



# **Modélisation et résolution de problèmes liés à l'exploitation d'infrastructures ferroviaires**

X. Delorme

Directeurs de thèse : Prof. A. Fréville

X. Gandibleux

J. Rodriguez



INRETS-ESTAS / LAMIH-ROI(UVHC)



# ***Plan de la présentation***

---

- ❑ **Présentation du problème étudié**
- ❑ Modélisation proposée
- ❑ Résolution du problème de set packing
- ❑ Expérimentations et résultats
- ❑ Intégration au projet RECIFE
- ❑ Conclusion et perspectives

# ***Problème étudié : contexte***

---

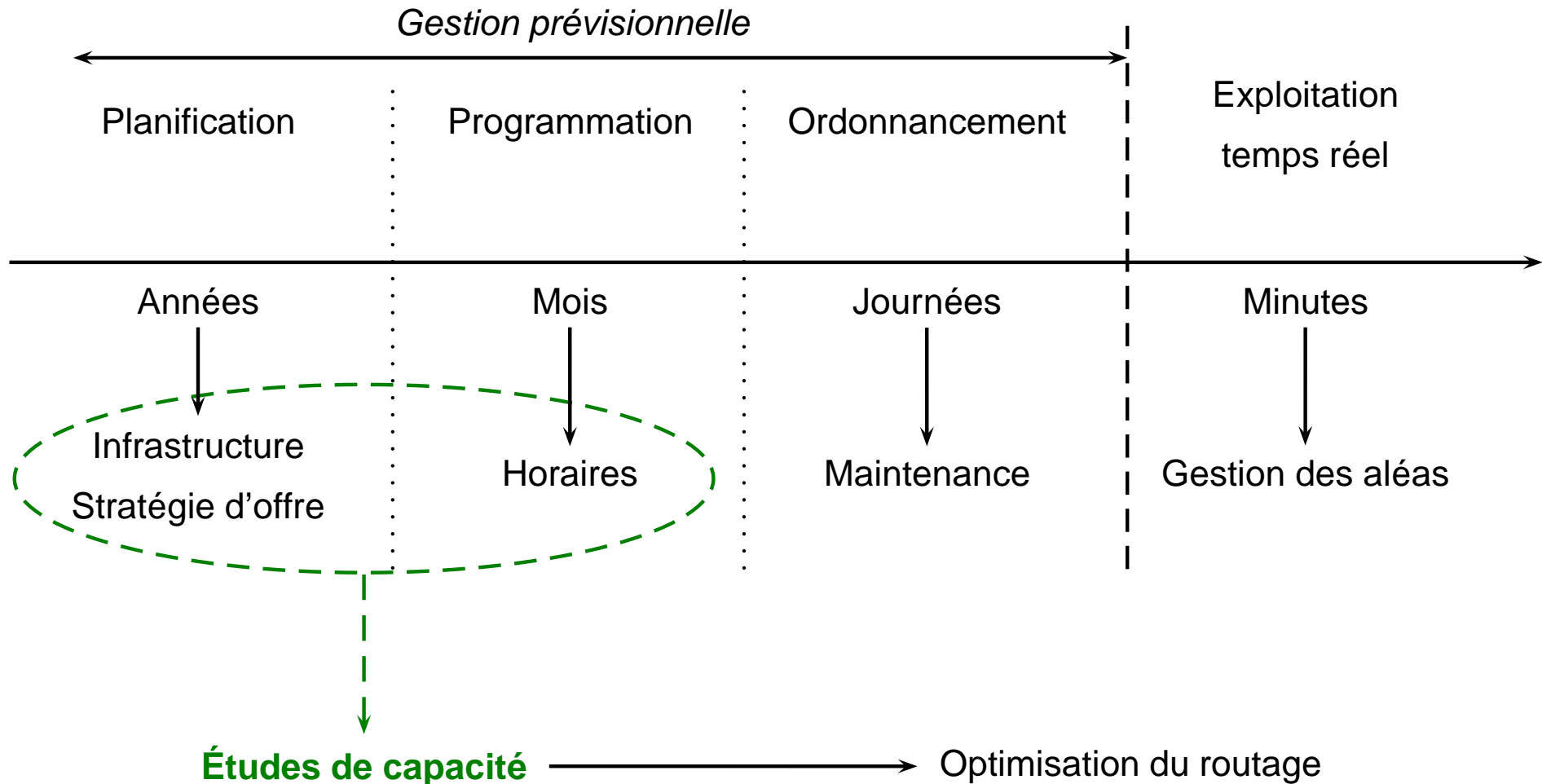
## **Transport ferroviaire**

- ❑ Renouveau d'intérêt (alternative à la route)
- ❑ Concurrence des autres modes
- ❑ Séparation gestionnaire / opérateur(s)

⇒ Accroissement et évolution du trafic

**Comment gérer l'exploitation ?**

# Problème étudié : positionnement

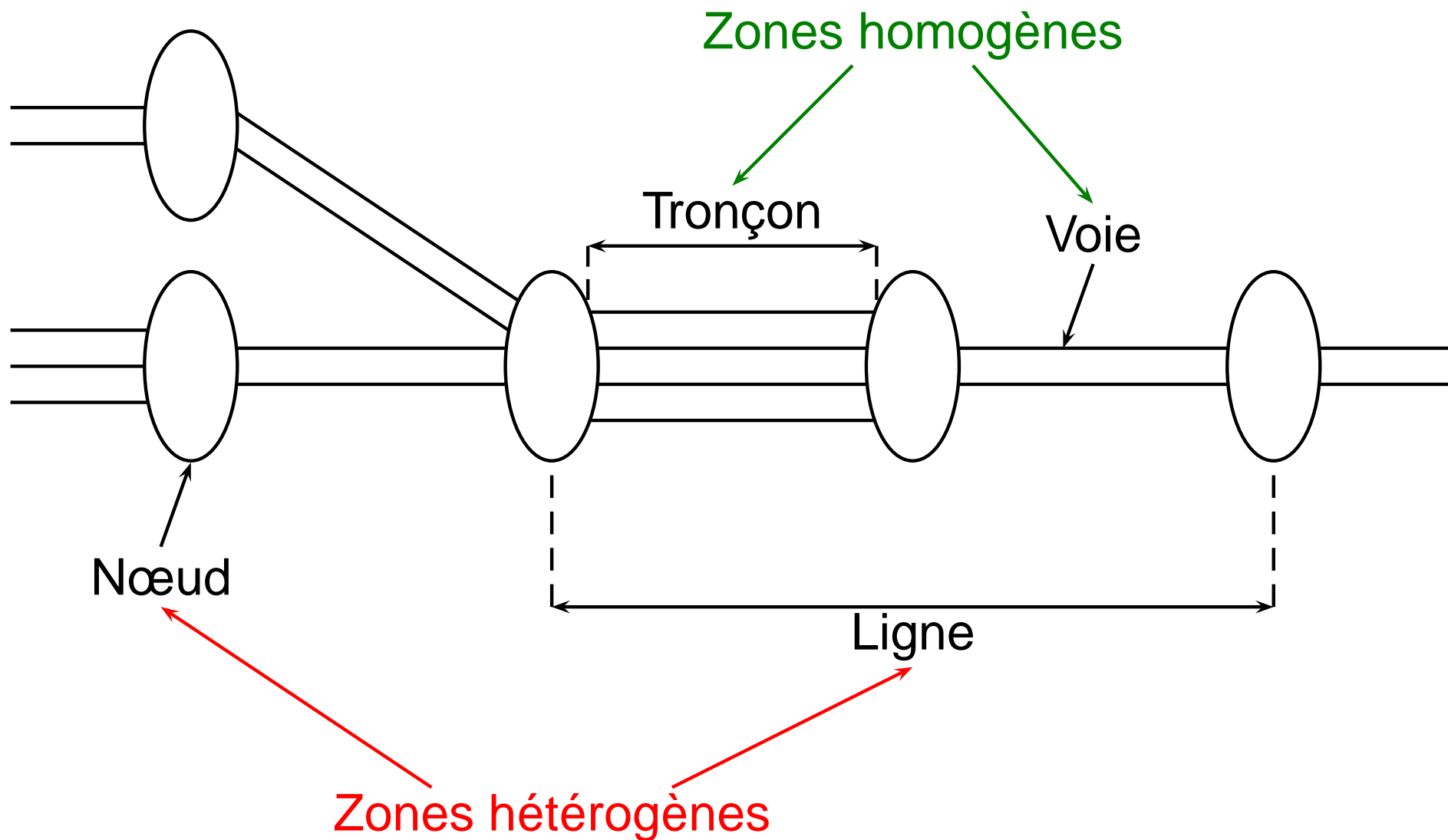


# Problème étudié : définitions

Données :	Infrastructure	Matériel roulant
	Normes de sécurité	Qualité de service
	Grille horaire	Liste(s) saturante(s)

- ❑ **Faisabilité** : Routage d'un ensemble de trains d'une grille horaire
- ❑ **Saturation** : Routage d'un maximum de trains d'une liste saturante
- ❑ **Préférences** : Routage maximisant une somme de préférences pré-définies
- ❑ **Stabilité horaire** : Minimisation des retards générés par le retard d'un train

# Problème étudié : infrastructure



# ***Problème étudié : types de méthodes***

---

## **Comment évaluer la capacité ?**

---

- ❑ **Analytiques** : Temps minimums de succession  
⇒ hypothèses trop réductrices pour une zone hétérogène
- ❑ **Probabilistes** : Répartition des trains  
⇒ hypothèses trop contraignantes
- ❑ **Simulation** : Évaluation de visu  
⇒ volume d'informations important, pas d'évaluation de la capacité
- ❑ **Construction d'horaire** : Saturation d'une grille horaire  
⇒ volume d'informations important ou pas de gestion des conflits

# ***Problème étudié : types de méthodes***

---

## **Comment évaluer la capacité ?**

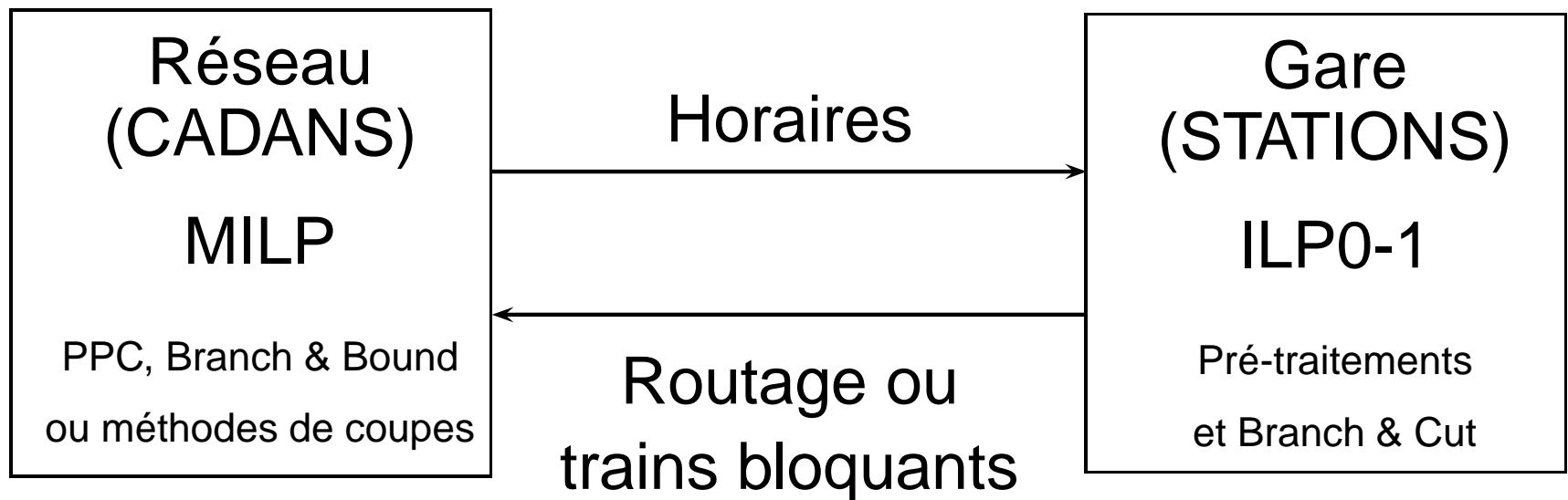
---

- ❑ **Analytiques** : Temps minimums de succession  
⇒ hypothèses trop réductrices pour une zone hétérogène
- ❑ **Probabilistes** : Répartition des trains  
⇒ hypothèses trop contraignantes
- ❑ **Simulation** : Évaluation de visu  
⇒ volume d'informations important, pas d'évaluation de la capacité
- ❑ **Construction d'horaire** : Saturation d'une grille horaire  
⇒ volume d'informations important ou pas de gestion des conflits  
⇒ méthodes algorithmiques

# Problème étudié : DONS

**DONS** : NS (Hollande) [Zwaneveld et al., 1996, 1997, 2001]

Faisabilité ou optimisation des préférences



**Hypothèse : Temps de parcours égaux dans une gare**

# ***Problème étudié : CAPRES***

**CAPRES** : CFF (Suisse) [Hachemane, 1997]  
⇒ logiciel commercial

Faisabilité puis saturation



- ❑ Obtention d'un ordonnancement, pas d'un horaire
- ❑ Nécessité d'une liste saturante ordonnée

# ***Problème étudié : DÉMIURGE***

**DÉMIURGE** : SNCF (France) [Labouisse et Djellab, 2002]

Faisabilité, saturation ou fluidification

Réseau, lignes

MILP

Pré-traitements, coupes  
et Branch & Cut (Cplex)

- ❑ Objectif : remplacer CAPRES
- ❑ Encore à l'état de prototype

# ***Problème étudié : limites***

---

## **Limites des méthodes existantes**

- ❑ Problèmes non traités
- ❑ Quasiment pas d'approche multiobjectif
- ❑ Stabilité non considérée
- ❑ Types d'infrastructures différents

**Proposition d'un nouveau modèle pour les nœuds**

⇒ Complément de CAPRES ou DÉMIURGE

- ❑ Présentation du problème étudié
- ❑ **Modélisation proposée**
- ❑ Résolution du problème de set packing
- ❑ Expérimentations et résultats
- ❑ Intégration au projet RECIFE
- ❑ Conclusion et perspectives

# Modélisation : hypothèses

## Cadre d'hypothèses

- ❑ Séparation des trains initiaux et saturants
- ❑ Parcours pré-définis et indépendants
- ❑ Horaires et retards possibles pré-définis

⇒ Variables binaires :

$$x_{t,r,\delta} = \begin{cases} 1 & \text{si le train } t \text{ est affecté au parcours } r \text{ en voie libre} \\ & \text{avec un décallage } \delta \text{ sur l'horaire de référence} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

# Modélisation : principes

## ❑ Objectifs :

- Faisabilité
  - Saturation
  - Préférences
- } ⇒ Maximisation d'une somme de  $x_{t,r,\delta}$

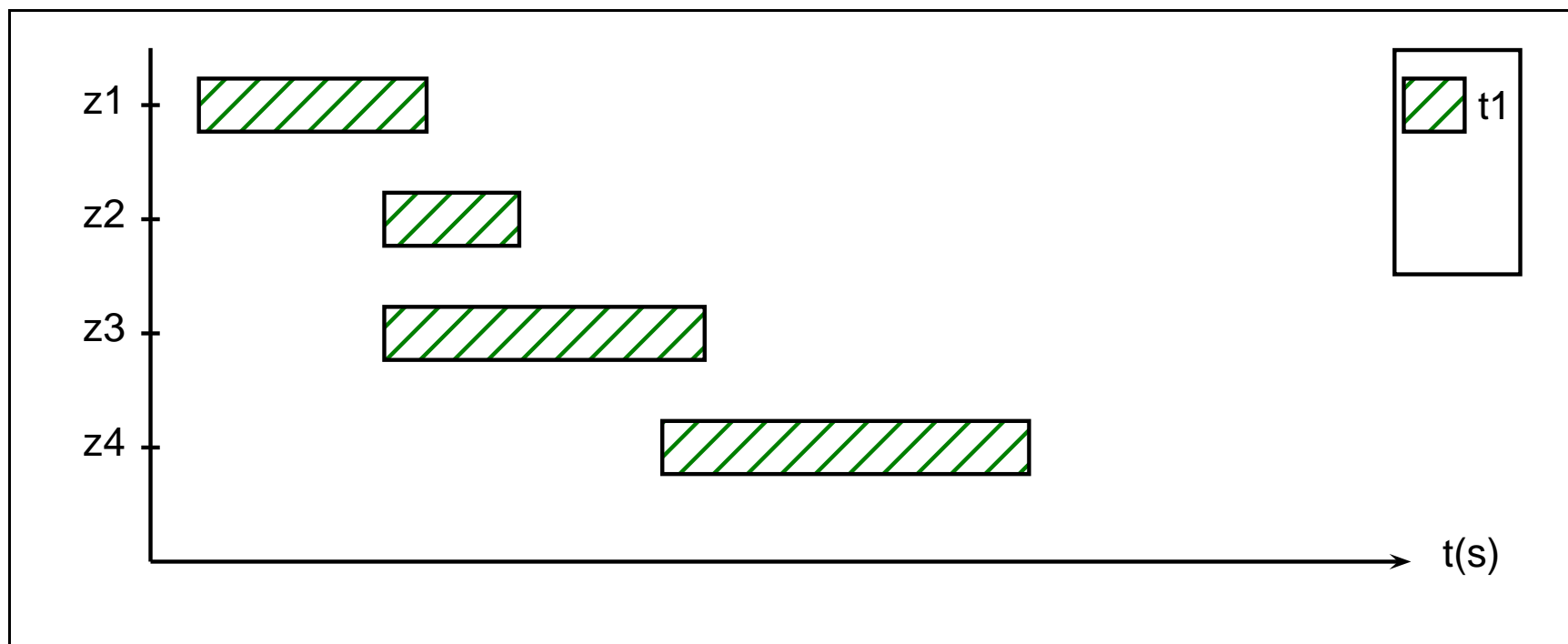
## ❑ Contraintes :

variables représentant un même train

- 1 seul parcours par train ⇒ **Groupes** de variables incompatibles
  - Pas de parcours en conflit
  - Pas de parcours incohérents
- } ⇒ **Couples** de variables  
? incompatibles

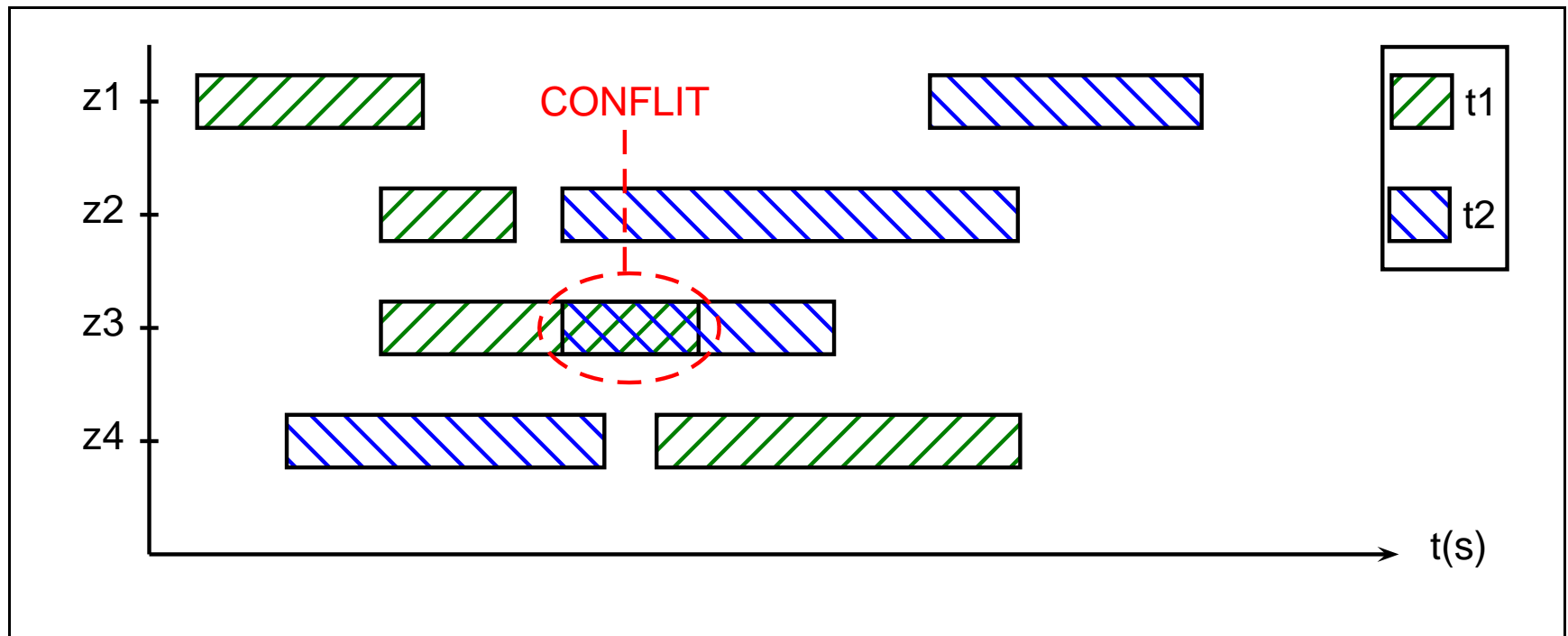
# Modélisation : utilisation des zones

- ❑ Empêcher les collisions
- ❑ Niveau de détail = zones de détection



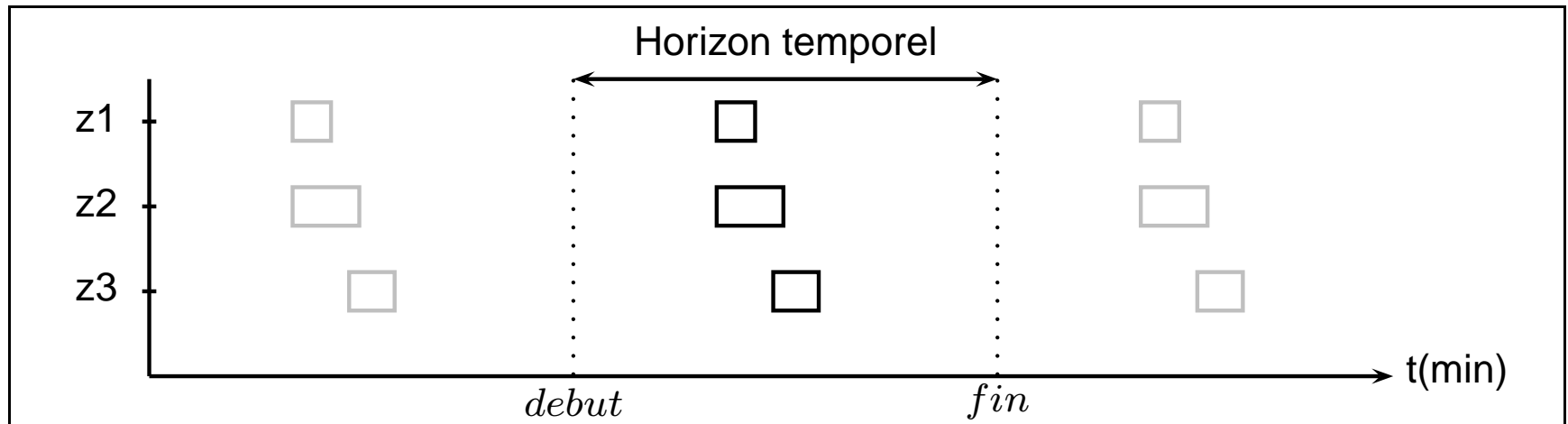
# Modélisation : utilisation des zones

- ❑ Empêcher les collisions
- ❑ Niveau de détail = zones de détection

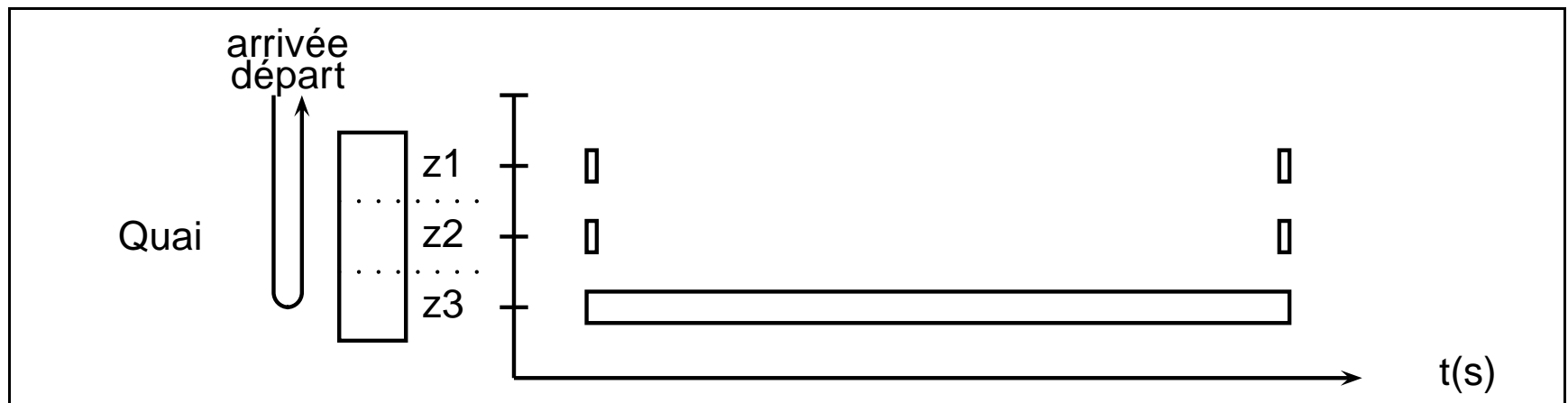


# Modélisation : cas particuliers

## ❑ Cadencement

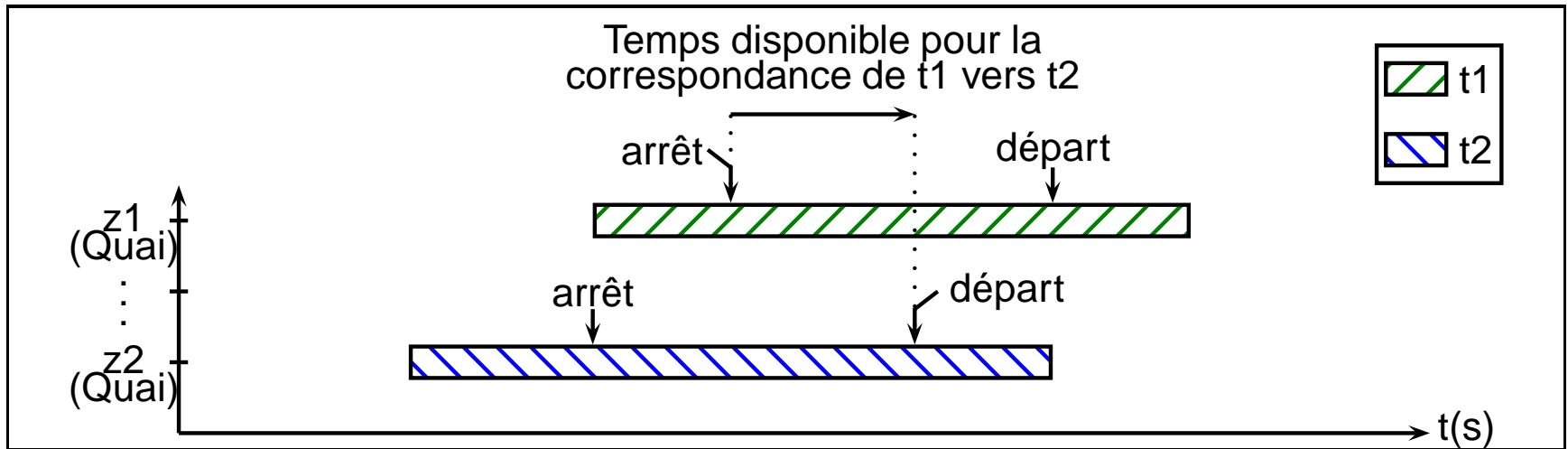


## ❑ Quais accueillant plusieurs trains (zones fictives)

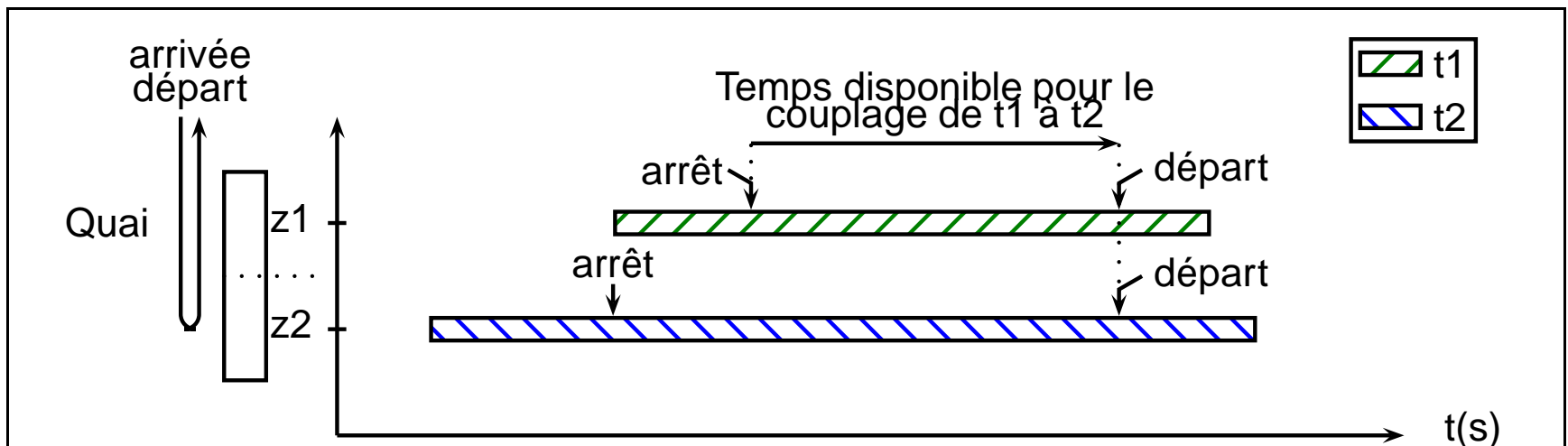


# Modélisation : horaires liés

## ❑ Correspondances



## ❑ Couplages / Découplages



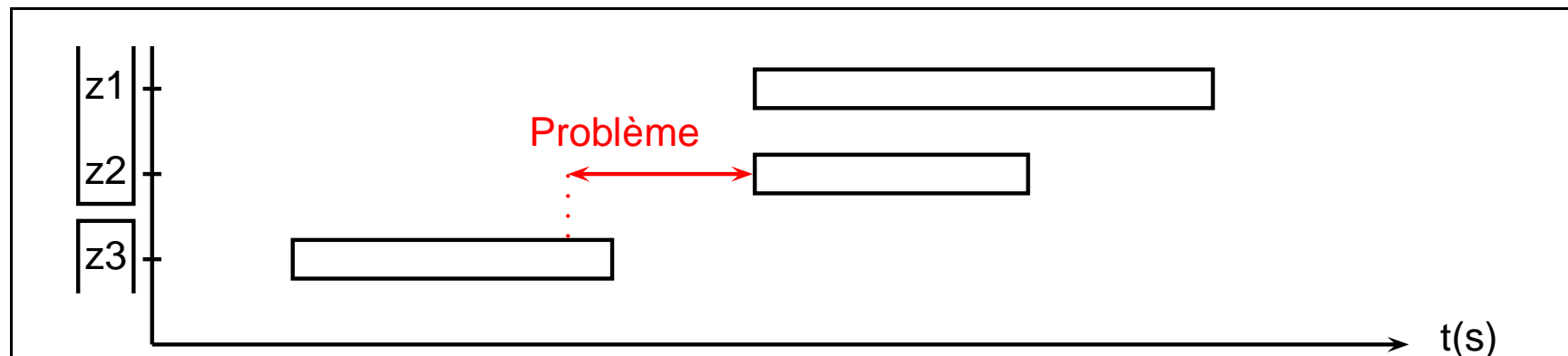
# Modélisation : partitionnement

## Possibilité de partitionner les parcours

- ❑ Compatibilité physique



- ❑ Concordance temporelle



- ❑ Complétude des parcours

# Modélisation : formulation

$$\text{lex}(\max z_{Fais}, \\ \max z_{Sat}^q, \forall \text{ types de trains } q | \max z_{Pref})$$

SC

$$\sum_{\text{parcours } r, \text{ retard } \delta} x_{t,r,\delta} \leq 1, \forall \text{ train } t$$

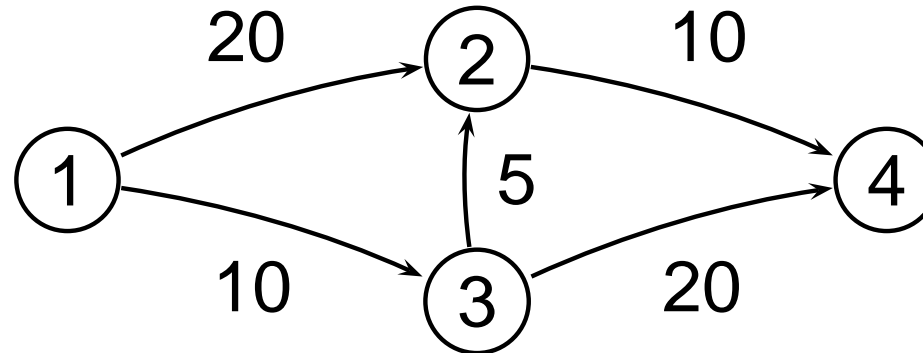
$$x_{t,r,\delta} + x_{t',r',\delta'} \leq 1, \forall (t, r, \delta), (t', r', \delta') \text{ incompatibles}$$

$$x_{t,r,\delta} \in \{0, 1\}, \forall \text{ train } t, \text{ parcours } r, \text{ retard } \delta$$

Set Packing Problem

# Modélisation : retards

## Retard d'un train : calcul des retards générés



Retard de 20 s du train 1  $\Rightarrow$  Retard du train 3 : 10 s  
 $\Rightarrow$  Retard du train 2 : 5 s  
 $\Rightarrow$  Retard du train 4 : 0 s  

---

 $\Rightarrow$  Retard total généré : 15 s

---

Retard de 20 s du train 2  $\Rightarrow$  Retard total généré : 10 s

---

Retard de 20 s du train 3  $\Rightarrow$  Retard total généré : 20 s

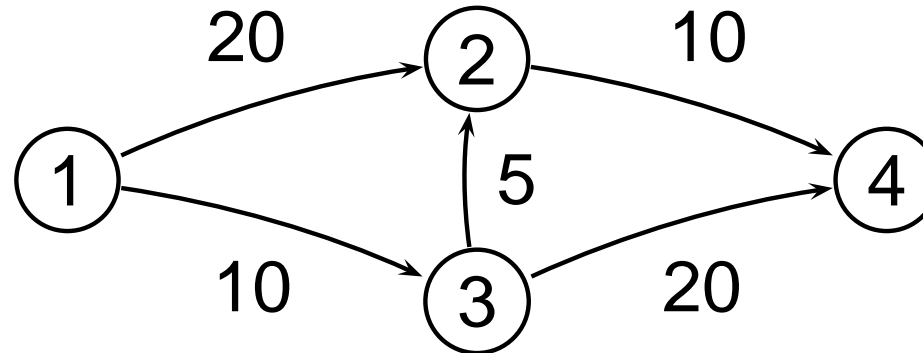
---

Retard de 20 s du train 4  $\Rightarrow$  Retard total généré : 0 s

**Cumul des retards générés pour un retard de 20 s : 45 s**

# Modélisation : retards

## Retard d'un train : calcul des retards générés



Retard de 20 s du train 1  $\Rightarrow$  Retard du train 3 : 10 s  
 $\Rightarrow$  Retard du train 2 : 5 s  
 $\Rightarrow$  Retard du train 4 : 0 s  

---

 $\Rightarrow$  Retard total généré : 15 s

Retard de 20 s du train 2  $\Rightarrow$  Retard total généré : 10 s

Retard de 20 s du train 3  $\Rightarrow$  Retard total généré : 20 s

Retard de 20 s du train 4  $\Rightarrow$  Retard total généré : 0 s

Cumul des retards générés pour un retard de 20 s : **45 s**

Évaluation de  
la stabilité

# Modélisation : évaluation de la stabilité

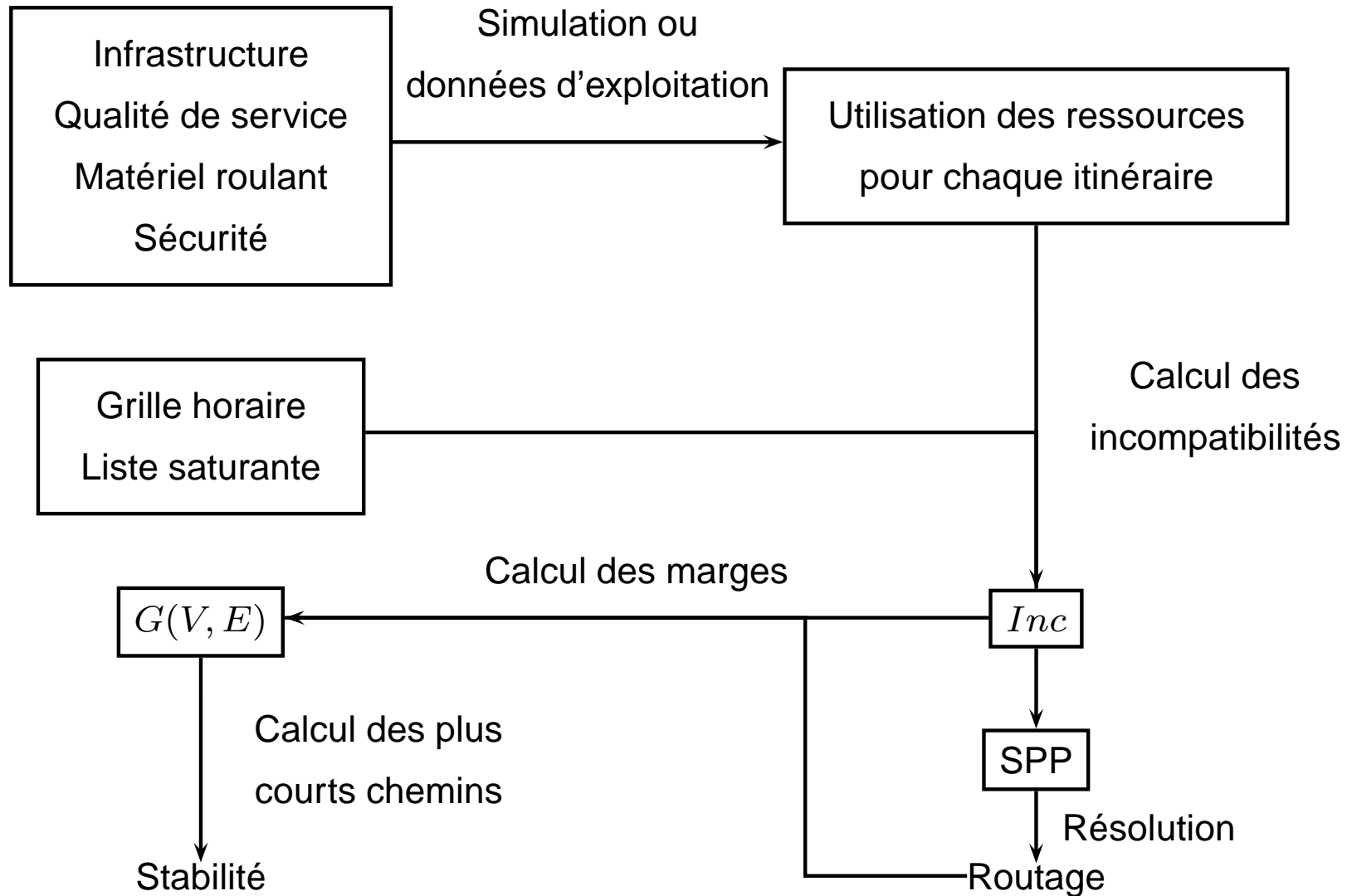
## Évaluation de la stabilité d'un routage

- ❑ Hypothèse : Conservation des parcours et de l'ordre des trains
- ❑ Graphe orienté  $G(V, E)$ ,  
 $V = \{\text{Variables sélectionnées dans le routage}\}$ ,  
 $E = \{\text{Couples de variables tels qu'un retard de la 1<sup>ère</sup> les rend incompatibles}\}$
- ❑ Valuation de l'arc (marge) =  
retard minimum tel que le couple de variables devient incompatible
- ❑ Retard généré par  $x_{t,r,\delta}$  sur  $x_{t',r',\delta'}$  =  
 $\max(0, \text{Retard de } x_{t,r,\delta} - \text{plus court chemin entre } x_{t,r,\delta} \text{ et } x_{t',r',\delta'})$
- ❑ Évaluation de la stabilité :

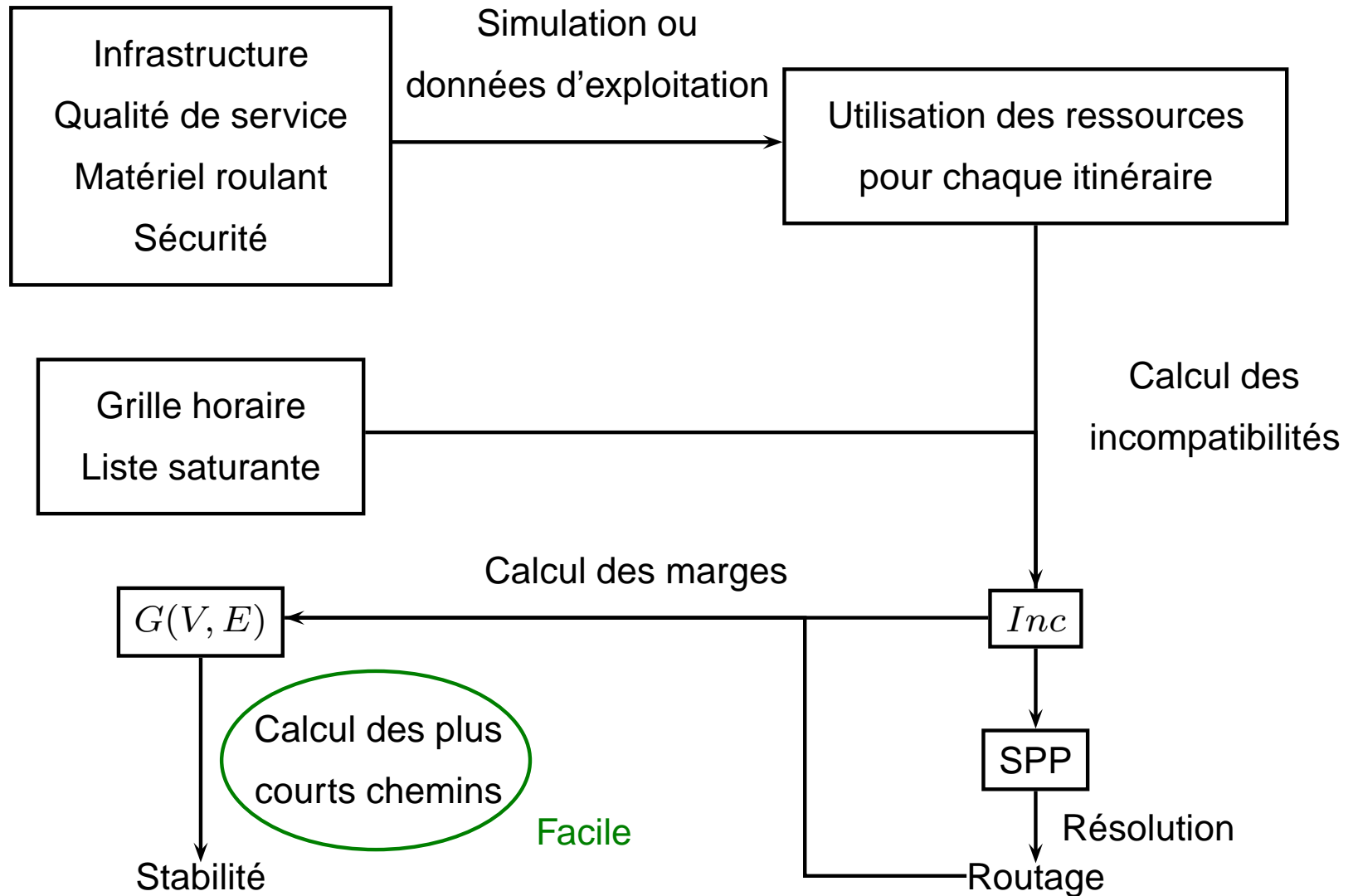
$$\sum_{\text{train } t, \text{ parcours } r, \text{ retard } \delta} (\text{Retards générés sur tous les autres trains})$$

- ❑ Présentation du problème étudié
- ❑ Modélisation proposée
- ❑ **Résolution du problème de set packing**
- ❑ Expérimentations et résultats
- ❑ Intégration au projet RECIFE
- ❑ Conclusion et perspectives

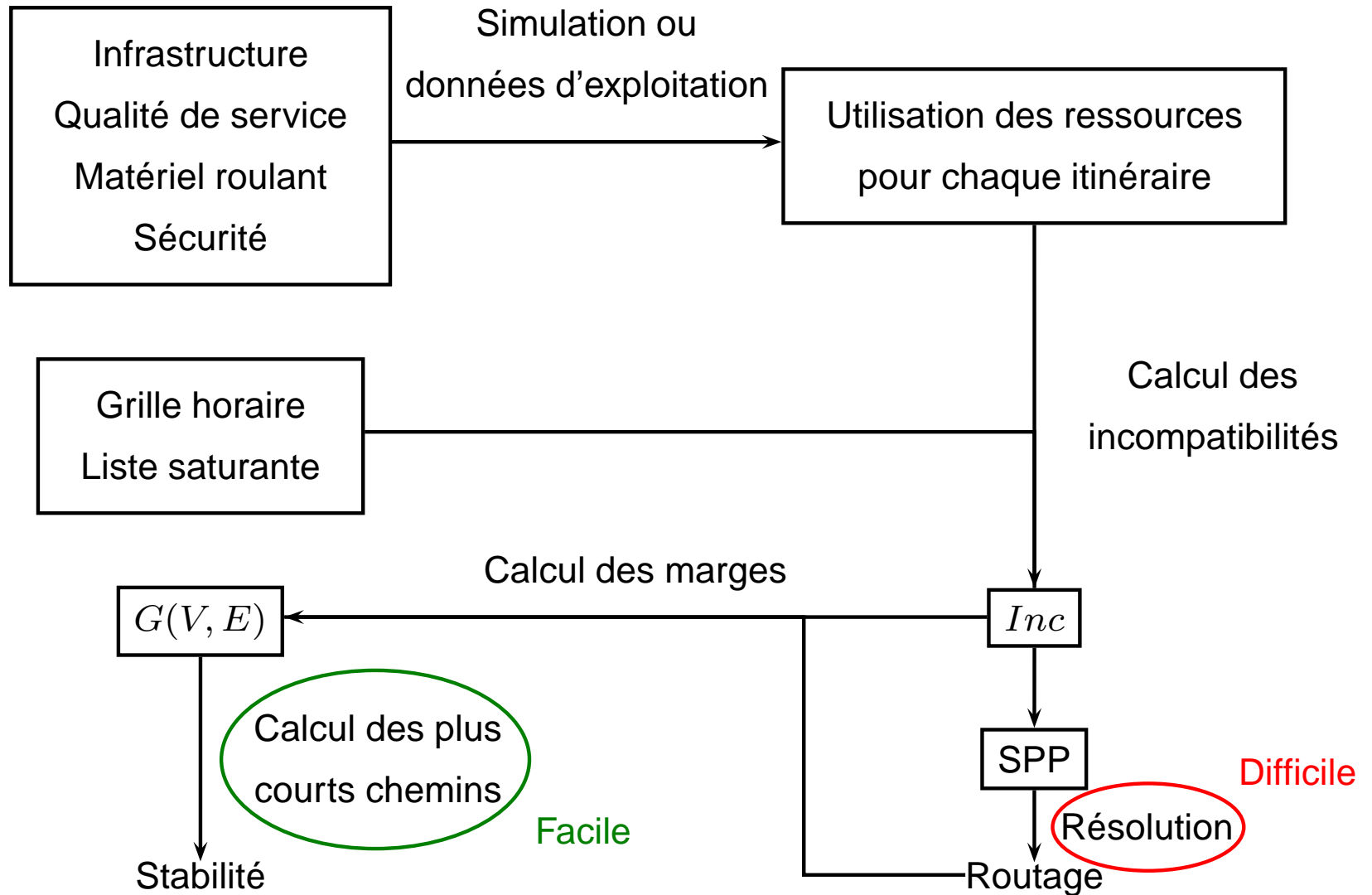
# Résolution : processus



# Résolution : processus



# Résolution : processus



# ***Résolution : set packing problem***

---

## **Résolution exacte du SPP**

- ❑ Nombreux travaux sur son étude polyédrale
- ❑ Inégalités valides  $\Rightarrow$  Méthode de Branch & Cut

MAIS problème NP-difficile

## **Résolution approchée du SPP**

- ❑ Peu d'applications réelles rapportées
- ❑ Aucune métaheuristique connue !!!

# Résolution : méthode exacte

---

## Cas mono-objectif

---

- ❑ Cliques particulières au problème ferroviaire
  - ❑ Cliques maximales uniquement (heuristique)
  - ❑ Test de dominance entre paires de variables
  - ❑ Test de dominance entre paires de contraintes
- ⇒ Solveur exact de type Branch & Cut (Cplex)

## Extension au cas biobjectif

---

- ❑ Adaptation des pré-traitements
  - ❑ Méthode de recherche dichotomique
- ⇒ Ensemble minimum complet (frontière efficace)

# Résolution : méthode approchée

## Adaptation de la métaheuristique GRASP

- ❑ Proposée par [Féo et Resende, 1989]
- ❑ Appliquée avec succès à de nombreux problèmes combinatoires
- ❑ Méthode multi-départ :

répéter

Phase gloutonne aléatoire

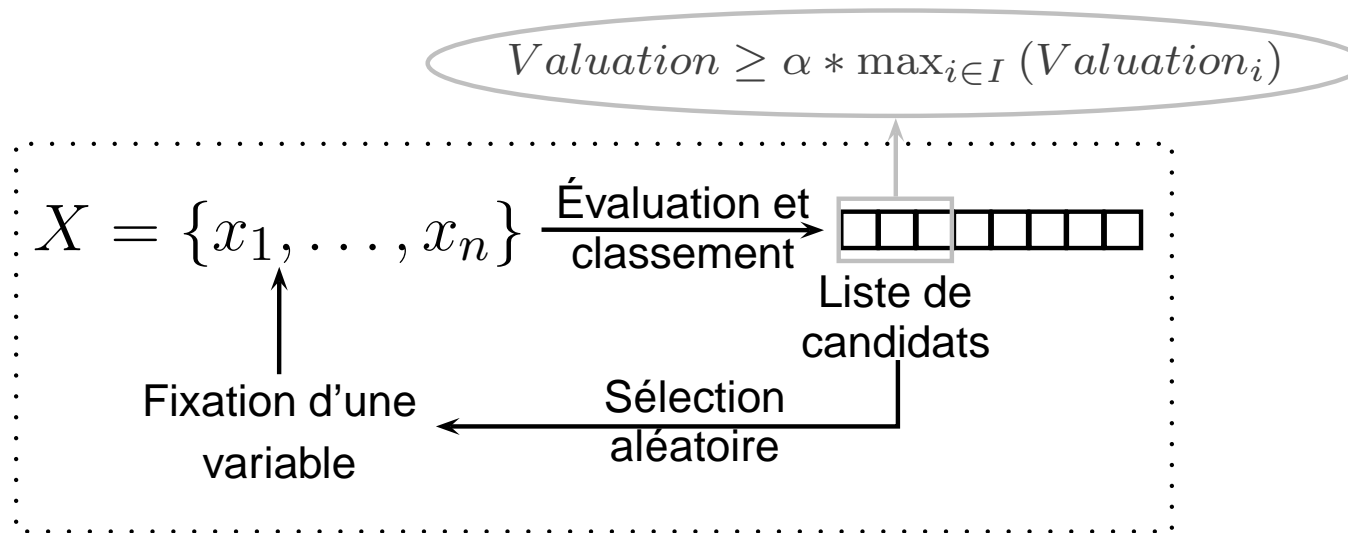
Recherche locale

[Intensification]

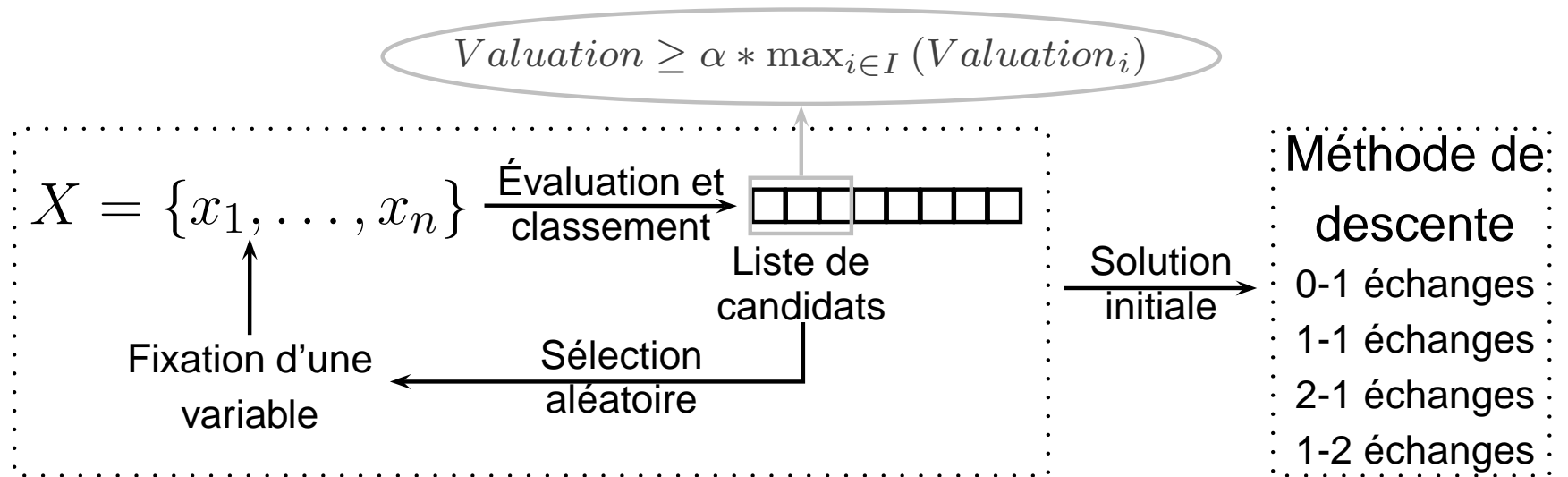
jusqu'à critère d'arrêt

[Post-optimisation]

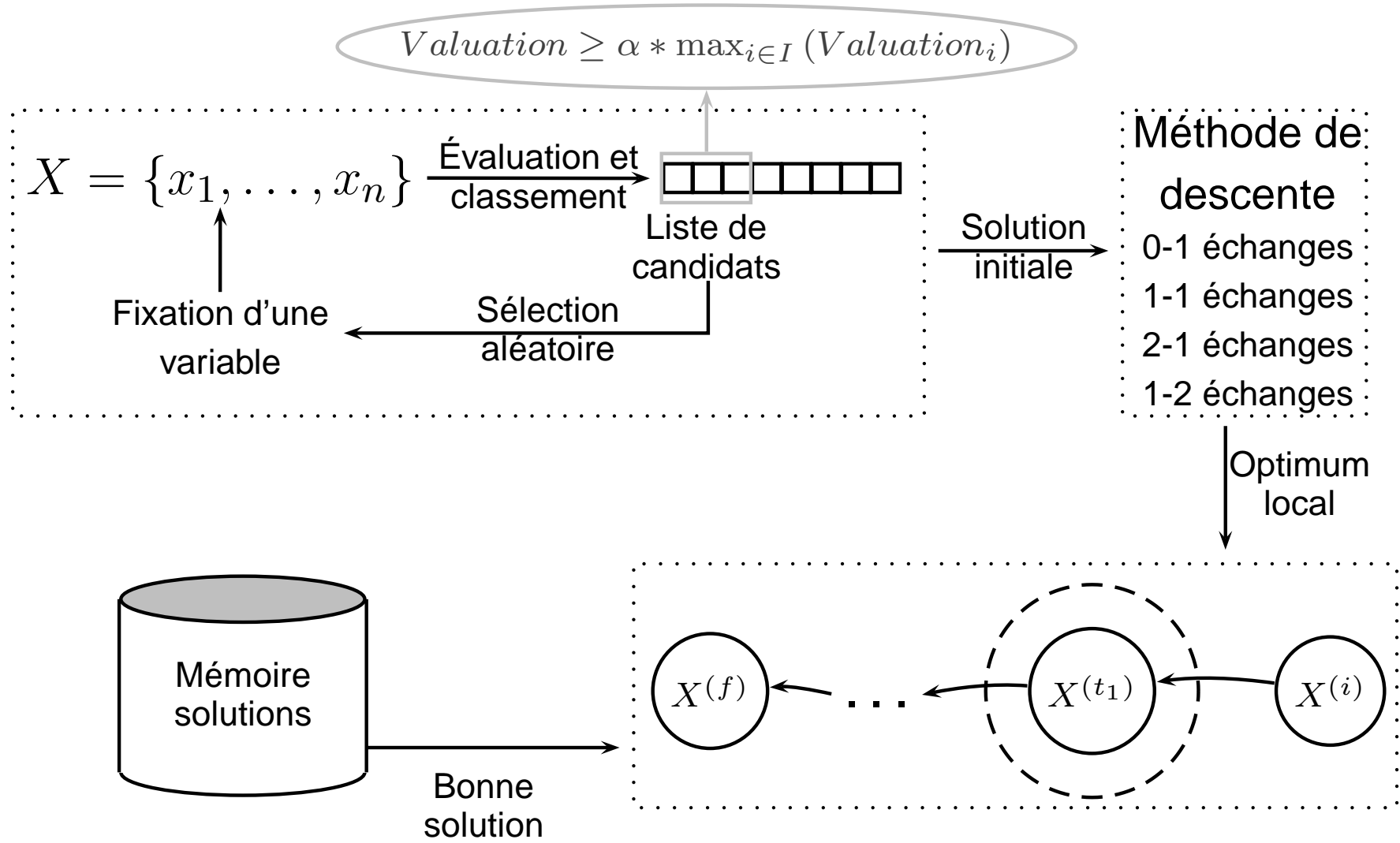
# Résolution : GRASP pour le SPP



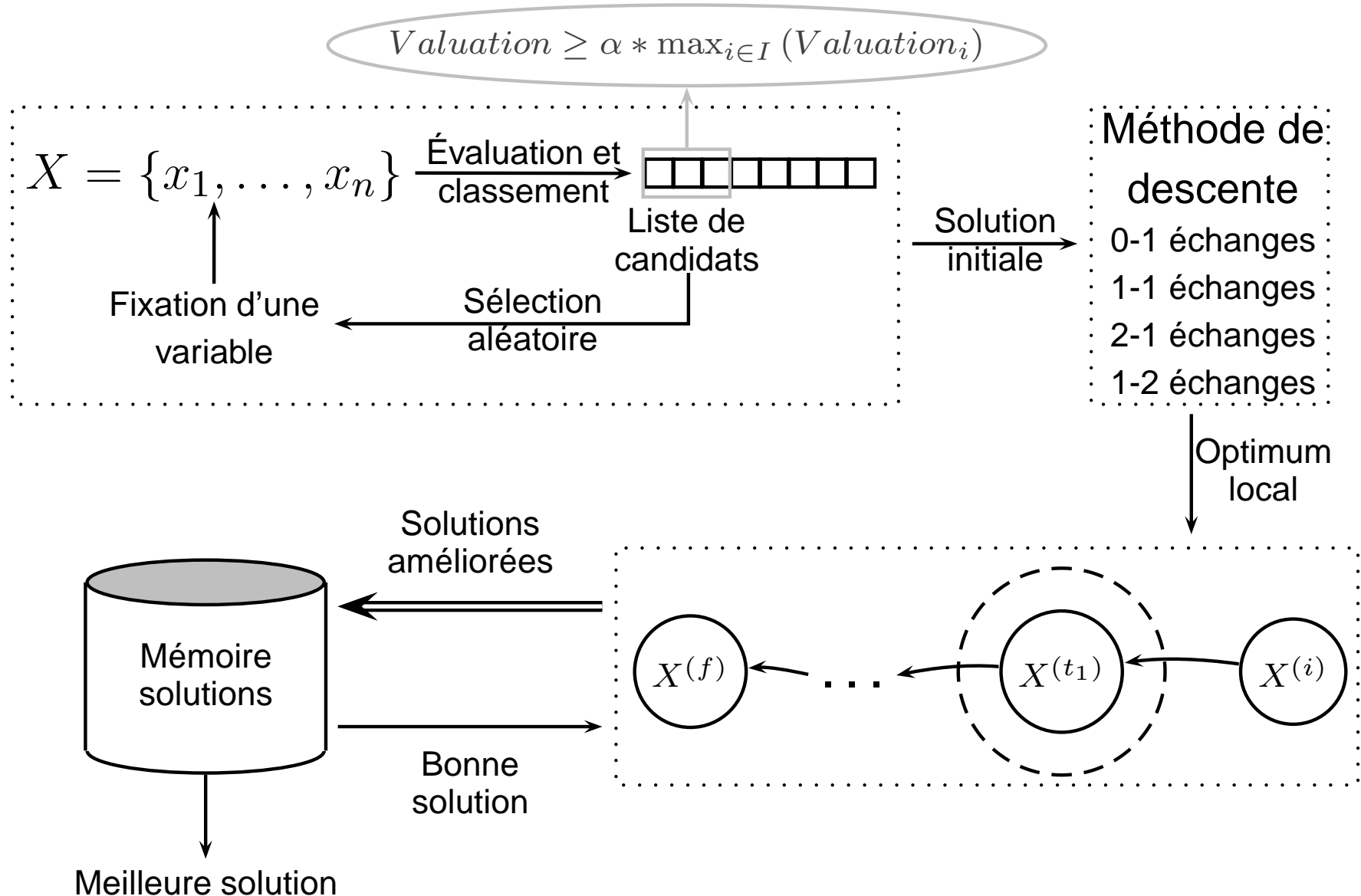
# Résolution : GRASP pour le SPP



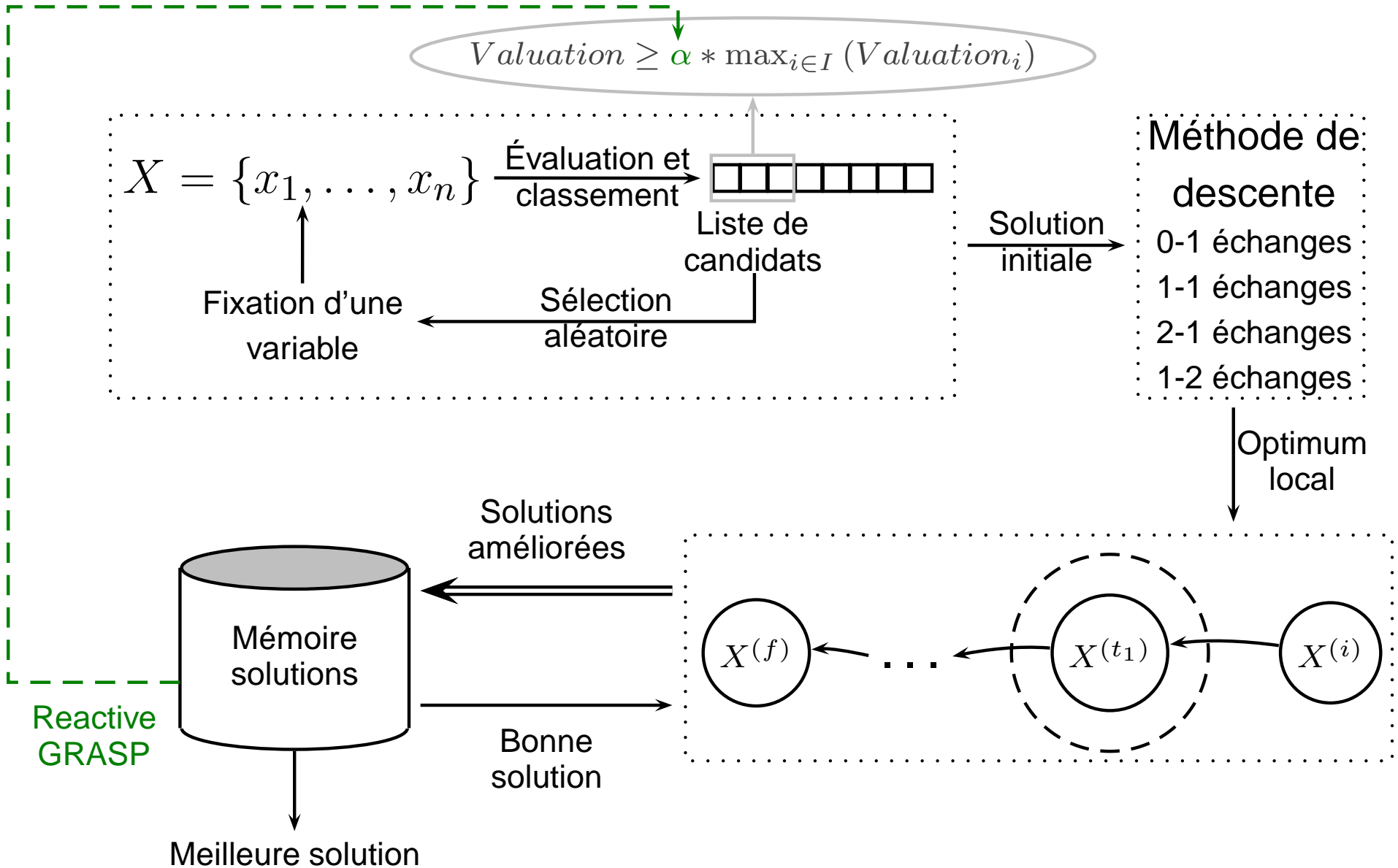
# Résolution : GRASP pour le SPP



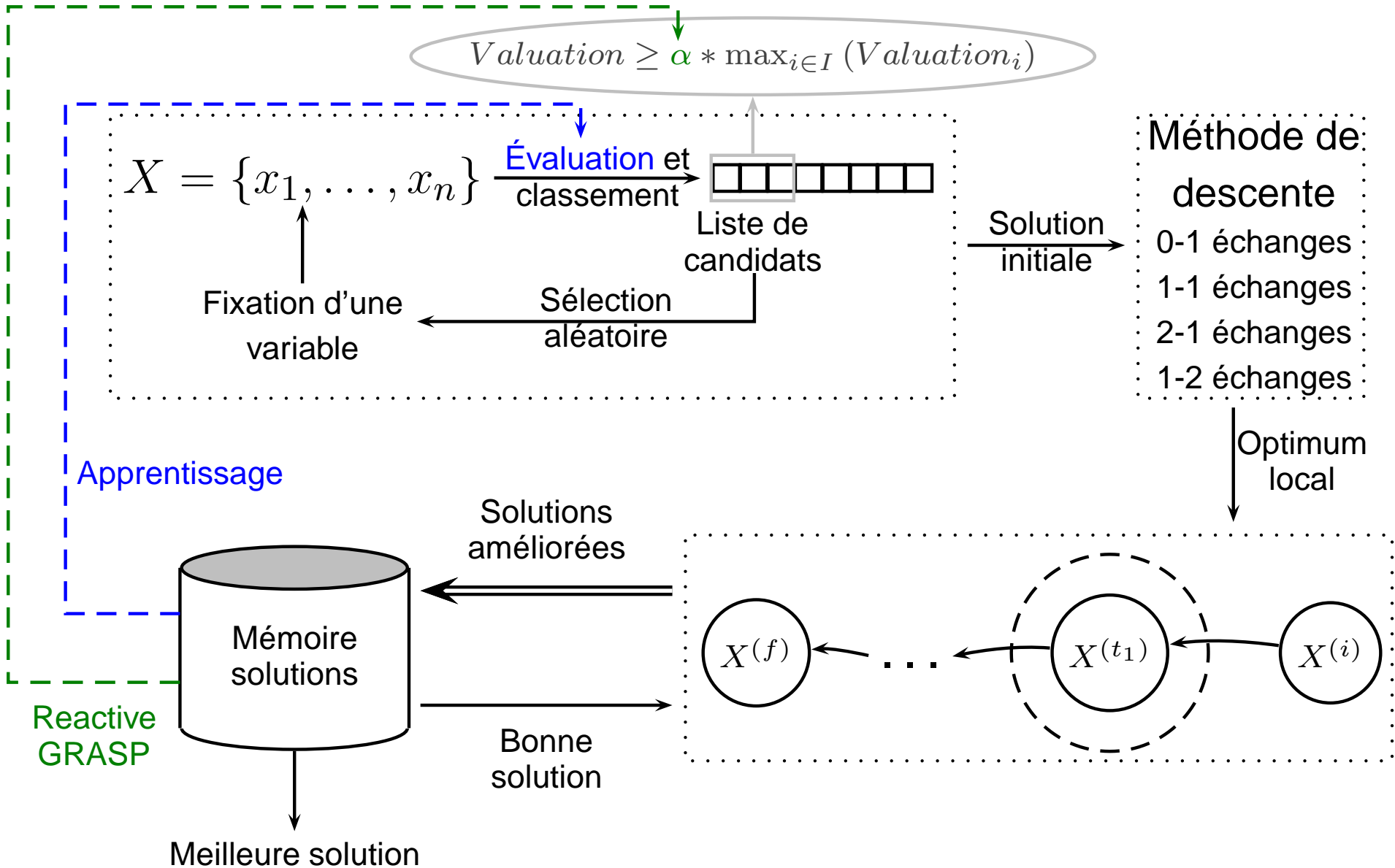
# Résolution : GRASP pour le SPP



# Résolution : GRASP pour le SPP



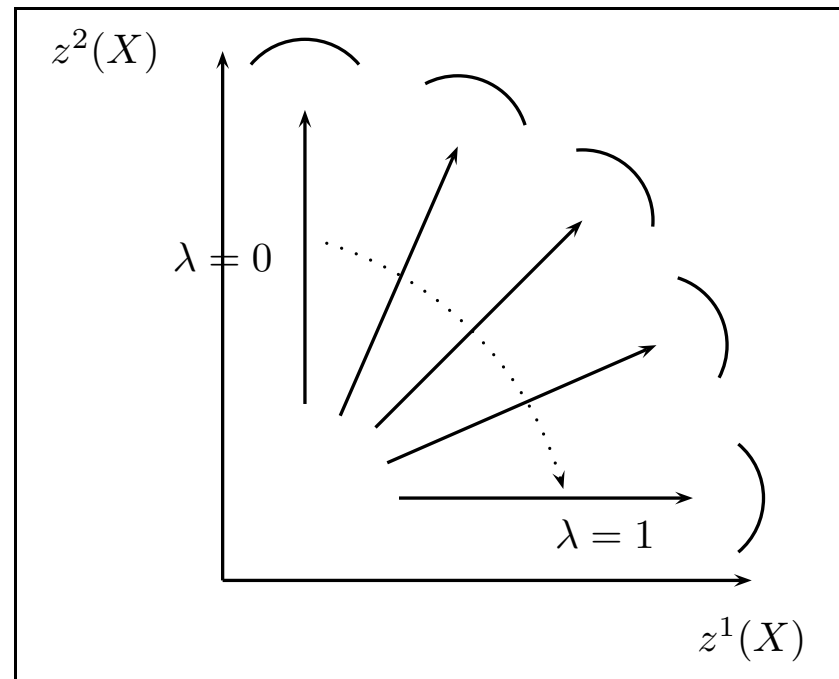
# Résolution : GRASP pour le SPP



# Résolution : extension biobjectif

## Extension de GRASP au cas biobjectif

- ❑ Approximation de la frontière efficace
- ❑ Utilisation sur 20 directions de recherche :



- ❑ Conservation de toutes les solutions potentiellement efficaces

# ***Expérimentations***

---

- ❑ Présentation du problème étudié
- ❑ Modélisation proposée
- ❑ Résolution du problème de set packing
- ❑ **Expérimentations et résultats**
- ❑ Intégration au projet RECIFE
- ❑ Conclusion et perspectives

# ***Expérimentations : instances ferroviaires***

---

## **15 instances mono-objectifs**

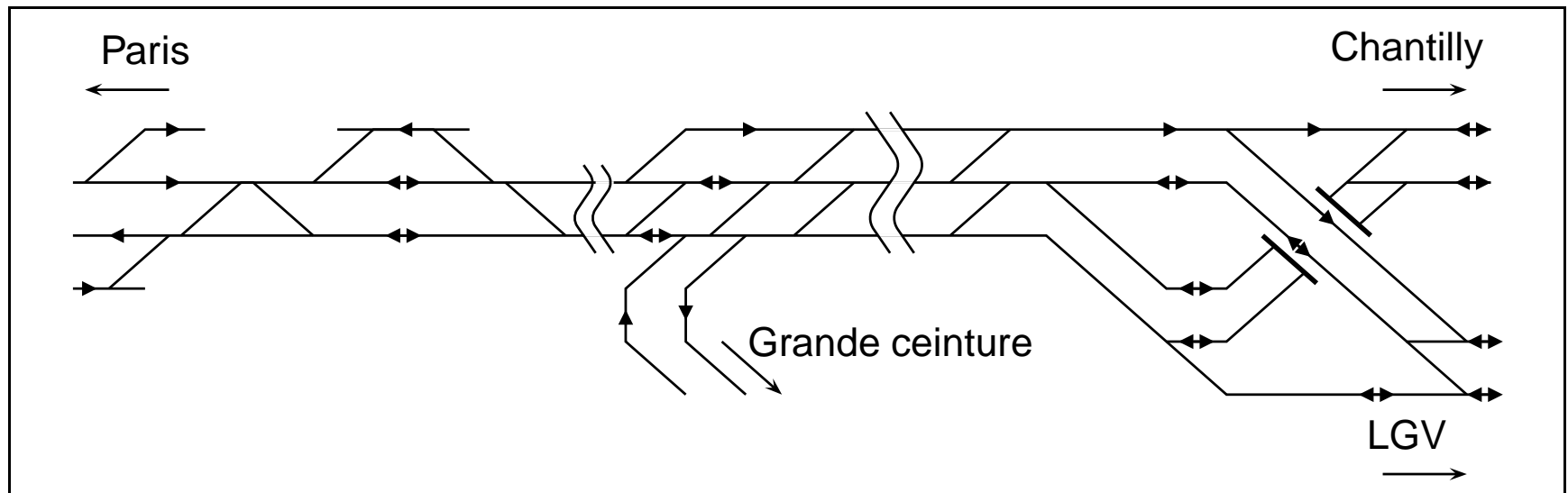
---

- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement

# Expérimentations : instances ferroviaires

## 15 instances mono-objectifs

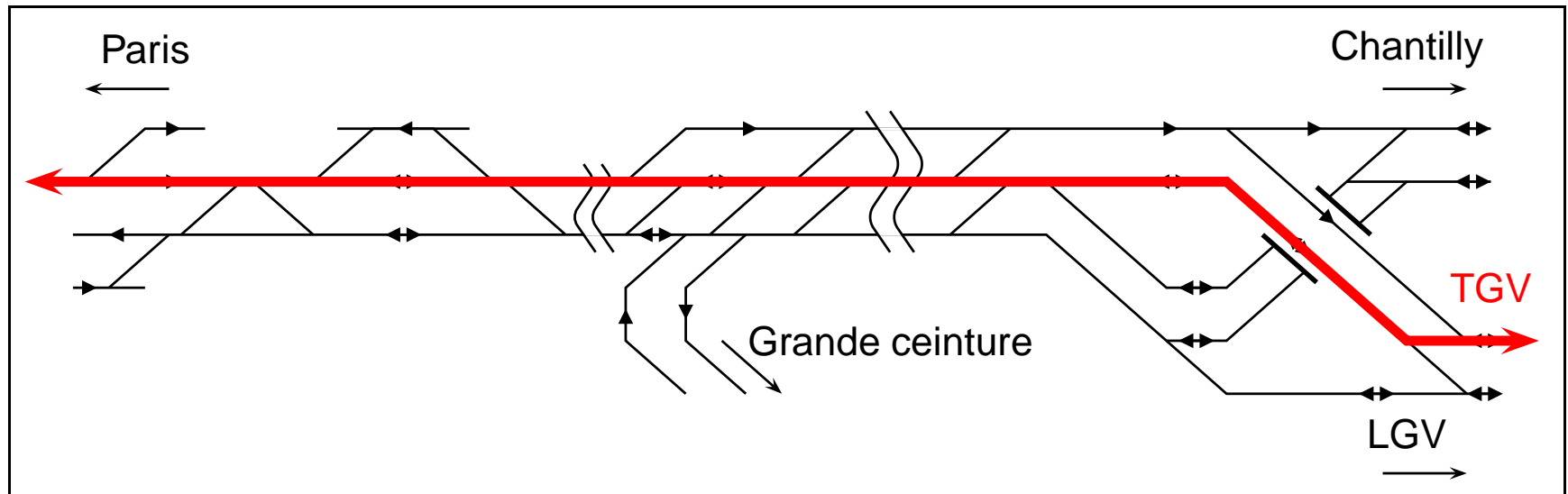
- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



# Expérimentations : instances ferroviaires

## 15 instances mono-objectifs

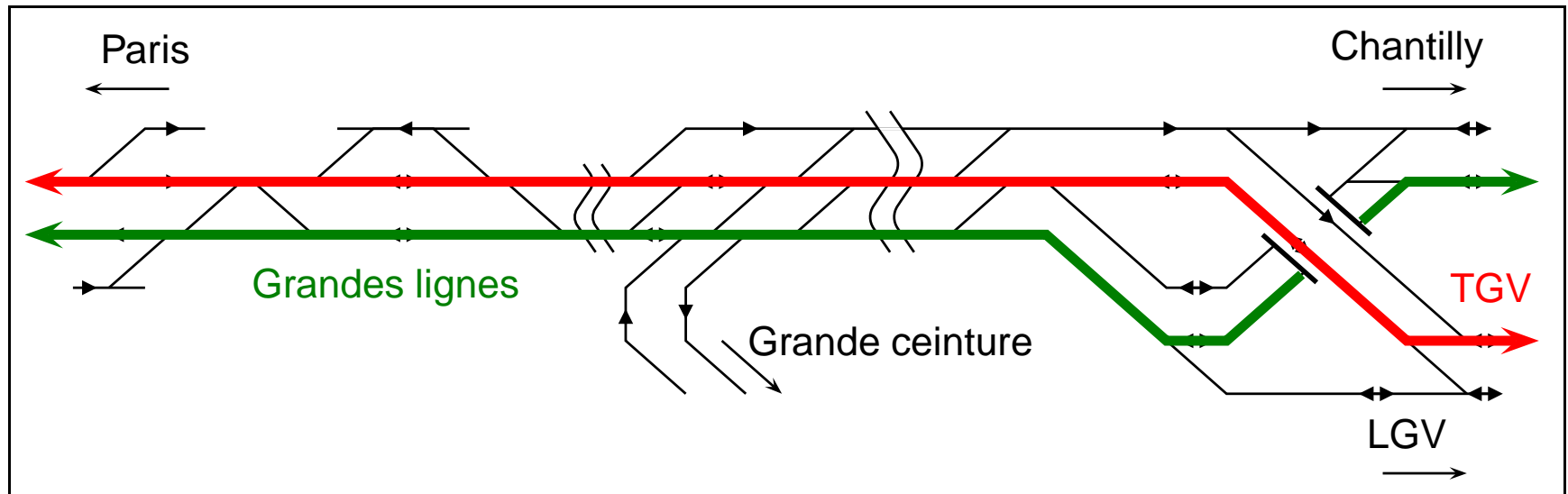
- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



# Expérimentations : instances ferroviaires

## 15 instances mono-objectifs

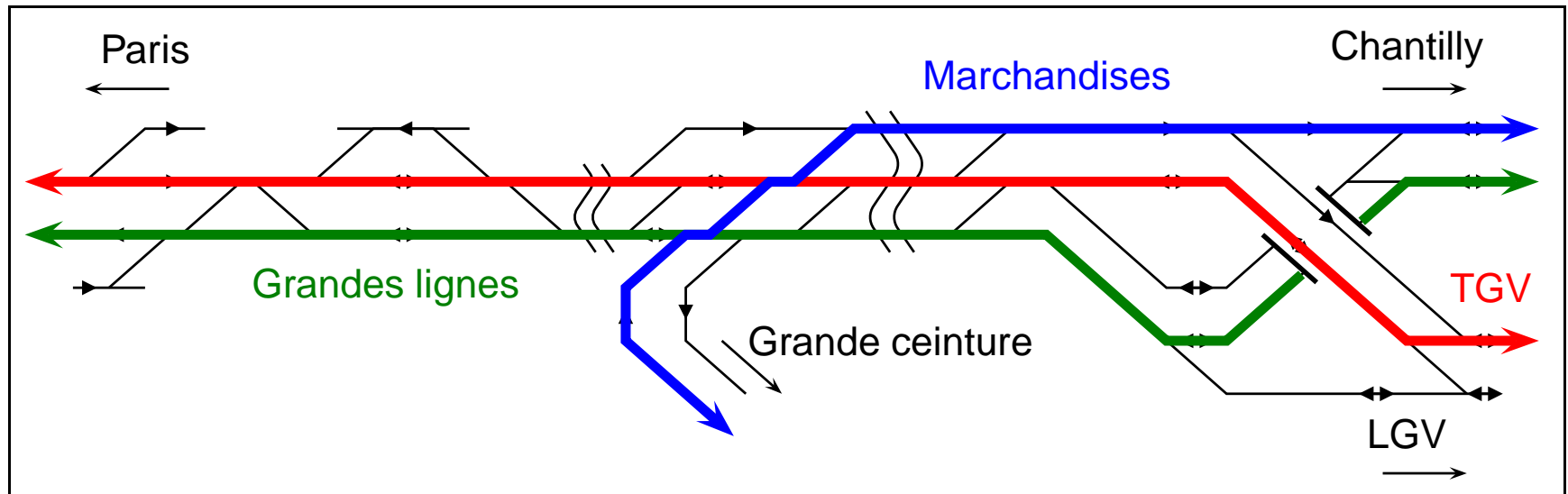
- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



# Expérimentations : instances ferroviaires

## 15 instances mono-objectifs

- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



# ***Expérimentations : instances aléatoires***

---

## **16 instances mono-objectifs**

---

- 1 000 à 2 000 variables
- 1 000 à 10 000 contraintes
- Densité entre 0,5 % et 2,6 %
- Coûts unitaires ou pondérés

⇒ <http://www3.inrets.fr/~delorme/Instances-fr.html>

## **120 instances biobjectifs**

---

- 100 à 200 variables
- 300 à 1 000 contraintes
- Densité entre 1 % et 3 %
- 6 familles de fonctions objectifs

⇒ <http://www.terry.uga.edu/mcdm/>

# Expérimentations : pré-traitements

## Impact des pré-traitements sur les instances aléatoires

- ❑ variables :  $-10\%$  (MAIS surtout 2 instances)
- ❑ contraintes :  $-3\%$
- ❑ densité :  $+1000\%$  sur 4 instances, rien sinon
  - ⇒ impact sur la relaxation linéaire limité aux 4 instances
  - ⇒ jusqu'à  $400\%$  de gap après 50 000 s !!!

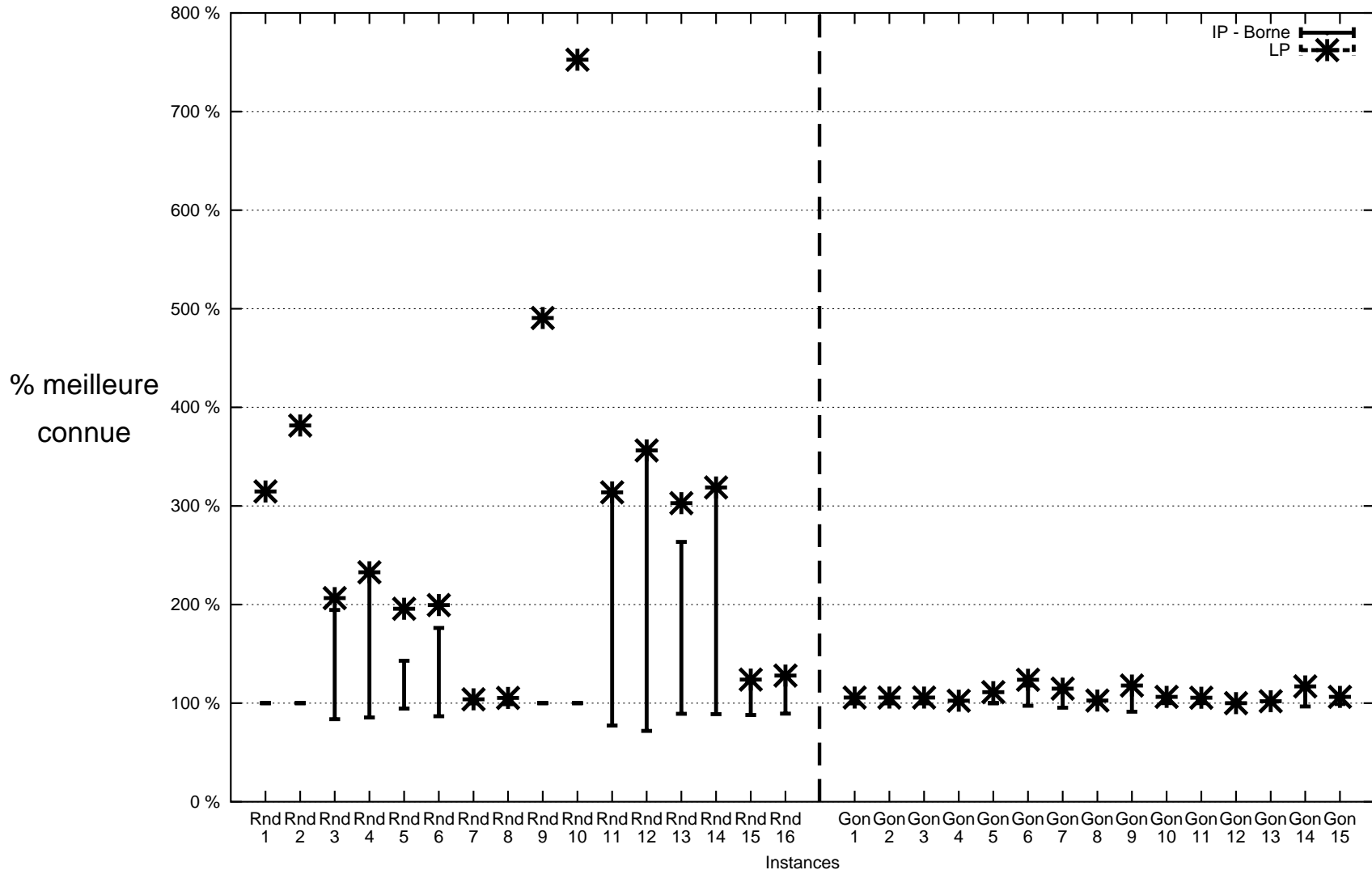
## Impact des pré-traitements sur les instances ferroviaires

- ❑ variables :  $-16\%$  (un peu moins pour les grandes)
- ❑ contraintes :  $-90\%!!!$
- ❑ densité :  $+400\%$ 
  - ⇒ impact important sur toutes les instances
  - ⇒ au plus  $25\%$  de gap après 50 000 s

Calculs de cliques très efficaces

# Expérimentations : résolution exacte

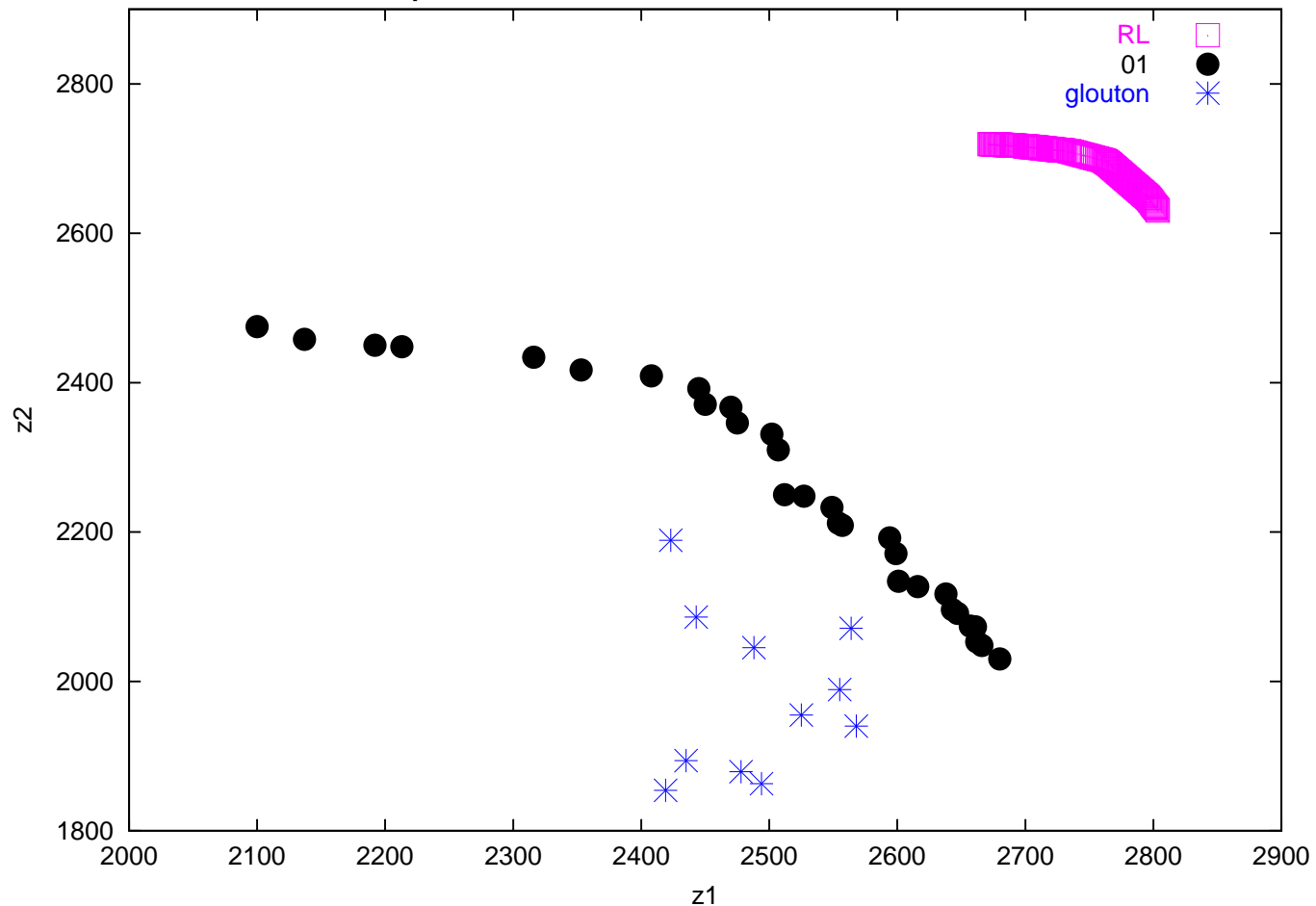
## Résolution des instances mono-objectifs



# Expérimentations : résolution exacte

## Résolution des instances biobjectifs

- ❑ Temps exorbitants (55 000 s pour les instances à 200 variables)
- ❑ Bornes de mauvaise qualité :



# ***Expérimentations : résolution exacte***

---

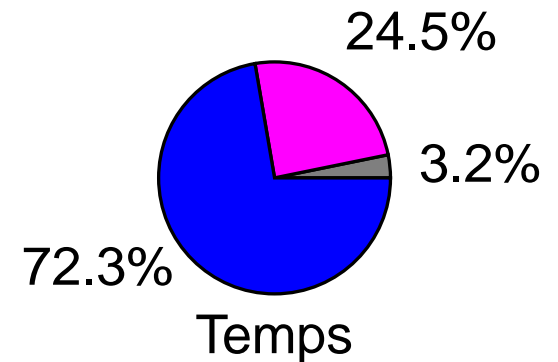
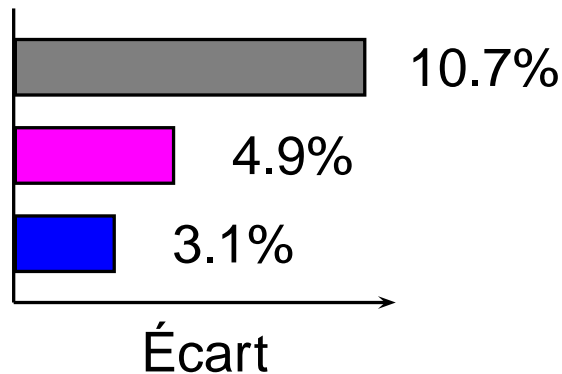
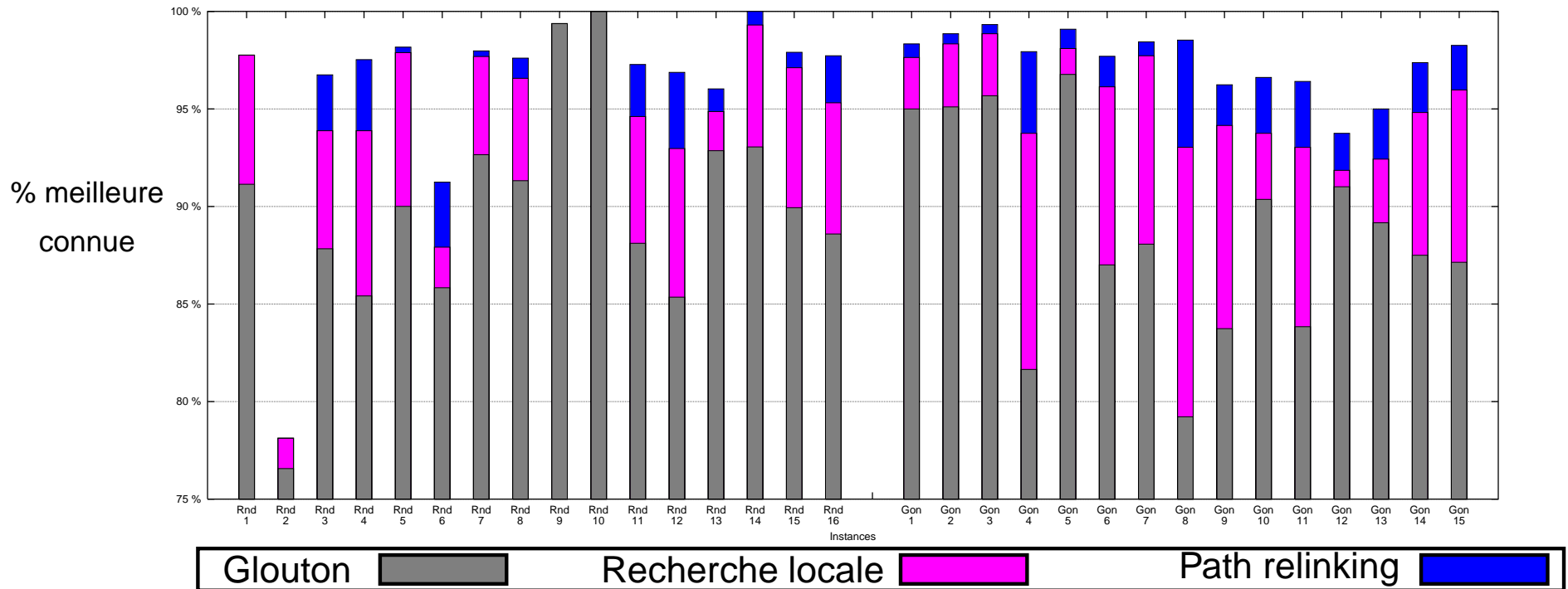
## **Bilan de la résolution exacte**

---

- ❑ Cas particuliers faciles
- ❑ Relaxation linéaire très mauvaise
- ❑ Solutions de très mauvaise qualité
- ❑ Gap très important (parfois plus de 500 %)
- ❑ Temps de réponses très importants
- ❑ Impact significatif des pré-traitements

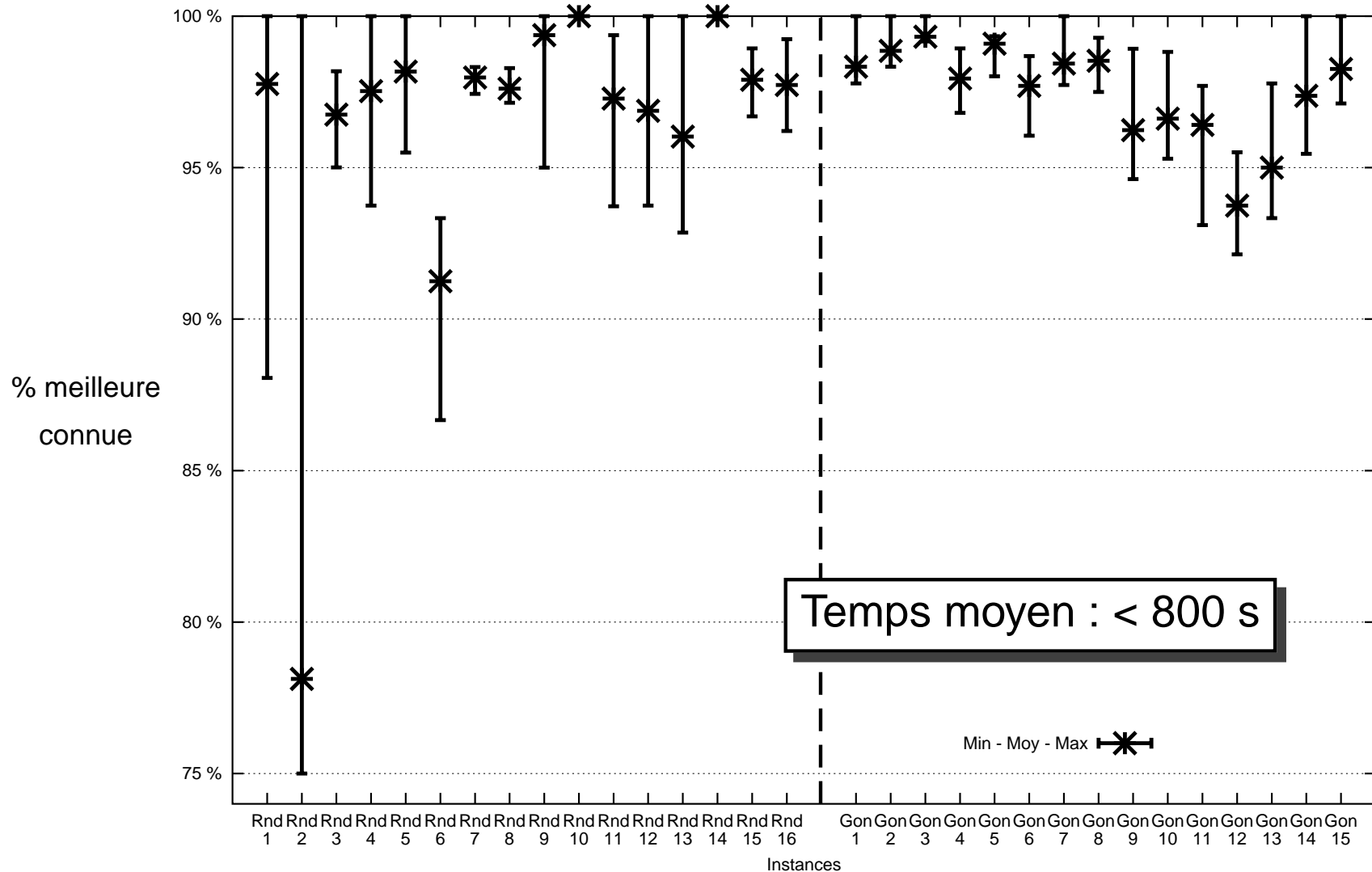
# Expérimentations : résolution approchée

## Impact de chaque phase de GRASP



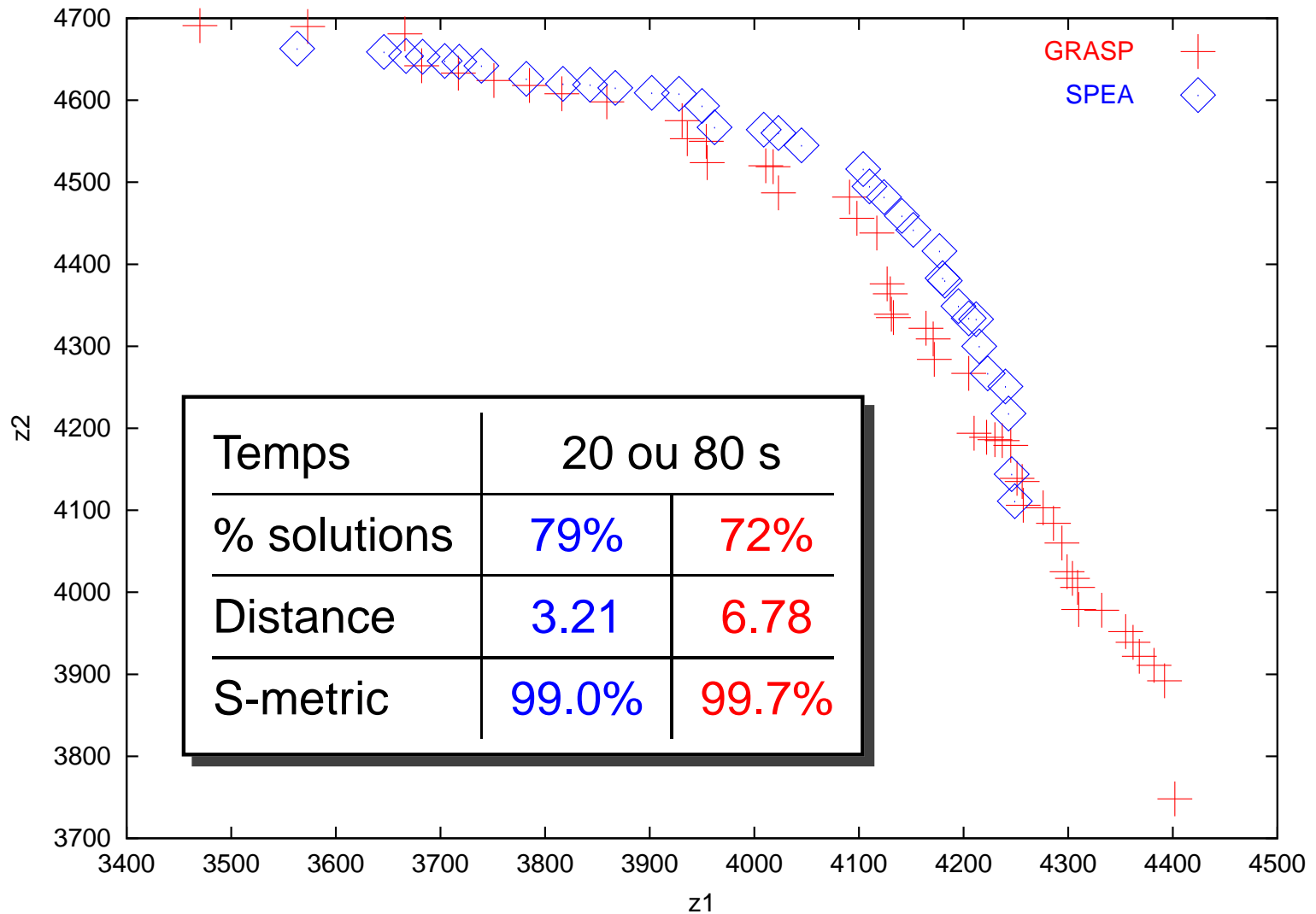
# Expérimentations : GRASP

## Résolution des instances mono-objectifs



# Expérimentations : GRASP

## Résolution des instances biobjectifs



# ***Expérimentations : GRASP***

---

## **Bilan de GRASP**

---

- ❑ Efficace sur tous les problèmes
- ❑ Temps assez faibles
- ❑ Résultats moyens à 3.5 % des solutions optimales connues
- ❑ Résultats moyens à 3.2 % des meilleures solutions connues
- ❑ Pour 28 instances sur 31, résultats au pire à 7.9 % des meilleures solutions connues

- ❑ Présentation du problème étudié
- ❑ Modélisation proposée
- ❑ Résolution du problème de set packing
- ❑ Expérimentations et résultats
- ❑ **Intégration au projet RECIFE**
- ❑ Conclusion et perspectives

# Projet RECIFE : présentation

Étude de la capacité ferroviaire d'un nœud

## Contexte

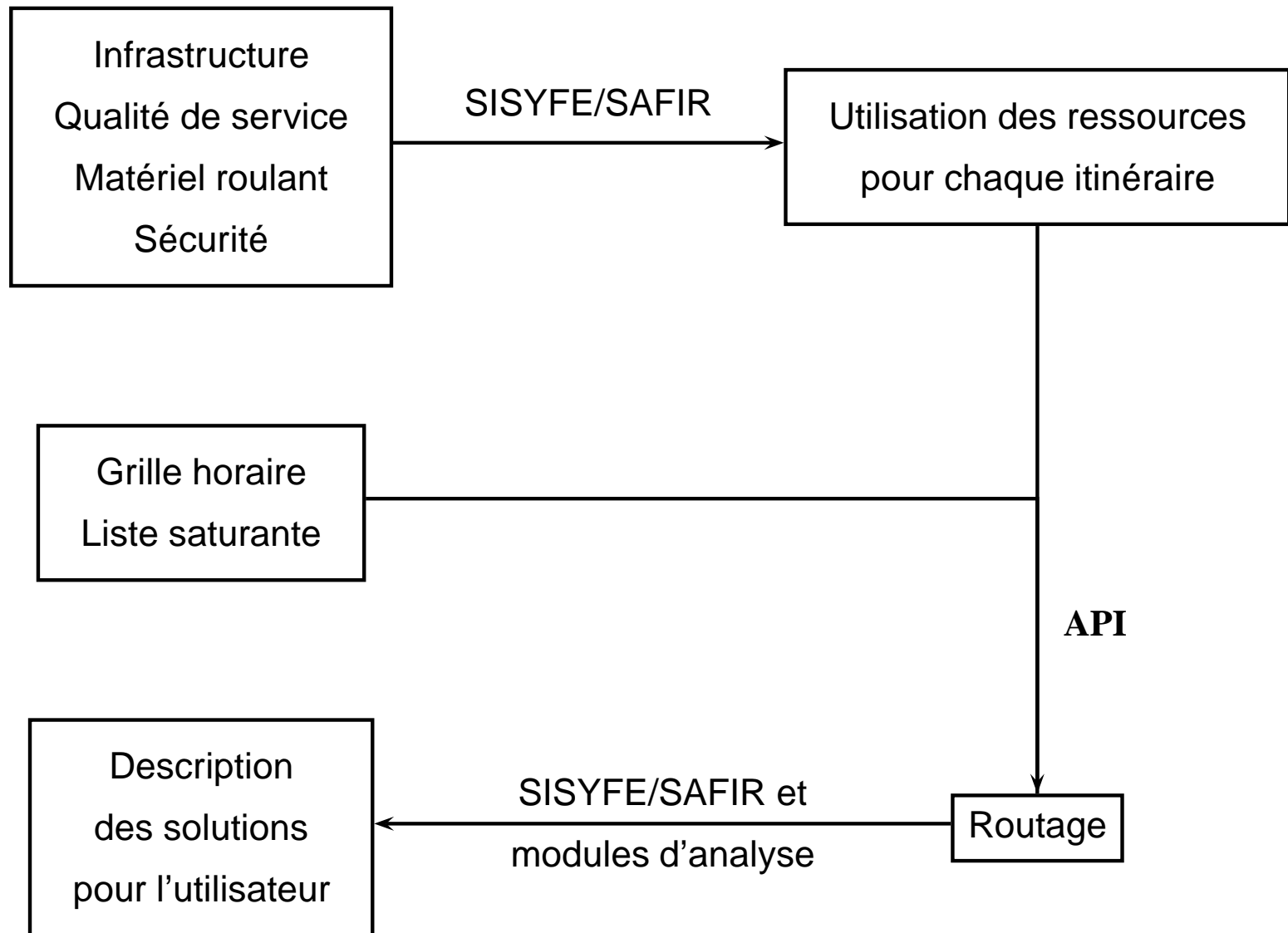
- ❑ Application régionale : gare de Lille-Flandres
- ❑ Complément à CAPRES ou DÉMIURGE
- ❑ Prolongement de SAFIR

## Étapes préalables

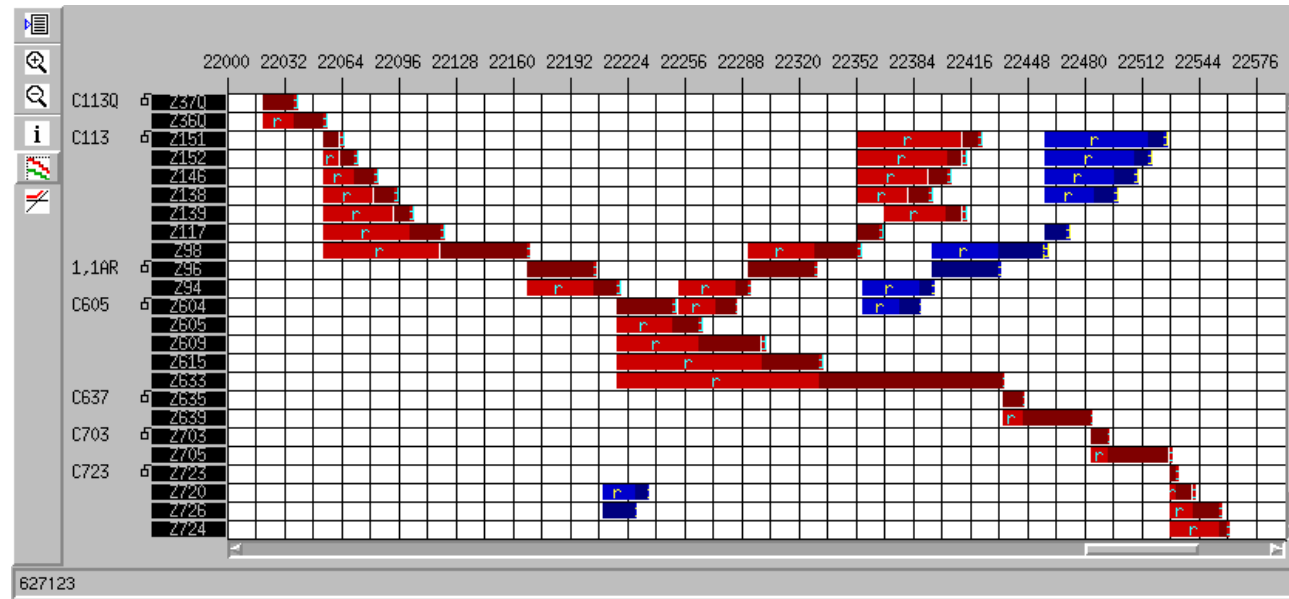
- ❑ Mise en forme des données
- ❑ Modélisation
- ❑ Résolution
- ❑ Analyse et/ou simulation

⇒ Outils d'aide à la décision

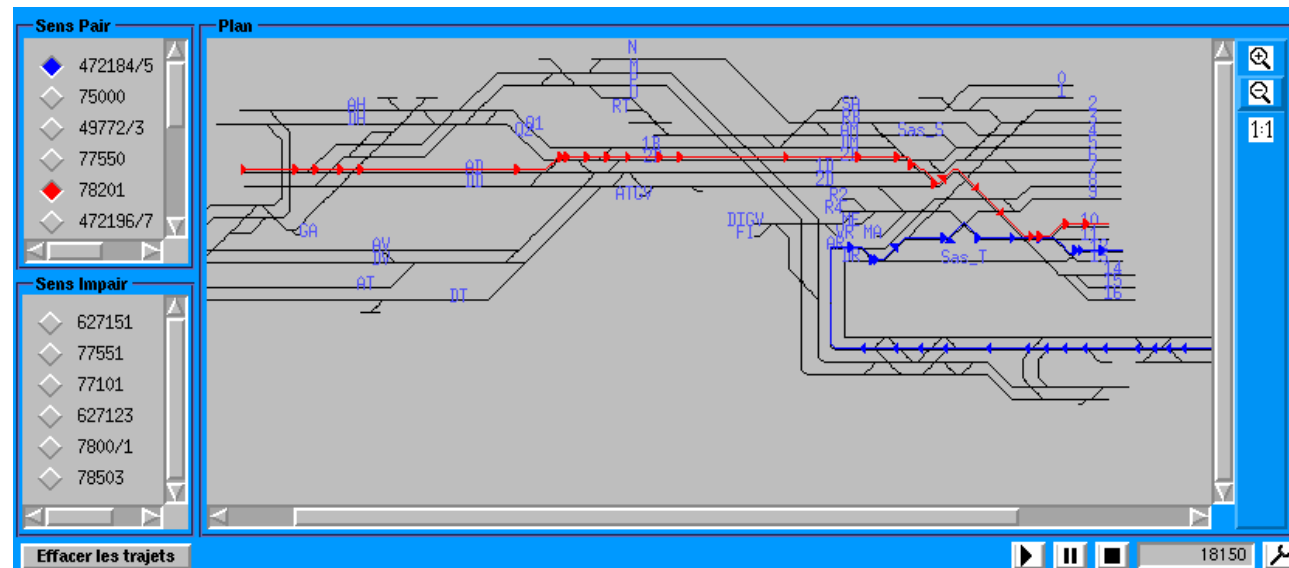
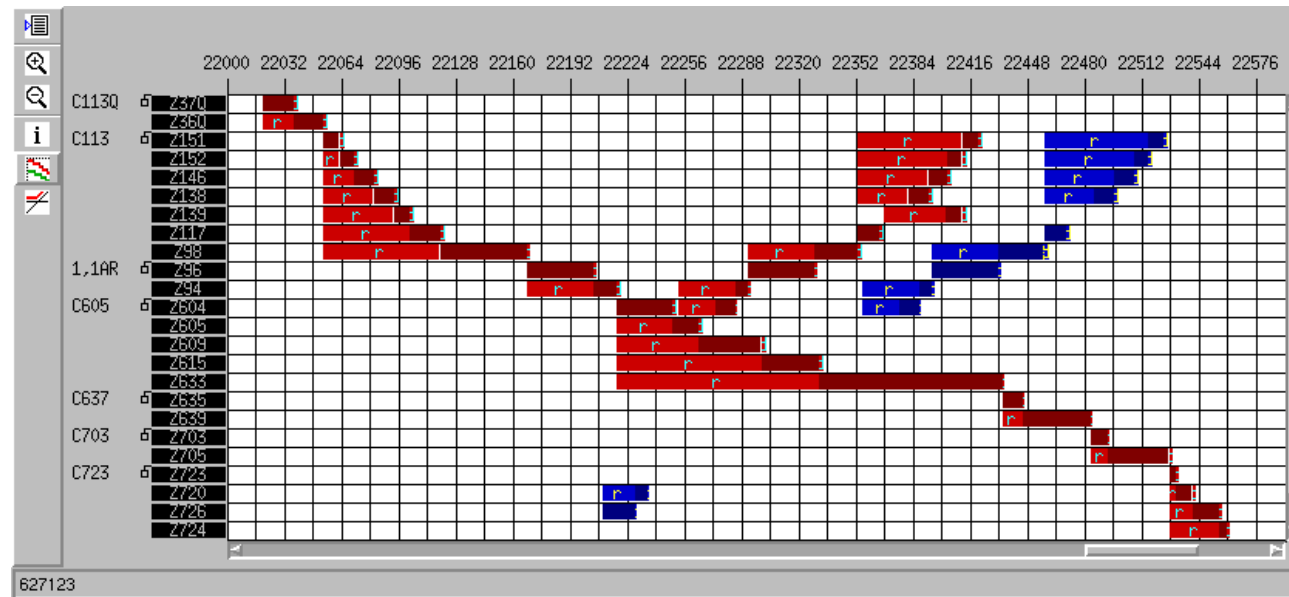
# Projet RECIFE : architecture



# Projet RECIFE : visualisation des solutions



# Projet RECIFE : visualisation des solutions



# ***Conclusion et perspectives***

---

- ❑ Présentation du problème étudié
- ❑ Modélisation proposée
- ❑ Résolution du problème de set packing
- ❑ Expérimentations et résultats
- ❑ Intégration au projet RECIFE
- ❑ **Conclusion et perspectives**

# ***Conclusion et perspectives : modélisation***

---

## **Conclusion**

---

- ❑ Modélisation multiobjectif complète du problème
- ❑ Échelle d'un nœud : niveau de détail fin
- ❑ Hypothèses de discrétisation

## **Perspective**

---

- ❑ Optimiser la stabilité

# ***Conclusion et perspectives : résolution***

---

## **Conclusion**

---

- ❑ Résultats intéressants pour les pré-traitements
- ❑ Métaheuristique GRASP performante
- ❑ Extensions au cas biobjectif

## **Perspectives**

---

- ❑ Méthode exacte dédiée
- ❑ Améliorations de GRASP (reactive GRASP, path relinking)
- ❑ Résolution multiobjectif

# ***Conclusion et perspectives : application***

---

## **Conclusion**

---

- ❑ Projet RECIFE en cours
  - ⇒ développement d'un logiciel complet
- ❑ Expérimentation sur un cas réel

## **Perspectives**

---

- ❑ Finalisation des modules d'analyse
- ❑ Validation sur la gare de Lille-Flandres
- ❑ Étudier d'autres infrastructures
- ❑ Couplage avec DÉMIURGE

# ***Perspective transversale***

---

## Aspects modélisation et résolution

- ❑ Existence d'un modèle PPC
- ❑ Complémentarité des deux approches
  - ⇒ discrétisation plus fine
- ❑ Hybridation possible
  - ⇒ amélioration des horaires
  - ⇒ utilisation de contraintes issues des deux modèles

Thèse en cours

