement les variations temporelles des données de trafic à l'aide de couleurs (par exemple : la densité qui est un bon indicateur de la congestion du réseau). L'intérêt de cette représentation est que l'on peut afficher de manière dynamique les données moyennes de l'ensemble des réplcations.



Capture d'écran d'une visualisation 3D (source : Cerema)



Bibliographie

Antoniou C., Barcelo J., Brackstone M., Celikoglu H.B., Ciuffo B., Punzo V., Sykes P., Toledo T., Vortisch P., Wagner P. (2014) *Traffic Simulation: Case for guidelines*, JRC éditeur, accessible : <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC88526> accédé le 09/11/2015

Buisson C., Lesort J.-B. (2010), *Comprendre le trafic routier, méthodes et calculs*, Certu, 111 p.

Bonnel P. (2004), *Prévoir la demande de transport*, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, 425 p.

Certu (2010), *Guide de conception des carrefours à feux*, Lyon, 83 p.

Daamen W., Buisson C., Hoogendoorn S.P. (2014) *Traffic simulation and data: Validation Methods and Applications*, Ed., Taylor and Francis, 190 p.

Direction générale des routes (2014), *Référentiel d'évaluation des projets de transport*
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Referentiel-d-evaluation-des.html> accédé le 09/11/2015

Duret A., Chiabat N. (2014), *Modélisation dynamique des congestions routières*, *Techniques de l'ingénieur, Applications des mathématiques*

Iooss B. (2011), «Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques», *Journal de la Société française de statistique*, n° 152, 23 p.

Barcelo J. (2010), *Fundamentals of traffic simulation*, Springer, 437 p.

SETRA (2012), *Évaluation environnementale des projets de gestion dynamique de trafic: la qualité de l'air*, SETRA, 111 p.

Treiber M., Kesting A. (2013), *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*, Springer

Vortisch P., Wagner P., Multitude (2013), *The MULTITUDE Traffic Simulation Primer: How to use traffic simulation – the most urgent issues*, 6 p. disponible : <https://dl.dropboxusercontent.com/u/4874702/uSimGuide-1.0.pdf> accédé le 09/11/2015



Table des illustrations

Représentation d'un giratoire dans Girabase	11
Préparation d'une enquête par relevé automatique de plaques d'immatriculation	12
Photo aérienne d'une zone d'étude	14
Exemple de diagnostic quantitatif de variabilité du trafic	15
Processus théorique d'une démarche d'évaluation en modélisation	16
Démarche de réalisation d'une étude de simulation dynamique	22
Plans autocad pour le codage	24
Exemple de profil de demande dynamique	26
Exemple d'analyse quantitative menée au cours du diagnostic de fonctionnement	27
Exemple d'analyse qualitative de fonctionnement	28
Codage d'un giratoire sous Aimsun	29
Exemple de comparaison entre les mesures réelles et simulées	31
Exemple d'exploitation quantitative d'indicateurs	34
Démarche de réalisation d'une étude de simulation dynamique	40
Exemple d'agrégation d'un indicateur	44
Interdiction dynamique de doubler pour les PL	45
Exemple de campagnes de comptage	48
Enquête par relevé de plaques minéralogiques	49
Compteurs automatiques de type radar	49
Exemple d'exploitation temps de parcours par lecture automatisée de plaques d'immatriculation	50
Principes de définition des situations de référence	55
Exemple de représentation de résultats dynamiques sur 10 répliques	57
Exemple de représentation de l'élasticité unitaire d'un modèle	61
Exemple de représentation des résultats d'un test de Morris	62
Comparaison du débit sur une branche de giratoire dans deux scénarios d'aménagement	64
Vocabulaire du référentiel d'évaluation des projets de transport	65
Capture d'écran d'une visualisation 2D	67
Capture d'écran d'une visualisation 3D	68



Table des matières

■ Introduction

5

PREMIÈRE PARTIE

■ Les questions indispensables à se poser...

8

1. ...avant l'étude	10
1.1. La simulation dynamique est-elle l'outil adéquat ?	10
La simulation dynamique est-elle adaptée à la phase du projet ?	10
La simulation dynamique est-elle pertinente pour les questions posées ?	11
Les ressources nécessaires sont-elles disponibles ?	11
Quelles sont les autres approches possibles ?	13
1.2. Quel est le périmètre spatio-temporel de l'étude ?	13
1.3. Quelles sont les données nécessaires ?	13
2. ...lors de la réalisation de l'étude	16
2.1. Mon modèle est-il bien validé ?	16
2.2. Mes scénarios sont-ils bien codés ?	17
3. ...à l'issue de l'étude	18
3.1. Quelles réponses puis-je apporter ?	18

DEUXIÈME PARTIE

■ Le déroulement idéal d'une étude

20

1. Préparation à la réalisation du modèle	23
1.1. Définition du périmètre d'étude et des périodes de modélisation (pré-diagnostic)	23
Exceptions à la modélisation de l'ensemble de l'étendue spatio-temporelle actuelle et future de la congestion	23
Exceptions à la modélisation de l'ensemble des carrefours interagissant	23
1.2. Collecte et mise en forme des données nécessaires au codage du réseau	24
1.3. Collecte et mise en forme des données nécessaires au codage de la demande de trafic	25
Spécifications de la demande	25
Description et obtention de la demande	25
Points complémentaires d'attention	26

1.4. Collecte et analyse des informations nécessaires à l'analyse des conditions actuelles de circulation (diagnostic)	26
L'offre	27
La demande	27
Les conditions de circulation	27
2. Réalisation du modèle et implémentation des différents scénarios projets	29
2.1. Codage de la situation actuelle	29
2.2. Calage et validation	29
Calage	29
Validation	31
2.3. Codage et vérification des différents scénarios projets	32
3. Analyse des résultats et capitalisation de l'étude	33
3.1. Analyse qualitative et quantitative des résultats	33
Analyse qualitative	33
Analyse quantitative	34
3.2. Rédaction d'un rapport et capitalisation de l'étude	35
3.3. Points de partage et de validation par le commanditaire	35
3.4. Éléments indispensables d'une étude	36

TROISIÈME PARTIE

■ Réponses aux questions fréquentes

38

1. Questions sur la préparation de l'étude	40
1.1. Combien de temps pour réaliser une étude en simulation dynamique ?	40
Préparation à la réalisation du modèle	41
Réalisation du modèle et des scénarios	41
Analyse des résultats et capitalisation de l'étude	42
1.2. Pourquoi et comment choisir préalablement les indicateurs à analyser ?	43
La problématique de l'agrégation	43
La problématique du choix des indicateurs	45
Exemples d'indicateurs et points d'attention	46
1.3. Comment organiser un recueil de données spécifique ?	47
Estimer la demande en entrée du modèle	47
Objectiver les conditions de circulation	50
1.4. Quel type de modèle ?	51
Choix d'un modèle	52
1.5. Quelles autres approches possibles ?	53
Dimensionnement et études de giratoires : Girabase	53
Dimensionnement et études de carrefours à feux	53
Méthodes analytiques	53

2. Questions sur la réalisation de l'étude	54
2.1. Comment définir une situation de référence pour le calage ?	54
Variabilité de la demande	54
Situation en équilibre instable	54
2.2. Comment faire en l'absence d'une situation de référence pour le calage ?	56
2.3. Combien de réplifications ?	56
2.4. Comment déterminer la demande future de déplacements ?	58
Utilisation de la demande actuelle	58
Évolution de la demande par taux de croissance	58
Modification manuelle de la demande	58
Calcul de la demande par un modèle d'affectation	58
Calcul de la demande par un modèle de déplacements	59
2.5. Quels tests de sensibilité ?	60
Inventaire des variables	60
Sélection des variables étudiées	60
Choix des intervalles de variation	60
Choix des indicateurs d'analyse	60
Tests unitaires	61
Analyse globale	61
2.6. Quel couplage avec des modèles environnementaux (air ou bruit) ?	62
3. Questions sur les résultats	64
3.1. Quels résultats présenter ?	64
3.2. Quel est mon scénario de référence ?	65
3.3. Quels niveaux de précision sur les résultats ?	66
Erreurs liées à la modélisation	66
Incertitudes liées à la demande	66
3.4. Quand utiliser les visualisations ?	67
Codage et calage du modèle	67
Analyse des résultats	67
Communication	68
Le problème de la réplification	68

■ Bibliographie

71

■ Table des illustrations

73

A guide to producing dynamic traffic simulation studies

Planning how a new intersection will work, quantifying the impact of a tramway on traffic or anticipating the consequences of a big concert on the roads serving the concert hall: dynamic traffic simulation applications are many and varied. This decision-making tool has long since moved out of the research laboratory to become an essential part of the evaluation of development work, infrastructure or traffic management. This publication is intended for a technical audience and gives the necessary details for carrying out a dynamic simulation study in the best state-of-the-art conditions, as a complement to the software user guides. It includes a list of preliminary questions on the relevance and feasibility of dynamic simulation, a detailed description of the process involved in carrying out a study and a list of answers to specific methodological points.

Estudio de simulación dinámica del tráfico – guía de realización

Prever el funcionamiento de un nuevo cruce, cuantificar el impacto de un tranvía en la circulación o anticipar las consecuencias de un gran concierto en las vías que llevan a la sala de espectáculo: las aplicaciones de la simulación dinámica del tráfico son múltiples y variadas. Esta herramienta de ayuda a la decisión se ha salido, desde hace tiempo, del marco de los laboratorios de investigación, para convertirse en un eslabón esencial de la evaluación de los acondicionamientos, las infraestructuras o la gestión del tráfico. Destinada a un público técnico, esta obra proporciona los elementos necesarios para la realización de un estudio de simulación dinámica en las mejores reglas del arte, como complemento de los manuales de utilización de los programas informáticos. Comprende así una lista de cuestiones previas sobre la pertinencia y la factibilidad de la simulación dinámica, una descripción detallada del proceso de realización de un estudio y una lista de respuestas a puntos metodológicos particulares.

© Cerema - 2015

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, créé au 1^{er} janvier 2014 par la fusion des 8 CETE, du Certu, du Cetmef et du Sétra.

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durables, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Jouve est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : service éditions Cerema / Direction technique Territoires et ville (P. Marchand)

Impression : Jouve – 1, rue du Docteur Sauvé – 53100 Mayenne – 01 44 76 54 40

Mise en page : PAO Concept - tél. 04 78 22 70 35

Achevé d'imprimer : novembre 2015

Dépôt légal : novembre 2015

ISBN : 978-2-37180-095-3

ISSN : 2276-0164

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Cet ouvrage est en vente au Cerema

Bureau de vente :

Cerema / Direction technique Territoires et ville

2 rue Antoine Charial

CS 33927

69426 Lyon Cedex 03 – France

Tél. 04 72 74 59 59 – Fax. 04 72 74 57 80

catalogue.territoires-ville.cerema.fr