

# Prix Master RO/AD

electric Vehicle Assignment Problem with Parking Constraints

Mathis Azéma

Ecole Polytechnique

6 mars 2023

Tuteurs: Guy Desaulniers, Jorge Mendoza, Gilles Pesant



POLYTECHNIQUE  
MONTREAL

WORLD-CLASS  
ENGINEERING



- 1 Description du problème
- 2 Modèle PLNE
- 3 Modèle PPC
- 4 Extensions



- 1 Description du problème
- 2 Modèle PLNE
- 3 Modèle PPC
- 4 Extensions

## Sujet du stage

- Le secteur du transport est responsable de 20% des émissions de CO<sub>2</sub> → développement des bus électriques.

## Sujet du stage



- Le secteur du transport est responsable de 20% des émissions de CO<sub>2</sub> → développement des bus électriques.

	Bus diesel 	Bus électrique 
Recharge	Quelques minutes	Plusieurs heures
Autonomie	Longue	Courte

⇒ Prise en compte des évènements de recharge dans les plannings.

## Sujet du stage

- Le secteur du transport est responsable de 20% des émissions de CO<sub>2</sub> → développement des bus électriques.

	Bus diesel 	Bus électrique 
Recharge	Quelques minutes	Plusieurs heures
Autonomie	Longue	Courte



⇒ Prise en compte des évènements de recharge dans les plannings.

### Originalité du sujet

- Les bus sont stationnés dans des dépôts fermés entre deux trajets dans les pays nordiques.

## Sujet du stage

- Le secteur du transport est responsable de 20% des émissions de CO<sub>2</sub> → développement des bus électriques.

	Bus diesel 	Bus électrique 
Recharge	Quelques minutes	Plusieurs heures
Autonomie	Longue	Courte

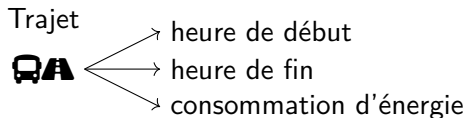
⇒ Prise en compte des évènements de recharge dans les plannings.

### Originalité du sujet

→ Les bus sont stationnés dans des dépôts fermés entre deux trajets dans les pays nordiques.

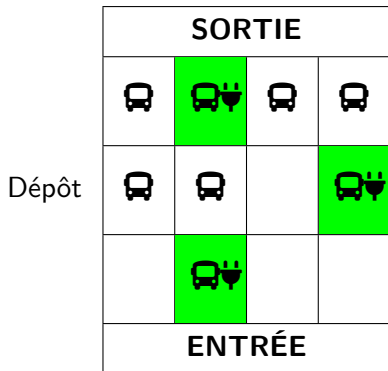
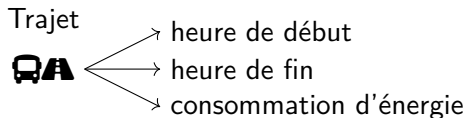
⇒ **Ajout de contraintes de stationnement.**

# Présentation du problème

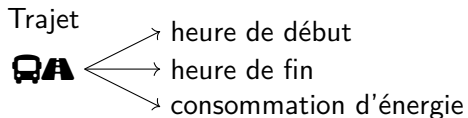




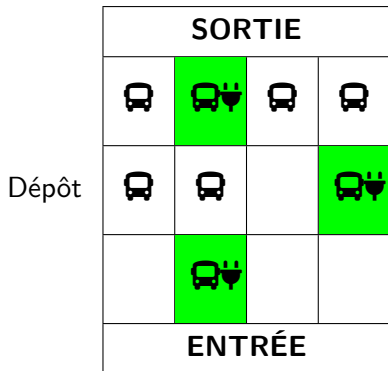
# Présentation du problème



# Présentation du problème



## Contraintes



# Présentation du problème

Trajet



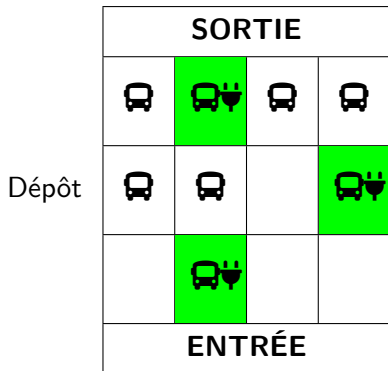
→ heure de début

→ heure de fin

→ consommation d'énergie

## Contraintes

→ Tournées de véhicules



# Présentation du problème

Trajet



→ heure de début

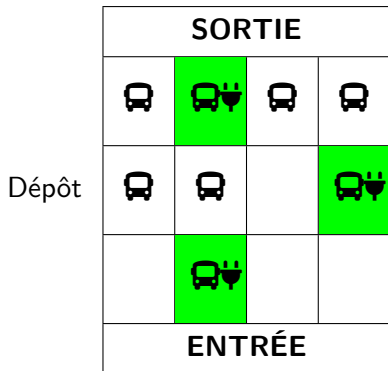
→ heure de fin

→ consommation d'énergie

## Contraintes

→ Tournées de véhicules

→ Quelle voie de stationnement après un trajet ?



# Présentation du problème

Trajet



→ heure de début

→ heure de fin

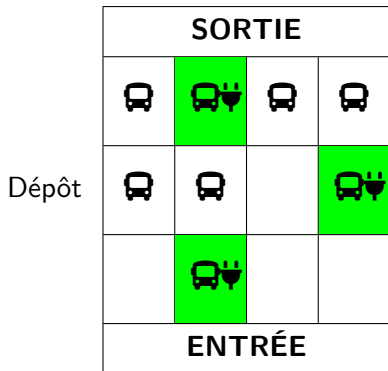
→ consommation d'énergie

## Contraintes

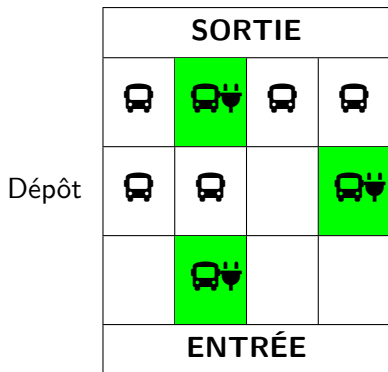
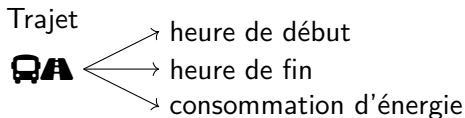
→ Tournées de véhicules

→ Quelle voie de stationnement après un trajet ?

→ Règle FIFO dans les voies



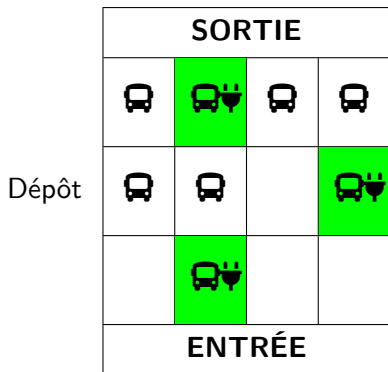
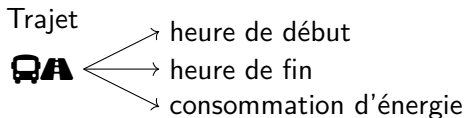
# Présentation du problème



## Contraintes

- Tournées de véhicules
- Quelle voie de stationnement après un trajet ?
- Règle FIFO dans les voies
- Gestion de l'énergie des bus.

# Présentation du problème



## Contraintes

- Tournées de véhicules
- Quelle voie de stationnement après un trajet ?
- Règle FIFO dans les voies
- Gestion de l'énergie des bus.
- Puissance du dépôt limitée (= Nombre de chargeurs)

## ① Description du problème

## ② Modèle PLNE

Modélisation générale  
Stratégies d'accélération  
Résultats

## ③ Modèle PPC

## ④ Extensions



## 1 Description du problème

## 2 Modèle PLNE

Modélisation générale

Stratégies d'accélération

Résultats

## 3 Modèle PPC

## 4 Extensions

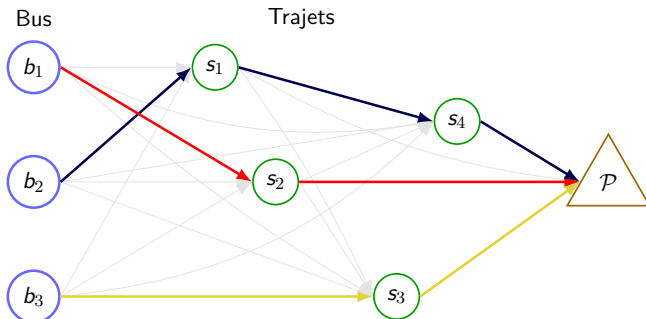
# Modélisation en trois sous-problèmes

## **Sous-problème d'affectation**

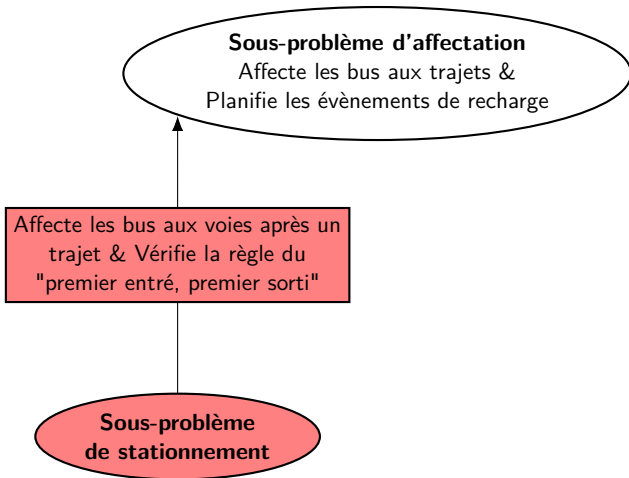
Affecte les bus aux trajets &  
Planifie les évènements de recharge

# Modélisation en trois sous-problèmes

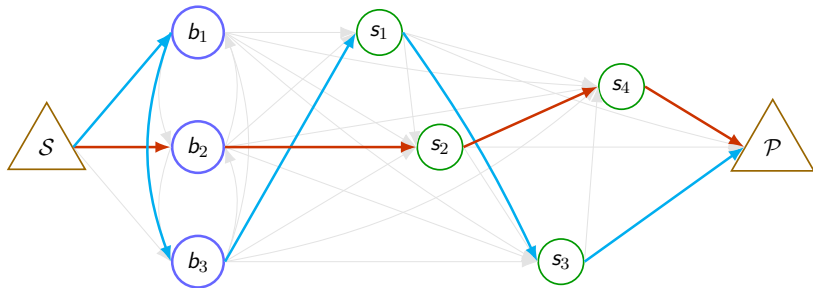
**Sous-problème d'affectation**  
Affecte les bus aux trajets &  
Planifie les évènements de recharge



# Modélisation en trois sous-problèmes



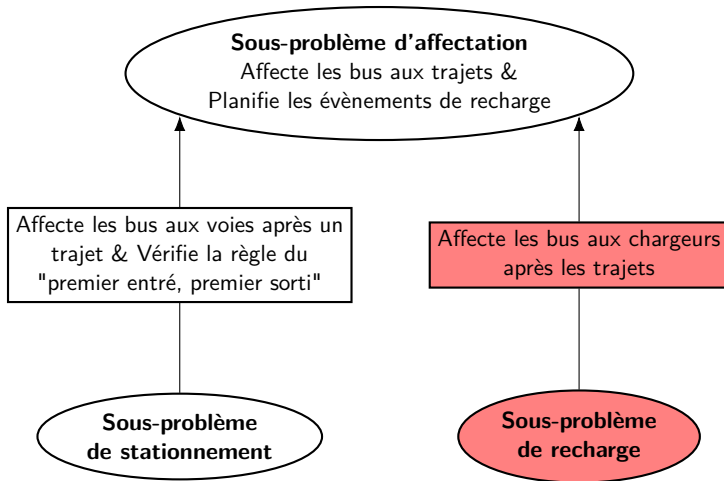
# Modélisation en trois sous-problèmes



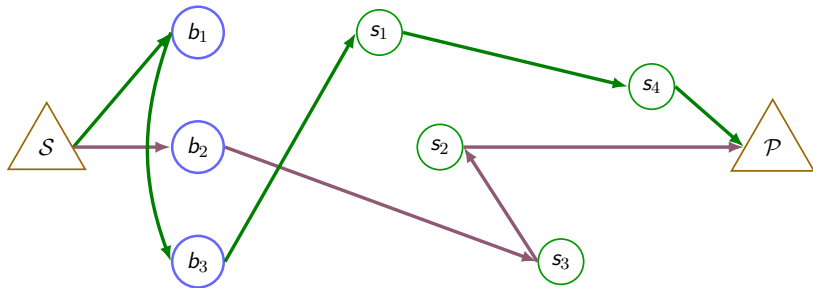
Un chemin est la suite des trajets stationnés dans une même voie

**Sous-problème  
de stationnement**

# Modélisation en trois sous-problèmes



# Modélisation en trois sous-problèmes



Un chemin est la suite des recharges effectuées par un même chargeur

**Sous-problème  
de recharge**

## ① Description du problème

## ② Modèle PLNE

Modélisation générale

Stratégies d'accélération

Résultats

## ③ Modèle PPC

## ④ Extensions



# Stratégies d'accélération

- **Réduction des graphes**

→ Un bus ne reste pas dans le dépôt 24 heures consécutives.

# Stratégies d'accélération

- **Réduction des graphes**

→ Un bus ne reste pas dans le dépôt 24 heures consécutives.

- **Décomposition en deux étapes**

Étape 1  
eVAP-PC sans contrainte  
sur le nombre de chargeurs

Étape 2  
Trouver un planning  
de recharge réalisable

# Stratégies d'accélération

- **Réduction des graphes**

→ Un bus ne reste pas dans le dépôt 24 heures consécutives.

- **Décomposition en deux étapes**

Étape 1	Étape 2
eVAP-PC sans contrainte sur le nombre de chargeurs	Trouver un planning de recharge réalisable

- **Ajout d'une fonction objectif**

Graphe affectation	Graphe stationnement
$c_{ij} = (h_j^{start} - h_i^{end} - 4h)^2$	$c_{ij} = (h_j^{end} - h_i^{end} - 1h)^2$

## ① Description du problème

## ② Modèle PLNE

Modélisation générale

Stratégies d'accélération

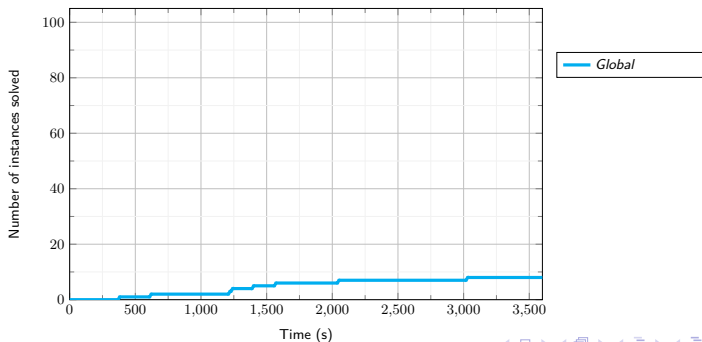
Résultats

## ③ Modèle PPC

## ④ Extensions

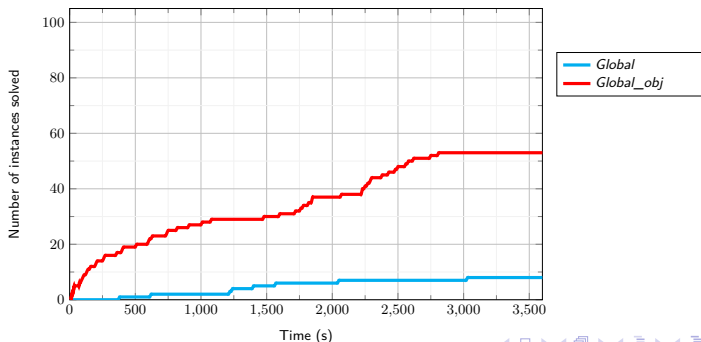
# Résultats: 30-40 bus, 2-3 jours, 2-3 trajets/bus/jour

Method	2-steps	Objective	Reduction
Global			X



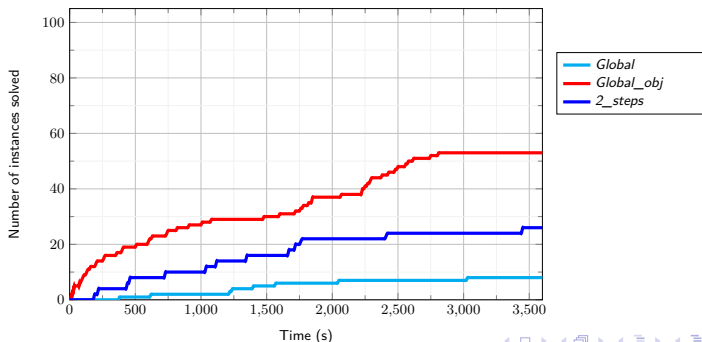
# Résultats: 30-40 bus, 2-3 jours, 2-3 trajets/bus/jour

Method	2-steps	Objective	Reduction
Global			X
Global_obj		X	X



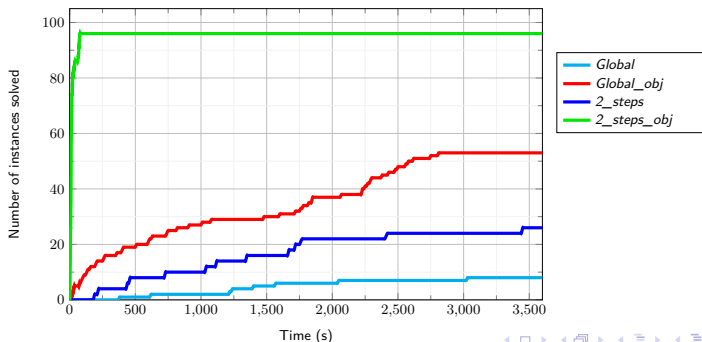
## Résultats: 30-40 bus, 2-3 jours, 2-3 trajets/bus/jour

Method	2-steps	Objective	Reduction
Global			X
Global_obj		X	X
2_steps	X		X



## Résultats: 30-40 bus, 2-3 jours, 2-3 trajets/bus/jour

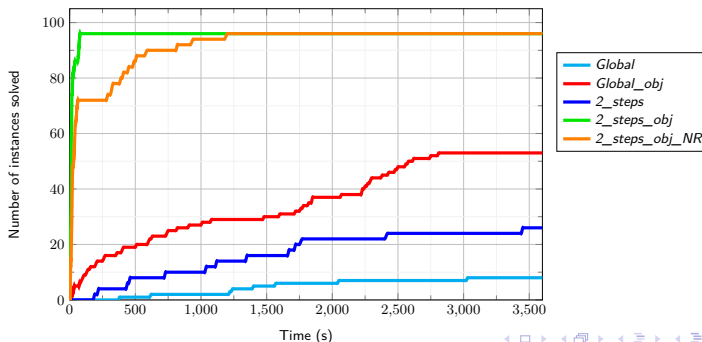
Method	2-steps	Objective	Reduction
Global			X
Global_obj		X	X
2_steps	X		X
2_steps_obj	X	X	X





## Résultats: 30-40 bus, 2-3 jours, 2-3 trajets/bus/jour

Method	2-steps	Objective	Reduction
Global			X
Global_obj		X	X
2_steps	X		X
2_steps_obj	X	X	X
2_steps_obj_NR	X	X	

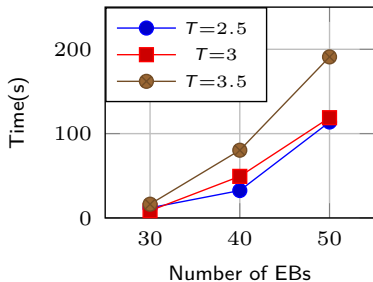


## Résultats avec un horizon de 3 jours

- $T$ : Nombre trajets par bus en moyenne
- $V$ : Nombre de bus par voies
  - ex: 30 bus,  $V = 6 \implies 5$  voies

## Résultats avec un horizon de 3 jours

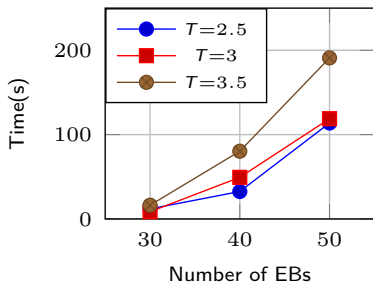
- $T$ : Nombre trajets par bus en moyenne
- $V$ : Nombre de bus par voies
  - ex: 30 bus,  $V = 6 \implies 5$  voies



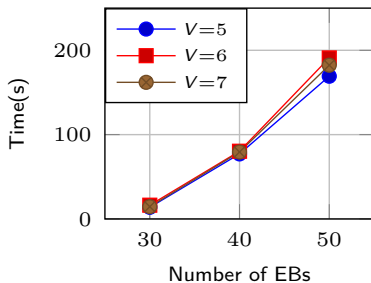
(a)  $V = 6$

## Résultats avec un horizon de 3 jours

- $T$ : Nombre trajets par bus en moyenne
- $V$ : Nombre de bus par voies
  - ex: 30 bus,  $V = 6 \implies 5$  voies



(a)  $V = 6$



(b)  $T = 3.5$

1 Description du problème

2 Modèle PLNE

3 **Modèle PPC**  
Description  
Résultats

4 Extensions

1 Description du problème

2 Modèle PLNE

3 **Modèle PPC**  
Description  
Résultats

4 Extensions

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $\text{PRES}(v)$ : Présence de la variable  $v$ .



# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $\text{PRES}(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $\text{START}(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $\text{PRES}(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $\text{START}(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $\text{LENGTH}(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $PRES(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $START(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $LENGTH(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .
- *sequence variables* :

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $PRES(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $START(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $LENGTH(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .
- *sequence variables* :
  - Ensemble de plusieurs interval variables.

# La Programmation Par Contraintes

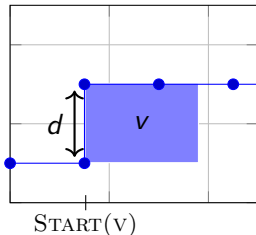
- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $PRES(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $START(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $LENGTH(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .
- *sequence variables* :
  - Ensemble de plusieurs interval variables.
  - Contraintes spécifiques :  $NOOVERLAP$ ,  $PREVIOUS$ , ...

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $PRES(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $START(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $LENGTH(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .
- *sequence variables* :
  - Ensemble de plusieurs interval variables.
  - Contraintes spécifiques :  $NOOVERLAP$ ,  $PREVIOUS$ , ...
- *Fonctions cumulatives* :

# La Programmation Par Contraintes

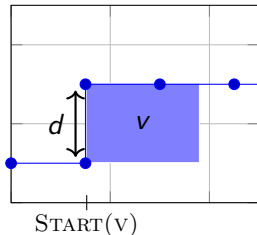
- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $PRES(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $START(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $LENGTH(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .
- *sequence variables* :
  - Ensemble de plusieurs interval variables.
  - Contraintes spécifiques :  $NOOVERLAP$ ,  $PREVIOUS$ , ...
- *Fonctions cumulatives* :



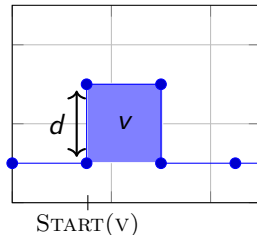
$STEPATSTART(v, d)$

# La Programmation Par Contraintes

- *interval variables*  $v$  définies par :
  - $PRES(v)$ : Présence de la variable  $v$ .
  - $START(v)$ : Début de l'intervalle  $v$ .
  - $LENGTH(v)$ : Longueur de l'intervalle  $v$ .
- *sequence variables* :
  - Ensemble de plusieurs interval variables.
  - Contraintes spécifiques : NOOVERLAP, PREVIOUS, ...
- *Fonctions cumulatives* :



STEPATSTART( $v, d$ )



PULSE( $v, d$ )



# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :

## Modélisation: Deux types de ressources

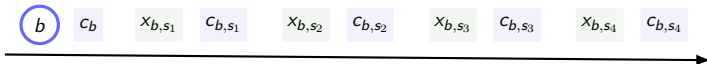
- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.

## Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les évènements de recharge au dépôt.

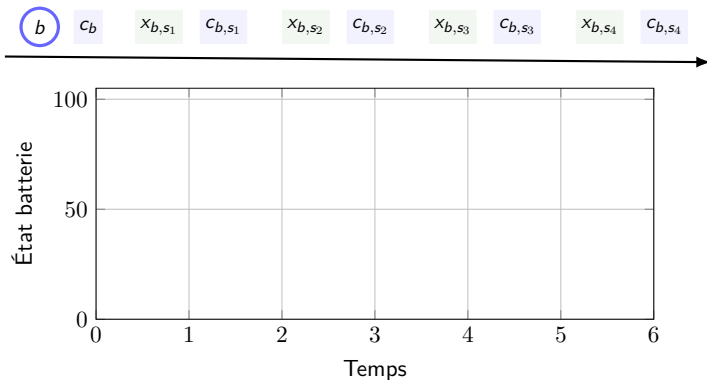
# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.



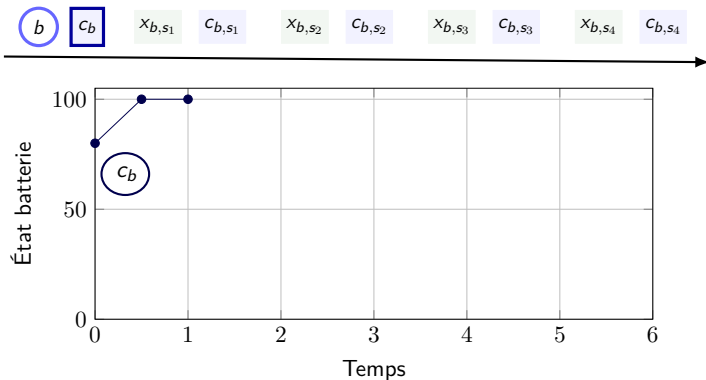
# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.



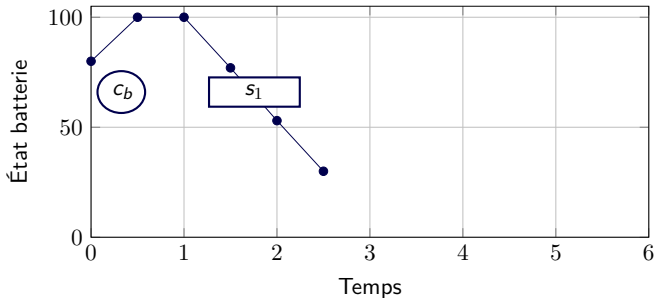
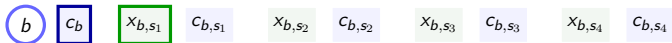
# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.



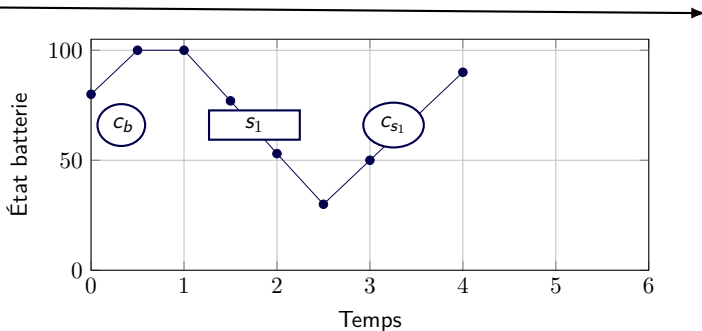
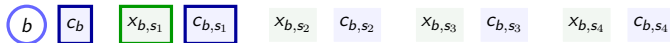
# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.



# Modélisation: Deux types de ressources

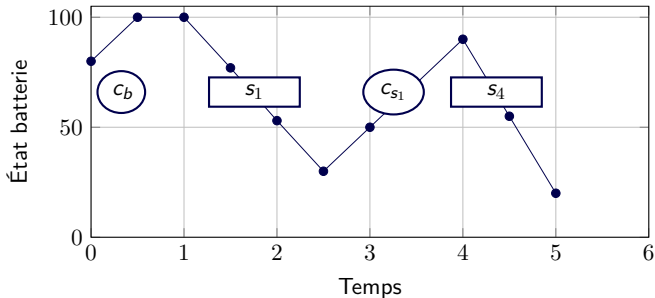
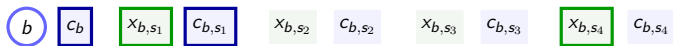
- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.





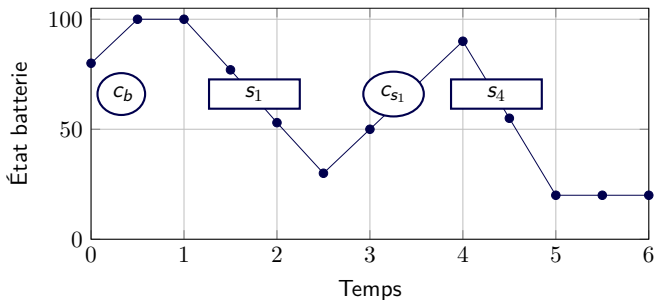
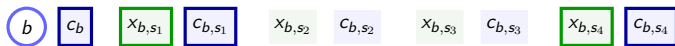
# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.



# Modélisation: Deux types de ressources

- La batterie des bus :
  - Consommée par les trajets.
  - Produite par les événements de recharge au dépôt.



## Modélisation: Deux types de ressources

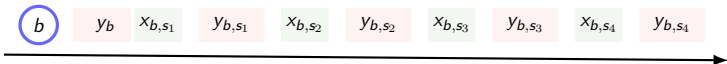
- Les voies du dépôt :

## Modélisation: Deux types de ressources

- Les voies du dépôt :
  - Les bus consomment une unité pendant leur stationnement.

# Modélisation: Deux types de ressources

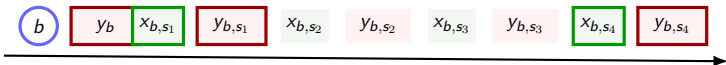
- Les voies du dépôt :  
→ Les bus consomment une unité pendant leur stationnement.



# Modélisation: Deux types de ressources

- Les voies du dépôt :

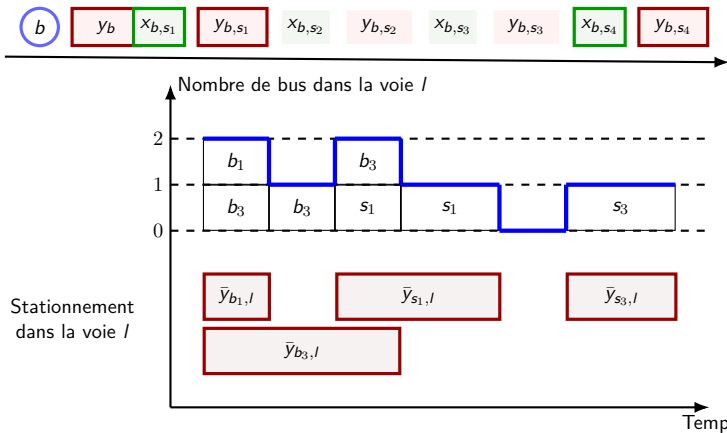
→ Les bus consomment une unité pendant leur stationnement.



# Modélisation: Deux types de ressources

- Les voies du dépôt :

→ Les bus consomment une unité pendant leur stationnement.



① Description du problème

② Modèle PLNE

③ **Modèle PPC**  
Description  
**Résultats**

④ Extensions



# Résultats

- *CP-searchPhase*: Fixer les variables de recharge en dernier.

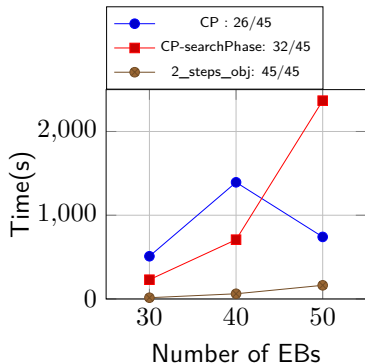


Fig. 3: Horizon : 3 jours

# Résultats

- *CP-searchPhase*: Fixer les variables de recharge en dernier.

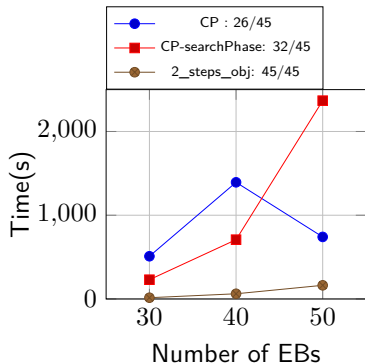


Fig. 3: Horizon : 3 jours

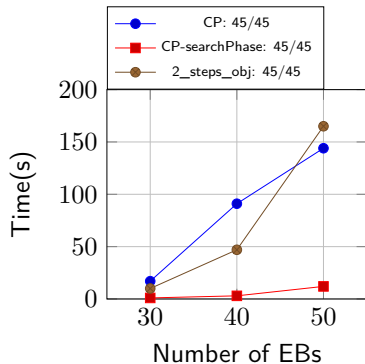
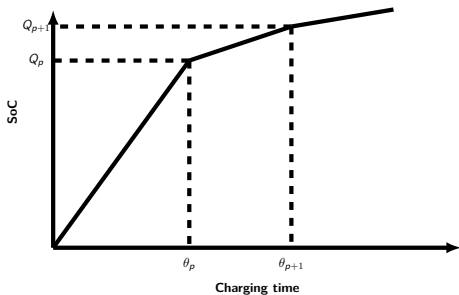


Fig. 4: Horizon : 1 jour avec contraintes cibles

- 1 Description du problème
- 2 Modèle PLNE
- 3 Modèle PPC
- 4 Extensions**

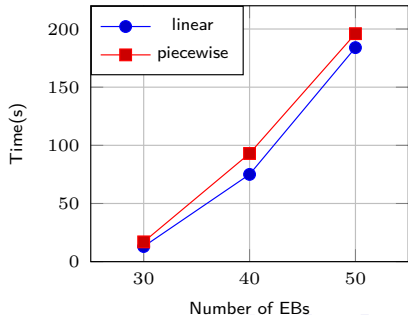
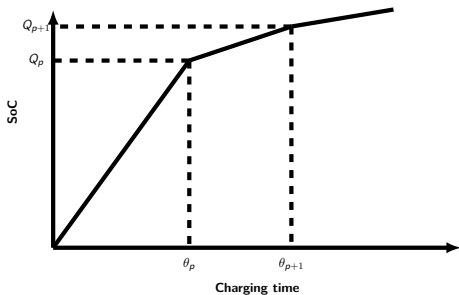
## Modèle PLNE linéaire par morceaux

- Fonction de recharge par morceaux concave avec le même temps de recharge 0-100% que celle linéaire.
- Ajout de variables binaires pour déterminer dans quel morceau on se trouve avant la recharge.
- Utilisation de la concavité pour déterminer le niveau d'énergie après la recharge.



## Modèle PLNE linéaire par morceaux

- Fonction de recharge par morceaux concave avec le même temps de recharge 0-100% que celle linéaire.
- Ajout de variables binaires pour déterminer dans quel morceau on se trouve avant la recharge.
- Utilisation de la concavité pour déterminer le niveau d'énergie après la recharge.



# Grandes instances

Méthode	60 bus	150 bus	210 bus	300 bus
<i>CP-searchPhase</i>	40	X	X	X

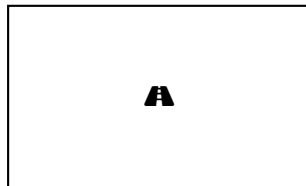
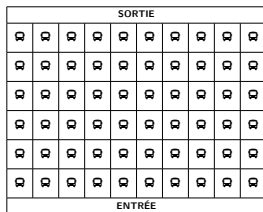
**Table 1:** Résumé des résultats (en secondes) sur des instances allant jusqu'à 900 trajets, 300 bus et 1 jour.

## Grandes instances

Méthode	60 bus	150 bus	210 bus	300 bus
<i>CP-searchPhase</i>	40	X	X	X

**Table 1:** Résumé des résultats (en secondes) sur des instances allant jusqu'à 900 trajets, 300 bus et 1 jour.

**Partitionnement de l'instance :** Capacité de recharge du dépôt comme seule contrainte liante.

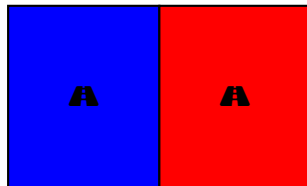
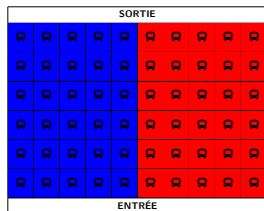


# Grandes instances

Méthode	60 bus	150 bus	210 bus	300 bus
<i>CP-searchPhase</i>	40	X	X	X

Table 1: Résumé des résultats (en secondes) sur des instances allant jusqu'à 900 trajets, 300 bus et 1 jour.

**Partitionnement de l'instance :** Capacité de recharge du dépôt comme seule contrainte liante.



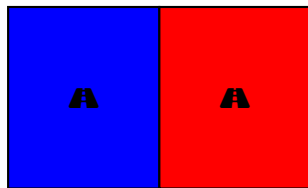
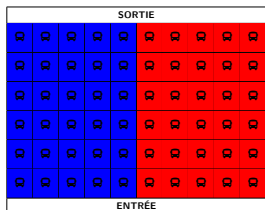


## Grandes instances

Méthode	60 bus	150 bus	210 bus	300 bus
<i>CP-searchPhase</i>	40	X	X	X
<i>CP-partition</i>	4	50	140	500

Table 1: Résumé des résultats (en secondes) sur des instances allant jusqu'à 900 trajets, 300 bus et 1 jour.

**Partitionnement de l'instance :** Capacité de recharge du dépôt comme seule contrainte liante.



# Bilan

- Formulation PLNE :
  - Basée sur trois graphes.
  - Développement de trois stratégies d'accélération.
  - Trouve un planning de 3 jours réalisable en moins de 5 minutes pour 50 bus.

# Bilan

- Formulation PLNE :
  - Basée sur trois graphes.
  - Développement de trois stratégies d'accélération.
  - Trouve un planning de 3 jours réalisable en moins de 5 minutes pour 50 bus.
- Formulation PPC :
  - Basée sur des variables intervalles consommant/ produisant 2 ressources: les batteries et les voies.
  - Moins efficace sur des plannings de plusieurs jours.
  - Très efficace pour un planning sur un jour avec des contraintes cibles.

# Bilan

- Formulation PLNE :
  - Basée sur trois graphes.
  - Développement de trois stratégies d'accélération.
  - Trouve un planning de 3 jours réalisable en moins de 5 minutes pour 50 bus.
- Formulation PPC :
  - Basée sur des variables intervalles consommant/ produisant 2 ressources: les batteries et les voies.
  - Moins efficace sur des plannings de plusieurs jours.
  - Très efficace pour un planning sur un jour avec des contraintes cibles.
- Extensions :
  - Fonction de recharge linéaire par morceaux.
  - Passage à l'échelle possible.

Merci pour votre attention !