

## Note technique n° 3

Titre de l'étude :	AMO contrôle de la congestion sur le réseau structurant de l'agglomération Aix-Marseille
N° de projet :	C0730
Maître d'ouvrage :	DIRMed
Titre du document :	Méthode proposée pour le calage du modèle de trafic
Auteur principal :	Alexandre NICOLAS
Revu par :	
N° version :	0.2
Date de rédaction :	5 avr. 19

## TABLE DES MATIERES

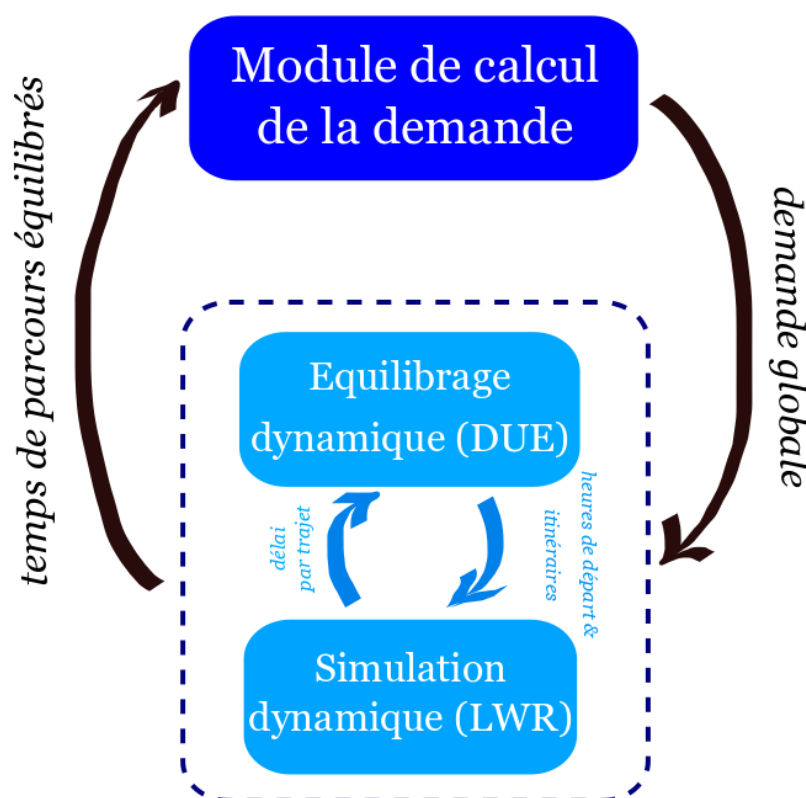
1	Paramètres ajustables du modèle .....	3
1.1	Réseau modélisé.....	3
1.2	Dynamique du trafic.....	4
1.3	Demande de transport.....	4
2	Données empiriques disponibles .....	5
3	Facteurs de mérite.....	5
4	Méthode de calage en deux temps.....	6
4.1	Principe.....	6
4.2	Détail de la méthode .....	7

Dans la perspective de l'établissement d'un modèle pour le réseau routier structurant géré par la DIRMed (et, pour commencer, pour l'axe A50/A501/A502), le choix a été fait d'un algorithme qui couple

- un modèle macroscopique de simulation dynamique (modèle de *Lighthill-Whitham-Richards* complété par un traitement des jonctions entre arcs avec une discipline FIFO) et
- un module d'affectation dynamique qui ajuste la distribution d'heures de départ et d'itinéraires pour atteindre un optimum (*équilibre de Nash*).

Cet algorithme a été implémenté par Ke Han et al. (2019) sous la forme d'un programme MATLAB. Il sera complété par EXPLAIN pour intégrer la rétroaction de l'offre sur la demande, par le biais de l'élasticité au temps de parcours, un aspect important mais souvent omis. Ainsi, l'algorithme se compose de trois modules emboîtés rétroagissant l'un sur l'autre jusqu'à la convergence, selon le schéma de fonctionnement représenté en [figure 1](#).

Figure 1 : Schéma de fonctionnement du modèle dynamique de trafic étudié, avec une demande variable.



Si la relative simplicité du modèle dynamique de trafic employé (macroscopique, fondé sur la théorie LWR) permet de bien comprendre l'effet de changements dans les paramètres

d'entrée sur le trafic simulé, en revanche l'emboîtement de modules rend moins immédiat le travail de calage, dans la mesure où la demande globale ainsi que les distributions d'heure de départ et d'itinéraires ne sont plus contrôlées par le modélisateur, mais réajustées de manière interne au modèle. Cela impose de réfléchir à une méthode de calage adéquate.

Cette note répond à ce besoin en proposant une telle méthode après avoir fait le point sur les paramètres ajustables du modèle et les facteurs de mérite qui serviront à mesurer le degré de réalisme de la description et/ou la robustesse des effets prédits.

## 1 Paramètres ajustables du modèle

Nous commençons par une énumération des paramètres qui permettront d'ajuster le modèle.

### 1.1 Réseau modélisé

Au-delà des nœuds et arcs définis, la modélisation du réseau implique la définition des caractéristiques suivantes pour les arcs :

- Leur longueur
- Le temps de parcours à vide, déduit de la longueur et de la vitesse maximale autorisée
- Leur capacité, égale au débit maximal obtenu dans le diagramme fondamental reconstitué à partir de données empiriques

En principe, il s'agit de caractéristiques intrinsèques au modèle qui seront définies une fois pour toutes (un exemple est donné en [figure 2](#)). De fait, la longueur des arcs sera figée. En revanche, comme la vitesse libre ne coïncide pas nécessairement avec la vitesse maximale autorisée, on étalonnera les temps de parcours à vide sur les données FCD, quand celles-ci seront disponibles.

Figure 2 : Tableau Excel répertoriant les caractéristiques des arcs (orientés) du réseau modélisé.

Nom_court	NUM_ROU	Sens	Nstart	Nend	VITESSE	FFT	VOIES	Capacity	longueur	Postes_compt	SIREDO
A50_a	A50	E	8	9	90		3,00	1,67	986.60		M3L
A50_b	A50	E	9	10	90		3,00	1,67	999.20		M3N
A50_c	A50	O	10	11	90		3,00	1,67	430.00		M3O
A50_d	A50	E	11	12	90		3,00	1,67	581.10		
A50_e	A50	E	12	13	90		3,00	1,67	1001.40		
A50_f	A50	E	13	14	90		3,00	1,67	1000.20		M3S,M3V
A50_g	A50	E	14	15	90		3,00	1,67	990.50		M3W,M3X
A50_h	A50	E	15	16	90		3,00	1,67	1005.60		M3Y,M3Z
A50_i	A50	E	16	17	90		3,00	1,67	1253.70		M4A,M4B
A50_j	A50	E	17	20	90		3,00	1,67	2035.30		
A501_a	A501	E	18	19	90		2,00	0,83	1612.10		
A501_b	A501	E	17	18	90		2,00	0,83	619.20		M4k
A501a	A501	O	19	18	90		2,00	0,83	1612.10		M4l,M4m,M4n,M4o
A501b	A501	O	18	17	90		3,00	0,83	619.20		
A502_a	A502	O	21	20	90		2,00	1,61	557.30		M4g

Après ce premier étalonnage des **temps de parcours** et **capacités**, pour se créer une marge de manœuvre, on s'autorisera un éventuel réajustement ultérieur de ces paramètres de l'ordre de grandeur

- des fluctuations de temps de parcours aux heures les plus creuses dans les données FCD
- de l'incertitude dans l'évaluation du débit maximal à partir des données SIREDO.

## 1.2 Dynamique du trafic

L'algorithme de Ke Han et al. suppose un diagramme fondamental triangulaire avec un rapport entre les pentes ascendante (régime fluide) et descendante (régime congestionné) de 3 (en valeur absolue). Ce rapport pourra être modifié (*uniformément pour l'ensemble des arcs, ou, si cela est techniquement faisable, au cas par cas*) pour mieux rendre compte des diagrammes fondamentaux mesurés.

## 1.3 Demande de transport

En ce qui concerne la demande de transport, les choix

- des liaisons Origine (O) - Destination (D) retenues
- des itinéraires autorisés/interdits pour chaque liaison
- des flux associés à chaque couple (O,D)

sont librement ajustables (du moins, pour les flux, lorsque le module de recalcul de la demande est désactivé).

En plus de ces paramètres, la distribution initiale des horaires de départ (ou, plus précisément, des taux de départ) et les flux initiaux par itinéraire peuvent être ajustées, étant entendu que l'équilibrage dynamique modifiera ensuite les valeurs initiales pour guider le système vers un optimum (équilibre de Nash).

Comme indiqué dans une note précédente, la modélisation macroscopique lisse la plupart des aléas responsables de la variabilité du trafic (ralentissements fortuits, accidents, etc.). Néanmoins, **après** le premier étalonnage (destiné à trouver un bon jeu de paramètres), une partie aléatoire pourra être réincorporée dans le modèle en introduisant des fluctuations aléatoires dans la demande et la capacité des arcs.

## 2 Données empiriques disponibles

Les données quantitatives empiriques dont nous disposons pour caractériser l'état réel de la circulation proviennent des trois sources suivantes :

- Temps de parcours de voitures « flottantes » intégrées dans le trafic (*floating car data*, FCD)
- Comptages SIREDO en section courante, permettant de reconstruire des diagrammes fondamentaux (par exemple, par ajustement à une courbe maîtresse). Cette reconstruction donnera notamment, pour chaque arc, les seuils de vitesse et de taux d'occupation de la voie qui séparent le régime fluide du régime congestionné
- Comptages aux postes sur les bretelles d'entrée et de sortie.

Compte tenu de la variabilité des flux dans l'espace et le temps, il faudra segmenter ces données par arc de mesure, bien entendu, mais aussi par jour et heure de mesure. Qui plus est, en plus des valeurs moyennes pour chacun des segments, nous prêterons attention aux fluctuations « aléatoires », reflétées par exemple par l'écart-type au sein de chaque segment.

## 3 Facteurs de mérite

Pour mesurer le degré de coïncidence entre le trafic réel et le trafic simulé, nous aurons recours aux facteurs de mérite suivants, évalués autour de l'HPM :

- GEH (horaires) par arc, jour et heure<sup>1</sup>, établi par comparaison aux résultats de comptage. *(Notons à ce titre que certains arcs incluent plusieurs postes de comptage. Si les données de comptage diffèrent considérablement entre ces postes, cela signifie qu'un nombre*

<sup>1</sup> Le découpage horaire peut apparaître assez grossier au regard de la rapidité d'évolution du trafic. Quoique le modèle n'ait pas vocation à être extrêmement précis, on tentera également une discrétisation des données à la demi-heure, plutôt qu'à l'heure.

*considérable de véhicules a été injecté « au milieu de » l'arc, ce qui justifiera alors de le scinder en plusieurs arcs ; sinon, on pourra prendre la moyenne).*

- Comparaison des temps de parcours *moyens* par arc, jour et heure aux données FCD.
- Comparaison des fluctuations de temps de parcours (écart-type). Ce dernier facteur de mérite ne sera considéré qu'après la première phase d'étalonnage, quand seront introduits des fluctuations aléatoires dans la demande et la capacité des arcs.

Bien entendu, l'obtention d'une bonne coïncidence entre les données *par arc* suppose que les flux OD précis aient été suffisamment renseignés pour que les flux quittent la section courante aux bons endroits (i.e., à telle bretelle et non telle autre). Comme il est souhaitable de commencer avec seulement un nombre limité d'OD pour y voir clair, les données seront d'abord **agrégées spatialement**, en prenant par exemple le minimum des débits d'arcs successifs (pour savoir combien de véhicules circulent vraiment d'une extrémité à l'autre de la séquence d'arcs considérée).

## 4 Méthode de calage en deux temps

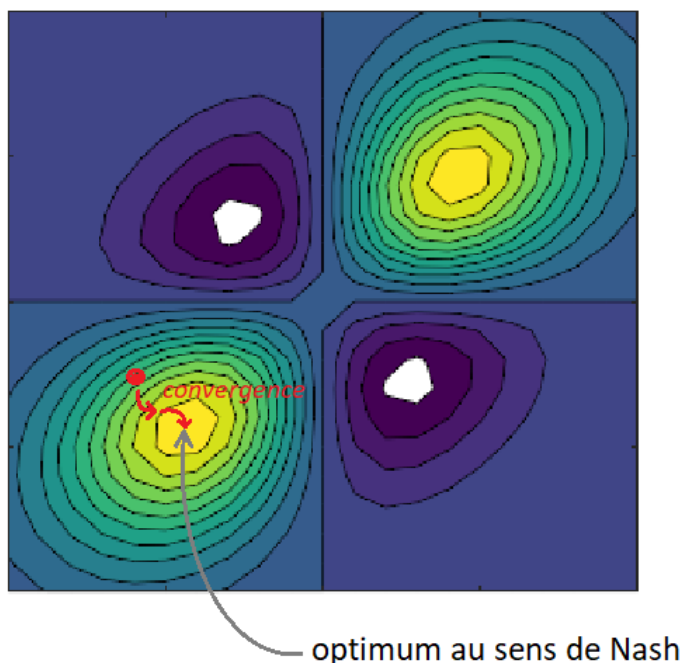
### 4.1 Principe

Nous avons déjà indiqué que le fonctionnement imbriqué du modèle, avec des boucles de rétroaction, peut compliquer l'étalonnage. La méthode de calage que nous proposons pare à cette difficulté en découplant les différents modules.

Plus précisément, nous partons de l'idée - approximative - que l'équilibrage dynamique (*Dynamic User Equilibrium*) fait converger la distribution d'heures de départ et d'itinéraires vers le point d'équilibre de Nash « le plus proche » des choix initiaux dans l'espace des paramètres, comme schématisé sur la [figure 3](#). Suivant cette idée, nous pourrions procéder au calage en éliminant provisoirement la partie d'équilibrage dynamique, c'est-à-dire en simulant les flux dans le bloc de « simulation dynamique » de la figure 1 (sans se soucier des boucles de rétroaction avec les autres blocs) pour trouver les paramètres et les distributions initiales qui reproduisent le mieux le trafic réel. L'équilibrage dynamique ne sera réintégré qu'une fois terminé cet étalonnage.

Le bloc d'adaptation de la demande au niveau de service (dans la figure 1) sera mis au point séparément, en prenant comme situation de référence la situation « actuelle » décrite par les données collectées (i.e., les temps de parcours et flux observés). L'effet de l'application d'une élasticité au temps de parcours pourra être entraperçu en considérant un ensemble de trajets OD minimalistes, qui pourra être traité sans simulation dynamique, avec des calculs de coin de tableur Excel pour les temps de parcours. Cette étude, découplée du reste, permettra de mieux cerner l'incidence de l'élasticité de la demande, quoique avec une description du trafic bien moins de réalisme que dans la simulation globale.

Figure 3 : Evolution schématique des distributions de taux de départ et d'itinéraires lors de la procédure d'équilibrage dynamique (DUE). Initialement au point rouge, ces distributions sont supposées converger vers le point d'équilibre local.



## 4.2 Détail de la méthode

On cherche à caler le modèle sur le trafic en HPM des lundis, mardis et jeudis. Une fois entrés les paramètres caractérisant le réseau (cf section 1.1), le principe proposé ci-dessus pour le calage se traduit comme suit :

Comme, sur les sections non congestionnées, les flux associés à des trajets OD différents s'additionnent en convergeant, alors qu'en présence de congestion, la capacité de la voie borne le flux total et crée des remontées, nous commencerons par répartir les flux observés entre les OD sur le réseau aux heures de trafic encore fluide, avant de traiter l'injection sur des trajets OD congestionnés.

### Estimation de l'état congestionné ou fluide du trafic

Les données de comptage SIREDO donnent accès aux taux d'occupation et vitesse sur les différents arcs du réseau. Il est donc aisé, avec les valeurs seuil pour la congestion extraites des diagrammes fondamentaux reconstitués (voir la section 2), de déterminer si le trafic sur un arc est fluide ou congestionné. Les mesures FCD pourront corroborer ces conclusions.

## Sélection d'itinéraires et flux moyens sur le réseau non congestionné

En étudiant le réseau suffisamment tôt pour que la circulation y soit intégralement fluide, nous réaliserons les opérations suivantes :

1. Calcul du débit moyen  $Q^{\text{arc}}$  (en véh/h) en HPM de chaque arc du modèle de réseau à partir des données empiriques de comptage.
2. Pour chacun des itinéraires jugés a priori pertinents sur le réseau-modèle, évaluer une borne supérieure  $\bar{Q}^{\text{iti}}$  au flux associé en prenant le minimum des débits sur les arcs le composant, viz.,  $\bar{Q}^{\text{iti}} = \min_{\text{arc} \in \text{iti}} Q^{\text{arc}}$ .
3. Pour les arcs partagés par plusieurs itinéraires, répartir le débit de l'arc entre les itinéraires au *pro rata* de  $\bar{Q}^{\text{iti}}$  et réitérer les étapes 2-3 jusqu'à convergence.

On dispose alors d'une estimation des flux moyens (HPM) associés aux différents itinéraires et on peut faire le choix de ne retenir que les itinéraires les plus empruntés.

## Distribution des taux horaires de départ sur le réseau congestionné ou non

Il s'agit de reproduire la démarche précédente en prêtant désormais attention à la possible congestion sur certains trajets OD et à l'évolution temporelle autour de l'HPM. Pour chaque itinéraire OD retenu, nous procéderons comme suit :

### Supposition d'un trajet OD fluide

Nous commencerons par supposer le trajet fluide. Comme il n'est pas parcouru instantanément, on fera « remonter » l'heure de mesure sur un arc à l'heure de départ à l'origine de l'itinéraire considéré, tel qu'on peut le déduire des temps de parcours FCD. Les étapes seront donc :

1. Pour toutes les périodes  $t$ , répartir les débits  $Q^{\text{arc}}(t)$  mesurés sur les arcs entre les itinéraires, au *pro rata* du débit moyen  $\bar{Q}^{\text{iti}}$  estimé précédemment.
2. Evaluer, pour tout instant  $t$  et tout itinéraire considéré, le taux de départ à l'origine pour cet itinéraire, comme  $\bar{Q}^{\text{iti}}(t) = \min_{\text{arc} \in \text{iti}} Q^{\text{arc}}(t + \Delta t_{\text{arc}})$ , où  $\Delta t_{\text{arc}}$  est le temps mis pour atteindre l'arc en question depuis l'origine de l'itinéraire d'après les temps de parcours FCD moyens à l'heure considérée.
3. Pour les arcs partagés par plusieurs itinéraires, répartir le débit de l'arc  $Q^{\text{arc}}(t)$  (pour tout instant  $t$ ) entre les itinéraires au *pro rata* de  $\bar{Q}^{\text{iti}}(t - \Delta t_{\text{arc}})$  et réitérer les étapes 2-3 jusqu'à convergence.

On dispose alors d'une estimation des taux de départ horaires par itinéraire.

### Cas de congestion



La démarche ci-dessus fait intervenir les données FCD et SIREDO sur les arcs composant l'itinéraire aux temps  $t + \Delta t_{\text{arc}}$ . Il sera donc aisé de vérifier si le trafic est bien fluide tout au long du parcours OD. Si ce n'est pas le cas, c'est-à-dire si l'un des arcs empruntés est congestionné, les taux de départ des itinéraires issus du point O à l'instant  $t'$  seront calculés différemment : la répartition en ce point entre les destinations D sera supposée identique à celle qui avait cours au dernier instant  $t < t'$  précédant la congestion ; la valeur absolue du flux sera tout simplement redressée :

$$Q_{OD}^{\text{iti}}(t') = Q_{OD}^{\text{iti}}(t) \cdot \frac{Q_O(t')}{Q_O(t)}$$

où  $Q_O(t)$  est le flux injecté dans les arcs<sup>2</sup> d'extrémité O à l'instant  $t$ . Cela suppose que ces premiers arcs ne subissent pas de congestion importante, ce qui est en général le cas<sup>3</sup> pour l'axe A50/A501.

### Simulation dynamique du trafic

1. Avec les données d'entrée établies ci-dessus, lancer la simulation dynamique sous MATLAB et obtenir en sortie les débits et temps de parcours sur les différents arcs.
2. Compte tenu de la méthode utilisée pour définir les taux de départ, les débits moyennés dans le temps sur chacun des arcs doivent être très proches des débits moyens des données de comptage.
3. S'il s'avère nécessaire d'améliorer la coïncidence temporelle des débits par arc, calculer les débits cumulés depuis le début de la période par arc, c'est-à-dire le nombre total de voitures étant passées par cet arc jusqu'à cet instant. Ajuster les taux de départ compte tenu des écarts entre  $N^{\text{arc}}(t) = \int_{t_0}^t Q^{\text{arc}}(t') dt'$  simulé et réel. Pour ce faire, augmenter le taux de départ à l'instant  $t$  sur les itinéraires empruntant l'arc considéré proportionnellement à  $\frac{[N^{\text{arc}}(t + \Delta t_{\text{arc}})]_{\text{réel}} - [N^{\text{arc}}(t + \Delta t_{\text{arc}})]_{\text{simulé}}}{[N^{\text{arc}}(t + \Delta t_{\text{arc}})]_{\text{simulé}}}$  où  $\Delta t_{\text{arc}}$  est défini comme précédemment, tout en maintenant constants les flux totaux par itinéraire.
4. Relancer la simulation et itérer les étapes 3-4.

<sup>2</sup> Si besoin est, la procédure pourra être affinée en classifiant les trajets issus de O selon leur début de parcours, i.e., leurs premiers arcs (fluides).

<sup>3</sup> Dans le cas contraire, s'il n'est pas possible de remonter à un point d'injection sans congestion, il n'est de toutes façons pas possible de faire la distinction entre des départs différés par la congestion présente à l'entrée et des départs prévus ultérieurement.

5. Si besoin est, adapter à la marge (i.e., dans les limites définies dans la section 1.1) les temps de parcours à vide des arcs et leur capacité proportionnellement à l'écart moyen entre les temps de parcours/débits moyens réels et simulés. (Par exemple, si le temps de parcours simulé sur un arc donné est plus faible en moyenne dans la simulation que dans la réalité, le temps de parcours à vide sera réduit).

### Modèle complet

1. Réintégrer le couplage avec la routine d'équilibrage dynamique (DUE) et comparer les résultats des simulations avec le trafic réel.
2. Ajuster à la marge les paramètres de la même manière que pour la simulation dynamique seule.