

# Modélisation dynamique de la congestion sur le réseau Aix-Marseille-Provence

[ Réunion de consultation ]

*DIRMed*

30 avril 2019



# Sommaire



## 1. Introduction

## 2. *Pourquoi un modèle dynamique ?*

## 3. *Comment construire un modèle dynamique ?* Etude de faisabilité sur l'axe A50-A501

## 4. *Pour aller plus loin :* Points-clés et bonnes pratiques

# Introduction





# Introduction

## Contexte et objectif de l'étude menée par EXPLAIN pour le compte de la DiRMed

- La DiRMed, gestionnaire d'un réseau de type autoroutier fortement sollicité, souhaite étudier l'impact et la pertinence de mesures d'accompagnement de la congestion sur son réseau
- Le secteur d'étude est déjà couvert par plusieurs modèles de déplacement :
  - Pour les plus larges, leur caractère **statique** ne permet pas de rendre pleinement compte de la complexité des phénomènes de congestion sur le réseau
  - Pour les plus fins (modèles microscopique dynamiques), leur trop **faible étendue** et **l'absence de rétroaction** offre / demande ne leurs permettent pas de saisir les interactions à plus grande échelle
  - Aucun de ces modèles n'est maîtrisé par la DiRMed, ce qui rend leur auditabilité et leur capitalisation difficile
- La DiRMed a donc mandaté EXPLAIN pour l'aider à cerner la faisabilité et l'utilité de la construction **d'un modèle dynamique** sur son réseau.
- Il ne s'agit donc pas d'une étude d'un secteur en particulier mais plutôt de la validation de méthodes et d'outils permettant la construction d'un modèle dynamique.

# *Pourquoi un modèle dynamique ?*



# Pourquoi un modèle dynamique ?

## Synthèse

- L'étude des données de trafic disponibles sur le territoire d'étude permet déjà de dégager de solides arguments en faveur d'un modèle dynamique de chargement du réseau.
- Par sa congestion importante, il existe en effet une **forte interdépendance dans l'espace et dans le temps** de l'écoulement des flux :
  - Difficulté de définir une période de pointe unique, car en fonction du point du réseau, la période la plus chargée varie (*variation de la structure de la demande au cours du temps et avancée de la « vague » de congestion*)
  - Difficulté d'isoler les tronçons les uns des autres, car des fortes difficultés d'écoulement du trafic en aval ont un impact manifeste sur le trafic en amont (écoulement congestionné sur l'A501 pour des débits inférieurs à la capacité attendue pour ce type de voie)
- Tous ces éléments militent dans le sens de la mise en place d'un modèle qui prenne en compte le temps comme variable explicite et qui soient en mesure de traiter d'un coup l'ensemble d'un réseau.

# Comment construire un modèle dynamique ?

## Synthèse

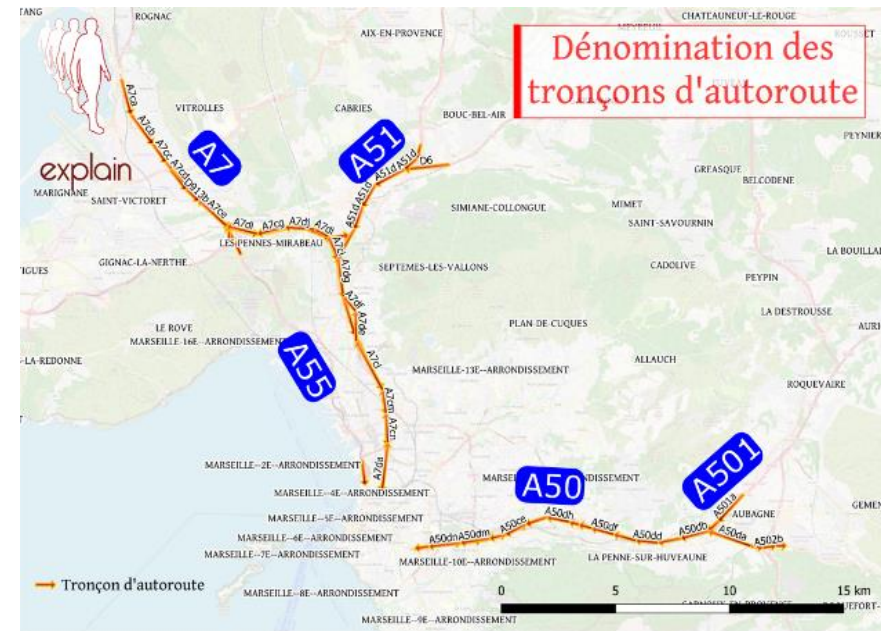
- Si l'intérêt « intellectuel » d'un modèle dynamique ne fait guère de doute, la question de sa mise en œuvre pratique reste entière. On pourrait craindre a priori une trop forte complexité algorithmique, calculatoire ou même en quantité de données nécessaire
- L'étude de faisabilité menée sur le cas A50 / A501 permet de montrer qu'un tel type de modèle est en fait relativement facile à monter avec les données déjà disponibles sur le réseau de la DiRMed :
  - Le choix d'un **modèle macroscopique dynamique** permet d'obtenir un modèle avec relativement peu de paramètres dont on maîtrise totalement la réactivité et le calage.
  - Les temps de calculs sont très courts, même pour le réseau entier
  - Les mesures de débits (SIREDO) et de temps de parcours (FCD) déjà disponibles suffisent à sa mise en place



# Pourquoi un modèle dynamique ?

## Éléments contextuels

- 650k déplacements par jour, dont >50k sur chacun des trois principaux corridors métropolitains
- 96% des dépl. métropolitains en voiture
- Territoire d'assez faible densité, structuré en étoile autour de Marseille (contraignant pour l'offre TC)
- « Métropole autoroutière » avec forte congestion, d'où
  - Des temps de parcours très variables
  - Une forte pollution



**Réseau autoroutier géré  
par la DIRMed**



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)

- Axe A50-A501 d'Aubagne à Marseille
- Vitesse limitée à 90 km/h
- 2 puis 3 voies dans ce sens, pour l'essentiel
- Axe très chargé en HPM, avec un temps de parcours de part en part (Aubagne(A501)→Marseille(A50)) d'environ 11 minutes qui double presque en hyperpointe



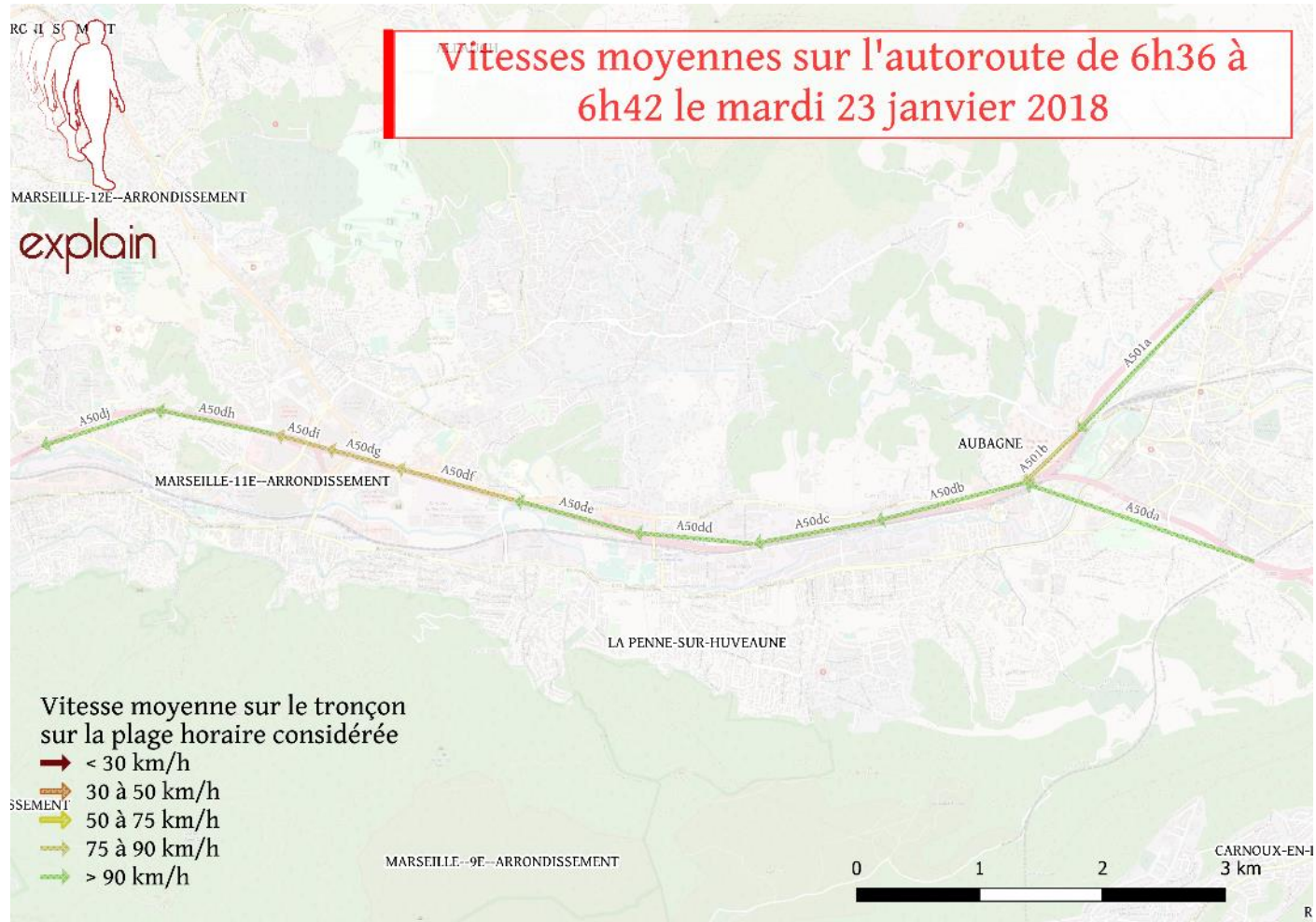
## Axe A50-A501

# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



(mesures FCD)

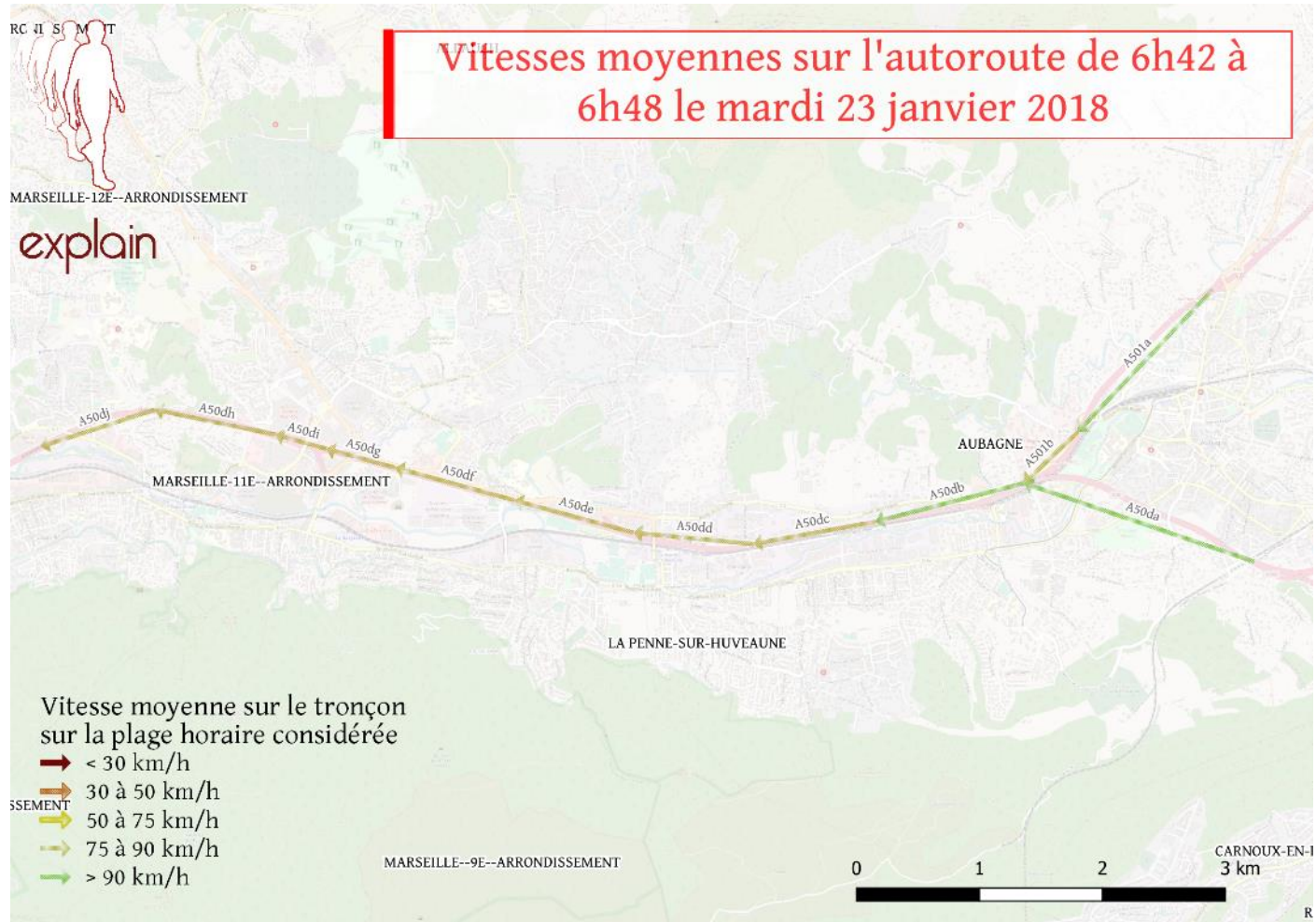


# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



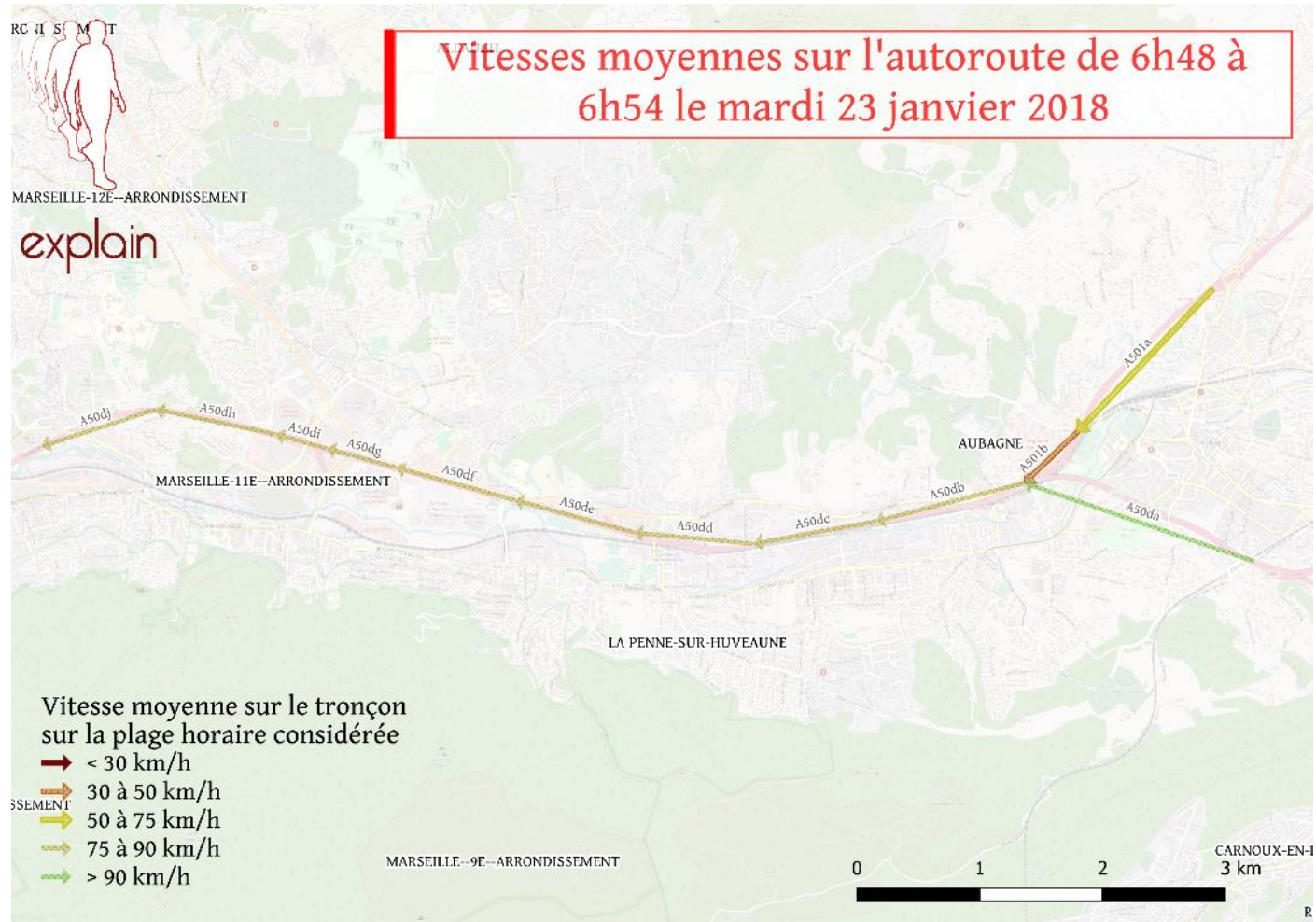
(mesures FCD)





# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

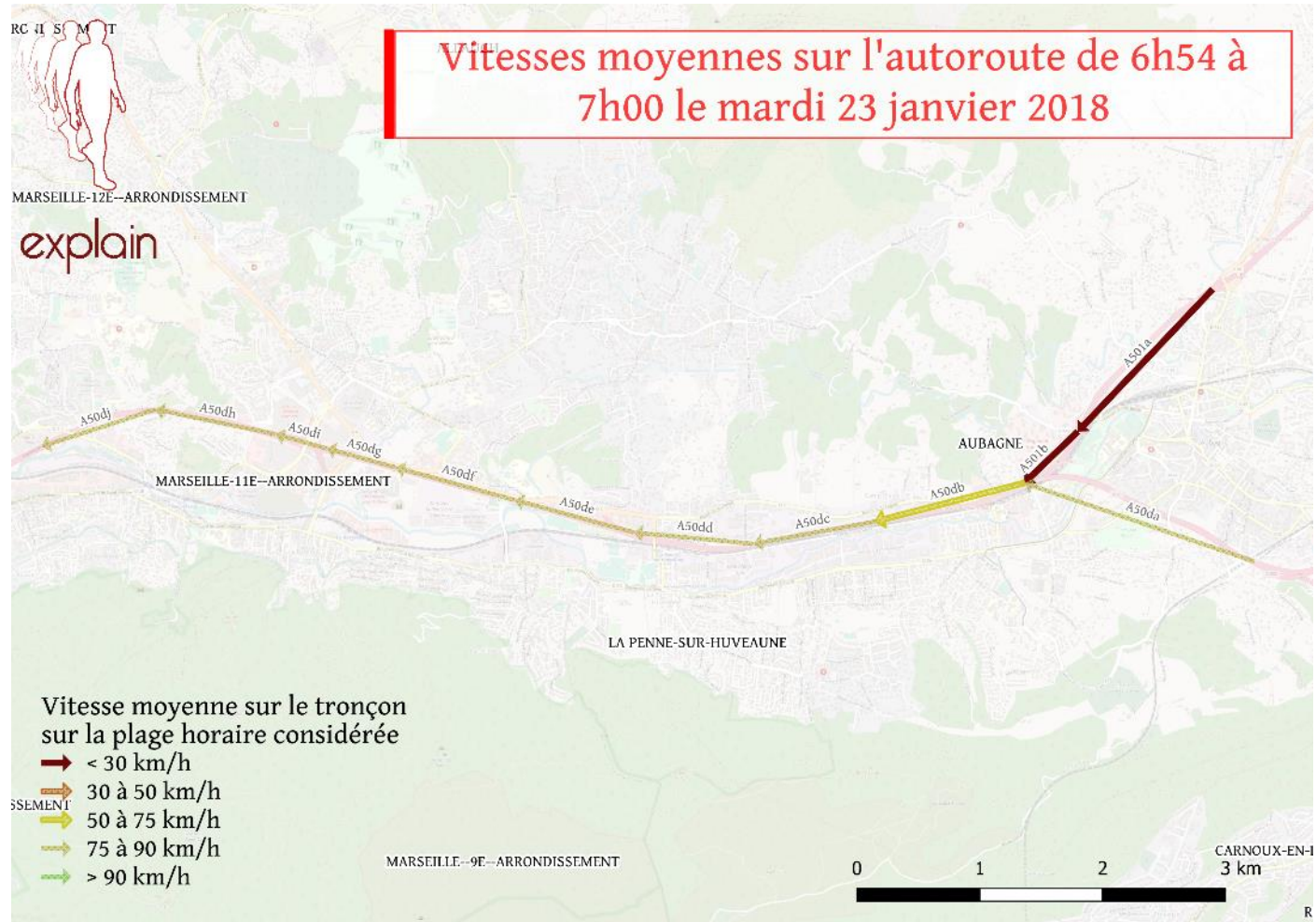
Mardi 23 janvier 2018 (PPM)





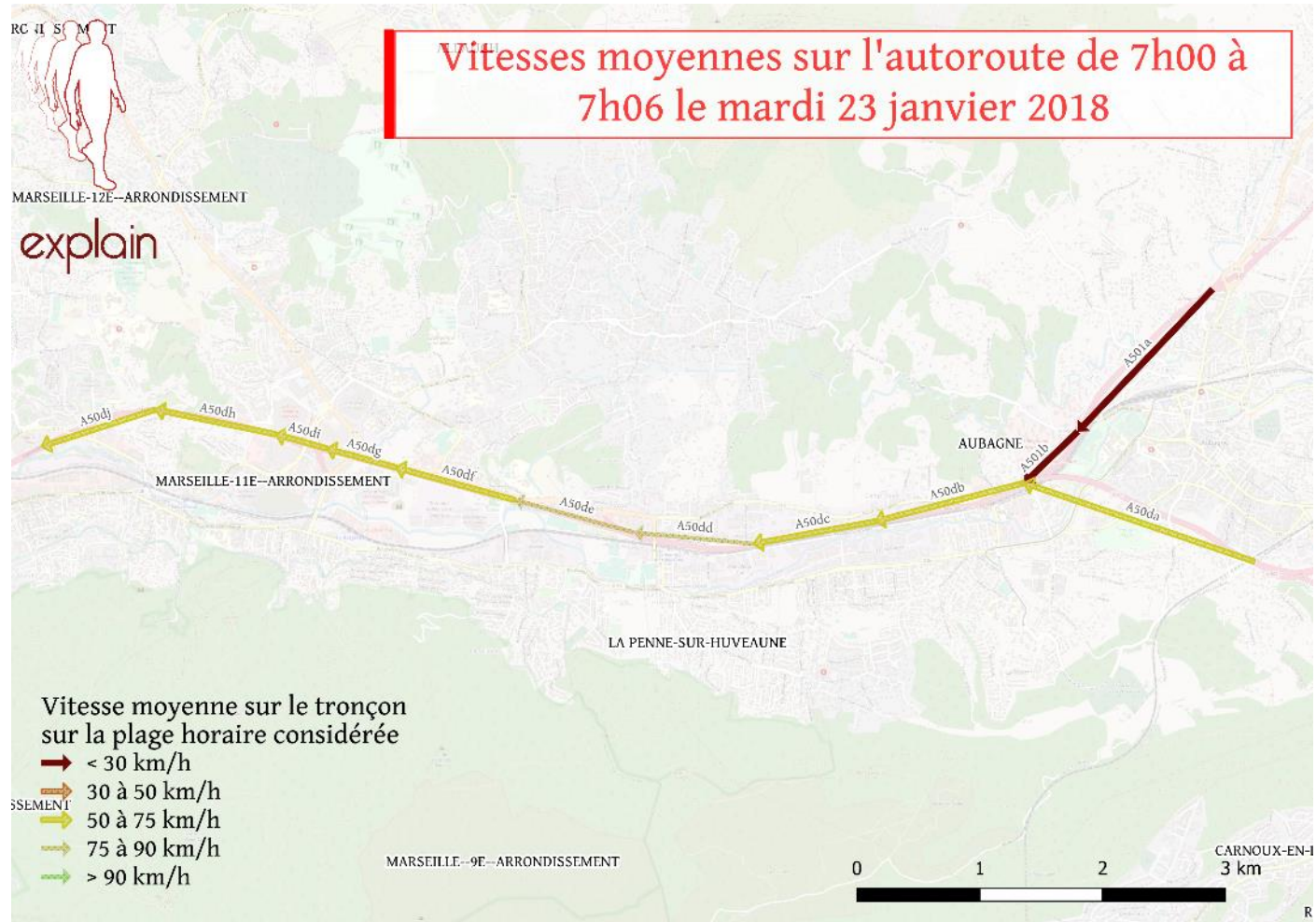
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

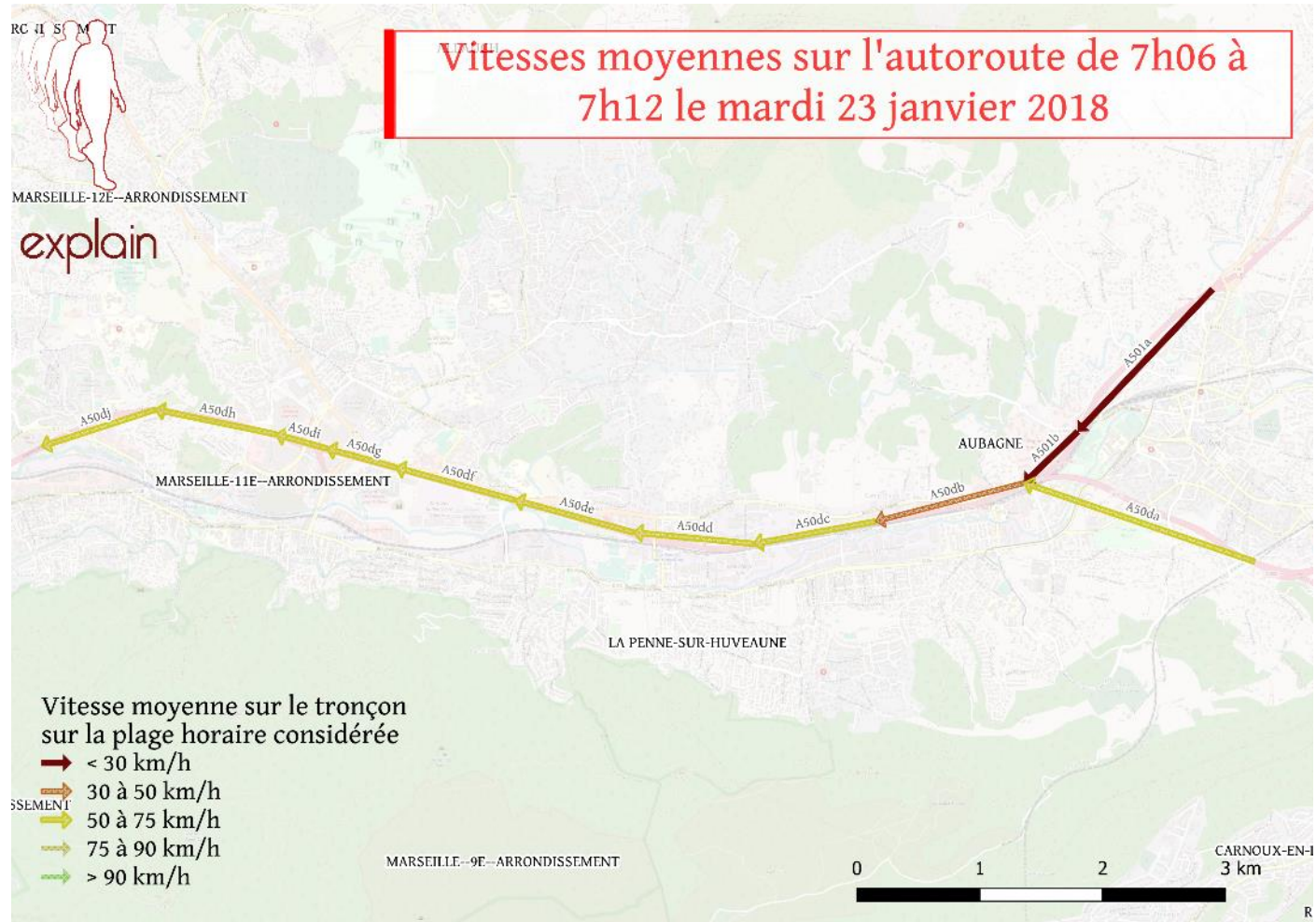
Mardi 23 janvier 2018 (PPM)





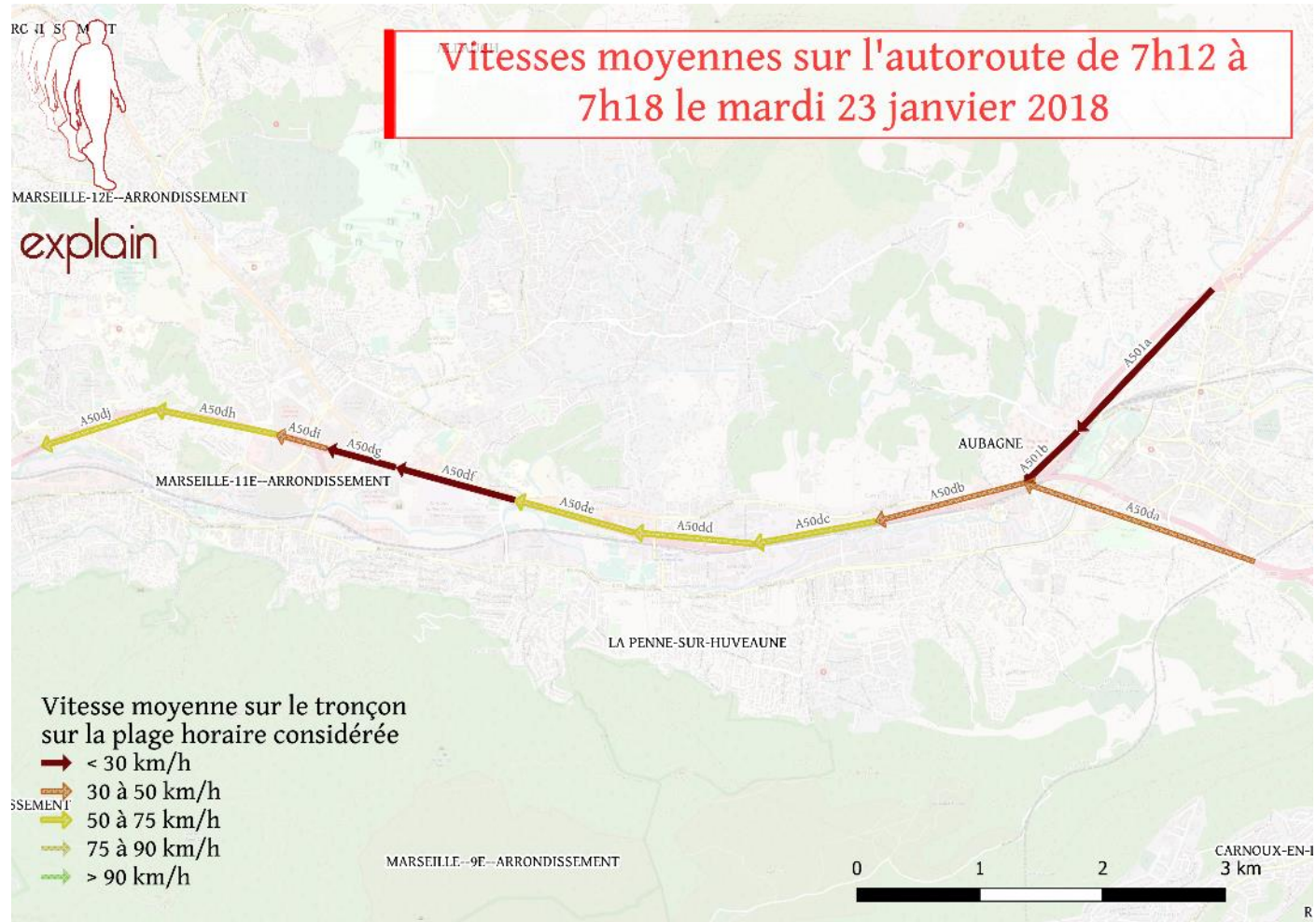
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

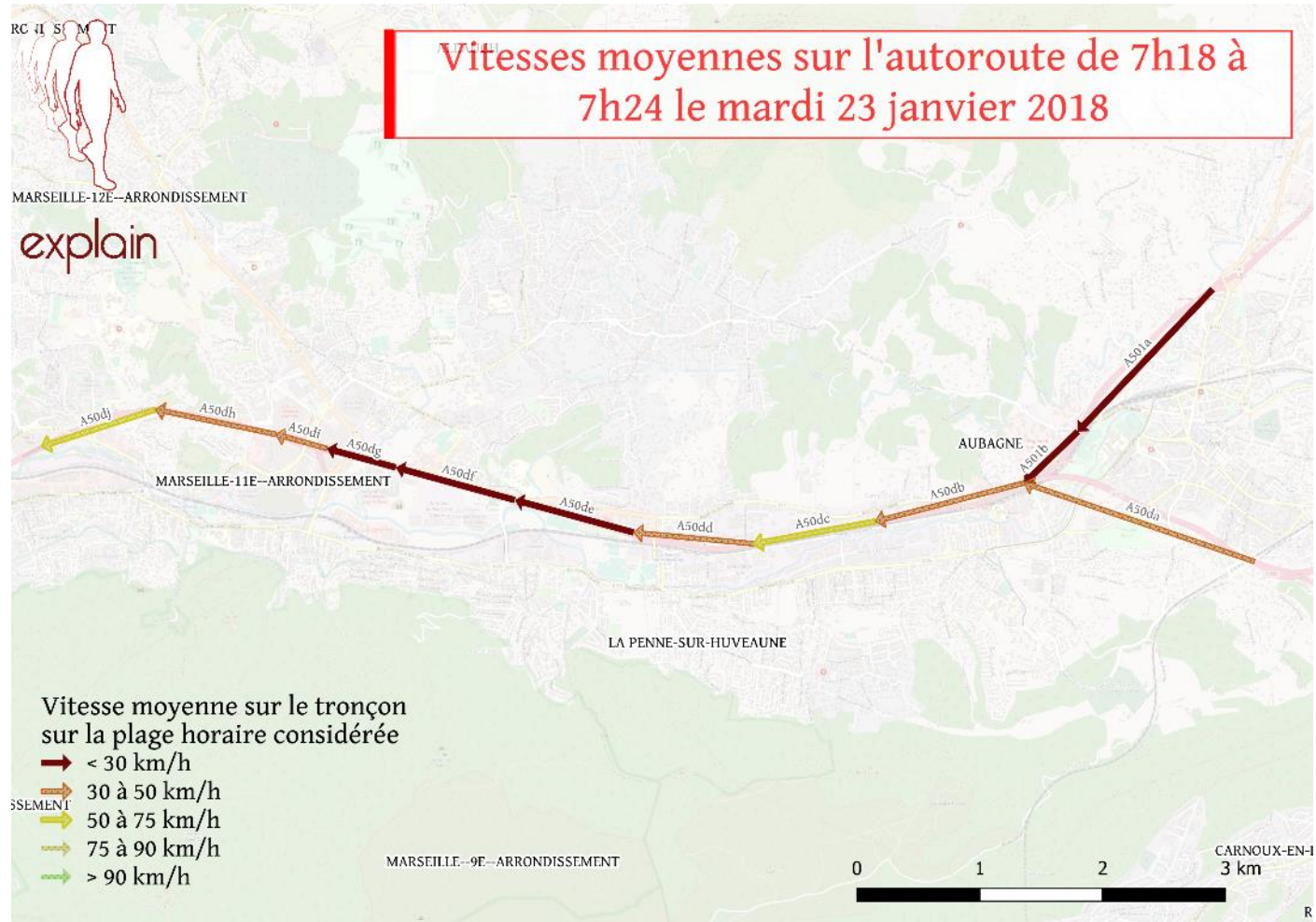
Mardi 23 janvier 2018 (PPM)





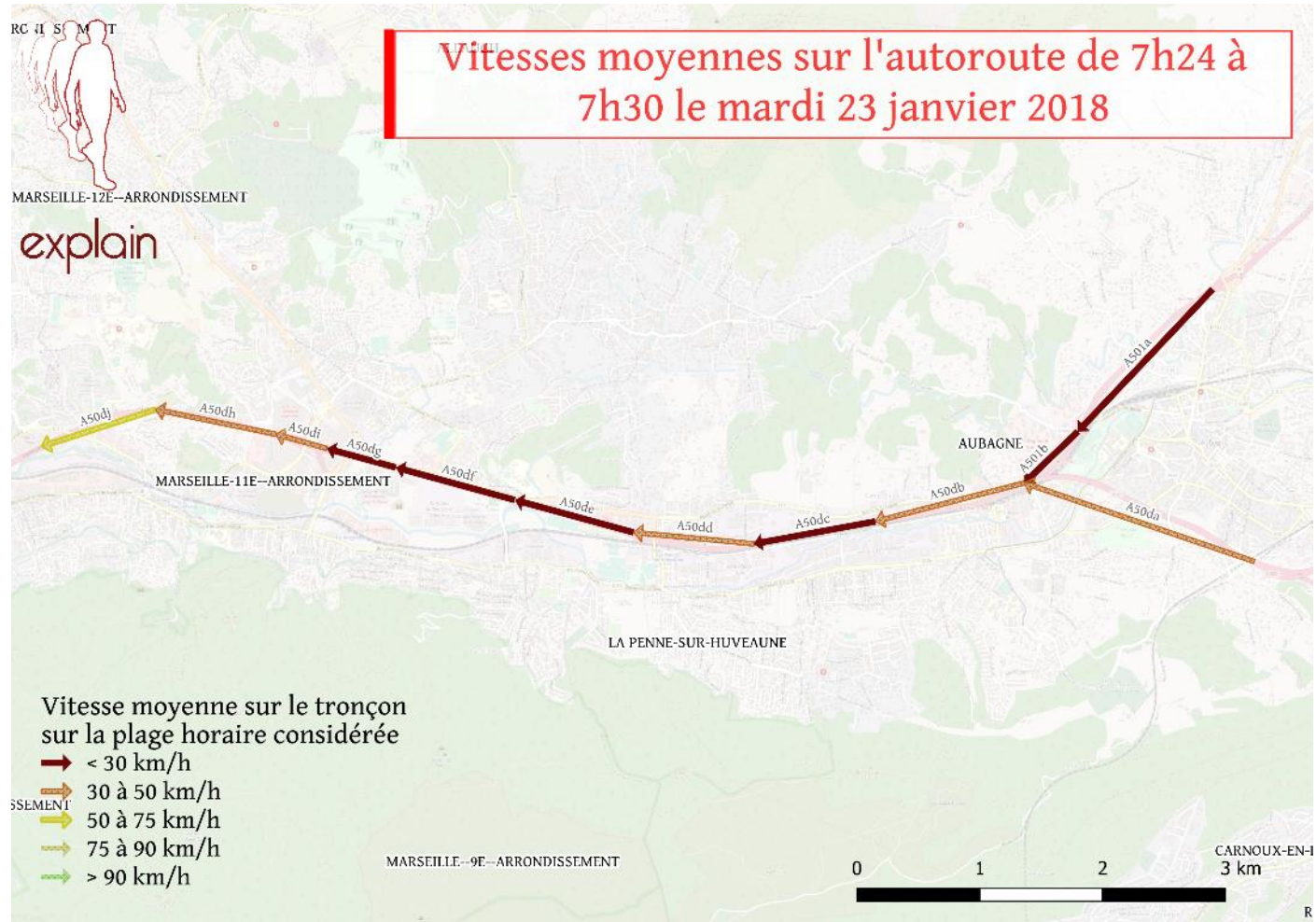
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

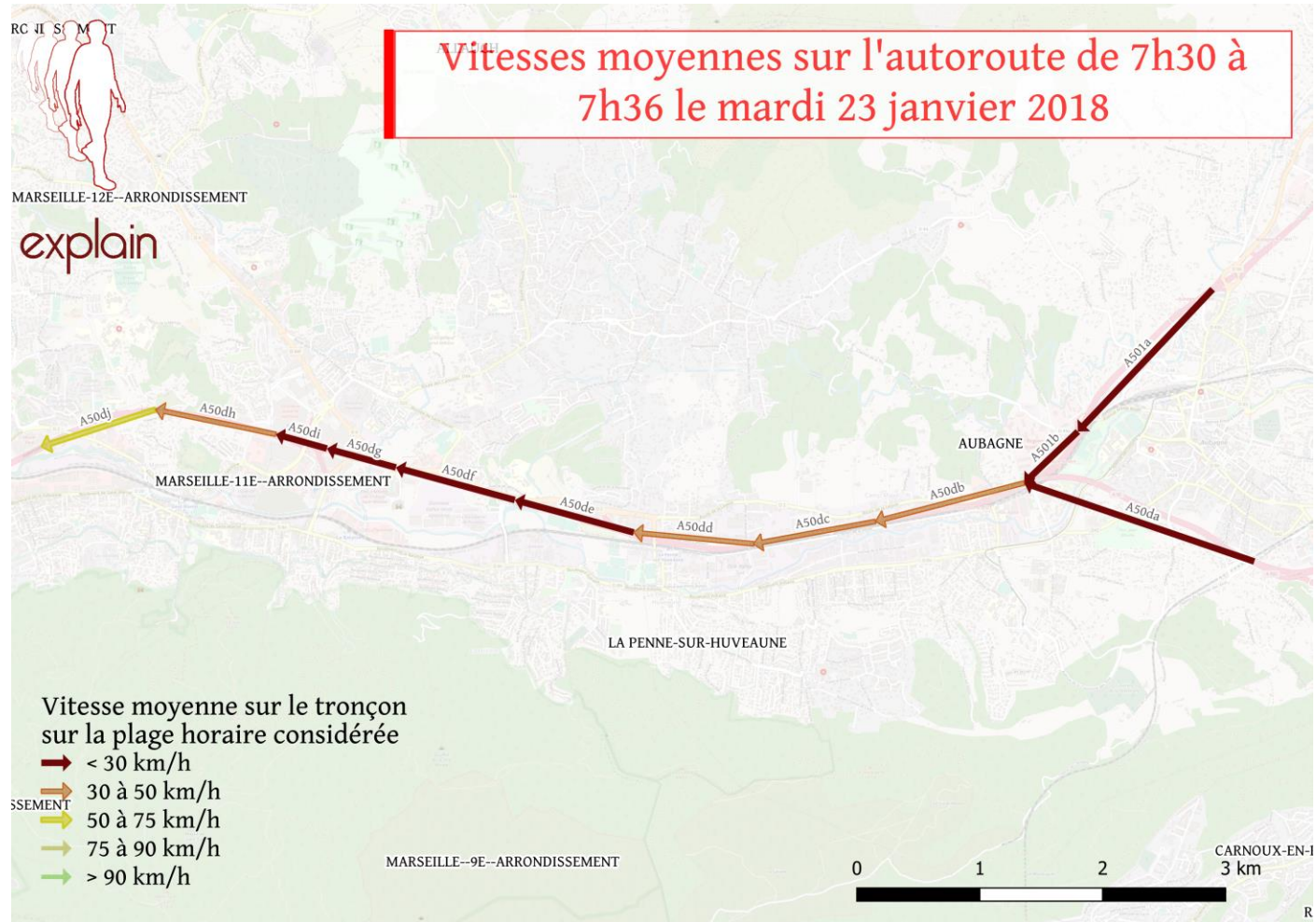
Mardi 23 janvier 2018 (PPM)





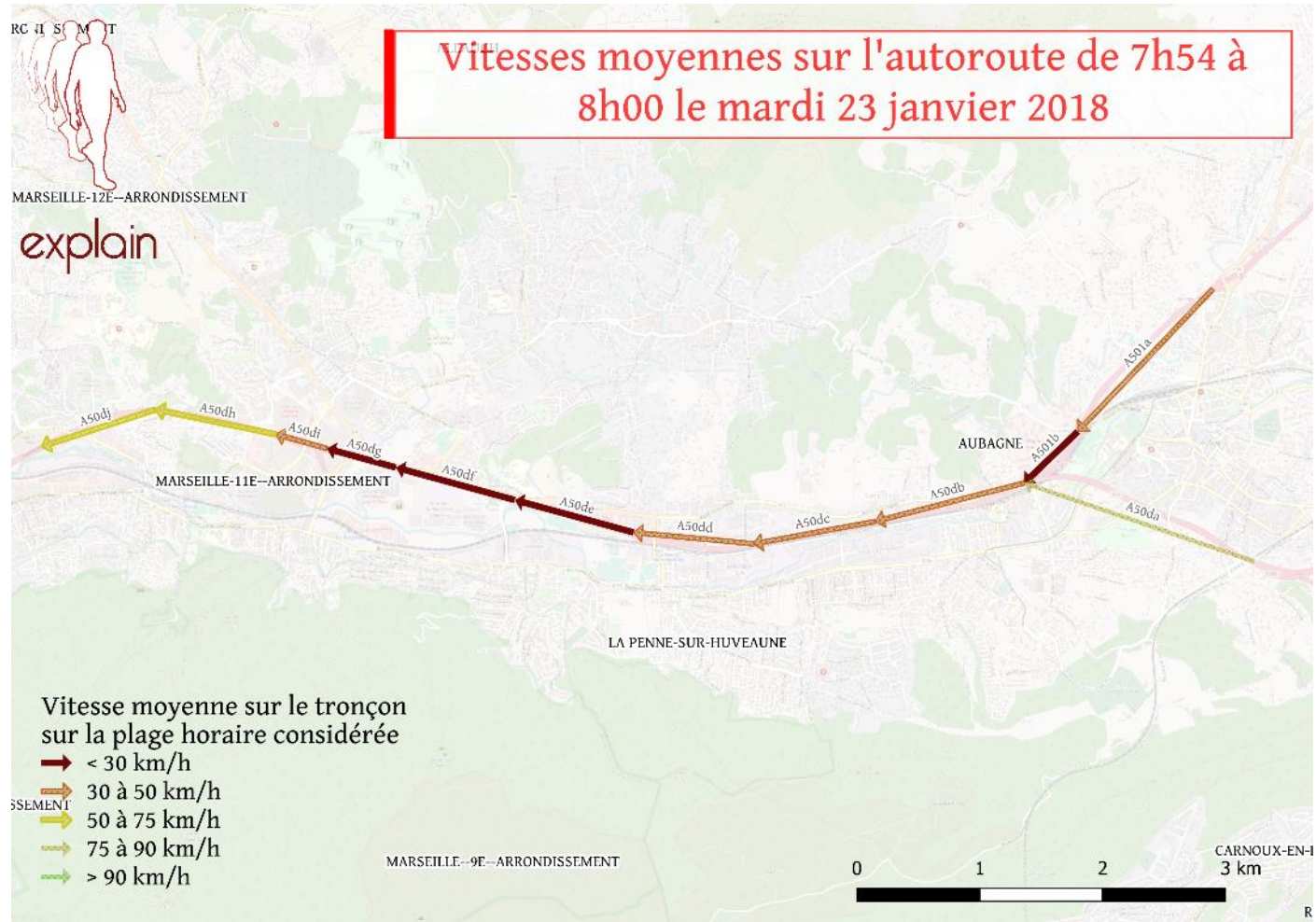
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

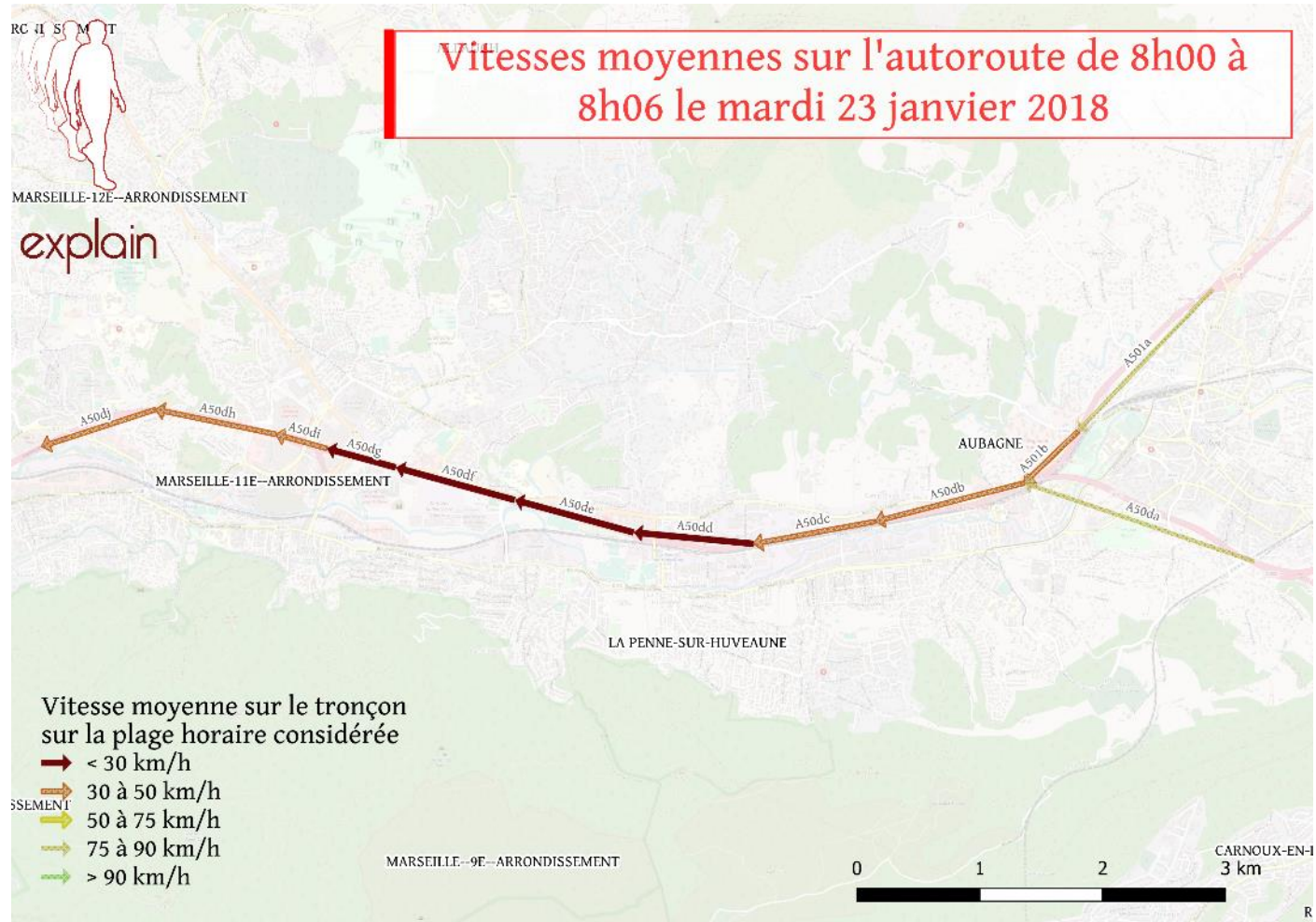
Mardi 23 janvier 2018 (PPM)





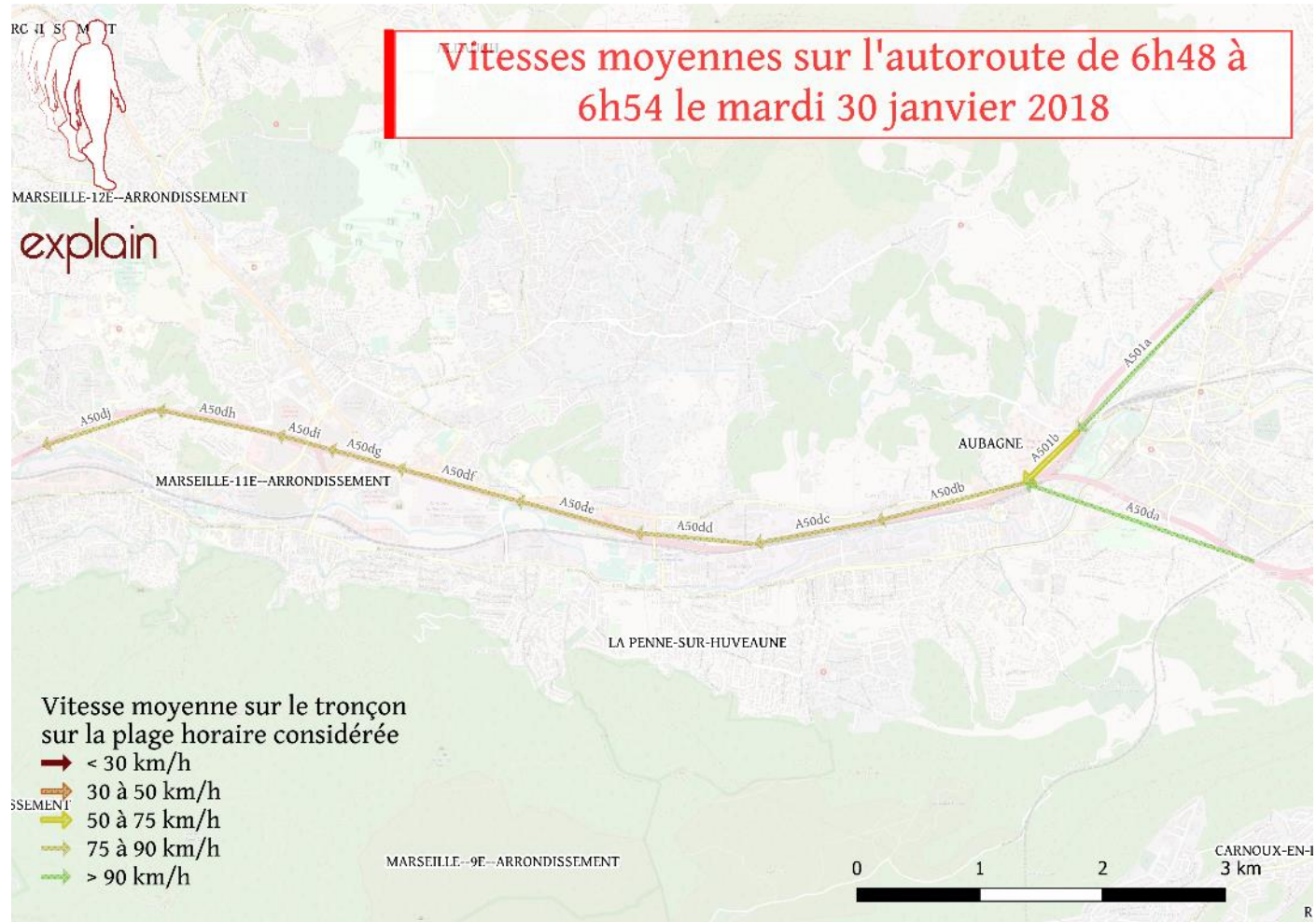
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 23 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

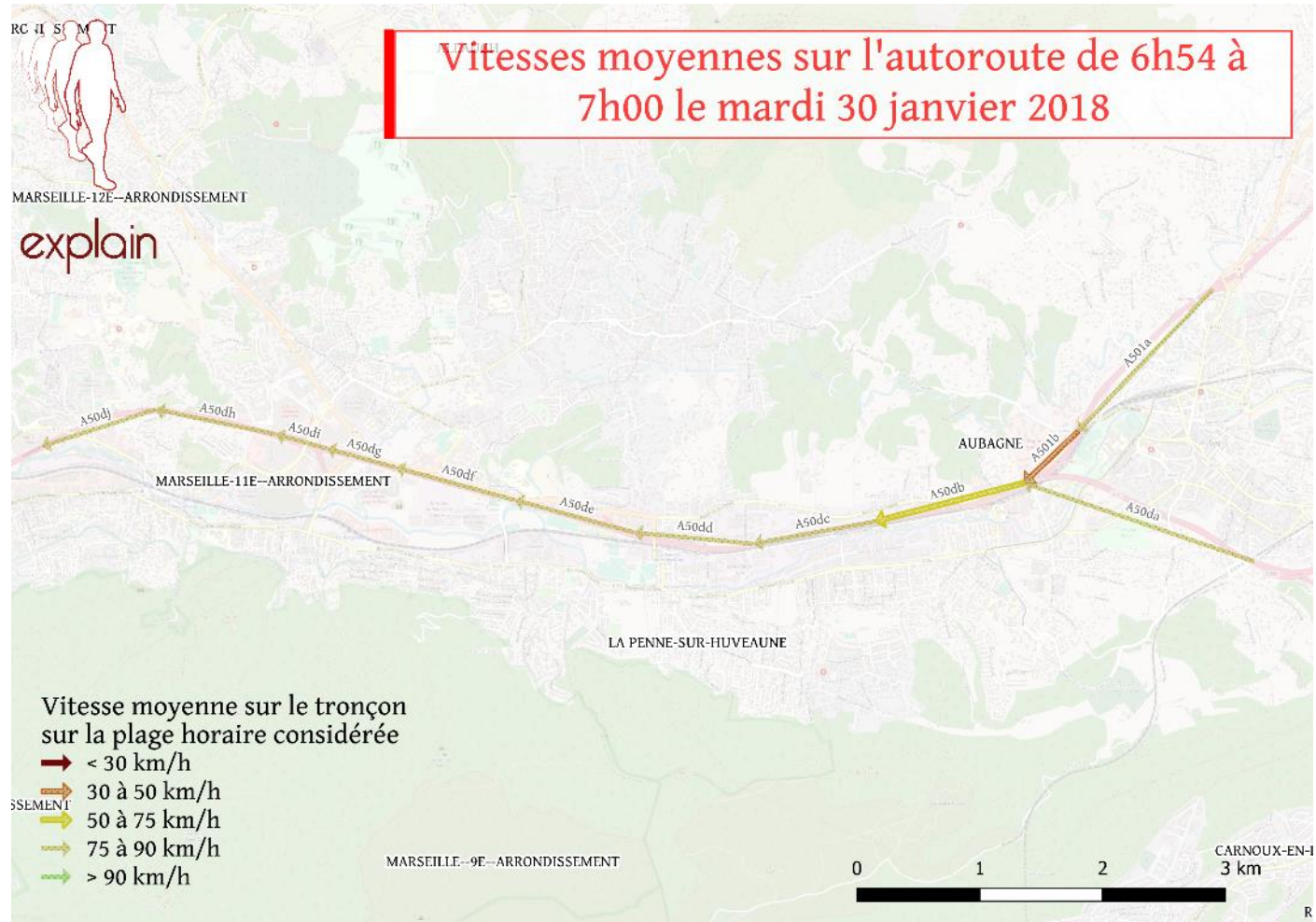
Mardi 30 janvier 2018 (PPM)





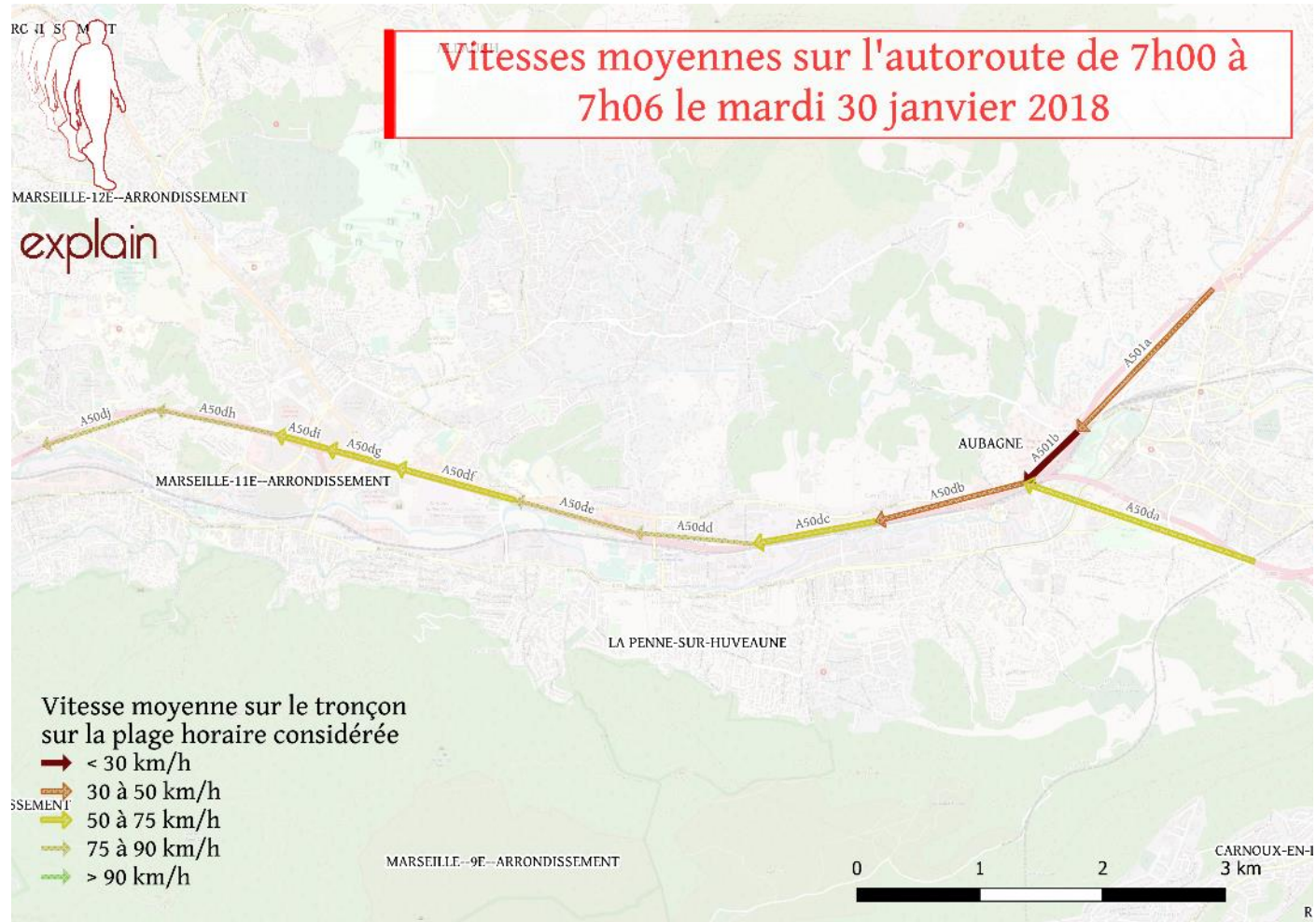
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 30 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

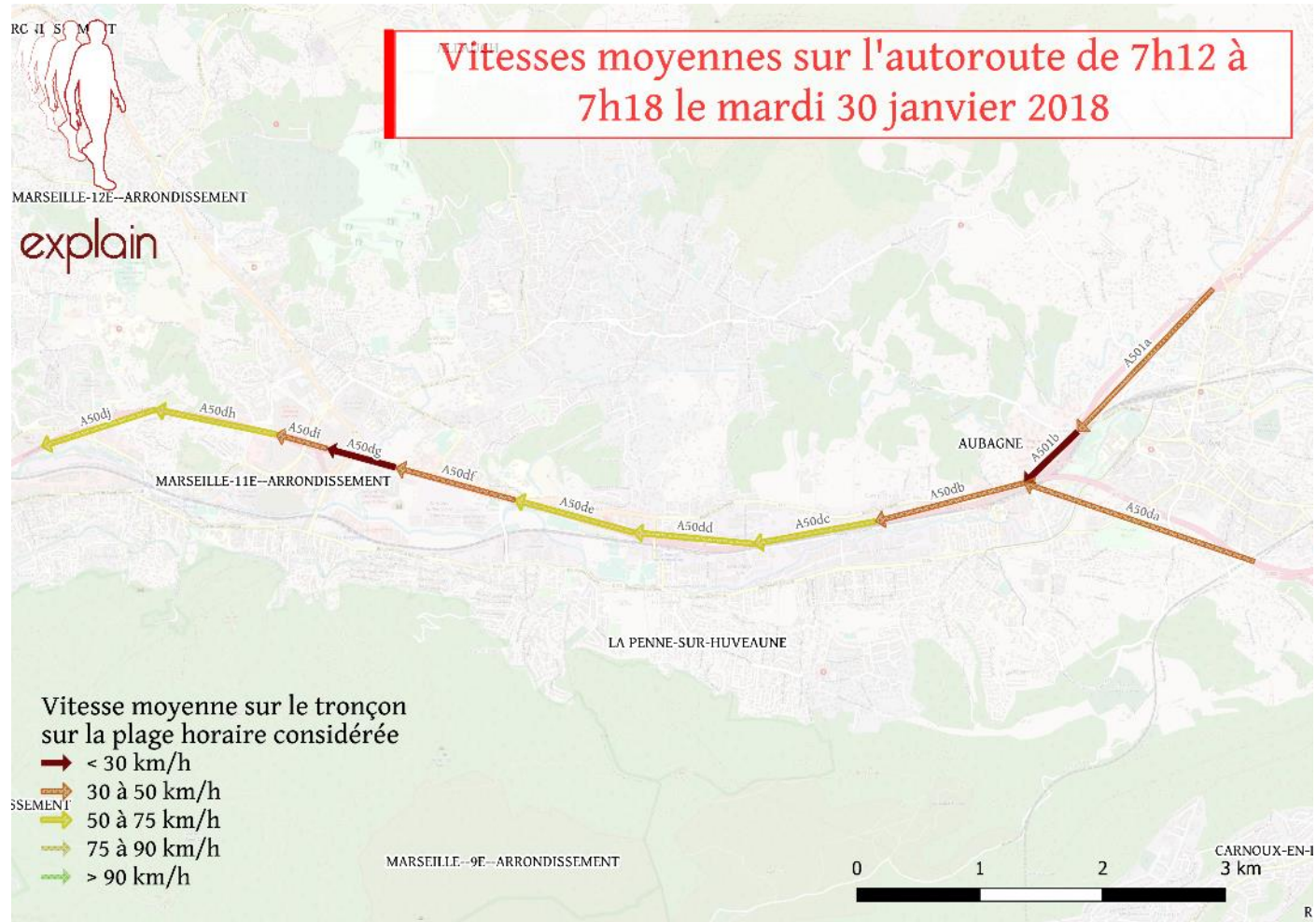
Mardi 30 janvier 2018 (PPM)





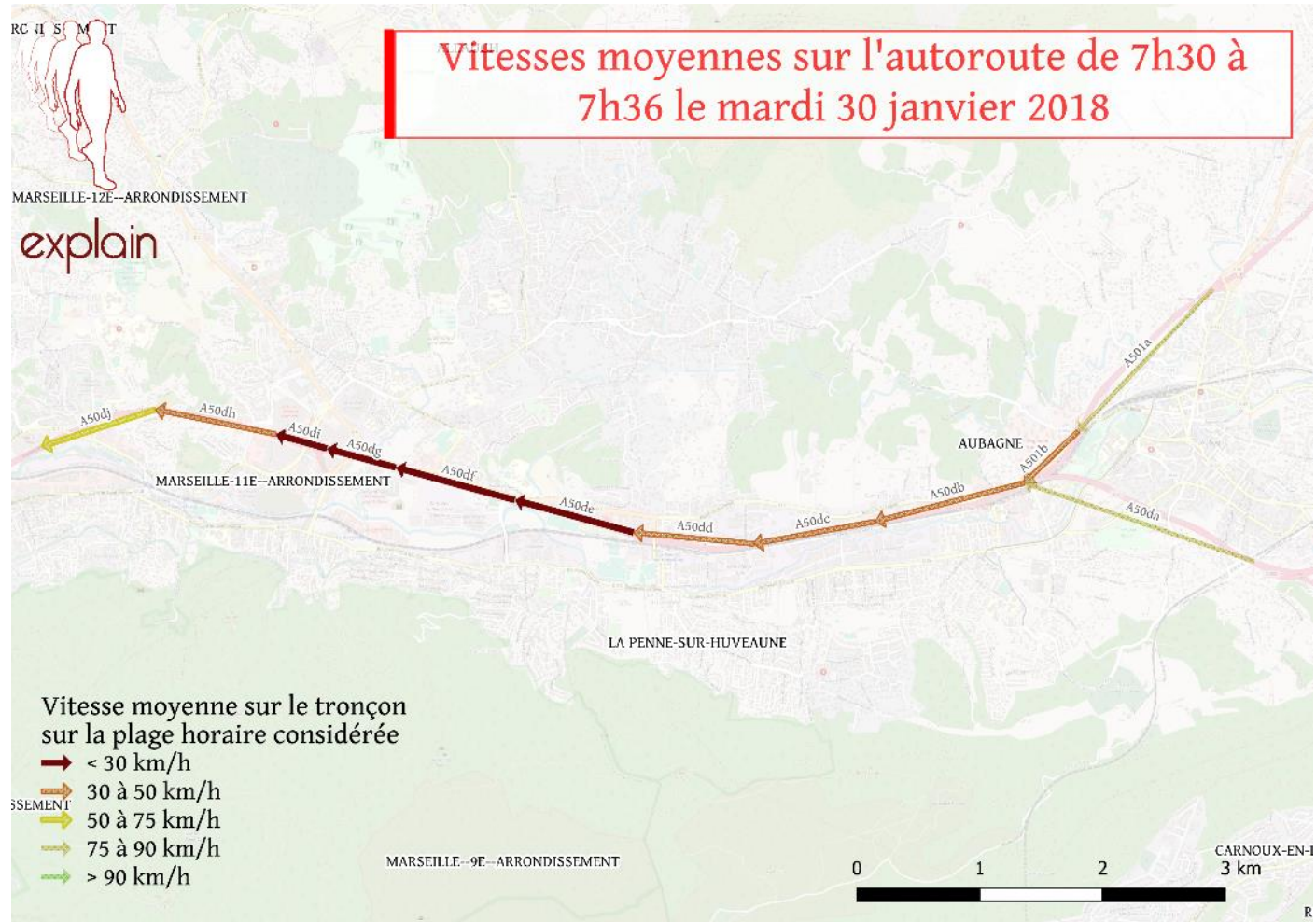
# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 30 janvier 2018 (PPM)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Mardi 30 janvier 2018 (PPM)



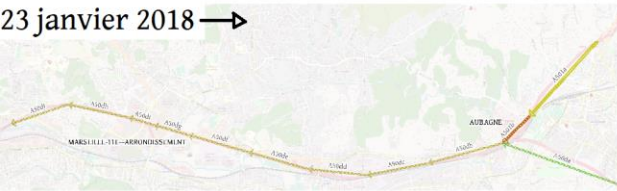


# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

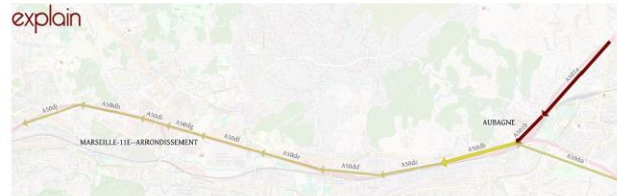
## 3 mardis successifs



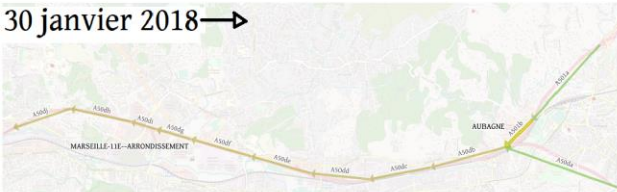
23 janvier 2018 →



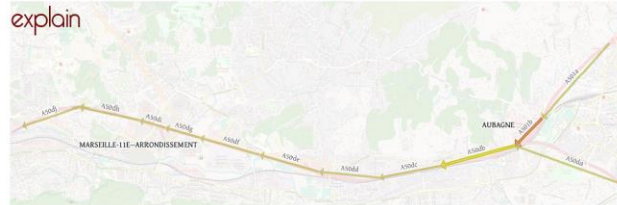
explain



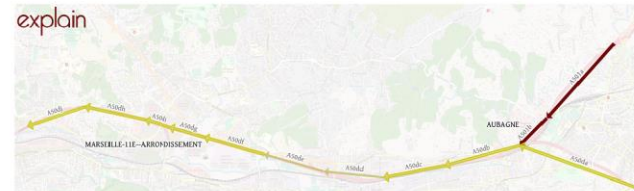
30 janvier 2018 →



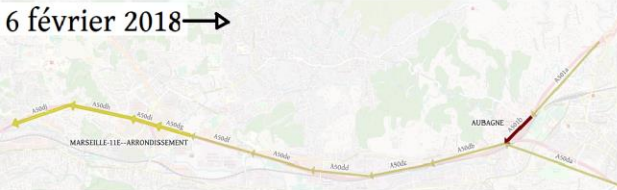
explain



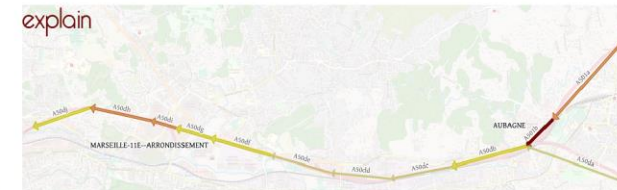
explain



6 février 2018 →



explain



explain

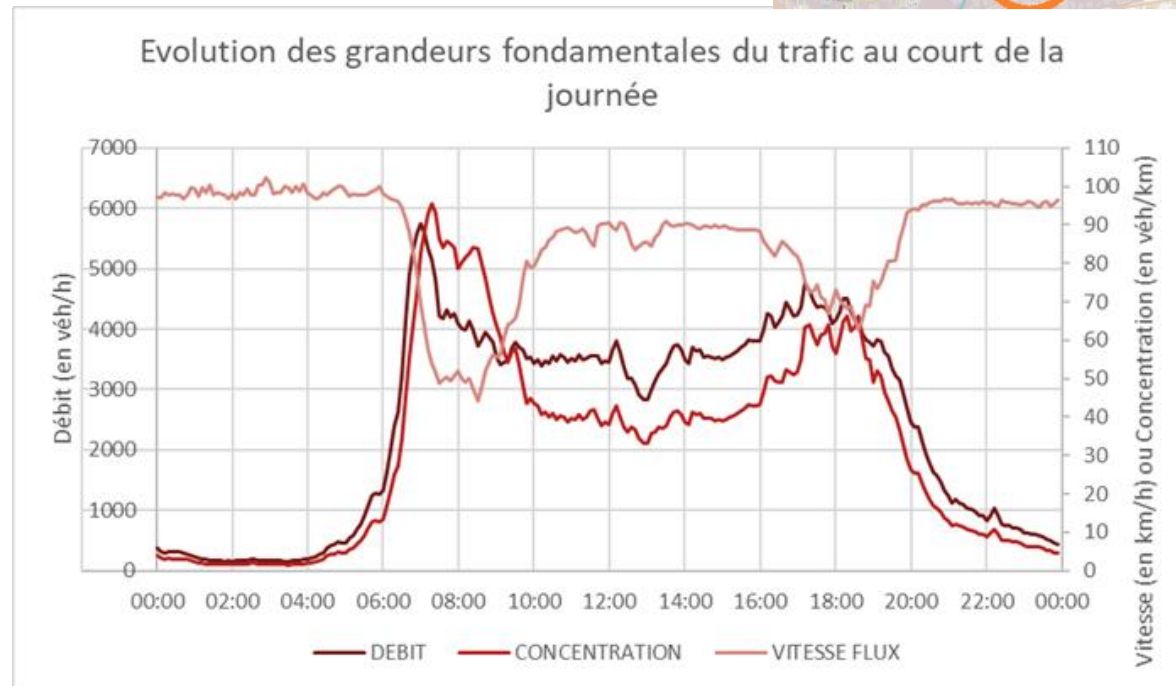




# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

Demande très variable au cours de la journée

Evolution au fil de la journée des débit, vitesse et concentration moyens en aval du convergent les mardis (données SIREDO)



# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

## Variabilité

### Observations

- Un même scénario d'émergence de la congestion qui débute sur l'A501 au niveau du convergent (1 voie), remonte l'A501 et gagne ensuite l'aval du convergent, tandis que les tronçons à l'ouest de la Valentine se chargent fortement.
- ... mais, dans le détail, une dynamique variable entre jours *a priori* équivalents

# Axe A50-A501: Evolution de la circulation

## Variabilité

### Observations

- Un même scénario d'émergence de la congestion qui débute sur l'A501 au niveau du convergent (1 voie), remonte l'A501 et gagne ensuite l'aval du convergent, tandis que les tronçons à l'ouest de la Valentine se chargent fortement.
- ... mais, dans le détail, une dynamique variable entre jours *a priori* équivalents

### Impact pour la modélisation

- Effets dynamiques à modéliser
- Interdépendance entre arcs successifs
- Variabilité de la réponse pour des conditions assez comparables



# Comment construire un modèle dynamique ?



# Comment construire un modèle dynamique ?

## Synthèse

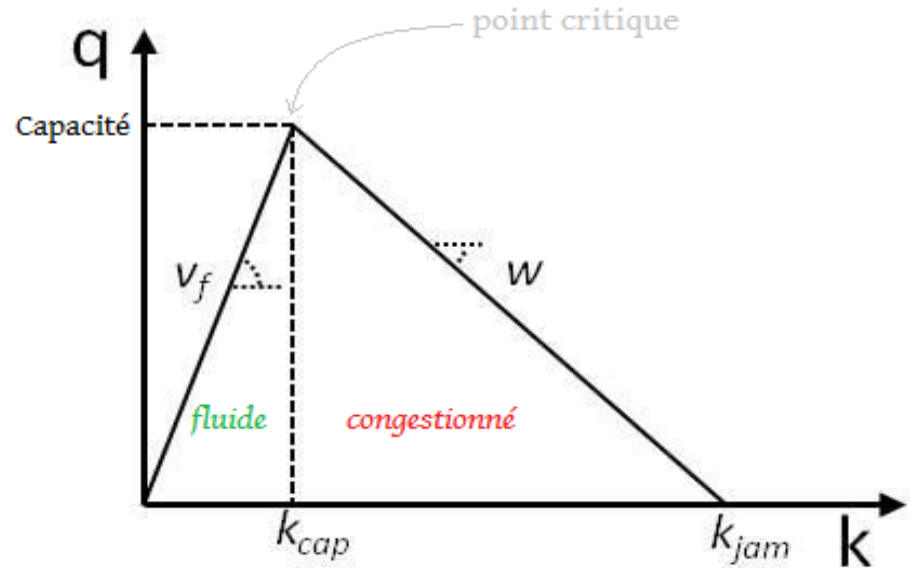
- Au-delà de l'intérêt « intellectuel » d'un modèle dynamique, question de sa **mise en œuvre pratique**. On pourrait craindre une trop forte complexité algorithmique, calculatoire ou même en quantité de données nécessaire
- L'étude de faisabilité menée sur le cas A50 / A501 établit que son élaboration est abordable avec les données déjà disponibles sur le réseau de la DiRMed :
  - Le choix d'un modèle macroscopique dynamique permet de se contenter de peu de paramètres, dont on maîtrise totalement la réactivité et le calage.
  - Temps de calculs très courts, même pour le réseau entier
  - Les mesures de débits (SIREDO) et de temps de parcours (FCD) déjà disponibles suffisent à sa mise en place

# Comment construire un modèle dynamique ?

## Dans le détail : Tour d'horizon des modèles

### — Modèles macroscopiques :

- *Lighthill-Whitham-Richards* (LWR)  
+ modèle de jointure des arcs
- Temps de calcul avantageux
- Peu de paramètres à étalonner
- Moins de marge de manœuvre



**Diagramme fondamental**

- **Modèles microscopiques** : simulation de voitures individuelles obéissant à des règles
- **Modèles mésoscopiques** : automates cellulaires, modèles de files d'attente

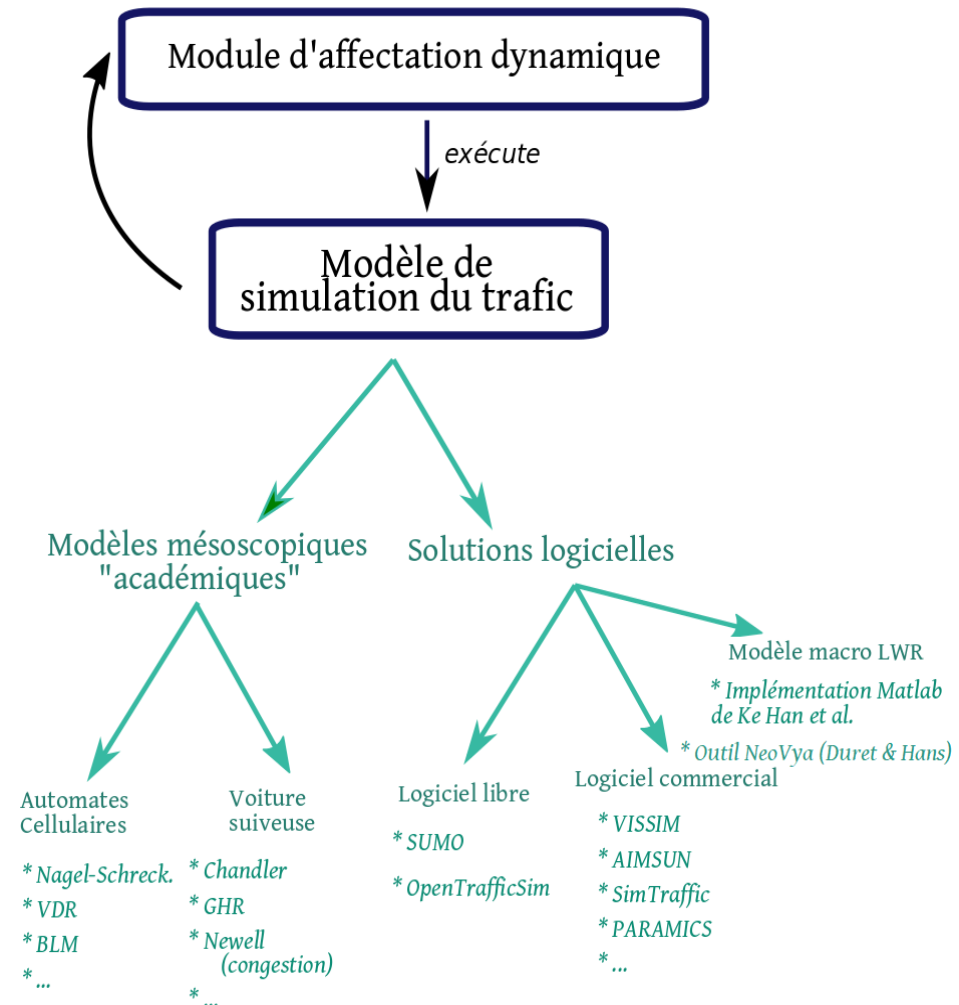


# Comment construire un modèle dynamique ?

## Choix d'un modèle

- Couplage du modèle de simulation dynamique du trafic à un modèle d'affectation dynamique :
  - Choix de l'heure de départ
  - Choix de l'itinéraire
- Les choix effectués doivent être optimaux (*principe de Wardrop*)
- Possibilité d'ajouter une « surcouche » pour inclure la rétroaction du temps de parcours observé sur la demande (*élasticité au temps de parcours*)

### Arbre décisionnel pour le choix d'un modèle

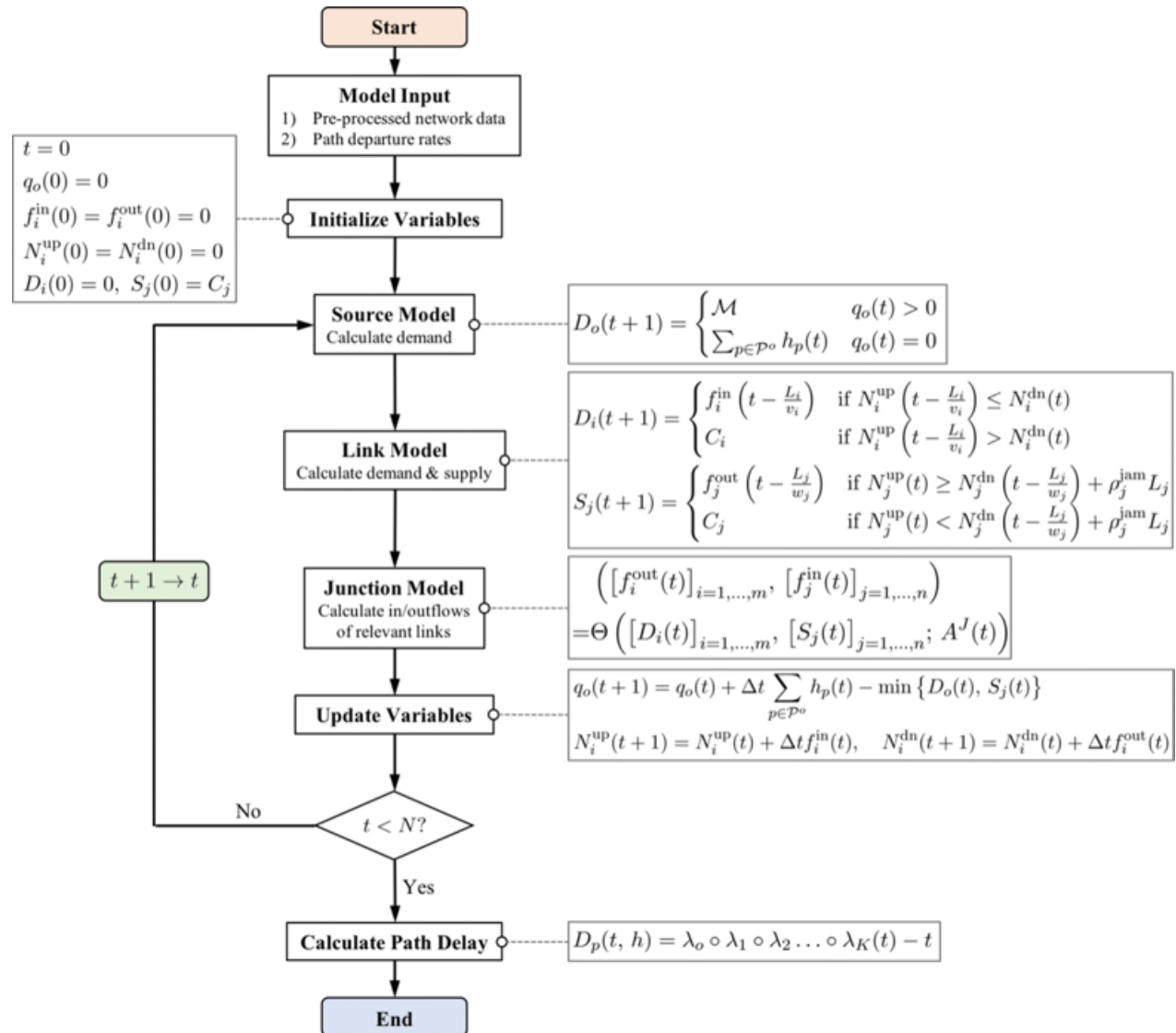


# Comment construire un modèle dynamique ?

Choix d'un modèle LWR basé sur l' algorithme de Ke Han et al.

- Un modèle macroscopique dynamique semble particulièrement adapté au cas du réseau A50 / A501 :
  - Longueur importante du linéaire à modéliser
  - Trafics importants ( 94.000 véhicules / JOB, 25.000 véhicules sur la période 6h - 10h)
  - Faible complexité du réseau : pas de « carrefour » complexe (pas de feux ou autre), faible densité d'intersections, trafics relativement uniformes dans leur composition (essentiellement VL)
  - Disponibilité de codes librement disponibles.

# Choix d'un modèle: algorithme de Ke Han et al.

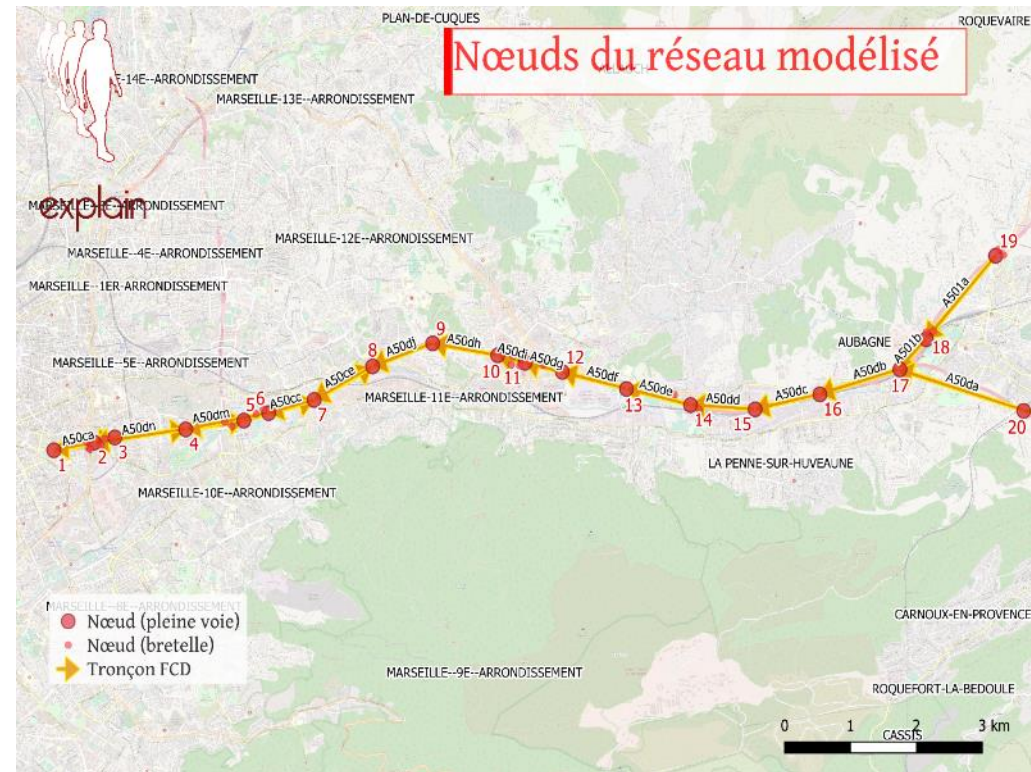




# Comment construire un modèle dynamique ?

## Codification du réseau

- Avoir des arcs le plus proches possible des tronçons FCD



**Nœuds principaux (*i.e.*, en section courante) du réseau modélisé**

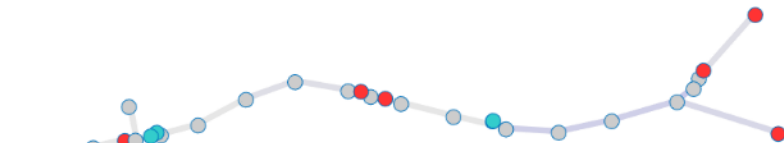
# Comment construire un modèle dynamique ?

## Codification du réseau

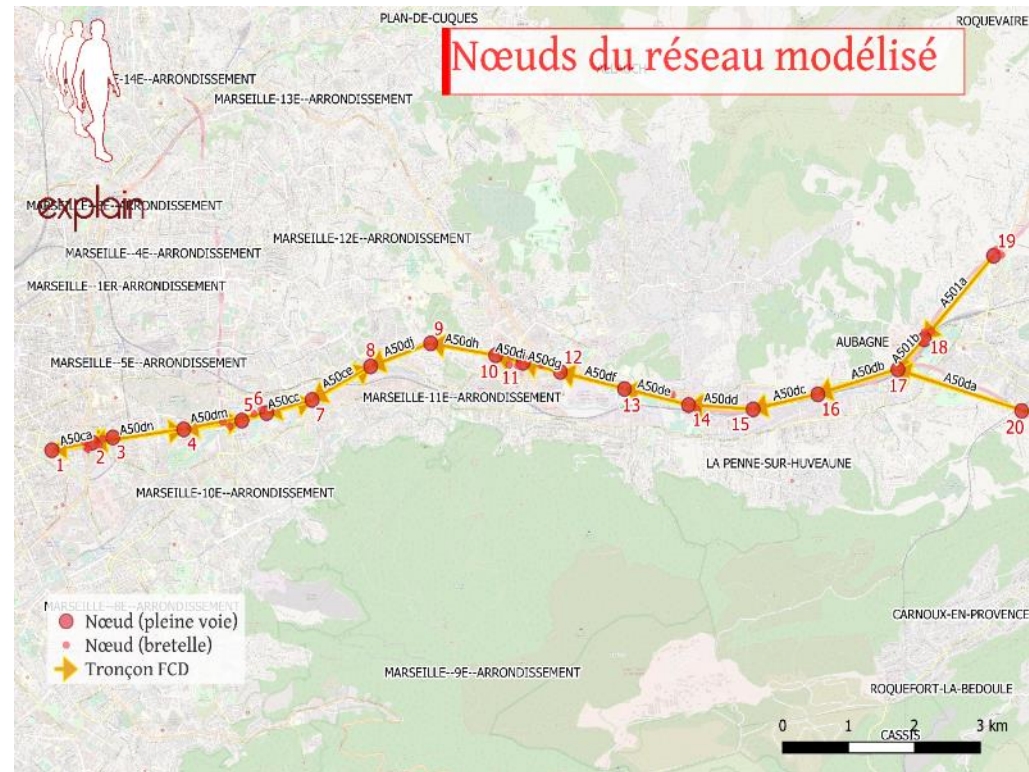
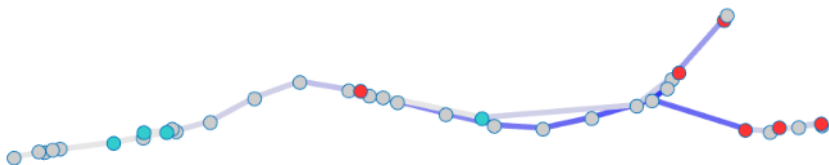
- Avoir des arcs le plus proches possible des tronçons FCD

- Deux niveaux de détail :

- Un réseau « épuré » avec 27 nœuds



- Un réseau plus détaillé de 37 nœuds (*dont une partie de la D2*)



**Nœuds principaux (*i.e.*, en section courante) du réseau modélisé**

# Comment construire un modèle dynamique ?

## Codification du réseau

Lien_no	Nom_court	NUM_ROUTE	SENS	Nstart	Nend	VITESSE	FFT	Capacité	longueur	Postes_comptage	SIREDO
1	A501b1	A501	O	18	175	90	10.77	1.10	269.2		
2	A501a	A501	O	19	18	90	64.48	1.10	1612.1		M4l,M4m,M4n,M4o
102	A50_S1	D8N	E	2	25	50	14.40	0.80	200	46	
3	A502b	A502	E	21	22	90	22.87	1.10	571.7		
4	A502a	A502	E	20	21	90	22.29	1.10	557.3		
104	A50_S3	D8N	O	3	28	50	14.40	0.80	200	50	
5	A502c	A502	E	22	23	90	18.67	1.10	466.8		
6	A50cb	A50	E	3	4	90	43.28	1.65	1082.1		M3B,M3C,M3D

### Tableur Excel pour les arcs (*extrait*)

ID	NUM_ROUTE	X	Y
1	A50	894302.021	6245561.922
2	A50	894914.801	6245670.492
3	A50	895229.471	6245744.099
4	A50	896307.816	6245858.190
5	A50	897191.101	6245983.323
6	A50	897568.338	6246090.053

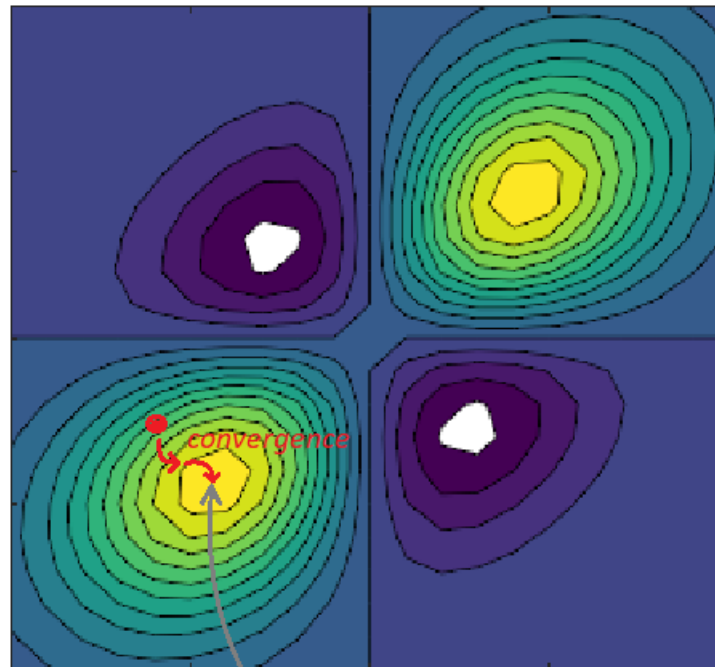
### Tableur Excel pour les nœuds (*extrait*)



# Comment construire un modèle dynamique ?

## Méthode d'étalonnage de la demande

### Etalonnage en amont de l'équilibrage dynamique



optimum au sens de Nash

# Comment construire un modèle dynamique ?

## Méthode d'étalonnage de la demande

### Deux méthodes de calage proposées et testées :

- Une méthode de Fratar qui s'appuie sur les flux émis ou attirés à chaque nœud d'entrée ou de sortie du réseau :
  - *Avantages* : facile à mettre en œuvre, cohérence et niveau des trafics injectés dans le réseau assurés par construction
  - *Inconvénients* : nécessite une connaissance a priori des courbes de débit de toutes les entrées-sorties. Ignore les itinéraires alternatifs,
- Une méthode qui suit les débits par arc tout au long de chaque itinéraire et les répartit entre itinéraires :
  - *Avantages* : intègre les itinéraires alternatifs, pas de besoin impératif de toutes les entrées / sorties
  - *Inconvénients* : la reproduction du volume global de déplacements n'est pas garantie par construction et appelle à la vigilance du modélisateur.

# Comment construire un modèle dynamique ?

## Méthode d'étalonnage de la demande

### Méthode de Fratar :

- Prend en entrée : les débits issus des entrées et aux sorties du réseau par tranche de 6 minutes
- Tient compte des temps de parcours par OD pour lier chaque horaire de départ par itinéraire à deux horaires d'arrivées :
  - 1 tranche de 6 min à l'origine est liée à deux tranches de 6 min à destination*
- Optimise alternativement les distributions de débit
  - aux origines
  - aux destinations

pour obtenir une structure de matrice respectant ces deux contraintes

		A50						...	Débits entrants
		6h0 0	6h0 6	6h1 2	6h1 8	6h2 4	...	...	
A50 1	6h0 0		x11	x12				...	
	6h0 6			x21	x22			...	
	6h1 2				x31	x32		...	
	...								
...	...								
Débits sortants									

Redressements successifs

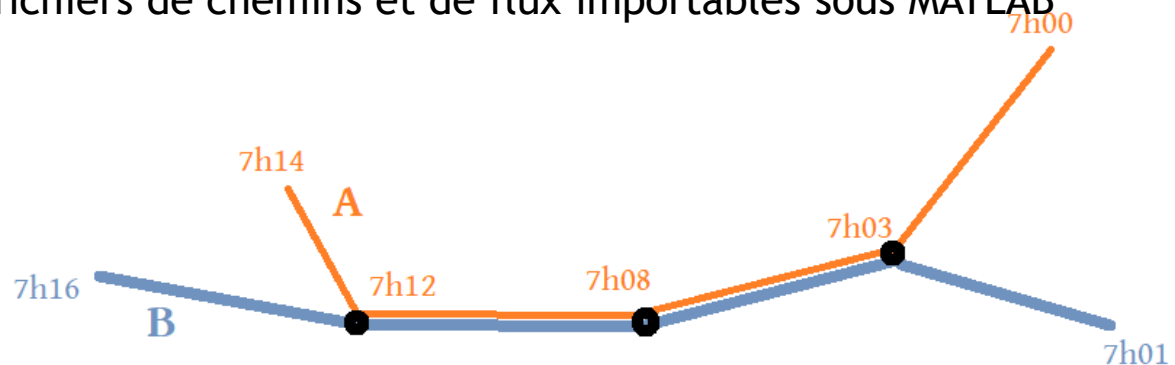


# Comment construire un modèle dynamique ?

## Méthode d'étalonnage de la demande

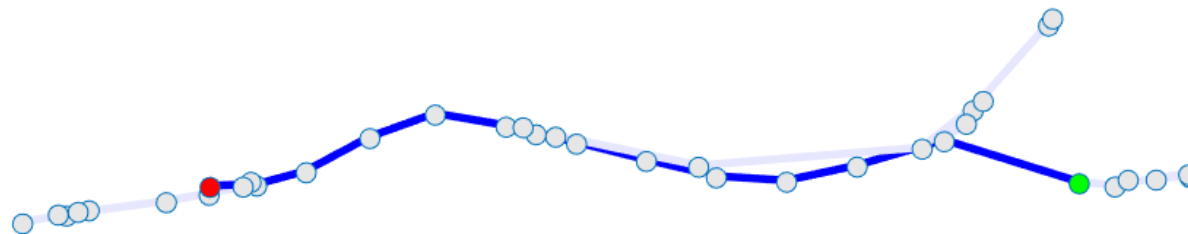
### Méthode de répartition des débits :

- Prend en entrée
  - le tableur Excel du réseau
  - les données de mesures (fichiers CSV)
- Calcule l'ensemble des itinéraires possibles automatiquement
- Evalue les débits observés entre arcs tout au long de chaque chemin
- Tient compte
  - des **délais** de parcours
  - du **partage** des flux entre chemins aux arcs communs à plusieurs chemins
- Produit en sortie des fichiers de chemins et de flux importables sous MATLAB

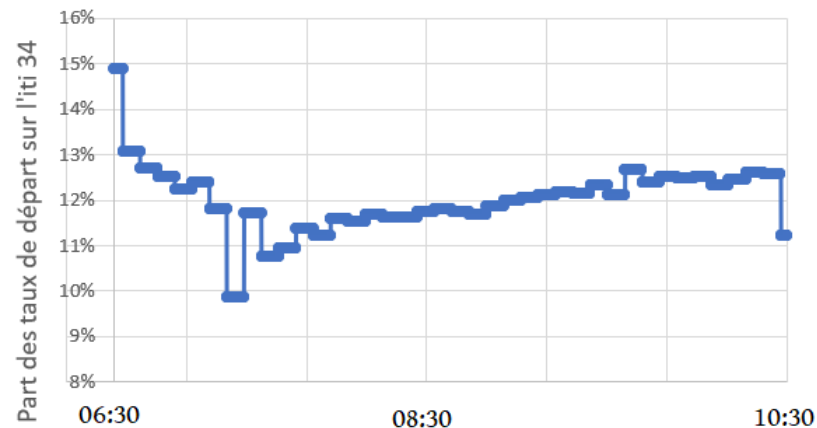


# Evolution de la structure de la matrice de demande

## Méthode de répartition des débits



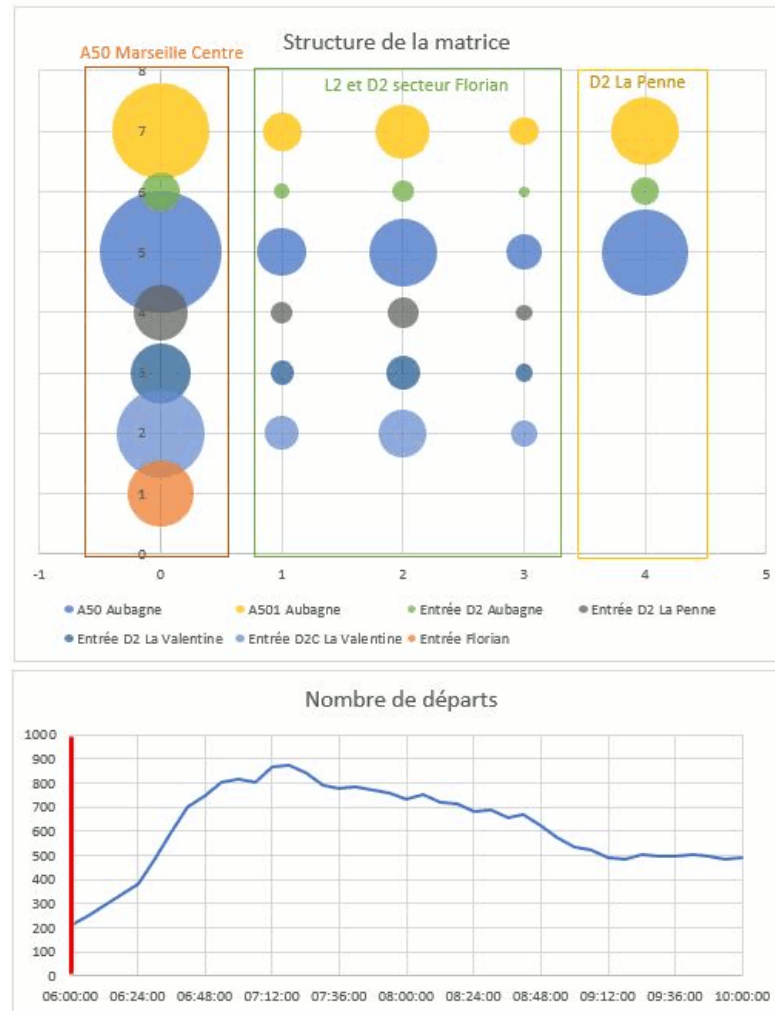
## Evolution du poids d'un des itinéraires les plus empruntés



# Evolution de la structure de la matrice de demande

## Méthode de Fratar

00:06:00



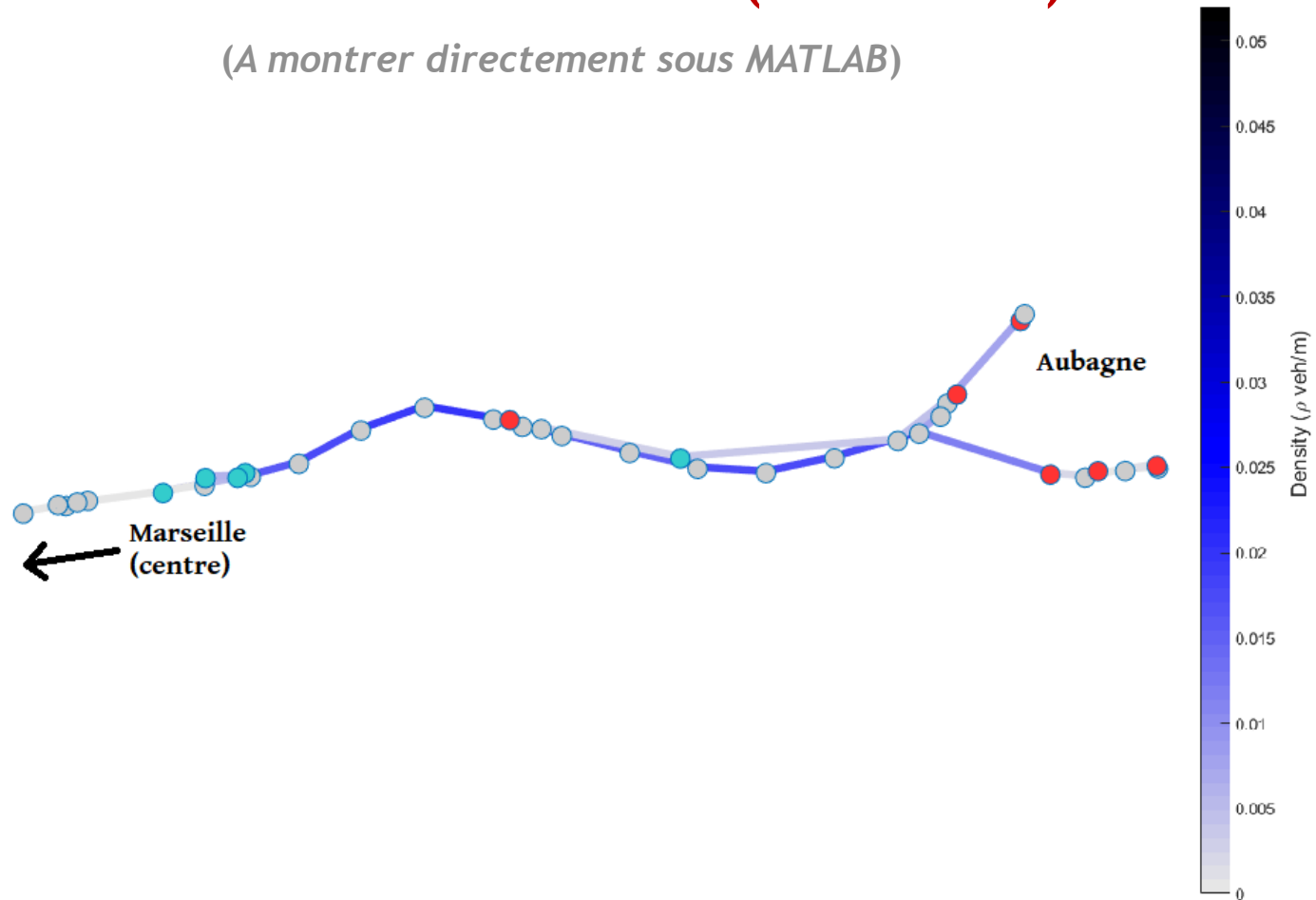


# Résultats des simulations

## Réseau détaillé

### Situation actuelle (référence)

(A montrer directement sous MATLAB)

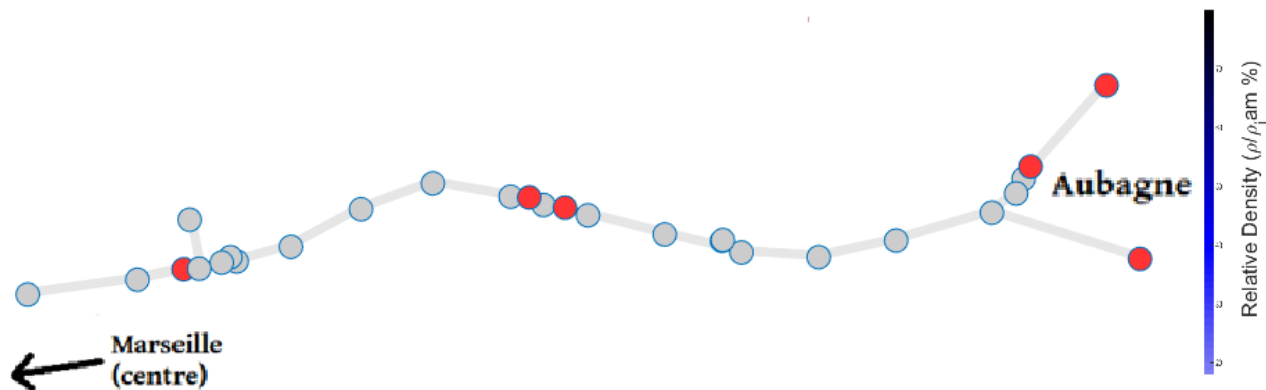


# Résultats des simulations

## Réseau épuré

### Situation actuelle (référence)

(A montrer directement sous MATLAB)

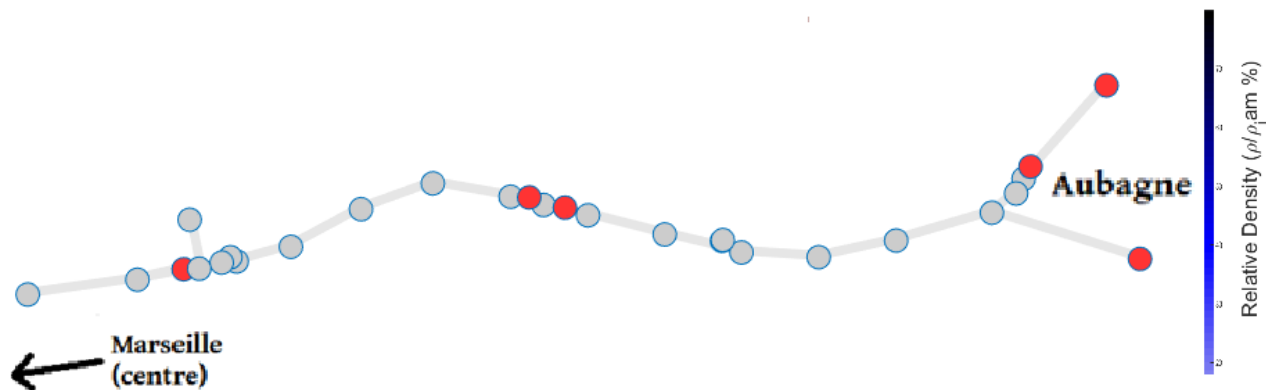


# Résultats des simulations

## Variation de la demande

### Situation-test: demande + 10%

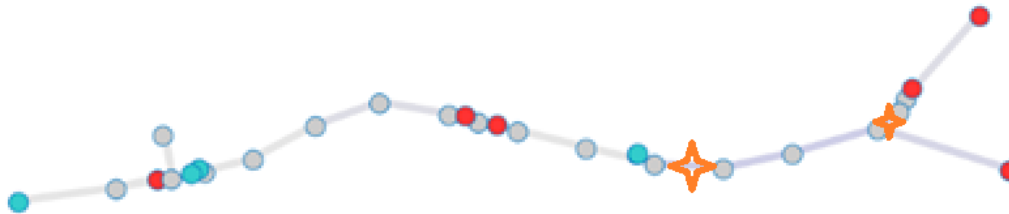
(A montrer directement sous MATLAB)





# Variation de l'offre

(A montrer directement sous MATLAB)

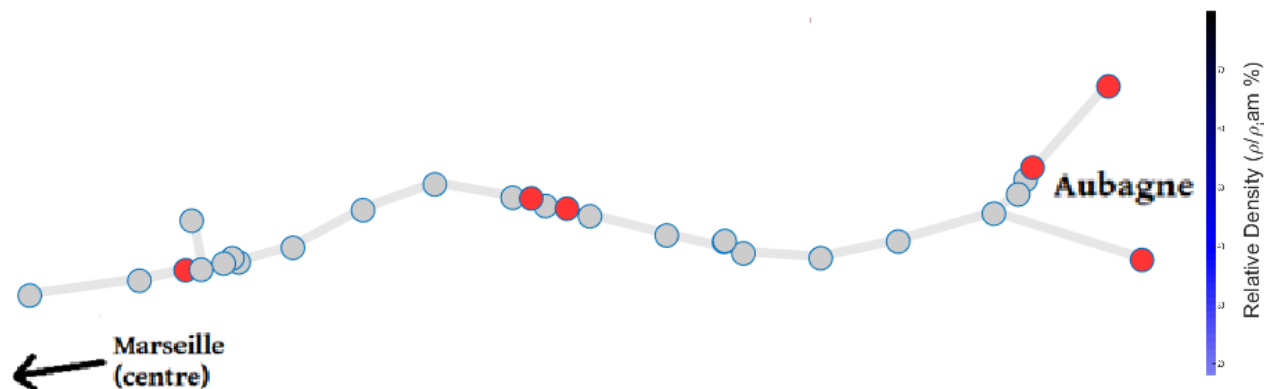


# Résultats des simulations

## Variation des temps de parcours à vide

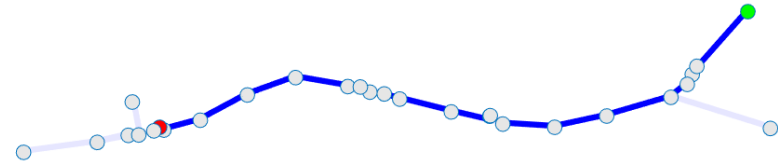
### Situation-test: temps de parcours à vide + 10%

(A montrer directement sous MATLAB)

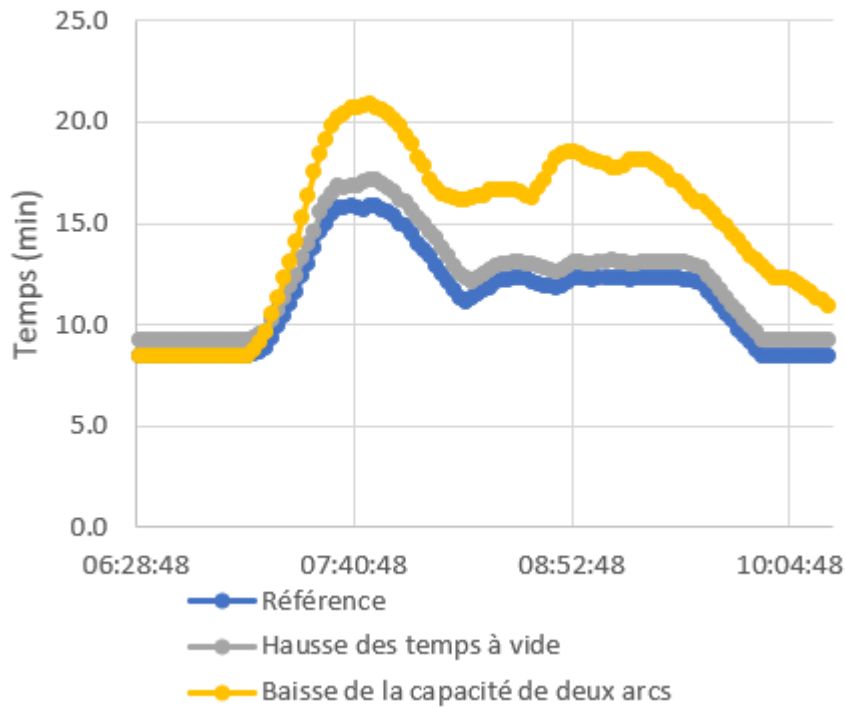


# Temps de parcours simulés

Trajet :



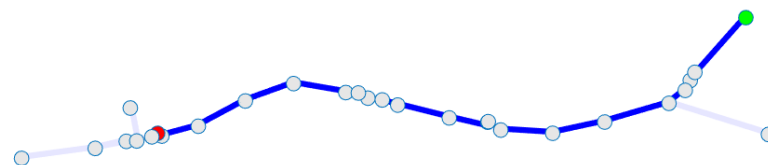
Temps de parcours



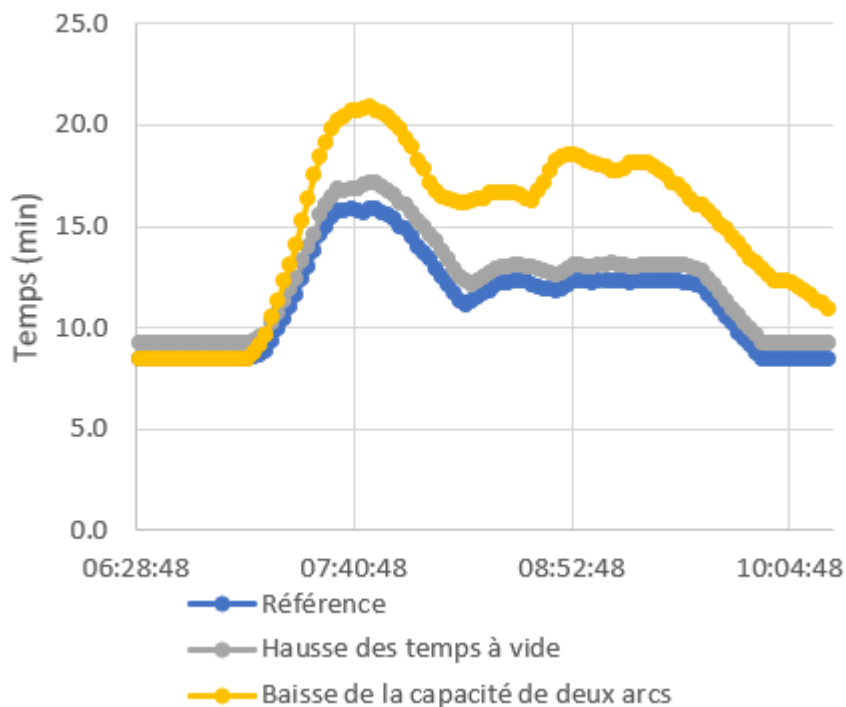


# Temps de parcours simulés

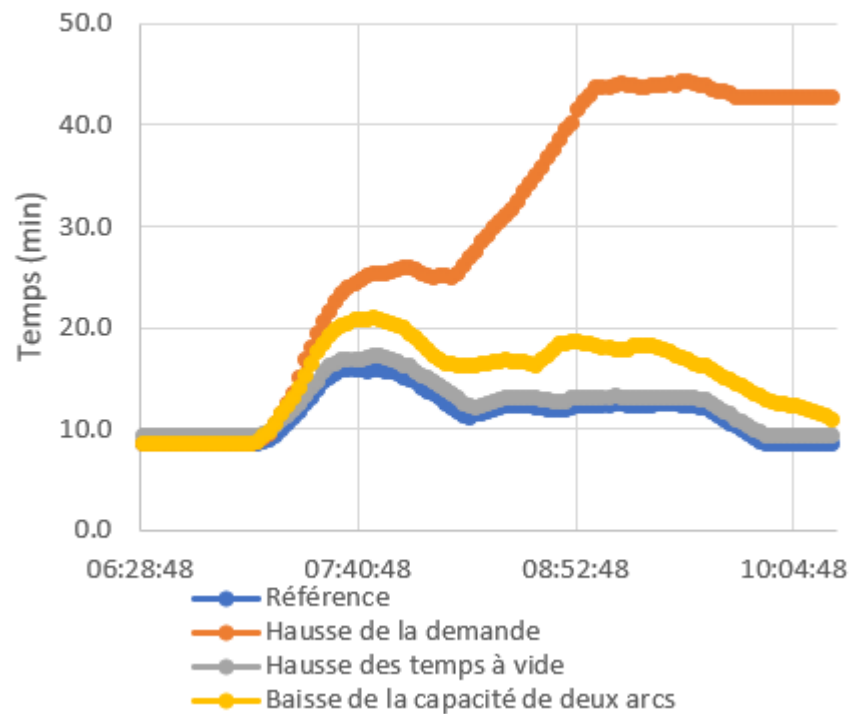
Trajet :



Temps de parcours



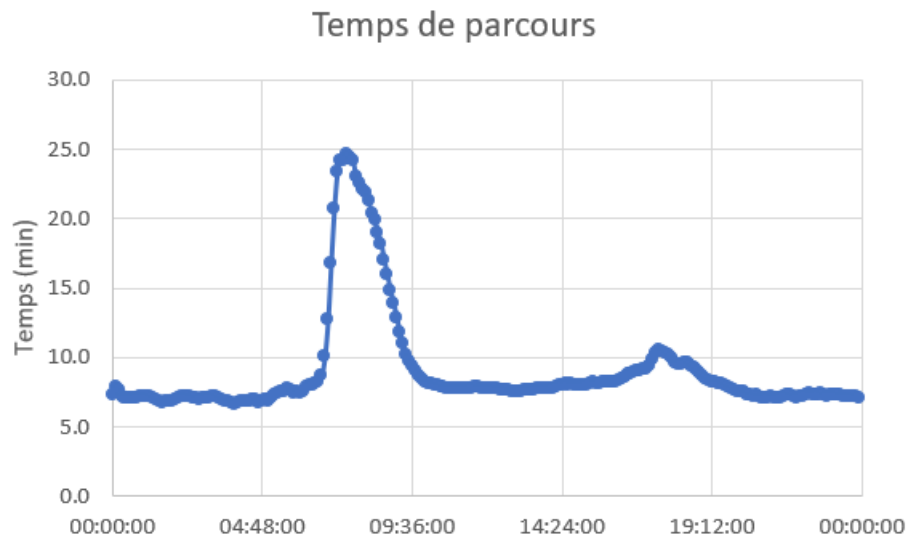
Temps de parcours



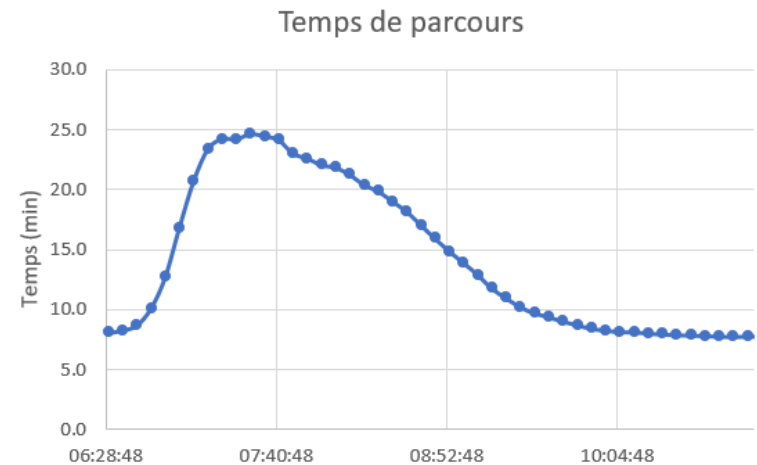
# Comparaison aux mesures empiriques

## Mesures empiriques de temps de parcours

- Temps cumulés FCD moyennés harmoniquement



Sur la journée



Pointe du matin

# Induction & évaporation du trafic

## Prise en compte de l'élasticité aux temps de parcours

### Origines :

- Demande latente
- Report modal
- Changement d'habitudes

### Idée de « **triple convergence** »

*A titre d'exemple, Cervero (2003) estime à 80% la part de l'accroissement de capacité routière en Californie (1980-1994) absorbée par du trafic supplémentaire aux heures de pointe, pour moitié due aux travaux effectués*



# Induction & évaporation du trafic

## Prise en compte de l'élasticité aux temps de parcours

### Origines :

- Demande latente
- Report modal
- Changement d'habitudes

### Idée de « triple convergence »

*A titre d'exemple, Cervero (2003) estime à 80% la part de l'accroissement de capacité routière en Californie (1980-1994) absorbée par du trafic supplémentaire aux heures de pointe, pour moitié due aux travaux effectués*

- Application d'une élasticité au temps de parcours équilibré

$$e = \frac{d \ln(\text{Flux})}{d \ln(\text{Temps})} \implies \frac{\Delta \text{Flux}}{\text{Flux}} \simeq e \frac{\Delta \text{Temps}}{\text{Temps}}$$

# Induction & évaporation du trafic

## Prise en compte de l'élasticité aux temps de parcours

Origines :

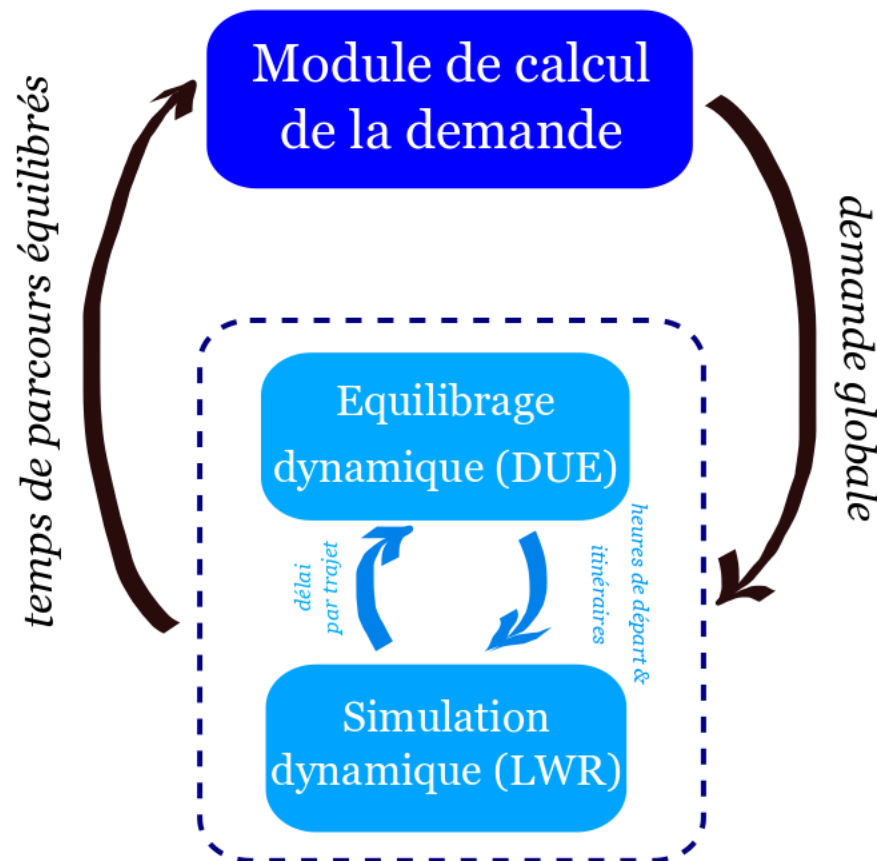
- Demande latente
- Report modal
- Changement d'habitudes

Idée de « triple convergence »

*A titre d'exemple, Cervero (2003) estime à 80% la part de l'accroissement de capacité routière en Californie (1980-1994) absorbée par du trafic supplémentaire aux heures de pointe, pour moitié due aux travaux effectués*

- Application d'une élasticité au temps de parcours équilibré

$$e = \frac{d \ln(\text{Flux})}{d \ln(\text{Temps})} \Rightarrow \frac{\Delta \text{Flux}}{\text{Flux}} \simeq e \frac{\Delta \text{Temps}}{\text{Temps}}$$

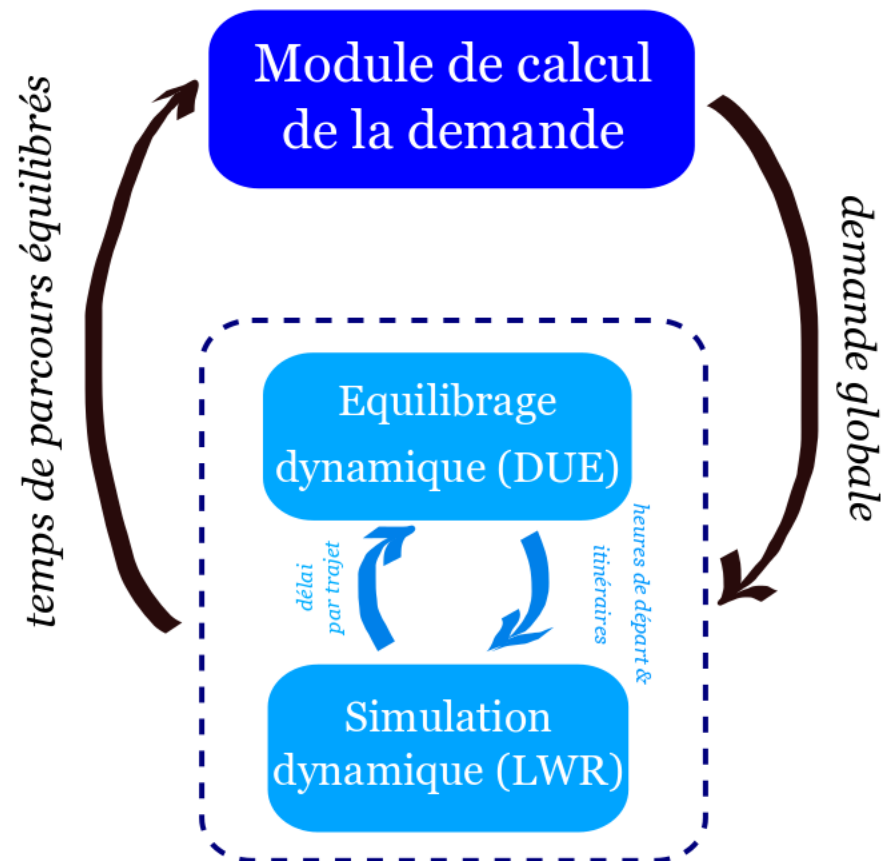
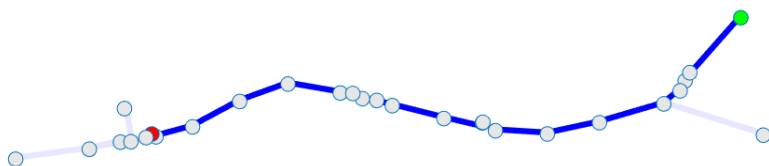


## Prise en compte de l'élasticité aux temps de parcours

### Example:

$$e = -30\%$$

Un raccourcissement de 2 minutes du trajet considéré (> 20 min en PPM) induirait 3% de trafic en plus.



# Pour aller plus loin : points-clés et bonnes pratiques





# Pour aller plus loin : points-clés et bonnes pratiques

## Questionnements à prendre en compte dans le choix de la formulation du modèle

- Prise en compte des effets dynamiques
- Prise en compte des effets de rétroaction temps de parcours / demande (encore à explorer):
  - Une affectation complète permettrait de saisir l'impact de changement d'itinéraire avec des itinéraires concurrents => problème : traiter la dissymétrie d'information entre l'axe autoroutier et l'axe concurrent
  - Introduire des élasticités au temps de parcours pour saisir les autres effets (induction / désinduction, report modal, changement de destination) => définir des valeurs d'élasticité
- Choix du bon niveau de détail de la description au vu des objectifs (*inutile de décrire très finement la dynamique du trafic si l'évolution de la demande liée au changement de l'offre est négligée par ailleurs*) (encore à explorer)

# Pour aller plus loin : points-clés et bonnes pratiques

## Questionnements à prendre en compte dans le choix de la formulation du modèle

- Comment rendre compte de la variabilité des temps de parcours observés ? (encore à explorer)
  - Un modèle macroscopique n'a pas de variabilité intrinsèque contrairement à un modèle microscopique
  - Il existe trois leviers pour simuler la variabilité des temps de parcours :
    - Randomisation de la demande (représente les aléas dans le niveau et la répartition horaire de la demande)
    - Randomisation des capacités (représente les aléas impactant la capacité d'une route à écouler du trafic : accidents, débris sur les voies, part de PL plus ou moins importante, ...)
    - Randomisation des vitesses à vide (représente les aléas sur des conditions de circulation : pluie, brouillard, proportion de conducteurs habitués, contrôles de vitesses,...)
- L'avantage de disposer d'un modèle à temps d'exécution rapide est qu'une approche de type Monte Carlo est matériellement possible. En comparaison, les modèles microscopiques à générateurs pseudo-aléatoires ne donnent que rarement lieu à de nombreuses répétitions permettant l'estimation réelle de la variabilité du fait de temps de calculs élevés.

# Pour aller plus loin : points-clés et bonnes pratiques

## Maitrise du modèle et capitalisation

- De part leur complexité ou leur support propriétaire, il est souvent difficile de s'approprier pleinement l'outil « modèle »
- L'étude de faisabilité a également pour objectif de tester quel niveau de compréhension peut être atteint à partir d'un modèle dont on disposerait du code et quels sont les meilleurs outils permettant la capitalisation et la diffusion du travail fait :
  - L'ensemble des codes et des traitements faits peuvent se retrouver sur le site GitHub : <https://github.com/nicolasmony/CongestionAixMarseille>
  - Importance de la documentation des codes : le code et l'algorithme de Ke Han et al. possède par exemple des niveaux de documentation très hétéroclites : abondante sur son DUE et quasi inexistante sur son modèle de jonction, ce qui a complexifier la détection d'une erreur importante dans le code fourni par Ke Han et al.
  - Sujet encore largement soumis à réflexion

**EXPLAIN** est un cabinet de conseil qui contribue à améliorer le système de transport.

Nous accompagnons l'Etat, les collectivités locales et les exploitants pour l'élaboration et l'évaluation des politiques, stratégies et projets de transport. Nous accompagnons les promoteurs et les investisseurs dans leurs projets de développement.



**Contact :**

N. MONY - Chef de projet  
[nmony@explainconsultancy.com](mailto:nmony@explainconsultancy.com)

**Email :** [contact@explainconsultancy.com](mailto:contact@explainconsultancy.com)

**explain**

Explain SAS au capital de 126 250€ dont le siège social se trouve au 104-112, avenue de la Résistance 93100 Montreuil, immatriculée au registre du commerce et des sociétés de Bobigny sous le numéro RCS 804 592 152 et dont le numéro de TVA intracommunautaire est le FR47 804 592 152.