

# Projet Hackathon Vélib's: recherche d'une répartition matinale optimale des vélos

---

Mehdi Boussâa, Diala Hawat,  
Alexander Reisach, Mariem Abaach, Raphaël Lachièze-Rey,  
22.12.2023

Laboratoire MAP5





## **Problème: la régulation des stations**

---

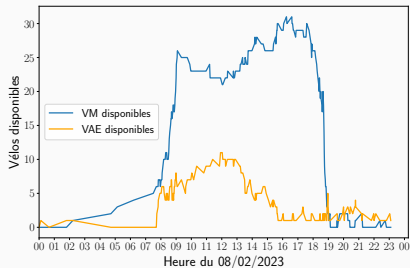
## Régulation des stations

- Il s'agit de corriger les déséquilibres dans la répartition des vélos sur le réseau générés par les usagers.

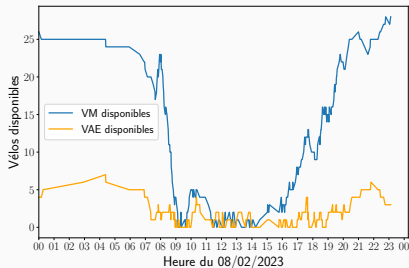


# Régulation des stations

- Il s'agit de corriger les déséquilibres dans la répartition des vélos sur le réseau générés par les usagers.



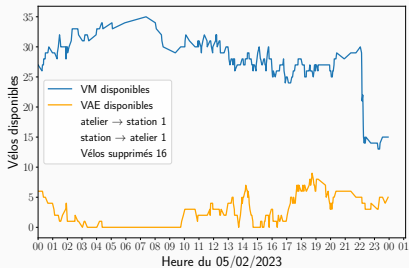
(a) Station auto-équilibrée



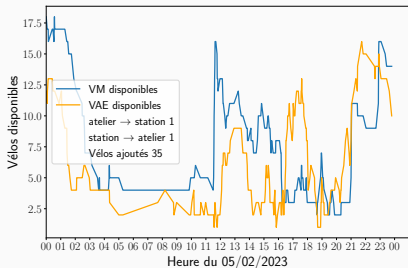
(b) Station auto-équilibrée

# Régulation des stations

- Il s'agit de corriger les déséquilibres dans la répartition des vélos sur le réseau générés par les usagers.



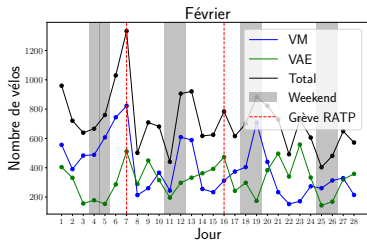
(a) Station remplie le soir



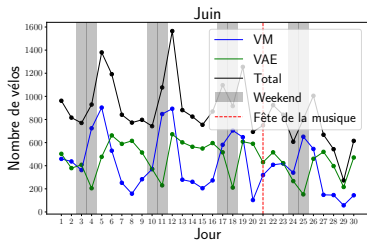
(b) Station vide le soir

# Régulation des stations

- Il s'agit de corriger les déséquilibres dans la répartition des vélos sur le réseau générés par les usagers.
- Nombre moyen (par jour) de vélos utilisés dans la régulation : 714 en février et 873 en juin.



(a) Régulation faite en février



(b) Régulation faite en juin

## Régulation des stations

- Il s'agit de corriger les déséquilibres dans la répartition des vélos sur le réseau générés par les usagers.
- Nombre moyen (par jour) de vélos utilisés dans la régulation : 714 en février et 873 en juin.

Comment peut-on rendre la régulation la plus efficace possible?

## **Données fournies par Smovengo**

---

- 1471 stations sur un territoire de 450  $km^2$ .
  - $\geq 15000$  vélos (mécaniques et électriques).
  - Chaque seconde 5 vélos pris en station en pic d'activité.
- 5 jeux de données fournies sur 2 mois : février et juin.
  - Variabilité inter mensuelle dûe à la météo.
  - Influence d'événement rares (grèves, jour fériés).

## 1. Courses usagers.

Numéro de Vélo	Assistance électrique	ID utilisateur	Date départ	Date arrivée	Distance parcourue en mètres	Durée en secondes	Vitesse maximum	Nom station départ	Latitude station départ	Longitude station départ	Statut station départ	Nom station arrivée
2041	True	71709	2023-02-02 23:52:49	2023-02-03 00:06:26	4109	812	31	Damrémont - Ordener	48.893400	2.336267	NORMALE	Laumière - Petit
2041	True	13661	2023-02-03 08:17:17	2023-02-03 08:45:02	7591	1659	26	Laumière - Petit	48.884674	2.380039	NORMALE	Gabriel Lamé
2041	True	44481	2023-02-03 08:51:06	2023-02-03 09:11:07	3524	1196	26	Gabriel Lamé	48.835121	2.385535	NORMALE	Gabriel Lamé
2041	True	93548	2023-02-03 12:10:23	2023-02-03 12:19:19	1735	531	28	Gabriel Lamé	48.835121	2.385535	NORMALE	Quai Panhard et Levassor
2041	True	1601	2023-02-03 17:36:32	2023-02-03 18:15:03	10980	2305	29	Quai Panhard et Levassor	48.828375	2.384274	NORMALE	André Maurois - Joseph et Marie Hackin

## 2. Historique remplissage des stations.

Code station	Nom station	longitude	latitude	Date mise à jour	VM disponibles	VAE disponibles	VM indisponibles	VAE indisponibles	Nombre de diapasons disponibles
1001	Quai de l'Horloge - Pont Neuf	2.341798	48.857059	2023-02-01 00:00:00	1	0	0	0	16
1001	Quai de l'Horloge - Pont Neuf	2.341798	48.857059	2023-02-01 00:02:00	1	0	1	0	15
1001	Quai de l'Horloge - Pont Neuf	2.341798	48.857059	2023-02-01 03:25:00	1	1	1	0	14
1001	Quai de l'Horloge - Pont Neuf	2.341798	48.857059	2023-02-01 06:15:00	1	0	1	0	15
1001	Quai de l'Horloge - Pont Neuf	2.341798	48.857059	2023-02-01 06:29:00	1	1	1	0	14



## 3. Régulation mouvements entre stations.

Nom station prise	Latitude station prise	Longitude station prise	Nom station dépose	Latitude station dépose	Longitude station dépose	Total	VAE	VM
Javel - André Citroën	48.846276	2.278637	Edgar Quinet - Gaité	48.841161	2.324595	13	2	11
Place de la Montagne du Goulet	48.844341	2.277384	Charles de Gaulle - Plateau de Vanves	48.822331	2.298572	12	2	10
Eugène Oudiné - Dessous Des Berges	48.825642	2.375023	Bobillot - Paulin Mery	48.829900	2.354336	9	1	8
La Jarry - Place Diderot	48.849727	2.452014	Fabre d'Eglantine - Place de la Nation	48.847112	2.395620	11	4	7
Gabriel Péri - Danielle Casanova	48.790114	2.402578	Cours de Vincennes - Sout	48.846919	2.410522	13	7	6
Place Marcel Cachin	48.814114	2.390908	François Debergue - Croix de Chavaux	48.857422	2.437578	3	0	3
Place Marcel Cachin	48.814114	2.390908	Louis Lumière.	48.862162	2.411126	6	0	6
Gouthière - Poterne des Peupliers	48.820507	2.351342	Château - Place de Catalogne	48.836806	2.318529	9	0	9
Aristide Briand - Place de la Résistance	48.821242	2.251100	Terroirs de France - Lheureux	48.832120	2.388618	6	0	6
Censier - Jardin des Plantes	48.841072	2.355475	Place de la Nation - Picpus	48.846822	2.400113	13	1	12
David Weill - Parc Montsouris	48.821092	2.333726	Boulevard - Daguerre	48.834465	2.329339	9	4	5
Javel - André Citroën	48.846276	2.278637	Château - Place de Catalogne	48.836806	2.318529	7	0	7

## 4. Régulation mouvement ateliers.

- Mouvement atelier-vers-station.

	Nom station dépose	Latitude station dépose	Longitude station dépose	Total	VAE	VM
	Gare du Nord - Hôpital Lariboisière	48.881949	2.352339	4	0	4
	Place d'Italie - Vincent Auriol	48.831482	2.356755	12	10	2
Station Paris Basketball - Stade Georges Carpe...		48.820482	2.366832	9	6	3
	Raymond Poincaré - Place Victor Hugo	48.870306	2.285075	9	9	0
	Porte Molitor	48.845248	2.256902	9	0	9
	Grande Armée - Brunel	48.876116	2.288124	14	10	4
	Diane Arbus	48.898801	2.352402	13	13	0
	Frères Flavien - Porte des Lilas	48.878099	2.411046	14	10	4
	Paul Signac - Aristide Briand	48.869503	2.450226	12	7	5
	Porte des Lilas - Faidherbe	48.878619	2.412033	30	15	15
	Le Goff - Gay-Lussac	48.846102	2.341221	14	9	5
	Hoche - Tilsitt	48.874836	2.297132	9	3	6

## 4. Régulation mouvement ateliers.

- Mouvement atelier-vers-station.
- Mouvement station-vers-atelier.

Nom station prise	Latitude station prise	Longitude station prise	Total	VAE	VM
Alexandre Dumas - Voltaire	48.852889	2.389148	3	3	0
Amelot - Saint-Sébastien	48.861142	2.367800	2	2	0
André Theuriet - Blagis	48.779773	2.313053	1	1	0
Archives - Rivoli	48.857347	2.353977	1	0	1
Arcole - Notre-Dame	48.853884	2.349380	2	0	2
...	...	...	...	...	...
Vincennes - Douy-Delcupe	48.854937	2.436049	1	1	0
Vincent Auriol - Louise Weiss	48.834002	2.370389	1	1	0
Vistule - Choisy	48.823655	2.361572	1	1	0
Vivaldi - Antoine-Julien Hénard	48.841924	2.389729	2	1	1
Westermeyer - Paul Vaillant-Couturier	48.819116	2.396664	1	1	0

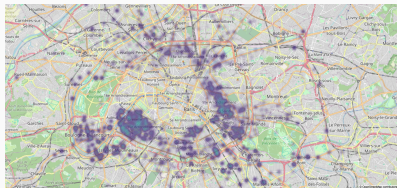
## 5. Signalement vélo abandonnés.

Date de signalement	Numéro de Vélo	Localisation
2023-02-01 08:37:43.285	57050	23 Voie Br/15, 75015 Paris, France
2023-02-01 09:01:40.695	5803	14 Rue De Dunkerque, 75010 Paris, France
2023-02-01 11:08:17.641	62660	37 Rue Clavel 75019 Paris
2023-02-01 12:34:14.555	31700	4 Rue Francis Jammes, 75010 Paris, France
2023-02-01 12:40:07.261	34111	128 Avenue De La République, 93300 Aubervillie...
...	...	...
2023-02-28 18:32:51.593	58407	20 Rue Bénard, 75014 Paris, France
2023-02-28 21:00:47.310	52291	3 Avenue Saint-Joseph 92600 Asnières-sur-Seine
2023-02-28 23:08:44.199	52865	40 Rue De La Fédération, 93100 Montreuil, France
2023-02-28 23:10:41.466	60010	Galerie De La Villette, 75019 Paris, France
2023-02-28 23:51:49.985	31230	84 Rue Réaumur, 75002 Paris, France

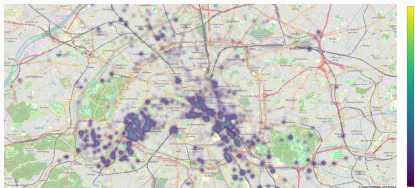
# Analyse de données

---

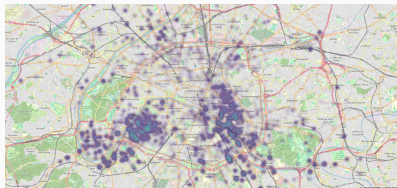
# Analyse de données



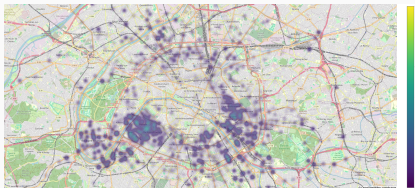
(a) Répartition des vélos à 6h (16 juin)



(b) Répartition des vélos à 20h (16 juin)

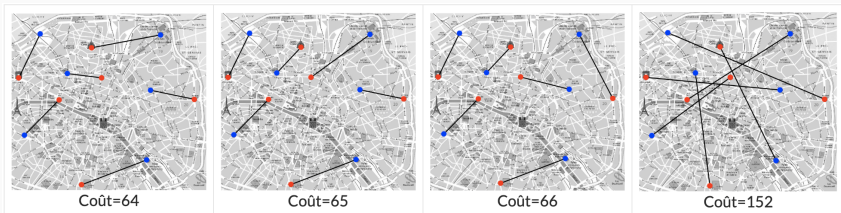


(c) Répartition des vélos à 1h (17 juin)

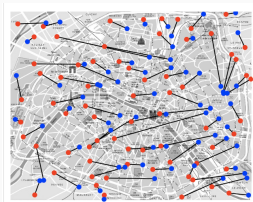


(d) Répartition des vélos à 6h (17 juin)

A quel point la distribution du matin est-elle “loin” de celle du soir?



(a) Plusieurs “plans de transport”



(b) Une répartition “optimale”

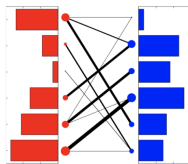
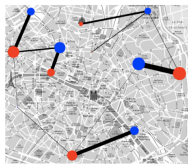
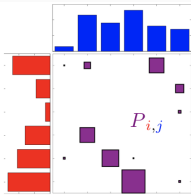
# Coût de transport (suite) ( G. Peyré, *Au fil des maths*)

- Distance de Wasserstein (Formalisation de Kantorovitch) :

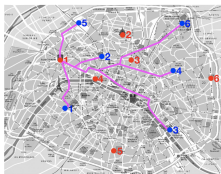
$$W(\text{bleu}, \text{rouge}) = \min_P \sum_{i=1}^{\# \text{stations}} \sum_{j=1}^{\# \text{vélos}} P_{i,j} \text{dist}(\text{station}_i, \text{vélo}_j).$$

	3	23	18	26	16	14
24	1	7	0	0	16	0
9	0	0	0	0	0	9
3	0	0	0	0	0	3
16	0	16	0	0	0	0
21	2	0	18	1	0	0
27	0	0	0	25	0	2

(a) matrice

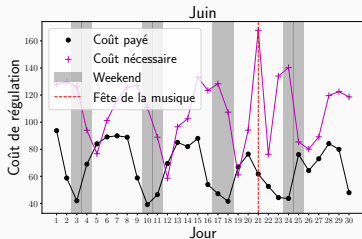


- Autre distance :

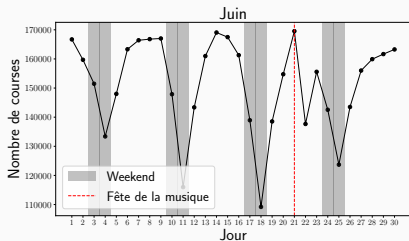




# Analyse de données

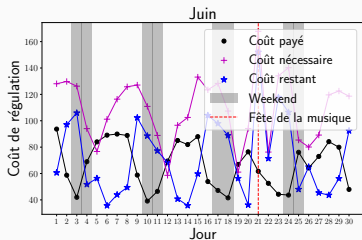


(a) Coût de régulation

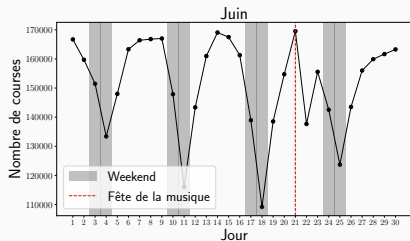


(b) Nombre de courses

# Analyse de données

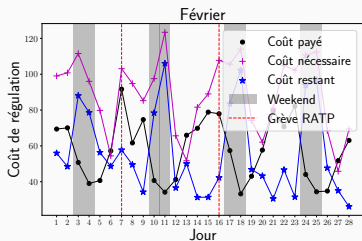


(a) Coût de regulation

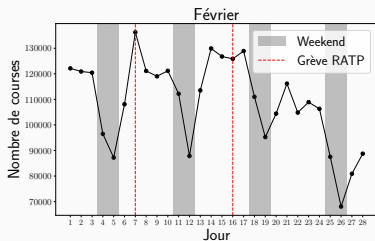


(b) Nombre de courses

# Analyse de données



(a) Coût de regulation



(b) Nombre de courses

# Projet proposé

---

# Objectifs

Fournir un outil algorithmique utilisé par l'équipe de régulation chaque soir pour prédire, à partir de la répartition du soir  $\mu^s$ , la répartition "optimale"  $\mu_{\text{opt}}$  selon laquelle il faut effectuer la régulation.

Fournir un outil algorithmique utilisé par l'équipe de régulation chaque soir pour prédire, à partir de la répartition du soir  $\mu^s$ , la répartition "optimale"  $\mu_{\text{opt}}$  selon laquelle il faut effectuer la régulation.

## Critères :

- Réduire les coûts de la régulation.
- Maximiser la satisfaction des utilisateurs.
- Solution réalisable.

# Objectifs

Fournir un outil algorithmique utilisé par l'équipe de régulation chaque soir pour prédire, à partir de la répartition du soir  $\mu^s$ , la répartition "optimale"  $\mu_{\text{opt}}$  selon laquelle il faut effectuer la régulation.

## Critères :

- Réduire les coûts de la régulation.
- Maximiser la satisfaction des utilisateurs.
- Solution réalisable.

## Idée :

- Attribuer à une répartition des vélos  $\mu$  un score.
- Trouver la répartition "optimale"  $\mu_{\text{opt}}$  maximisant ce score.

## Example

On définit le score :

$$s(\mu) = \frac{n(\mu)}{W(\mu^s, \mu)}$$

- $n(\mu)$  : nombre de courses pour une répartition  $\mu$ .
- $W(\mu^s, \mu)$  : coût minimal pour transporter  $\mu^s$  vers  $\mu$ .



## Example

On définit le score :

$$s(\mu) = \frac{n(\mu)}{W(\mu^s, \mu)} \quad \text{ou} \quad s(\mu) = n(\mu) - \lambda W(\mu^s, \mu).$$

- $n(\mu)$  : nombre de courses pour une répartition  $\mu$ .
- $W(\mu^s, \mu)$  : coût minimal pour transporter  $\mu^s$  vers  $\mu$ .
- $\lambda$  : Paramètre de pondération, positif.

## Example

On définit le score :

$$s(\mu) = \frac{n(\mu)}{W(\mu^s, \mu)} \quad \text{ou} \quad s(\mu) = n(\mu) - \lambda W(\mu^s, \mu).$$

- $n(\mu)$  : nombre de courses pour une répartition  $\mu$ .
- $W(\mu^s, \mu)$  : coût minimal pour transporter  $\mu^s$  vers  $\mu$ .
- $\lambda$  : Paramètre de pondération, positif.

Trouvez  $\mu_{\text{opt}}$  maximisant  $s$  :

$$\mu_{\text{opt}} \in \operatorname{argmax}_{\mu} s(\mu).$$

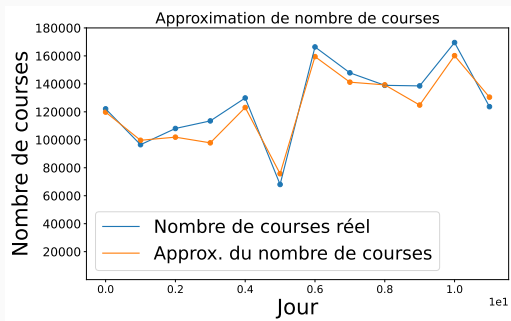
## Exemple jouet

---

# Maximisation du score

## Exemple joué:

- $n(\cdot)$ : un réseau de neurones à trois couches entièrement connecté, avec une fonction d'activation *ReLU*.



## Exemple jouet:

- $n(\cdot)$ : un réseau de neurones à trois couches entièrement connecté, avec une fonction d'activation *ReLU*.
- $W(\mu^s, \mu)$ : distance de Wasserstein d'ordre 2 régularisée.

$$\min_{P \text{ donne } \mu^s, \mu^m} \sum_{i,j} P_{i,j} \text{dist}(S_i, V_j) - \varepsilon H(P)$$

Où  $H(P) = -\sum_{i,j} P_{ij} \log(P_{ij})$  et  $\varepsilon > 0$ .

## Exemple jouet:

- $n(\cdot)$ : un réseau de neurones à trois couches entièrement connecté, avec une fonction d'activation *ReLU*.
- $W(\mu^s, \mu)$ : distance de Wasserstein d'ordre 2 regularisée.

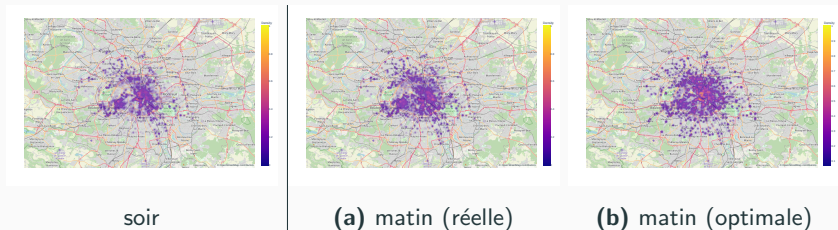
On va chercher  $\mu_{\text{opt}}$  tel que, pour  $\lambda > 0^a$

$$\mu_{\text{opt}} \in \operatorname{argmax} s(\mu) = n(\mu) - \lambda W(\mu^s, \mu).$$

---

<sup>a</sup>Optimisation via descente de gradient

# Quelques résultats

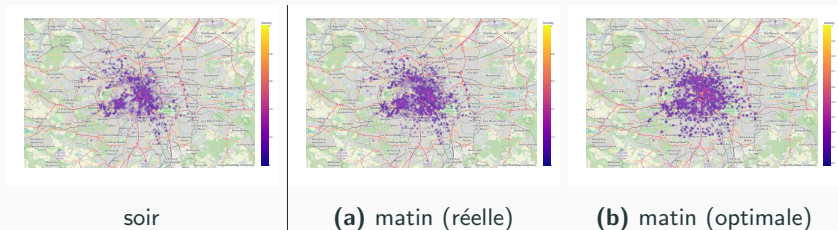


**Figure 8:** Répartition des vélos

## Amélioration

- Distance de Wasserstein  $W$  : +6.5%
- Utilisation du vélo +10%
- 48% déplacés (en  $W$ )

# Quelques résultats



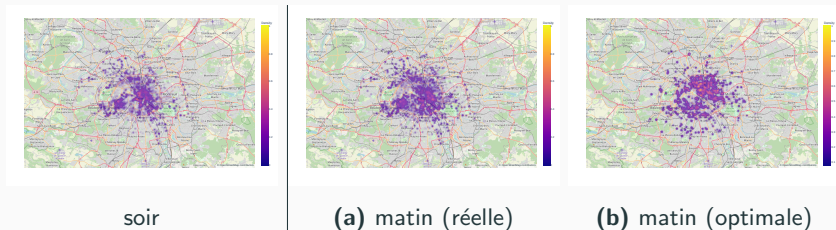
**Figure 8:** Répartition des vélos

## Amélioration

- Distance de Wasserstein  $W$  : +6%
- Utilisation du vélo +18%
- 41% déplacés (en  $W$ )



# Quelques résultats



**Figure 8:** Répartition des vélos

## Amélioration

- Distance de Wasserstein  $W$  :  $-100\%$
- Utilisation du vélo  $+150\%$
- 61% déplacés (en  $W$ )

## **Résumé, avantages, perspectives**

---

## Résumé :

- Fonction score évaluant l'efficacité d'une répartition matinale.
- Outil algorithmique visant à identifier la répartition matinale optimale maximisant ce score.

# Résumé, avantages, perspectives

## Résumé :

- Fonction score évaluant l'efficacité d'une répartition matinale.
- Outil algorithmique visant à identifier la répartition matinale optimale maximisant ce score.

## Avantages :

- Réduire les coûts de régulation.
- Réduire l'empreinte carbone de la régulation.
- Augmentation de la satisfaction des utilisateurs.

# Résumé, avantages, perspectives

## Résumé :

- Fonction score évaluant l'efficacité d'une répartition matinale.
- Outil algorithmique visant à identifier la répartition matinale optimale maximisant ce score.

## Avantages :

- Réduire les coûts de régulation.
- Réduire l'empreinte carbone de la régulation.
- Augmentation de la satisfaction des utilisateurs.

## Perspectives :

- Intégrer les contraintes de l'équipe Vélib dans le modèle.
- Étude plus approfondie avec plus de données.

**Merci pour votre attention !**

---