Contrôle optimal numérique appliqué au trafic routier

CANUM

Mickael Bestard

14.06.2022

Overview

1. Introduction

2. Un modèle contrôlé de trafic routier

3. Analyse du problème de Contrôle Optimal

4. Méthodes Numériques

5. Résultats

6. Conclusion

Introduction

Introduction

Travaux réalisés avec : Yannick Privat, Emmanuel Franck, Laurent Navoret

- Outil d'aide à la décision : gestion de crise en milieu urbain impliquant trafic routier
- Besoin de prédire rapidement la circulation pour organiser opérations de secours
- Approche similaire à [*Benedetto Piccoli Gabriellle Bretti Roberto Natalini. "A Fluid-Dynamic Traffic Model on Road Networks". In: Archives of Computational Methods in Engineering (2007)*] : modèle hydrodynamique **(contrôlé)** sur graphe orienté, problèmes aux jonctions
- Plusieurs approches de contrôle dans la littérature : voiture de guidage, **blocages aux intersections**,...

Introduction

Travaux réalisés avec : Yannick Privat, Emmanuel Franck, Laurent Navoret

- Outil d'aide à la décision : gestion de crise en milieu urbain impliquant trafic routier
- Besoin de prédire rapidement la circulation pour organiser opérations de secours
- Approche similaire à [*Benedetto Piccoli Gabriellle Bretti Roberto Natalini. "A Fluid-Dynamic Traffic Model on Road Networks". In: Archives of Computational Methods in Engineering (2007)*] : modèle hydrodynamique **(contrôlé)** sur graphe orienté, problèmes aux jonctions
- Plusieurs approches de contrôle dans la littérature : voiture de guidage, **blocages aux intersections**,...

En utilisant comme contrôle la mise en place de barrages routiers aux carrefours, comment libérer un itinéraire d'évacuation pour un temps final donné ?

Un modèle contrôlé de trafic routier

- Modèle fluide standard (Lighthill-Whitham-Richards, 1955)
- Répartition des flux aux jonctions couple les arêtes de façon **non-linéaire** (Neumann)
- Contrôle "barrière" aux entrées des routes pondère la capacité d'accueil de véhicules

- Modèle fluide standard (Lighthill-Whitham-Richards, 1955)
- Répartition des flux aux jonctions couple les arêtes de façon **non-linéaire** (Neumann)
- Contrôle "barrière" aux entrées des routes pondère la capacité d'accueil de véhicules

Évolution sur une route $[a_i, b_i]$ de la densité ρ_i soumise au contrôle $\boldsymbol{u}$:

$$
\begin{cases}
\partial_t \rho_i(t,x) + \partial_x f_i(\rho_i(t,x)) = 0, & (t,x) \in (0,T) \times [a_i, b_i], \\
\rho_i(0,x) = \rho_i^0(x), & x \in [a_i, b_i], \\
f_i(\rho_i(t,a_i)) = \gamma_i^L(t, \rho(t), \boldsymbol{u}(t)), & t \in (0,T), \\
f_i(\rho_i(t,b_i)) = \gamma_i^R(t, \rho(t), \boldsymbol{u}(t)), & t \in (0,T),
\end{cases}
$$

$\boldsymbol{\gamma}^L$ et $\boldsymbol{\gamma}^R$: solutions de la programmation linéaire, $\quad \rho^0$: condition initiale

- Modèle fluide standard (Lighthill-Whitham-Richards, 1955)
- Répartition des flux aux jonctions couple les arêtes de façon **non-linéaire** (Neumann)
- Contrôle "barrière" aux entrées des routes pondère la capacité d'accueil de véhicules

Après discrétisation par volumes finis, l'inconnue numérique $\hat{\boldsymbol{\rho}}$ satisfait :

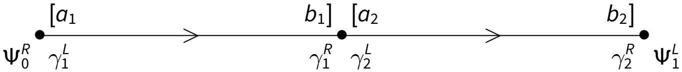
$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\hat{\boldsymbol{\rho}}}{\mathrm{d}t} = f^{FV}(\hat{\boldsymbol{\rho}}, \boldsymbol{\gamma}), & t \in (0, T) \\ \boldsymbol{\gamma} = \phi^{LP}(\hat{\boldsymbol{\rho}}, \boldsymbol{u}), & t \in (0, T) \\ \hat{\boldsymbol{\rho}}(0) = \boldsymbol{\rho}_0, \end{cases}$$

f^{FV} flux VF, ϕ^{LP} programmations linéaires aux jonctions.

Un modèle contrôlé de trafic routier

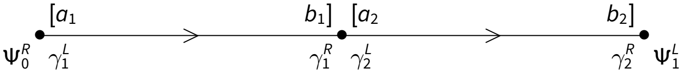
Programmation linéaire contrôlée aux jonctions

- Densité indéterminée aux jonctions $\rightarrow$ conditions aux limites de type Neumann
  - $\gamma_i^{\mathrm{R}}(t) := f_i(\rho_i(t, b_i))$ flux **sortant** de la route i,
  - $\gamma_j^{\mathrm{L}}(t) := f_j(\rho_j(t, a_j))$ flux **entrant** à la route j.
  - Ψ_K : flux cellules fantômes



Un modèle contrôlé de trafic routier
Programmation linéaire contrôlée aux jonctions

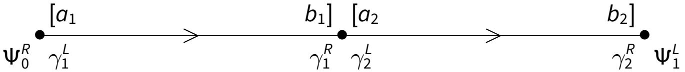
- Densité indéterminée aux jonctions $\rightarrow$ conditions aux limites de type Neumann
  - $\gamma_i^{\mathrm{R}}(t) := f_i(\rho_i(t, b_i))$ flux **sortant** de la route i,
  - $\gamma_j^{\mathrm{L}}(t) := f_j(\rho_j(t, a_j))$ flux **entrant** à la route j.
  - Ψ_K : flux cellules fantômes



- **Conservation du flux** : $\displaystyle\sum_{i=1}^{n} \gamma_i^{\mathrm{R}}(t) = \sum_{j=n+1}^{n+m} \gamma_j^{\mathrm{L}}(t)$

Un modèle contrôlé de trafic routier
Programmation linéaire contrôlée aux jonctions

- Densité indéterminée aux jonctions $\rightarrow$ conditions aux limites de type Neumann
  - $\gamma_i^R(t) := f_i(\rho_i(t, b_i))$ flux **sortant** de la route i,
  - $\gamma_j^L(t) := f_j(\rho_j(t, a_j))$ flux **entrant** à la route j.
  - Ψ_K : flux cellules fantômes



- **Conservation du flux** : $\displaystyle\sum_{i=1}^{n} \gamma_i^R(t) = \sum_{j=n+1}^{n+m} \gamma_j^L(t)$

- **Répartition des flux** : $A := (\alpha_{ji})_{\substack{n+1\leq j\leq n+m \\ 1\leq i\leq n}}$, $0 < \alpha_{ji} < 1$, $\displaystyle\sum_{j=n+1}^{n+m} \alpha_{ji} = 1$ tel que $\gamma^L = A\gamma^R$.

  NB : α_{ji} est le pourcentage des véhicules venant de i allant vers j

- Capacités max des routes dépendent de la densité : $\gamma_i^{R,\max}(\rho_i)$, $\gamma_j^{L,\max}(\rho_j)$

Problème de programmation linéaire

On résout à chaque jonction et à chaque pas de temps :

$$(\mathcal{P}_{LP}) : \quad \max_{\gamma^R \in \Omega_u} \mathbf{1} \cdot \gamma^R$$

avec $\mathbf{1} = (1, \cdots, 1) \in \mathbb{R}^n$

- Capacités max des routes dépendent de la densité : $\gamma_i^{R,\max}(\rho_i)$, $\gamma_j^{L,\max}(\rho_j)$
- Contraintes :

Problème de programmation linéaire

On résout à chaque jonction et à chaque pas de temps :

$$(\mathcal{P}_{LP}) : \quad \max_{\gamma^R \in \Omega_{\boldsymbol{u}}} \mathbf{1} \cdot \gamma^R$$

avec $\mathbf{1} = (1, \cdots, 1) \in \mathbb{R}^n$

- Capacités max des routes dépendent de la densité : $\gamma_i^{R,\max}(\rho_i), \gamma_j^{L,\max}(\rho_j)$
- Contraintes :
  - $\gamma_i^R \in \Omega_i = [0, \gamma_i^{R,\max}], 1 \leq i \leq n$

Problème de programmation linéaire

On résout à chaque jonction et à chaque pas de temps :

$$(\mathcal{P}_{LP}) : \quad \max_{\boldsymbol{\gamma}^R \in \Omega_{\boldsymbol{u}}} \mathbf{1} \cdot \boldsymbol{\gamma}^R$$

avec $\mathbf{1} = (1, \cdots, 1) \in \mathbb{R}^n$

- Capacités max des routes dépendent de la densité : $\gamma_i^{R,\max}(\rho_i)$, $\gamma_j^{L,\max}(\rho_j)$
- Contraintes :
  - $\gamma_i^R \in \Omega_i = [0, \gamma_i^{R,\max}], 1 \leq i \leq n$
  - $\gamma_j^L \in \Omega_j^{\boldsymbol{u}} = [0, (1 - u_j)\gamma_j^{L,\max}], n+1 \leq j \leq n+m$

Problème de programmation linéaire

On résout à chaque jonction et à chaque pas de temps :

$$(\mathcal{P}_{LP}) : \quad \max_{\boldsymbol{\gamma}^R \in \Omega_{\boldsymbol{u}}} \mathbf{1} \cdot \boldsymbol{\gamma}^R$$

avec $\mathbf{1} = (1, \cdots, 1) \in \mathbb{R}^n$

- Capacités max des routes dépendent de la densité : $\gamma_i^{R,\max}(\rho_i)$, $\gamma_j^{L,\max}(\rho_j)$
- Contraintes :
  - $\gamma_i^R \in \Omega_i = [0, \gamma_i^{R,\max}], 1 \leq i \leq n$
  - $\gamma_j^L \in \Omega_j^{\boldsymbol{u}} = [0, (1 - u_j)\gamma_j^{L,\max}], n+1 \leq j \leq n+m$
- $\Omega_{\boldsymbol{u}} = \left\{ \gamma \in \prod_{i=1}^{n} \Omega_i \mid A\gamma \in \prod_{j=n+1}^{n+m} \Omega_j^{\boldsymbol{u}} \right\}$

Problème de programmation linéaire

On résout à chaque jonction et à chaque pas de temps :

$$(\mathcal{P}_{LP}) : \quad \max_{\gamma^R \in \Omega_{\boldsymbol{u}}} \mathbf{1} \cdot \gamma^R$$

avec $\mathbf{1} = (1, \cdots, 1) \in \mathbb{R}^n$

Analyse du problème de Contrôle Optimal

Question :

En utilisant comme contrôle la mise en place de barrages routiers aux carrefours, comment libérer un ***chemin d'évacuation*** *pour un temps final donné ?*

IЯMA

Question :

*En utilisant comme contrôle la mise en place de barrages routiers aux carrefours, comment libérer un **chemin d'évacuation** pour un temps final donné ?*

Formulation mathématique :

On cherche à minimiser la fonction suivante :

$$\boldsymbol{u} \mapsto \sum_{i \in \textbf{path}} \int_{a_i}^{b_i} \rho_i(T, x; \boldsymbol{u})\, dx$$

IRMA

Question :
*En utilisant comme contrôle la mise en place de barrages routiers aux carrefours, comment libérer un **chemin d'évacuation** pour un temps final donné ?*

Formulation mathématique :
On cherche à minimiser la fonction suivante :

$$\boldsymbol{u} \mapsto \sum_{i \in \mathbf{path}} \int_{a_i}^{b_i} \rho_i(T, x; \boldsymbol{u})\, dx$$

Version discrète :
On est ammené à résoudre numériquement le problème suivant :

$$(\mathcal{P}_{ctrl}) : \min_{\substack{\boldsymbol{u} \in L^\infty(0,T,\mathcal{U}) \\ TV(\boldsymbol{u}) \leq K}} J(\boldsymbol{u}) = \sum_{i \in \mathbf{path}} \hat{\rho}_i(T; \boldsymbol{u}) = \mathbf{c} \cdot \hat{\boldsymbol{\rho}}_T$$

où : $K \in \mathbb{R}$, $\mathcal{U} = \{\boldsymbol{u} \in \mathbb{R}^N ; 0 \leq u_i \leq 1\}$ et $c_i = 1$ pour tout $i \in$ **path**

On souhaite calculer $\nabla J(\boldsymbol{u})$ mais...

- Fonctionnelle dépendant de $\boldsymbol{u}$ de façon **très implicite**
  (borne supérieure d'un problème LP donnant une condition de Neumann pour la densité $\boldsymbol{\rho}$)
- On ne peut pas calculer la dérivée directement : introduction d'un **état adjoint**

IRMA

On souhaite calculer $\nabla J(\boldsymbol{u})$ mais...

- Fonctionnelle dépendant de $\boldsymbol{u}$ de façon **très implicite**
  (borne supérieure d'un problème LP donnant une condition de Neumann pour la densité ρ)
- On ne peut pas calculer la dérivée directement : introduction d'un **état adjoint**

Théorème

J est Gateaux-différentiable et son gradient est donné pour tout $\boldsymbol{u} \in L^\infty(0, T, \mathcal{U})$ par :

$$\nabla J(\boldsymbol{u}) = N^T \mathbf{p},$$

- $\mathbf{p}$ est l'état adjoint solution de :

$$\begin{cases} \mathbf{p}' + M^T \mathbf{p} = 0, \\ \mathbf{p}(T) = \mathbf{c}, \end{cases}$$

- M et N sont les matrices suivantes :

$$\begin{cases} M = (\partial_\rho f^{FV}) + (\partial_\gamma f^{FV})(\partial_\rho \phi^{LP}), \\ N = (\partial_\gamma f^{FV})(\partial_{\boldsymbol{u}} \phi^{LP}). \end{cases}$$

IRMA

Définition : directions admissibles

On dit que $\mathbf{h}$ est une perturbation admissible de $\boldsymbol{u} \in \mathcal{U}$ si $\exists \varepsilon > 0$; $\boldsymbol{u} + \varepsilon \mathbf{h} \in \mathcal{U}$,
i.e. $\exists \varepsilon > 0$; $0 \leq u_i + \varepsilon h_i \leq 1$.

- Sur l'ensemble $I_0 := \{u_i \equiv 0\}$, on doit avoir $h_i \geq 0$,
- Sur l'ensemble $I_1 := \{u_i \equiv 1\}$, on doit avoir $h_i \leq 0$,
- Sur l'ensemble $I_* := \{0 < u_i < 1\}$, tout h_i convient tant que ε assez petit.

Proposition : conditions d'optimalité

Soit $\boldsymbol{u}^*$ un minimiseur local de J. Alors on a :

$$\begin{aligned} \nabla J(\boldsymbol{u}^*)_i &\geq 0, \quad \text{p.p. sur } I_0, \\ \nabla J(\boldsymbol{u}^*)_i &\leq 0, \quad \text{p.p. sur } I_1, \\ \nabla J(\boldsymbol{u}^*)_i &= 0, \quad \text{p.p. sur } I_*, \end{aligned}$$

IRMA

Définition : directions admissibles

On dit que $\mathbf{h}$ est une **perturbation admissible** de $\boldsymbol{u} \in \mathcal{U}$ si $\exists \varepsilon > 0;\ \boldsymbol{u} + \varepsilon \mathbf{h} \in \mathcal{U}$,
i.e. $\exists \varepsilon > 0;\ 0 \leq u_i + \varepsilon h_i \leq 1$.

- Sur l'ensemble $I_0 := \{u_i \equiv 0\}$, on doit avoir $h_i \geq 0$,
- Sur l'ensemble $I_1 := \{u_i \equiv 1\}$, on doit avoir $h_i \leq 0$,
- Sur l'ensemble $I_* := \{0 < u_i < 1\}$, tout h_i convient tant que ε assez petit.

Proposition : vérification pratique des conditions d'optimalité

On introduit pour chaque $\boldsymbol{u}^*$ la fonction suivante :

$$\Lambda(t) = \min\left\{\boldsymbol{u}^*(t), \max\left\{\boldsymbol{u}^*(t) - 1, \nabla J(\boldsymbol{u}^*)(t)\right\}\right\},$$

on a la propriété suivante :

$$\boldsymbol{u}^* \text{ est un minimum local } \Leftrightarrow \Lambda = 0\ p.p.$$

Théorème : existence d'un contrôle optimal

Le problème de contrôle optimal

$$(\mathcal{P}_{ctrl}) : \min_{\substack{\boldsymbol{u} \in L^\infty(0,T,\mathcal{U}) \\ TV(\boldsymbol{u}) \leq K}} J(\boldsymbol{u})$$

admet au moins une solution $\boldsymbol{u}_*$, qui est à variations bornées (uniformément). La densité correspondante $\boldsymbol{\rho}_*$ est bornée dans $\mathcal{W}^{1,\infty}$.

Idée de la preuve :

- méthode directe du calcul des variations (suite minimisante, CV faible, ...)
- Théorème d'Areza-Ascoli

NB : l'existence et l' unicité d'un état $\boldsymbol{\rho}$ dans $\mathcal{BV}$ est démontrée dans la littérature. Dans la version semi-discrète qui nous intéresse, la diffusivité entraîne même $\boldsymbol{\rho} \in \mathcal{W}^{1,\infty}$.

Méthodes Numériques

IRMA

Algorithme : Descente de gradient projetée

- Problème direct

$$(\boldsymbol{\rho}^{k+1}, \boldsymbol{\gamma}^{k+1}) \leftarrow \text{ solution de } \begin{cases} \boldsymbol{\rho}' = f^{FV}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\gamma}) \\ \boldsymbol{\gamma} = \phi(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{u}^k) \\ \boldsymbol{\rho}(0) = \boldsymbol{\rho}^0 \end{cases}$$

- Problème adjoint

$$\mathbf{p} \leftarrow \text{ solution de } \begin{cases} \mathbf{p}'(t) + M^T_{(\boldsymbol{\rho}^{k+1}, \boldsymbol{\gamma}^{k+1})}\mathbf{p} = \mathbf{0} \\ \mathbf{p}(T) = \mathbf{c} \end{cases}$$

- Descente

$$\tilde{\boldsymbol{u}}^{k+1} \leftarrow \boldsymbol{u}^k - \delta^k \nabla J(\boldsymbol{u}^k)$$

- Projection

$$\boldsymbol{u}^{k+1} \leftarrow \pi_{[0,1]}\left(\tilde{\boldsymbol{u}}^{k+1}\right)$$

IRMA

Algorithme : méthode de point-fixe

- Problème direct

$$(\boldsymbol{\rho}^{k+1}, \boldsymbol{\gamma}^{k+1}) \leftarrow \text{ solution de } \begin{cases} \boldsymbol{\rho}' = f^{FV}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\gamma}) \\ \boldsymbol{\gamma} = \phi(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{u}^k) \\ \boldsymbol{\rho}(0) = \boldsymbol{\rho}^0 \end{cases}$$

- Problème adjoint

$$\mathbf{p} \leftarrow \text{ solution de } \begin{cases} \mathbf{p}'(t) + M^T_{(\boldsymbol{\rho}^{k+1}, \boldsymbol{\gamma}^{k+1})}\mathbf{p} = \mathbf{0} \\ \mathbf{p}(T) = \mathbf{c} \end{cases}$$

- Point-fixe

$$\boldsymbol{u}^{k+1} \leftarrow \mathbb{1}_{\{\nabla J(\boldsymbol{u}^k) \leq 0\}}$$

Rappel : on a $\nabla J(\boldsymbol{u})_i \leq 0$ p.p. sur $I_1 = \{u_i \equiv 1\}$.

Algorithme : méthode hybride GDFP

- Problème direct

$$(\boldsymbol{\rho}^{k+1}, \boldsymbol{\gamma}^{k+1}) \leftarrow \text{ solution de } \begin{cases} \boldsymbol{\rho}' = f^{FV}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\gamma}) \\ \boldsymbol{\gamma} = \phi(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{u}^k) \\ \boldsymbol{\rho}(0) = \boldsymbol{\rho}^0 \end{cases}$$

- Problème adjoint

$$\mathbf{p} \leftarrow \text{ solution de } \begin{cases} \mathbf{p}'(t) + M^T_{(\boldsymbol{\rho}^{k+1}, \boldsymbol{\gamma}^{k+1})}\mathbf{p} = \mathbf{0} \\ \mathbf{p}(T) = \mathbf{c} \end{cases}$$

- **Si** $k\%10 = 0$ **alors**
  Point-fixe

$$\boldsymbol{u}^{k+1} \leftarrow \mathbb{1}_{\{\nabla J(\boldsymbol{u}^k) \leq 0\}}$$

  Sinon
  Gradient projeté

$$\boldsymbol{u}^{k+1} \leftarrow \pi_{[0,1]}\left(\boldsymbol{u}^k - \delta^k \nabla J(\boldsymbol{u}^k)\right)$$

Résultats

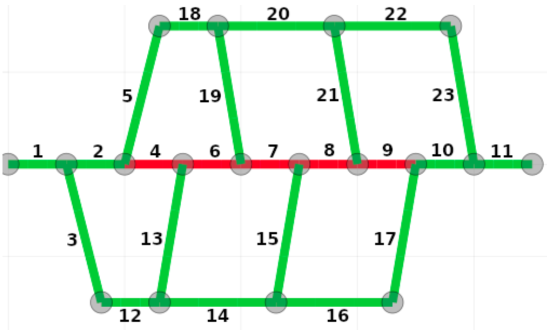
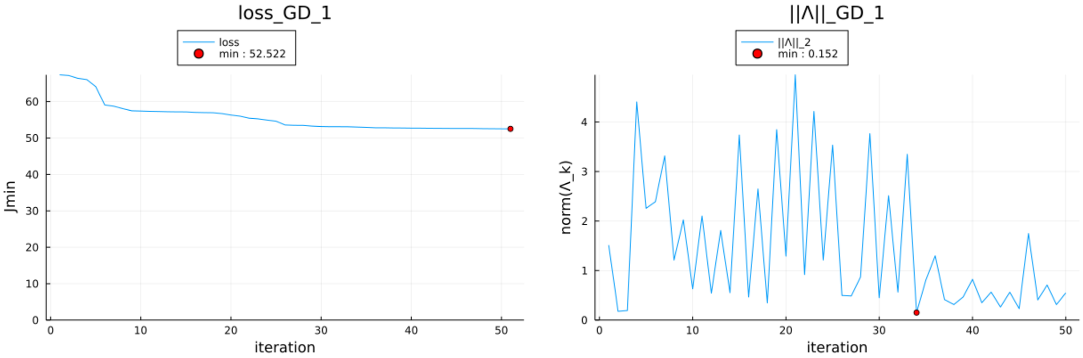


Figure 1: Graphe à trois voies

- les arêtes vont de gauche à droite
- tendance à saturer la voie centrale (celle que l'on veut évacuer)
- paramètres : $T = 30$, Nc = 15 mailles par arête

Résultats
Gradient projeté

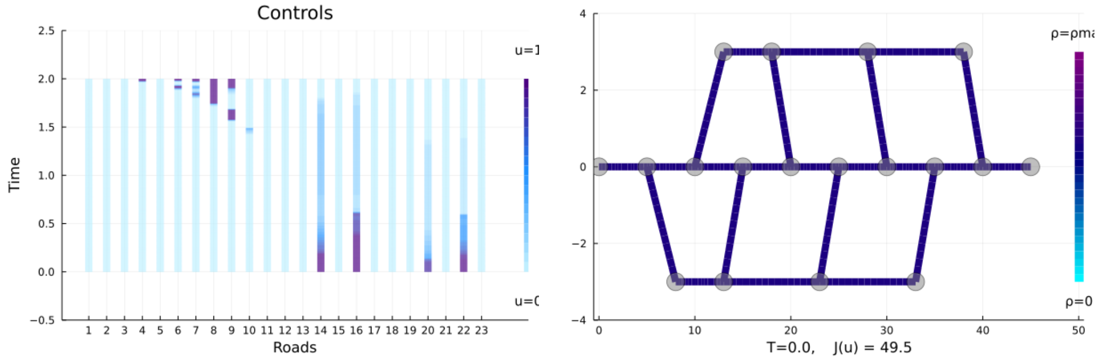


(a) loss history

(b) optimality history

Figure 2: Gradient projeté : convergence

Résultats
Gradient projeté

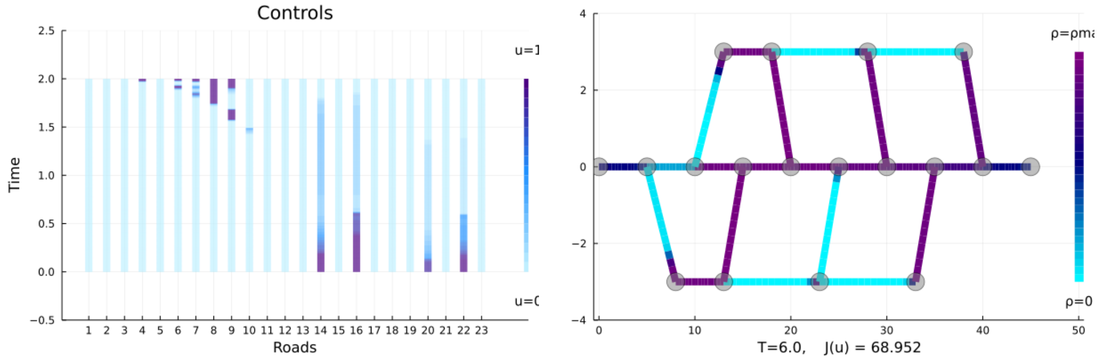


(a) control

(b) density

Figure 2: Gradient projeté : contrôle et densité associée

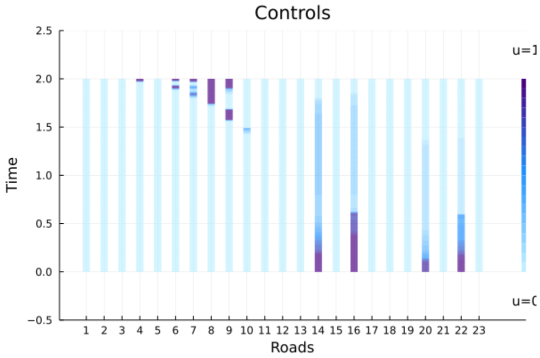
Résultats
Gradient projeté



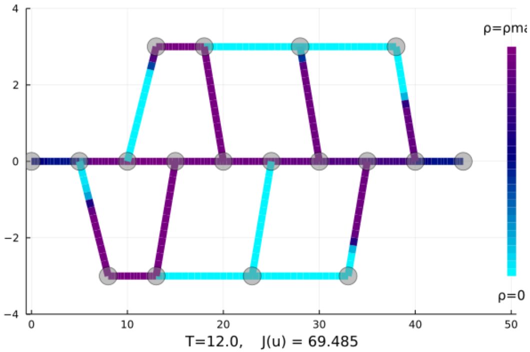
(a) control **(b)** density

Figure 2: Gradient projeté : contrôle et densité associée

Résultats
Gradient projeté



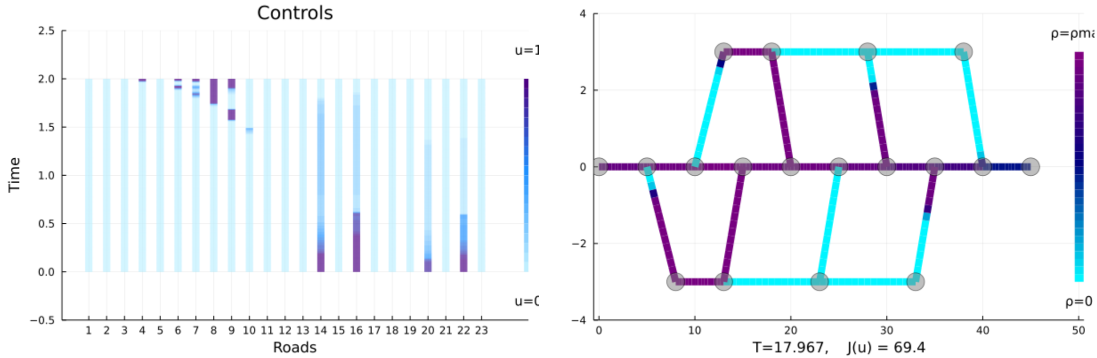
(a) control



(b) density

Figure 2: Gradient projeté : contrôle et densité associée

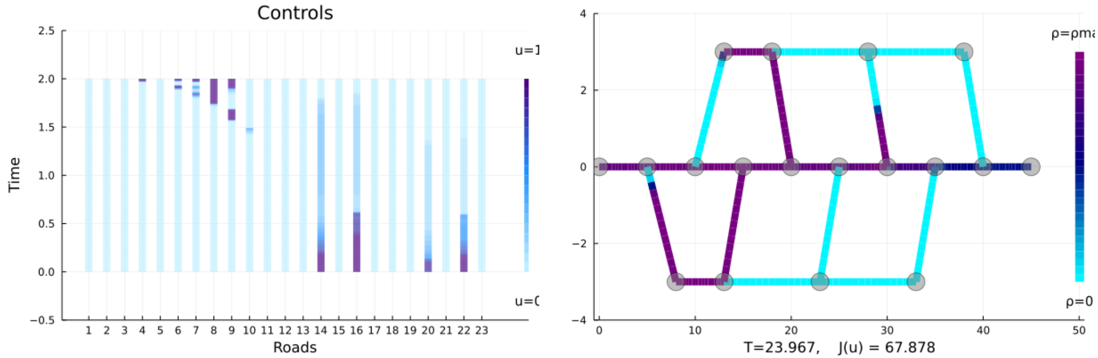
Résultats
Gradient projeté



(a) control **(b)** density

Figure 2: Gradient projeté : contrôle et densité associée

Résultats
Gradient projeté

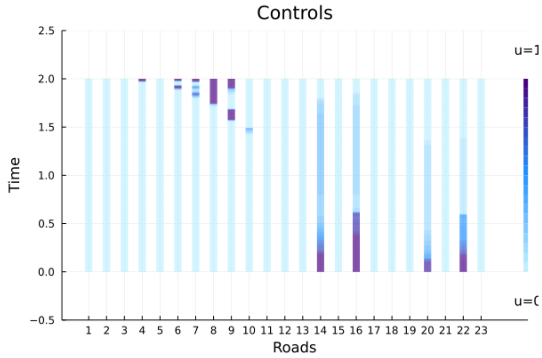


(a) control

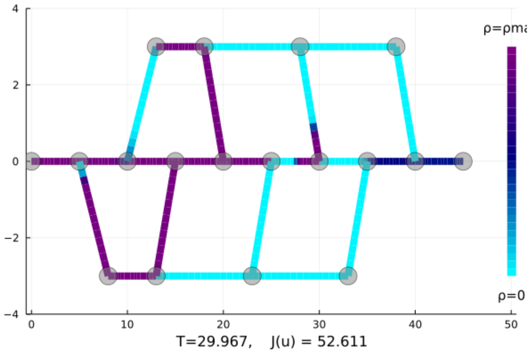
(b) density

Figure 2: Gradient projeté : contrôle et densité associée

Résultats
Gradient projeté



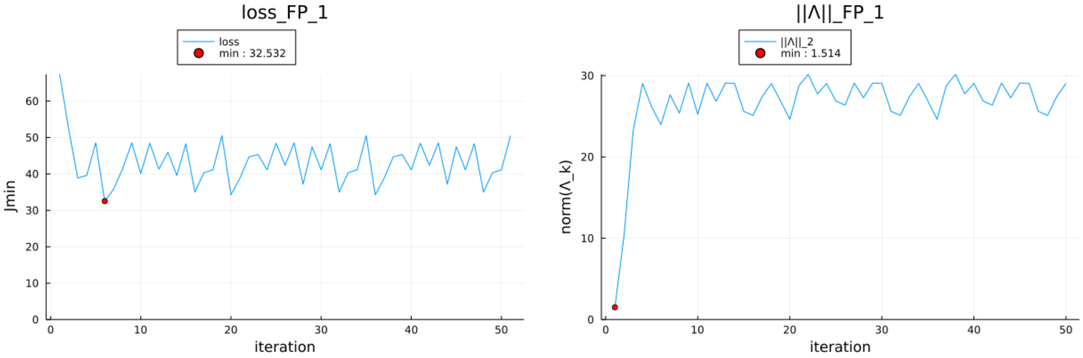
(a) control



(b) density

Figure 2: Gradient projeté : contrôle et densité associée

Résultats
Point-fixe

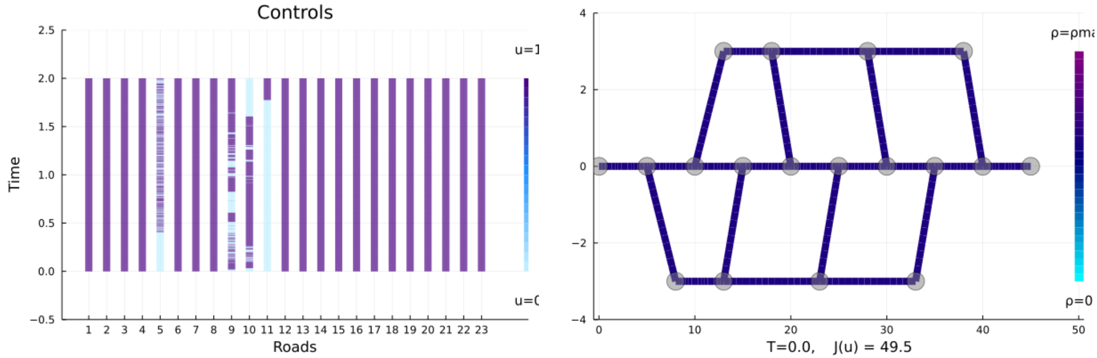


(a) loss history

(b) optimality history

Figure 3: Point fixe : convergence

Résultats
Point-fixe

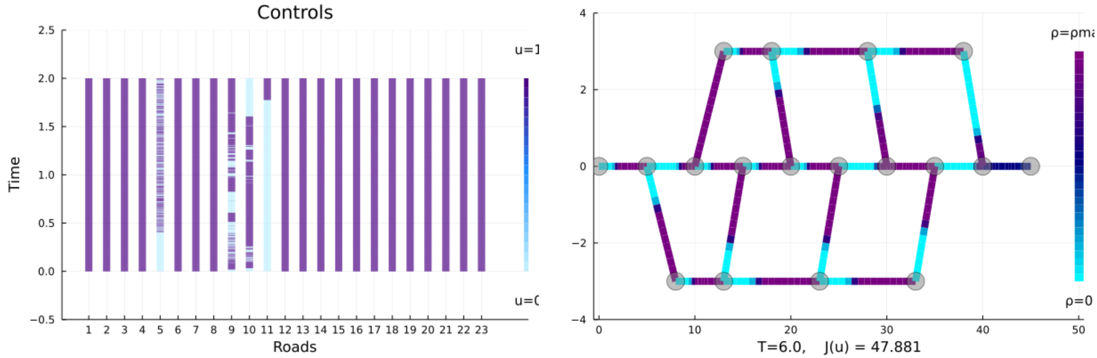


(a) control

(b) density

Figure 3: Point fixe : contrôle et densité associée

Résultats
Point-fixe

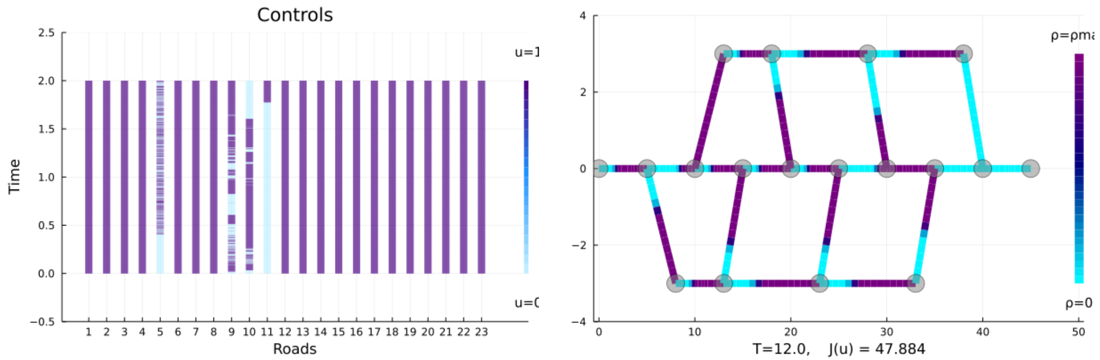


(a) control

(b) density

Figure 3: Point fixe : contrôle et densité associée

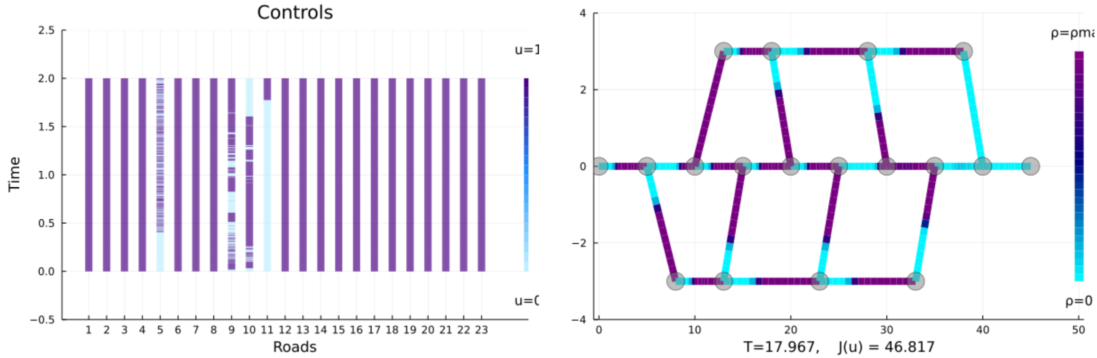
Résultats
Point-fixe



(a) control **(b)** density

Figure 3: Point fixe : contrôle et densité associée

Résultats
Point-fixe

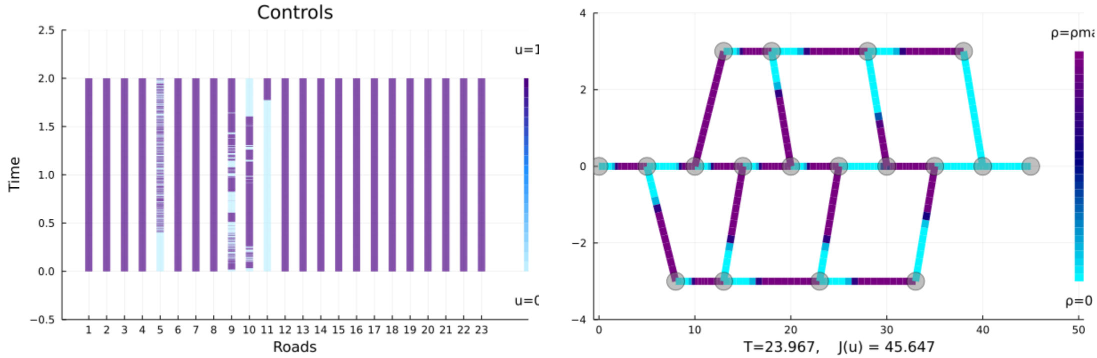


(a) control

(b) density

Figure 3: Point fixe : contrôle et densité associée

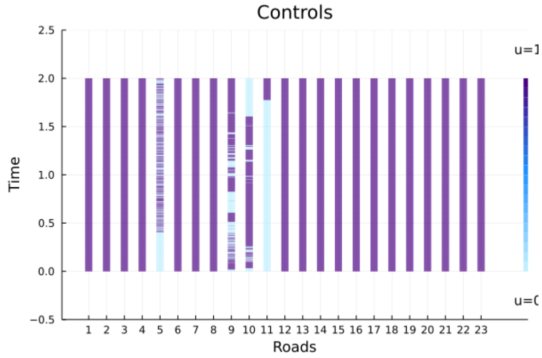
Résultats
Point-fixe



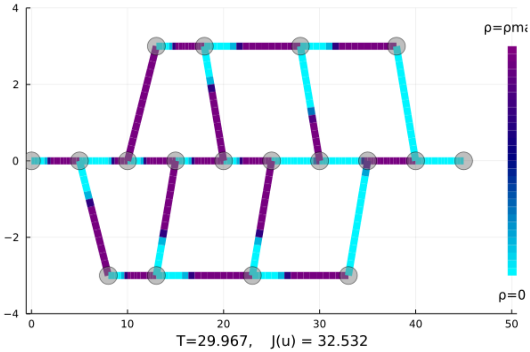
(a) control **(b)** density

Figure 3: Point fixe : contrôle et densité associée

Résultats
Point-fixe



(a) control

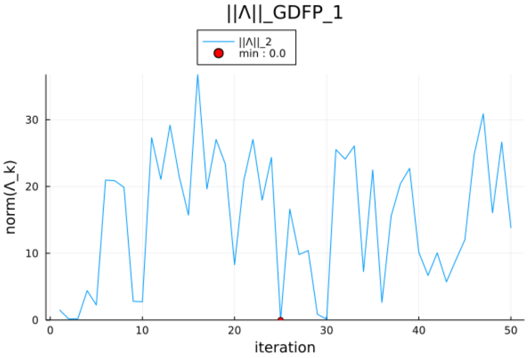


(b) density

Figure 3: Point fixe : contrôle et densité associée

Résultats
Hybride

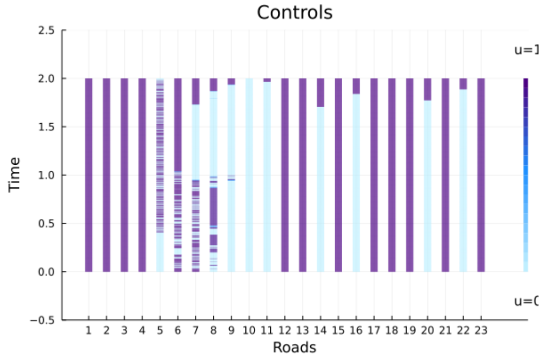
(a) loss history



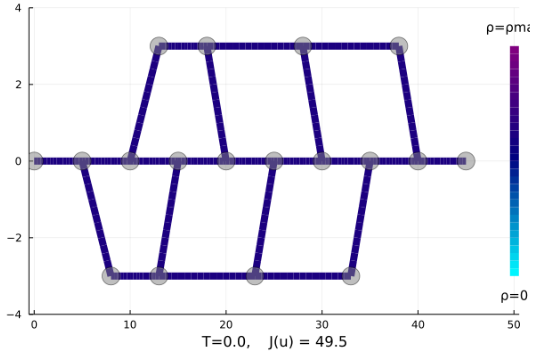
(b) optimality history

Figure 4: Hybride : convergence

Résultats
Hybride



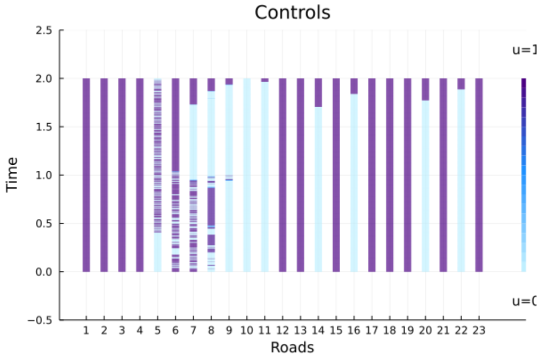
(a) control



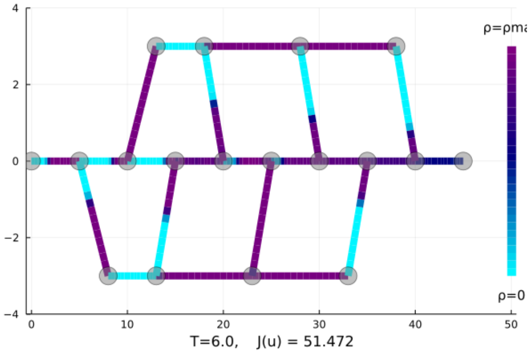
(b) density

Figure 4: Hybride : contrôle et densité associée

Résultats
Hybride



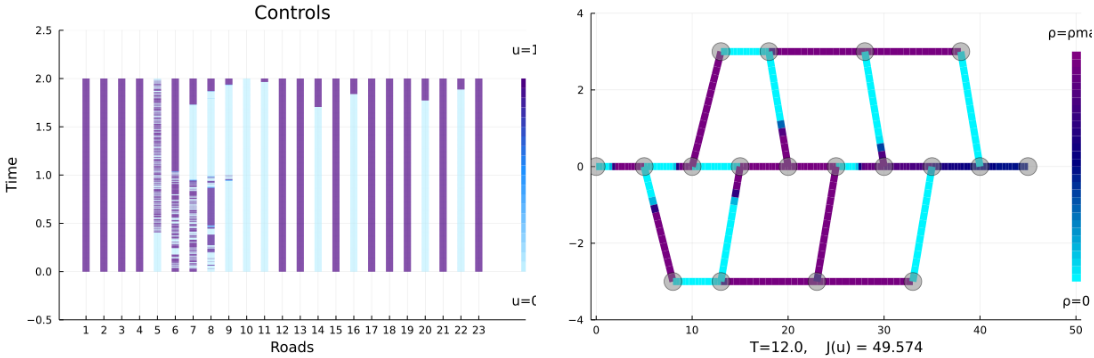
(a) control



(b) density

Figure 4: Hybride : contrôle et densité associée

Résultats
Hybride

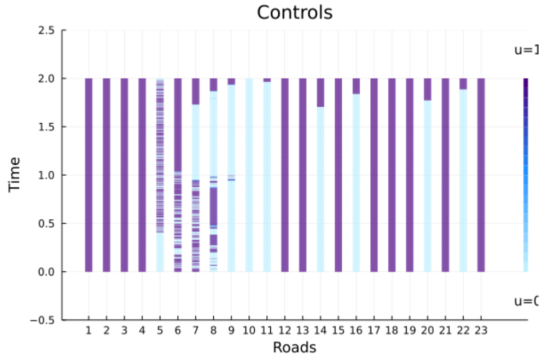


(a) control

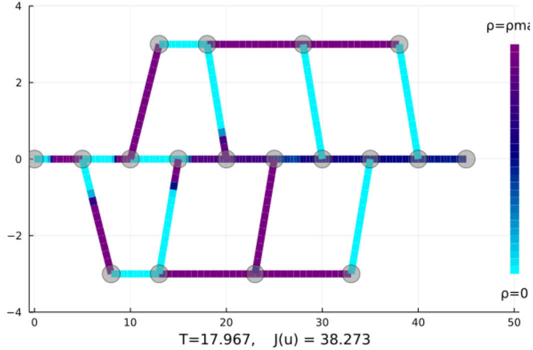
(b) density

Figure 4: Hybride : contrôle et densité associée

Résultats
Hybride



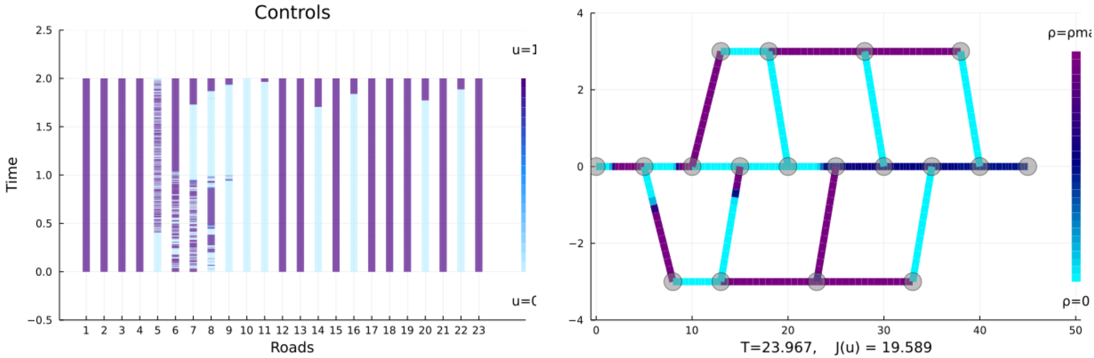
(a) control



(b) density

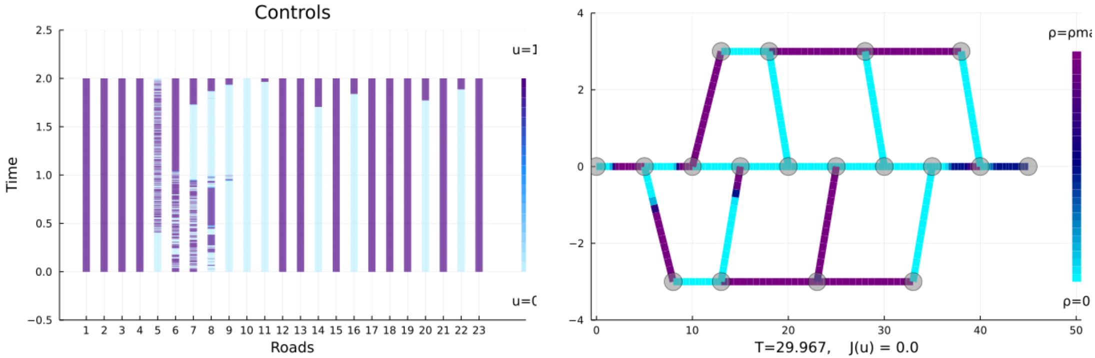
Figure 4: Hybride : contrôle et densité associée

Résultats
Hybride



(a) control **(b)** density

Figure 4: Hybride : contrôle et densité associée



(a) control **(b)** density

Figure 4: Hybride : contrôle et densité associée

Conclusion

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. “Optimal Control for Traffic Flow Networks”. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
  - graphe plus grand

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
  - graphe plus grand
  - gestion de l'effectif des barrages (dynamique, probabiliste,...)

Conclusion

IЯMA

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. “Optimal Control for Traffic Flow Networks”. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
  - graphe plus grand
  - gestion de l'effectif des barrages (dynamique, probabiliste,...)
- Gain possibles en temps de calculs

Conclusion

IRMA

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
  - graphe plus grand
  - gestion de l'effectif des barrages (dynamique, probabiliste,...)
- Gain possibles en temps de calculs
  - traiter beaucoup plus de mailles (idéalement une centaine)

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
  - graphe plus grand
  - gestion de l'effectif des barrages (dynamique, probabiliste,...)
- Gain possibles en temps de calculs
  - traiter beaucoup plus de mailles (idéalement une centaine)
  - paralléliser

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
    - graphe plus grand
    - gestion de l'effectif des barrages (dynamique, probabiliste,...)
- Gain possibles en temps de calculs
    - traiter beaucoup plus de mailles (idéalement une centaine)
    - paralléliser

Conclusion

- Résultats numériques et théoriques
- Dans un cas général (tous types d'écoulement, c.f. [M. Gugat et al. "Optimal Control for Traffic Flow Networks". In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 126 (2005)]
- Cas tests plus complexes à traiter
  - graphe plus grand
  - gestion de l'effectif des barrages (dynamique, probabiliste,...)
- Gain possibles en temps de calculs
  - traiter beaucoup plus de mailles (idéalement une centaine)
  - paralléliser

Merci pour votre attention !