



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

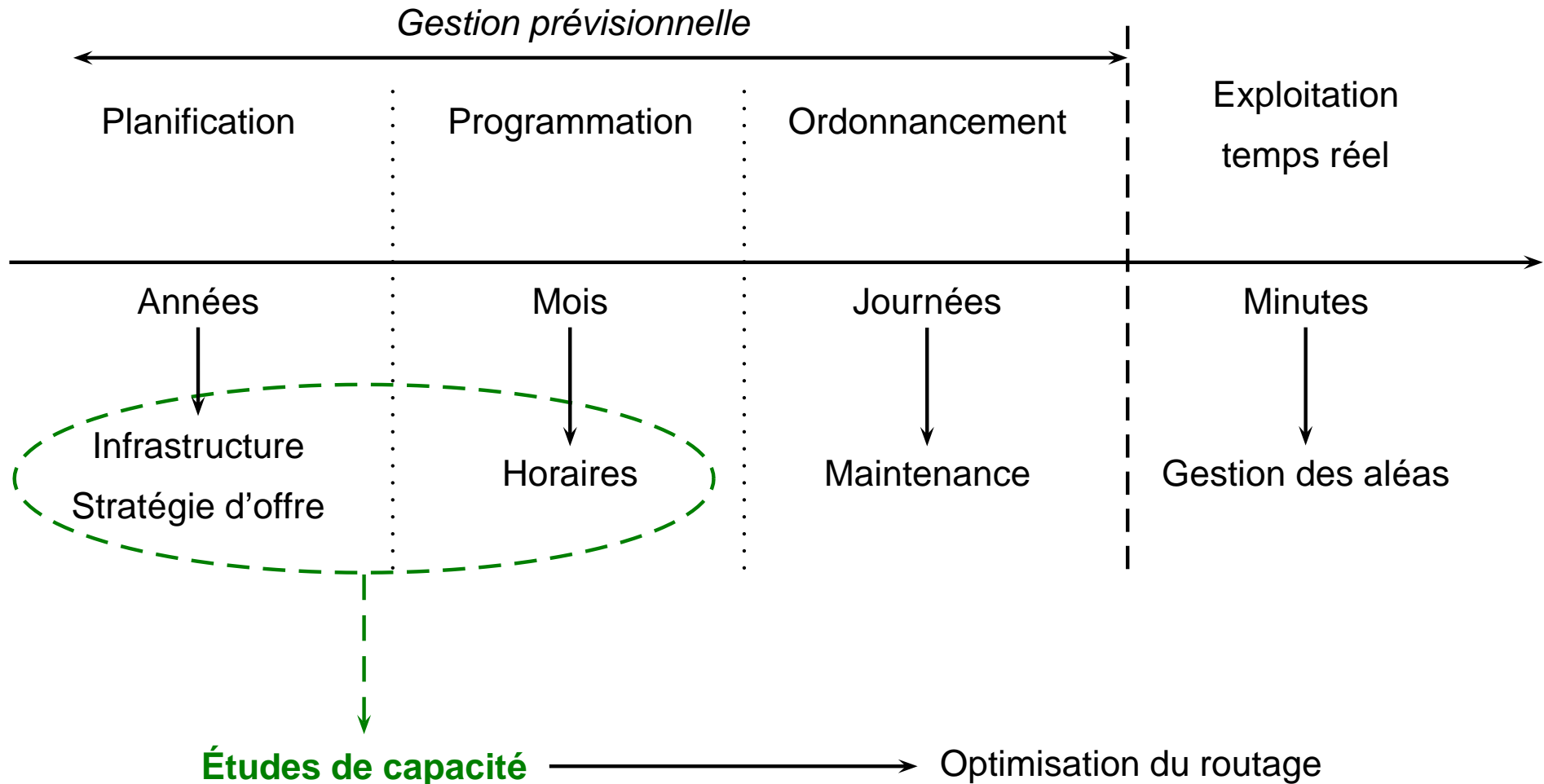
Transport ferroviaire

- ❑ 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

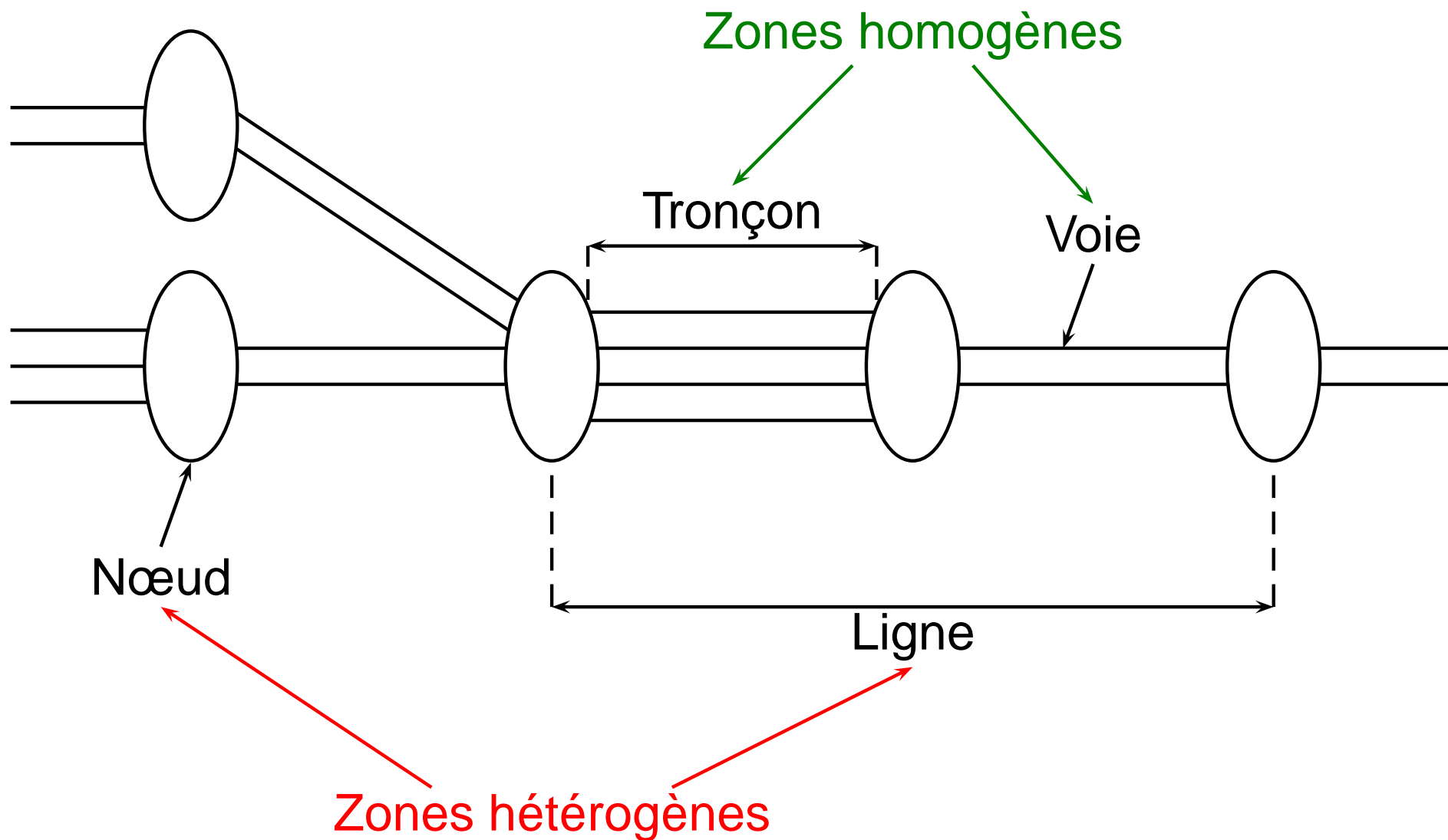


Problème étudié : définitions

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

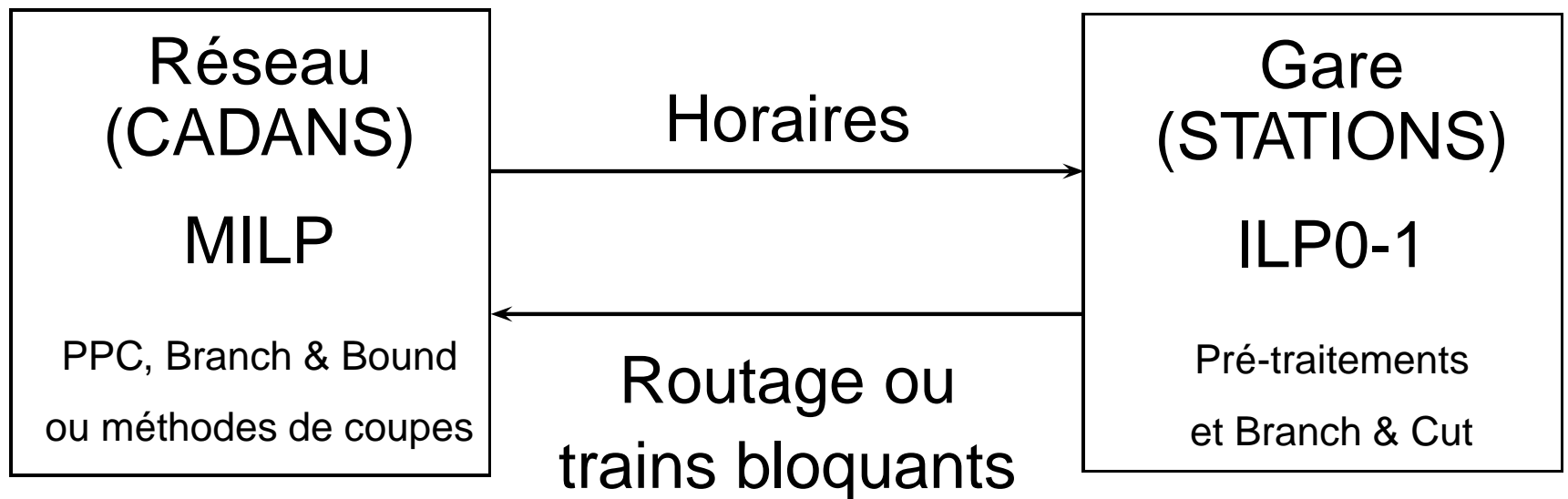
Comment évaluer la capacité ?

- ❑ **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

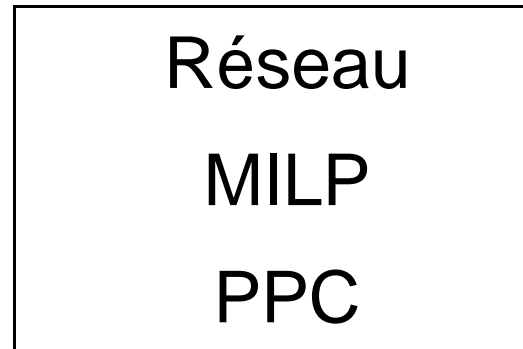


Hypothèse : Temps de parcours égaux dans une gare

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 $x_{t,r,\delta}$

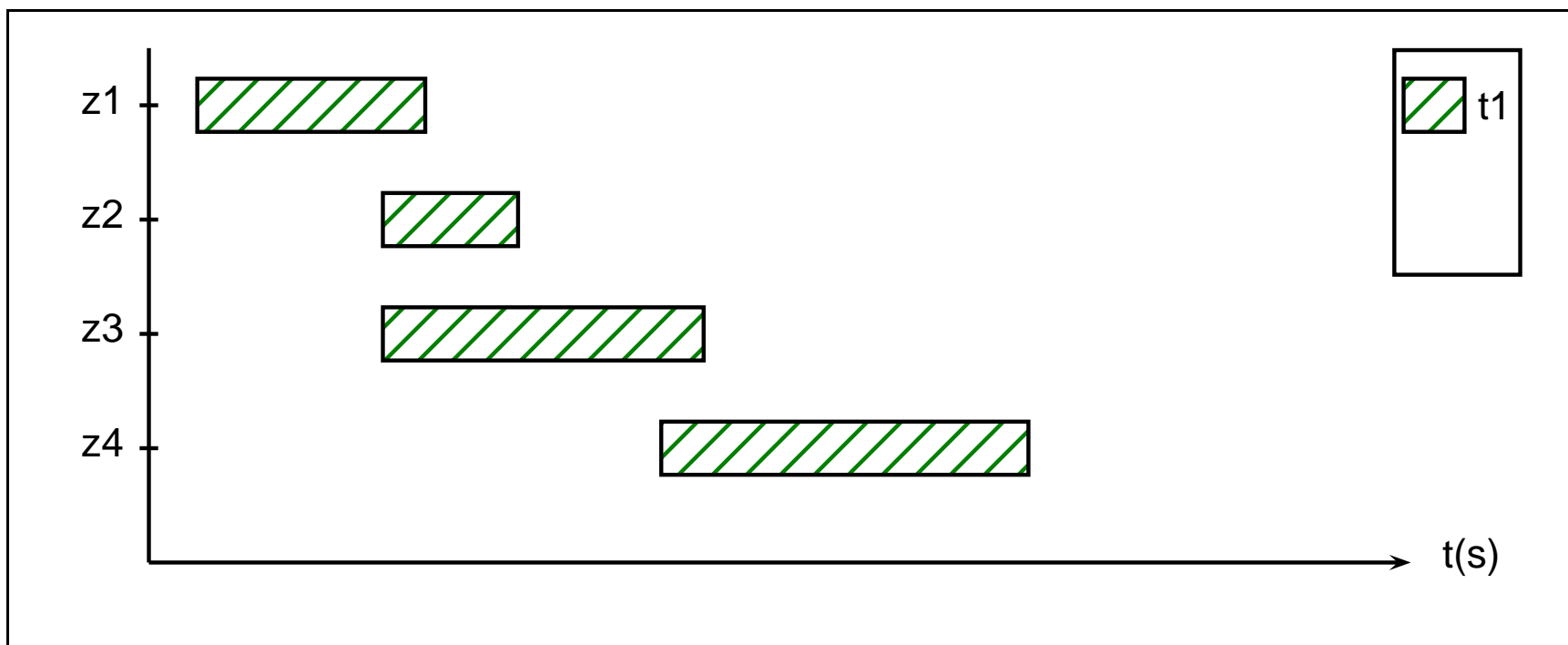
❑ Contraintes :

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

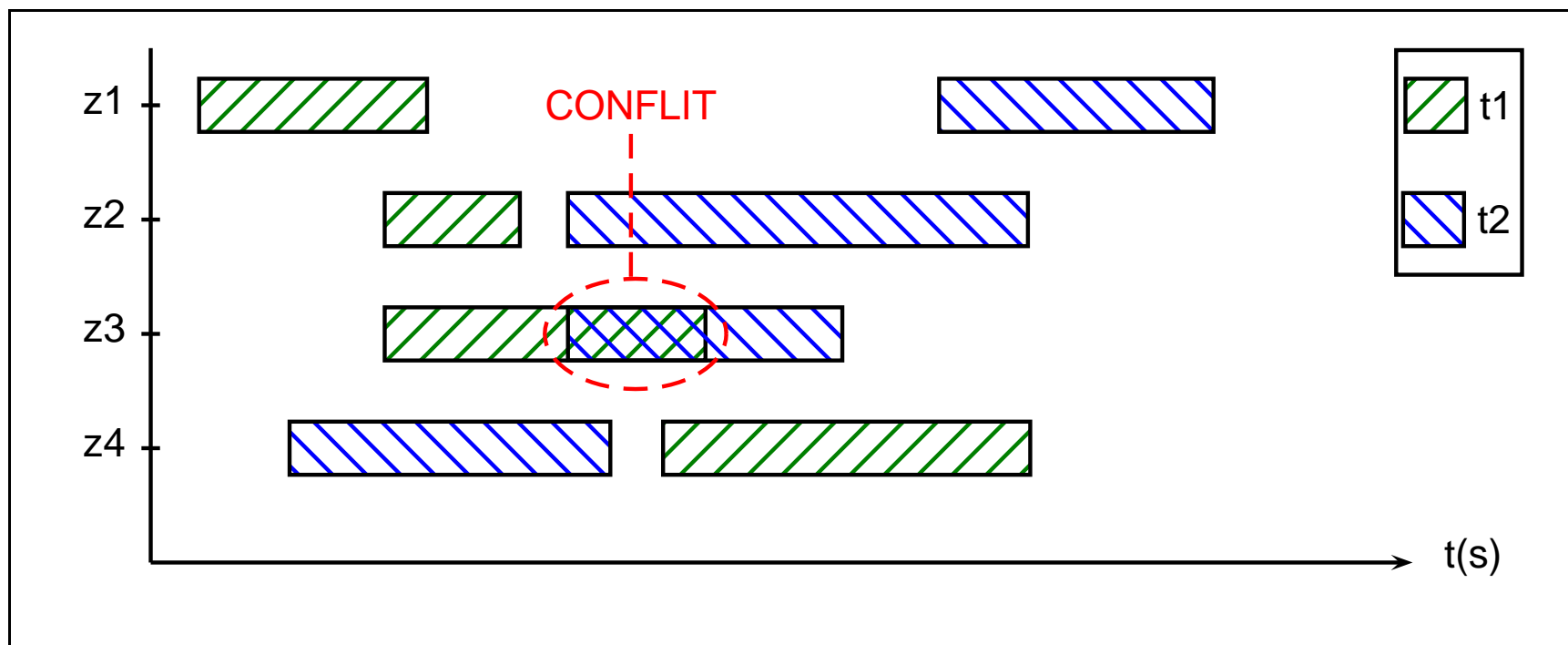
Modélisation : utilisation des zones

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



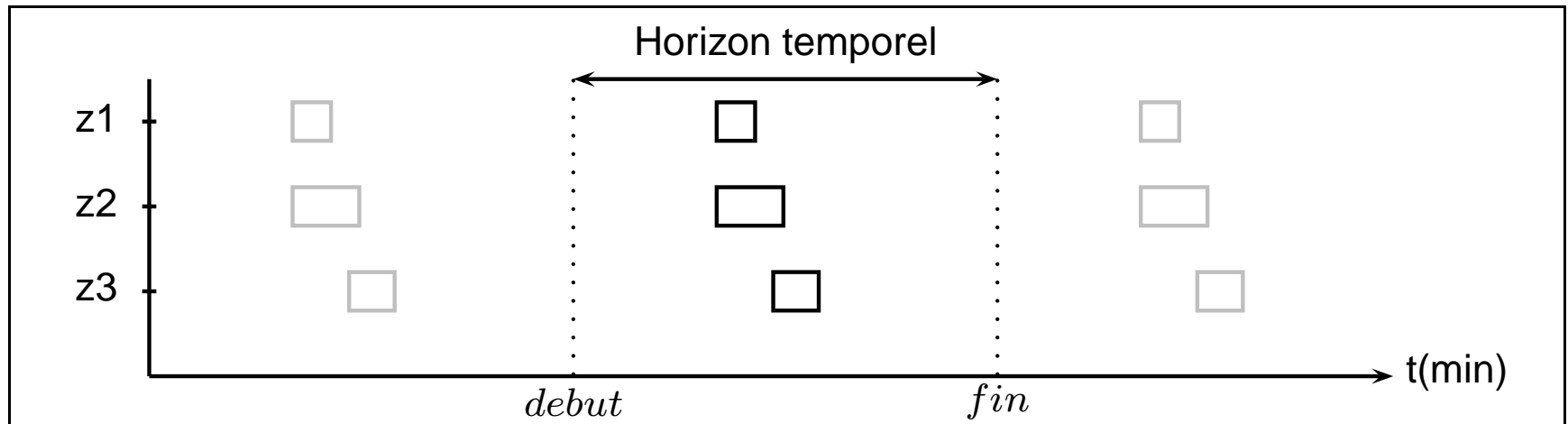
Modélisation : utilisation des zones

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

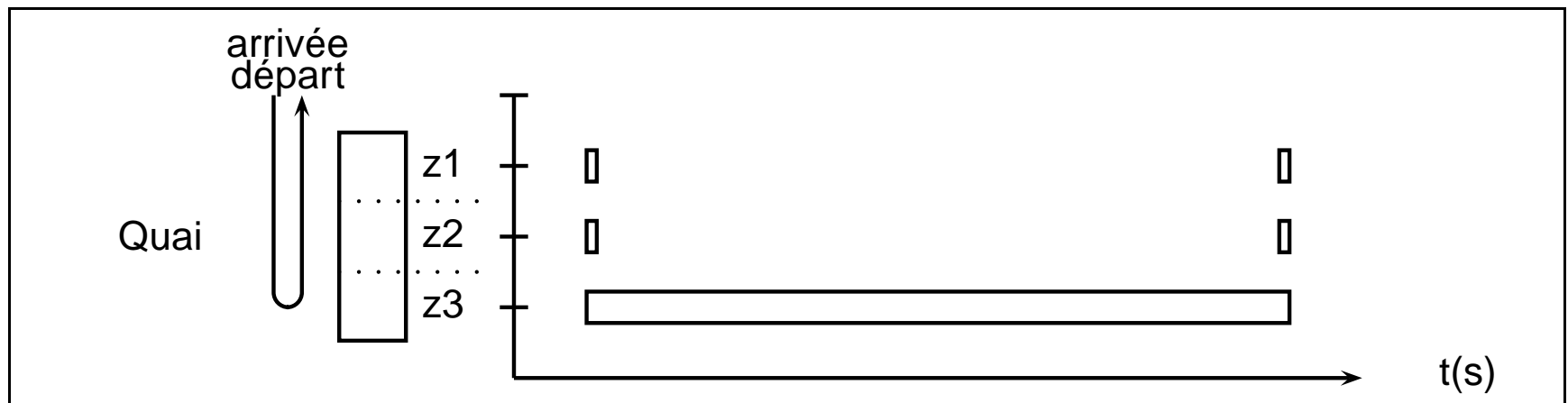


Modélisation : cas particuliers

❑ Cadencement

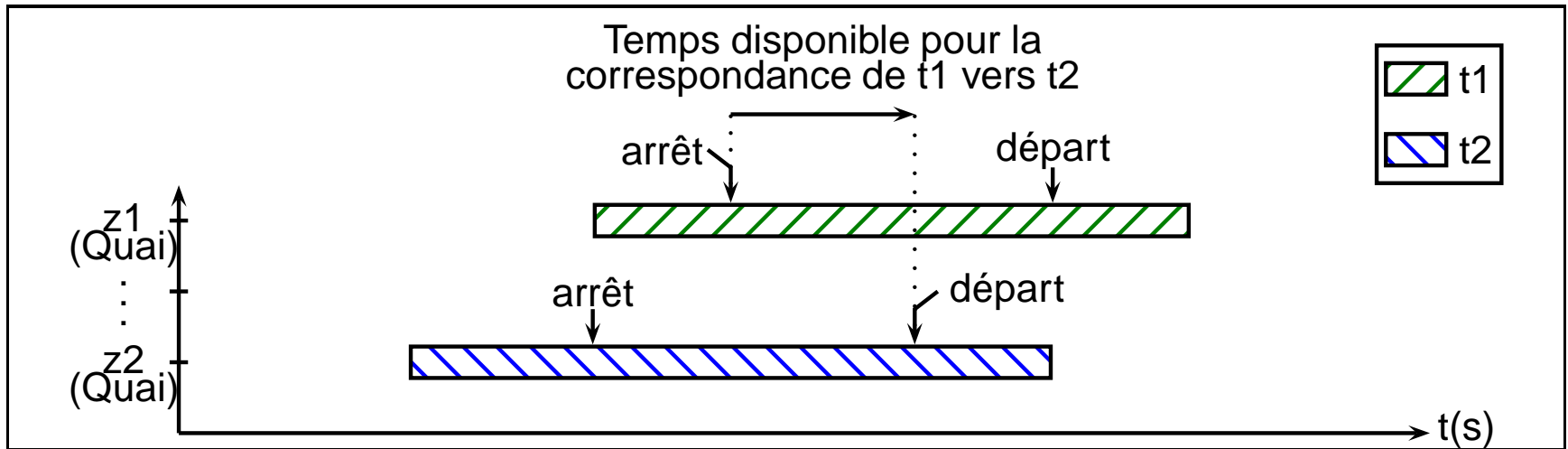


❑ Quais accueillant plusieurs trains (zones fictives)

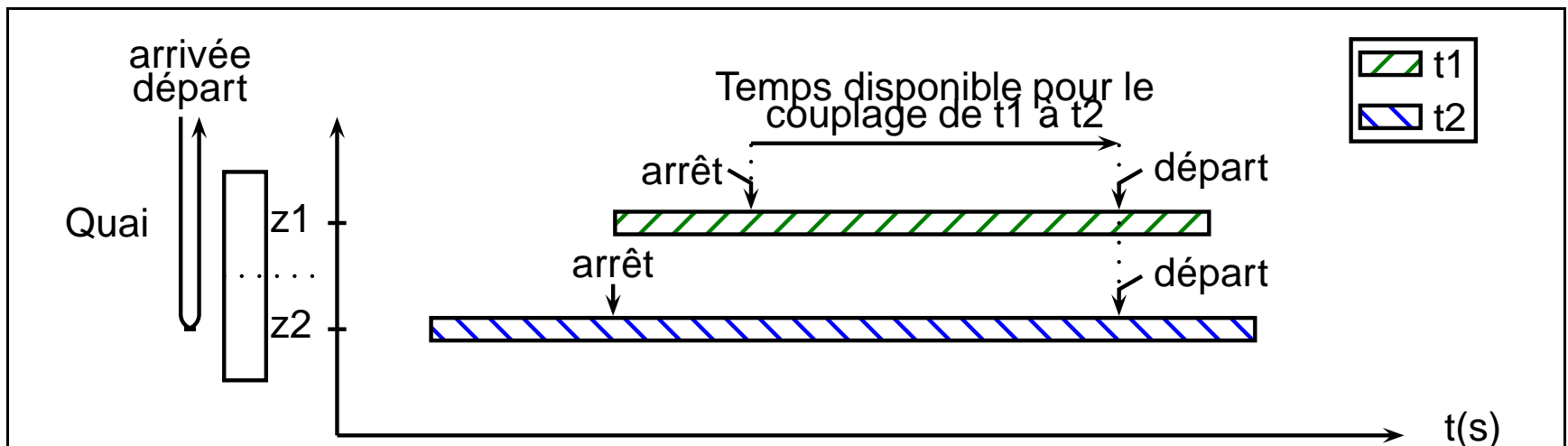


Modélisation : horaires liés

❑ Correspondances



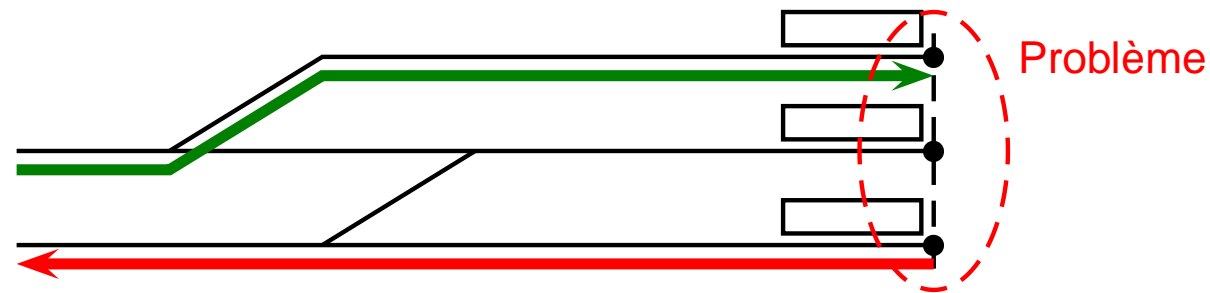
❑ Couplages / Découplages



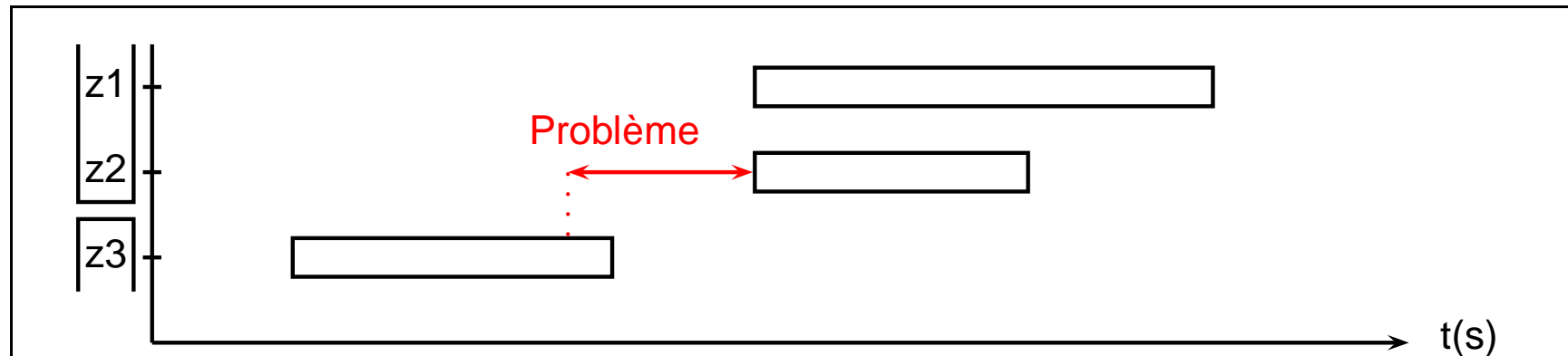
Modélisation : partitionnement

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

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

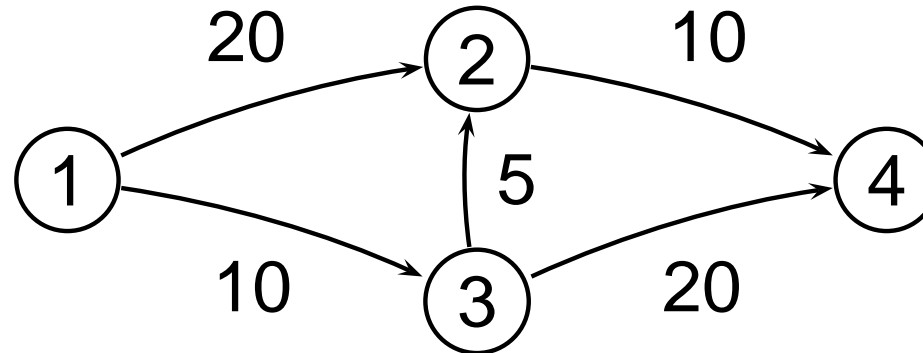
$$x_{t,r,\delta} + x_{t',r',\delta'} \leq 1, \forall (t, r, \delta), (t', r', \delta') \text{ incompatibles}$$

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

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

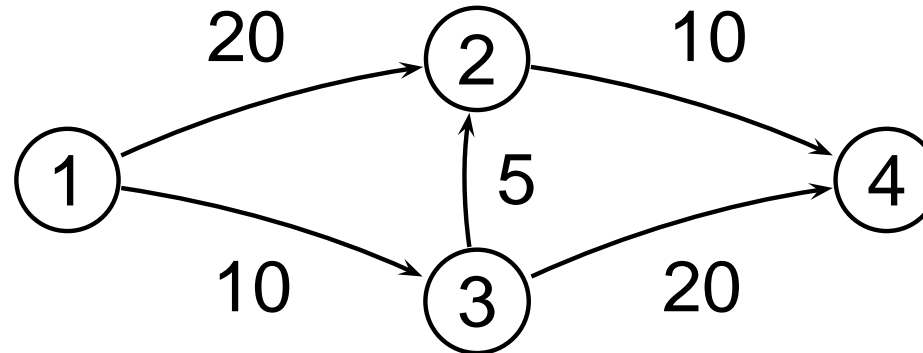
Retard de 20 s du train 3 \Rightarrow Retard total généré : 20 s

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

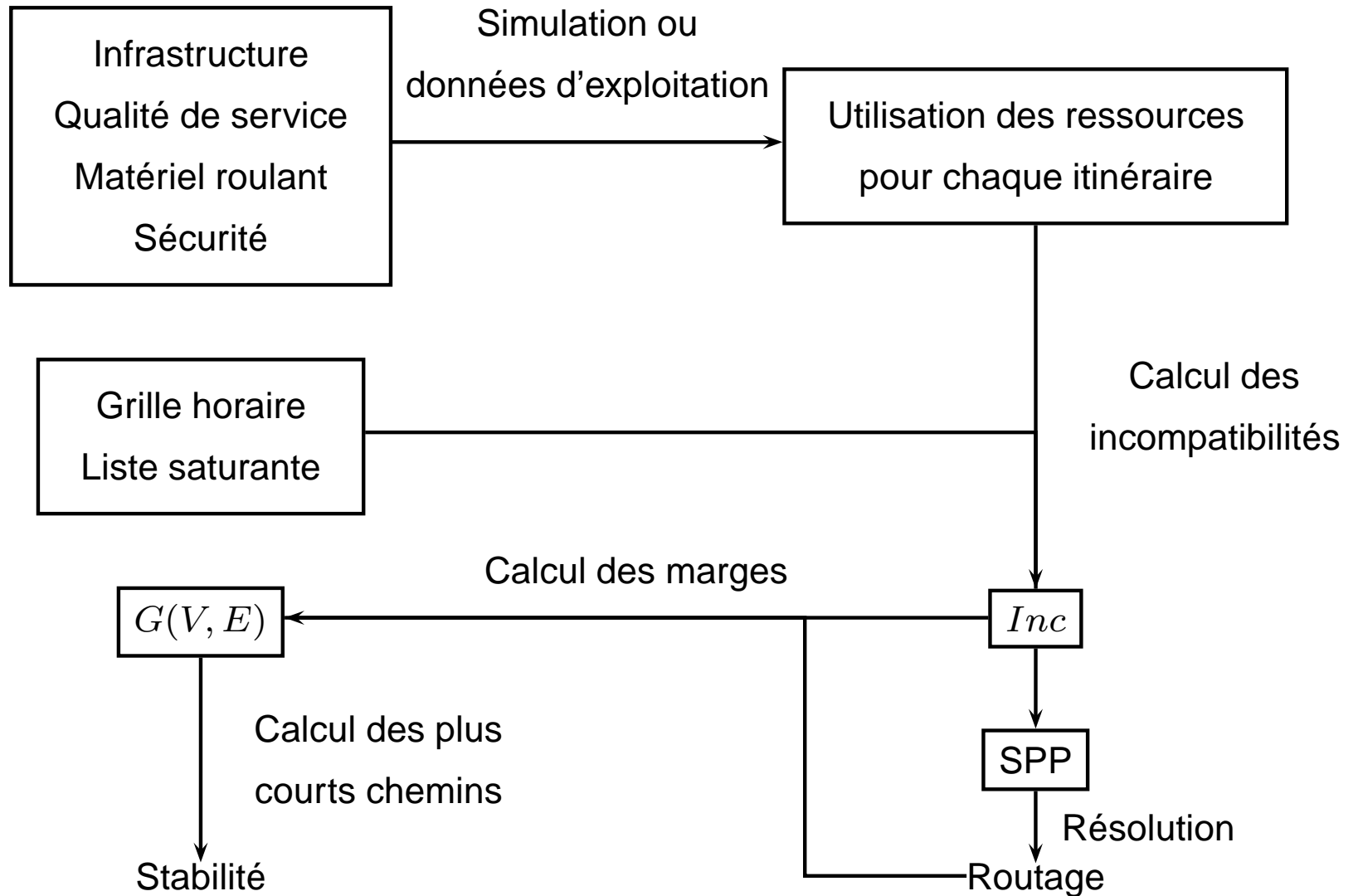
Évaluation de la stabilité d'un routage

- ❑ Hypothèse : Conservation des parcours et de l'ordre des trains
- ❑ Graphe orienté $G(V, E)$,
 $V = \{\text{Variables sélectionnées dans le routage}\},$
 $E = \{\text{Couples de variables tels qu'un retard de la 1^{ère} les rend incompatibles}\}$
- ❑ 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 :

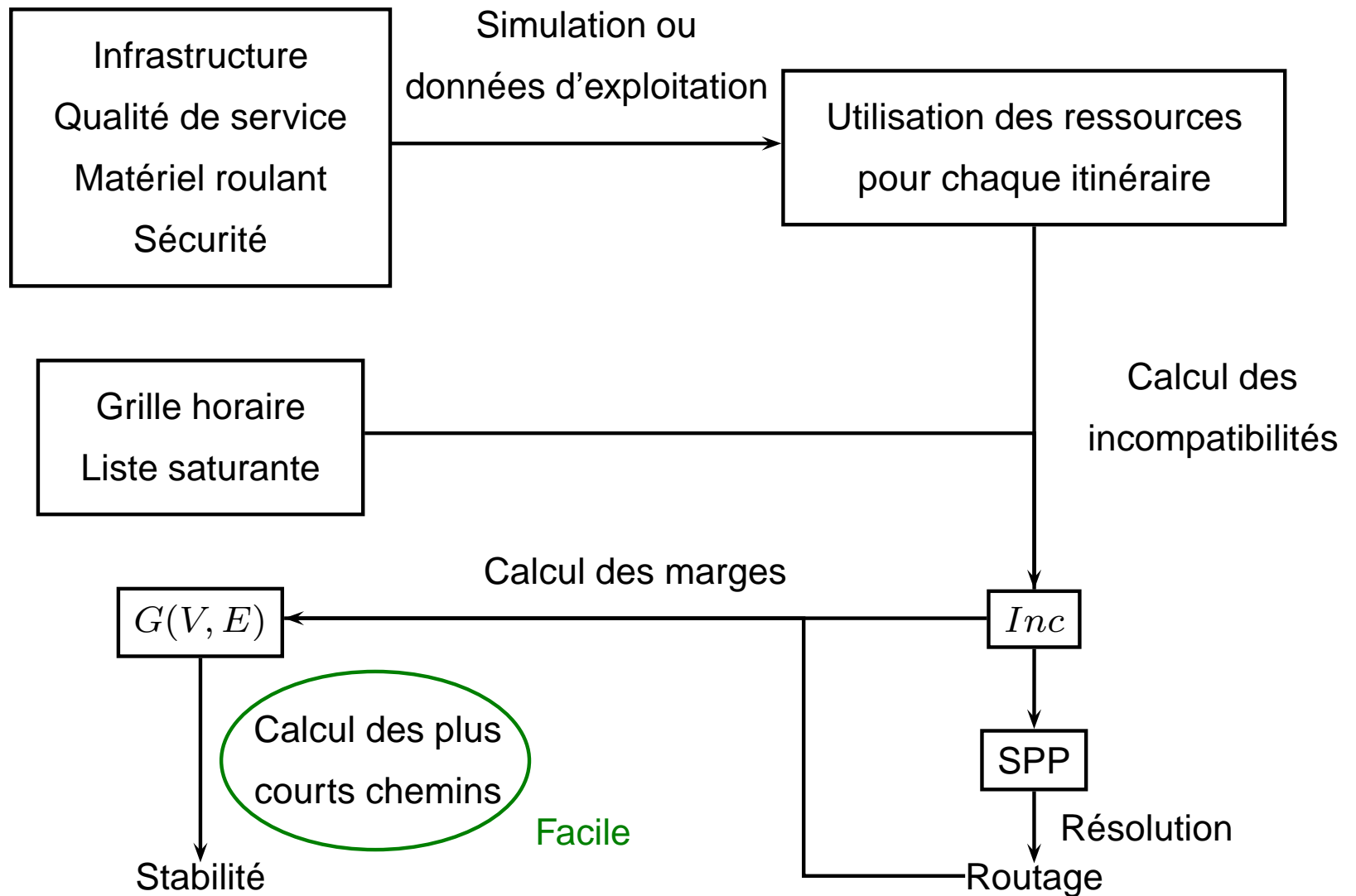
$$\sum_{\text{train } t, \text{ parcours } r, \text{ retard } \delta} (\text{Retards générés sur tous les autres trains})$$

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

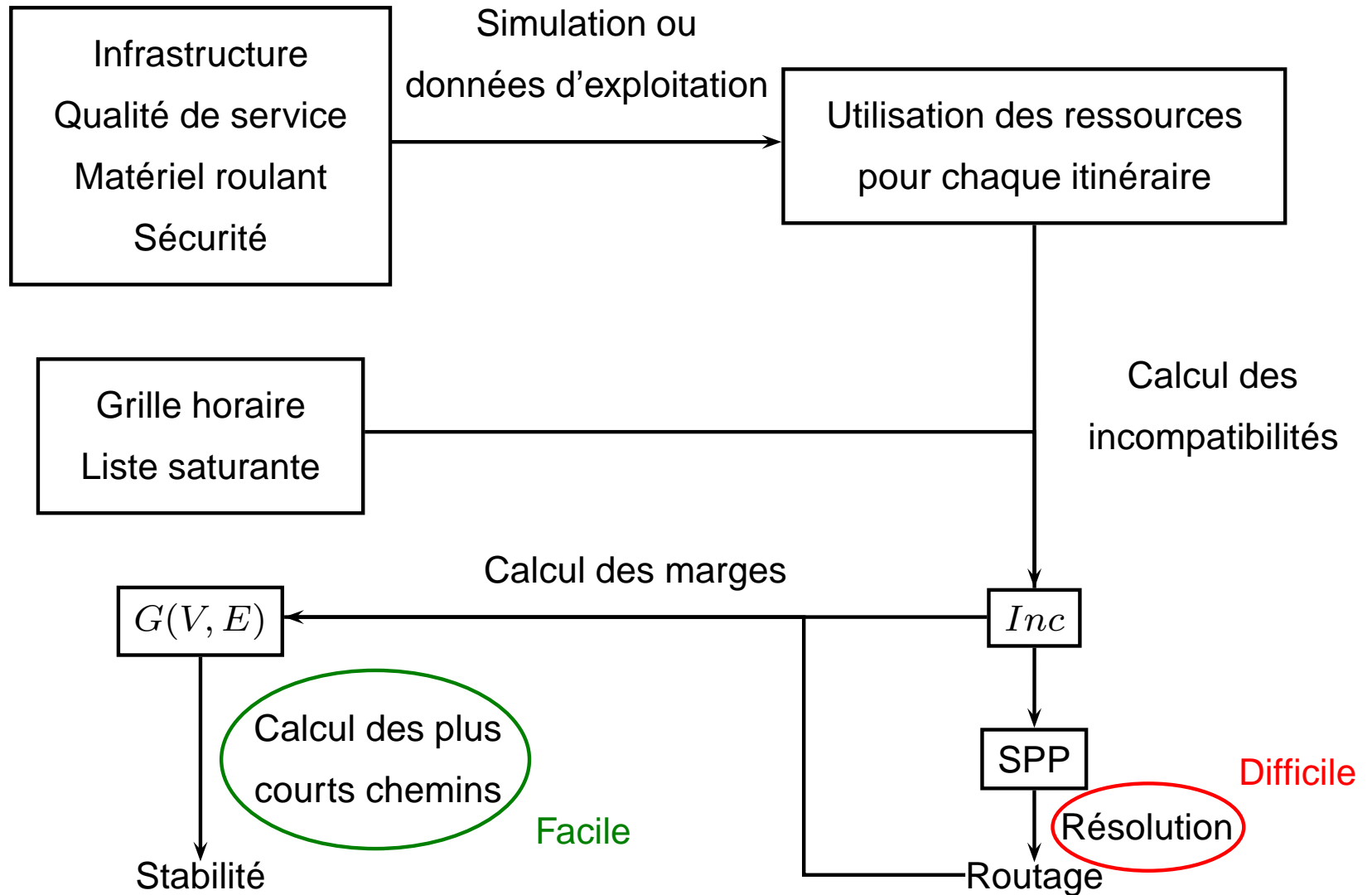
Résolution : processus



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

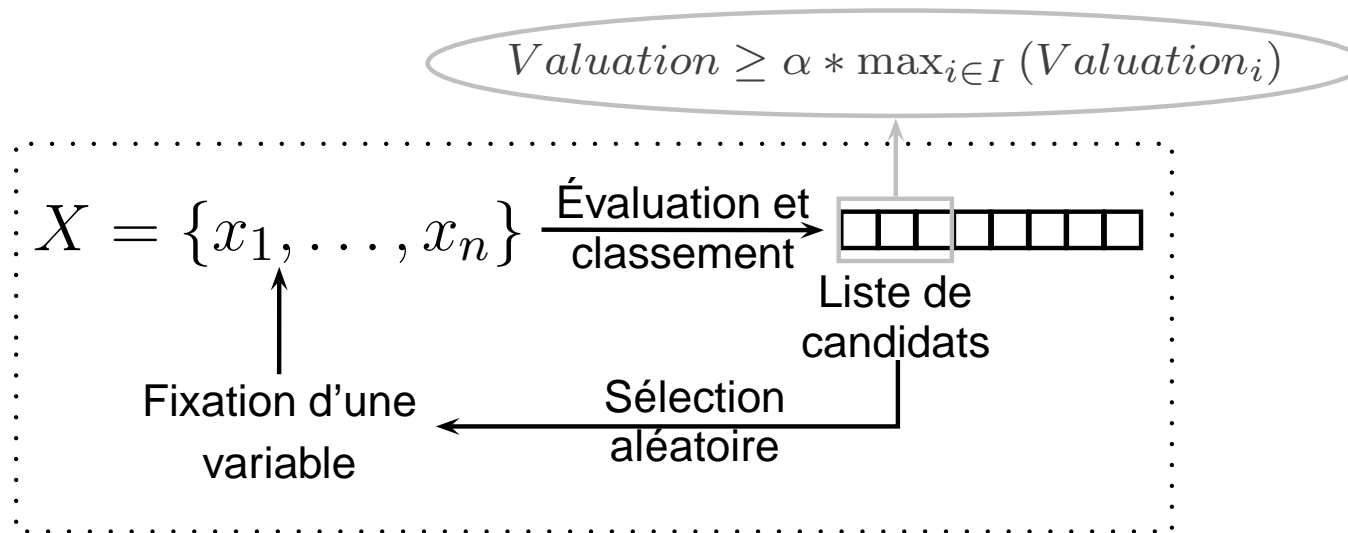
Recherche locale

[Intensification]

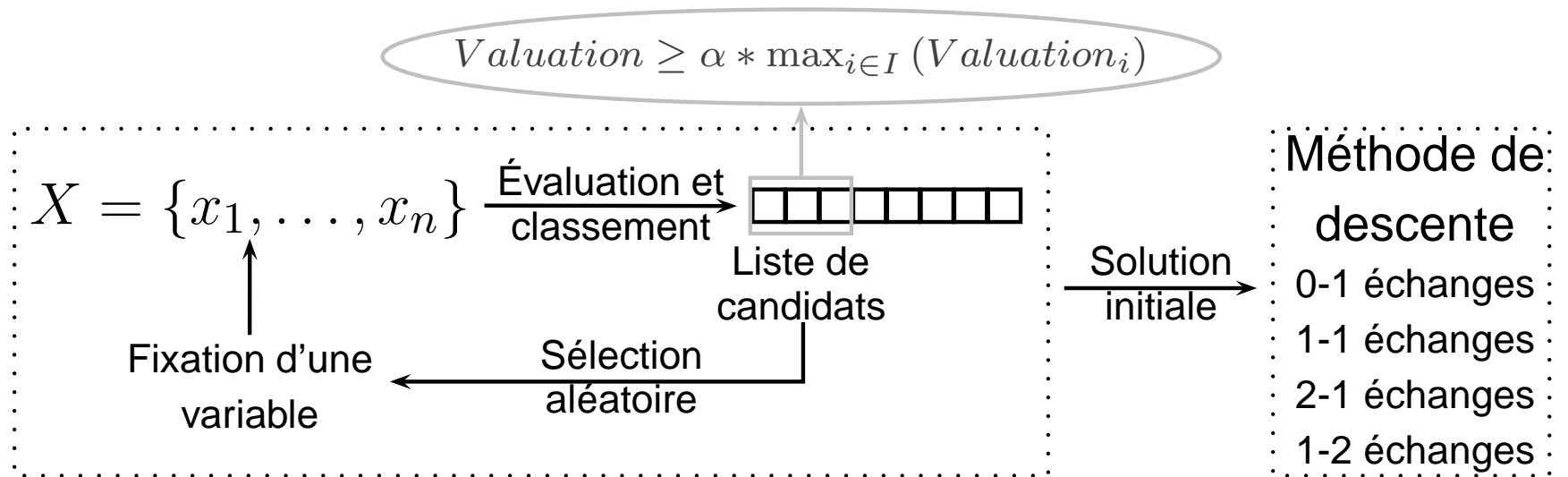
jusqu'à critère d'arrêt

[Post-optimisation]

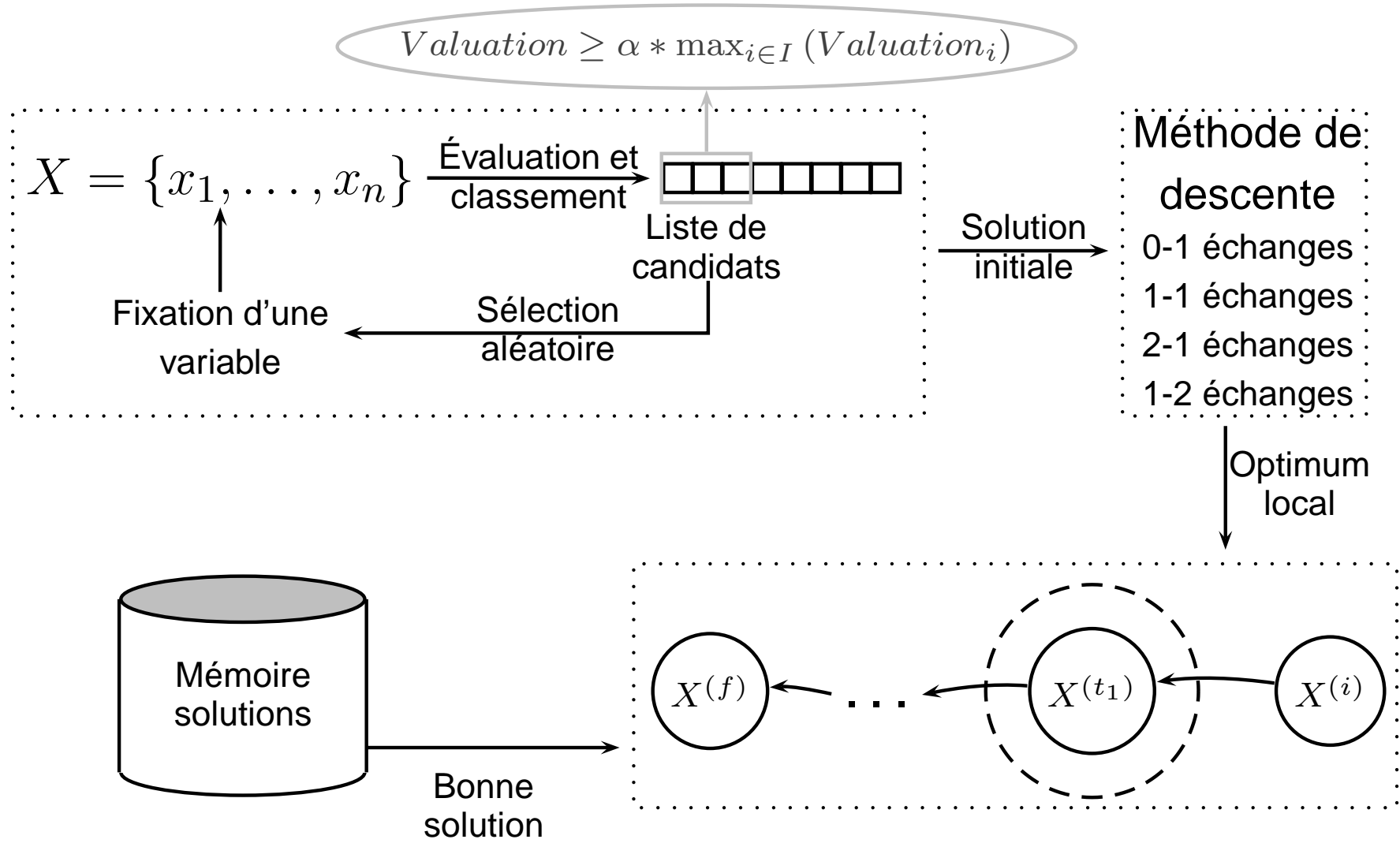
Résolution : GRASP pour le SPP



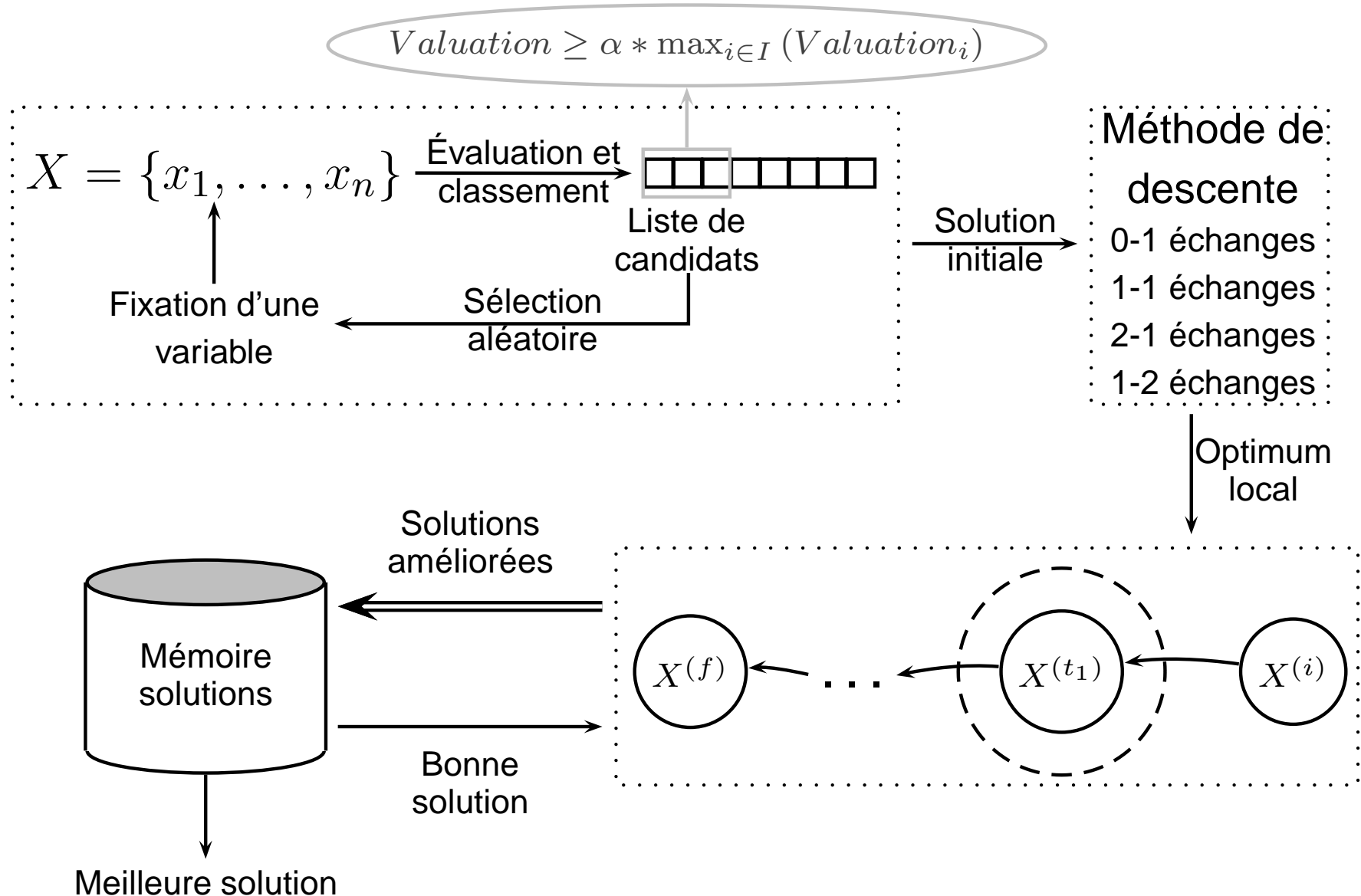
Résolution : GRASP pour le SPP



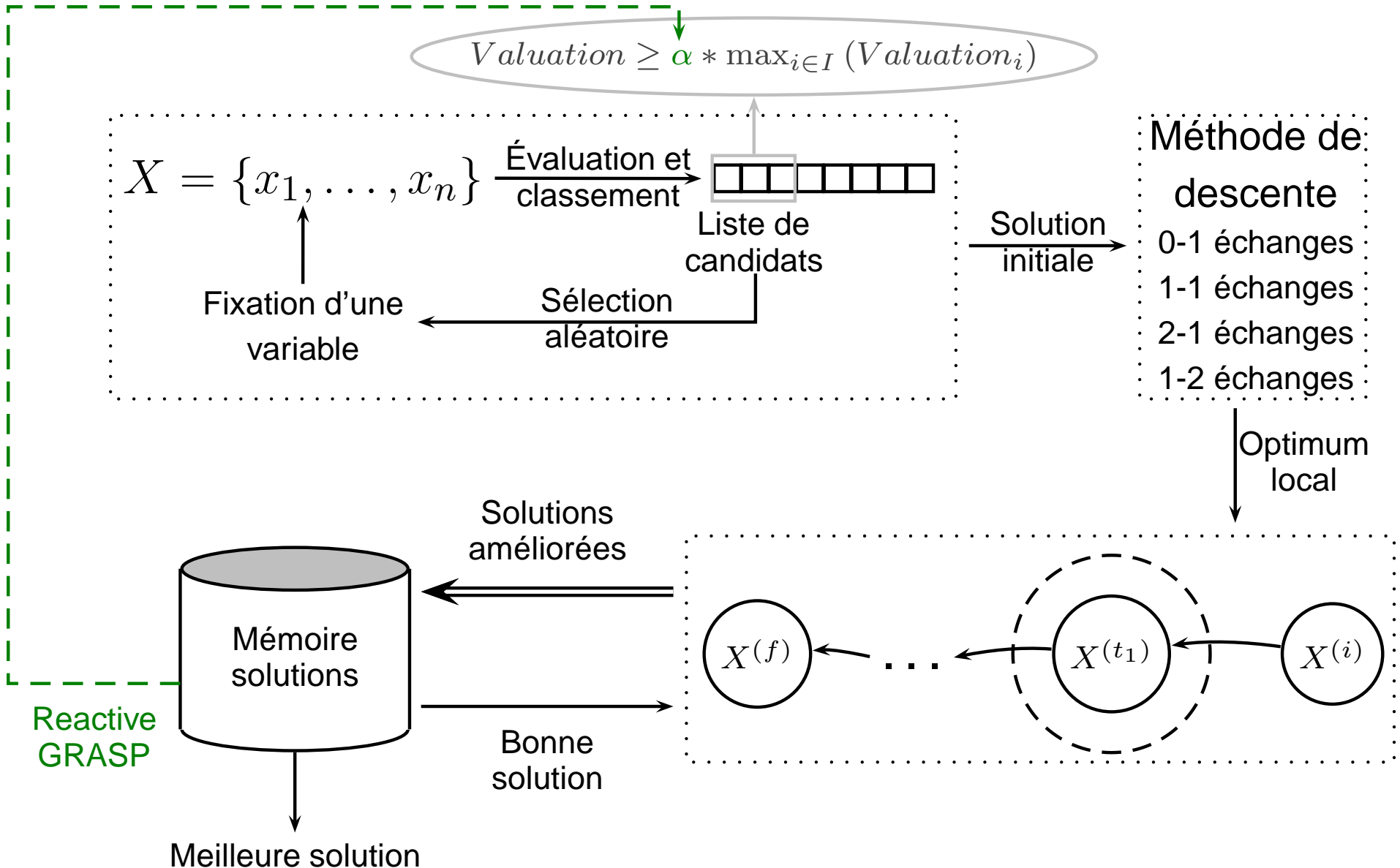
Résolution : GRASP pour le SPP



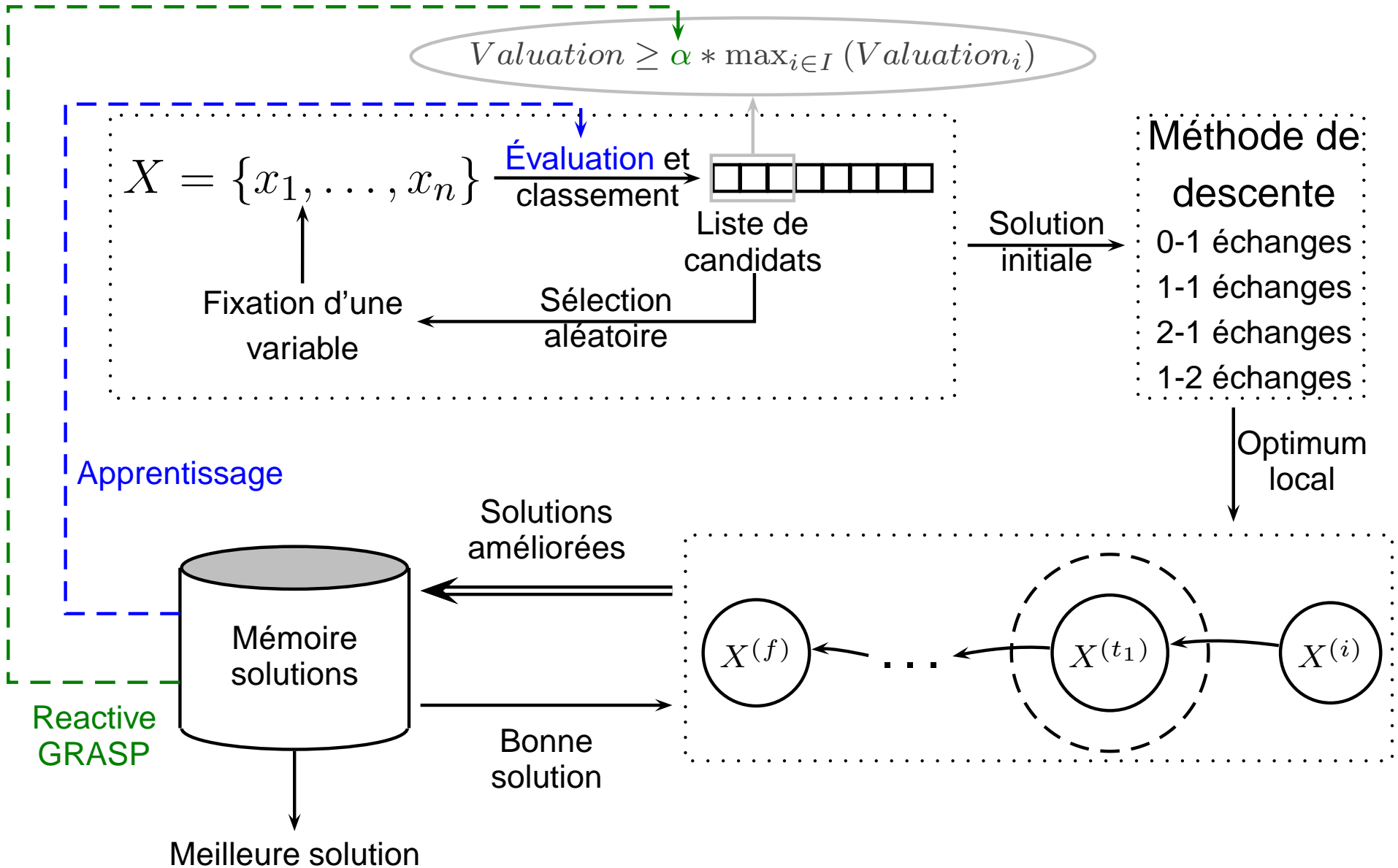
Résolution : GRASP pour le SPP



Résolution : GRASP pour le SPP



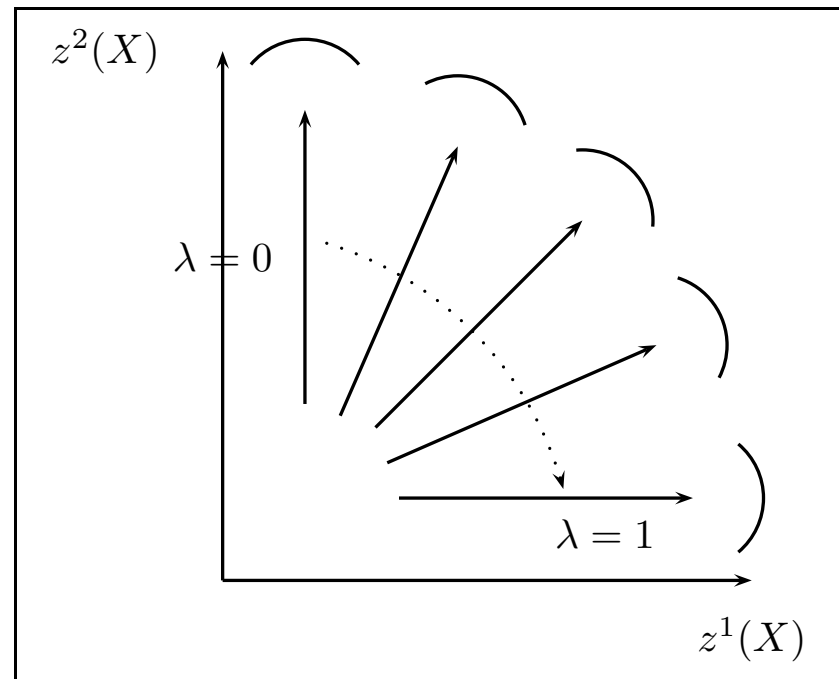
Résolution : GRASP pour le SPP



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

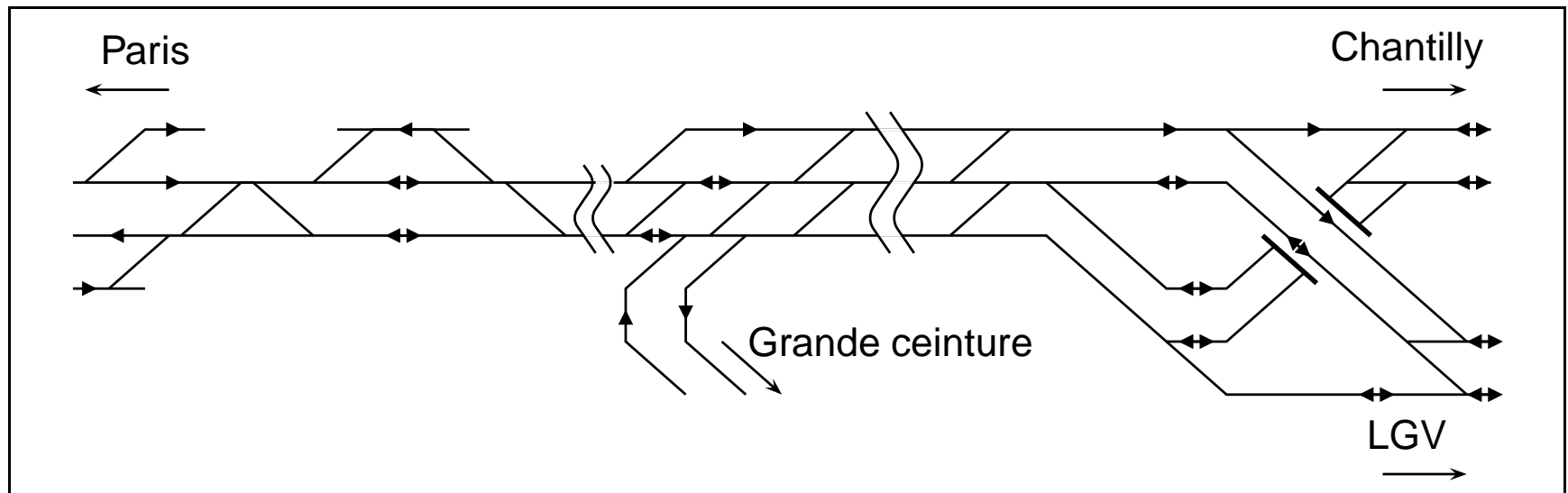
15 instances mono-objectifs

- 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

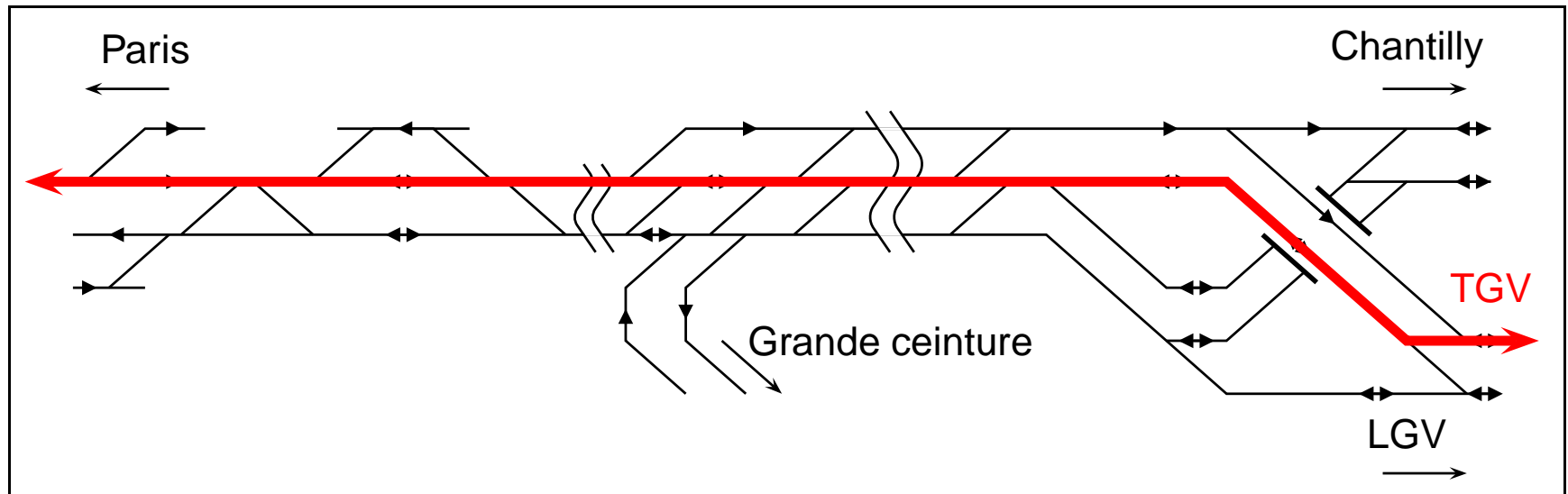
- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



Expérimentations : instances ferroviaires

15 instances mono-objectifs

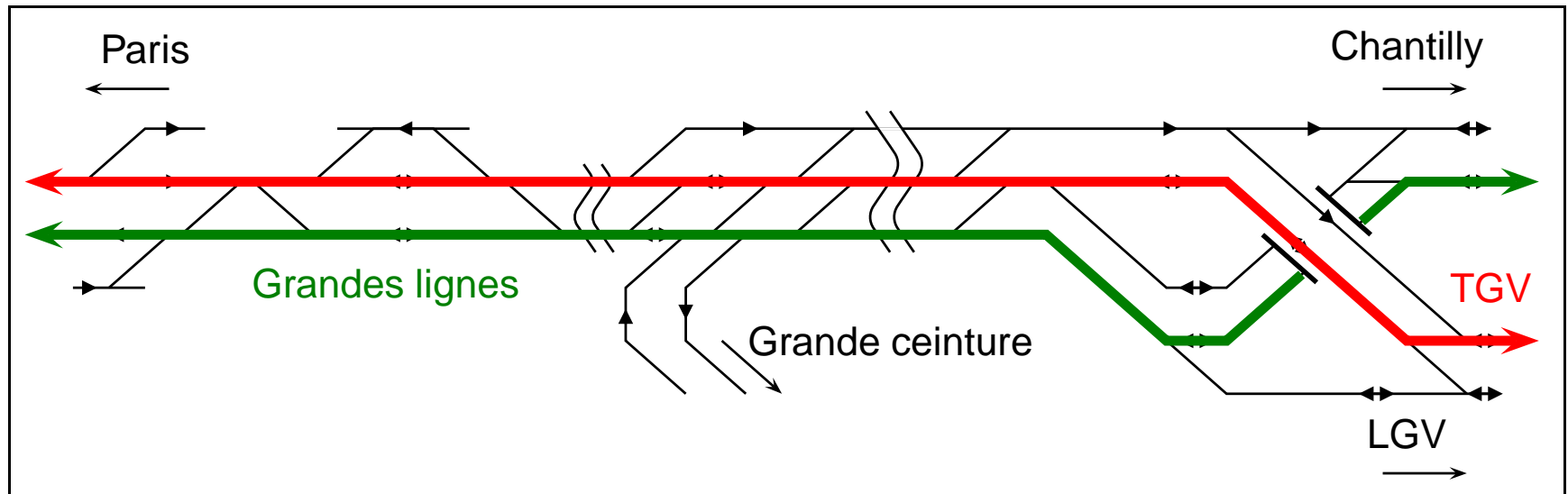
- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



Expérimentations : instances ferroviaires

15 instances mono-objectifs

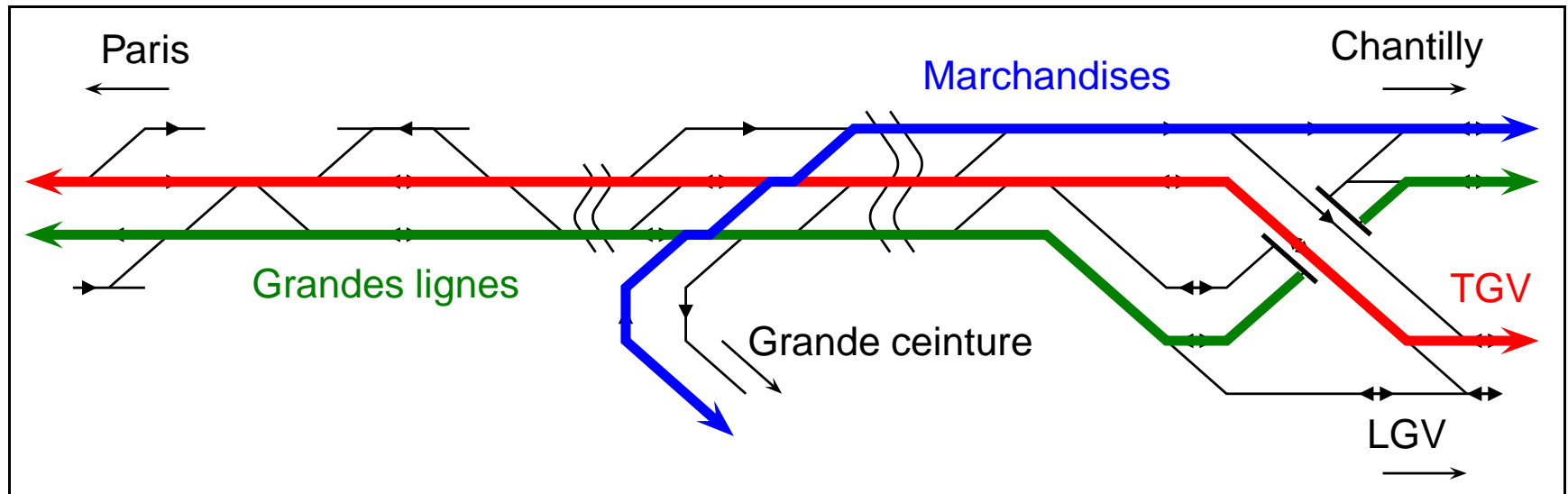
- Faisabilité ou saturation
- Durée 1 heure ou 2 heures
- 16 à 720 trains
- 50 à 4 000 variables
- 100 à 160 000 contraintes
- Densité entre 0,1 % et 5,7 %
- Coûts unitaires seulement



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 !!!

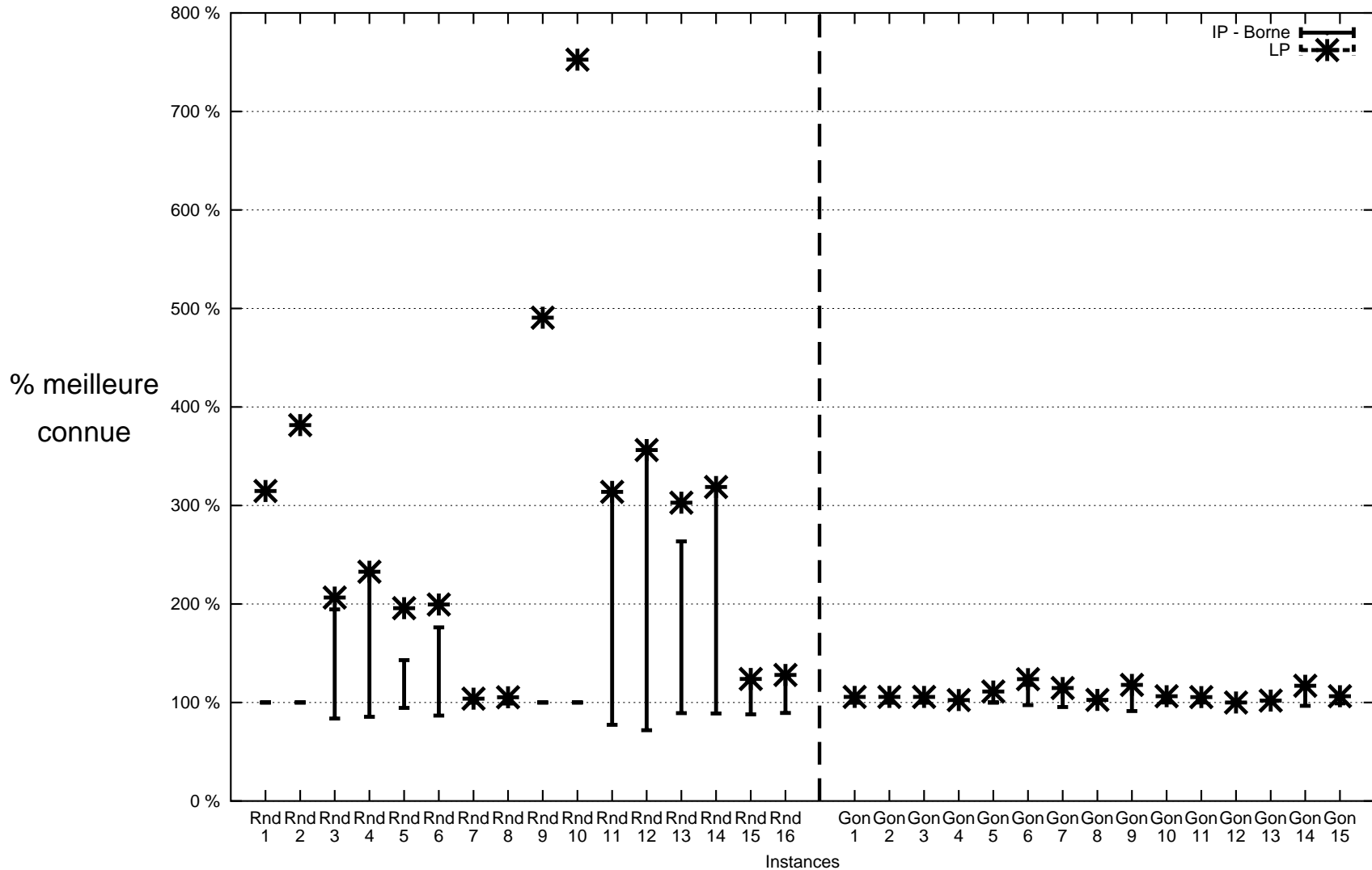
Impact des pré-traitements sur les instances ferroviaires

- ❑ 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

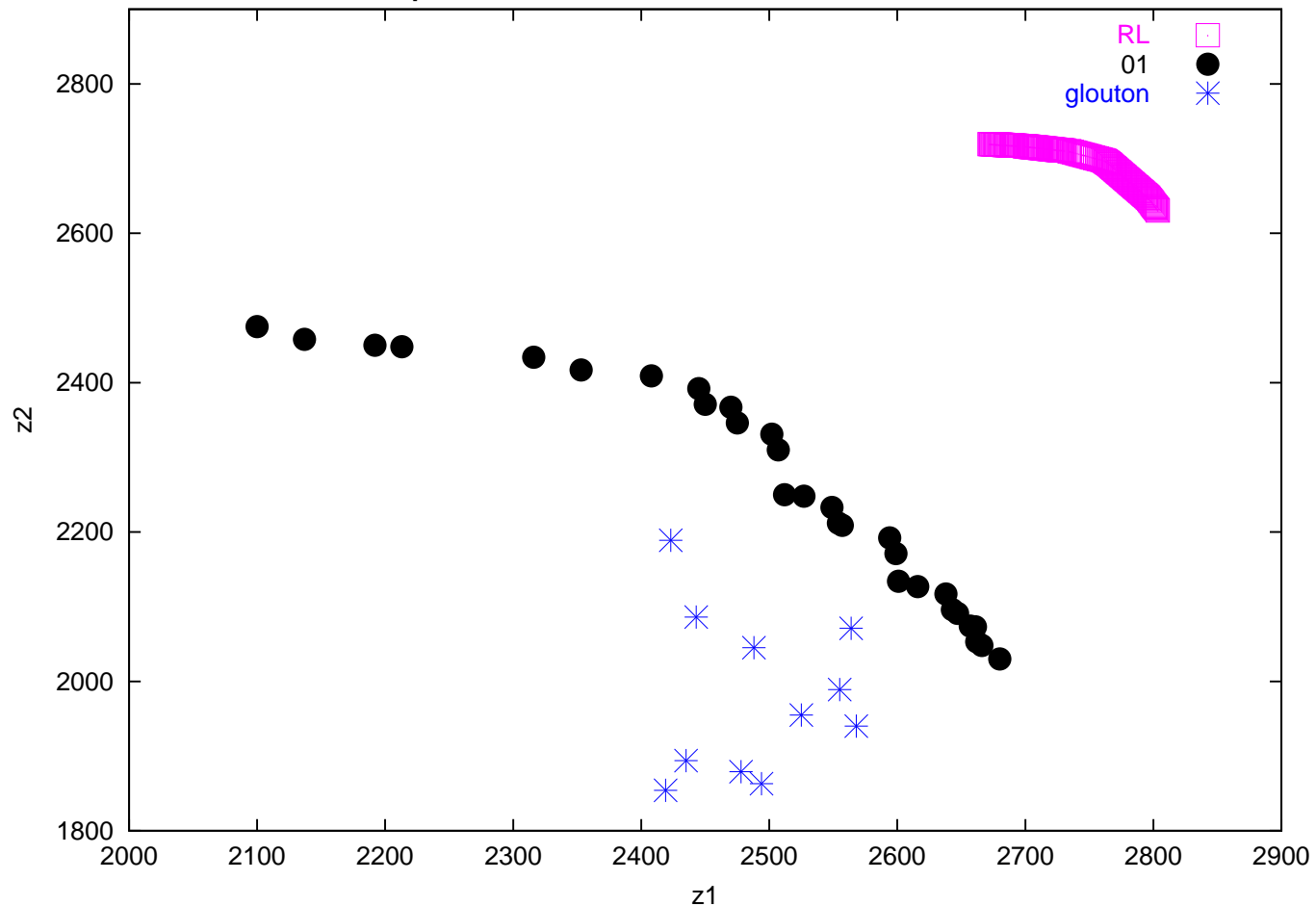
Résolution des instances mono-objectifs



Expérimentations : résolution exacte

Résolution des instances biobjectifs

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



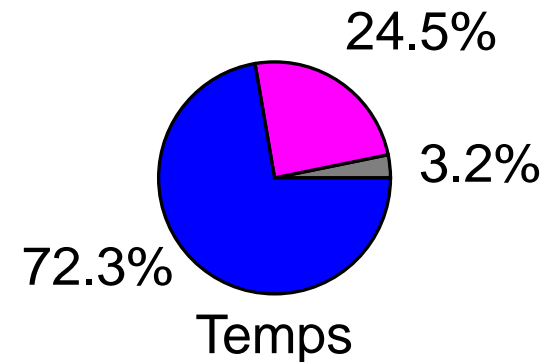
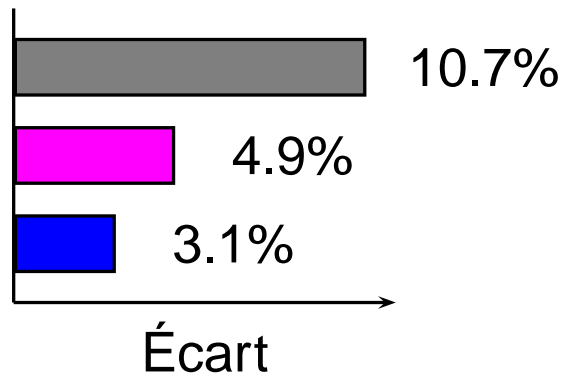
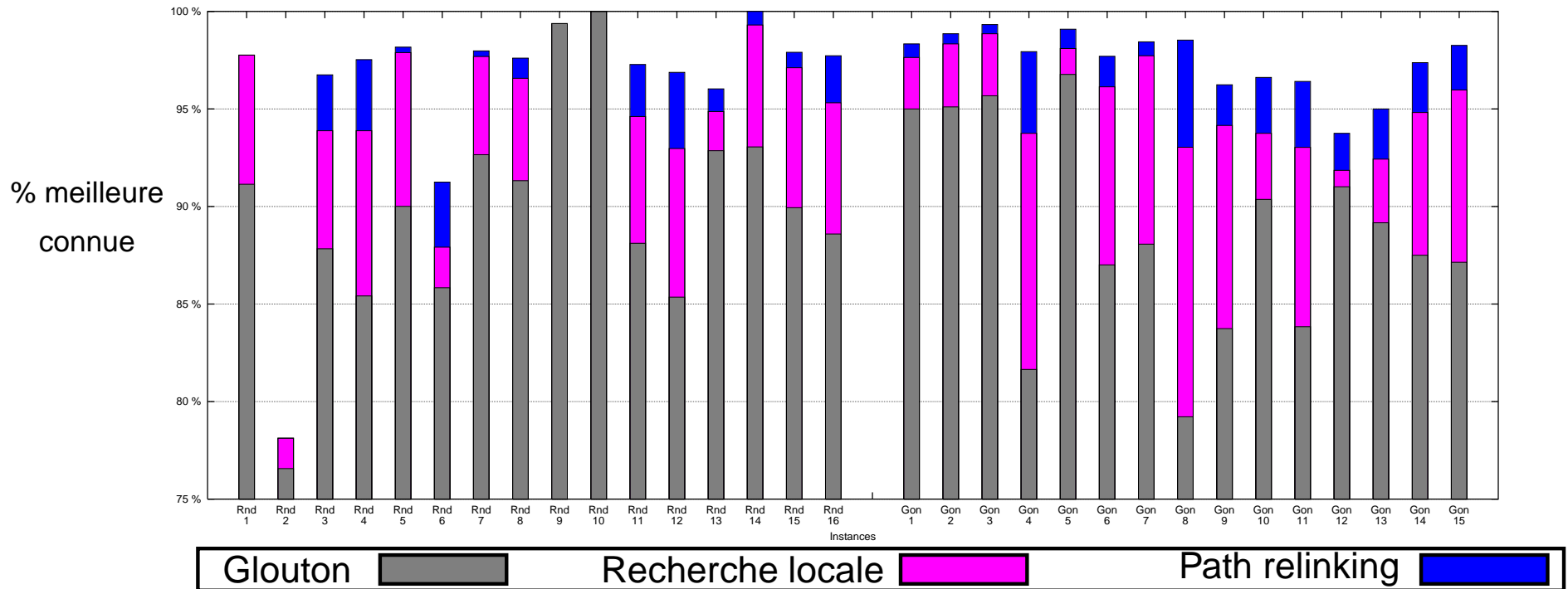
Expérimentations : résolution exacte

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

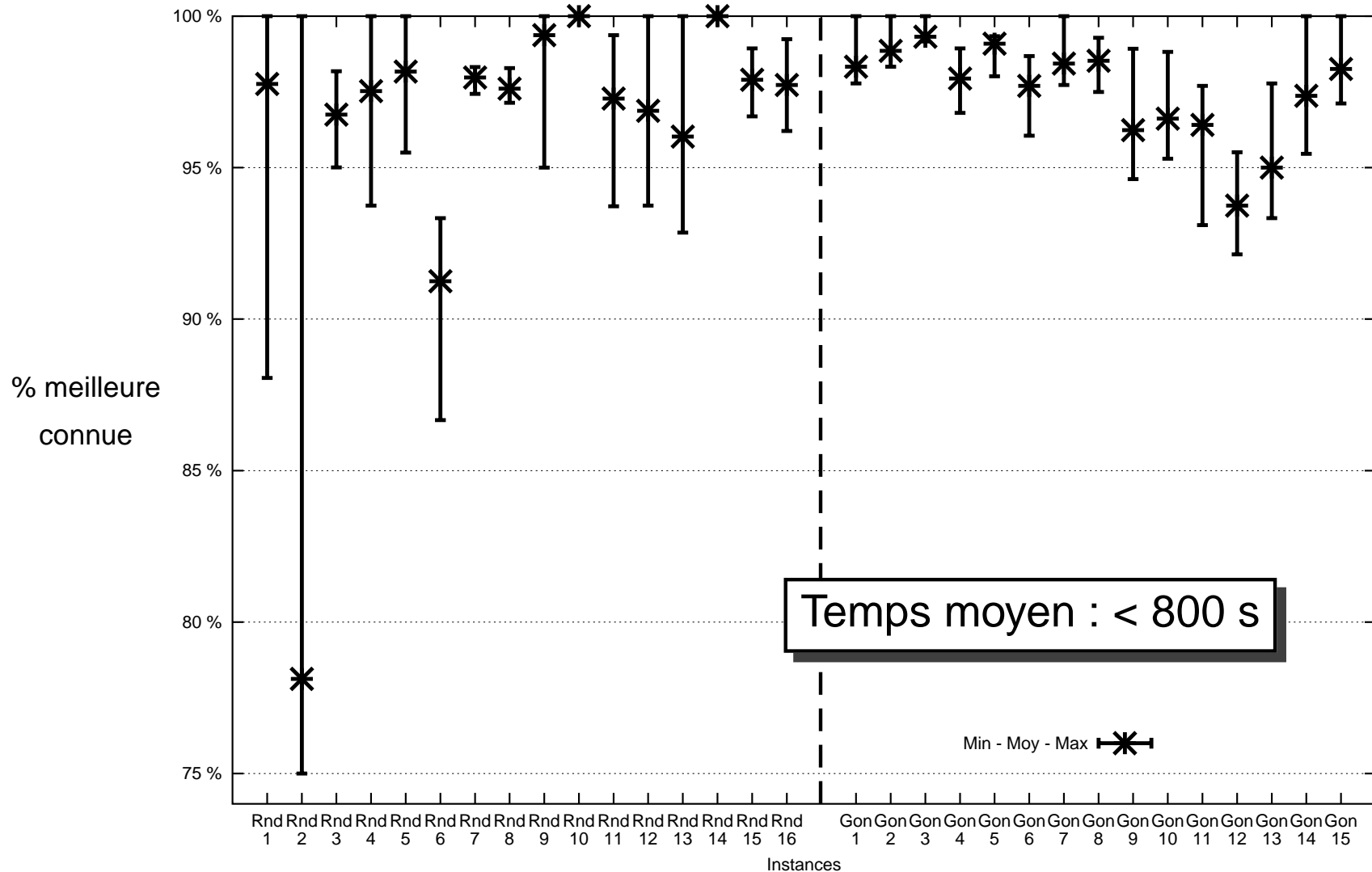
Expérimentations : résolution approchée

Impact de chaque phase de GRASP



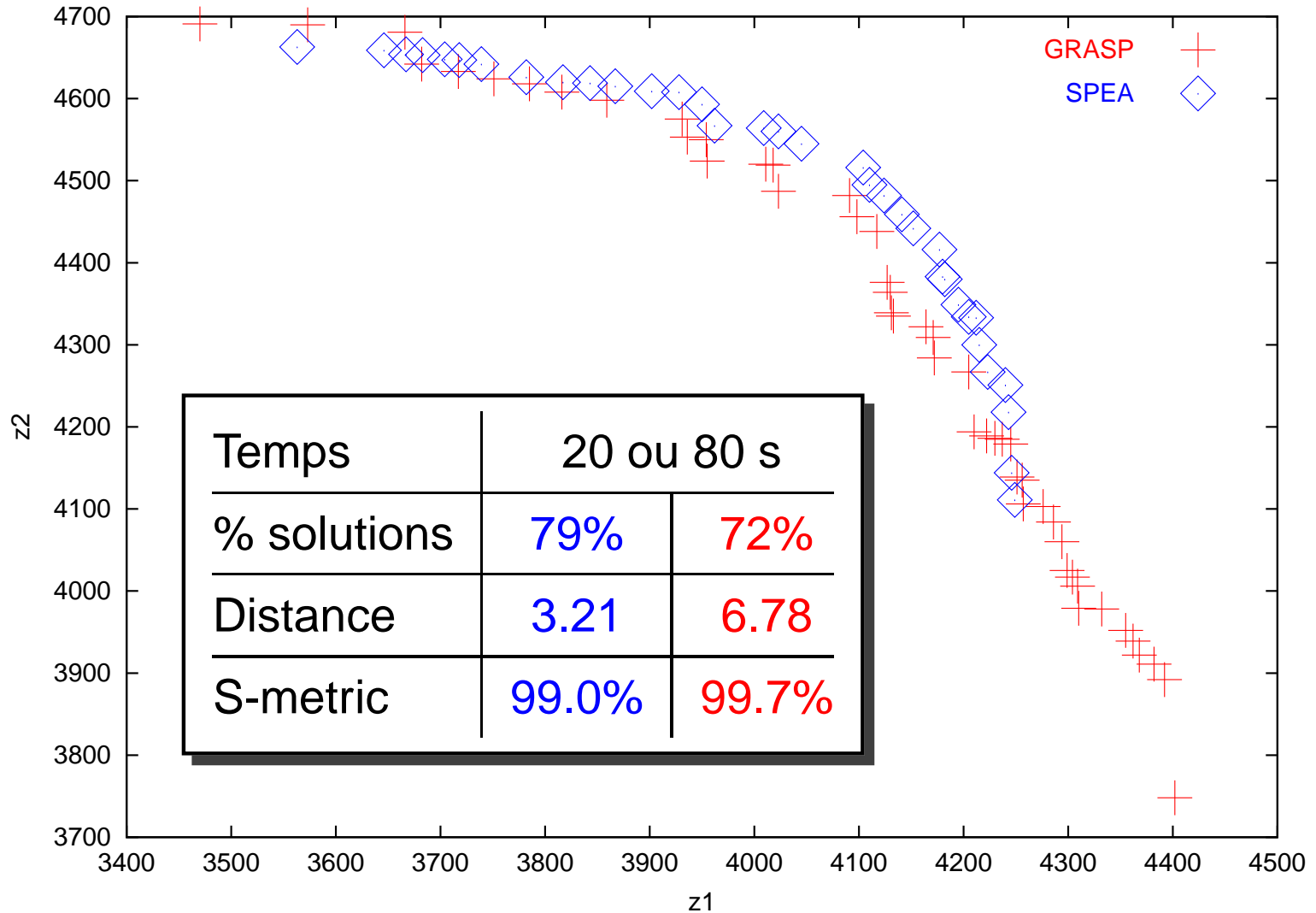
Expérimentations : GRASP

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

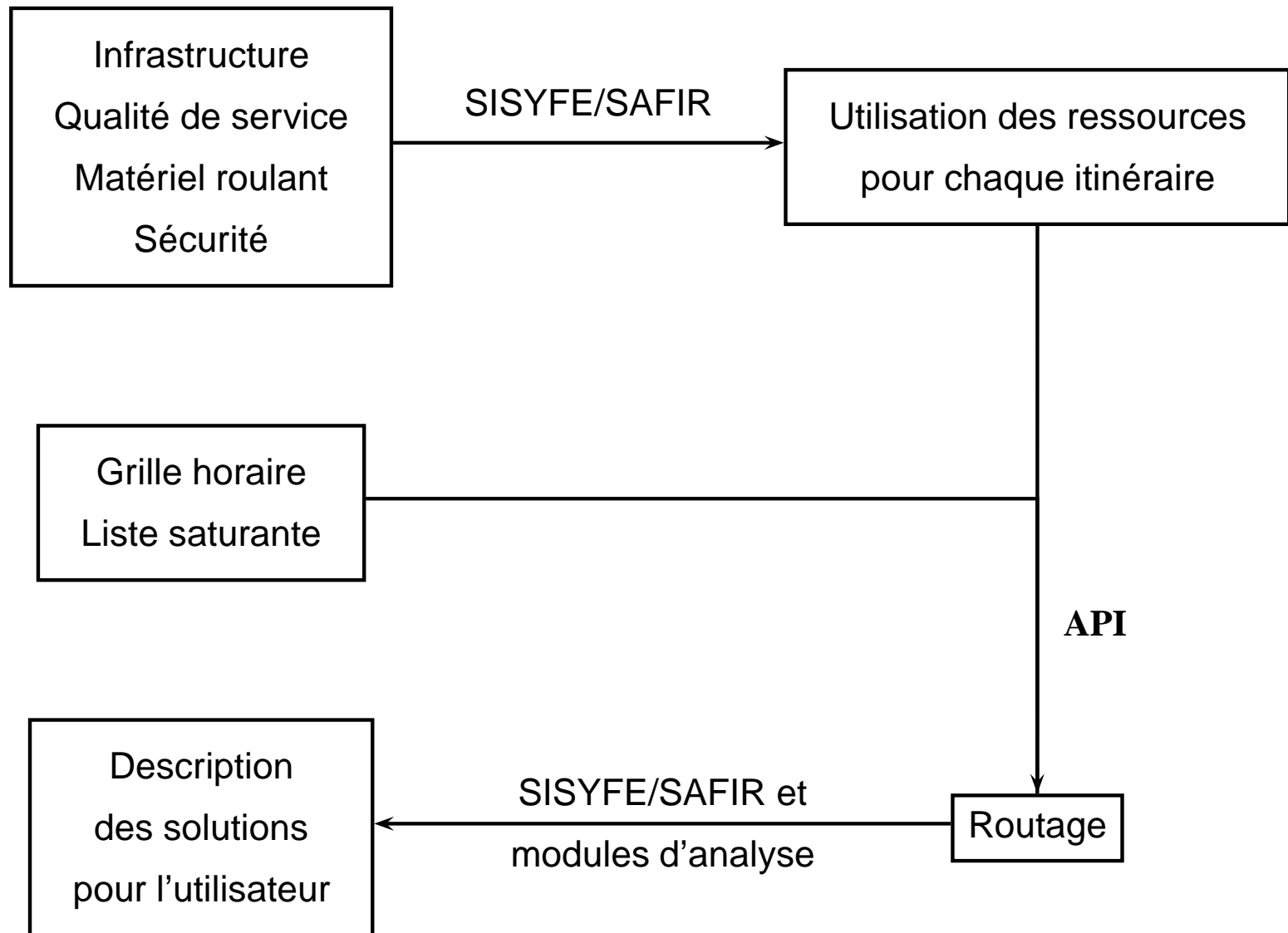
- ❑ Application régionale : gare de Lille-Flandres
- ❑ Complément à CAPRES ou DÉMIURGE
- ❑ Prolongement de SAFIR

Étapes préalables

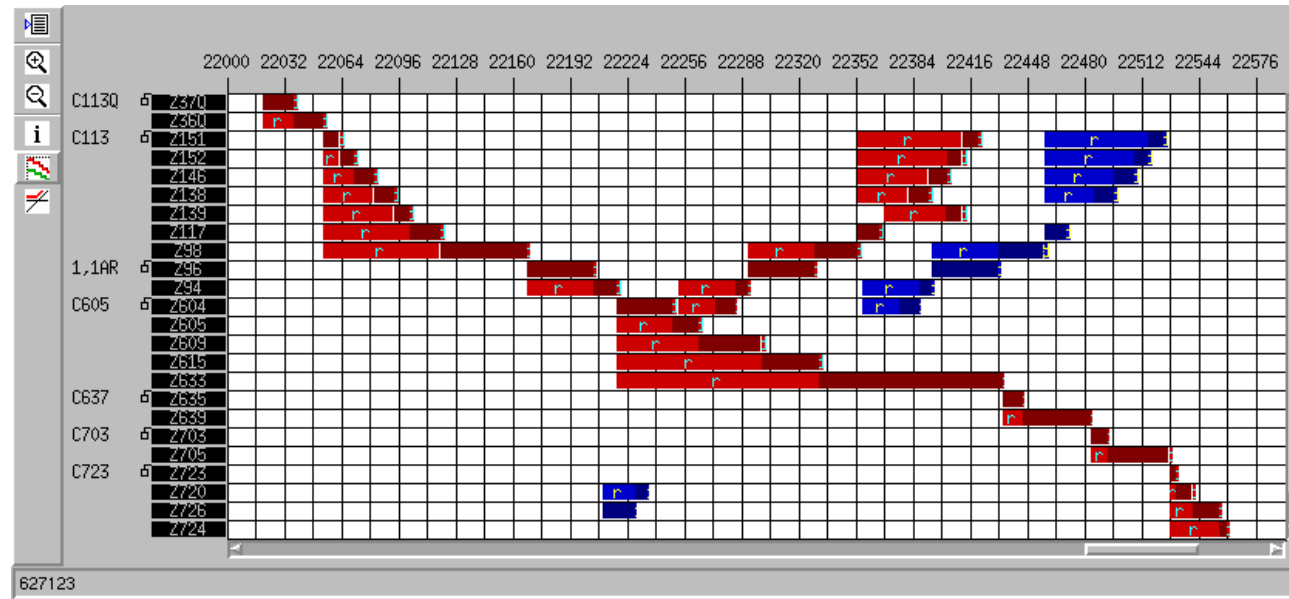
- ❑ Mise en forme des données
- ❑ Modélisation
- ❑ Résolution
- ❑ Analyse et/ou simulation

⇒ Outils d'aide à la décision

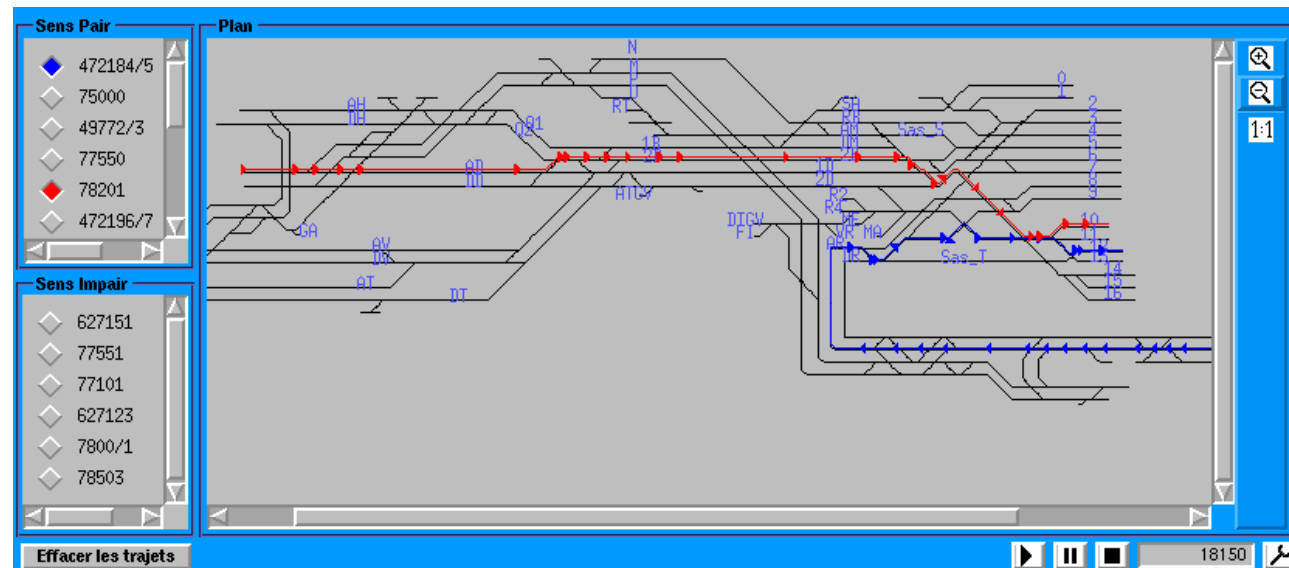
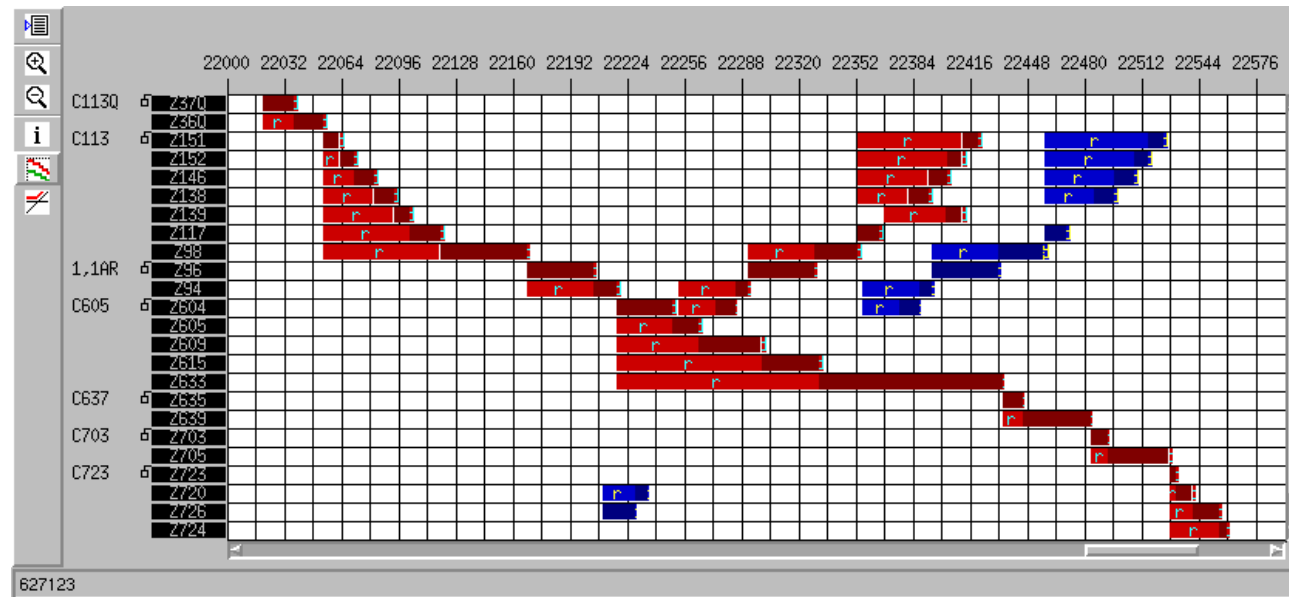
Projet RECIFE : architecture



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

