

ECOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE TOURS

Département Informatique

64 avenue Jean Portalis

37200 Tours, France

Tél. +33 (0)2 47 36 14 14

[polytech.univ-tours.fr](http://polytech.univ-tours.fr)

## Projet Recherche & Développement

2018-2019

# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF



### Entreprise

SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps



### Tuteurs entreprise

Romuald DETRUE

Guillaume BRANGER

Bruno LASNIER

### Étudiant

Benjamin POUVREAU (DI5)

### Tuteurs académiques

Ronan BOCQUILLON

Vincent T'KINDT

# Liste des intervenants

## Entreprise

SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps  
56 Avenue Pompidou  
37700 Saint Pierre des Corps  
[www.sncf.com/fr/reseau-et-expertises/direction-du-materiel](http://www.sncf.com/fr/reseau-et-expertises/direction-du-materiel)



| Nom               | Email                                                                                        | Qualité                                        |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Benjamin POUVREAU | <a href="mailto:benjamin.pouvreau@etu.univ-tours.fr">benjamin.pouvreau@etu.univ-tours.fr</a> | Étudiant DI5                                   |
| Ronan BOCQUILLON  | <a href="mailto:ronan.bocquillon@univ-tours.fr">ronan.bocquillon@univ-tours.fr</a>           | Tuteur académique,<br>Département Informatique |
| Vincent T'KINDT   | <a href="mailto:vincent.tkindt@univ-tours.fr">vincent.tkindt@univ-tours.fr</a>               | Tuteur académique,<br>Département Informatique |
| Romuald DETRUE    | <a href="mailto:romuald.detrue@sncf.fr">romuald.detrue@sncf.fr</a>                           | Tuteur entreprise                              |
| Guillaume BRANGER | <a href="mailto:guillaume.branger@sncf.fr">guillaume.branger@sncf.fr</a>                     | Tuteur entreprise                              |
| Bruno LASNIER     | <a href="mailto:bruno.lasnier@sncf.fr">bruno.lasnier@sncf.fr</a>                             | Tuteur entreprise                              |



# Avertissement

Ce document a été rédigé par Benjamin POUVREAU susnommé l'auteur.

L'entreprise SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps est représentée par Romuald DETRUE, Guillaume BRANGER et Bruno LASNIER susnommés les tuteurs entreprise.

L'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours est représentée par Ronan BOCQUILLON et Vincent T'KINDT susnommés les tuteurs académiques.

Par l'utilisation de ce modèle de document, l'ensemble des intervenants du projet acceptent les conditions définies ci-après.

L'auteur reconnaît assumer l'entière responsabilité du contenu du document ainsi que toutes suites judiciaires qui pourraient en découler du fait du non respect des lois ou des droits d'auteur.

L'auteur atteste que les propos du document sont sincères et assument l'entière responsabilité de la véracité des propos.

L'auteur atteste ne pas s'approprier le travail d'autrui et que le document ne contient aucun plagiat.

L'auteur atteste que le document ne contient aucun propos diffamatoire ou condamnable devant la loi.

L'auteur reconnaît qu'il ne peut diffuser ce document en partie ou en intégralité sous quelque forme que ce soit sans l'accord préalable des tuteurs académiques et de l'entreprise.

L'auteur autorise l'école polytechnique de l'université François Rabelais de Tours à diffuser tout ou partie de ce document, sous quelque forme que ce soit, y compris après transformation en citant la source. Cette diffusion devra se faire gracieusement et être accompagnée du présent avertissement.



## Pour citer ce document

Benjamin POUVREAU, *Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF*, Projet Recherche & Développement, Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, Tours, France, 2018-2019.

```
@mastersthesis{
  author={POUVREAU, Benjamin},
  title={Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de
    la SNCF},
  type={Projet Recherche \& Développement},
  school={Ecole Polytechnique de l'Université de Tours},
  address={Tours, France},
  year={2018-2019}
}
```



# Table des matières

|                                                              |          |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| Liste des intervenants                                       | a        |
| Avertissement                                                | b        |
| Pour citer ce document                                       | c        |
| Table des matières                                           | i        |
| Table des figures                                            | iv       |
| Liste des tableaux                                           | vi       |
| <b>1 Introduction</b>                                        | <b>1</b> |
| 1 Acteurs .....                                              | 1        |
| 2 Contexte et enjeux .....                                   | 1        |
| 3 Objectifs .....                                            | 2        |
| 4 Hypothèses .....                                           | 3        |
| 5 Bases méthodologiques .....                                | 3        |
| <b>2 Description générale</b>                                | <b>4</b> |
| 1 Environnement du projet .....                              | 4        |
| 2 Caractéristique des utilisateurs.....                      | 4        |
| 3 Fonctionnalités du système .....                           | 4        |
| 4 Structure générale du système .....                        | 5        |
| <b>3 État de l’art et veille</b>                             | <b>7</b> |
| 1 Méthodes d’ordonnancement en Recherche Opérationnelle..... | 7        |
| 2 Travaux d’ordonnancement ferroviaires .....                | 8        |

|          |                                             |           |
|----------|---------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>Analyse</b>                              | <b>9</b>  |
| 1        | Compréhension du besoin.....                | 9         |
| 2        | Analyse des contraintes du problème .....   | 10        |
| 2.1      | Criticité des incidents.....                | 10        |
| 2.2      | Planning des roulements .....               | 10        |
| 2.3      | Maintenance préventive .....                | 11        |
| 2.4      | Infrastructures .....                       | 11        |
| 2.5      | Sites de maintenance .....                  | 12        |
| 2.6      | Équipes de maintenance.....                 | 13        |
| 2.7      | Méthode de planification .....              | 13        |
| 2.8      | Changement de voies.....                    | 13        |
| 2.9      | Disponibilité des rames sur le réseau.....  | 14        |
| 2.10     | Opérations de maintenance corrective.....   | 14        |
| 2.11     | Accessibilité des sites de maintenance..... | 14        |
| 3        | Hypothèses retenues.....                    | 15        |
| 4        | Données du système .....                    | 16        |
| 5        | Objectif .....                              | 16        |
| <b>5</b> | <b>Conception</b>                           | <b>17</b> |
| 1        | Modélisation mathématique .....             | 17        |
| 1.1      | Présentation du modèle.....                 | 18        |
| 2        | Modélisation de l'application.....          | 19        |
| 2.1      | Architecture de l'application.....          | 19        |
| 2.1.1    | Module de résolution.....                   | 20        |
| 2.1.2    | Module d'import et d'export de données..... | 21        |
| 2.1.3    | Module de formatage des données.....        | 22        |
| <b>6</b> | <b>Mise en œuvre</b>                        | <b>23</b> |
| 1        | Outils et bibliothèques utilisés.....       | 23        |
| 1.1      | Langage .....                               | 23        |
| 1.2      | Environnement de développement .....        | 24        |
| 1.3      | Solveur .....                               | 24        |
| 1.4      | Autres bibliothèques.....                   | 24        |
| 2        | Implémentation .....                        | 24        |
| 2.1      | Choix techniques .....                      | 24        |
| 2.2      | Interface utilisateur .....                 | 25        |
| 2.3      | Format du résultat .....                    | 25        |
| 3        | Qualité .....                               | 26        |
| 4        | Résultats.....                              | 26        |

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>7 Bilan et conclusion</b>                             | <b>28</b>  |
| 1 Bilan du semestre 9 .....                              | 28         |
| 2 Planification du Semestre 10.....                      | 29         |
| 3 Bilan du semestre 10 .....                             | 29         |
| 4 Bilan du PRD .....                                     | 29         |
| <b>Annexes</b>                                           | <b>30</b>  |
| <b>A Spécifications fonctionnelles</b>                   | <b>31</b>  |
| 1 Fonction 1 : Importation des données d'entrée.....     | 31         |
| 2 Fonction 2 : Pré-traitement des données d'entrée ..... | 31         |
| 3 Fonction 3 : Solveur .....                             | 31         |
| 4 Fonction 4 : Mise en forme de la sortie .....          | 31         |
| 5 Fonction 5 : Représentation des données.....           | 31         |
| <b>B Spécifications non fonctionnelles</b>               | <b>32</b>  |
| 1 Performances .....                                     | 32         |
| 2 Capacités.....                                         | 32         |
| <b>C Gestion de projet</b>                               | <b>33</b>  |
| 1 Diagramme de Gantt .....                               | 34         |
| 2 Document de pilotage de projet.....                    | 35         |
| 3 Trello .....                                           | 36         |
| <b>D Cahier des charges</b>                              | <b>38</b>  |
| <b>E Formulation du problème</b>                         | <b>50</b>  |
| <b>F Modèle mathématique</b>                             | <b>64</b>  |
| <b>G Diagramme UML complet</b>                           | <b>70</b>  |
| <b>H Documentation utilisateur</b>                       | <b>72</b>  |
| <b>I Documentation développeur</b>                       | <b>83</b>  |
| <b>Comptes rendus hebdomadaires</b>                      | <b>103</b> |
| <b>Webographie</b>                                       | <b>109</b> |
| <b>Bibliographie</b>                                     | <b>110</b> |
| <b>Glossaire</b>                                         | <b>111</b> |

# Table des figures

## 1 Introduction

|   |                                        |   |
|---|----------------------------------------|---|
| 1 | Plan commercial des lignes H et K..... | 2 |
|---|----------------------------------------|---|

## 2 Description générale

|   |                                                             |   |
|---|-------------------------------------------------------------|---|
| 1 | Diagramme général des cas d'utilisation de la solution..... | 5 |
| 2 | Structure générale du système .....                         | 6 |

## 4 Analyse

|   |                                                                     |    |
|---|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Photographies d'infrastructures à Joncherolles.....                 | 12 |
| 2 | Photographies du technicentre de maintenance des Joncherolles ..... | 12 |
| 3 | Analyse des fréquentations des gares des lignes H et K.....         | 14 |

## 5 Conception

|   |                                                                          |    |
|---|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Diagramme UML global du Proof of Concept V1.6 .....                      | 20 |
| 2 | Exemple d'ajout d'un modèle de Programmation par Contraintes .....       | 21 |
| 3 | Modélisation de la base de données contenant les données constantes..... | 22 |

## 6 Mise en œuvre

|   |                                                                                                                   |    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Extrait du diagramme de Gantt du fichier de résultat généré .....                                                 | 25 |
| 2 | Extrait de la liste des affectations du fichier de résultat généré .....                                          | 25 |
| 3 | Données supplémentaires du fichier de résultat généré .....                                                       | 26 |
| 4 | Extrait de la documentation générée avec Doxygen.....                                                             | 26 |
| 5 | Résultats des tests sur les données réelles adaptées des signalements de la SNCF<br>du 1er au 5 janvier 2019..... | 27 |

**C Gestion de projet**

|   |                                                |    |
|---|------------------------------------------------|----|
| 1 | Diagramme de Gantt .....                       | 34 |
| 2 | Diagramme de Gantt .....                       | 34 |
| 3 | Fichier de pilotage de projet pour le S9 ..... | 35 |
| 4 | Trello en cours de S10.....                    | 37 |



# Liste des tableaux

## 4 Analyse

|   |                                                                                                        |    |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Exemple d'extrait de plan de roulement pour une rame.....                                              | 11 |
| 2 | Exemple d'accessibilité binaire aux sites de maintenance selon la gare .....                           | 15 |
| 3 | Exemple d'accessibilité en temps de trajet aux sites de maintenance selon la gare,<br>en minutes ..... | 15 |
| 4 | Délais de correction des incidents de criticité 4 à 6 .....                                            | 15 |

# 1

## Introduction

Ce document présente le travail effectué pour le Projet de Recherche et Développement "Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF".

Cette partie explicite le contexte du projet, ses enjeux et acteurs. Elle présente également les objectifs du projet, ses hypothèses et ses bases méthodologiques.

## 1 Acteurs

Ce projet a été proposé par l'équipe Recherche Opérationnelle : Ordonnancement et Transport (ROOT) du Laboratoire d'Informatique Fondamentale et Appliquée de Tours (LIFAT) à l'École Polytechnique de l'université de Tours.

Il est encadré par Messieurs Ronan BOCQUILLON et Vincent T'KINDT, Enseignants Chercheurs à l'École Polytechnique de Tours et membres de l'équipe ROOT du LIFAT.

Ce projet est effectué pour le Pôle de Saint-Pierre-des-Corps de l'Ingénierie du Matériel de la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF), représenté par Messieurs Romuald DETRUE et Bruno LASNIER, SET 2 pour l'Ingénierie du Matériel de la SNCF, et Monsieur Guillaume BRANGER, Responsable Technique du Pôle ICC Télédiagnostic pour l'Ingénierie du Matériel de la SNCF.

Il est exécuté par Benjamin POUVREAU, Élève Ingénieur en 5ème année à l'École Polytechnique de l'Université de Tours, spécialité Informatique, et rédacteur du présent rapport.

## 2 Contexte et enjeux

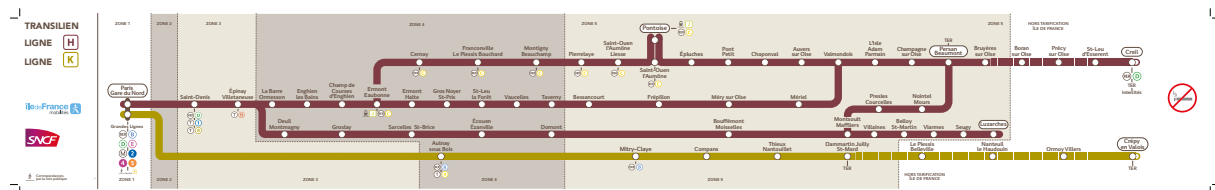
Le technicentre de maintenance des Joncherolles, situé en Seine-Saint-Denis à huit kilomètres de la Gare du Nord à Paris, a en charge la maintenance de la flotte des rames des lignes H et K, deux lignes transiliennes desservant le nord de l'île de France. Sur ces lignes transitent des rames capables de communiquer en temps réel l'état de leurs différents organes, et de signaler les divers incidents détectés au centre de contrôle. Les signalements peuvent également émaner du personnel de la SNCF.

Chaque matin, à partir des incidents signalés, un employé de la SNCF est chargé de planifier les opérations de maintenance corrective à effectuer sur les rames. Ces opérations présentent

différents niveaux de criticité et nécessitent diverses ressources, humaines et matérielles. L'employé doit donc prendre en compte l'ensemble de ces paramètres en plus de diverses contraintes, comme par exemple le planning de roulement des rames, pour ordonnancer au mieux les opérations de maintenance sur les rames des lignes H et K. Cette planification nécessite 1H30 chaque matin pour l'employé.

La SNCF recherche donc à créer un outil d'aide à la décision permettant de proposer des solutions d'ordonnancement des opérations de maintenance corrective sur les rames. Cela permettra d'une part de faire gagner du temps à l'employé chargé de la planification, et d'autre part de proposer des solutions de planification optimales.

A long terme, la SNCF souhaite généraliser l'utilisation d'un tel outil de décision pour l'ensemble de son réseau. En effet, l'optimisation de la maintenance des rames permet d'assurer une meilleure disponibilité des rames pour le réseau, et assure une meilleure longévité au matériel.



**Figure 1** – *Plan commercial des lignes H et K*

### 3 Objectifs

Le Pôle Ingénierie du Matériel de la SNCF souhaite mettre en place un outil d'aide à la décision permettant d'ordonnancer les opérations de maintenance corrective des rames des lignes H et K du Transilien. Ce Projet de Recherche et Développement intervient dans le cadre du développement de cet outil, et a pour objectif principal de trouver des solutions permettant de planifier ces opérations de maintenance, pour les incidents présentant une criticité moyenne à élevée, de J à J+7 jours.

Les signalements induisent une date limite de résolution de l'incident affectant la rame, par le biais de la planification des opérations de maintenance nécessaires à cette résolution. L'objectif principal de la solution est de minimiser le retard des opérations de maintenance par rapport à ces dates dues, afin de minimiser le nombre de rames immobilisées et d'assurer ainsi le meilleur service aux usagers des lignes H et K.

Dans un premier temps, il faut analyser et comprendre les besoins de la SNCF, afin de les formaliser pour permettre de proposer une solution répondant à la problématique d'ordonnancement des opérations de maintenance préventive de la façon la plus pertinente.

Dans un deuxième temps, un état de l'art doit être effectué, afin de prendre connaissance de l'existant concernant le domaine de l'ordonnancement de trains ou d'opérations de maintenance. Ainsi la solution pourrait s'appuyer sur ces travaux pour proposer ses solutions.

La troisième étape est la formulation et la modélisation mathématique du problème, en prenant en compte ses objectifs et ses contraintes.

La quatrième étape est l'utilisation de ces modèles dans un solveur pour tester les premiers résultats sur des données test.

La cinquième étape est de proposer des algorithmes permettant de résoudre au mieux le problème d'ordonnancement, et de les tester en les implémentant dans un langage de programmation approprié. Ces algorithmes seront ensuite fournis à la SNCF.



## 4 Hypothèses

Au cours de ce projet, différentes approches de Recherche Opérationnelle seront étudiées pour répondre au mieux à la problématique de la SNCF. Nous conserverons l'approche nous permettant d'avoir les meilleurs résultats, de la façon la plus performante.

Lors de la réalisation du projet, nous tenterons tout d'abord de résoudre le problème avec un solveur existant, tel que CPLEX. Si le solveur n'est pas suffisant pour répondre au problème, nous implémenterons et testerons différents algorithmes de résolution, en utilisant des langages tels que le C ou le C++.

## 5 Bases méthodologiques

Le projet fonctionne de façon itérative. Une première modélisation mathématique simplifiée, ne prenant pas toutes les contraintes en compte, sera réalisée et proposée à la SNCF. Le modèle sera ensuite enrichi, par l'ajout de contraintes plus spécifiques et grâce aux retours du Pôle d'Ingénierie du Matériel de la SNCF. Chaque nouvelle itération du modèle sera alors présentée au client, puis améliorée de la même façon, afin de mettre en place la solution répondant le mieux aux besoins du client.

Une gestion des versions est mise en place sur le projet. Chaque document produit sera versionné, et les précédentes versions sont conservées et archivées. Le projet dispose d'un dépôt SVN sur le serveur SVN de Polytech Tours, permettant une meilleure gestion des versions dans une solution sécurisée et privée.

Un cahier des charges est mis en place avec la SNCF, pour permettre une formalisation de la demande du client.

Des comptes-rendus hebdomadaires sont adressés par mail aux encadrants académiques, et des points sur l'avancée du projet sont régulièrement envoyés par mail au client.

Un document de pilotage est utilisé pour visualiser les séances prévues de PRD et garder une trace du travail effectué à chaque séance ainsi que noter les jours de réunion. Ce document est consultable dans la section **Document de pilotage de projet** de l'annexe **Gestion de projet**.

# 2

## Description générale

### 1 Environnement du projet

Pour générer sa solution d'ordonnancement, le projet utilisera les données générées par Rexmat, un logiciel de la SNCF permettant de gérer les signalements d'incidents des rames. Le projet utilisera également les données de roulement des rames ainsi que le planning des maintenances préventives des rames et les données d'infrastructure des sites de maintenance des lignes H et K.

Cependant, le projet ne sera pas intégré dans un système d'information dans le cadre de ce PRD, puisque sa vocation est la recherche de solutions d'ordonnancement et la production d'un proof of concept, et non la production d'un outil logiciel à proprement parler.

### 2 Caractéristique des utilisateurs

On peut identifier deux types d'utilisateurs principaux pour le projet. En premier lieu, les ingénieurs en informatique du Pôle d'Ingénierie du Matériel de la SNCF à Saint-Pierre-des-Corps. Ils utiliseront les modélisations et algorithmes pour la mise en place de l'outil d'aide à la décision. Ils disposent d'une forte expertise en informatique et suivent de près l'évolution du projet.

Nous pouvons également identifier l'employé SNCF en charge de la planification des opérations de maintenance des lignes H et K. Il pourrait être amené à utiliser le proof of concept afin de donner son retour sur les solutions générées. On considère que cet utilisateur dispose de connaissances basiques en informatique.

### 3 Fonctionnalités du système

La solution produite pourra être utilisée par l'employé SNCF en charge de l'ordonnancement des opérations de maintenance, pour recueillir son retour d'expérience sur les résultats proposés par la solution. Il devra pour cela charger les fichiers de données nécessaires à l'algorithme, le démarrer et récupérer les résultats. S'il est satisfait des résultats, il pourra décider d'appliquer

cet ordonnancement. Autrement, il pourra s'appuyer sur les résultats produits pour proposer l'ordonnancement qui le satisfait le plus.

Les ingénieurs pourront, quant à eux, utiliser les algorithmes produits pour les intégrer dans une solution logicielle.

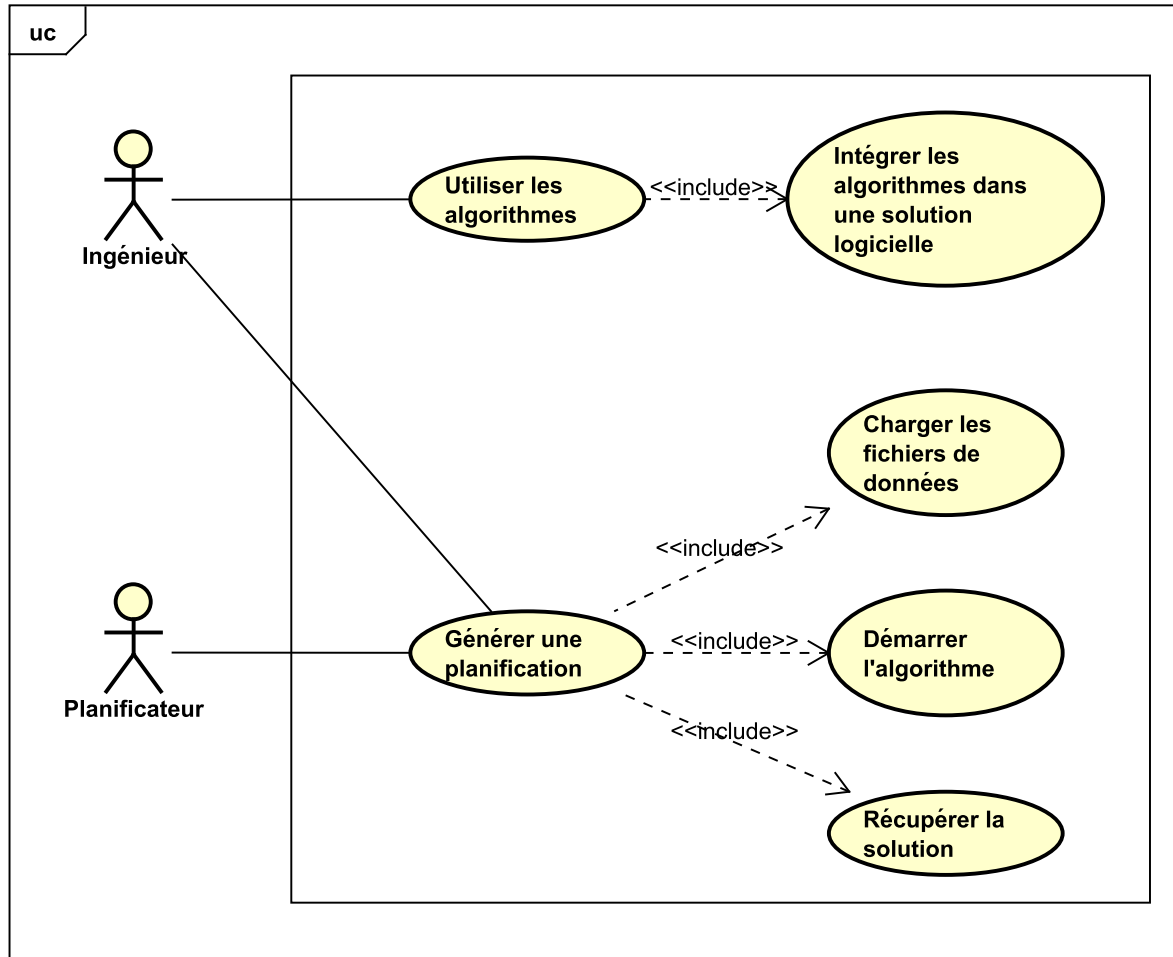


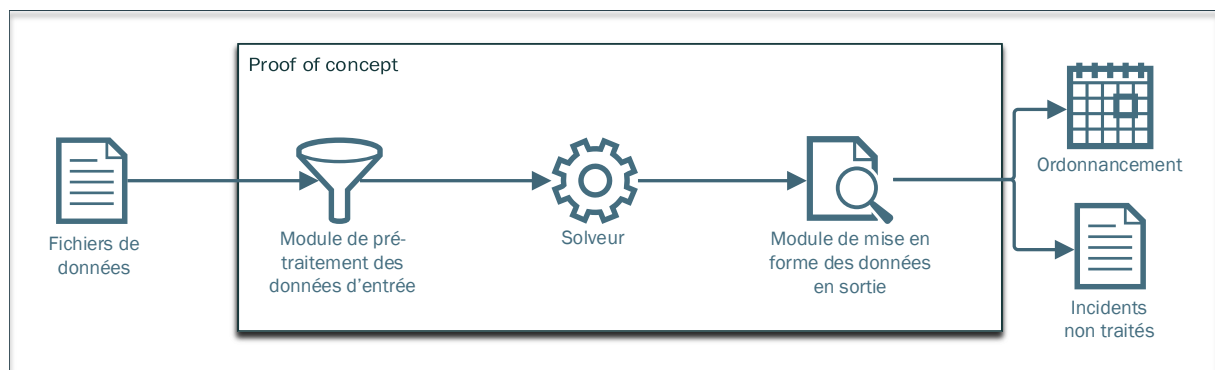
Figure 1 – Diagramme général des cas d'utilisation de la solution

## 4 Structure générale du système

Un proof of concept sera réalisé pour tester les solutions. Les fichiers de données brutes lui seront fournis en entrée. Un module aura ensuite la charge de pré-traiter les données, pour les rendre utilisables par le solveur.

Le solveur peut être un solveur existant, comme CPLEX, ou une implémentation des algorithmes de résolution qui auront été proposés et conçus pour ce projet. Il a à charge la résolution du problème d'ordonnancement.

Les données brutes de la solution du solveur seront ensuite transmises à un module permettant de les mettre en forme et de sortir l'ordonnancement des opérations de maintenance ainsi que les incidents n'ayant pas pu être traités.



**Figure 2 – Structure générale du système**

# 3

## État de l'art et veille

### 1 Méthodes d'ordonnancement en Recherche Opérationnelle

La première étape du Projet de Recherche et Développement a été de revoir les méthodes générales de résolution de problématiques d'ordonnancement en Recherche Opérationnelle. Pour cela, le cours d'Aymen Sioud [3] a été étudié.

Il existe deux principales approches de résolution de problèmes d'ordonnancement :

- **La Programmation Linéaire Standard (PLS) :** Cette approche consiste en la modélisation du système sous la forme d'une équation linéaire à minimiser, appelée "fonction objectif", avec les contraintes écrites comme des équations ou inéquations. Voici un exemple de modélisation de PLS :

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= ax_1 + bx_2 + cx_3 \\ x_1 &\leq \alpha \\ x_2 &\leq \beta \\ x_2 + x_3 &\leq \gamma \\ x_1, x_2, x_3 &\in X \\ a, b, c &\in \mathbb{R} \end{aligned}$$

On cherche à trouver les variables  $x_i$  telles que le résultat de la fonction objectif  $z$  soit minimal.

- **La Programmation par Contraintes (PPC) :** Il s'agit d'une méthode utilisée pour formuler et résoudre des problèmes combinatoires, c'est à dire des problèmes ayant des solutions dans un ensemble discret. Cette approche combine la Recherche Opérationnelle avec l'Intelligence Artificielle et l'Informatique et est particulièrement appréciée pour résoudre des problèmes d'ordonnancement. Un problème formulé en PPC est représenté par  $n$  variables  $X_i$  disposant chacune d'un domaine  $D_i$  de valeurs possibles, et soumises à  $m$  contraintes  $C_m$ . La résolution se fait ensuite par exploration des différentes solutions possibles à l'aide d'algorithmes tels que *Backtrack Search* ou *Branch and Bound*.

Il faudra tester les deux approches et sélectionner celle qui permettra d'obtenir les meilleurs résultats, de la façon la plus performante.

## 2 Travaux d'ordonnancement ferroviaires

Il existe de nombreux problèmes d'ordonnancement relatifs au monde ferroviaire, comme le montre Tomas Lidén dans son étude sur le sujet [2]. Cependant, il n'existe pas de problème similaire à celui de l'ordonnancement des opérations de maintenance corrective des rames exploitant des données de signalement mises à jour en temps réel. Le rapport expose principalement des problèmes d'ordonnancement d'opérations de maintenance sur les infrastructures du réseau ferroviaire, et non concernant les rames.

Il existe dans la littérature une thèse sur l'ordonnancement des opérations de maintenance préventive, présentée par Ronald Paulus Evers [1]. Bien que le problème soit différent, il permet de donner des pistes de modélisation et des techniques de résolution, avec l'utilisation et la mise en pratique de différentes approches de résolution.

# 4

## Analyse

### 1 Compréhension du besoin

La première étape du Projet de Recherche et Développement a été d'aller à la rencontre de la SNCF, afin de comprendre le contexte du projet, ses enjeux et les besoins du client. Le jeudi 20 septembre 2018, M. Ronan BOCQUILLON et moi avons rencontré M. Romuald DETRUE dans les locaux du pôle d'Ingénierie du Matériel de la SNCF de Saint-Pierre-des-Corps. M. DETRUE occupe le poste de SET 2 au sein de la SNCF. Le pôle au sein duquel il travaille s'occupe notamment d'un nouveau système de supervision des rames en temps réel, permettant de vérifier l'état des organes des rames de la flotte de la SNCF et de contrôler les signalements provenant des différentes rames. M. DETRUE nous a alors expliqué le contexte du projet, ses enjeux et sa problématique.

L'outil de supervision de flotte est entre autres apparu après que les lignes H et K se sont dotées de rames de nouvelle génération à partir de fin 2009, avec l'arrivée des Z50000, aussi appelées "NAT" pour "Nouvelle Automotrice Transilien". [WWW1] Ce matériel est capable de communiquer en temps réel l'état de ses organes au centre de contrôle. Suite à la mise en place de cet outil de supervision de flotte et à l'augmentation du trafic sur les lignes du Transilien, la SNCF souhaite mettre en place un outil permettant d'ordonnancer les opérations de maintenance corrective des rames. Cela devient en effet difficile pour les employés chargés de cette planification de réaliser cet ordonnancement en raison du grand volume de données d'entrée fournis par le système de supervision. Il est également nécessaire d'assurer la bonne santé du réseau de la SNCF, afin d'assurer une meilleure longévité des rames et la stabilité du service.

La première étape de la création de l'outil d'ordonnancement des opérations de maintenance corrective est donc de trouver une solution permettant d'ordonnancer ces opérations sur une échelle réduite, avec le réseau des lignes H et K du Transilien. Ce réseau présente la particularité d'être géré par un unique technicentre de maintenance, celui des Joncherolles. En effet, la plupart du temps, les rames de la SNCF nécessitent d'utiliser différents technicentres de maintenance à travers la France, selon les opérations nécessaires. Pour les lignes H et K, Joncherolles est capable d'effectuer l'entretien complet des rames, ce qui simplifie le problème.

Le besoin du client pour ce PRD est donc d'obtenir des modèles et algorithmes permettant d'ordonnancer les opérations de maintenance corrective de ces rames, afin de les intégrer au futur outil.

Le cahier des charges présenté dans l' **Annexe D** a été un élément décisif pour comprendre le problème de la SNCF. Il a permis de formaliser la demande du client et d'apporter des premiers éléments d'analyse et de spécifications, ainsi que de tout faire valider par le client.

## 2 Analyse des contraintes du problème

Le problème d'ordonnancement des opérations de maintenance corrective sur les rames des lignes H et K est soumis à différentes contraintes, qu'il a fallu faire émerger des rencontres avec les acteurs de la SNCF et par l'analyse des données transmises. Ce travail a occupé la majeure partie de ce semestre, car chaque nouvelle rencontre avec la SNCF et chaque nouveau fichier de données fournis faisait émerger ou modifier des contraintes du problème. Cette section du rapport présente les différentes contraintes étudiées au cours des différentes analyses, qu'elles aient été conservées ou abandonnées.

Le document de formulation du problème, proposé en **Annexe E**, a permis de poser l'analyse du problème avec une première réflexion sur la façon de présenter le problème et de pré-traiter les données. La version présentée en annexe n'est pas à jour par rapport aux spécifications récentes, mais permet d'avoir un aperçu de la méthode d'analyse et de représentation des données.

### 2.1 Criticité des incidents

Les incidents impactant les rames ont différents niveaux de criticité, de 0 à 6, de la moins importante à la plus importante.

Certains niveaux de criticité induisent des temps maximums de traitement de la défaillance, ce qui ajoute des dates dues à la planification. Les criticités 5 et 6 ont un délai maximum de 72h et 24h respectivement.

Une criticité 4 est généralement traitée en rentrée naturelle, c'est-à-dire une rentrée sur un site de maintenance, prévue par le planning de roulement. En effet, les rames rentrent régulièrement sur les sites de maintenance, même sans avoir besoin de subir des opérations de maintenance. Cependant, une date due leur est souvent assignée par l'employé en charge de la planification des opérations de maintenance.

Les criticités 1 à 3 sont traitées lors des rentrées naturelles des rames uniquement, et une criticité 0 indique une simple information.

Une rame qui n'a pas pu être rentrée sur un site de maintenance avant sa date due subit des restrictions d'utilisation et est généralement stockée sur un site de garage avant d'être prise en charge par un site de maintenance, ou "accouplée" à une autre rame pour circuler en tandem.

A l'heure actuelle, en moyenne, 92,5% des rames en criticité 6 et 89,7% en criticité 5 sont rentrées avec succès avant la date due.

### 2.2 Planning des roulements

Le planning de roulement des rames identifie, pour chaque **rame** des lignes H et K, les **roulements** qu'elles devront effectuer. Ce planning identifie les lieux de départ et d'arrivée de la rame, le nombre de kilomètres effectués, les dates de départ et d'arrivée ainsi que le numéro de **train** associé au roulement.

Le plan de roulement permet d'identifier les périodes d'inactivité des rames, c'est à dire les périodes pendant lesquelles elles n'ont pas de service à assurer et peuvent potentiellement



bénéficier d'opérations de maintenance. Il nous permet également d'identifier la position de la rame entre deux roulements.

Les services commerciaux, ou **trains**, doivent absolument être respectés. Parfois, lorsque l'employé en charge de l'ordonnancement des opérations de maintenance corrective effectue sa planification, il arrive qu'il doive intervertir deux rames sur le plan de roulement, afin d'assurer qu'il soit respecté et que la rame endommagée puisse recevoir les correctifs nécessaires dans les temps.

**Table 1** – Exemple d'extrait de plan de roulement pour une rame

| STF | Rame | train  | date_train | heure_depart      | heure_arrivee     | km_total | lieu_dep | lieu_arr |
|-----|------|--------|------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|
| SPN | 01H  | 796904 | 06/09/2018 | 06/09/2018 06 :17 | 06/09/2018 06 :27 | 3        | PCH-G2   | PNB-BV   |
| SPN | 01H  | 746407 | 06/09/2018 | 06/09/2018 06 :38 | 06/09/2018 07 :04 | 18       | PNB-BV   | SLF-BV   |
| SPN | 01H  | 124006 | 06/09/2018 | 06/09/2018 07 :16 | 06/09/2018 07 :44 | 18       | SLF-BV   | PNB-BV   |
| SPN | 01H  | 746417 | 06/09/2018 | 06/09/2018 07 :53 | 06/09/2018 08 :19 | 18       | PNB-BV   | SLF-BV   |

## 2.3 Maintenance préventive

Les rames sont soumises à des opérations de maintenance préventive. Ces opérations régulières sont programmées tous les X km ou Y H d'utilisation des rames, et doivent absolument être effectuées avant ces dates dues, sous peine d'immobilisation de la rame.

Pour ce faire, des créneaux réservés à la maintenance préventive sont planifiés plusieurs semaines à l'avance sur le technicentre de Joncherolles et doivent obligatoirement être respectés. Ainsi, il est possible d'intervertir la rame planifiée pour ce créneau avec une autre rame sur laquelle une opération de maintenance préventive doit être effectuée. Cependant, un créneau de maintenance préventive doit être honoré et ne peut donc pas être remplacé par de la maintenance corrective. En cas d'intervention de rames, sur ces créneaux, il est nécessaire de prendre en compte les dates dues des opérations de maintenance préventive des rames échangées, afin de ne pas les dépasser.

## 2.4 Infrastructures

Les lignes H et K utilisent trois types d'infrastructures pour effectuer des opérations de maintenance sur les rames.

- **Les fosses** : Ces infrastructures consistent en des fosses placées sous les rails de la voie de maintenance. Elles permettent de réaliser des opérations de maintenance sur les organes situés sur la partie basse des rames, notamment les organes de roulement.
- **Les passerelles** : Il s'agit de passerelles disposées sur les côtés de la voie de maintenance, permettant d'effectuer des opérations de maintenance sur la partie supérieure des rames.
- **Les terre-pleins** : Ces infrastructures sont les plus répandues. Il s'agit d'une voie de garage classique, permettant d'effectuer toutes les opérations de maintenance ne nécessitant pas une fosse ou une passerelle.

Au technicentre des Joncherolles, chaque voie disposant d'une passerelle dispose également d'une fosse.



(a) Rame NAT sur un terre-plein à Joncherolles - Par Lunon92 — Photographie personnelle, CC BY-SA 3.0, [com-mons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14844046](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14844046)



(b) Rame Z6100 sur une fosse à Joncherolles - Par Clicsouris — Photographie personnelle, CC BY-SA 3.0, [com-mons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9791279](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9791279)

**Figure 1** – Photographies d’infrastructures à Joncherolles

## 2.5 Sites de maintenance

Les lignes H et K disposent de trois sites sur lesquels il est possible d’effectuer de la maintenance corrective :

- **Le technicentre de maintenance des Joncherolles** : Il s’agit du site de maintenance principal, rattaché à la gare de Saint Denis. Il dispose des trois types d’infrastructures et est capable d’effectuer toutes les opérations de maintenance corrective nécessaires sur les rames des lignes H et K. C’est également sur ce site que sont planifiées les maintenances correctives.
- **Le dépôt de Crépy-en-Valois** : Rattaché à la gare du même nom, il s’agit d’un terminus de la ligne K. Ce dépôt ne dispose que d’infrastructures de type terre-plein.
- **Le dépôt de Persan-Beaumont** : Rattaché à la gare du même nom. Il s’agit d’un terminus de la ligne H. Il ne dispose également que d’infrastructures de type terre-plein.



(a) Entrée du technicentre des Joncherolles - Par Chris93 — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, [com-mons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27232821](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27232821)



(b) Dépôt des Joncherolles - Par Claude villetaneuse — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, [com-mons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9793485](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9793485)

**Figure 2** – Photographies du technicentre de maintenance des Joncherolles

Chacun de ces sites de maintenance dispose de contraintes qui lui sont propres, comme par exemple le stock des pièces de rechange, le nombre d’équipes de maintenance affectées, une capacité de traitement d’incidents, un nombre maximum de rentrées de rames, etc. Ces sites

fonctionne de jour comme de nuit. Ainsi, le site des Joncherolles dispose d'une capacité limitée de traitement d'incidents, selon le type d'infrastructures nécessaire pour les résoudre : fosse, passerelle ou terre-plein. Il est également limité en nombre de rentrées : le site autorise un maximum de 9 rentrées de rames le matin et 7 le soir.

## 2.6 Équipes de maintenance

Les opérations de maintenance au sein des différents sites sont réalisées par des équipes spécialisées. Chaque équipe est rattachée à un seul site de maintenance. On peut distinguer deux types d'équipes différentes :

- **Équipes de dépannage** : Ces équipes polyvalentes sont qualifiées pour réaliser toutes les opérations de maintenance corrective pour les incidents de criticité 4 à 6.
- **Équipes de maintenance classiques** : Ces équipes sont qualifiées pour réaliser diverses opérations de maintenance, dont celle permettant de corriger les incidents de criticité 0 à 3. Ces équipes ne disposent pas toutes des mêmes qualifications.

Le mode de travail des équipes est par tranches de 3 fois 8 heures : des équipes travaillent sur le créneau du matin, d'autres sur celui de l'après-midi et enfin les dernières sur le créneau nocturne.

Lors des premières analyses, avant de rencontrer le personnel en charge de la planification des opérations de maintenance corrective à Paris, nous avons fait l'hypothèse que l'on devait prendre en compte le nombre d'équipes des sites de maintenance, leurs qualifications ainsi que leurs disponibilités. Cependant, la planification effectuée par le planificateur ne s'occupe pas de l'affectation des équipes aux opérations de maintenance. On considère donc que les trois sites disposent d'équipes en nombre suffisant pour réaliser les opérations de maintenance, dans la limite de la capacité de chacun des sites.

## 2.7 Méthode de planification

L'employé en charge de la planification utilise actuellement une méthode de planification manuelle, à l'aide d'un fichier Excel. La granularité du temps à l'échelle de 24h et en demi-journées : jour et nuit. L'employé planifie les entrées et les sorties des rames le jour et la nuit pour une date donnée, ainsi que le type d'opération à effectuer.

Afin de permettre un maximum de robustesse de la solution proposée, il ne faudra pas utiliser une granularité temporelle trop fine, étant donné que les employés de la SNCF ne peuvent pas estimer précisément la durée des opérations de maintenance.

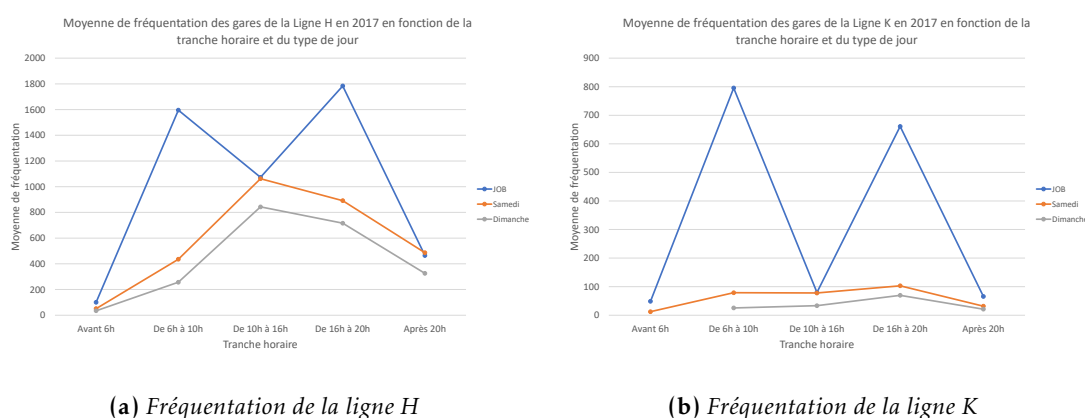
## 2.8 Changement de voies

Il est parfois nécessaire de faire changer de voie une rame au sein d'un site de maintenance, afin de l'amener sur la voie appropriée. Cependant, un tel changement nécessite du temps. En effet, l'électrification d'une voie est désactivée lorsqu'une rame y est présente pour des opérations de maintenance, afin de garantir la sécurité des techniciens. Pour changer de voie de maintenance, il faut donc dé-sécuriser la voie, puis déplacer la rame sur la nouvelle voie, et enfin sécuriser la nouvelle voie. Pour que l'ensemble de cette opération soit réalisée en toute sécurité, il faut compter entre trente minutes et une heure.

## 2.9 Disponibilité des rames sur le réseau

Les lignes H et K n'ont pas le même volume de fréquentation selon l'heure de la journée et le jour de la semaine. Lors des heures de pointe, la SNCF doit assurer la meilleure disponibilité de rames afin d'assurer la stabilité du réseau. Les lignes H et K sont donc soumises à une contrainte de disponibilité minimale. Ainsi, aux heures de pointe, la SNCF n'autorise pas plus de 11 rames à l'arrêt, sur la centaine de rames des lignes H et K.

Afin de mieux comprendre cette contrainte, une analyse a été réalisée à l'aide de données de comptage de fréquentation sur les gares transiliennes disponibles sur le site SNCF Open Data [WWW2], qui propose de nombreuses données statistiques concernant la SNCF en libre accès. On observe ainsi des pics de fréquentations dans les tranches horaires correspondant aux heures de pointe, les jours de travail.



**Figure 3** – Analyse des comptages de fréquentation des gares des lignes H et K en 2017 selon le type de jours et la tranche horaire, réalisée avec Excel à l'aide des données de SNCF Open Data [WWW2]

## 2.10 Opérations de maintenance corrective

Pour résoudre un incident subi par une rame, il faut réaliser des opérations de maintenance corrective particulières. La SNCF dispose d'une classification très précise des différents incidents pouvant impacter les rames, et à chacun de ces incidents peuvent être associées un ensemble d'opérations de maintenance afin de les résoudre. Ces opérations n'ont pas la même durée et ne nécessitent pas les mêmes infrastructures.

## 2.11 Accessibilité des sites de maintenance

Cette contrainte a été rajoutée au semestre 10. En effet dans un premier temps il était considéré qu'une rame ne pouvait accéder à un site de maintenance uniquement si celle-ci était à proximité du site. Cette contrainte a été affinée en définissant l'accessibilité aux sites de maintenance selon la gare où la rame est arrêtée. Cela peut être défini de deux façons différentes :

- **Accessibilité binaire** : Le site de maintenance est accessible ou n'est pas accessible depuis une gare, sans prendre en compte le trajet nécessaire.
- **Accessibilité au temps de trajet** : On définit un temps de trajet nécessaire pour atteindre les sites de maintenance en fonction de la gare où la rame est arrêtée.

**Table 2** – Exemple d'accessibilité binaire aux sites de maintenance selon la gare

| Ligne | Gare              | Accès Joncherolles | Accès Crépy en Valois | Accès Persan Beaumont |
|-------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| H     | Auvers sur Oise   | 0                  | 0                     | 1                     |
| H/K   | Paris la Chapelle | 1                  | 0                     | 0                     |
| K     | Aulnay Sous Bois  | 0                  | 1                     | 0                     |

**Table 3** – Exemple d'accessibilité en temps de trajet aux sites de maintenance selon la gare, en minutes

| Ligne | Gare              | Accès Joncherolles | Accès Crépy en Valois | Accès Persan Beaumont |
|-------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| H     | Auvers sur Oise   | 55                 | NULL                  | 15                    |
| H/K   | Paris la Chapelle | 3                  | NULL                  | 39                    |
| K     | Aulnay Sous Bois  | 19                 | 38                    | NULL                  |

### 3 Hypothèses retenues

Après l'analyse des différentes contraintes qui pèsent sur l'ordonnancement de la maintenance corrective des rames des lignes H et K, la prochaine étape est de définir les hypothèses qui serviront à définir notre modèle. Les hypothèses sont les suivantes :

- On ne planifie que les incidents de criticité 4 à 6. Les incidents de criticité inférieure ne sont pas à planifier, puisqu'ils sont la plupart du temps résolus lors des rentrées naturelles des rames sur les sites de maintenance.
- On considère les dates dues suivantes, pour les criticités 4 à 6 :

**Table 4** – Délais de correction des incidents de criticité 4 à 6

|             |                |
|-------------|----------------|
| Criticité 6 | 24H (1 jour)   |
| Criticité 5 | 72H (3 jours)  |
| Criticité 4 | 168H (7 jours) |

Une date due a été fixée pour la criticité 4 pour s'assurer que l'incident soit corrigé.

- Le planning de roulement est une constante à respecter. On considère qu'une rame doit absolument respecter le plan de roulement qui lui a été imposé, et on n'autorise pas le modèle à intervertir deux rames sur le plan de roulement. Le planificateur pourra ainsi lancer l'algorithme, et si la solution proposée sans changer le plan de roulement ne le satisfait pas, il pourra faire le choix d'intervertir deux rames sur le plan de roulement.
- On considère dans un premier temps que le planning des maintenances préventives est une constante à respecter. On n'autorise donc pas le ré-ordonnancement de ces opérations.
- On ne fait pas effectuer un roulement à une rame pour l'amener à un site de maintenance. Pour cela, on attends que le plan de roulement amène naturellement la rame à proximité du site de maintenance, et que la rame y soit inactive suffisamment longtemps pour recevoir les correctifs. Au semestre 10, il a été décidé que le modèle binaire sera utilisé : soit le site est accessible depuis la gare où la rame est arrêtée, soit il ne l'est pas. Le temps de trajet est alors compté comme faisant partie de la durée d'opération de maintenance.
- On considère qu'à un incident correspond une unique opération de maintenance.
- On considère les opérations de maintenance comme étant atomiques, c'est à dire que l'on n'autorise pas d'effectuer une opération de 4h en 2x2h avec un coupure au milieu.
- On considère que les sites de maintenance gèrent eux-même leurs équipes de maintenance, on ne prends donc pas en compte leur nombre. Étant donné qu'on ne planifie que les opérations concernant les incidents de criticité 4 à 6, seules les équipes de dépannage sont

concernées. Ces équipes étant polyvalentes et capables de réaliser toutes les opérations correspondant à ces criticités, on ne prend pas en considération les qualifications des équipes.

- On ne prend pas en compte le stock des pièces nécessaires aux opérations de maintenance. On considère que les sites de maintenance ont en tout temps le stock nécessaire pour réaliser les opérations.

## 4 Données du système

Les données d'entrée du système sont les suivantes :

- La liste des signalements
- Le planning des opérations de maintenance préventive
- Le planning de roulement des rames

Pour construire sa solution, le système s'appuiera sur les données suivantes, considérées constantes pour le système :

- Les données d'infrastructure des sites de maintenance : la liste des voies avec les infrastructures associées
- La mise en correspondance des types d'incidents avec les dates dues, les infrastructures et les durées nécessaires aux réparations
- La liste des gares des lignes H et K, avec pour chacune indiqué le site de maintenance associé. Si la gare n'est pas associée à un site de maintenance, ce qui est le cas pour la majorité d'entre elles, cela veut dire qu'une rame au repos à cette gare ne peut pas recevoir de correctif.

Le système fournira alors en sortie :

- Le planning des ordonnancements
- La liste des incidents n'ayant pas été ordonnancés avant leur date due

## 5 Objectif

L'objectif du problème est de minimiser le retard des opérations de maintenance corrective par rapport à leur date due, afin de s'assurer qu'un maximum de rames passent en correctif avant leur date due. Il serait possible de chercher à minimiser la moyenne ou le maximum de ces retards, selon le choix de la SNCF.



# 5

## Conception

Cette partie présente la phase de conception du Projet de Recherche et Développement. Cette phase a eu lieu pendant la seconde partie du projet, au semestre 10.

Cette phase a consisté en la conception du modèle mathématique répondant au problème d'ordonnancement et à la modélisation de l'application preuve de concept permettant d'implémenter ce modèle et de le tester sur les données réelles de la SNCF.

### 1 Modélisation mathématique

Pour résoudre un problème d'ordonnancement en recherche opérationnelle, il est nécessaire de construire un modèle mathématique. Le but de ce modèle est de traduire les hypothèses, contraintes et variables réelles du problème sous une forme qui permet sa résolution, dans notre cas sous une forme mathématique. Une fois le modèle mathématique établi, il suffit de le programmer dans un solveur, c'est-à-dire un programme chargé de la résolution exacte ou approchée d'un modèle mathématique à l'aide d'algorithmes spécifiques.

Il existe de nombreuses façons de traduire un problème sous forme mathématique. Pour un problème d'ordonnancement comme celui traité dans notre cas, il existe entre autres deux principales écoles : la Programmation Linéaire et la Programmation par Contraintes.

La Programmation Linéaire consiste en la modélisation des contraintes du problème sous forme d'égalités ou inégalités linéaires, c'est à dire la somme de variables multipliées par des coefficients constants mise en inégalité ou égalité avec une constante ou une autre variable, par exemple  $ax_1 + bx_2 + \dots + cx_n \geq d$  où  $a, b, c$  et  $d$  sont les constantes et les  $x_i$  sont les variables. La fonction objectif, c'est-à-dire la fonction d'optimisation, consiste alors en la minimisation ou la maximisation d'une combinaison linéaire des variables, par exemple  $\text{Min } \sum_i w_i x_i$  avec  $w_i$  des coefficients.

La Programmation par Contraintes consiste quant à elle en la définition de domaines de valeurs acceptées pour les différentes variables de décision, par la définition de contraintes arithmétiques ou logiques réduisant le nombre de valeurs que peuvent prendre les variables.

Pour ce Projet de Recherche et Développement, c'est un modèle de Programmation Linéaire qui a été conçu. Nous avons fait ce choix car c'est la forme de modélisation que j'ai le plus étudié au cours de mon cursus et c'est également celle qu'a préféré mettre en place M. T'KINDT pour une première modélisation du problème.

La conception du modèle mathématique s'est étendue sur l'ensemble du semestre 10, de la version 1.0 le 20 décembre 2018 à la version 1.6 le 21 mars 2019. Ce document est présenté en annexe, cf. [Annexe F](#).

La première version du modèle a été écrite avec M. T'KINDT avant la soutenance du semestre 9. Ce modèle ne couvrait pas encore toutes les contraintes et hypothèses actuellement considérées. Par la suite, certaines contraintes ont été rajoutées et d'autres ont été déplacées dans les hypothèses, pour alléger le modèle et le solveur. Ainsi ces anciennes contraintes sont devenues des pré-traitements et pré-conditions sur les données d'entrée, permettant de réduire le nombre de variables et de contraintes à gérer par le solveur.

## 1.1 Présentation du modèle

Comme dit précédemment, le modèle mathématique conçu lors de ce projet est un modèle de Programmation Linéaire. Étant donné qu'il s'agit d'un problème d'ordonnancement, le modèle est indexé sur le temps. Le temps est discrétisé, on ne garde que certaines dates séparées par un intervalle de temps constant. Ainsi sur deux jours, on pourra avoir 49 dates, si l'on utilise des intervalles de temps d'une heure : 0, 1,..., 24, 25,..., 48. Les intervalles de disponibilité des voies et des rames seront alors exprimés et approchés en fonction de ces dates. Ainsi on travaille avec des dates et des intervalles de temps.

La variable  $x_{i,j,t}$  présentée dans le modèle est une variable binaire, qui permet de déterminer si la rame  $i$  est affectée à la voie  $j$  à partir de la date  $t$  pour y recevoir son opération de maintenance corrective. On définit également la date  $C_i$  qui correspond à la date de fin d'opération de la rame  $i$  et le retard  $T_i$  qui correspond au retard de la rame  $i$  par rapport à sa date due. On associe à chaque rame un poids  $w_i$  qui servira à moduler l'importance de faire rentrer une rame à temps par rapport à une autre.

L'objectif du modèle est alors de minimiser la somme des retards pondérés des rames. Concrètement, cela signifie que le modèle va tenter de faire rentrer les rames dans un centre de maintenance de façon à minimiser le temps total de retard des rames sur leur date due, en accordant une importance différente à certaines rames pour leur permettre d'avoir un retard encore plus faible si non nul.

On applique alors différentes contraintes sur les variables, qui correspondent à des contraintes réelles sur les rames, voies, etc. Les contraintes retenues dans ce modèle sont les suivantes, dans l'ordre de numérotation présenté dans le modèle de l'[Annexe F](#) :

1. On s'assure que chaque opération de maintenance, donc chaque rame, est bien affectée à une unique voie. Ainsi s'il n'est pas possible d'affecter une voie à toutes les rames du problème, on considère que le problème n'est pas solvable. Cela correspond
2. On s'assure qu'une rame ne peut être affectée à une voie que si celle-ci dispose de l'infrastructure nécessaire à son opération de maintenance corrective. Cela correspond à la contrainte présentée en [Section 2.10](#) (Chapitre 4).
3. On s'assure qu'une seule rame puisse être affectée à la fois sur une voie. Il n'est en effet pas possible d'avoir deux rames en même temps sur une même voie.
4. Comme vu dans la [Section 2.9](#) (Chapitre 4), le réseau des lignes H et K doit s'assurer d'avoir un minimum de rames en service pendant certaines périodes, en réponse aux heures de pointe. Cela se traduit donc par une contrainte de nombre maximum de rames en maintenance corrective à chaque date  $t$ . Cette contrainte utilise une donnée,  $f_t$ , qui indique ce nombre maximum autorisé en tenant compte du nombre de trains déjà à l'arrêt pour de la maintenance préventive.
5. On s'assure que les sites de maintenance ne dépassent pas leur nombre maximal de rentrées de rames sur leurs créneaux de travail. Cette contrainte a été présentée en [Section 2.5](#) (Chapitre 4).



Les deux dernières contraintes du modèle permettent de calculer la date de fin d'opération des rames ainsi que le retard des rames par rapport à leur date due.

Les autres contraintes du problème qui ont été présentée dans la [Section 2](#) (Chapitre 4) sont gérées ainsi :

- La criticité des incidents, présentée en [Section 2.1](#) (Chapitre 4), a été modifié en poids  $w_i$ , permettant par exemple d'assigner au rames un poids exponentiel par rapport à la criticité pour avoir plus d'impact sur la fonction objectif. Cela est donc géré en pré-traitement.
- La contrainte du planning de roulements des trains présentée en [Section 2.2](#) (Chapitre 4) est gérée par la donnée  $\mathcal{T}_i^r$ , qui donne les intervalles de disponibilité des rames.
- La contrainte des maintenances préventives présentée en [Section 2.3](#) (Chapitre 4) est gérée par la donnée  $\mathcal{T}_j^v$ , qui donne les intervalles de disponibilité des voies en fonction des maintenances préventives qui sont déjà programmées.
- L'accessibilité des sites de maintenance présentée en [Section 2.11](#) (Chapitre 4) est gérée selon un modèle binaire et permet, à l'aide du plan de roulement et du planning d'occupation des voies, de définir la donnée  $\mathcal{T}_{i,j}^d$  qui donne les intervalles de dates possibles d'affectation par rame et par voie, en fonction du planning des roulements, du planning d'occupation des voies et de l'accessibilité du site de maintenance de la voie selon la gare où la rame est arrêtée.

Cette modélisation permet ainsi de souligner le fait que l'on résout ici un problème NP-difficile. En d'autre termes, le temps de calcul nécessaire à la résolution exacte du problème augmentera de façon exponentielle avec la taille de l'instance, soit dans notre cas la taille des données d'entrée.

Pour consulter les hypothèses du modèle mathématique, se référer à l'[Annexe F](#).

## 2 Modélisation de l'application

Afin de pouvoir mettre en œuvre le modèle mathématique et le tester sur des données réelles, il est nécessaire de créer une application implémentant le modèle et permettant de le résoudre.

L'application doit permettre de récupérer les données de la SNCF, les mettre en forme pour les rendre utilisables par le modèle, résoudre le modèle et ressortir les données sous un format compréhensible. Elle permet ainsi d'utiliser les données fournies par la SNCF sans nécessiter de grand travail sur le formatage des données par l'utilisateur. Ainsi, elle permet de lire les données dans des fichiers Excel et de produire un résultat sous la forme d'un classeur Excel.

Le but premier de cette application n'est pas de fournir un produit d'aide à la décision, mais de pouvoir tester différents modèles mathématiques et algorithmes de résolution sur des données réelles ou des données de test. Elle a cependant été conçue afin que certains de ses composants puissent être intégrés dans un système d'informations plus complexe.

### 2.1 Architecture de l'application

Un soin particulier a été apporté à l'architecture de l'application, le but étant qu'elle puisse facilement intégrer de nouveaux modèles mathématiques et algorithmes de résolution et que le module de résolution puisse facilement être intégré au sein d'un autre système d'information.

Cela est permis par l'architecture orientée objet présentée par la [Figure 1](#) ci-dessous. Pour le diagramme UML complet avec ses attributs et ses méthodes, voir l'[Annexe G](#).

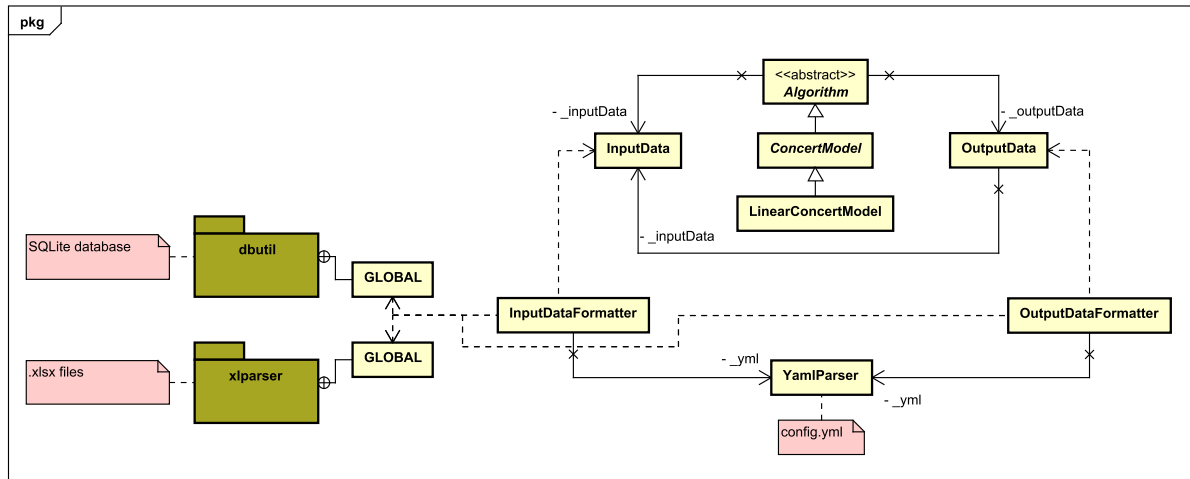


Figure 1 – Diagramme UML global du Proof of Concept V1.6

### 2.1.1 Module de résolution

Le module de résolution consiste en la partie composée des classes **InputData**, **OutputData**, **Algorithm**, **ConcertModel** et **LinearConcertModel**. Ce module est au cœur de l'application et est chargé de la résolution du problème.

- **InputData** : Cette classe contient l'ensemble des données nécessaires au modèle mathématique pour permettre la résolution du problème : les signalements, les roulements, les infrastructures, etc. C'est en quelque sorte le point d'entrée du module de résolution.
- **OutputData** : Cette classe contient les données de sortie du module de résolution, c'est-à-dire les affectations des rames, la valeur de la fonction objectif, etc. Elle contient également un objet **InputData** pour faire le lien des données de sortie avec les données d'entrée. C'est en quelque sorte le point de sortie du module de résolution.
- **Algorithm** : Il s'agit d'une classe abstraite dotée d'un objet **InputData** et d'un objet **OutputData**. Elle dispose de méthodes abstraites permettant de définir le modèle et de le résoudre, ainsi que de définir les différentes contraintes. Le principe de cette classe est de pouvoir utiliser le principe de polymorphisme de la conception orientée objet, permettant d'utiliser des classes héritant d'**Algorithm** en appelant les mêmes méthodes en toute transparence, sans se soucier des différences entre les classes filles. Ainsi, cette classe abstraite permet de "brancher" d'autres modèles mathématiques et méthodes de résolution au module de résolution de la façon la plus simple, permettant ainsi d'éviter de dupliquer du code ou de devoir modifier le code appelant un objet hérité de **Algorithm**.
- **ConcertModel** : Cette classe abstraite hérite d'**Algorithm** et définit des attributs et méthodes utilisées par les modèles et algorithmes implémentés par le solveur choisi pour l'application (cf. [Section 1](#) (Chapitre 6)).
- **LinearConcertModel** : Pour finir, cette classe implémente le modèle mathématique linéaire décrit en [Section 1](#) et permet de résoudre le problème en implémentant les méthodes définies par **Algorithm**.

Du fait de cette architecture, il est tout à fait possible d'ajouter une implémentation d'un autre modèle mathématique au module de résolution, comme par exemple un modèle de programmation par contraintes utilisant le même solveur que **LinearConcertModel**. Ainsi mes successeurs pourront continuer à utiliser la même application pour tester leurs modèles mathématiques.

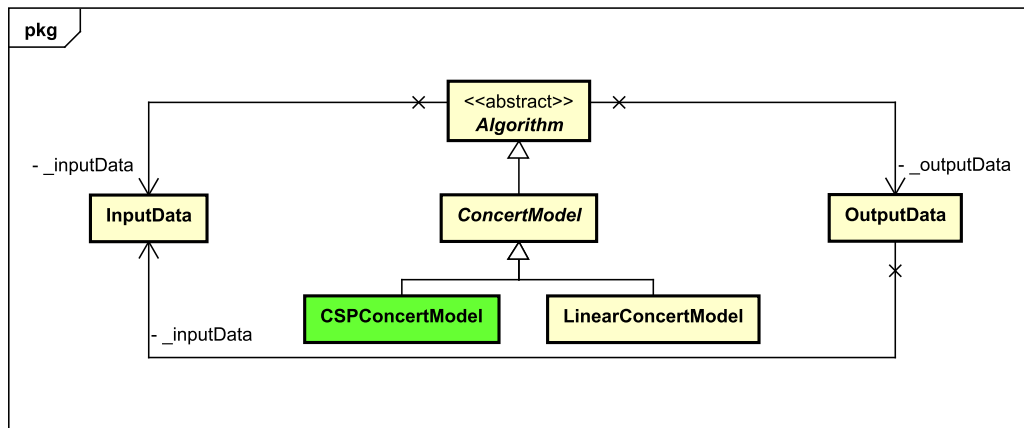


Figure 2 – Exemple d'ajout d'un modèle de Programmation par Contraintes

### 2.1.2 Module d'import et d'export de données

Ce module est chargé de la configuration de la résolution ainsi que de l'importation et de l'exportation des données nécessaires à la résolution du problème. Il est composé de la classe **YamlParser** et des espaces de noms **xlparser** et **dbutil**.

L'application lit les données variables comme les plans de roulement, les signalements, et. depuis des fichiers Excel et les données considérées comme constantes comme les infrastructures, les horaires de travail, etc. depuis une base de données locale. Tout ceci est configurable grâce à un fichier de configuration lié au jeu de données.

- **YamlParser** : Cette classe sert à interpréter le fichier de configuration des jeux de données. L'application est conçue pour s'exécuter sur un jeu de données, et chaque jeu dispose d'un fichier de configuration permettant de définir où trouver les données d'entrer, où écrire la sortie et comment exécuter l'application. Cette classe est chargée de cette interprétation.
- **xlparser** : Cet espace de noms consiste en un ensemble de méthodes permettant de lire les données d'entrée et écrire les données de sortie de l'application en utilisant des fichiers Excel.
- **dbutil** : Cet espace de noms consiste en un ensemble de méthodes permettant de lire les données de la base de données de l'application, et permet également la création et le peuplement de cette dernière.

Si la SNCF souhaite intégrer l'application dans son système d'informations, elle n'utilisera probablement pas ces méthodes, étant donné que les flux d'entrée et de sortie ne seront certainement pas des fichiers Excel.

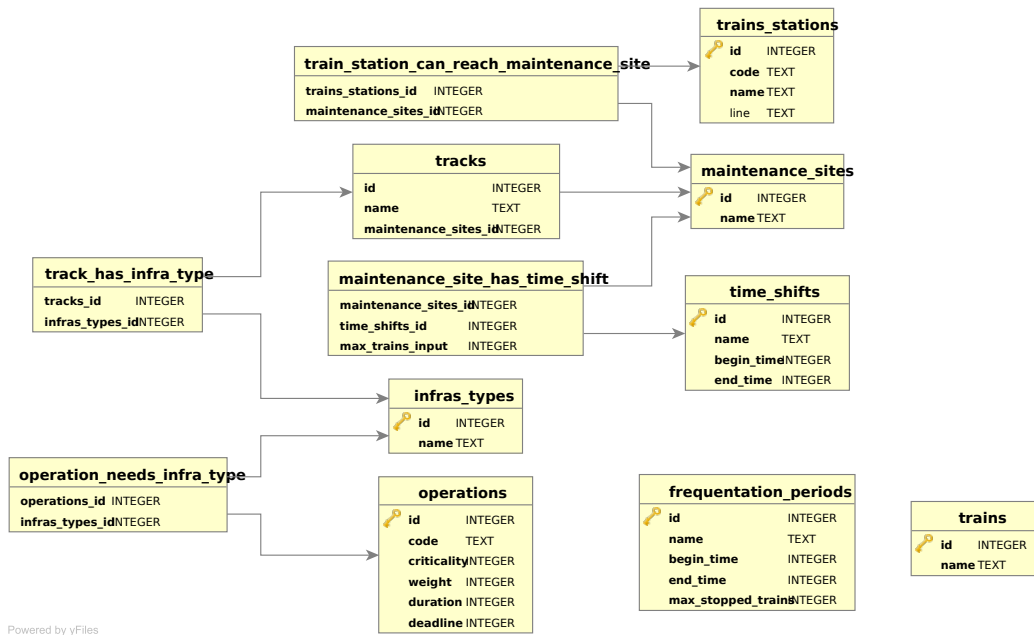


Figure 3 – Modélisation de la base de données contenant les données constantes

### 2.1.3 Module de formatage des données

Ce module permet de formater les données d'entrée pour le module de résolution et de sortie de ce même module. Il est composé des classes **InputDataFormatter** et **OutputDataFormatter**. Il permet de faire l'interface entre le module de résolution et le module d'import et d'export de données.

- **InputDataFormatter** : Cette classe permet de formater les données d'entrée brutes lues en appelant les méthodes de **xlparger** et **dbutil** afin de construire l'objet **InputData** qui sera utilisé par le module de résolution.
- **OutputDataFormatter** : Cette classe formate les données issues d'un objet **OutputData** et appelle les méthodes de **xlparger** et **dbutil** pour créer le fichier de sortie.

Si la SNCF souhaite intégrer l'application dans son système d'informations, elle devra réécrire ces deux classes pour les adapter aux flux de données.

# 6

## Mise en œuvre

La mise en œuvre du projet a été un des objectifs principaux du semestre 10. Cette partie présente de quelle façon et avec quels outils le projet a été implémenté.

Dans le cadre de ce PRD, la mise en œuvre consiste en l'implémentation du modèle mathématique dans une application permettant de tester le modèle mathématique.

### 1 Outils et bibliothèques utilisés

Cette section présente les outils et librairies utilisés pour la mise en œuvre du PRD. Se référer à la documentation développeur en [Annexe I](#) pour plus de détails.

#### 1.1 Langage

Afin d'implémenter et tester notre modèle mathématique, nous avons choisi d'utiliser le langage C++. Ce langage a été choisi pour les raisons suivantes :

- M. T'KINDT souhaitait que le modèle soit implémenté en C ou en C++, afin entre autres de faciliter la reprise du projet par des spécialistes en recherche opérationnelle.
- Le solveur utilisé (cf. [Section 1.3](#)) propose des librairies pour l'intégrer dans de nombreux langages, dont le C et le C++. La librairie spécialisée pour le C++ est orientée objet, simple à utiliser et suffisamment performante en C++, ce qui a orienté ce choix.
- Le C++ est un langage orienté objet, ce qui permet d'avoir une meilleure architecture logicielle.
- Le C++ est un des langages objet les plus performants, car plus proche de la machine. La performance est un critère crucial en recherche opérationnelle, une résolution exacte d'un problème complexe pouvant nécessiter temps de calcul très important.
- Pour finir, c'est un langage que je connais et que j'ai déjà beaucoup utilisé, ce qui permet un développement plus simple.

La version de C++ utilisée est C++14, afin de pouvoir utiliser la bibliothèque standard du langage et de pouvoir s'interfacer avec certaines bibliothèques utilisées.

## 1.2 Environnement de développement

L'application a été développée avec Visual Studio 2017, l'environnement de développement de Microsoft. Cet outil a été choisi car le solveur utilisé par l'application et fourni par mes encadrants est fait pour fonctionner avec Visual Studio 2015 ou 2017.

L'application a été développée sur un poste utilisant le système d'exploitation Microsoft Windows 10. Cela était nécessaire d'utiliser Windows dans une version supérieure ou égale à Windows 7 afin de pouvoir utiliser Visual Studio 2017.

## 1.3 Solveur

Afin d'implémenter et tester le modèle mathématique, nous avons choisi d'utiliser le solveur IBM ILOG CPLEX. Il s'agit d'un solveur à haute performance développé par IBM permettant entre autres de résoudre de façon exacte des modèles linéaires ou des modèles de programmation par contraintes. Le choix s'est porté sur ce solveur en raison de sa puissance et de son interface facile d'utilisation avec le C++, mais aussi car mes encadrants disposent d'une licence universitaire.

## 1.4 Autres bibliothèques

D'autres bibliothèques ont été utilisées pour créer l'application :

- **XLNT**, utilisée pour interagir avec des fichiers Excel .xlsx.
- **SQLite C/C++**, utilisée pour interagir avec la base de données SQLite locale contenant les données constantes.
- **yaml-cpp**, utilisée pour lire le fichier de configuration YAML.

# 2 Implémentation

## 2.1 Choix techniques

Les données d'entrée sont lues dans des fichiers Excel au format .xlsx, qui est le format utilisé depuis Microsoft Excel 2010. Le choix s'est porté sur ce format plutôt que le .xls car c'est celui qu'a utilisé la SNCF pour me fournir les données d'entrée.

Le fichier de configuration des jeux de données utilise le format YAML. J'ai choisi ce format car il est facile à comprendre et à utiliser, même pour quelqu'un qui n'est pas développeur. Il dispose également d'une bibliothèque permettant de facilement utiliser le format en C++. L'ensemble des règles du fichier de configuration est disponible dans la documentation utilisateur en [Annexe H](#).

La base de données contenant les données constantes de l'application est une base SQLite. J'ai choisi cette technologie car elle permet de mettre en place une base de données portable et légère sous la forme d'un unique fichier, qui peut donc être directement incorporé au répertoire du jeu de données associé.

## 2.2 Interface utilisateur

L'application développée est une application console, c'est-à-dire une application utilisée en lignes de commandes. L'interface avec l'utilisateur se fait donc via le fichier de configuration et la console. J'ai considéré qu'il n'était pas nécessaire de réaliser une interface graphique pour cette application, étant donné qu'il ne s'agit que d'une simple résolution et que le résultat de la résolution est visible dans un fichier Excel formaté pour être facilement compréhensible et exploitable.

## 2.3 Format du résultat

Comme visible dans la documentation utilisateur en [Annexe H](#), le résultat de la résolution du problème d'ordonnancement est stocké dans un fichier Excel, composé de trois feuilles :

1. Un diagramme de Gantt permettant de visualiser l'affectation des rames identifiées par leur numéro (75H par exemple) sur les voies, dans une représentation similaire aux fichiers d'affectation déjà utilisés par la SNCF.

|    | A               | B     | AV   | AW | AX | AY  | AZ | BA | BB | BC  | BD  | BE | BF       | BG | BH   | BI | BJ | BK | BL | BM | BN | BO | BP | BQ | BR       | BS | BT   | BU | BV | BW | BX | BY | BZ | CA | CB | CC | CD       |  |
|----|-----------------|-------|------|----|----|-----|----|----|----|-----|-----|----|----------|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|--|
| 1  |                 |       | Nuit |    |    |     |    |    |    |     |     |    | Avt jour |    | Jour |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Avt nuit |    | Nuit |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Avt jour |  |
| 2  | Site            | Voies | 45   | 46 | 47 | 48  | 49 | 50 | 51 | 52  | 53  | 54 | 55       | 56 | 57   | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67       | 68 | 69   | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79       |  |
| 40 | JONCHEROLLES    | 3GVG  |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 41 | JONCHEROLLES    | 1CC   |      |    |    | 75H |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 42 | JONCHEROLLES    | 2CC   |      |    |    | 26H |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 43 | JONCHEROLLES    | 3CC   |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 44 | JONCHEROLLES    | VF1   |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 45 | JONCHEROLLES    | VF2   |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 46 | CREPY EN VALOIS | 1     |      |    |    | 15H |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 47 | CREPY EN VALOIS | 2     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 48 | CREPY EN VALOIS | 3     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 49 | CREPY EN VALOIS | 4     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 50 | PERSAN BEAUMONT | 1     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 51 | PERSAN BEAUMONT | 2     |      |    |    |     |    |    |    | 29H |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 52 | PERSAN BEAUMONT | 3     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 53 | PERSAN BEAUMONT | 4     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 54 | PERSAN BEAUMONT | 5     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 55 | PERSAN BEAUMONT | 6     |      |    |    |     |    |    |    | 49H |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 56 | PERSAN BEAUMONT | 7     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 57 | PERSAN BEAUMONT | 8     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 58 | PERSAN BEAUMONT | 9     |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 59 | PERSAN BEAUMONT | 10    |      |    |    |     |    |    |    |     | 41H |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |
| 60 | PERSAN BEAUMONT | 11    |      |    |    |     |    |    |    |     |     |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |  |

Figure 1 – Extrait du diagramme de Gantt du fichier de résultat généré

2. Une liste des affectations donnant plus de détails sur les affectations et les retards des rames.

|    | A             | B        | C              | D               | E    | F            | G           | H      |
|----|---------------|----------|----------------|-----------------|------|--------------|-------------|--------|
| 1  | Code incident | Num Rame | Code operation | Site            | Voie | Date rentree | Date sortie | Retard |
| 2  | 525447        | 222H     | 1500           | JONCHEROLLES    | 10   | 93           | 94          | 0      |
| 3  | 524919        | 65H      | 2000           | JONCHEROLLES    | 11   | 0            | 1           | 0      |
| 4  | 525139        | 22H      | 5212           | JONCHEROLLES    | 4    | 2            | 3           | 0      |
| 5  | 525080        | 82H      | 2207           | JONCHEROLLES    | 1CB  | 71           | 72          | 0      |
| 6  | 525437        | 75H      | 2006           | JONCHEROLLES    | 1CC  | 47           | 48          | 0      |
| 7  | 525377        | 26H      | 5213           | JONCHEROLLES    | 2CC  | 47           | 48          | 0      |
| 8  | 525072        | 15H      | 1037           | CREPY EN VALOIS | 1    | 46           | 47          | 0      |
| 9  | 525229        | 07H      | 1036           | CREPY EN VALOIS | 3    | 73           | 74          | 0      |
| 10 | 525171        | 53H      | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 3            | 4           | 0      |
| 11 | 525231        | 73H      | 2202           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 23           | 24          | 0      |

Figure 2 – Extrait de la liste des affectations du fichier de résultat généré

3. Des données supplémentaires concernant la résolution du problème.

|                           |    |
|---------------------------|----|
| Nombre d'operations       | 22 |
| Nombre de voies total     | 58 |
| Nombre de voies utilisees | 16 |
| Fonction objectif         | 0  |

Figure 3 – Données supplémentaires du fichier de résultat généré

Ainsi le fichier de sortie permet à la fois d'avoir des données exploitables et lisibles.

### 3 Qualité

La totalité du code produit est documenté à l'aide de Doxygen, un utilitaire permettant de créer une documentation html à partir des blocs de commentaires dans le code. Cela permet d'avoir une documentation claire et facile à parcourir.

**POLYTECH TOURS** Polytech - SNCF R&D Project V1.6 - March 2019 - Benjamin Pouvreau  
Proof of concept realized to test models and algorithms for a corrective maintenance scheduling problems on trains.

**writeResultPlanning()**

```
void xparser::writeResultPlanning ( string
                                string
                                string
                                unsigned int
                                const vector< map< string, string >>
                                const map< unsigned int, map< string, string >>>
                                const map< unsigned int, map< string, string >>
                                )
```

filepath, ganttSheet, listSheet, objectiveValue, formattedTimeShifts, formattedAssignments, tracks

Writes the results of the solver in an .xlsx file.  
Writes the results in an .xlsx file in two different sheets.

**Parameters**

**filepath** The path of the .xlsx file to overwrite.  
**ganttSheet** The name of the sheet where the results will be displayed as a Gantt diagram, as below :

| Site         | Track | Time shift 1 |   |        |   |   | Time shift 2 |   |   |   |   |   |   |  |
|--------------|-------|--------------|---|--------|---|---|--------------|---|---|---|---|---|---|--|
|              |       | 0            | 1 | 2      | 3 | 4 | 5            | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |  |
| JONCHEROLLES | 1     |              |   | Train1 |   |   |              |   |   |   |   |   |   |  |
| JONCHEROLLES | 2     |              |   | Train2 |   |   |              |   |   |   |   |   |   |  |

**listSheet** The name of the sheet where the results will be displayed as a list, as below :

| Report code | Train number | Operation code | Site         | Track | Entry date | Exit date | Delay |
|-------------|--------------|----------------|--------------|-------|------------|-----------|-------|
| 123456      | Train1       | 1234           | JONCHEROLLES | 1     | 1          | 2         | 0     |
| 234567      | Train2       | 2345           | JONCHEROLLES | 2     | 0          | 2         | 0     |
| 345678      | Train3       | 3456           | JONCHEROLLES | 1     | 3          | 4         | 2     |

**objectiveValue** The value of the objective function.  
**formattedTimeShifts** The time shifts formatted as follow :

Generated by doxygen 1.8.15

Figure 4 – Extrait de la documentation générée avec Doxygen

Le projet bénéficie également d'une documentation utilisateur, cf. [Annexe H](#), ainsi que d'une documentation développeur, cf. [Annexe I](#).

Cependant le code n'a pas de tests unitaires. Ayant pris du retard sur le projet, je n'ai pas eu le temps de mettre en place ces tests. Les fonctionnalités de l'application ont tout de même été testées à l'aide du déboguer de Visual Studio.

### 4 Résultats

Cette application a permis de tester le modèle mathématique sur les données réelles de la SNCF et de faire émerger des axes d'amélioration est des contraintes au problème. Ainsi, je me suis



rendu compte que les données d'entrée manquaient de cohérence, notamment au niveau des plans de roulements, qui se chevauchent parfois.

Le modèle mathématique actuel a également tendance à affecter beaucoup de rames sur les sites de maintenance secondaire, comme le montre les résultats de la **Figure 5**. Cela est dû au modèle d'accessibilité des sites de maintenance depuis les gares, qui est binaire et ne prend pas en compte la durée de trajet.

| Code incident | Num Rame | Code operation | Site            | Voie | Date rentree | Date sortie | Retard |
|---------------|----------|----------------|-----------------|------|--------------|-------------|--------|
| 525447        | 222H     | 1500           | JONCHEROLLES    | 10   | 93           | 94          | 0      |
| 524919        | 65H      | 2000           | JONCHEROLLES    | 11   | 0            | 1           | 0      |
| 525139        | 22H      | 5212           | JONCHEROLLES    | 4    | 2            | 3           | 0      |
| 525080        | 82H      | 2207           | JONCHEROLLES    | 1CB  | 71           | 72          | 0      |
| 525437        | 75H      | 2006           | JONCHEROLLES    | 1CC  | 47           | 48          | 0      |
| 525377        | 26H      | 5213           | JONCHEROLLES    | 2CC  | 47           | 48          | 0      |
| 525072        | 15H      | 1037           | CREPY EN VALOIS | 1    | 46           | 47          | 0      |
| 525229        | 07H      | 1036           | CREPY EN VALOIS | 3    | 73           | 74          | 0      |
| 525171        | 53H      | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 3            | 4           | 0      |
| 525231        | 73H      | 2202           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 23           | 24          | 0      |
| 525448        | 29H      | 1501           | PERSAN BEAUMONT | 2    | 49           | 50          | 0      |
| 525436        | 06H      | 4532           | PERSAN BEAUMONT | 4    | 29           | 30          | 0      |
| 524935        | 189H     | 5003           | PERSAN BEAUMONT | 4    | 1            | 2           | 0      |
| 525495        | 04H      | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 5    | 29           | 30          | 0      |
| 525347        | 17H      | 4533           | PERSAN BEAUMONT | 5    | 21           | 22          | 0      |
| 524923        | 39H      | 1503           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 27           | 28          | 0      |
| 525318        | 49H      | 1531           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 48           | 49          | 0      |
| 525117        | 58H      | 1018           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 22           | 23          | 0      |
| 525223        | 84H      | 2629           | PERSAN BEAUMONT | 8    | 2            | 3           | 0      |
| 525068        | 03H      | 1035           | PERSAN BEAUMONT | 10   | 1            | 2           | 0      |
| 525115        | 41H      | 1504           | PERSAN BEAUMONT | 10   | 50           | 51          | 0      |
| 525242        | 16H      | 1038           | PERSAN BEAUMONT | 11   | 95           | 96          | 0      |

**Figure 5** – Résultats des tests sur les données réelles adaptées des signalements de la SNCF du 1er au 5 janvier 2019

J'ai également dû retoucher les données d'entrée pour donner une durée moins contraignante aux opérations, la durée étant six heures par défaut. En effet, il est rare qu'une rame soit disponible six heures à la suite en même temps que le créneau de travail des sites de maintenance et sur une gare ayant accès au site. Cela est entre autres dû au fait que l'employé de la SNCF chargé de la planification n'essaie pas réellement de faire tenir six heures d'opération dans le créneau de disponibilité de la voie. La plupart du temps, il planifie la rentrée des rames sans prendre en compte la durée d'opération et laisse les sites de maintenance gérer la réalisation des opérations.

# 7

## Bilan et conclusion

### 1 Bilan du semestre 9

A l'heure de l'écriture de ce rapport, l'ensemble de la compréhension des besoins du client ainsi que la spécification du problème ont été réalisés. L'analyse du problème et de toutes ses contraintes a demandé le plus de travail pendant ce semestre, car chaque nouvelle rencontre avec le client amenait de nouveaux éléments de spécification, ou modifiait les éléments existants. Il a également fallu analyser l'ensemble des fichiers métier transmis par la SNCF, afin d'en faire émerger des contraintes et des données pertinentes.

Par exemple, avant que la SNCF ne spécifie que les lignes H et K ne disposent que de trois sites de maintenance, une recherche complète avec croisement de données issues de SNCF Open Data et issues des sources fournies par client avait dû être menée pour identifier les gares disposant d'infrastructures éligibles à la maintenance corrective. Lors de la rencontre avec le personnel en charge de la planification de ces opérations de maintenance à Paris, nous avons finalement appris qu'il n'y avait que trois sites de maintenance. Il faudra donc reprendre la formulation du problème pour une quatrième version respectant ces nouvelles spécifications.

L'état de l'art aurait également mérité d'être approfondi. Étant donné que le principal du travail a été effectué sur l'analyse du problème, l'analyse de l'existant mériterait davantage de temps.

Pour résumer, les tâches effectuées au semestre 9 sont les suivantes :

- Compréhension du sujet
- État de l'art, concernant les problèmes d'ordonnancement ferroviaires et les méthodes de Recherche Opérationnelle
- Compréhension des besoins du client et de ses contraintes : cahier des charges (V4)
- Première formulation non mathématique du problème, avec hypothèses, contraintes et objectifs (V3)
- Écriture des spécifications

Les éléments actuellement en cours de production sont :

- La V4 de la formulation non mathématique du problème
- Une première modélisation mathématique simplifiée

## 2 Planification du Semestre 10

Pour le S10, le problème sera reformulé, puis modélisé mathématiquement. Il sera ensuite traduit algorithmiquement et implémenté. Pour cette planification, voir [Section 1](#) (Annexe C).

## 3 Bilan du semestre 10

A la fin de ce semestre, le projet dispose d'un premier modèle mathématique simplifié permettant de prouver la faisabilité de la résolution du problème d'ordonnancement de la SNCF.

Le projet dispose également d'une application fonctionnelle et simple d'utilisation permettant de tester les modèles mathématiques et dont certaines portions pourront être intégrées dans un système d'information plus complet. Cette application permettra à mes successeurs de tester divers modèles mathématiques et algorithmes de résolution sans nécessiter trop de développement.

Le modèle mathématique devra évoluer, afin de s'approcher au mieux de la réalité du problème d'ordonnancement. Il sera également nécessaire de mettre en place des algorithmes de résolution permettant de s'affranchir de CPLEX.

## 4 Bilan du PRD

Ce Projet de Recherche et Développement aura été très formateur pour moi. Il m'aura permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine de la Recherche Opérationnelle. Mais il m'aura surtout permis de travailler avec un industriel et d'augmenter mes compétences en analyse et en gestion de projet.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont aidé sur ce projet, à savoir Messieurs Ronan BOCQUILLON, Vincent T'KINDT, Guillaume BRANGER, Romuald DETRUE et Bruno LASNIER, ainsi que Valentine JOURDAN, qui me succèdera désormais dans le projet et à qui je souhaite une excellente continuation.

## Annexes

# A

## Spécifications fonctionnelles

### 1 Fonction 1 : Importation des données d'entrée

Cette fonction prend les fichiers de données brutes en entrée du modèle et les transmet au programme : signalements, planning de roulement et de la maintenance corrective.

### 2 Fonction 2 : Pré-traitement des données d'entrée

Cette fonction traite les données brutes transmise par la Fonction 1 pour les formater de façon à pouvoir les utiliser dans le modèle algorithmique de recherche opérationnelle.

### 3 Fonction 3 : Solveur

Cette fonction génère des solutions d'ordonnancement brutes à partir des données pré-traitées, en utilisant un ou plusieurs algorithmes de résolution, selon l'approche souhaitée.

### 4 Fonction 4 : Mise en forme de la sortie

Cette fonction met en forme les données brutes ressorties par le solveur afin de les rendre présentables pour l'utilisateur.

### 5 Fonction 5 : Représentation des données

Cette fonction représente les résultats formatés à l'utilisateur, soit sur une console, soit dans un fichier.

# B

## Spécifications non fonctionnelles

### 1 Performances

Le temps nécessaire pour calculer la solution doit être inférieur à celui que prend l'employé SNCF en charge de la planification pour effectuer l'ordonnancement. On doit donc fournir un algorithme capable de générer une solution en moins de 1h30.

### 2 Capacités

Le système doit en capacité de générer une solution pour un parc disposant d'une centaine de rames, et de les ordonnancer entre trois sites de maintenance différents.



## Gestion de projet

Ce projet suit une méthodologie itérative. Pour chacun des documents produits, une première version a été produite, puis soumise à la validation aux encadrants et clients du projets. Une nouvelle version améliorant la précédente était alors produite.

Des réunions étaient régulièrement organisées, avec la SNCF ou les encadrants du projet. pour la SNCF, trois réunions ont eu lieu :

- **20 septembre 2018 à Saint-Pierre-des-Corps** : Présentation du projet et de son contexte, démarrage du PRD
- **11 octobre 2018 à Saint-Pierre-des-Corps** : Nouvelles spécifications apportées par M. Branger, retour sur le cahier des charges et la première formulation du problème
- **8 novembre 2018 à Paris** : Rencontre avec les employés en charge de la planification. Spécifications finales apportées.

D'autres réunions ont eu lieu au cours du S10.

Les réunions donnent lieu à des compte-rendus, afin de garder une trace des nouveaux éléments qu'elles apportent.

Les documents ci-dessous présentent le pilotage du projet, via un diagramme de Gantt réel pour le S9 et prévisionnel pour le S10, ainsi que le document de pilotage des séances de PRD permettant de garder une trace des actions effectuées et des réunions tenues.

# 1 Diagramme de Gantt

## Untitled Gantt Project

10 déc. 2018

## Diagramme de Gantt

3

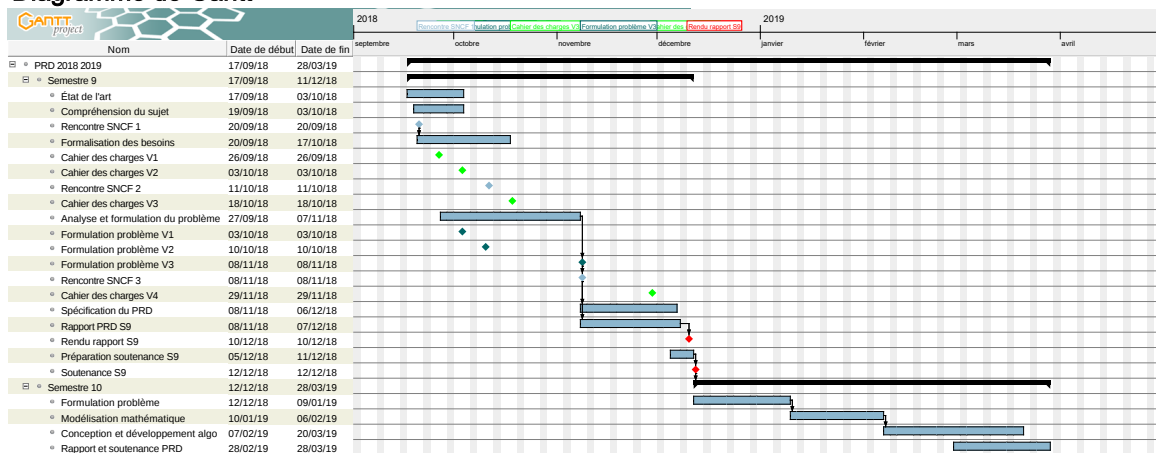


Figure 1 – Diagramme de Gantt réel du S9 et prévisionnel du S10

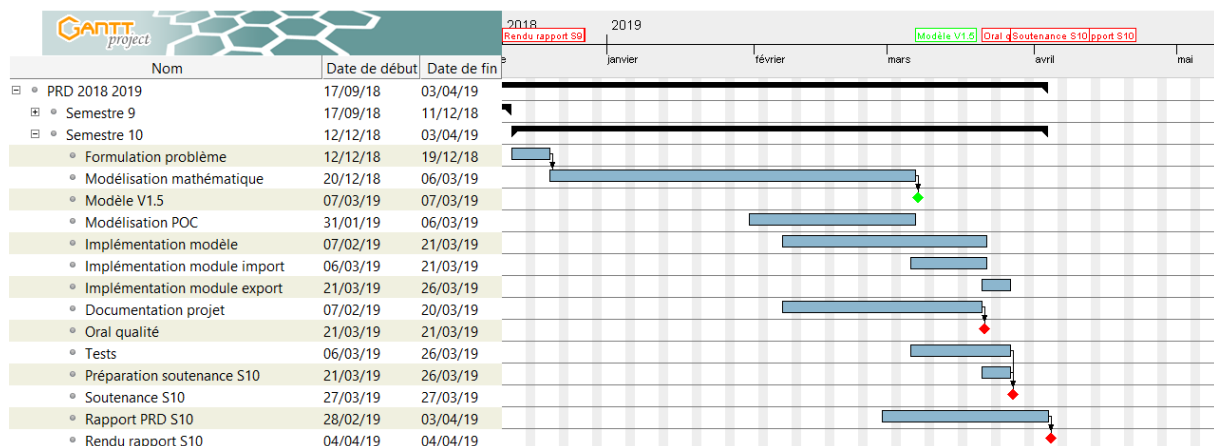


Figure 2 – Diagramme de Gantt réel du S10



## 2 Document de pilotage de projet

| Séances            | Notes                                                                                                                        | Réunions                                                                                                |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 19/09/2018       | X Démarrage PRD, documentation                                                                                               | M. Bocquillon, démarrage de PRD                                                                         |
| 2 20/09/2018       | X Rencontre SNCF                                                                                                             | SNCF et M. Bocquillon, première rencontre SNCF                                                          |
| 3 26/09/2018       | X Cahier des charges, première analyse des contraintes                                                                       | /                                                                                                       |
| 4 27/09/2018       | X Analyse des fichiers source, état de l'art, documentation sur les méthodes de RO                                           | /                                                                                                       |
| 5 03/10/2018       | X Correction CDC, analyse des contraintes, début de formulation et modélisation simplifiées du problème                      | M. Bocquillon, présentations fichiers source et retour sur CDC                                          |
| 6 04/10/2018       | X Formulation du problème : hypothèses, format des données, objectifs, etc.                                                  | /                                                                                                       |
| 7 10/10/2018       | X Formulation du problème                                                                                                    | M. Bocquillon, explication première formulation                                                         |
| 8 11/10/2018       | X RDV avec la SNCF, <b>Conférence sécurité 14-16h</b> , rédaction compte-rendu réunion avec SNCF                             | M. Branger, cahier des charges et formulation du problème                                               |
| 9 17/10/2018       | X Rédaction compte-rendu réunion avec SNCF, révision du cahier des charges                                                   | /                                                                                                       |
| 10 18/10/2018      | X Révision du cahier des charges, reformulation du problème                                                                  | /                                                                                                       |
| 11 24/10/2018      | X Analyse des fichiers d'infrastructure et des gares, formulation du problème                                                | /                                                                                                       |
| 12 25/10/2018      | X Nettoyage et analyse des données des gares, analyse des infrastructures, formulation du problème                           | /                                                                                                       |
| VACANCES TOUSSAINT |                                                                                                                              |                                                                                                         |
| 13 07/11/2018      | X Finalisation de la formulation du problème V3, préparation de la rencontre avec les SET-1                                  | /                                                                                                       |
| 14 08/11/2018      | X <b>Rencontre avec les SET-1 à Paris Nord</b>                                                                               | MM. Bocquillon, T'Kindt et clients SNCF SET-1 et SET-2                                                  |
| 15 14/11/2018      | X Préparation au forum des entreprises, débrief de la rencontre avec les SET-1                                               | /                                                                                                       |
| 16 15/11/2018      | X <b>Forum des entreprises 13-17h</b>                                                                                        | /                                                                                                       |
| 17 21/11/2018      | X Analyse des nouvelles spécifications, analyse de la fréquentation des lignes H/K                                           | /                                                                                                       |
| 18 22/11/2018      | X Rédaction de la V4 du cahier des charges, <b>entretien d'embauche 14h - 16h</b>                                            | /                                                                                                       |
| 19 28/11/2018      | X <b>entretiens d'embauche à 8h30 et 15h</b> ; rédaction de la V4 du cahier des charges                                      | /                                                                                                       |
| 20 29/11/2018      | X <b>entretien d'embauche à 11h</b> ; fin du cahier des charges V4, rédaction du cahier des specs, modélisation mathématique | Ronan Bocquillon, Vincent T'Kindt : Point sur les nouvelles spécifications et modélisation mathématique |
| 21 05/12/2018      |                                                                                                                              |                                                                                                         |
| 22 06/12/2018      |                                                                                                                              |                                                                                                         |
| 12/12/2018         | SOUTENANCES S9                                                                                                               |                                                                                                         |
| 13/12/2018         | SOUTENANCES S9                                                                                                               |                                                                                                         |

Figure 3 – Fichier de pilotage de projet pour le S9

Le même document a été utilisé au S10.

### 3 Trello

Un Trello a été utilisé pour gérer les tâches du projet à partir du S10.

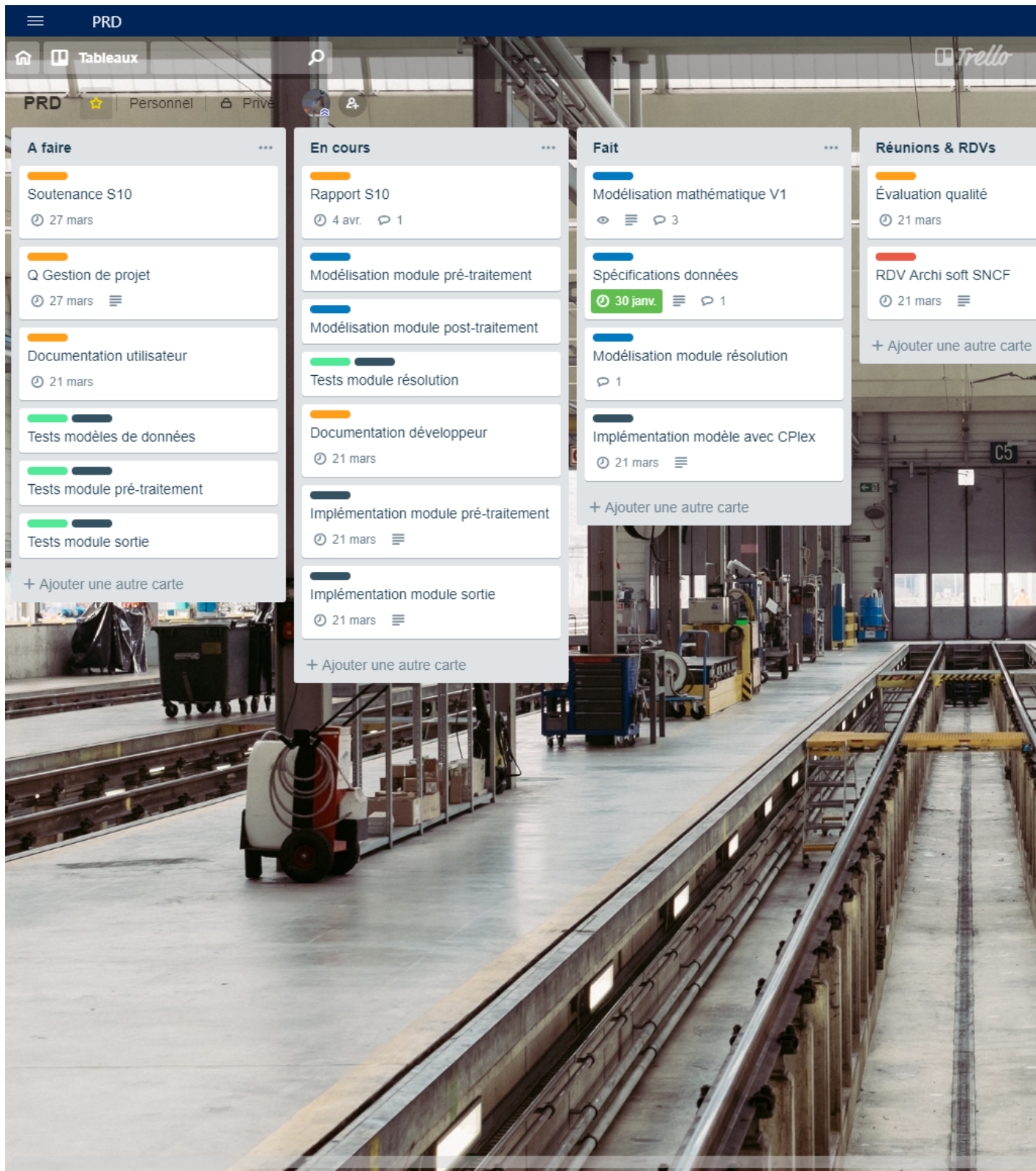


Figure 4 – Trello en cours de S10

# D

## Cahier des charges

Cette annexe présente le cahier des charges en version 4, du 29 novembre 2018. Il s'agit de la dernière version du cahier des charges, à la date de l'écriture de ce rapport.

Ce document est utilisé pour formaliser la demande de la SNCF, ainsi que de faire valider notre compréhension du problème.

## Projet de Recherche et Développement



# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

## Cahier des charges

Version 4 – jeudi 29 novembre 2018

*Benjamin Pouvreau, DI5*

**Encadrants :**  
*Ronan Bocquillon*  
*Vincent T'Kindt*

## Versions du document

| V | Date       | Commentaire                                                                           | Auteur            |
|---|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1 | 26/09/2018 | Création du cahier des charges                                                        | Benjamin Pouvreau |
| 2 | 03/10/2018 | Révision à la suite du retour de M. Bocquillon                                        | Benjamin Pouvreau |
| 3 | 18/10/2018 | Révision à la suite de la réunion du 11/10 avec M. Branger : nouvelles spécifications | Benjamin Pouvreau |
| 4 | 29/11/2018 | Révision à la suite de la rencontre des SET 1 à Paris                                 | Benjamin Pouvreau |

## Table des matières

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Versions du document.....                               | 1  |
| Introduction .....                                      | 3  |
| 1. Présentation du PRD.....                             | 4  |
| 1.1. Intervenants .....                                 | 4  |
| 1.1.1. Encadrants.....                                  | 4  |
| 1.1.2. Client.....                                      | 4  |
| 1.1.3. Exécutant.....                                   | 4  |
| 1.2. Contexte et définition du problème .....           | 5  |
| 1.3. Objectif.....                                      | 5  |
| 2. Expression du besoin .....                           | 6  |
| 3. Contraintes.....                                     | 6  |
| 3.1. Roulements.....                                    | 6  |
| 3.2. Maintenance préventive .....                       | 6  |
| 3.3. Criticité.....                                     | 7  |
| 3.4. Sites de maintenance.....                          | 7  |
| 3.5. Rentrée des rames sur un site de maintenance ..... | 8  |
| 3.6. Changement de voies .....                          | 8  |
| 3.7. Disponibilité des rames sur le réseau.....         | 9  |
| 3.8. Restrictions d'utilisation.....                    | 9  |
| 3.9. Données en entrée.....                             | 9  |
| 3.10. Durée des opérations de maintenance .....         | 9  |
| 3.11. Horizon de planification.....                     | 9  |
| 4. Dates clés .....                                     | 10 |
| 5. Suivi du projet .....                                | 10 |
| 6. Livrables.....                                       | 10 |



## Introduction

Ce document présente les charges du Projet de Recherche et Développement  
*Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF.*

Il permet d'encadrer et de spécifier les besoins du PRD et de définir ses contraintes.





---

## 1. Présentation du PRD

### 1.1. Intervenants

#### 1.1.1. Encadrants

Ce PRD est encadré par Messieurs Ronan BOCQUILLON et Vincent T'KINDT, enseignants chercheurs à l'*École Polytechnique de l'Université de Tours*.

#### 1.1.2. Client

Ce PRD est effectué en collaboration avec le Technicentre SNCF de Saint-Pierre-des-Corps pour le compte de la *Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF)*, représentée par Messieurs Guillaume BRANGER, Romuald DETRUE et Bruno LASNIER.

#### 1.1.3. Exécutant

Ce PRD est exécuté par Benjamin POUVREAU, élève ingénieur en 5<sup>ème</sup> année à l'*École Polytechnique de l'Université de Tours*, spécialité Informatique.

---

## 1.2. Contexte et définition du problème

L'intitulé du PRD est le suivant :

*Ce PRD est en collaboration avec le technicentre SNCF de St Pierre des Corps dont la préoccupation est de planifier les opérations de maintenance qui doivent être réalisées sur tous les trains roulant en France. Tous les jours, certains ingénieurs du technicentre doivent prévoir pour la semaine à venir quelles sont les opérations de maintenance corrective à faire : par exemple, changer une porte sur un véhicule de telle rame. Ces opérations sont plus ou moins urgentes et impliquent donc un délai maximum avant d'être réalisées. Par ailleurs, chaque opération, pour pouvoir être réalisée va nécessiter un ensemble de ressources (des techniciens qualifiés, des conditions d'accès à la rame, lieu où la réparation doit être faite, etc.).*

*La problématique pour la SNCF est donc d'ordonnancer toutes ces opérations à l'échelle de la semaine.*

*Dans le cadre du PRD nous étudierons ce problème que nous modéliserons mathématiquement après une étude de terrain au sein du technicentre de Joncherolles. Un état de l'art permettra d'évaluer si d'autres travaux sur ce problème existent. Puis nous envisagerons la réalisation de premiers algorithmes de résolution, notamment le respect de la maintenance préventive. L'adaptation de celle-ci sera à définir lors de la revue du technicentre.*

## 1.3. Objectif

L'objectif du PRD est de trouver une solution pour ordonnancer les opérations de maintenance corrective nécessaires pour les rames des lignes H/K de la SNCF, rattachées au technicentre de maintenance de Joncherolles, en prenant en compte les contraintes de disponibilité des trains ainsi que les diverses contraintes des sites de maintenance.

On cherche à minimiser le retard des correctifs par rapport aux dates dues, afin d'assurer une meilleure disponibilité des rames sur le réseau, en impactant au minimum le planning initial.



## 2. Expression du besoin

Ordonnancer les opérations de maintenance corrective à 7 jours des rames rattachées au technicentre de maintenance de Joncherolles, pour les incidents de criticité 4 à 6.

## 3. Contraintes

### 3.1. Roulements

Les rames de la SNCF doivent être disponibles à la circulation pour effectuer des roulements, i.e. un trajet d'un point A à un point B. Ces roulements sont définis au préalable dans un calendrier des roulements, qui assigne un planning à une rame. Ces plannings doivent être respectés. Un roulement est défini par :

- La gare d'arrivée
- L'heure d'arrivée
- La gare de départ
- L'heure de départ
- Les gares traversées
- Les horaires de passage

On distingue dans le planning des roulements les roulements commerciaux des roulements d'entrée et sortie de dépôt.

Sur une journée d'exploitation, une rame peut effectuer 0 à plusieurs roulements.

### 3.2. Maintenance préventive

Les rames sont soumises à des opérations de maintenance préventive. Ces opérations doivent obligatoirement être effectuées avant une date limite, sous peine d'immobilisation de la rame.

Pour ce faire, des créneaux réservés à la maintenance préventive sont planifiés plusieurs semaines à l'avance sur le technicentre de Joncherolles et doivent obligatoirement être respectés. Ainsi, il est possible d'intervenir la rame planifiée pour ce créneau avec une autre rame sur laquelle une opération de maintenance préventive doit être effectuée. Cependant, un créneau de maintenance préventive doit être honoré et ne peut donc pas être remplacé par de la maintenance corrective. En cas d'intervention de rames, sur ces créneaux, il est nécessaire de prendre en compte les dates dues des opérations de maintenance préventive des rames échangées, afin de ne pas les dépasser.



### 3.3. Criticité

Les dysfonctionnements dont sont atteintes les rames ont différents niveaux de criticité, de 0 à 6. Certaines dégradations requièrent en effet une correction plus urgente que d'autres.

Certains niveaux de criticité induisent des temps maximums de traitement de la défaillance, ce qui ajoute des dates dues à la planification. Les criticités 5 et 6 ont un délai maximum de 72h et 24h respectivement.

Une criticité 4 est généralement traitée en rentrée naturelle, c'est-à-dire une rentrée prévue par le planning de roulement. Un délai de traitement peut cependant lui être assigné.

Les criticités 0 à 3 sont traitées en rentrée naturelle uniquement, et ne sont pas à planifier. Elle ne seront donc pas considérées dans notre problème.

Une rame qui n'a pas pu être rentrée sur un site de maintenance avant sa date due subit des restrictions d'utilisation et est généralement stockée sur un site de garage avant d'être prise en charge par un site de maintenance.

### 3.4. Sites de maintenance

Les lignes H/K disposent de trois sites de maintenance :

- **Crépy en Valois et Persan Beaumont** : Ces gares sont équipées pour réaliser des opérations de maintenance simples.
- **Le technicentre de maintenance de Joncherolles** : Ce technicentre permet de réaliser des opérations de maintenance plus complètes sur les rames.

Chacun des sites de maintenance des lignes H/K dispose de propriétés particulières. Il faut donc profiter de l'inactivité de la rame sur un site de maintenance, en fonction de :

- **L'équipement du site de maintenance** : Chaque site de maintenance dispose d'un nombre différent d'infrastructures de maintenance. Il existe trois types d'infrastructures :
  - **Fosse** : Infrastructure abaissée par rapport au sol, permettant de réaliser des opérations de maintenance sous les rames et au niveau inférieur des rames.
  - **Passerelle** : Infrastructure surélevée par rapport au sol, permettant de réaliser des opérations de maintenance sur la partie supérieure des rames.
  - **Terre-plein** : Infrastructure de plain-pied permettant de réaliser diverses opérations de maintenance. Il s'agit la plupart du temps d'une voie classique. Crépy en Valois et Persan Beaumont ne disposent que de ce type d'infrastructures.

- **Le stock des pièces :** Les sites de maintenance disposent d'un stock de pièces nécessaire aux opérations de maintenance. Notre problème considèrera que les stocks sont suffisamment alimentés, ils ne sont donc pas pris en compte dans la modélisation.
- **Le nombre d'entrées :** Les sites de maintenance sont capables de faire rentrer un certain nombre de rames par jour ou par nuit. Ainsi pour Joncherolles, le nombre maximum de rentrées est fixé à 9 le matin et 7 le soir, sachant que les rames rentrent la plupart du temps en étant accouplées à une seconde rame. Deux rames rentrant en étant accouplées sont considérées comme une seule entrée.
- **La capacité :** Chaque site de maintenance dispose d'une capacité maximale de rames, et donc d'un potentiel de résolution d'incidents. Cette capacité s'exprime selon les infrastructures nécessaires pour les incidents : passerelle, fosse ou terre-plein.
- **Les équipes de maintenance :** Les sites de maintenance disposent de deux types d'équipe, qui ne présentent pas les mêmes qualifications :
  - **Dépannage :** Ces équipes interviennent sur les incidents de criticité 4 à 6. Elles sont capables d'effectuer toutes les opérations de maintenance permettant de résoudre les incidents de criticité 4 à 6.
  - **Maintenance classique :** Ces équipes interviennent sur les incidents de criticité 0 à 3. La plupart du temps, ces équipes sont spécialisées pour réaliser certaines opérations. Les différentes équipes de maintenance classique n'ont pas les mêmes qualifications. Ces équipes ne seront pas considérées dans notre problème, puisque seules les criticités 4 à 6 nous intéressent.

### 3.5. Rentrée des rames sur un site de maintenance

Notre problème est de planifier la rentrée des rames sur les sites de maintenance. Nous ne nous occupons pas du routage des rames au sein des sites, cette opération étant gérée par les sites de maintenance.

### 3.6. Changement de voies

Il est possible de faire changer de voie une rame au sein d'un site de maintenance. Cependant, un changement de voie nécessite du temps. En effet, l'électrification d'une voie est désactivée lorsqu'une rame y est présente pour des opérations de maintenance, afin de garantir la sécurité des techniciens. Pour changer de voie de maintenance, il faut donc désécuriser la voie, puis déplacer la rame sur la nouvelle voie, et enfin sécuriser la nouvelle voie. Pour l'ensemble de cette opération, il faut compter entre trente minutes et une heure.



### 3.7. Disponibilité des rames sur le réseau

Les lignes H/K n'ont pas la même fréquentation au cours d'une journée. Lors des heures de pointe, où les pics de plus forte fréquentation sont observés, la SNCF doit pouvoir assurer une disponibilité minimale pour que le réseau puisse subvenir aux besoins des passagers. Il existe donc une limite de 11 rames à l'arrêt maximum aux heures de pointes.

### 3.8. Restrictions d'utilisation

Si une rame subit un incident et n'est pas rentrée avant sa date due, une restriction d'utilisation lui est appliquée. Dans certains cas, la rame peut encore circuler sous certaines conditions, par exemple en étant raccrochée à une autre rame.

### 3.9. Données en entrée

Les données fournies en entrée à partir desquelles la solution sera générée sont :

- Le planning des roulements des rames
- Le planning des opérations de maintenance préventive des rames
- Les signalements
- Les infrastructures des sites de maintenance

### 3.10. Durée des opérations de maintenance

Il existe différentes opérations de maintenance corrective. Chacune de ces opérations nécessite un temps de réalisation différent. Il faut prendre en compte ces durées dans la planification de la maintenance corrective.

### 3.11. Horizon de planification

La planification de la maintenance doit être effectuée de J à J+7.



---

## 4. Dates clés

- **Mercredi 12 décembre 2018 à 10h30** : Soutenance de S9, partie *recherche* du PRD, avec rendu du rapport de S9 une semaine avant.
- **Avril 2019 (à préciser)** : Soutenances S10 de fin de PRD, partie *développement*, et rendu du PRD, avec rendu du rapport S9 + S10 une semaine avant.

## 5. Suivi du projet

Les encadrants et les clients du projet seront notifiés de l'avancement du projet par des comptes-rendus hebdomadaires.

## 6. Livrables

- Le présent cahier des charges, pour formaliser la demande
- Une formulation du problème
- Le modèle mathématique
- Le cahier des spécifications

# E

## Formulation du problème

Cette annexe présente le document de formulation du problème d'ordonnancement dans sa version 3, du 7 novembre 2018. Il ne s'agit pas de la version la plus récente, celle-ci ayant été réalisée avant la rencontre du personnel en charge de la planification à Paris, le 8 novembre 2018.

Il présente les hypothèses qui étaient retenues à cet instant du projet, ainsi que le travail de réflexion et d'analyse sur la façon de pré-traiter les données.

Ce document n'est pas à jour sur les contraintes, il a servi à décrire les différentes contraintes et hypothèses avant la mise en place du modèle mathématique.



## Projet de Recherche et Développement



# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

## Formulation du problème

Version 3 – mercredi 7 novembre 2018

*Benjamin Pouvreau, DI5*

**Encadrants :**  
*Ronan Bocquillon*  
*Vincent T'Kindt*



## Versions du document

| V | Date       | Commentaire                                                                                                                       | Auteur            |
|---|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1 | 03/10/2018 | Création du document                                                                                                              | Benjamin Pouvreau |
| 2 | 10/10/2018 | Ajustement suites aux retours des encadrants                                                                                      | Benjamin Pouvreau |
| 3 | 07/11/2018 | Reformulation à la suite des retours et nouvelles spécifications de M. Branger ainsi qu'à l'analyse des données d'infrastructures | Benjamin Pouvreau |

## Table des matières

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Versions du document.....                  | 1  |
| 1. Introduction .....                      | 3  |
| 2. Hypothèses .....                        | 4  |
| 3. Données.....                            | 5  |
| 3.1. Données des incidents .....           | 5  |
| 3.1.1. Signalements .....                  | 5  |
| 3.1.2. Criticité .....                     | 5  |
| 3.1.3. Correction des incidents .....      | 6  |
| 3.2. Données des sites de maintenance..... | 7  |
| 3.2.1. Infrastructures .....               | 7  |
| 3.2.2. Transit .....                       | 8  |
| 3.2.3. Équipes .....                       | 9  |
| 3.3. Données des rames .....               | 10 |
| 3.3.1. Roulements .....                    | 10 |
| 3.3.2. Planning des rames.....             | 10 |
| 4. Formulation du problème.....            | 11 |
| 4.1. Objectifs .....                       | 11 |
| 4.2. Entrée .....                          | 11 |
| 4.3. Contraintes.....                      | 11 |
| 4.4. Sortie.....                           | 12 |

---

## 1. Introduction

Ce document présente une approche du problème d'ordonnancement des opérations de maintenance corrective des rames des lignes H/K de la SNCF. Il propose une formulation du problème, avec ses données d'entrée, ses objectifs, ses contraintes et ses données de sortie.

Cette approche propose une représentation matricielle des données, afin qu'elles puissent être manipulées mathématiquement et informatiquement. Elle ne propose pas de modèle mathématique.

Cette version propose des hypothèses issues de l'analyse des fichiers de données fournis par la SNCF. Celles concernant les ressources humaines des sites de maintenance sont simplifiées, la rencontre avec le personnel de Joncherolles n'ayant pas encore eu lieu à la date de cette version. Ce document sera donc amené à évoluer.

## 2. Hypothèses

- Pour cette formulation, on considère un unique technicentre de maintenance, celui de Joncherolles, et un ensemble de sites de maintenance équipés de voies de garage.
- On considère que les infrastructures dont les sites de maintenance sont équipés sont compatibles pour tous les types de rames des lignes H/K.
- On considère trois types d'infrastructures :
  - Fosse
  - Passerelle
  - Terre-plein
- Les voies de garage ne sont équipées que de terre-pleins, tandis que le technicentre de Joncherolles est équipé des trois types d'infrastructures.
- Une journée de travail est divisée en trois unités de temps :
  - M : matin
  - A : après-midi
  - N : nuit
- La granularité des ressources humaines des sites de maintenance est du niveau des équipes. Le nombre d'agents par équipe n'est pas pris en compte.
- Une équipe ne peut pas réaliser plus d'une opération de maintenance en mois d'une unité de temps (M, A ou N). Une opération de maintenance peut s'étendre sur plusieurs unités de temps, voire plusieurs jours.
- On considère qu'à un ou plusieurs types d'incidents (codifiés) correspondent une ou plusieurs opérations de maintenance.
- Le plan de roulement des rames est une constante. Les rames doivent respecter ce plan, on ne peut pas intervertir une rame avec une autre pour un roulement.
- Le planning des maintenances préventives est une constante. Il n'est pas possible de repousser une opération de maintenance préventive pour planifier une opération corrective.

## 3. Données

### 3.1. Données des incidents

#### 3.1.1. Signalements

Le fichier des signalements contient une grande quantité d'informations par signalement, seules quelques données sont conservées. Les données qui seront nécessaire à la résolution du problème sont la rame, son type, le code identifiant le type d'incident, la date du signalement et la criticité de l'incident.

**Signalements**

| Rame | Type rame | Code incident | Date             | Criticité |
|------|-----------|---------------|------------------|-----------|
| 01H  | 1         | 50050         | 03/10/2018 14:30 | 6         |
| 02H  | 2         | 20560         | 04/10/2018 06:51 | 2         |
| 03H  | 4         | 10202         | 04/10/2018 12:12 | 4         |

#### 3.1.2. Criticité

Les incidents impactant les rames ont différents niveaux de criticités, de 1 à 6, qui induisent un délai maximum de correction du défaut. Le tableau ci-dessous indique les délais maximums de traitement des incidents en fonction du niveau de criticité de l'incident.

Un signalement de criticité 1 n'est pas un incident mais une information, et ne nécessite donc pas une opération de maintenance. Les incidents de criticité 1 seront donc ignorés.

**Criticité / Délai max**

| Criticité | Délai max (h) |
|-----------|---------------|
| 2         | 672           |
| 3         | 672           |
| 4         | 168           |
| 5         | 112           |
| 6         | 24            |

### 3.1.3. Correction des incidents

On considère qu'à un code incident sur une rame correspond un ensemble d'opérations de maintenance. On liste donc les incidents par leur code de type d'incident, en les mettant en correspondance avec les opérations de maintenance nécessaires pour corriger l'incident.

#### Correspondance incident / opérations de maintenance

|               | <div><input checked="" type="checkbox"/> 1 Nécessaire</div> |             | <div><input type="checkbox"/> 0 Non</div> |             |
|---------------|-------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|-------------|
|               | Opérations de maintenance nécessaires                       |             |                                           |             |
| Code incident | Opération A                                                 | Opération B | Opération C                               | Opération D |
| 1             | 1                                                           | 1           | 0                                         | 0           |
| 2             | 0                                                           | 0           | 1                                         | 1           |
| 3             | 1                                                           | 0           | 0                                         | 1           |
| 4             | 0                                                           | 1           | 0                                         | 0           |

Les opérations de maintenance ne requièrent pas toutes le même temps de réalisation. Afin de représenter ceci, un temps de réalisation est associé à chacune des opérations de maintenance, comme dans le tableau ci-dessous.

#### Temps par opération

| Opération   | Temps (h) |
|-------------|-----------|
| Opération A | 6         |
| Opération B | 2         |
| Opération C | 1         |
| Opération D | 5         |

## 3.2. Données des sites de maintenance

### 3.2.1. Infrastructures

Pour réaliser les différentes opérations de maintenance corrective, chaque site de maintenance dispose d'un ensemble d'infrastructures. Tous les sites ne sont pas équipés des mêmes installations et en même quantité. Certaines voies sont équipées d'une fosse, d'autres d'une passerelle, certains de ces deux équipements, quand il ne s'agit pas d'un simple terre-plein. Ces données sont représentées ainsi, par site de maintenance :

**Infrastructures par site de maintenance**

| <input checked="" type="checkbox"/> 1 Équipée |                                                                                    |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Joncherolles                                  | Infrastructures                                                                    |
| Nom voie                                      | Fosse      Passerelle      Terre-plein                                             |
| 3                                             | <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 1      0 |
| 17                                            | 0      0 <input checked="" type="checkbox"/> 1                                     |
| 31                                            | <input checked="" type="checkbox"/> 1      0      0                                |

Ces infrastructures sont adaptées à la réalisation d'opérations de maintenance spécifiques. Ceci est représenté par la matrice ci-dessous, qui indique quel type d'infrastructure peut permettre la réalisation de l'opération. Dans l'exemple ci-dessous, l'opération B peut être effectuée à l'aide d'une fosse ou d'un terre-plein, mais pas avec une passerelle.

**Correspondance infrastructures / opérations de maintenance**

|                |                                                      |                                           |             |             |
|----------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|-------------|
|                | <div><input checked="" type="checkbox"/> 1 Oui</div> | <div><input type="checkbox"/> 0 Non</div> |             |             |
|                | Opérations de maintenance réalisables                |                                           |             |             |
| Infrastructure | Opération A                                          | Opération B                               | Opération C | Opération D |
| Fosse          | 1                                                    | 1                                         | 0           | 0           |
| Passerelle     | 0                                                    | 0                                         | 1           | 1           |
| Terre-plein    | 0                                                    | 1                                         | 0           | 0           |



Les voies peuvent être initialement occupées par des rames. Il est donc nécessaire de prendre en compte le planning de disponibilité, comme ci-dessous.

#### Planning de disponibilité des voies par site de maintenance

0 Indisponible 1 Disponible M : matin, A : après-midi, N : nuit

| Joncherolles | Dimanche |   |   | Lundi |   |   | Mardi |   |   | Mercredi |   |   | Jeudi |   |   | Vendredi |   |   |
|--------------|----------|---|---|-------|---|---|-------|---|---|----------|---|---|-------|---|---|----------|---|---|
| Voie         | M        | A | N | M     | A | N | M     | A | N | M        | A | N | M     | A | N | M        | A | N |
| 3            | 1        | 1 | 1 | 1     | 1 | 1 | 1     | 1 | 1 | 1        | 1 | 1 | 1     | 1 | 1 | 1        | 1 | 1 |
| 17           | 1        | 1 | 0 | 0     | 0 | 0 | 0     | 0 | 0 | 0        | 0 | 0 | 0     | 1 | 1 | 1        | 1 | 1 |
| 31           | 0        | 0 | 0 | 1     | 1 | 1 | 1     | 1 | 1 | 1        | 1 | 1 | 0     | 0 | 1 | 1        | 1 | 1 |

### 3.2.2. Transit

Afin de réaliser une opération de maintenance corrective sur une rame, il faut la déplacer d'une voie à une autre au sein du site de maintenance, et ce déplacement nécessite d'introduire un intervalle de temps de transit. Ces intervalles sont représentés par la matrice ci-dessous, qui donne le temps de transit à prévoir entre une voie et une autre. On considère qu'il est possible que l'opération nécessite plus de temps pour être effectuée dans un sens (A vers B) que dans l'autre (B vers A), comme dans l'exemple avec les voies 17 et 3.

#### Temps de transit entre deux voies d'un site

| Joncherolles | Voie arrivée |    |    |
|--------------|--------------|----|----|
| Voie départ  | 3            | 17 | 31 |
| 3            | 0            | 20 | 60 |
| 17           | 30           | 0  | 40 |
| 31           | 60           | 40 | 0  |

### 3.2.3. Équipes

Chaque site de maintenance dispose d'un nombre d'équipes de techniciens variable, et les équipes ne disposent pas des mêmes qualifications pour réaliser les opérations de maintenance corrective. Ainsi, ces données seront représentées suivant le tableau ci-dessous, associant les opérations de maintenance aux équipes qualifiées :

**Équipes et leurs qualifications par site de maintenance**

|              |                |                 |             |             |
|--------------|----------------|-----------------|-------------|-------------|
|              | 1 Qualifiée    | 0 Non qualifiée |             |             |
| Joncherolles | Qualifications |                 |             |             |
| Équipe       | Opération A    | Opération B     | Opération C | Opération D |
| Eq 1         | 1              | 1               | 0           | 0           |
| Eq 2         | 0              | 0               | 1           | 1           |
| Eq 3         | 1              | 0               | 0           | 1           |

Les équipes ne sont pas disponibles en continu pour réaliser des opérations de maintenance correctives. Elles peuvent être en repos ou travailler sur d'autres opérations. Cette contrainte peut être représentée par le tableau ci-dessous :

**Planning de disponibilité des équipes par site de maintenance**

0

Indisponible

1

Disponible

| Joncherolles | Dimanche |   |   | Lundi |   |   | Mardi |   |   | Mercredi |   |   | Jeudi |   |   | Vendredi |   |   |
|--------------|----------|---|---|-------|---|---|-------|---|---|----------|---|---|-------|---|---|----------|---|---|
| Équipe       | M        | A | N | M     | A | N | M     | A | N | M        | A | N | M     | A | N | M        | A | N |
| Eq 1         | 1        | 1 | 0 | 1     | 1 | 0 | 0     | 1 | 0 | 1        | 0 | 0 | 0     | 1 | 0 | 1        | 1 | 0 |
| Eq 2         | 0        | 0 | 1 | 0     | 0 | 1 | 0     | 0 | 1 | 0        | 0 | 0 | 0     | 0 | 1 | 0        | 0 | 1 |
| Eq 3         | 1        | 1 | 0 | 0     | 0 | 0 | 1     | 1 | 0 | 0        | 0 | 0 | 1     | 1 | 0 | 0        | 0 | 1 |

### 3.3. Données des rames

#### 3.3.1. Roulements

Les données pertinentes concernant le planning des roulements des rames sont les périodes d'inactivité des rames. Cependant, pour pouvoir recevoir une opération de maintenance corrective, la rame doit être inactive suffisamment longtemps, et sur un site équipé d'infrastructures de maintenance. Par conséquent, il faut prétraiter les données ainsi :

- Déduire les périodes d'inactivité des rames depuis leur planning de roulement
- Ignorer les périodes d'inactivité lorsque la rame n'est pas sur un site de maintenance
- Ignorer les périodes d'inactivité quand les opérations de maintenance nécessaires ne peuvent pas être exécutées sur le site (infrastructure ou qualification du personnel)
- Ignorer les périodes d'inactivité inférieures à deux heures

On obtient ainsi des données similaires au tableau ci-dessous :

**Inactivités des rames**

| Rame | Lieu   | Date début       | Date fin         | Temps (min) |
|------|--------|------------------|------------------|-------------|
| 01H  | PSE-GB | 06/09/2018 19:30 | 06/09/2018 23:50 | 260,00      |
| 01H  | SDE-JO | 03/10/2018 12:30 | 04/10/2018 15:17 | 1607,00     |
| 02H  | SDE-JO | 03/10/2018 05:30 | 05/10/2018 17:30 | 3600,00     |

#### 3.3.2. Planning des rames

Grâce aux précédentes données et au planning des opérations de maintenance préventive, on peut construire un planning de disponibilité des rames par site de maintenance. Ainsi, dans l'exemple ci-dessous, on peut rentrer la rame 01H à Joncherolles dimanche matin, car elle sera sur site, disposera d'un intervalle d'inactivité au moins égal à 2h et pourra faire corriger son dysfonctionnement avec les infrastructures du site de Joncherolles.

**Planning de disponibilité des rames par site de maintenance**

0 Indisponible    1 Disponible    M : matin, A : après-midi, N : nuit

| Joncherolles | Dimanche |   |   | Lundi |   |   | Mardi |   |   | Mercredi |   |   | Jeudi |   |   | Vendredi |   |   |
|--------------|----------|---|---|-------|---|---|-------|---|---|----------|---|---|-------|---|---|----------|---|---|
| Rame         | M        | A | N | M     | A | N | M     | A | N | M        | A | N | M     | A | N | M        | A | N |
| 01H          | 1        | 1 | 0 | 0     | 0 | 0 | 1     | 1 | 0 | 1        | 1 | 1 | 0     | 1 | 1 | 0        | 1 | 1 |
| 02H          | 0        | 0 | 0 | 0     | 1 | 1 | 1     | 1 | 0 | 0        | 1 | 1 | 1     | 0 | 1 | 1        | 1 | 0 |
| 03H          | 0        | 0 | 1 | 1     | 1 | 1 | 1     | 1 | 0 | 0        | 1 | 0 | 1     | 1 | 0 | 1        | 1 | 0 |

## 4. Formulation du problème

### 4.1. Objectifs

- Ordonnancer les opérations de maintenance corrective sur les rames rattachées au technicentre de maintenance de Joncherolles, du jour J au jour J+7
- Maximiser le nombre de rames traitées
- Minimiser le retard des correctifs par rapport aux dates dues

### 4.2. Entrée

- Liste des incidents nécessitant une opération de maintenance corrective. Se référer à [Signalements](#) pour voir la structure de la liste.

### 4.3. Contraintes

Se référer à Données pour voir la structure des données de contraintes.

- Criticité des incidents : respect des dates dues
- Opérations de maintenance
  - Durée des opérations
  - Types d'infrastructures nécessaires
- Planning initial des rames :
  - Roulements
  - Maintenances préventives / immobilisations
- Ressources des sites de maintenance :
  - Voies de maintenance :
    - Nombre
    - Disponibilité
    - Infrastructures
    - Temps de transit entre les voies
  - Équipes :
    - Nombre
    - Qualification
    - Disponibilité



## 4.4. Sortie

- Liste des opérations ordonnancées (voir le tableau ci-dessous) :
  - Rame
  - Dates début / fin
  - Opération
  - Site
  - Voie
  - Équipe

**Planification maintenance corrective**

| Rame | Début      | Fin        | Opération   | Site   | Voie | Équipe |
|------|------------|------------|-------------|--------|------|--------|
| 01H  | Lundi N    | Mardi M    | Opération A | SDE-JO | 3    | Eq 1   |
| 02H  | Mercredi M | Mercredi M | Opération B | SDE-JO | 17   | Eq 2   |
| 03H  | Mardi A    | Mardi N    | Opération C | SDE-JO | 3    | Eq 1   |

- Liste des incidents du fichier d'entrée pour lesquels les opérations de maintenance n'ont pas pu être ordonnancées

# F

## Modèle mathématique

Cette annexe présente le modèle mathématique dans sa version 1.6, soit la version implémentée dans l'application de résolution.

Ce document présente les hypothèses et contraintes retenues pour la résolution du problème.

# Projet de Recherche et Développement



## Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

### Modélisation Mathématique

Version 1.6 – mercredi 27 mars 2019

*Benjamin Pouvreau, DI5*

#### **Encadrants :**

Ronan BOCQUILLON  
Vincent T'KINDT

## Versions du modèle

| V   | Date       | Commentaire                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Auteur            |
|-----|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1.0 | 20/12/2018 | Création du document, première version du modèle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Benjamin Pouvreau |
| 1.1 | 23/01/2019 | Correctifs suite au retour encadrant et contrainte de nb de rentrées suivant créneau                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Benjamin Pouvreau |
| 1.2 | 30/01/2019 | Ajout données occupation des voies $\mathcal{T}_j^{dv}$ , nb max rames à l'arrêt à une date donnée $f_t$ et date début au plus tard $S_i^t$<br>Modification contraintes (5) et (10)<br>Ajout contrainte (7) (heures de pointe)<br>Correctif $T_i$ : Le retard est désormais calculé à partir de la rentrée de la rame, et $d_i$ est désormais la date de rentrée souhaitée | Benjamin Pouvreau |
| 1.3 | 28/02/2019 | Correction contrainte (7)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Benjamin Pouvreau |
| 1.4 | 05/03/2019 | Précision des hypothèses ; révision complète du modèle de données et des contraintes à partir des intervalles de disponibilité des rames et des voies : remplacement de $\mathcal{V}_{i,l}^d$ par $\mathcal{T}_{i,j}^d$ , suppression des anciennes contraintes (1), (5) et (6) désormais gérées en pré-traitement                                                         | Benjamin Pouvreau |
| 1.5 | 07/03/2019 | Clarification des notations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Benjamin Pouvreau |
| 1.6 | 21/03/2019 | Correction contrainte (3) : multiplication par $n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Benjamin Pouvreau |

Réalisé avec L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X



# Modélisation

## Hypothèses

- On considère que chaque rame ne nécessite qu'une seule opération de maintenance corrective.
- Ce modèle est construit sur le principe selon lequel une rame doit respecter son plan de roulement et ne peut pas être échangée avec une autre rame sur ce plan. Ce modèle mathématique cherche donc à tirer profit des disponibilités des rames selon ce plan.
- Le temps nécessaire au déplacement d'une rame pour l'amener jusqu'à une voie de maintenance est inclus dans sa durée d'opération corrective (notée  $p_i$  dans les données). On considère que ce temps ne diffère pas selon l'endroit où est stationnée la rame. Un pré-traitement est effectué sur les données d'entrée pour savoir si la rame peut accéder à un site de maintenance depuis son lieu d'arrêt.
- Ce modèle est indexé sur le temps. Le temps est discrétisé de façon constante et est représenté par des dates  $t$  et non par des périodes. Les intervalles de temps sont représentés par une date de début  $t^d$  et une date de fin  $t^f$  :  $\llbracket t^d; t^f \rrbracket$ .
- On considère qu'une rame est disponible à un instant  $t$  si elle ne roule pas ou n'est pas déjà en maintenance préventive.
- On considère qu'une voie est disponible à un instant  $t$  si elle n'est pas déjà occupée par une rame.
- Le nombre maximal de rames arrêtées par date (appelé  $f_t$  dans les données) comprends le nombre de rames déjà à l'arrêt à cette date  $t$ , par exemple pour de la maintenance préventive.
- Le nombre maximal de rentrées de rames par créneau horaire (appelé  $r_{l,k}$  dans les données) comprends le nombre de rame rentrant sur les sites  $l$  pendant ce créneau  $k$ , par exemple pour de la maintenance préventive.
- Pour chaque rame, on ne parle pas d'"intervalles de disponibilité" mais d'"intervalles de possibles dates de début d'opération" (voir  $\mathcal{T}_i^r$  dans les données). Il s'agit des intervalles de disponibilité des rames auxquels on a retranché la durée d'opération minimale nécessaire des rames, afin de ne garder que les dates de rentrées possibles dans ces intervalles (soit  $t^f - p_i$  avec la notation utilisée dans les données).
- Le nombre de créneaux horaires (noté  $n^h$  dans les données) s'adapte à l'horizon de planification. Ainsi, si on découpe 24h en 3 créneaux, et que l'horizon de planification est à 7 jours, on aura donc  $3 \times 7 = 21$  créneaux horaires.
- Pour déterminer les intervalles de temps de début d'opération possible de chaque rame sur chaque voie (noté  $\mathcal{T}_{i,j}^d$  dans les données), on prends en compte les intervalles de possibles dates de début d'opération des rames ( $\mathcal{T}_i^r$ ) couplé aux intervalles de disponibilité des voies ( $\mathcal{T}_j^v$ ), en prenant en compte la durée de l'opération nécessaire et le lieu d'arrêt des rames par rapport aux voies.

## Données

| Données scalaires                                |  | Notation |
|--------------------------------------------------|--|----------|
| Nombre de rames                                  |  | $n$      |
| Nombre de voies                                  |  | $m$      |
| Horizon de planification                         |  | $D$      |
| Nombre de types d'infrastructures                |  | $n^u$    |
| Nombre de sites de maintenance                   |  | $s$      |
| Nombre de créneaux horaires de travail des sites |  | $n^h$    |

| Données vectorielles                                                                                     | Notation                    | Domaine                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Durée de l'opération de maintenance corrective des rames $i$                                             | $p_i$                       | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$                                                                   |
| Date de rentrée souhaitée des rames $i$                                                                  | $d_i$                       | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$                                                                   |
| Priorités des rames $i$                                                                                  | $w_i$                       | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$                                                                   |
| Nombre de périodes de disponibilité des rames $i$                                                        | $n_i^d$                     | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$                                                                   |
| Nombre de périodes de disponibilité des voies $j$                                                        | $n_j^v$                     | $j \in \llbracket 1; m \rrbracket$                                                                   |
| Nombre maximum autorisé de rames en maintenance sur le réseau aux dates $t$                              | $f_t$                       | $t \in \llbracket 0; D \rrbracket$                                                                   |
| Date de début au plus tard de l'opération associée à la rame $i$                                         | $S_i^t = t_{i, n_i^d}^{fr}$ | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$                                                                   |
| L'opération associée à la rame $i$ nécessite une infrastructure de type $k$                              | $b_{i,k}$                   | $= 1$ si vrai, 0 sinon<br>$i \in \llbracket 1; n \rrbracket$<br>$k \in \llbracket 1; n^u \rrbracket$ |
| La voie $j$ est équipée d'une infrastructure de type $k$                                                 | $a_{j,k}$                   | $= 1$ si vrai, 0 sinon<br>$j \in \llbracket 1; m \rrbracket$<br>$k \in \llbracket 1; n^u \rrbracket$ |
| Nombre maximum de rentrées de rames pour le site $l$ sur le créneau horaire $k$                          | $r_{l,k}$                   | $l \in \llbracket 1; s \rrbracket$<br>$k \in \llbracket 1; n^h \rrbracket$                           |
| Nombre d'intervalles de dates $t$ pouvant marquer le début de l'opération de la rame $i$ sur la voie $j$ | $n_{i,j}^d$                 | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$<br>$j \in \llbracket 1; m \rrbracket$                             |

| Ensembles de données                                                                                                      | Notation              | Domaine                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| {Dates $t$ appartenant au créneau horaire $k$ }                                                                           | $\mathcal{H}_k$       | $k \in \llbracket 1; n^h \rrbracket$                                     |
| {Voies $j$ appartenant au site $l$ }                                                                                      | $\mathcal{L}_l$       | $l \in \llbracket 1; s \rrbracket$                                       |
| {Intervalles $\llbracket t_{i,k}^{dr}; t_{i,k}^{fr} \rrbracket$ des possibles dates de début d'opération de la rame $i$ } | $\mathcal{T}_i^r$     | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$                                       |
| {Intervalles de disponibilité $\llbracket t_{j,k}^{dv}; t_{j,k}^{fv} \rrbracket$ de la voie $j$ }                         | $\mathcal{T}_j^v$     | $j \in \llbracket 1; m \rrbracket$                                       |
| {Intervalles de dates $t$ pouvant marquer le début de l'opération de la rame $i$ sur la voie $j$ }                        | $\mathcal{T}_{i,j}^d$ | $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$<br>$j \in \llbracket 1; m \rrbracket$ |

## Variables

$$x_{i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{si la rame } i \text{ débute son opération à la date } t \text{ sur la voie } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket \\ \forall j \in \llbracket 1; m \rrbracket \\ \forall t \in \mathcal{T}_{i,j}^d \end{matrix}$$

$C_i$  Date de fin de l'opération de maintenance corrective de la rame  $i$ ,  $\forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket$

$$T_i = \begin{cases} C_i - p_i - d_i & \text{si } C_i - p_i > d_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket$$

Retard de rentrée de la rame  $i$  par rapport à la date due  $d_i$

## Contraintes

- (1) Chaque opération de maintenance est affectée à une unique voie pour une rame donnée :

$$\sum_{j=1}^m \sum_{t \in \mathcal{T}_{i,j}^d} x_{i,j,t} = 1 \quad \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket$$

- (2) On s'assure qu'une rame ne peut être affectée à une voie que si celle-ci dispose de l'infrastructure nécessaire :

$$b_{i,k} \sum_{t \in \mathcal{T}_{i,j}^d} x_{i,j,t} \leq a_{j,k} \quad \begin{array}{l} \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket \\ \forall j \in \llbracket 1; m \rrbracket \\ \forall k \in \llbracket 1; n^u \rrbracket \end{array}$$

- (3) Chaque voie ne peut être occupée que par une rame à un instant donné :

$$\sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^n \sum_{\substack{t'=t \\ t' \leq t+p_i}} x_{i',j,t'} \leq n \times (1 - x_{i,j,t}) \quad \begin{array}{l} \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket \\ \forall j \in \llbracket 1; m \rrbracket \\ \forall t \in \mathcal{T}_{i,j}^d \end{array}$$

- (4) Nombre maximal autorisé de rames en maintenance selon la date (contrainte des heures de pointe) :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{t'=\max(0; t-p_i)}^t (x_{i,j,t'}) \leq f_t \quad \forall t \in \llbracket 0; D \rrbracket$$

- (5) Les sites de maintenance disposent d'une capacité maximale de rentrées le matin, l'après-midi et le soir :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \in \mathcal{L}_l} \sum_{t \in \mathcal{H}_k \cap \mathcal{T}_{i,j}^d} x_{i,j,t} \leq r_{l,k} \quad \begin{array}{l} \forall l \in \llbracket 1; s \rrbracket \\ \forall k \in \llbracket 1; n^h \rrbracket \end{array}$$

- (6) Calcul de la date de fin de l'opération de maintenance corrective d'une rame :

$$\sum_{j=1}^m \sum_{t \in \mathcal{T}_{i,j}^d} x_{i,j,t}(t + p_i) = C_i \quad \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket$$

- (7) Le retard de la date de rentrée d'une rame par rapport à sa date due est forcément positif, et est supérieur à la différence entre la date de début de l'opération de maintenance et la date de rentrée due.

$$T_i \geq 0, \quad T_i \geq C_i - p_i - d_i \quad \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket$$

## Objectif

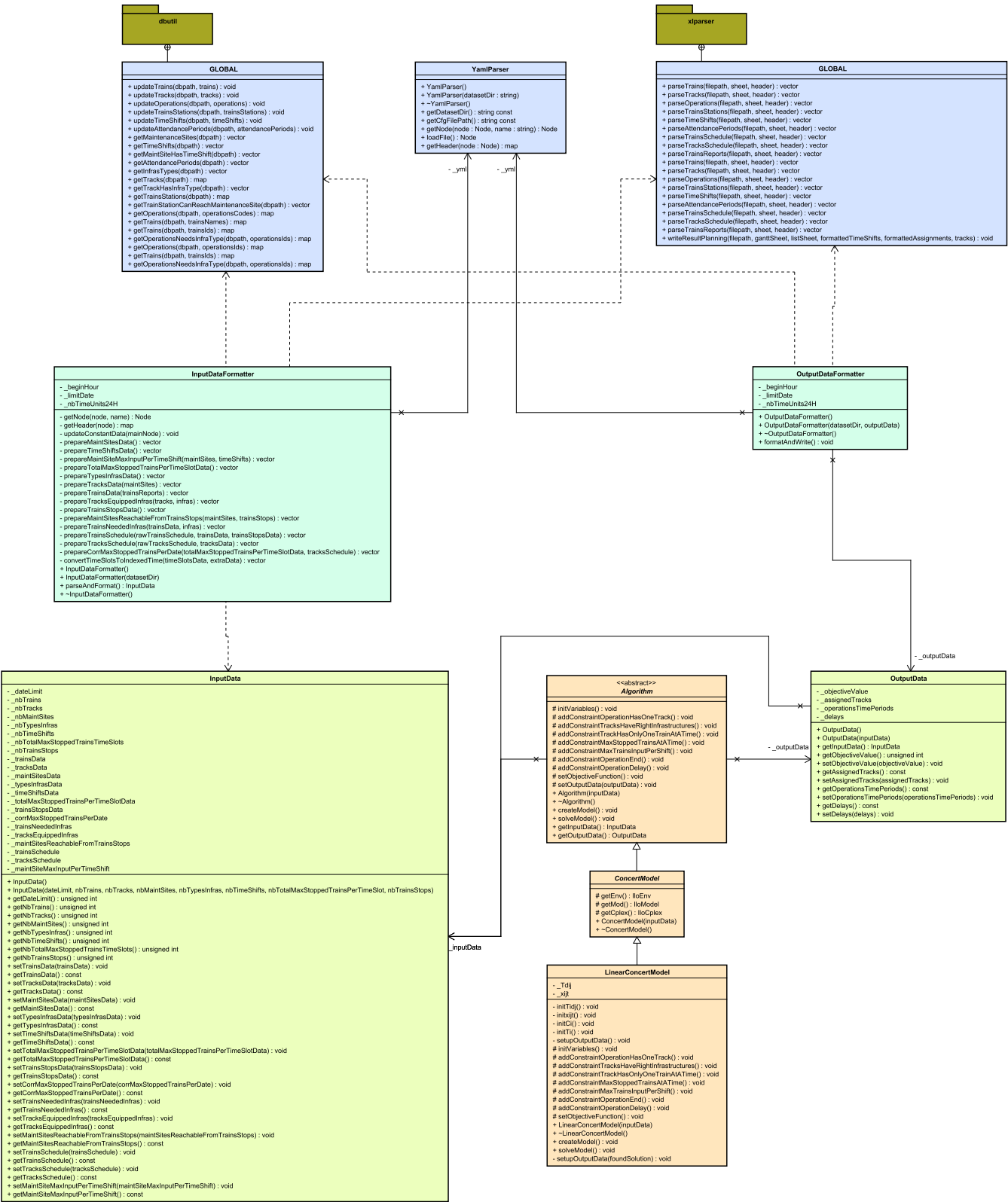
L'objectif est de minimiser la somme des retards des rames.

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n w_i T_i$$



## Diagramme UML complet

Cette annexe présente le diagramme UML complet de l'application, réalisé avec Astah.





## Documentation utilisateur

Cette annexe présente la documentation utilisateur, permettant de guider l'utilisateur de l'application dans l'utilisation de celle-ci.

## Projet de Recherche et Développement



# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

## Guide Utilisateur Proof of Concept V1.6

Version 3 – mercredi 3 avril 2019

*Benjamin Pouvreau, DI5*

### **Encadrants :**

*Ronan Bocquillon*

*Vincent T'Kindt*

## Versions du document

| V | Date       | Commentaire                                     | Auteur            |
|---|------------|-------------------------------------------------|-------------------|
| 1 | 20/03/2019 | Création du document – dernière maj 21 mars     | Benjamin Pouvreau |
| 2 | 03/04/2019 | Ajout guide installation et ajout de précisions | Benjamin Pouvreau |



---

## Table des matières

|                                            |   |
|--------------------------------------------|---|
| Versions du document.....                  | 1 |
| Table des illustrations.....               | 2 |
| 1. Introduction .....                      | 3 |
| 2. Utilisation.....                        | 3 |
| 2.1. Installation.....                     | 3 |
| 2.2. Préparation des données .....         | 3 |
| 2.2.1. Fichier de configuration YAML ..... | 4 |
| 2.3. Lancement .....                       | 7 |
| 2.4. Récupération des données.....         | 9 |

## Table des illustrations

|                                                                               |   |
|-------------------------------------------------------------------------------|---|
| Figure 2.1 - Exemple de répertoire de données utilisé par l'application ..... | 3 |
| Figure 2.2 - Contenu du répertoire de l'application .....                     | 7 |
| Figure 2.3 - Affichage de l'aide et des informations de l'application .....   | 7 |
| Figure 2.4 - Exemple d'exécution avec mise à jour de la base de données ..... | 8 |

## 1. Introduction

Le proof of concept du Projet de Recherche et Développement en partenariat avec la SNCF a pour objectif de résoudre le problème d'ordonnancement de la maintenance corrective des rames des lignes H et K du Transilien.

## 2. Utilisation

### 2.1. Installation

Pour utiliser l'application, il faut disposer d'un poste fonctionnant sous Microsoft Windows 7 ou plus récent en 64 bits, et y installer au préalable le [Package Redistribuable Microsoft Visual C++ x64 pour Visual Studio 2017](#) disponible sur le site de support [Microsoft](#).

Récupérer le dossier Release du projet et le copier sur le poste. Aucune action supplémentaire n'est nécessaire.

### 2.2. Préparation des données

Pour pouvoir utiliser l'application, il faut stocker les données dans des fichiers .xlsx, dans un répertoire. Par exemple, le répertoire « dataset1 » :

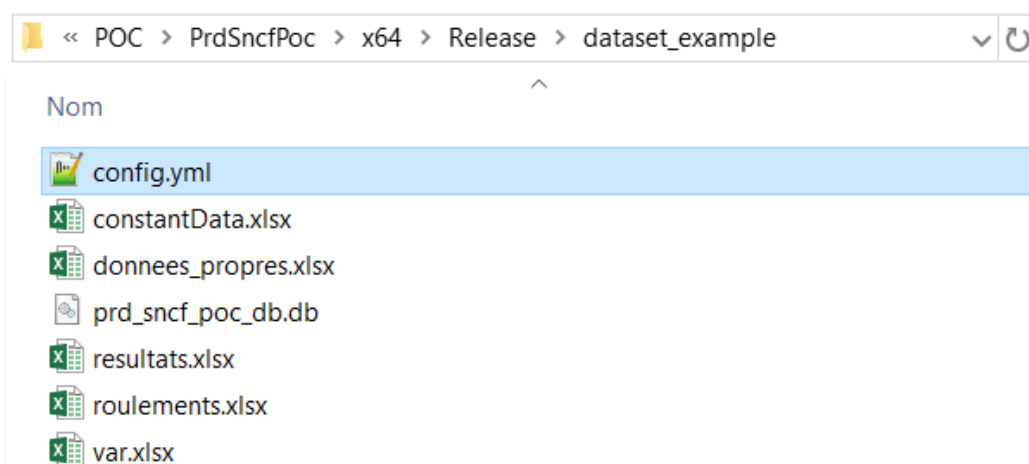


Figure 2.1 - Exemple de répertoire de données utilisé par l'application

### 2.2.1. Fichier de configuration YAML

Ce fichier est lu par l'application et permet de configurer les données d'entrée. C'est un fichier [YAML](#), un format de notation de données facile à comprendre et à utiliser pour l'Homme. Il se présente comme suit (l'indentation est importante en YAML) :

#### GENERAL

|                         |                                                                                                                                                     |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| nom_jeu_de_donnees      | Nom du jeu de données                                                                                                                               |
| nb_unites_temps_par_24H | Nombre d'unités de temps sur 24h, entre 1 et 24                                                                                                     |
| horizon_planification   | Date limite de planification en unités de temps                                                                                                     |
| heure_debut             | Heure de début de la planification                                                                                                                  |
| base_sqlite             | Base de données SQLite stockant les données constantes                                                                                              |
| fichier                 | Nom du fichier de la base de données                                                                                                                |
| maj                     | Si <i>true</i> , met à jour la base de données. Si <i>false</i> , n'utilise que les données variables. Mettre à <i>true</i> si le .db n'existe pas. |

#### VARIABLES

|                 |                                                                         |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| planning_trains | Données relatives aux roulements des trains                             |
| fichier         | Fichier .xlsx contenant les données                                     |
| feuille         | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier                 |
| entete          | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste           |
| num_rame        | Numéro de la rame                                                       |
| gare_depart     | Gare de départ de la rame                                               |
| gare_arrivee    | Gare d'arrivée de la rame                                               |
| temps_depart    | Temps de départ de la rame, indexé de 0 à <i>horizon_planification</i>  |
| temps_arrivee   | Temps d'arrivée de la rame, indexé de 0 à <i>horizon_planification</i>  |
| planning_voies  | Données relatives à l'occupation des voies                              |
| fichier         | Fichier .xlsx contenant les données                                     |
| Feuille         | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier                 |
| entete          | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste           |
| num_voie        | Numéro de voie                                                          |
| site            | Nom du site d'appartenance de la voie                                   |
| temps_debut     | Temps de début d'occupation, indexé de 0 à <i>horizon_planification</i> |
| temps_fin       | Temps de fin d'occupation, indexé de 0 à <i>horizon_planification</i>   |
| signalements    | Données relatives aux incidents / signalements                          |
| fichier         | Fichier .xlsx contenant les données                                     |
| feuille         | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier                 |
| entete          | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste           |
| num_incident    | Numéro de l'incident / du signalement                                   |
| num_rame        | Numéro de la rame concernée                                             |
| code_operation  | Code de l'opération à réaliser                                          |
| date            | Date du signalement, indexée selon <i>horizon_planification</i>         |

## SORTIE

|               |                                                                        |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|
| resultats     | Données de résultat de l'application                                   |
| fichier       | Fichier .xlsx contenant les données                                    |
| feuille_gantt | Nom de la feuille contenant le diagramme de Gantt dans le fichier      |
| Feuille_liste | Nom de la feuille contenant la liste des affectations dans le fichier. |

## DONNEES CONSTANTES

|                        |                                                                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| rames                  | Données relatives aux trains                                         |
| fichier                | Fichier .xlsx contenant les données                                  |
| feuille                | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier              |
| entete                 | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste        |
| num_rame               | Numéro de la rame                                                    |
| voies                  | Données relatives aux voies                                          |
| fichier                | Fichier .xlsx contenant les données                                  |
| feuille                | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier              |
| entete                 | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste        |
| num_voie               | Numéro de la voie                                                    |
| site                   | Site d'appartenance de la voie                                       |
| infras                 | Infrastructures des voies                                            |
| operations             | Données relatives aux operations                                     |
| fichier                | Fichier .xlsx contenant les données                                  |
| feuille                | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier              |
| entete                 | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste        |
| code                   | Code de l'opération                                                  |
| criticite              | Criticite de l'opération                                             |
| poids                  | Poids de l'opération (coefficient de « priorité »)                   |
| duree                  | Duree de l'opération en unités de temps                              |
| date_due               | Date due de l'opération, indexée de 0 à <i>horizon_planification</i> |
| infras                 | Infrastructures nécessaire à l'opération                             |
| periodes_frequentation | Données relatives aux contraintes d'heures de pointes                |
| fichier                | Fichier .xlsx contenant les données                                  |
| feuille                | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier              |
| entete                 | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste        |
| creneau                | Nom du créneau / de la période                                       |
| heure_debut            | Heure de début, de 0 à 24                                            |
| heure_fin              | Heure de fin, de 0 à 24                                              |
| max_rames_immo         | Nombre maximum autorisé de rames immobilisées sur le réseau          |

|                  |                                                               |
|------------------|---------------------------------------------------------------|
| periodes_travail | Données relatives aux créneaux de travail des dépôts          |
| fichier          | Fichier .xlsx contenant les données                           |
| feuille          | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier       |
| entete           | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste |
| creneau          | Nom du créneau / de la période                                |
| heure_debut      | Heure de début, de 0 à 24                                     |
| heure_fin        | Heure de fin, de 0 à 24                                       |
| max_rames_immo   | Nombres maximums de rentrées de rames par site                |
|                  |                                                               |
| gares            | Données relatives aux gares                                   |
| fichier          | Fichier .xlsx contenant les données                           |
| feuille          | Nom de la feuille contenant les données dans le fichier       |
| entete           | Indique les coordonnées Excel de l'entête sous forme de liste |
| code             | Code identifiant de la gare                                   |
| nom              | Nom de la gare                                                |
| ligne            | Lignes de la gare                                             |
| acces_site       | Accès aux sites de maintenance                                |

Il est conseillé de regarder les fichiers fournis avec l'application dans le dossier `dataset_example`, qui donnent le format des données, avec le fichier de configuration en parallèle.

Afin de permettre le bon fonctionnement de l'application, il est nécessaire d'harmoniser les informations entre les différents fichiers. Ainsi si un site s'appelle « PERSAN BEAUMONT » dans un fichier et « Persan-Beaumont » dans un autre, l'application ne sera pas en mesure de fonctionner correctement.

Il est de même conseillé d'éviter les accents et caractères spéciaux dans les classeurs .xlsx et de ne pas garder ouvert le fichier de résultat lorsque l'application est relancée sans changement de configuration, afin de lui permettre d'écraser le fichier.

Il faut également prendre garde à respecter l'indentation du fichier YAML et de bien utiliser des espaces et non des tabulations pour indenter le fichier, comme le veut la norme YAML, sans quoi l'application ne sera pas en mesure d'interpréter le fichier de configuration.

## 2.3. Lancement

Une fois les fichiers configurés, se rendre dans le dossier de release de l'application et lancer l'application via une console de commande en spécifiant en argument le chemin du répertoire contenant les données (c'est-à-dire le répertoire contenant le *config.yml* à sa racine. Si aucun répertoire n'est spécifié, l'application affiche une aide et ses informations.

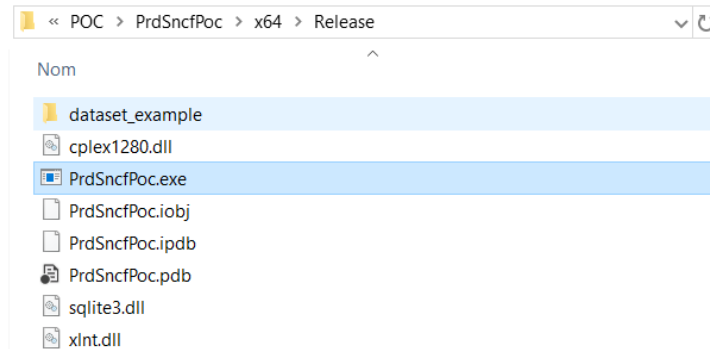


Figure 2.2 - Contenu du répertoire de l'application

```
C:\...\Release>PrdSnfPoc.exe

=====
====  PRD Polytech Tours - SNCF  ====
====  Proof of Concept V1.6      ====
====  Benjamin POUVREAU         ====
=====

> A propos :
    Projet de Recherche et Developpement 2018-2019 - Ordonnancement des operations de maintenance
corrective au sein de la SNCF
    Par Benjamin POUVREAU, Eleve Ingenieur en 5eme annee au Departement Informatique de Polytech
Tours
    Encadre par M. Ronan BOCQUILLON et M. Vincent T'KINDT, enseignants-chercheurs a Polytech Tours
    Proof of Concept pour le probleme d'ordonnancement - Version 1.6, mars 2019

> Utilisation :
    Executer l'executable PRD_SNCF-POLYTECH_POC.exe dans la console de commande avec comme argument
le dossier contenant les donnees et le fichier de configuration :

    > PRD_SNCF-POLYTECH_POC.exe dataset_directory_path

    Le repertoire des donnees doit etre specifie sans "/" ou "\" final et doit etre presente
ainsi :
    -> dataset_directory_path
        -> config.yml          Le fichier de configuration du dataset
    Se referrer a la documentation utilisateur pour plus de details sur la configuration de
l'application.

====  Fin du programme  ====

Appuyez sur une touche pour terminer le programme.
```

Figure 2.3 - Affichage de l'aide et des informations de l'application

```
C:\...\Release>PrdSncfPoc.exe dataset_example

=====
====   PRD Polytech Tours - SNCF   ====
====   Proof of Concept V1.6       ====
====   Benjamin POUVREAU          ====
=====

Execution du programme avec le dataset dataset_example.

==== Formattage des donnees d'entree ====

Mise a jour de la base de donnees :
> Lecture et insertion des rames... OK
> Lecture et insertion des voies... OK
> Lecture et insertion des operations... OK
> Lecture et insertion des gares... OK
> Lecture et insertion des periodes de travail... OK
> Lecture et insertion des periodes de frequentation... OK
Base de donnees a jour.

Lecture des variables :
> Lecture des signalements... OK
> Lecture du planning des roulements... OK
> Lecture du planning des voies... OK

Preparation des donnees..... OK
Preparation des donnees terminee.

====          Creation du modele          ====

====          Resolution du modele        ====

Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 30456 rows and 22969 columns.
MIP Presolve modified 92088 coefficients.
Reduced MIP has 825 rows, 4205 columns, and 20203 nonzeros.
Reduced MIP has 4184 binaries, 21 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.20 sec. (215.44 ticks)
Found incumbent of value 0.000000 after 0.27 sec. (255.03 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time       =    0.28 sec. (256.11 ticks)
Parallel b&c, 4 threads:
  Real time       =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) =    0.00 sec.
  Wait time (average) =    0.00 sec.
  -----
Total (root+branch&cut) =    0.28 sec. (256.11 ticks)

====          Formattage du resultat          ====

Formattage des donnees de sortie... OK

Ecriture des resultats... OK

====          Fin du programme          ====

Pressez une touche pour terminer le programme.
```

Figure 2.4 - Exemple d'exécution avec mise à jour de la base de données



---

## 2.4. Récupération des données

Les données résultant de l'opération sont accessibles dans le fichier Excel spécifié sous le nœud *résultats* du fichier de configuration. La console dispense également des informations sur le déroulement de l'algorithme.



# I

## Documentation développeur

Cette annexe présente la documentation développeur, avec son principe de fonctionnement, son architecture et les bibliothèques utilisées. Il propose également un guide d'installation de l'environnement de développement et un guide de déploiement pour utiliser l'application sur d'autres postes.

## Projet de Recherche et Développement



### Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

### Documentation développeur Proof of Concept V1.6

Version 2 – mercredi 3 avril 2019

*Benjamin Pouvreau, DI5*

***Encadrants :***

*Ronan Bocquillon*

*Vincent T'Kindt*

## Versions du document

| V | Date       | Commentaire                                 | Auteur            |
|---|------------|---------------------------------------------|-------------------|
| 1 | 31/02/2019 | Création du document – dernière maj 21 mars | Benjamin Pouvreau |
| 2 | 03/04/2019 | Ajout du guide de déploiement               | Benjamin Pouvreau |

## Table des matières

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Versions du document.....       | 1  |
| Table des illustrations.....    | 3  |
| 1. Introduction .....           | 4  |
| 2. L'application .....          | 4  |
| 3. Modélisation .....           | 5  |
| 3.1. Application .....          | 5  |
| 3.2. Base de données .....      | 8  |
| 4. Bibliothèques.....           | 9  |
| 4.1. C++ Standard Library ..... | 9  |
| 4.2. ILO CPLEX .....            | 9  |
| 4.3. SQLite C/C++.....          | 9  |
| 4.4. XLNT.....                  | 9  |
| 4.5. yaml-cpp .....             | 9  |
| 5. Guide d'installation .....   | 10 |
| 5.1. Introduction .....         | 10 |
| 5.2. Général .....              | 11 |
| 5.3. Installer CPLEX.....       | 12 |
| 5.4. Installer SQLite.....      | 13 |
| 5.5. Installer XLNT .....       | 14 |
| 5.6. Installer yaml-cpp .....   | 16 |
| 6. Guide de déploiement .....   | 18 |

---

## Table des illustrations

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.1 - Schéma du principe de l'application .....          | 4  |
| Figure 3.1 - Diagramme UML simplifié POC V1.6.....              | 5  |
| Figure 3.2 - Diagramme UML complet POC V1.6 .....               | 7  |
| Figure 3.3 - Schéma base de donnée des données constantes ..... | 8  |
| Figure 5.1 - Configuration générale .....                       | 11 |
| Figure 5.2 - Répertoire d'installation de CPLEX.....            | 12 |
| Figure 5.3 - Génération des libs SQLite 3.....                  | 13 |
| Figure 5.4 - CMake pour XLNT .....                              | 14 |
| Figure 5.5 - Visual studio pour XLNT .....                      | 15 |
| Figure 5.6 - CMake pour yaml-cpp .....                          | 16 |
| Figure 5.7 - Visual studio pour yaml-cpp.....                   | 17 |
| Figure 6.1 - Contenu du répertoire Release.....                 | 18 |

## 1. Introduction

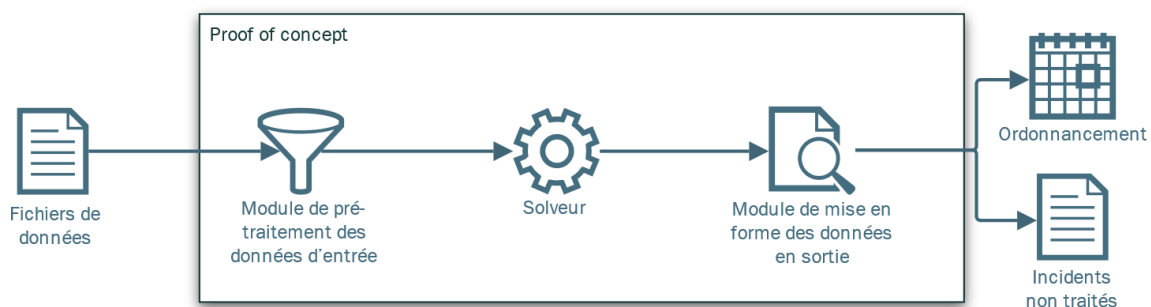
Ce document présente les informations qui seront utiles à la reprise du projet dans le but de poursuivre son développement.

En cas de problème, s'adresser par mail à [benjamin.pouvreau@etu.univ-tours.fr](mailto:benjamin.pouvreau@etu.univ-tours.fr).

## 2. L'application

Le projet présenté est une application console réalisée en C++ permettant de résoudre le problème de planification des opérations de maintenance corrective.

Pour cela, le programme charge des fichiers de données au format Excel, stocke les données fixes dans une base de données locale SQLite, résout le problème et sort la solution.



*Figure 2.1 - Schéma du principe de l'application*

La documentation complète du code, à savoir les classes, méthodes et attributs, est disponible au format *html* avec ce document. Dans les fichiers source, la documentation des méthodes et attributs se situent dans les fichiers d'en-tête (.h).

La documentation a été générée à l'aide de *Doxygen*, utilitaire permettant de générer de la documentation *html* à partir des blocs de commentaires renseignés dans le code.

## 3. Modélisation

### 3.1. Application

La modélisation globale se présente ainsi :

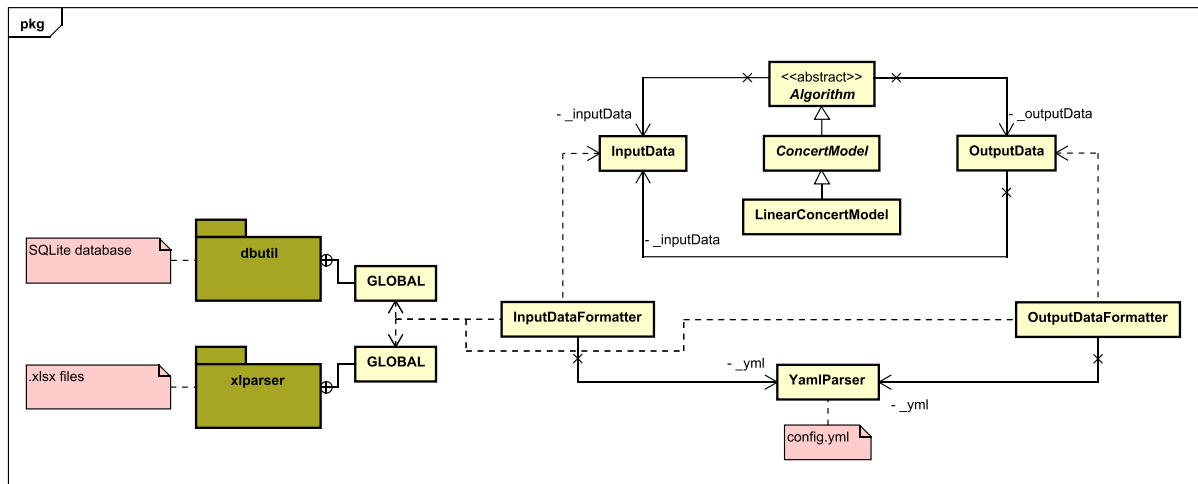


Figure 3.1 - Diagramme UML simplifié POC V1.6

Pour un diagramme de classe plus complet, se référer à la documentation Doxygen du code ou au diagramme complet disponible en annexe de ce document.

1. Les données d'entrée du problème sont obtenues par lecture de fichiers Excel .xlsx et d'une base de données SQLite. La structure de cette base sera décrite plus tard. Ainsi, le namespace **xlparser** contient toutes les méthodes permettant d'interroger les données issues des fichiers Excel, et le namespace **dbutil** contient toutes les méthodes permettant d'écrire et de lire dans la base de données. Ces deux namespaces vont ainsi permettre d'obtenir les données brutes.
2. La classe **InputDataFormatter** utilise les méthodes des namespaces précédemment cités, à partir de la configuration définie par l'utilisateur dans le fichier *config.yml* (voir la documentation utilisateur) interprété par la classe **YamlParser**. **InputDataFormatter** récupère les données brutes et les met en forme pour correspondre au modèle attendu par le solveur, à savoir **InputData**. Cette classe contient toutes les données d'entrée nécessaires à la résolution du problème.

3. Une fois l'**InputData** créé, le module solveur se charge de résoudre le problème. Ce module est constitué d'une classe abstraite : **Algorithm**. Cette classe abstraite permet de définir les contraintes attendues, ainsi que l'objet d'entrée **InputData** et l'objet de sortie **OutputData**. Ainsi, pour implémenter un algorithme de résolution, il suffit de créer une classe généralisant **Algorithm**. Dans l'application actuelle, elle est généralisée par la classe **ConcertModel**, elle-même généralisée par **LinearConcertModel**. La classe **ConcertModel** permet de définir les attributs et méthodes communs à tous les modèles utilisant la technologie *CPLEX Concert*, et la classe **LinearConcertModel** est une implémentation d'un modèle linéaire sous *CPLEX Concert*. Dans l'application, c'est cette classe qui résout le problème. Une fois le problème résolu, le solveur crée un objet **OutputData** pour y stocker les résultats de l'opérations.
4. La classe **OutputDataFormatter** récupère les données d'**OutputData** et les met en forme pour les insérer dans un fichier .xlsx de sortie, à l'aide des méthodes de **dbutil** et **xlparser** et de la configuration spécifiée par le fichier *config.yml* interprété par **YamlParser**.



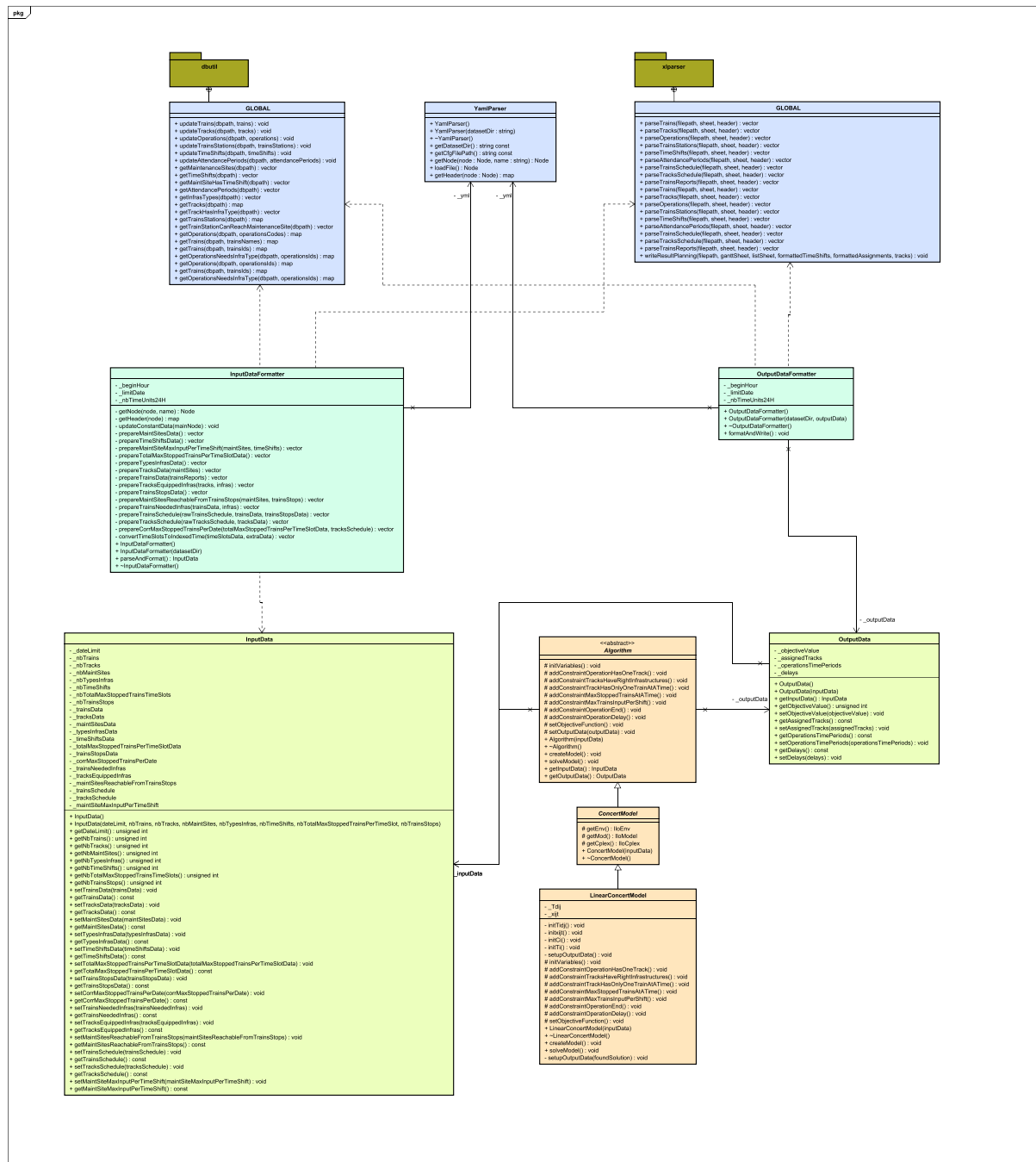


Figure 3.2 - Diagramme UML complet POC V1.6

## 3.2. Base de données

L'application utilise une base de données *SQLite* pour stocker les informations considérées comme constantes du point de vue de la modélisation, à savoir les données d'infrastructures, de matériel, de créneaux horaires de travail, etc. Cela permet de réduire la lecture de fichiers Excel et de gagner en performance. Sa modélisation est la suivante :

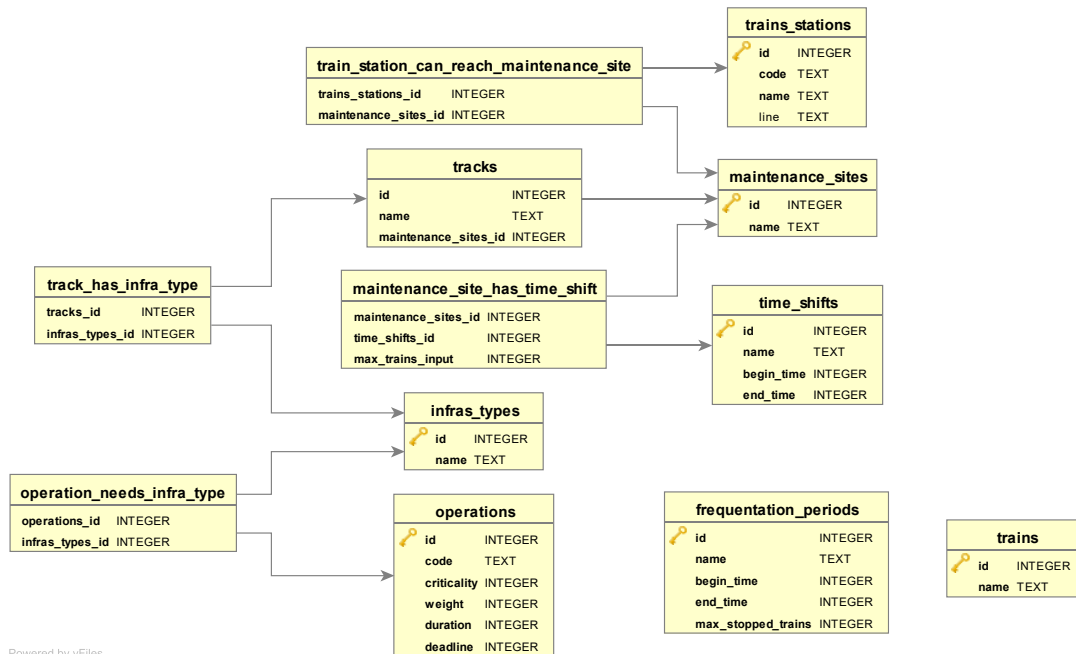


Figure 3.3 - Schéma base de donnée des données constantes

La base de données peut être créée au lancement de l'application, il suffit de changer un paramètre du fichier de configuration.

## 4. Bibliothèques

L'application est développée en C++ 14 et utilise plusieurs bibliothèques pour s'exécuter, dont voici la liste.

### 4.1. C++ Standard Library

Cette bibliothèque standard est utilisée pour faciliter le codage de l'application, notamment au niveau du stockage des données dans des vecteurs, listes, map ou l'utilisation de *string*.

Voir le site [cplusplus.com](http://cplusplus.com) pour la documentation de la STL.

### 4.2. ILO CPLEX

Cette bibliothèque est utilisée dans les classes **ConcertModel** et **LinearConcertModel** pour résoudre le problème d'ordonnancement à l'aide du solveur *CPLEX* développé par *IBM*.

Voir le site d'[IBM](http://ibm.com) pour la documentation.

### 4.3. SQLite C/C++

Cette bibliothèque est utilisée pour s'interfacer avec la base de données *SQLite* utilisée par l'application.

Voir le site de [SQLite](http://sqlite.org) pour plus d'informations sur la documentation.

### 4.4. XLNT

Cette bibliothèque développée sous licence MIT est utilisée pour s'interfacer avec les fichiers Excel au format *.xlsx*. Elle permet d'écrire et de lire dans des classeurs Excel.

Le projet est disponible sur ce [dépôt GitHub](#) et dispose d'une documentation à [cette adresse](#), bien qu'elle soit incomplète.

### 4.5. yaml-cpp

Cette bibliothèque est utilisée pour lire le fichier de configuration *config.yml*. Elle permet de facilement naviguer entre les nœuds du fichier et respecte la norme *YAML 1.2*.

Le projet est disponible sur ce [dépôt GitHub](#) sous licence MIT et dispose d'une [documentation](#).



---

## 5. Guide d'installation

### 5.1. Introduction

Ce guide a été conçu au fur et à mesure de la configuration du projet sur une machine disposant de l'environnement suivant :

- **OS :** Microsoft Windows 10 Éducation 64 bits
- **IDE :** Microsoft Visual Studio Community 2017
- **Langage :** C++ (ISO C++ 14)
- **Libraries builder :** CMake

Pour l'ensemble de cette documentation, Visual Studio a été utilisé dans sa version anglaise. Le nom des options peut différer en version française.

Ce guide d'installation n'a pas été testé sur un autre environnement. Il est donc possible qu'il ne fonctionne pas de façon optimale sur un autre environnement.

## 5.2. Général

Télécharger et installer **CMake** : <https://cmake.org/download/> dans la version adaptée au système (x64 ou x86) . Cet utilitaire est nécessaire pour configurer les bibliothèques.

Vérifier la configuration de base du projet :

1. Dans Visual Studio, sélectionner le projet, clic droit, **Properties**. Sélectionner « All configurations » pour **Configuration** et « x64 » pour **Platform**.
2. Sélectionner l'onglet **C/C++->Language** et pour l'option **C++ Language Standard**, sélectionner **ISO C++ 14 Standard (/std:c++14)**.
3. Dans le même onglet, pour l'option **Conformance mode**, sélectionner **No**.

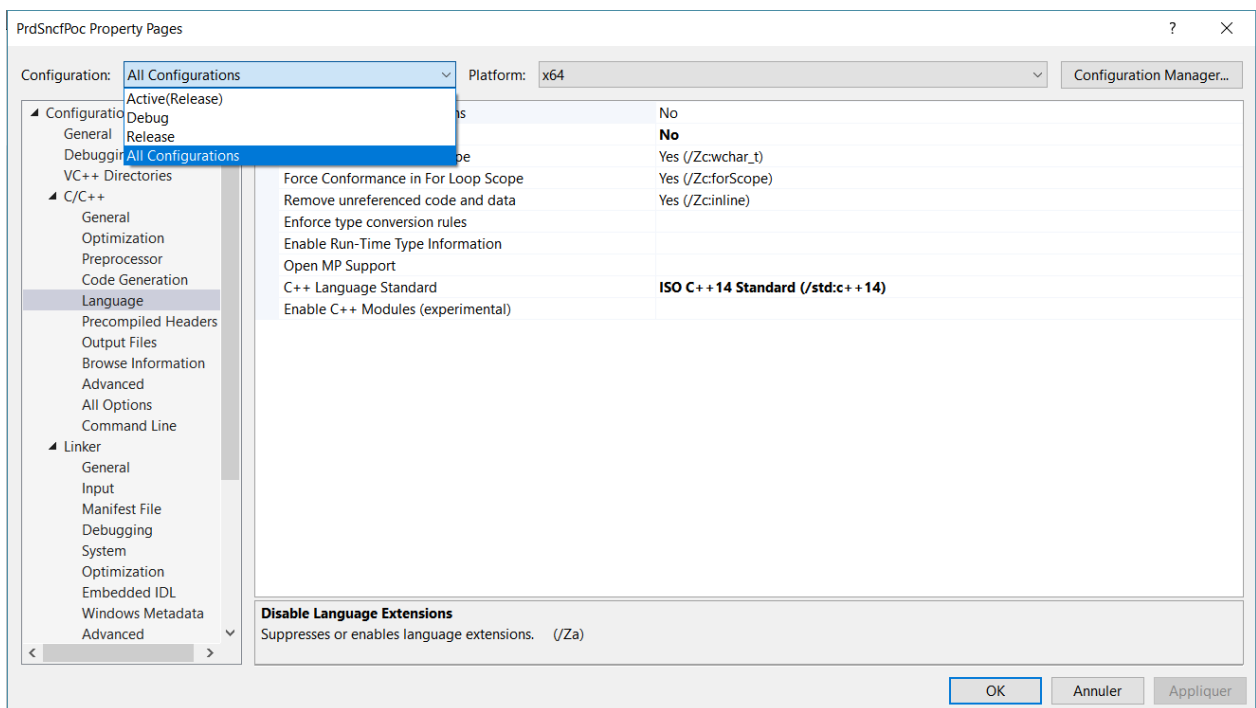


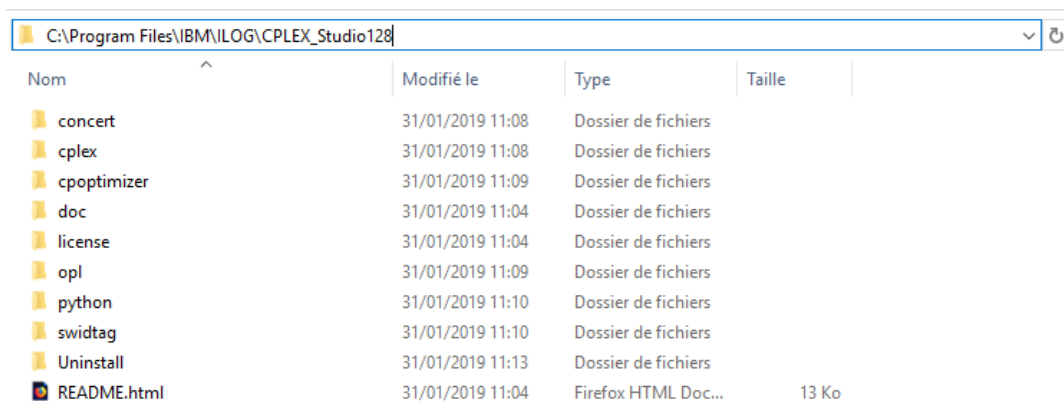
Figure 5.1 - Configuration générale

### 5.3. Installer CPLEX

CPLEX et sa technologie Concert sont utilisés dans ce projet pour résoudre le problème d'ordonnancement.

Soit **<CPLEXDIR>** le répertoire de Cplex. Par défaut, le projet est configuré pour :

- Visual Studio 2017
- **<CPLEXDIR> = "C:\Program Files\IBM\LOG\CPLEX\_Studio128"**



| Nom         | Modifié le       | Type                | Taille |
|-------------|------------------|---------------------|--------|
| concert     | 31/01/2019 11:08 | Dossier de fichiers |        |
| cplex       | 31/01/2019 11:08 | Dossier de fichiers |        |
| coptimizer  | 31/01/2019 11:09 | Dossier de fichiers |        |
| doc         | 31/01/2019 11:04 | Dossier de fichiers |        |
| license     | 31/01/2019 11:04 | Dossier de fichiers |        |
| opl         | 31/01/2019 11:09 | Dossier de fichiers |        |
| python      | 31/01/2019 11:10 | Dossier de fichiers |        |
| swidtag     | 31/01/2019 11:10 | Dossier de fichiers |        |
| Uninstall   | 31/01/2019 11:13 | Dossier de fichiers |        |
| README.html | 31/01/2019 11:04 | Firefox HTML Doc... | 13 Ko  |

Figure 5.2 - Répertoire d'installation de CPLEX

1. Installer *CPlex 12.8*, si possible avec le même **<CPLEXDIR>** que ci-dessus.
2. Ouvrir le projet **PrdSncfPoc.sln**
3. Si votre version de *Visual Studio* et/ou votre **<CPLEXDIR>** sont différents de la configuration par défaut, ouvrir le fichier **<CPLEXDIR>\cplex\c\_cpp.html** et suivre les instructions de la partie *Building your own project which links with CPLEX* en ajustant à votre version de *Visual Studio* (2015 ou 2017).

Pour le mode **Debug**, effectuer la même procédure, à l'exception de :

- Select General/Code Generation : set RuntimeLibrary to **Multi-threaded Debug DLL (/MDd)**
- Select General/Additional Library Directories (vs2015 ou vs2017 selon votre version de *Visual Studio*) :
  - **<CPLEXDIR>\lib\x64\_windows\_vs2017\stat\_mdd**
  - **<CONCERTDIR>\lib\x64\_windows\_vs2017\stat\_mdd****mda** est pour la version **Release** et **mdd** pour la version **Debug**.

Il est à noter qu'en mode Debug, lors de la phase de build, Concert génère de nombreux warnings **LNK4099** (PDB 'concert.pdb' [...]). Cela est dû au fait que la librairie est principalement conçue pour le mode Release et n'impacte pas le fonctionnement de l'application. Pour plus d'information, voir [ici](#).

## 5.4. Installer SQLite

SQLite est utilisé pour stocker les données considérées comme « fixes » pour le problème. Il faut donc installer la librairie pour l'utiliser dans notre projet.

La procédure ci-dessous décrit l'installation complète. La bibliothèque est déjà incluse dans le projet. Il faudra cependant probablement éditer le chemin de la librairie pour l'adapter à votre machine à l'étape 7.

1. Télécharger les binaires de SQLite pour Windows, dans la version souhaitée :
  - a. Version x86 : <https://www.sqlite.org/2019/sqlite-dll-win32-x86-3270200.zip>
  - b. Version x64 : <https://www.sqlite.org/2019/sqlite-dll-win64-x64-3270200.zip>
2. Extraire le .zip dans un dossier, par exemple **C:\sqlite** : on obtient ainsi deux fichiers, **sqlite3.def** et **sqlite3.dll**.
3. Lancer le Developer Command Prompt de Visual Studio en x64 ou x86 selon votre système (rechercher Visual Studio dans le menu Démarrer, développer le dossier et prendre la command prompt adaptée au système, x86 ou x64)
4. Générer le fichier .lib à partir du fichier .def avec la commande suivante :  
`lib /DEF:"C:\sqlite\sqlite3.def" /OUT:"C:\sqlite\sqlite3.lib"`

```

Invite de commandes des outils natifs x64 pour VS 2017
*****
** Visual Studio 2017 Developer Command Prompt v15.9.7
** Copyright (c) 2017 Microsoft Corporation
*****
[vvarsall.bat] Environment initialized for: 'x64'

C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\2017\Community>lib /DEF:"C:\sqlite\sqlite3.def" /OUT:"C:\sqlite\sqlite3.lib"
Microsoft (R) Library Manager Version 14.16.27027.1
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

LINK : warning LNK4068: /MACHINE non spécifié ; X64 pris par défaut
Création de la bibliothèque C:\sqlite\sqlite3.lib et de l'objet C:\sqlite\sqlite3.exp
  
```

Figure 5.3 - Génération des libs SQLite 3

5. Télécharger **sqlite amalgamation** afin de l'utiliser dans le projet :  
<https://www.sqlite.org/2019/sqlite-amalgamation-3270200.zip> puis extraire le .zip pour obtenir le fichier **sqlite.h**.
6. Copier les fichiers **sqlite.h**, **sqlite3.dll** et **sqlite3.lib** dans le dossier **libs/sqlite** dans le dossier du projet.
7. Dans Visual Studio, sélectionner le projet, clic droit, **Properties**. Sélectionner « All configurations » dans la liste :
  - a. Onglet **C/C++->General** : modifier **Additional Include Directories** et ajouter le chemin vers le dossier **libs/sqlite** précédemment créé.
  - b. Onglet **Linker->General** : modifier **Additional Library Directories** et ajouter le chemin vers le dossier **libs/sqlite** précédemment créé.
  - c. Onglet **Linker->Input** : modifier **Additional Dependencies** et ajouter **sqlite3.lib**.

- Il est désormais possible d'utiliser sqlite dans l'application (#include <sqlite3.h>). Voir [https://www.tutorialspoint.com/sqlite/sqlite\\_c\\_cpp.htm](https://www.tutorialspoint.com/sqlite/sqlite_c_cpp.htm) pour les fonctions disponibles. En cas de difficultés, un lien utile : <https://cppcodetips.wordpress.com/tag/including-sqlite-with-visual-studio/>

## 5.5. Installer XLNT

XLNT est la bibliothèque utilisée pour générer le fichier xlsx de sortie. La procédure ci-dessous décrit l'installation qui a été réalisée pour ce projet. En principe, il n'est pas nécessaire de reproduire cette procédure, cette bibliothèque ayant directement été intégrée par son code source dans le projet. Cependant, si le dossier **libs/xlnt-1.3.0/build** n'existe pas ou est vide, il est nécessaire d'exécuter les étapes 2 à 7.

- Télécharger la bibliothèque en sélectionnant « Source code (zip) » sur <https://github.com/tfussell/xlnt/releases> et l'extraire dans le dossier **libs** à la racine du projet.
- Dans le répertoire de la bibliothèque **libs/xlnt-1.3.0**, créer un dossier **build**.
- Exécuter l'utilitaire **CMake**, sélectionner le répertoire **libs/xlnt-1.3.0** pour le code source et le répertoire **libs/xlnt-1.3.0/build** pour le build.
- Cliquer sur configurer et sélectionner le générateur du projet (dans notre cas, Visual Studio 15 2017 Win64) et sélectionner l'option « Use default native compilers », puis cliquer sur **Finish**. Vérifier la configuration une fois le processus fini :

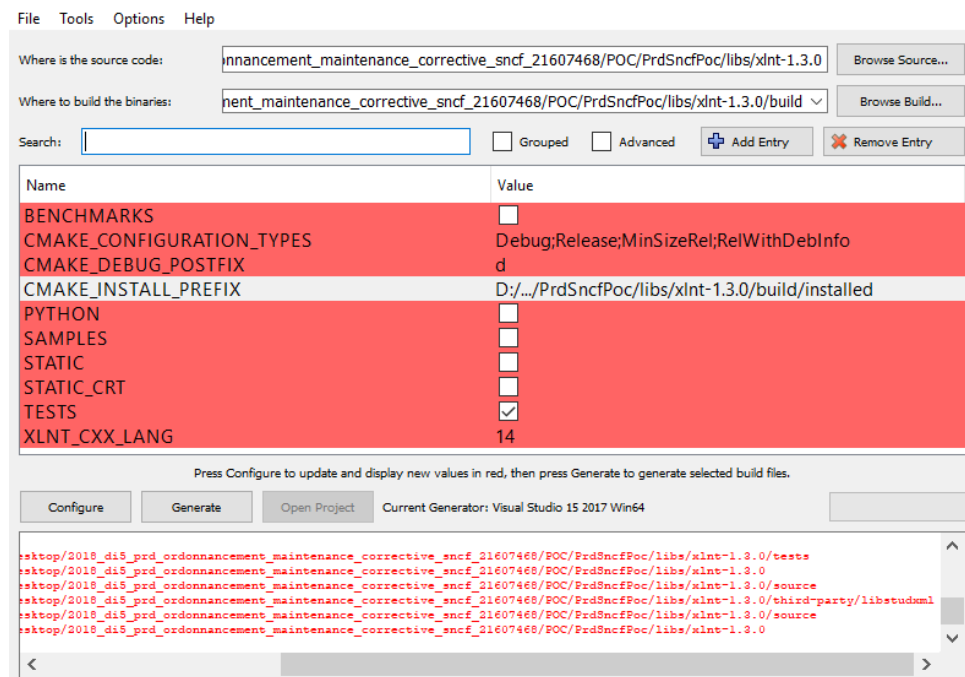


Figure 5.4 - CMake pour XLNT



5. Cliquer sur **Generate** puis sur **Open Project**.
6. Le projet est désormais ouvert dans Visual Studio. Build le projet en **Debug** et en **Release**.

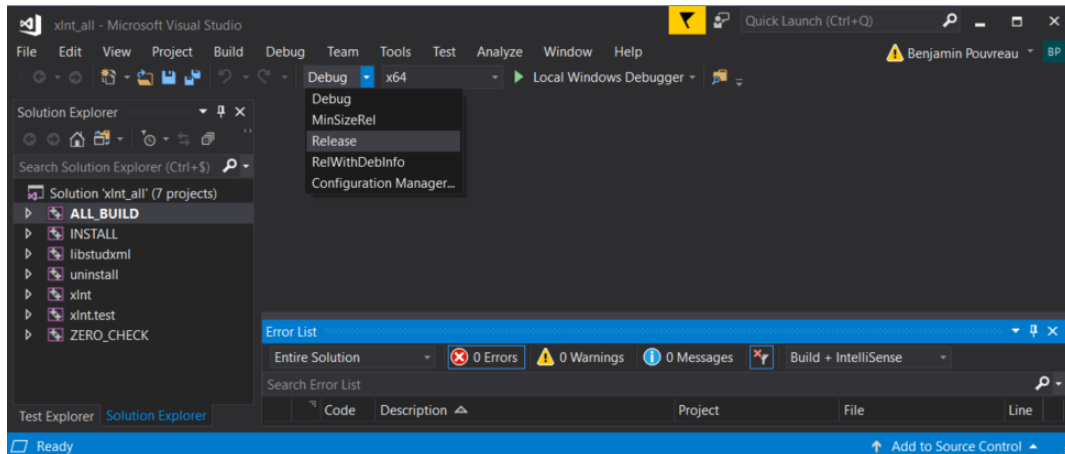


Figure 5.5 - Visual studio pour XLNT

7. Copier les .dll **libs/xInt-1.3.0/build/source/Debug/xIntd.dll** et **libs/xInt-1.3.0/build/source/Release/xInt.dll** dans le répertoire contenant les sources de notre projet.
8. Retourner sur notre projet dans Visual Studio et ouvrir les propriétés du projet (clic droit -> Properties) :
  - a. Option **C/C++ -> General -> Additional Include Directories**, pour Release et Debug : ajouter le chemin vers le dossier **libs/xInt-1.3.0/include**
  - b. Option **Linker -> General -> Additional Library Directories** et ajouter le chemin vers le dossier de la librairie générée :
    - i. Debug : **libs/xInt-1.3.0/build/source/Debug**
    - ii. Release : **libs/xInt-1.3.0/build/source/Release**
  - c. Option **Linker -> Input -> Additional Dependencies** et ajouter les librairies :
    - i. Debug : **xIntd.lib**
    - ii. Release : **xInt.lib**
9. Tester l'installation en lançant le build du projet en **Release** et **Debug**.
10. Voir la documentation XLNT pour plus d'informations :  
<https://tfussell.gitbooks.io/xInt/content/>

## 5.6. Installer yaml-cpp

yaml-cpp est la bibliothèque utilisée pour lire les fichiers de configuration YAML des datasets. La procédure ci-dessous décrit l'installation qui a été réalisée pour ce projet. En principe, il n'est pas nécessaire de reproduire cette procédure, cette bibliothèque ayant directement été intégrée par son code source dans le projet. Cependant, si le dossier **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2/build** n'existe pas ou est vide, il est nécessaire d'exécuter les étapes 2 à 6.

1. Télécharger la bibliothèque en sélectionnant « Source code (zip) » sur <https://github.com/jbeder/yaml-cpp/releases> et l'extraire dans le dossier **libs** à la racine du projet. Si vous utilisez Visual Studio et la version 0.6.2 de yaml-cpp, appliquer les modifications du commit [0f9a586](#) pour résoudre les problèmes de compatibilité avec Visual Studio.
2. Dans le répertoire de la bibliothèque **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2**, créer un dossier **build**.
3. Exécuter l'utilitaire **CMake**, sélectionner le répertoire **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2** pour le code source et le répertoire **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2/build** pour le build.
4. Cliquer sur configurer et sélectionner le générateur du projet (dans notre cas, Visual Studio 15 2017 Win64) et sélectionner l'option « Use default native compilers », puis cliquer sur **Finish**. Vérifier la configuration une fois le processus fini :

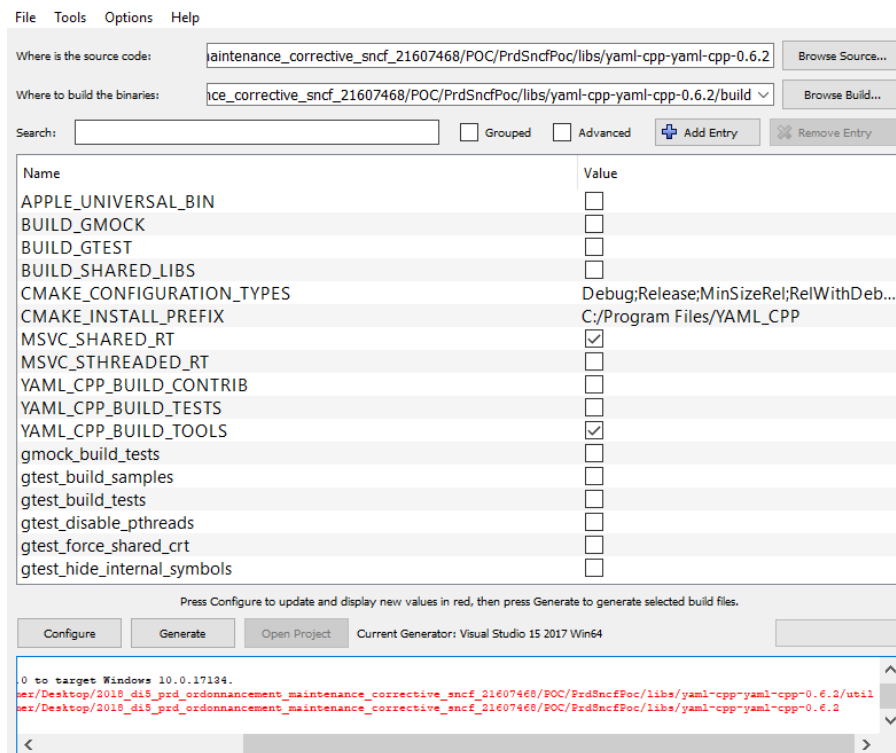
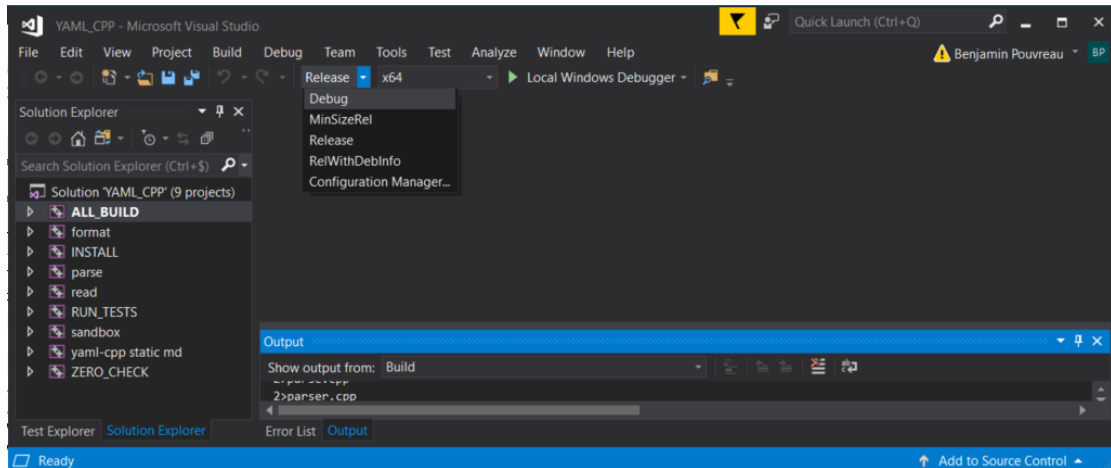


Figure 5.6 - CMake pour yaml-cpp

5. Cliquer sur **Generate** puis sur **Open Project**.
6. Le projet est désormais ouvert dans Visual Studio. Build le projet en **Debug** et en **Release**.



*Figure 5.7 - Visual studio pour yaml-cpp*

7. Retourner sur notre projet dans Visual Studio et ouvrir les propriétés du projet (clic droit -> Properties) :
  - a. Option **C/C++ -> General -> Additional Include Directories**, pour Release et Debug : ajouter le chemin vers le dossier **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2/include**
  - b. Option **Linker -> General -> Additional Library Directories** et ajouter le chemin vers le dossier de la librairie générée :
    - i. Debug : **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2/build/Debug**
    - ii. Release : **libs/yaml-cpp-yaml-cpp-0.6.2/build/Release**
  - c. Option **Linker -> Input -> Additional Dependencies** et ajouter les librairies :
    - i. Debug : **libyaml-cppmdd.lib**
    - ii. Release : **libyaml-cppmd.lib**
8. Tester l'installation en lançant le build du projet en **Release** et **Debug**.
9. Voir la documentation de yaml-cpp pour plus d'informations : <https://github.com/jbeder/yaml-cpp/wiki>.

## 6. Guide de déploiement

Pour déployer l'application sur un poste, suivre les étapes suivantes :

1. Sur le poste développeur, Sous Visual Studio, build le projet en mode **Release**.
2. Dans le dossier contenant la release, ajouter les .dll de **CPLEX**, **XLNT** et **SQLite3** :

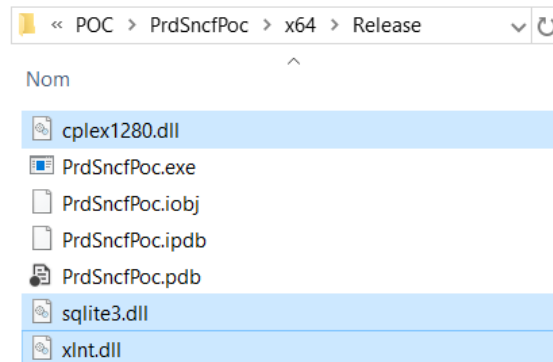


Figure 6.1 - Contenu du répertoire Release

Si les librairies ont été installées en suivant ce guide, vous les trouverez ici :

- sqlite3.dll :  
**libs/sqlite/sqlite3.dll**
- xInt.dll :  
**libs/xInt-1.3.0/build/source/Release/xInt.dll**
- cplex1280.dll :  
**C:\Program Files\IBM\LOG\CPLEX\_Studio128\cplex\bin\x64\_win64\cplex1280.dll**

3. Joindre la documentation utilisateur avec la Release.
4. Le poste client doit fonctionner sous **Microsoft Windows 7 ou plus récent en 64 bits**.
5. Installer sur le poste client le [Package Redistribuable Microsoft Visual C++ x64 pour Visual Studio 2017](#) disponible sur le site de support [Microsoft](#) (éventuellement adapter à la version de VS utilisée pour développer l'application : 2015, 2017, etc.)
6. Copier le dossier complet de la release sur le poste client.
7. Tester le bon fonctionnement de l'application en exécutant **PrdSncfPoc.exe** via une console de commande ou en double-cliquant directement sur l'exécutable, sans arguments, i.e. sans spécifier de répertoire de données. Si l'aide de l'application s'affiche sans erreur, le déploiement est réussi.



# Comptes rendus hebdomadaires

## **Compte rendu n°1 du 20/09/2018**

### **Semaine du 17 septembre 2018**

*Mercredi 19 septembre 2018*

- Démarrage de projet : Rendez-vous avec M. Ronan Bocquillon pour démarrer le projet et définir son sujet
- Recherche académique : Révisions de quelques principes de RO (PLS, PPC, etc.)
- État de l'art : Étude des documents fournis par M. Bocquillon
- Gestion de projet : Création d'un fichier de pilotage

*Jeudi 20 septembre 2018*

- État de l'art : Étude des documents fournis par M. Bocquillon
- RDV SNCF : Premier RDV avec M. Romuald Détroue, client SNCF, avec M. Bocquillon
  - Rencontre avec M. Détroue et présentation de l'équipe
  - Présentation du contexte du projet et de l'outil de contrôle de la flotte de rames par l'équipe de M. Détroue
  - Définition des besoins du projet et première approche des données à traiter

## **Compte rendu n°2 du 01/10/2018**

### **Semaine du 24 septembre 2018**

*Mercredi 26 septembre 2018*

- Rédaction du cahier des charges
- Première analyse des contraintes du problème
- Mise en place du dépôt svn sur Redmine Polytech Tours

*Jeudi 27 septembre 2018*

- Analyse des fichiers sources fournis par la SNCF
- État de l'art sur les problèmes d'ordonnancement
- Documentation sur les méthodes de RO

## **Compte rendu n°3 du 07/10/2018**

### **Semaine du 1er octobre 2018**

*Mercredi 3 octobre 2018*

- Correction du cahier des charges
- Analyse des contraintes du problème
- Début de la formulation simplifiée du problème

*Jeudi 4 octobre 2018*

- Formulation simplifiée :
  - Hypothèses
  - Prétraitements de données
  - Format des données d'entrée
  - Format des données de contraintes
  - Format des données de sortie

Rendu de la V1 de la formulation du problème

#### **Compte rendu n°4 du 17/10/2018**

**Semaine du 8 octobre 2018**

*Mercredi 10 octobre 2018*

- Travail sur la formulation du problème
- Réunion avec M. Bocquillon pour présenter la formulation

*Jeudi 11 octobre 2018*

- RDV avec M. Branger à la SNCF à St Pierre, pour parler du cahier des charges et de la formulation du problème
- Conférence sur la sécurité des SI de 14h à 16h : pas de travail sur le PRD pendant ce temps
- Rédaction du compte-rendu de la réunion du matin

Rendu du compte-rendu de réunion à la SNCF du 11 octobre 2018.

#### **Compte rendu n°5 du 18/10/2018**

**Semaine du 15 octobre 2018**

*Mercredi 17 octobre 2018*

- Rédaction du compte-rendu de réunion pour la rencontre avec la SNCF du 11 octobre
- Révision du cahier des charges

*Jeudi 18 octobre 2018*

- Révision du cahier des charges
- Nouvelle formulation du problème en cours

Rendu du cahier des charges V3.

#### **Compte rendu n°6 du 28/10/2018**

**Semaine du 22 octobre 2018**

*Mercredi 24 octobre 2018*

- Travail sur la formulation du problème avec les nouvelles spécifications
- Analyse du fichier des infrastructures de Joncherolles
- Analyse des fichiers des gares

*Jeudi 25 octobre 2018*

- Analyse et nettoyage des données concernant les gares des lignes H/K (gérées par Joncherolles) : faire correspondre les gares affichées sur le plan des lignes avec leurs codes à partir des fichiers fournis et de données publiques de la SNCF. Ces codes de gares sont ceux qui identifient les lieux de départ et arrivées sur le plan de roulement.
- Analyse des types d'infrastructures sur Joncherolles
- Travail sur la formulation du problème à l'aide de ces nouvelles données

Rendu de l'analyse des données des gares.

### Compte rendu n°7 du 26/11/2018

#### Semaine du 12 novembre 2018

Cette semaine n'a pas beaucoup fait avancer le PRD en raison du forum des entreprises. J'ai en effet préparé mon forum le mercredi, et j'y ai participé jeudi toute l'après-midi. Cependant, j'ai rédigé le rapport de la réunion à Paris Nord, qui résume les nouvelles spécifications à partir du croisement de mes notes et de celles de M. T'Kindt.

#### Semaine du 19 novembre 2018

*Mercredi 21 novembre 2018*

- Analyse des nouvelles spécifications apportées par la réunion à Paris Nord
- Analyse de la fréquentation des lignes H/K à l'aide des données Open Data de la SNCF, pour comprendre la contrainte du nombre maximum de rames à l'arrêt aux heures de pointe

*Jeudi 22 novembre 2018*

- Rédaction de la V4 du cahier des charges (encore en cours)
- Après-midi recrutement avec une entreprise : pas de PRD l'après-midi. Cette après-midi a été rattrapée en heures de travail personnel dans le week-end.

Rendu du compte-rendu de la réunion à Paris Nord, rendu de l'analyse des fréquentations des lignes H&K

### Compte rendu n°8 du 03/12/2018

#### Semaine du 26 novembre 2018

*Mercredi 28 novembre 2018*

- Rédaction de la V4 du cahier des charges
- Deux entretiens d'embauche, le premier à 8h30 et le second à 15h, ce qui a ralenti le projet.

*Jeudi 29 novembre 2018*

- Fin de rédaction du cahier des charges V4
- Début de rédaction du cahier de spécification
- Réunion avec M. Bocquillon et T'Kindt : révision des nouvelles spécifications et première modélisation
- Un entretien d'embauche à 11h

Rendu du cahier des charges V4.

### Compte rendu n°9 du 16/01/2019

#### Semaine du 17 décembre 2018

*Mercredi 19 décembre 2018*

- Analyse du modèle mathématique

*Jeudi 20 décembre 2018*

- Écriture du modèle mathématique sous LaTeX

### **Semaine du 17 décembre 2018**

En raison de la fin du S9, j'ai utilisé les séances de PRD pour terminer d'autres projets pour Polytech, dont le projet SI. Le PRD n'a donc pas avancé pendant cette semaine.

Rendu modèle mathématique V1.0

### **Compte rendu n°10 du 23/01/2019**

#### **Semaine du 14 janvier 2019**

*Mercredi 16 janvier 2019*

- Gestion de projet : création d'un Trello afin de lister les tâches et RDVs, mise à jour du fichier de pilotage des séances, tour d'horizon de l'état actuel du projet
- Travail sur d'autres projets pour Polytech en raison de la fin du S9

*Jeudi 17 janvier 2019*

- Travail sur d'autres projets pour Polytech en raison de la fin du S9

Mise en place du Trello

### **Compte rendu n°11 du 30/01/2019**

#### **Semaine du 21 janvier 2019**

*Mercredi 23 janvier 2019*

- Rectification du modèle mathématique
- Listage des données nécessaires à l'application
- Préparation RDV SNCF du 24 janvier
- Réunion encadrants 10h30-12h

*Jeudi 24 janvier 2019*

- RDV SNCF à St Pierre de 9h à 11h30
- Spécification détaillée des données nécessaires à l'application
- Conférence sur la transformation digitale dans l'assurance de 16h15 à 18h15

Rendu modèle mathématique V1.2

### **Compte rendu n°12 du 06/02/2019**

#### **Semaine du 28 janvier 2019**

*Mercredi 30 janvier 2019*

- Mise à jour du modèle mathématique V1.2
- Étude de CPLEX

*Jeudi 31 janvier 2019*

- Configuration de l'environnement de développement et du projet
- Étude de CPLEX
- Modélisation UML

### **Compte rendu n°13 du 13/02/2019**

#### **Semaine du 4 février 2019**



*Mercredi 6 février 2019*

- Modélisation UML du proof of concept
- Documentation sur l'utilisation de CPLEX et Concert
- RDV à l'IUT GEII pour le projet SI de 14h à 16h

*Jeudi 7 février 2019*

- Modélisation UML
- Programmation :
  - Classe des données d'entrée du modèle (codée, documentée, non testée)
  - Modèle CPLEX (En cours de codage et de documentation)
- Conférence Sopra 14h-16h

Rendu compilation de documents sur le projet pour stagiaire Valentine JOURDAN

#### **Compte rendu n°14 du 27/02/2019**

**Semaine du 11 février 2019**

*Mercredi 13 février 2019*

- Modélisation UML
- Programmation du modèle de données d'entrée pour le module de résolution

*Jeudi 14 février 2019*

- Programmation du modèle mathématique

**Semaine du 18 février 2019**

- Correction du modèle de données d'entrée (le modèle ne permettait pas une bonne programmation des contraintes)
- Programmation du modèle mathématique
- Révision du modèle mathématique : lors de la programmation des contraintes, je me suis aperçu d'une erreur dans l'écriture des contraintes (7) et (8).

Rendu compilation de documents sur le projet pour stagiaire Valentine JOURDAN

#### **Compte rendu n°15 du 07/03/2019**

**Semaine du 25 février 2019**

- Reprise modèle mathématique version 1.4
- Recodage modèle de données en C++ pour se conformer à la V1.4
- Retravail de la modélisation du proof of concept

Rendu modèle mathématique V1.5

#### **Compte rendu n°16 du 13/03/2019**

**Semaine du 4 mars 2019**

- Correction du modèle mathématique dans sa version 1.5
- Travail sur la modélisation du POC pour le rendre plus modulaire à l'ajout d'autres algorithmes de résolution utilisant CPLEX ou non
- Modélisation de la base de données
- Création base de données SQLite
- Modèle de données d'entrées codé (reste à tester)
- Module de résolution avec CPLEX codé (reste à tester)
- Modèle de données de sortie (reste à tester)

**Compte rendu n°17 du 26/03/2019****État du projet à la veille de la soutenance S10**

- Import, résolution et export terminés
- Modules d'export et import testés et validés
- Module de résolution testé sur une petite instance, avec succès

Rendu résultats test



# Webographie

- [WWW1] ORTFERROVIAIRE. *Dossier Francilien Z50000*. transport paris. 12 mar. 2014. URL : <http://transportparis.canalblog.com/archives/2014/03/12/29416401.html> (visité le 08/12/2018).
- [WWW2] Transilien SNCF. *Comptage des voyageurs montants dans les trains Transilien*. SNCF Open Data. 27 avr. 2018. URL : <https://data.sncf.com/explore/dataset/comptage-voyageurs-trains-transilien/information/> (visité le 21/11/2018).



## Bibliographie

- [1] Ronald Paulus EVERS. « Algorithms for Scheduling of Train Maintenance ». Thèse pour Master en Sciences Informatiques. Delft University of Technology, The Netherlands, 1<sup>er</sup> nov. 2010.
- [2] Tomas LIDÉN. *Railway infrastructure maintenance - a survey of planning problems and conducted research. 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands*. Research Survey. Linköping University, Department of Science et Technology, Norrköping SE-601 74, Sweden, 14 juil. 2015.
- [3] Aymen SIOUD. *Introduction à la Recherche Opérationnelle. Cours 8ROP515*. Cours. Université du Québec à Chicoutimi, Département Informatique et Mathématiques, 1<sup>er</sup> sept. 2017.



## Glossaire

**rame** Pour la SNCF, une rame est un ensemble de voitures et locomotives raccordées entre elles et circulant sur les chemins de fer. Chaque rame de la SNCF dispose d'un identifiant. 1, 10, 111

**roulement** Un roulement est un déplacement effectué par une rame d'un point A à un point B. 10

**train** Au sein de ce PRD, ce terme fait référence au service commercial effectué par des rames, pour relier un point A à un point B via des chemins de fer. Un train est identifié par un numéro de service commercial. 10, 11

# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

Benjamin POUVREAU

Encadrement : Ronan BOCQUILLON et Vincent T’KINDT



En collaboration avecSNCF -  
Pôle Ingénierie du Matériel  
Le Saint-Denis des Bois

## Objectifs

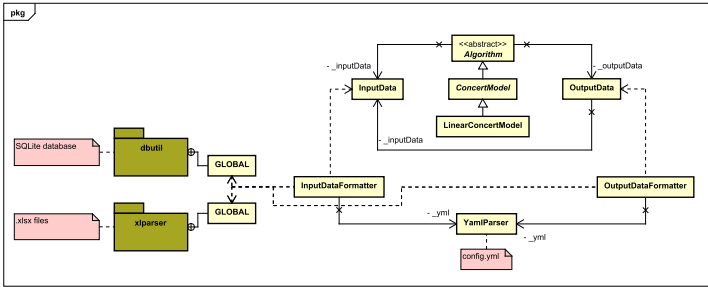
La SNCF dispose des lignes H et K du Transilien, au nord de Paris, gérées par le Technicentre de Maintenance des Joncherolles. L’objectif de ce projet est d’ordonnancer les opérations de maintenance corrective des rames signalées, en fonction de différentes contraintes horaires et matérielles.



Entrée du technicentre des Joncherolles

## Mise en œuvre

La résolution du problème s’est faite par une analyse du problème puis une formulation et une modélisation mathématique du problème, après un état de l’art sur des travaux d’ordonnancement similaires. Une application C++ a été développée pour tester le modèle.



Rame Z50000 sur un terre-plein

## Résultats attendus

Le résultat attendu est une planification de J à J+7 des opérations de maintenance corrective à réaliser sur les différentes rames, en spécifiant le site de maintenance. La planification minimisera le retard des opérations de maintenance corrective par rapport à leur date due.

| Code incident | Num Rame | Code operation | Site            | Voie | Date rentree | Date sortie | Retard |
|---------------|----------|----------------|-----------------|------|--------------|-------------|--------|
| 525447        | 222H     | 1500           | JONCHEROLLES    | 10   | 93           | 94          | 0      |
| 524919        | 65H      | 2000           | JONCHEROLLES    | 11   | 0            | 1           | 0      |
| 525139        | 22H      | 5212           | JONCHEROLLES    | 4    | 2            | 3           | 0      |
| 525080        | 82H      | 2207           | JONCHEROLLES    | 1CB  | 71           | 72          | 0      |
| 525437        | 75H      | 2006           | JONCHEROLLES    | 1CC  | 47           | 48          | 0      |
| 525377        | 26H      | 5213           | JONCHEROLLES    | 2CC  | 47           | 48          | 0      |
| 525072        | 15H      | 1037           | CREPY EN VALOIS | 1    | 46           | 47          | 0      |
| 525229        | 07H      | 1036           | CREPY EN VALOIS | 3    | 73           | 74          | 0      |
| 525171        | 53H      | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 3            | 4           | 0      |
| 525231        | 73H      | 2202           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 23           | 24          | 0      |
| 525448        | 29H      | 1501           | PERSAN BEAUMONT | 2    | 49           | 50          | 0      |
| 525436        | 06H      | 4532           | PERSAN BEAUMONT | 4    | 29           | 30          | 0      |
| 524935        | 189H     | 5003           | PERSAN BEAUMONT | 4    | 1            | 2           | 0      |
| 525495        | 04H      | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 5    | 29           | 30          | 0      |
| 525347        | 17H      | 4533           | PERSAN BEAUMONT | 5    | 21           | 22          | 0      |
| 524923        | 39H      | 1503           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 27           | 28          | 0      |
| 525318        | 49H      | 1531           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 48           | 49          | 0      |
| 525117        | 58H      | 1018           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 22           | 23          | 0      |
| 525223        | 84H      | 2629           | PERSAN BEAUMONT | 8    | 2            | 3           | 0      |
| 525068        | 03H      | 1035           | PERSAN BEAUMONT | 10   | 1            | 2           | 0      |
| 525115        | 41H      | 1504           | PERSAN BEAUMONT | 10   | 50           | 51          | 0      |
| 525242        | 16H      | 1038           | PERSAN BEAUMONT | 11   | 95           | 96          | 0      |

# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

Benjamin POUVREAU

Encadrement : Ronan BOCQUILLON et Vincent T’KINDT

## Objectifs

La SNCF dispose des lignes H et K du Transilien, au nord de Paris, gérées par le Technicentre de Maintenance des Joncherolles. L’objectif de ce projet est d’ordonnancer les opérations de maintenance corrective des rames signalées, en fonction de différentes contraintes horaires et matérielles.



Entrée du technicentre des Joncherolles



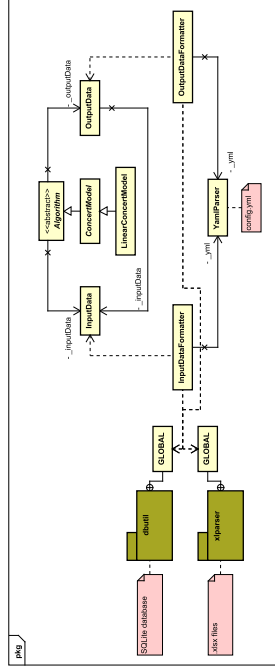
En collaboration avec SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps

## Mise en œuvre

La résolution du problème s’est faite par une analyse du problème puis une formalisation et une modélisation mathématique du problème, après un état de l’art sur des travaux d’ordonnancement similaires. Une application C++ a été développée pour tester le modèle.

## Résultats attendus

Le résultat attendu est une planification de J à J+7 des opérations de maintenance corrective à réaliser sur les différentes rames, en spécifiant le site de maintenance. La planification minimisera le retard des opérations de maintenance corrective par rapport à leur date due.



Rame Z50000 sur un terre-plein

| Code Incident | Nom Rame | Code operation | Site            | Voie | Date rentrée | Date sortie | Retard |
|---------------|----------|----------------|-----------------|------|--------------|-------------|--------|
| 325447        | 222H     | 1500           | JONCHEROLLES    | 10   | 95           | 94          | 0      |
| 324919        | 254H     | 2000           | JONCHEROLLES    | 11   | 0            | 1           | 0      |
| 325139        | 221H     | 5212           | JONCHEROLLES    | 4    | 2            | 3           | 0      |
| 325080        | 824H     | 2207           | JONCHEROLLES    | 1C8  | 71           | 72          | 0      |
| 324837        | 754H     | 2006           | JONCHEROLLES    | 1CC  | 47           | 48          | 0      |
| 325072        | 264H     | 5213           | JONCHEROLLES    | 2CC  | 47           | 48          | 0      |
| 325072        | 154H     | 1037           | CREPY EN VALOIS | 1    | 46           | 47          | 0      |
| 325229        | 074H     | 1036           | CREPY EN VALOIS | 3    | 73           | 74          | 0      |
| 325171        | 534H     | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 3            | 4           | 0      |
| 325231        | 734H     | 2202           | PERSAN BEAUMONT | 1    | 23           | 24          | 0      |
| 325448        | 294H     | 1501           | PERSAN BEAUMONT | 2    | 49           | 50          | 0      |
| 324836        | 064H     | 4532           | PERSAN BEAUMONT | 4    | 29           | 30          | 0      |
| 324935        | 189H     | 5003           | PERSAN BEAUMONT | 4    | 1            | 2           | 0      |
| 324945        | 044H     | 1000           | PERSAN BEAUMONT | 5    | 29           | 30          | 0      |
| 325347        | 174H     | 4533           | PERSAN BEAUMONT | 5    | 21           | 22          | 0      |
| 324923        | 394H     | 1503           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 27           | 28          | 0      |
| 325318        | 494H     | 1531           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 48           | 49          | 0      |
| 325117        | 584H     | 1018           | PERSAN BEAUMONT | 6    | 22           | 23          | 0      |
| 325223        | 844H     | 2629           | PERSAN BEAUMONT | 8    | 2            | 3           | 0      |
| 325068        | 034H     | 1035           | PERSAN BEAUMONT | 10   | 1            | 2           | 0      |
| 325115        | 414H     | 1504           | PERSAN BEAUMONT | 10   | 50           | 51          | 0      |
| 325242        | 164H     | 1038           | PERSAN BEAUMONT | 11   | 95           | 96          | 0      |



# Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF

## Résumé

La SNCF souhaite développer un outil d'ordonnancement des opérations de maintenance corrective pour les lignes H et K du Transilien. A cette fin, le but de ce projet est de trouver une solution d'ordonnancement de ces opérations.

## Mots-clés

Polytech Tours, PRD, SNCF, ordonnancement

## Abstract

The SNCF wishes to develop a scheduling tool of corrective maintenance operations for H and K Transilien lines. The purpose of this project is to find a planning solution for these operations.

## Keywords

Polytech Tours, PRD, SNCF, scheduling

## Entreprise

SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps



## Tuteurs entreprise

Romuald DETRUE  
Guillaume BRANGER  
Bruno LASNIER

## Étudiant

Benjamin POUVREAU (DI5)

## Tuteurs académiques

Ronan BOCQUILLON  
Vincent T'KINDT