



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

Projet Recherche & Développement

2020-2021

Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF

Entreprise

SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps



Tuteurs entreprise

Romuald DETRUE

Tony BOURLIER

Étudiant

Yohan NOUET (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



Nom	Email	Qualité
Yohan NOUET	yohan.nouet@etu.univ-tours.fr	Étudiant DI5
Ronan BOCQUILLON	ronan.bocquillon@univ-tours.fr	Tuteur académique, Département Informatique
Vincent T'KINDT	vincent.tkindt@univ-tours.fr	Tuteur académique, Département Informatique
Romuald DETRUE	romuald.detrue@sncf.fr	Tuteur entreprise
Tony BOURLIER	tony.bourlier@sncf.fr	Tuteur entreprise



Avertissement

Ce document a été rédigé par Yohan NOUET susnommé l'auteur.

L'entreprise SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps est représentée par Romuald DETRUE et Tony BOURLIER 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 assume 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

Yohan NOUET, *Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF* : ,
Projet Recherche & Développement, Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, Tours,
France, 2020-2021.

```
@mastersthesis{
  author={NOUET, Yohan},
  title={Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF: },
  type={Projet Recherche \& Développement},
  school={Ecole Polytechnique de l'Université de Tours},
  address={Tours, France},
  year={2020-2021}
}
```

Table des matières

Liste des intervenants	a
Avertissement	b
Pour citer ce document	c
Table des matières	i
Table des figures	iv
1 Introduction	1
1 Acteurs.....	1
2 Contexte.....	1
3 Enjeux.....	2
4 Objectifs.....	3
5 Bases méthodologiques.....	4
2 Description générale	5
1 Environnement du projet	5
2 Caractéristiques des utilisateurs.....	5
3 Fonctionnalités du système	5
4 Structure générale du système.....	6
3 État de l'art	8
1 Études des anciens Projets de Recherche et Développement	8
2 Recherche de littérature sur l'ordonnancement de maintenance ferroviaire	8
3 Méthodes de recherche opérationnelle	9
La programmation par contrainte	9

La programmation linéaire simple.....	10
4 Analyse	11
1 Compréhension du besoin	11
Réunion 1 : une première version du besoin	11
Réunion 2 : le besoin évolue	12
2 Analyse des contraintes du problème.....	12
2.1 Agencement des technicentres	12
2.2 Les sites de maintenance.....	13
2.3 La maintenance préventive.....	14
2.4 La maintenance corrective	14
2.5 Les équipes de maintenance	14
2.6 Plan de transport	15
2.7 Massification des modules	15
2.8 Accessibilité des sites de maintenance	16
2.9 Planification actuelle	16
2.10 Gestion des stocks	16
3 Diagramme de représentation du problème.....	16
4 Hypothèses	16
5 Données.....	18
Données d'entrée	18
Données de sortie	18
6 Objectif.....	18
5 Bilan et Conclusion	19
1 Bilan du semestre 9	19
Travail réalisé.....	19
Travail en cours.....	19
Bilan personnel	19
2 Objectifs pour le semestre 10	20
Annexes	21
A Cahier de Spécification	22
1 Spécifications fonctionnelles	22
1.1 Définition de la fonction 1 : Chargement des fichiers	22
Description de la fonction :	22
1.2 Définition des fonctions de pré-traitement des données.....	22
Description de la fonction :	22
1.3 Définition de la fonction 3 : Solveur	23

	Description de la fonction :	23
1.4	Définition de la fonction 4 : Post-traitement des données	23
	Description de la fonction :	23
1.5	Définition de la fonction 5 : Création du planning.....	23
	Description de la fonction :	23
2	Spécifications non fonctionnelles	24
2.1	Performance : un temps de traitement raisonnable	24
2.2	Formatage des données	24
2.3	Capacités du système.....	24
2.4	Maintenabilité et intégrabilité	24
B	Planification, gestion de projet	25
1	Méthodologie	25
2	Outils utilisés.....	25
2.1	Planification à court terme : Trello	25
2.2	Planification à long terme : Gantt.....	26
2.3	Stockage cloud.....	26
2.4	Gestion des versions.....	27
2.5	Travail effectué lors des séances	27
C	Comptes rendus de réunion	30
D	Cahier des charges	34
E	Webographie	43
F	Bibliographie	44



Table des figures

1 Introduction

- 1.1 Rame Pays de la Loire, auteur : Cramos — Photographie personnelle, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35039155> 3

2 Description générale

- 2.1 Diagramme de cas d'utilisation du système 6
- 2.2 Diagramme de représentation du système 7

4 Analyse

- 4.1 Plan du technicentre de Nantes..... 13
- 4.2 Schéma d'organisation des ressources dans un technicentre..... 17
- 4.3 Schéma d'organisation de la maintenance..... 17

B Planification, gestion de projet

- B.1 Trello - PRD 1..... 26
- B.2 Diagramme de Gantt - PRD 1 26

1

Introduction

Ce rapport présente les travaux réalisés lors du Projet de Recherche et de Développement *Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF*, réalisé dans le cadre de la cinquième année d'école d'ingénieur informatique à Polytech Tours. Cette première partie présentera les acteurs et le contexte dans lequel s'inscrit ce projet ainsi que ses objectifs et les bases méthodologiques employées.

1 Acteurs

Ce projet a été proposé par le Laboratoire d'Informatique Fondamentale et Appliquée de Tours (LIFAT) de l'école Polytech Tours, par le biais de son équipe ROOT chargée de la Recherche Opérationnelle Ordonnancement et Transport.

Ce PRD est encadré par Ronan Bocquillon et Vincent T'kindt, tous les deux enseignants à Polytech Tours et chercheurs au sein de l'équipe ROOT.

Ce projet est réalisé en collaboration avec le pôle de l'Ingénierie du Matériel de la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) de Saint-Pierre-des-Corps, à l'initiative de la demande. Il est représenté par Romuald Détroue, SET 2 l'Ingénierie du Matériel de la SNCF.

Ce projet met également en relation le technicentre SNCF des Pays de la Loire à qui le projet est destiné, représenté par Tony Bourlier, responsable amélioration continue, innovation et digital au sein du pôle de Nantes.

Enfin, ce projet est réalisé par Yohan Nouet, étudiant en cinquième année d'école ingénieur informatique à Polytech Tours.

2 Contexte

Le technicentre SNCF Pays de la Loire réalise des opérations de maintenance préventive et corrective du matériel roulant circulant sur le réseau de l'ouest. Il s'occupe principalement de la maintenance des rames¹ STF Intercités et STF Pays de la Loire qui totalisent plus de 140 engins.

1. le terme rame fait référence à la machine circulant sur les voies ferrées. Une rame est constituée d'un ensemble de voitures et locomotives

La maintenance de la région est effectuée principalement sur le site de Nantes Botreau, équipé de 7 voies de maintenance et différentes infrastructures. La région compte également quelques sites déportés qui permettent la réalisation de petites opérations de maintenance et le nettoyage des rames.

Jusqu'à présent, la planification des opérations de maintenance préventive sur les rames est réalisée par l'exploitant² longtemps à l'avance (plusieurs mois en amont) et transmise aux technicentres toutes les semaines. Cette anticipation permet de planifier toutes les opérations préventives (on parle de modules) avant leur butée de maintenance car chaque opération doit être réalisée avant x kilomètres ou x heures de fonctionnement. Cependant cette planification en amont est complexe et s'avère être une contrainte pour la gestion des technicentres qui doivent s'organiser en fonction de celle-ci. Le fait de planifier à long terme le préventif demande d'adapter les roulements (voyages commerciaux des trains³) en fonction de cette planification.

Les technicentres réalisent également toutes les opérations de maintenance corrective. Cette dernière consiste à traiter tous les incidents qui interviennent de manière aléatoire sur les engins. Ce type d'opération est très imprévisible et donc difficile à anticiper dans la planification. De plus, les types d'opérations sont classés par niveaux d'importance pour lesquels des délais maximums de résolution des incidents peuvent être définis.

Aujourd'hui, au niveau des technicentres, la planification quotidienne est réalisée par le CO-PROD⁴. Il est en charge de l'ordonnancement des opérations selon les ressources disponibles (nombre d'agents, infrastructures, stocks de pièces disponibles) mais surtout en fonction des demandes de maintenance. En effet, la planification dans les ateliers doit accorder les demandes de planifications préventives prévues en amont avec celle des opérations correctives qui sont imprévisibles et sont à réaliser dans des délais très courts. Ce type de fonctionnement ne permet pas une bonne gestion des aléas puisqu'elle n'offre pas beaucoup de marge de manœuvre aux agents du technicentre.

3 Enjeux

Le principal enjeu pour le technicentre des Pays de la Loire est d'optimiser la planification des opérations de maintenance préventive et corrective. L'idée est de passer d'un modèle de planification dissociée à une planification conjointe des opérations préventives et correctives.

Cette relation permet d'optimiser la planification du préventif en exploitant les impératifs liés aux rentrées des rames dans les ateliers pour le correctif. Des opérations préventives et correctives pourront donc être réalisées simultanément sur une rame.

Il est également question d'optimiser le préventif en regroupant les modules pouvant être réalisés en même temps (en fonction de leur butée de maintenance) sur une machine : on parle de massification. Auparavant, le mode de planification rendait la massification très contraignante puisqu'il est difficile de tenir compte des butées de maintenance lorsque la planification est réalisée longtemps à l'avance. Il s'agit donc d'adopter un système d'ordonnancement sur un horizon plus court.

A certains moments, il arrive qu'une rame soit stationnée plusieurs heures de suite sur une voie de garage (lorsque l'exploitant n'en a pas besoin par exemple). L'enjeu est alors d'exploiter ces

2. Chez la SNCF, l'exploitant désigne le service qui supervise et coordonne l'exploitation des ressources pour assurer les services commerciaux. Jusqu'à présent, c'est l'exploitant qui planifiait la maintenance préventive des rames pour la région des Pays de la Loire.

3. Dans le langage SNCF, un train désigne un service commercial effectué par une rame entre deux gares. Cela ne fait pas référence au matériel.

4. Ce terme désigne la personne en charge de la coordination de la production. Cela consiste à organiser et planifier la maintenance au sein des sites SNCF.



Figure 1.1 – *Rame Pays de la Loire*, auteur : Cramos — Photographie personnelle, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35039155>

moments d'inactivité lorsqu'une rame est située à proximité d'un atelier de maintenance pour réaliser des modules préventifs dont les butées sont proches.

Pour mettre tout cela en application, la SNCF souhaite créer un outil d'aide à la décision, à destination des employés en charge de la coordination de production, qui permet d'ordonnancer la maintenance préventive et corrective des rames sur les différents sites de la région de façon optimisée sur un horizon de 4 semaines. Ce projet permet également de retirer la contrainte de la planification du préventif à l'exploitant en déléguant la planification au COPROD. Cette évolution permet d'avoir une planification à plus petite échelle au plus près de la gestion des ressources.

4 Objectifs

L'objectif principal de ce Projet de Recherche et de Développement est de concevoir l'outil d'aide à la décision que souhaite réaliser le pôle ingénierie du matériel SNCF pour optimiser la planification de la maintenance préventive et corrective dans le technicentre des Pays de la Loire sur un horizon de 4 semaines (28 jours).

Pour y parvenir cela se traduit par différentes étapes :

- Tout d'abord, il est crucial de bien comprendre la demande de la SNCF pour partir dans la bonne direction. Cette première étape permet de formaliser le problème pour ensuite proposer une solution en adéquation avec les besoins d'optimisation de la planification de la maintenance.
- La deuxième étape consiste à réaliser une étude de la littérature pour situer le problème dans le contexte scientifique. Dans notre cas l'état de l'art consiste à étudier les différents travaux sur la planification de la maintenance ferroviaire appliquée à la maintenance du matériel roulant.
- Il s'agit ensuite de formaliser le problème puis de s'en servir pour modéliser mathématiquement le problème en définissant ses contraintes et objectifs d'optimisation.

- L'étape suivante consiste à implémenter notre programme d'optimisation. Une fois que tout est opérationnel et que le programme permet une optimisation de la planification, il peut être proposé à la SNCF.

5 Bases méthodologiques

Pour mettre en place ce projet, nous nous sommes naturellement tournés vers une méthode itérative mettant le client au cœur du projet. La méthodologie agile s'avère être la plus adaptée étant donné que de nombreux échanges sont nécessaires au long du projet avec les différents acteurs de la SNCF pour bien comprendre le contexte, la problématique du sujet et faire ressortir les contraintes.

Au lancement du projet, des réunions sont prévues d'abord au pôle ingénierie à Saint-Pierre-Des-Corps pour situer le projet dans son contexte puis ensuite avec les agents du technicentre de Nantes pour préciser la problématique.

Différents outils de gestion de projet ont été mis en place pour mener à bien ce PRD :

- Un diagramme de Gantt réalisé avec l'outil GanttProject permet de placer les différents jalons à respecter ainsi que des relations de précedence entre les tâches. Il permet également d'avoir une vision d'ensemble du projet.
- Pour l'organisation à plus petite échelle, un Trello a été mis en place. Dans ce projet il permet de découper plus finement l'ensemble des tâches en actions à réaliser. Cela apporte également une vision sur la progression des tâches au jour le jour. Utilisés de cette manière, Trello et Gantt sont des outils assez complémentaires.

Les encadrants sont tenus informés de l'avancée du projet. La progression des travaux est également présentée régulièrement à la SNCF par mail.

Les documents de gestion de projet sont disponibles en annexe **B**.

2

Description générale

1 Environnement du projet

L'objectif de ce Projet de Recherche et de Développement est avant tout de proposer des solutions aidant à la planification. Cela se traduit dans un premier temps par la conception d'un prototype permettant de démontrer la faisabilité du projet avant une conception plus approfondie (réalisation d'un Proof of concept).

Le périmètre du projet n'est ainsi pas contraint par l'intégration au sein du système d'information de la SNCF. Les seules interactions se limitent à la lecture de jeux de données. Cependant, à terme si le logiciel est intégré par le technicentre de Nantes, il pourra être amené à communiquer avec des éléments existants comme une base de données pour la gestion des ressources notamment.

2 Caractéristiques des utilisateurs

Le projet est à destination des coordinateurs de production (COPROD). Ils en seront les utilisateurs finaux. Ils pourront être amenés à utiliser l'outil lorsqu'ils devront prendre des décisions quant à la planification de la maintenance des rames.

Dans l'optique d'une future intégration au système d'information actuel, le pôle ingénierie du matériel roulant peut être amené à réutiliser les algorithmes et les adapter pour les intégrer dans leurs logiciels. Nous pouvons les qualifier d'utilisateurs subsidiaires dans ce projet.

3 Fonctionnalités du système

Le système permettra à l'utilisateur de générer une solution de planification de la maintenance au sein du technicentre. Pour cela l'utilisateur devra paramétrer l'outil en lui fournissant les fichiers de données nécessaires au fonctionnement de l'algorithme. A partir de ces données, le système pourra proposer une solution de planification satisfaisant toutes les contraintes d'optimisation amenées par le problème. Cette solution sera ensuite mise à disposition de l'utilisateur qui pourra s'en servir pour établir sa planification. Le système pourra également être amené à évoluer en vue d'une intégration par le pôle d'ingénierie de Saint-Pierre-des-Corps pour une future intégration dans les logiciels SNCF.

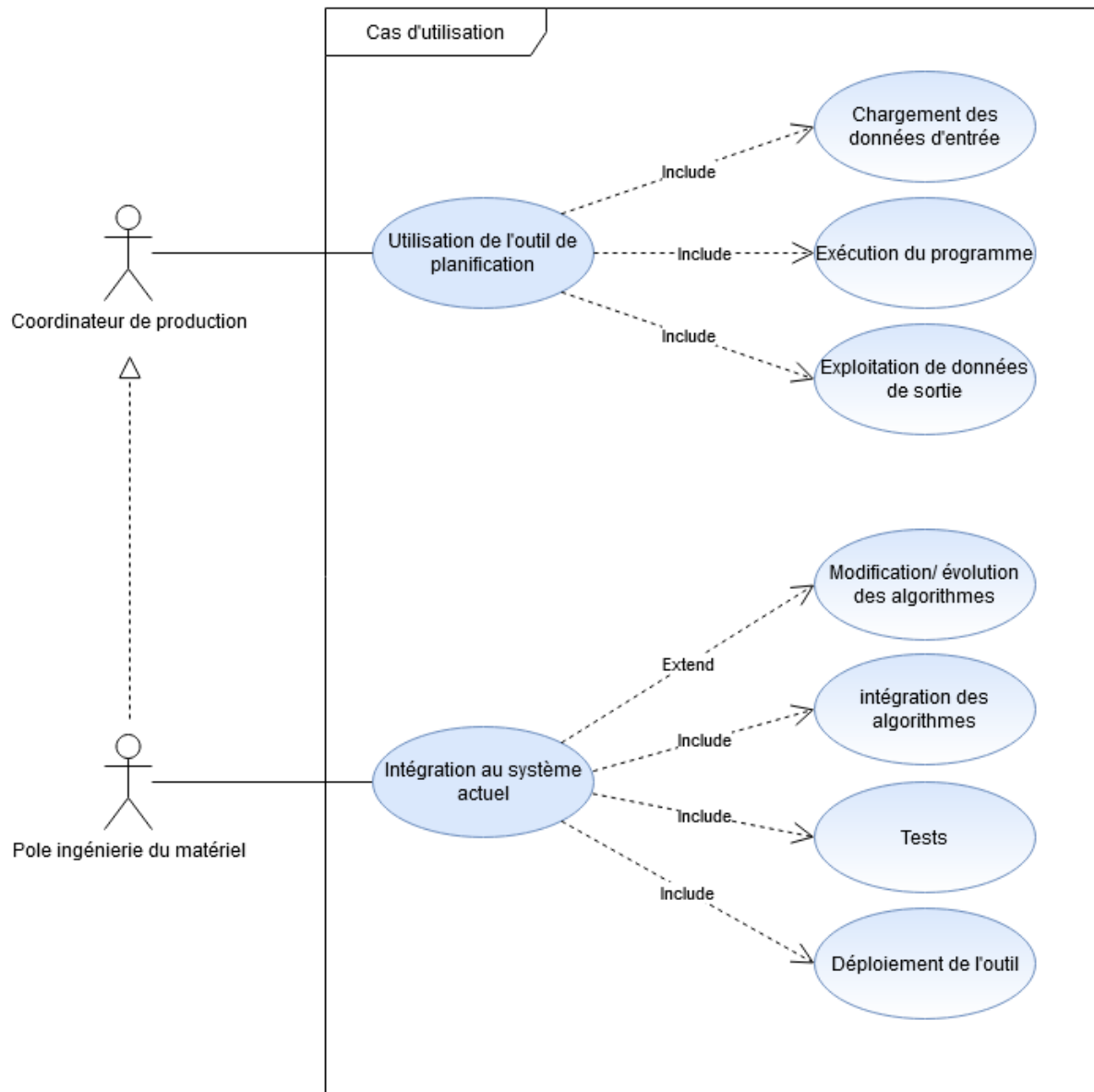


Figure 2.1 – Diagramme de cas d'utilisation du système

4 Structure générale du système

Le projet consiste à développer un algorithme d'optimisation. Il ne sera donc pas constitué d'interfaces graphiques permettant d'interagir avec l'utilisateur. Le programme s'exécutera en mode console. Les fichiers de données seront à fournir en paramètre au lancement de l'exécution. Ensuite, les fichiers seront lus et les données utiles en seront extraites. Cela sera réalisé par un module d'analyse syntaxique (parseur) qui préparera les données avant de les exploiter dans le solveur.

Le solveur entre ensuite en action. Il s'agit du module qui aura la tâche de trouver une solution optimisant les contraintes du problème d'ordonnancement.

Enfin, le programme terminera son exécution en mettant les résultats de la planification à la disposition de l'utilisateur dans un fichier.

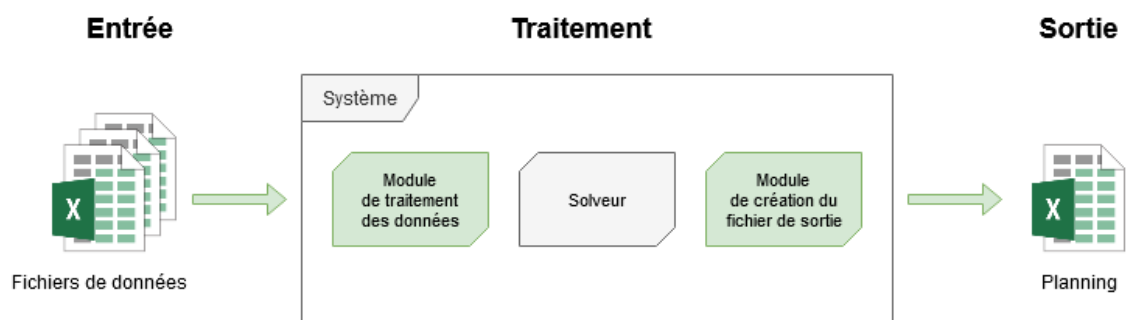


Figure 2.2 – *Diagramme de représentation du système*

3

État de l'art

Une importante partie du début du Projet de Recherche et Développement a été la réalisation de l'état de l'art du projet. Cette section détaille ainsi quels sont les travaux qui ont été faits par le passé sur le sujet de l'ordonnancement de la maintenance ferroviaire dans la littérature mais également au sein de l'école lors de précédents PRD.

1 Études des anciens Projets de Recherche et Développement

Deux étudiants ont déjà travaillé sur des projets d'ordonnancement de maintenance ferroviaire. En effet, un premier travail a été réalisé par Benjamin Pouvreau sur la maintenance corrective [4]. Ses recherches traitent la problématique de la planification de la maintenance corrective des rames sur deux lignes d'Ile-de-France en fonction de signaux communicant en temps réel l'état de leurs composants. Ce projet a ensuite été poursuivi par Maël Bervet, afin de d'améliorer les résultats en utilisant notamment des méthodes heuristiques [1].

Valentine Jourdan, doctorante de l'université de Tours, prépare également une thèse sur le sujet en s'intéressant à l'optimisation de la planification de la maintenance corrective. Ses travaux visent notamment à exploiter les rentrées des rames en atelier pour les opérations préventives dont les échéances sont connues à l'avance pour planifier les opérations de maintenance corrective selon leur criticité sur un horizon de 7 jours.

Au sein de l'école, différents projets ont donc déjà étudié la problématique de l'ordonnancement de la maintenance des rames. Ces différents travaux étant en lien avec ce que nous cherchons à faire dans ce PRD, il s'agira de voir quels sont les éléments pouvant être adaptés pour traiter notre problématique.

2 Recherche de littérature sur l'ordonnancement de maintenance ferroviaire

Dans la littérature, différents travaux traitent la problématique de l'optimisation de la maintenance ferroviaire. La majeure partie d'entre eux est axée sur l'ordonnancement de l'entretien des voies de chemin de fer . J'ai notamment étudié les travaux de Tomas Lidén au travers de sa

thèse [3], ou encore les recherches de Hui Shang qui a travaillé sur la conception de modèles de coût/performance pour améliorer les décisions de maintenance [6]. L'ensemble de ces ressources visent à optimiser les opérations de maintenance des réseaux ferroviaires.

D'autres travaux concernent l'ordonnancement de la maintenance du matériel roulant. En effet, François Ramond a travaillé en 2008 sur la planification optimisée des opérations sur les rames dans les technicentres SNCF [5]. Les travaux n'ayant pas été numérisés, je n'ai pas pu approfondir leur étude davantage. Les recherches de Ronald Evers effectuées durant sa thèse traitent également de la maintenance des rames et plus particulièrement de l'ordonnancement de la maintenance préventive du matériel roulant dans un technicentre aux Pays-Bas [2]. Ses recherches sont intéressantes car elles s'approchent de la problématique à laquelle nous faisons face dans ce projet : le modèle de planification préventif décrit dans ses travaux ressemble fortement à la méthode employée jusqu'à présent à Nantes. Aux Pays-Bas, La modélisation est basée sur la génération d'un planning général qui représente une semaine type de maintenance reconduite ensuite d'une semaine à l'autre. Ce plan est généré quelques fois par an (généralement une fois pour la saison d'hiver et une seconde pour la saison d'été) et ne tient pas compte de tous les niveaux de détails. Ce planning sert ensuite de base pour établir un planning de production plus détaillé, qui tient compte des ressources mises à disposition. De cette façon le planning peut prendre en compte les derniers ajustements semaine à semaine.

3 Méthodes de recherche opérationnelle

Les deux méthodes de recherche opérationnelle qui sont fréquemment utilisées dans les différents travaux de la littérature étudiée sont la programmation par contrainte et la programmation linéaire simple.

La programmation par contrainte

Dans la littérature, beaucoup de travaux d'ordonnancement font référence à la programmation par contrainte (PPC ou CSP pour Constraint Satisfaction Problem). Ce domaine n'ayant pas été couvert par les cours de recherche opérationnelle que j'ai suivis, je me suis formé en étudiant un cours d'introduction à la modélisation et résolution par programmation par contrainte [WWW3]. Ce type de programmation permet de résoudre des problèmes combinatoires de grande taille comme les problèmes de planification et d'ordonnancement [WWW2].

En PPC, les problèmes sont modélisés sous la forme d'un ensemble de contraintes posées sur des variables, chacune de ces variables prenant ses valeurs dans un domaine. Une CSP peut être définie par le triplet (X, D, C) :

- $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ l'ensemble des variables de décision
- D la fonction qui associe à chaque variable $x_i \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, son domaine, c'est-à-dire, l'ensemble des valeurs pouvant être prise par x_i
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ L'ensemble des contraintes. Les contraintes peuvent avoir différents types contrairement à la programmation linéaire. On y retrouve les contraintes numériques (égalité, différence, inégalité) entre 2 expressions arithmétiques, les contraintes booléennes ou encore les contraintes sur les ensembles (contrainte all-different par exemple).

La résolution est faite par combinaisons, en explorant différentes solutions réalisables. Généralement, il est nécessaire d'utiliser des méthodes se rapprochant de l'intelligence artificielle qui permettent de réduire le temps de recherche des combinaisons satisfaisant les contraintes. La recherche combinatoire de la PPC peut être associée à une fonction objective afin de pouvoir optimiser les résultats.

La programmation linéaire simple

La programmation linéaire peut également servir dans un problème d'ordonnancement. Elle consiste à optimiser (minimiser ou maximiser) une fonction linéaire, appelée fonction objective, mettant en jeu plusieurs variables qui sont liées par des relations linéaires (contraintes) [WWW1]. De ce fait elle est très utilisée dès lors qu'une optimisation est recherchée. Le domaine de définition des variables peut être réel ou entier, dans ce cas on parle de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE).

4

Analyse

Ce chapitre présente l'exploration qui a été faite autour du projet. Cette phase d'analyse, essentielle pour mener à bien un projet, a permis de formaliser le problème d'ordonnancement sur lequel travaille la SNCF.

1 Compréhension du besoin

La première étape de l'analyse a été de comprendre le besoin du client. Pour cela, plusieurs réunions ont eu lieu au cours desquelles nous avons pu échanger sur le contexte du projet ainsi que les enjeux répondant aux différentes problématiques. Nous allons voir que la compréhension du besoin n'a pas été facile puisque celui-ci a beaucoup évolué au fil des réunions.

Réunion 1 : une première version du besoin

Une première réunion a eu lieu au pôle ingénierie du matériel le 22 octobre 2020. Ronan Bocquillon m'y a accompagné. Cette réunion intervient un mois après le lancement du PRD, ce qui à l'échelle du projet est assez tardif. Malheureusement il a été difficile de trouver un créneau durant lequel la SNCF pouvait nous recevoir. Durant cette période j'ai essentiellement étudié la littérature disponible et réalisé l'état de l'art du projet. Cette première réunion a été l'occasion de rencontrer Romuald Détrue, SET niveau 2, chef de projet Ordonnancement de la Maintenance Corrective pour la SNCF. Cette réunion nous a permis d'aborder les différents aspects de la maintenance et de sa prise en charge au sein de la SNCF de manière générale. Il nous a ensuite présenté le contexte particulier en lien avec le technicentre des Pays de la Loire :

Au sein du technicentre de Nantes, l'agent en charge de la planification reçoit chaque semaine les demandes de prise en charge pour la maintenance préventive transmises par l'exploitant. Ces demandes sont présentées sous la forme de deux fichiers Excel : l'un donnant les dates et heures d'arrivées sur la semaine pour les TER, l'autre pour les Intercités. En parallèle, le technicentre doit aussi traiter la maintenance corrective dont on ne connaît pas la planification à l'avance, les pannes étant imprévisibles. A partir de ces données, tous les jours, l'agent organise la maintenance préventive et corrective au sein du technicentre sur 24 heures. Pour cela il doit tenir compte des dates d'arrivées des rames dans l'atelier, répartir les opérations sur les différentes voies en fonction de leurs équipements et également tenir compte des ressources à disposition : le nombre de techniciens et leur métier, ainsi que les stocks de pièce à disposition.

Pour aider la coordination de production, la SNCF est donc à la recherche d'un outil d'aide à la planification journalière pour le site de Nantes.

Ce kick-off meeting nous a permis de situer le projet dans son contexte. Nous avons convenu d'une prochaine réunion avec un responsable du site de Nantes pour évoquer plus en détail les différentes contraintes du problème.

Réunion 2 : le besoin évolue

Le 5 novembre 2020, Ronan Bocquillon, Vincent T'Kindt et moi avons participé à une seconde réunion organisée en visio avec Romuald Détroue et Tony Bourlier, responsable amélioration continue, innovation et digital au sein du pôle de Nantes. Tony bourlier nous a précisé le contexte et les enjeux de la réalisation de ce projet. Il s'est avéré que le besoin n'était plus celui que nous avions évoqué lors du premier meeting. Le travail effectué jusqu'à présent allait devoir être modifié. J'avais, entre autres, rédigé une première version de cahier des charges que je comptais leur présenter lors de cette réunion pour m'assurer d'aller dans la bonne direction en ayant compris le sujet. Ce document n'a donc pas été proposé (il est disponible en annexe **D**).

Cette réunion a donc permis de faire évoluer le contexte dans lequel s'inscrit ce PRD. Le nouveau besoin est celui qui a été évoqué en introduction de ce rapport. Il ne s'agit plus de proposer une solution de planification à l'horizon de 24 heures au sein même de l'atelier mais sur une échelle plus large. En effet il est maintenant question de proposer une solution d'ordonnancement sur un horizon de 4 semaines sur l'ensemble des infrastructures pouvant effectuer de la maintenance dans la région (l'atelier principal étant le technicentre de Nantes). Le réel besoin est d'évoluer vers un modèle de planification conjointe de la maintenance préventive et corrective sur les différentes infrastructures de manière à optimiser le temps passé en atelier par les rames. Cela se traduit notamment par chercher à regrouper les modules de maintenance préventive pouvant être réalisés en même temps sur une rame.

2 Analyse des contraintes du problème

Le problème de planification auquel nous sommes confrontés met en jeu plusieurs contraintes qu'il a fallu mettre en évidence. Cela n'a pas été une tâche facile, cependant nous avons réussi à les identifier au travers de nos différents échanges.

Certains éléments de l'analyse ont pu être réemployés à partir du travail effectué par Benjamin Pouvreau lors de son PRD. Ces derniers ont été adaptés à la problématique du site de Nantes.

Il s'agira de voir à travers cette section quelles sont les différentes contraintes identifiées lors de l'analyse du problème.

2.1 Agencement des technicentres

Les ateliers de maintenance disposent de différentes infrastructures. En effet toutes les voies de maintenance au sein du technicentre ne possèdent pas les mêmes équipements. De ce fait, Elles permettent d'effectuer des opérations différentes selon leur type d'aménagement. Le technicentre de Nantes comporte 7 voies de maintenance :

- des fosses qui permettent d'accéder à la partie inférieure de la rame. Les agents peuvent aisément intervenir sur le bogie notamment (chariot au contact des rails constituant le train roulant de l'engin).
- des voies équipées de ponts permettant d'intervenir sur la partie haute et la toiture de la rame.

- des voies de terre-pleins moins spécifiques pour toutes les opérations qui ne nécessitent pas d'infrastructures particulières.
- une station service pour toutes les opérations logistiques (carburant, lave-glace, huile moteur, eau claire, etc).

En ce qui concerne le dimensionnement, les voies d'atelier sont parfois très longues, et peuvent donc accueillir plusieurs rames. Le technicentre de Nantes a la particularité d'être disposé en bout de ligne (cul-de-sac). Ainsi, l'ordre de sortie des rames sera l'inverse de celui d'entrée. Cela peut devenir une contrainte forte pour l'ordonnancement des opérations sur les différentes voies (contrainte similaire au jeu de taquin). Cependant dans notre cas, l'expérience des agents sur le terrain, habitués à devoir organiser les déplacements des rames permet de ne pas avoir à prendre en compte cette contrainte.

Pour la sécurité des agents, lors des opérations de maintenance les voies doivent être sécurisées en mettant les lignes hors tension. Les techniciens sont ainsi en mesure de travailler en toute sécurité. A l'issue d'une opération ou pour déplacer une rame dans l'atelier, l'opération inverse est effectuée, les voies sont remises sous tension.

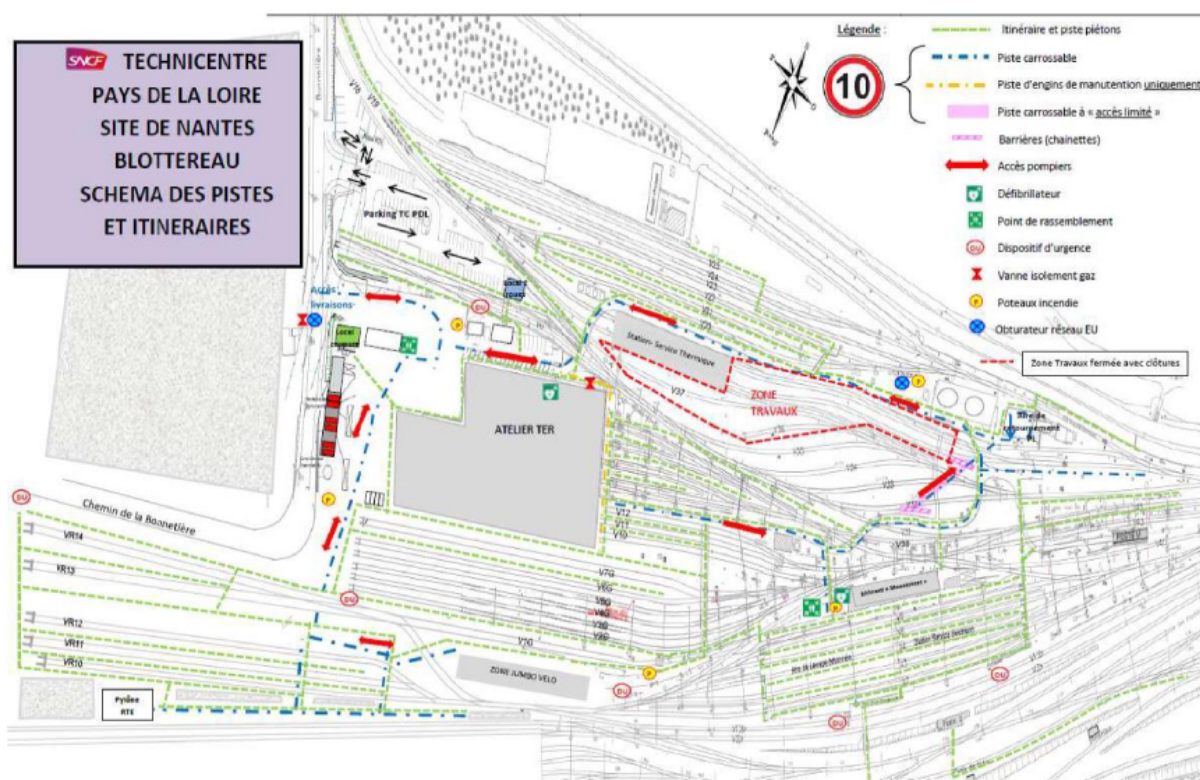


Figure 4.1 – Plan du technicentre de Nantes

2.2 Les sites de maintenance

La région des Pays de la Loire comporte plusieurs sites pour la maintenance dont le principal est situé à Nantes (technicentre du site Blottereau). D'autres sites annexes, permettent de réaliser de plus petites opérations de prévention et de nettoyage. Parmi eux, on retrouve l'étoile ferroviaire du Mans qui est, entre autres, un site de maintenance et garage pour les rames. La liste exhaustive des différents sites de maintenance doit encore être mise à disposition par la SNCF.

2.3 La maintenance préventive

La maintenance préventive englobe toutes les opérations de maintenance définies par l'ingénierie qui sont à effectuer à échéances régulières. En effet, ces opérations sont à réaliser tous les x kilomètres ou x heures d'utilisation. Ces butées de maintenance, également appelées dates dues, doivent obligatoirement être respectées au risque de se voir restreindre l'utilisation, ou même l'immobilisation de la rame concernée.

La maintenance préventive est répartie en différents modules. On compte jusqu'à 200 modules de maintenance selon le type de rame. Chaque module est défini par l'ingénierie et se constitue, entre autres, des éléments suivants :

- la description des opérations à effectuer
- la date due exprimée en distance ou en nombre d'heures d'utilisation
- la durée évaluée pour la réalisation du module
- les ressources nécessaires (nombre d'agents et leur qualification, type d'infrastructure, liste de pièces)

Afin d'optimiser la planification des opérations préventives, les modules peuvent être regroupés lorsque cela est possible. Plusieurs modules peuvent donc être ordonnancés en même temps s'ils sont inter-compatibles. Cette opération qui consiste à regrouper des modules est appelée la massification (voir section 2.7). Elle est au cœur des enjeux de ce projet.

2.4 La maintenance corrective

Une rame qui tombe en panne, est accidentée, ou plus généralement subit un incident est envoyée en maintenance corrective. Les différents incidents pouvant être subis par les rames sont classés par la SNCF. Cette classification établie par l'ingénierie, détaille selon le type d'incident quelles sont les ressources nécessaires (durée de réparation, infrastructures requises, etc). Chaque type d'incident peut donner lieu à différentes interventions de maintenances pouvant nécessiter la coordination de plusieurs corps de métier.

En pratique, lorsque une panne ou un problème est constaté sur une rame, un agent fait remonter son signalement. Les mesures nécessaires sont ensuite prises selon la gravité de l'incident.

2.5 Les équipes de maintenance

Au sein des sites de maintenance, les techniciens sont répartis en différentes équipes en fonction de leurs spécialisations. Leur mission principale est la réalisation des opérations de maintenance du matériel roulant. Nous pouvons y retrouver des corps de métiers variés comme les électriciens, ou les mécaniciens par exemple. On y trouve également des métiers particuliers pour des opérations ayant besoin d'expertise dans un domaine (spécialistes pour les portes par exemple). Chaque équipe comporte un chef qui fait le lien entre les responsables de site et les agents. Les effectifs comptent aussi des équipes de dépannage qui sont particulièrement qualifiées pour les opérations de maintenance corrective.

Les différentes équipes sont réparties en 3 x 8 heures (matin/après-midi/nuite) via un fichier de planification.

En journée, les agents sont affectés aux opérations selon les besoins de ces dernières et les disponibilités de chacune des équipes.

2.6 Plan de transport

Le plan de transport établit les roulements effectués par les rames. Il indique pour chaque rame les trajets à réaliser en spécifiant les données suivantes :

- le type de rame
- le numéro de train
- la date et l'heure de départ
- le lieu de départ
- la date et l'heure d'arrivée
- le lieu d'arrivée
- le nombre de kilomètres effectués

A partir des données du plan de transport, il est possible d'identifier à quel endroit du réseau se situe une rame. Cela nous permet d'identifier si une machine est positionnée à proximité d'un atelier de maintenance.

Les données nous permettent également de déterminer les périodes d'inactivité d'une rame (les périodes de temps durant laquelle elle n'est pas en service). Lorsque le matériel n'est pas exploité, il peut potentiellement se voir effectuer des opérations de maintenance préventive.

La combinaison des données de localisation et de périodes d'inactivité du matériel peuvent ainsi permettre de planifier des modules de maintenance sans perturber les services commerciaux. En effet ces derniers doivent absolument être respectés.

2.7 Massification des modules

La massification consiste à réaliser un assemblage de modules de maintenance préventive, dont les butées approchent, pouvant être réalisés en même temps sur une rame. Cette opération permet d'optimiser le temps passé par une rame en maintenance en réalisant plusieurs opérations en parallèle.

Pour décider quels modules peuvent être planifiés simultanément il faut définir une matrice de compatibilité entre les modules. Cette classification doit tenir compte de plusieurs critères :

- le type de voie sur laquelle est à effectuer le module. En effet il peut y avoir des conflits si les modules demandent des infrastructures différentes (par exemple si un des modules requiert une fosse et un autre nécessite un pont).
- les contraintes de séquençement logique entre opérations : certains modules doivent impérativement être réalisés avant d'autres. Ainsi, la massification se doit de respecter l'ordonnancement des modules.
- la non compatibilité entre deux modules. Pour des raisons techniques, certains modules ne peuvent pas être réalisés en même temps.

Ces différents critères sont valables pour la massification des modules préventifs mais il est également possible de planifier des modules préventifs en même temps qu'une opération de maintenance corrective. Cela permet ainsi de profiter d'une rentrée en atelier pour du correctif pour effectuer des modules préventifs compatibles.

Aujourd'hui, la planification actuelle du préventif, effectuée longtemps à l'avance rend la massification complexe. L'objectif, à travers ce projet, est donc d'exploiter la massification pour optimiser l'ordonnancement de la maintenance tout en respectant la butée de maintenance imposée à chaque module.

2.8 Accessibilité des sites de maintenance

D'après la position d'une rame dans le réseau, nous pouvons connaître la distance séparant la rame du technicentre. Cela permet d'établir l'accessibilité aux sites de maintenance en fonction de la gare dans laquelle est située la rame.

La SNCF peut établir ce critère selon deux méthodes :

- Accessibilité binaire : à partir d'une gare, est-ce qu'il est envisageable d'accéder ou non au site de maintenance.
- Accessibilité selon le temps de trajet : un temps de trajet pour rejoindre le technicentre à partir d'une gare est déterminé.

Couplées au temps de disponibilité des rames entre 2 services, donné par le plan de transport, les données permettent de planifier des modules de maintenance lorsque les rames se trouvent à proximité des ateliers.

2.9 Planification actuelle

Jusqu'à présent la planification des opérations préventives et correctives était faite de manière dissociée. Le préventif était fixé longtemps à l'avance et des créneaux étaient réservés avec anticipation dans les technicentres pour sa réalisation. Le correctif était ensuite programmé par dessus sur un horizon plus court.

L'employé responsable de la planification arrivait à organiser les opérations à la main en se basant sur les différents fichiers (Excel) de ressources à sa disposition.

2.10 Gestion des stocks

Chaque opération de maintenance qu'elle soit préventive ou corrective peut nécessiter un certain nombre de pièces à remplacer. Les pièces nécessaires pour chaque opération sont listées par le constructeur des rames. Les technicentres disposent de leur propre stock de pièces qui sont répertoriées dans leur système d'information. Lors de la phase d'ordonnancement, les agents en charge de la planification sont chargés d'étudier la faisabilité des opérations, en vérifiant notamment que les pièces sont disponibles.

3 Diagramme de représentation du problème

Afin de bien visualiser l'ensemble des paramètres rentrant en jeu dans le problème et dans l'organisation de la maintenance au sein des technicentres de façon générale, des diagrammes ont été réalisés. Le premier permet de mettre en valeur l'organisation des ressources sur un site de maintenance (figure 4.2).

Le second diagramme schématise l'ensemble des données qui sont en jeu dans le problème pour permettre d'optimiser la planification des opérations (figure 4.3).

4 Hypothèses

Afin de simplifier la première version du problème, différentes hypothèses ont été retenues :

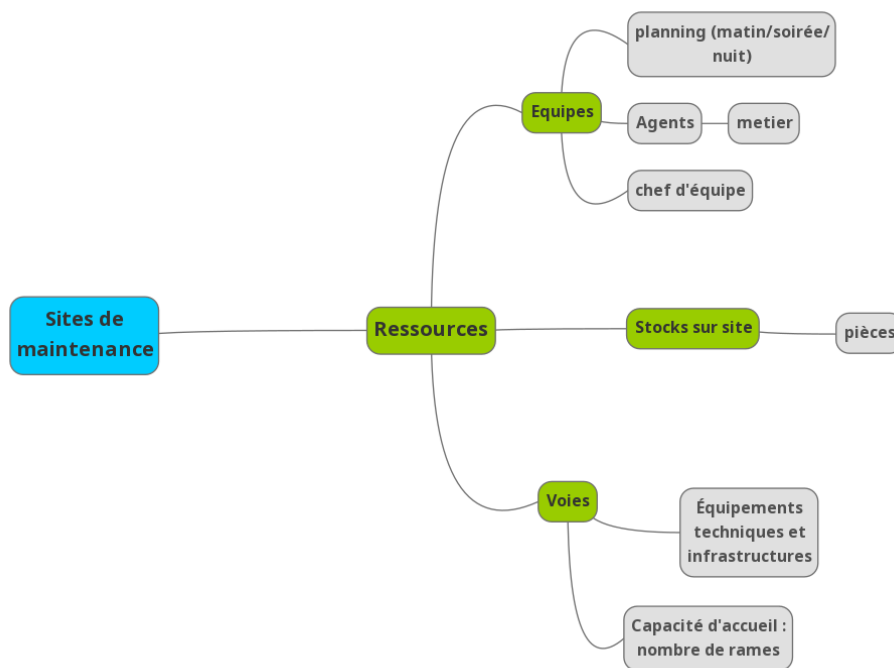


Figure 4.2 – Schéma d'organisation des ressources dans un technicentre

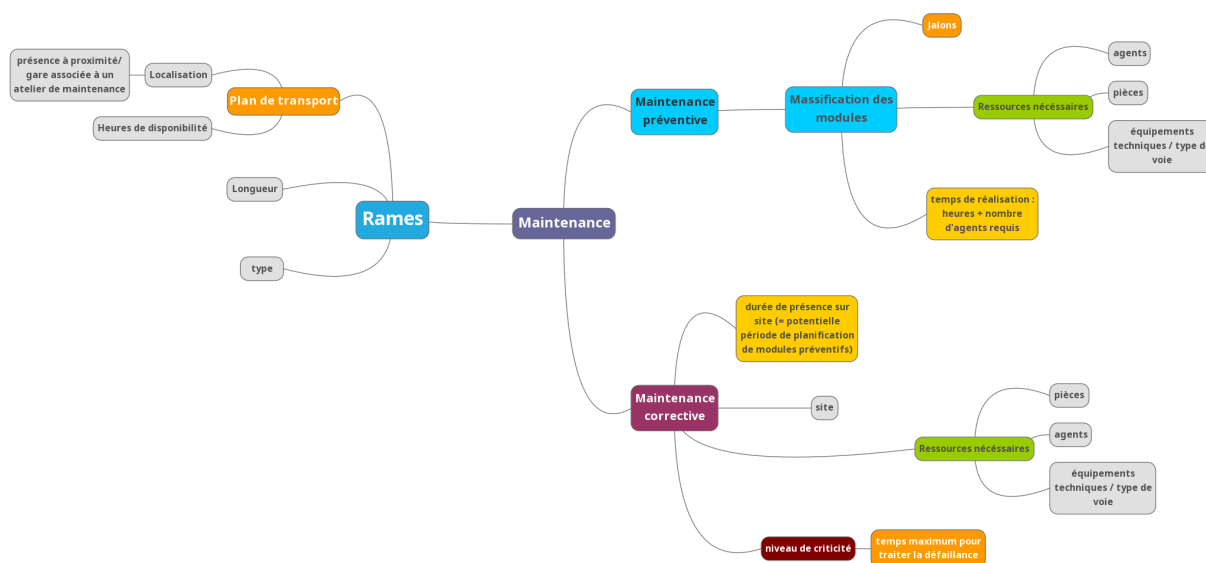


Figure 4.3 – Schéma d'organisation de la maintenance

- Travailler avec un nombre limité de rames. Dans un premier temps, le modèle va travailler avec un nombre réduit de rames en se limitant à un seul modèle : les rames de type TER2NNG (dans la version Z24500) qui comptent 13 machines. Cette restriction permet ainsi de réduire la taille des données nécessaires au fonctionnement de l'algorithme.
- Fixer la butée de maintenance. La SNCF a souhaité travailler avec une butée de maintenance fixée à 85% de leur jauge. La planification de la maintenance ne devra se faire qu'à partir de cette valeur.

5 Données

Lors de l'exécution, le programme nécessite des données en entrée. Ensuite, à la fin du déroulement de l'algorithme, des données de résultat seront proposées en sortie à l'utilisateur.

Données d'entrée

- le plan de transport (planning de roulement des rames)
- la classification des opérations correctives
- la liste des signalements correctifs
- la liste des modules préventifs par type de rame
- la matrice de compatibilité entre les modules
- les données d'accessibilité des sites de maintenance
- la liste des rames
- la liste des voies de maintenance et de leurs infrastructures
- l'état des stocks de pièces
- le planning des équipes et agents à disposition

Parmi ces données, certaines seront définies comme constantes tandis que les autres seront bien à spécifier en paramètre au lancement du programme.

Données de sortie

A la fin de l'exécution, des données de résultat seront générées :

- une proposition de planification
- éventuellement un fichier annexe, listant les problèmes d'ordonnancement rencontrés (impossibilité de respecter une contrainte, erreurs, etc)

6 Objectif

L'objectif de ce problème d'ordonnancement est double. Il s'agit d'une part de minimiser le retard des opérations correctives par rapport au délai qui leur est imposé. Il est également en jeu de minimiser l'avance de la réalisation des modules préventif. Cela permet ainsi d'atteindre le seuil de 85% de la butée de maintenance (jalon) et de tendre le plus près possible des 100%. Cela permet d'exploiter au maximum les ressources en retardant l'échéance.

Ces deux objectifs peuvent être combinés en cherchant à minimiser la somme du retard de la planification corrective et l'avance de la planification préventive.

5

Bilan et Conclusion

1 Bilan du semestre 9

A la fin de cette première phase du Projet de Recherche et de Développement, voici où en est l'évolution du projet :

Travail réalisé

A la fin du semestre, la compréhension des besoins du client a été effectuée (même si l'expérience a montré que ces besoins sont parfois amenés à évoluer) ainsi que l'étude de la littérature. Ensuite l'analyse du problème a pu être réalisée et nous amener à la rédaction du cahier de spécifications.

Au cours de ce semestre, certains travaux avaient été faits sur la précédente version du problème. Un cahier des charges que j'avais l'attention de soumettre pour vérifier notre compréhension du sujet avait été rédigé (disponible en annexe **D**). Certains travaux ont pu être réemployés et adaptés à la nouvelle problématique comme l'état de l'art, évitant ainsi de perdre trop de temps. Lorsque la problématique a évolué (à partir de la réunion du 5 novembre), j'ai choisi de ne pas refaire de cahier des charges sur la nouvelle version car le temps commençait à devenir précieux. Il était préférable de passer directement à la phase d'analyse et de rédaction du cahier de spécification.

Travail en cours

Actuellement, une première version de modélisation mathématique est en cours de production à partir de travaux réalisés par Valentine Jourdan dans le cadre de sa thèse. L'enjeu est de repartir de ses travaux de modélisation sur la maintenance corrective pour pouvoir l'adapter à la prise en charge de planification préventive.

Le cahier de spécification est également en attente de validation.

Bilan personnel

Sur le plan personnel, j'ai trouvé cette première approche très enrichissante. J'avais à cœur de choisir un sujet partant de zéro pour bien passer par l'étape de compréhension du problème auprès du client, plutôt que de reprendre un précédent PRD. Pour ce point, le sujet de la SNCF correspondait tout à fait à mes attentes.

Malheureusement, la situation sanitaire et le reconfinement ne m'ont pas permis de m'imprégner du contexte autant que j'aurais voulu car je n'ai pas pu observer concrètement en quoi consiste le domaine de la planification au sein du technicentre en allant visiter le site de Nantes. Les réunions en visio nous ont cependant permis de faire au mieux.

Le petit point négatif que je soulignerais sur le lancement du PRD serait la difficulté de mise en place du projet. En effet la réunion qui s'est avérée être la plus importante, pour affiner le besoin du client final, n'a pu être planifiée qu'au début du mois de novembre en fonction des disponibilités de chacun. Ce retard a nécessité de revenir sur le travail effectué auparavant et de prendre en compte tout cela dans la planification des tâches.

Malgré tout, cette première partie du Projet de Recherche et Développement s'est avérée très formatrice.

2 Objectifs pour le semestre 10

Pour la seconde partie de ce PRD, les enjeux sont tout d'abord de finir et faire valider la modélisation mathématique du problème pour ensuite passer sur le développement de l'algorithme d'ordonnancement.

Annexes

A

Cahier de Spécification

1 Spécifications fonctionnelles

1.1 Définition de la fonction 1 : Chargement des fichiers

Cette fonction fait partie du module d'importation et de pré-traitement des données (voir la figure page 7). Elle prend en entrée les fichiers de données utilisés par la SNCF (liste des données, page 18) , puis réalise les appels aux fonctions de pré-traitement selon le type de fichier.

Description de la fonction :

Entrée : Fichiers

Sortie : Aucune

Préconditions : Format des noms de fichiers à respecter selon la convention SNCF

Postconditions : Appels des fonctions spécifiques à chaque type de fichier

1.2 Définition des fonctions de pré-traitement des données

Cette fonction regroupe un ensemble de sous-fonctions qui s'intègrent dans le module d'importation et de pré-traitement des données (voir la figure page 7). Chacune de ces fonctions est spécifique à un type de fichier de données. Ces fonctions réalisent l'analyse syntaxique des fichiers pour en extraire les données importantes pour l'algorithme de résolution.

Description de la fonction :

Entrée : Fichier

Sortie : Données formatées

Préconditions : Fichier correspondant à la fonction

Postconditions : Aucune

1.3 Définition de la fonction 3 : Solveur

Cette fonction permet de déterminer une solution d'ordonnancement satisfaisant les contraintes à partir des données formatées par le module de pré-traitement.

Description de la fonction :

Entrée : Données

Sortie : Données de la solution

Préconditions : Données respectant le formatage du solveur

Postconditions : Données satisfaisant les contraintes

1.4 Définition de la fonction 4 : Post-traitement des données

Cette fonction fait partie du module de création du fichier de sortie (voir la figure page 7). A partir des données brutes proposées par le solveur, une planification est réalisée de manière à proposer une bonne visualisation des résultats pour l'utilisateur. De cette manière les résultats sont plus facile à interpréter que les données initialement proposées par le solveur.

Description de la fonction :

Entrée : Données de la solution provenant du solveur

Sortie : Données formatée

Préconditions : Aucune

Postconditions : Aucune

1.5 Définition de la fonction 5 : Création du planning

Cette fonction fait partie du module de création du fichier de sortie (voir la figure page 7). A partir des données formatées issues de la fonction de post-traitement, la fonction va mettre en forme ces données dans un fichier en sortie.

Description de la fonction :

Entrée : Données formatées

Sortie : Planning (fichier)

Préconditions : Les données respectent le formatage requis pour l'écriture du fichier

Postconditions : Le fichier est édité dans un format standard (Excel, fichier txt, etc)

2 Spécifications non fonctionnelles

2.1 Performance : un temps de traitement raisonnable

L'un des enjeux à travers ce projet est d'optimiser un travail effectué en partie par différentes personnes au sein de la SNCF. Le temps de traitement nécessaire à l'obtention d'une solution optimale doit donc être inférieur au temps que pourrait mettre un employé pour le même problème.

2.2 Formatage des données

Le résultat proposé en sortie doit être exploitable pour pouvoir servir de solution d'aide à la planification. Ainsi, la mise en page du résultat doit permettre de bien comprendre l'ordonnancement proposé par l'algorithme.

2.3 Capacités du système

Le système peut être amené à traiter les données d'un nombre important de rames devant satisfaire plusieurs contraintes. Malgré cela, le système doit être en capacité de fournir une solution d'ordonnancement.

2.4 Maintenabilité et intégrabilité

Le projet consiste dans un premier temps à produire un proof of concept mais ensuite, il doit être possible de le faire évoluer et de l'intégrer au sein du système d'information de la SNCF.

B

Planification, gestion de projet

1 Méthodologie

Pour mener à bien ce projet, une méthodologie itérative a été mise en place. Cela a permis de bien comprendre au mieux la problématique d'ordonnancement et ses contraintes au fil des échanges avec le client. Lorsque des documents ont été transmis à la SNCF, ils ont d'abord été vérifiés avec les encadrants lors d'échanges de mails ou de réunions en visio.

Au cours de la première phase du projet, deux réunions ont été organisées au pôle ingénierie du matériel roulant puis avec le technicentre de Nantes en visio. Il était prévu de se rendre à Nantes pour rencontrer les responsables de la planification et mesurer les différentes contraintes mais cela n'a pas été possible à cause de la situation sanitaire. Les compte-rendus des réunions sont disponibles en annexe [C](#).

2 Outils utilisés

Au cours de ce Projet de Recherche et Développement, différents outils de gestion de projet ont été mis en place.

2.1 Planification à court terme : Trello

Pour la gestion des tâches sur un horizon court et avoir une idée du travail planifié à l'échelle de la semaine voire de la journée, un Trello a été mis en place. A mon sens, il permet une vision plus fine de la progression des tâches qu'un diagramme de Gantt.

Les cartes y sont classées selon différentes catégories :

- Terminé
- En Cours
- A faire
- A faire aujourd'hui
- Réunions
- Deadlines

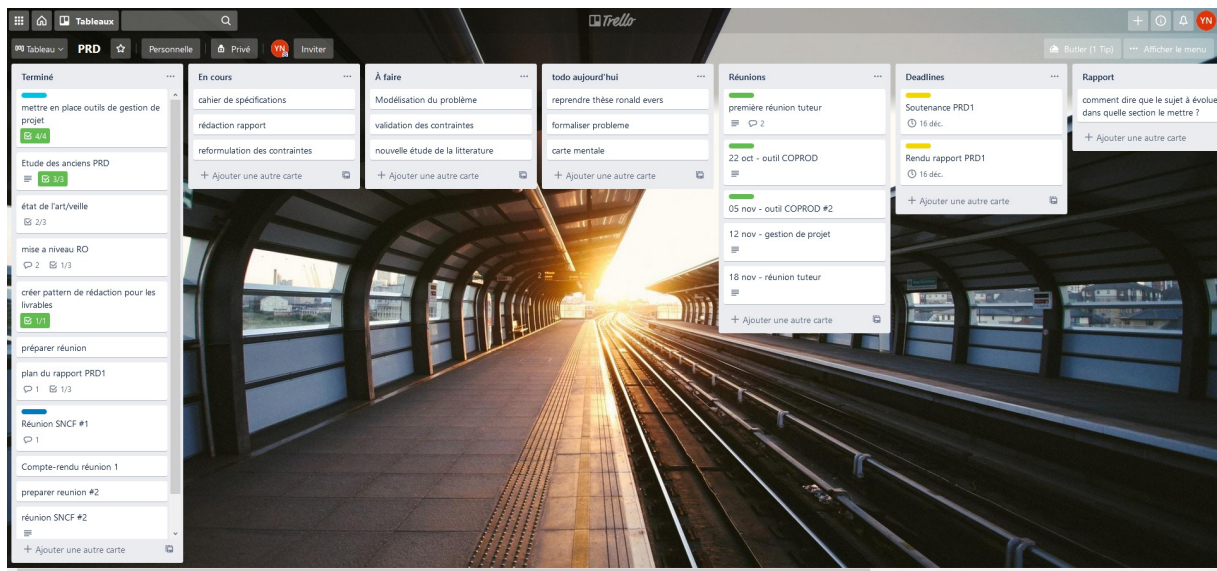


Figure B.1 – Trello - PRD 1

2.2 Planification à long terme : Gantt

Pour la planification à long terme, j'ai utilisé un diagramme de Gantt, mis en place avec l'outil GanttProject. Il m'a permis de visualiser l'ensemble des tâches à l'échelle du projet. Il permet également d'appliquer des relations de précédence entre les tâches.

Le diagramme a été mis à jour au long du semestre pour ajuster au mieux le planning prévisionnel.

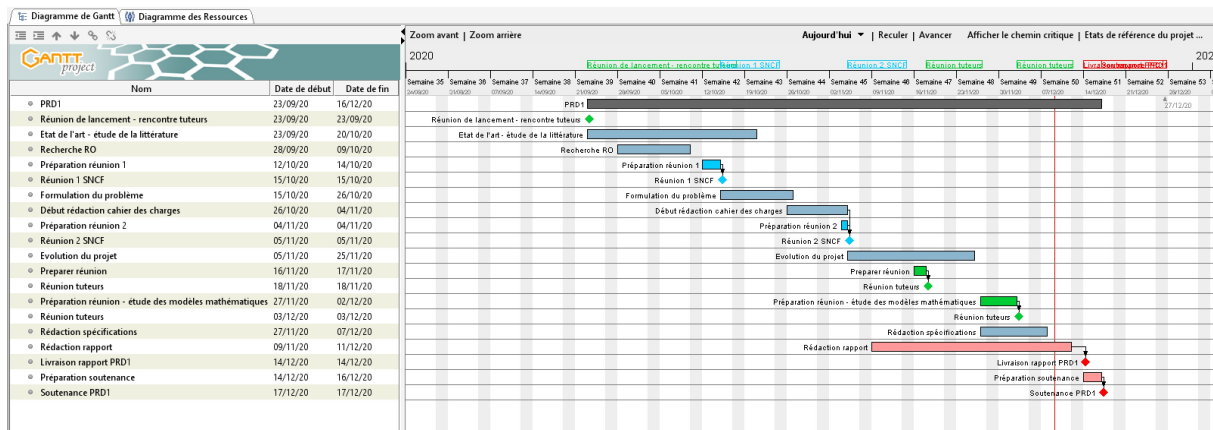


Figure B.2 – Diagramme de Gantt - PRD 1

2.3 Stockage cloud

Afin de ne pas risquer de perdre le travail effectué durant ces recherches ainsi que les différents documents produits, une sauvegarde automatique de tous les fichiers a été mise en place. Tous les documents enregistrés en local, sont copiés une seconde fois dans un répertoire Google Drive. En cas de problème informatique, le travail ne serait pas perdu.

2.4 Gestion des versions

Lors de la phase de développement, un outil sera mis en place pour la gestion des différentes versions du code. Cela permettra de gagner en efficacité lors du développement et accordera également une bonne maintenabilité du projet et un suivi de son évolution.

2.5 Travail effectué lors des séances

SEMAINE 1	Date		Contenu
	mercredi 23/09/2020		Première réunion avec Ronan Bocquillon. Présentation du sujet + contexte. Réception et étude des anciens PRD en relation avec le sujet. Mise en place d'outils de gestion de projet : Trello, Gant, drive
	Date		Contenu
SEMAINE 2	jeudi 24/09/2020		Etude des anciens PRD. Recherche de littérature sur les sujets d'ordonnancement/ planification de la maintenance de rames.
			Etude de la thèse de Ronald Evers : Algorithms for Scheduling of Train Maintenance
	Date		Contenu
	mercredi 30/09/2020		Remise à niveau en recherche opérationnelle + apprentissage de la programmation par contrainte. Recherche de littérature.
SEMAINE 3			
	Date		Contenu
	jeudi 01/10/2020		Première approche sur les solveurs de programmation par contrainte. Recherche d'autres algorithmes de RO spécifiques à l'ordonnancement
SEMAINE 4	Date		Contenu
	mercredi 07/10/2020		Première ébauche d'un plan de rapport. Début de rédaction de la partie "Etat de l'art"
	Date		Contenu
	jeudi 08/10/2020		recherches sur les problèmes temporels : STP, TCSP pouvant être en lien avec le sujet. Préparation de la réunion (réunion repoussée au 15/10).
SEMAINE 5			
	Date		Contenu
	mercredi 14/10/2020		Réunion de présentation des attentes PRD1. recherche de littérature
	Date		Contenu
SEMAINE 6	jeudi 15/10/2020		Kick-off meeting SNCF avec Romuald Detru. Debriefing et rédaction du compte-rendu de la réunion. Conférence obligatoire l'après midi
	Date		Contenu
	mercredi 21/10/2020		Analyse : formulation des contraintes. Temps de rédaction rapport PRD. Recherches sur la problématique de technicentre en fin de ligne : ordonnancement LIFO... rien trouvé d'intéressant
SEMAINE 6			
	Date		Contenu
	jeudi 22/10/2020		rédaction initiale du cahier des charges à soumettre a la sncf pour formaliser la demande.
	Date		Contenu
SEMAINE 6	mercredi 04/11/2020		Suite de rédaction du cahier des charges. installation de Latex pour le rapport. Préparation de la seconde réunion.
	Date		Contenu
	jeudi 05/11/2020		Réunion avec Nantes (Tony Bourlier) -> nouvel définition du problème. Rédaction d'un compte rendu de la réunion envoyé aux clients + questions pour s'assurer d'avoir compris le

		problème
SEMAINE 7	Date	Contenu
	jeudi 12/11/2020	Nouvelles recherches de littérature vis-à-vis du nouveau problème. Réunion de gestion de projet avec Marine Hoguet.
		Forum stage l'après midi (4 entretiens)
SEMAINE 8	Date	Contenu
	mercredi 18/11/2020	Réunion avec les tuteurs pour présenter ce qui a été fait jusqu'à présent voir ce qu'on envisage de faire pour la suite. Elaboration d'un document de formulation du nouveau problème + liste de questions transmis à la SNCF.
SEMAINE 9	Date	Contenu
	jeudi 19/11/2020	Rédaction du rapport + Forum stage l'après-midi (3 entretiens)
SEMAINE 10	Date	Contenu
	mercredi 25/11/2020	Rédaction de la partie état de l'art du rapport
SEMAINE 11	Date	Contenu
	jeudi 26/11/2020	Travail sur les nouvelles contraintes, Conférence obligatoire : Sopra banking (réalisation d'un chatbot, machine learning) + entretien stage + rédaction
SEMAINE 12	Date	Contenu
	mercredi 02/12/2020	travail sur les modèles mathématique PPC et PLNE de Valentine Jourdan -> compréhension + préparation de la réunion du lendemain pour en discuter
SEM. 12	Date	Contenu
	jeudi 03/12/2020	réunion avec les tuteurs + rédaction du rapport
SEM. 12	Date	Contenu
	mercredi 09/12/2020	journée consacrée à la rédaction du rapport
SEM. 12	Date	Contenu
	jeudi 10/12/2020	journée consacrée à la rédaction du rapport + conférence obligatoire : solution cognitives aux assurances
		Rendu du rapport et soutenance PRD 1

C

Comptes rendus de réunion

Voici les comptes rendus rédigés à l'issue des réunions. A chaque fois, une copie est envoyée aux participants pour mesurer notre compréhension du problème. Le premier document concerne la réunion de présentation du projet (kickoff meeting), le second concerne la réunion de mise au point du sujet avec le technicentre de Nantes.

Réunion du 15/10/20 :

- Romuald Detruie *SET2 SNCF*
- Ronan Bocquillon
- Yohan Nouet
- Valentine Jourdan (visio)

Cette première réunion a permis de définir le contexte dans lequel s'inscrit le PRD :

Le COPROD réalise la planification et l'organisation des interventions de maintenance **préventive** et **corrective** sur site (technicentre de Nantes) à la journée (répartie en plage horaire matin/soirée/nuit). Aujourd'hui, cette planification est faite à la main et surtout à l'expérience. Elle se base sur différents outils :

- Les demandes de maintenance **préventive** – Excel – planification des arrivées/départ des rames au technicentre à l'échelle de la semaine (rames Intercités)
- Les demandes de maintenance **préventive** – Excel – planification des arrivées/départ des rames au technicentre à l'échelle de la semaine (rames Pays de la Loire)
- Les demandes quotidiennes de maintenance **corrective** transmises par le GOF (Gestion Opérationnelle de Flotte, planification à large échelle)
- Les ressources humaines à disposition aujourd'hui - planning DPx (tient compte des congés, permet de connaître chaque jour les effectifs : nombre d'électriciens, de mécaniciens, etc. Egalement la présence de compétences rares)
- Connaissance du site (nombre de voies et leur capacité, types de voies, stock de pièces de rechange à disposition).

Avec ces données, le COPROD est capable de fournir un planning de la journée. On y retrouve par voie d'atelier (7 voies) et par période journalière les affectations : numéro des engins, opérations à réaliser, métiers impactés et leur temps d'occupation.

Objectif : Fournir une solution d'aide à la planification journalière pour le COPROD du technicentre de Nantes

Contraintes :

Il faut essayer de respecter les dates de livraisons des rames (respect du plan de transport). En découle la problématique suivante : Comment modéliser la gestion des aléas ? Nous avons évoqué la modélisation d'un monde parfait sans aléas dans un premier temps.

Atelier en cul de sac : comment gérer l'affectation des travaux sur les voies (parfois plusieurs rames disposées à la suite sur une même voie) afin de réduire les déplacements de rames qui sont relativement contraignants (protocole de sécurité relativement long).

Certainement un écart entre la théorie et ce qui est fait en pratique lors de la planification (taches réalisées sur voies de garage par exemple dont la fonction initiale est différente), c'est cela qu'il est important de bien comprendre.

Prochaine réunion :

Planification d'une prochaine réunion avec l'équipe COPROD de Nantes à minima en visio ou sur place pour bien comprendre la problématique et échanger avec eux sur les différents points clés.

Réunion du 05/11/20 :

- Romuald Détrue, SET SNCF, SPDC
- Tony Bourlier, responsable amélioration continue, digital, Nantes
- Vincent T'Kindt
- Ronan Bocquillon
- Yohan Nouet

Deuxième réunion en visio qui permet de faire évoluer le contexte du PRD.

La maintenance de la région des pays de la Loire est effectuée principalement sur le site Nantes Botreau :

- 7 voies de maintenance
- 8 équipes en 3*8 matin/soirée/nuit constituées d'un chef d'équipe (DPX) + 15 agents de métiers différents
- Equipe mouvement qui s'occupe de déplacer les rames sur le site
- 140 engins (ter + Intercités)

Egalement quelques sites déportés pour la maintenance et le nettoyage des rames :

- Etoile ferroviaire du Mans : site et garage

Demande : Un outil pouvant aider la partie coordination de production (COPROD) afin d'optimiser les choix d'opérations de maintenance préventive sur les différents sites de la région afin de diminuer la contrainte de l'exploitant.

La maintenance préventive est découpée en modules (jusqu'à 200 modules pour un type de rame) qui ont des jalons à respecter (butées de maintenance en kilomètres ou temps de fonctionnement). Les modules sont très difficiles à planifier à l'avance.

Pour optimiser la planification préventive : **massification** des modules (plusieurs modules vont être fait en même temps en fonction des ressources disponibles, quitte à ce que certains modules soient réalisés en avance par rapport aux jalons).

Contrainte de respect du plan de transport :

- Prise en charge au technicentre lorsque l'exploitant n'en a pas besoin (2 périodes de demande : pic du matin/pic du soir)
- Planification lors d'un arrêt prolongé (exemple : un train est stationné 3h au Mans et les ressources nécessaires sont disponibles => opportunité pour effectuer les modules préventifs dont les butées approchent)
- Accueil d'une rame pour de la maintenance corrective au sein du technicentre : planification de modules préventifs.
- Croisements possible mais reste une contrainte forte (à minimiser pour ne pas trop impacter l'exploitant). Le nombre de croisements est à minimiser.

Contraintes importantes pour le préventif :

- Prise en compte des ressources humaines avec certaines compétences/habilitations
- Prise en compte des ressources matérielles (stocks), les nomenclatures listent les pièces devant être changées pour chaque module. Les stocks de l'établissement sont connus en temps réels.
- Le mouvement au sein du technicentre n'est pas une contrainte.

Thèse de Valentine : le préventif est connu puisque planifié longtemps à l'avance => planification du correctif en exploitant le préventif pour amener les rames au plus tôt dans les technicentres.

Aujourd'hui la gestion des rames arrivant pour le correctif semble OK. Le fait de planifier à long terme le préventif s'avère être une contrainte : il faut adapter les roulements commerciaux en fonction de cette planification. L'objectif est de retirer cette contrainte imposée par la maintenance et d'optimiser au mieux les sites de maintenance préventive.

Passer d'une planification à long terme vers une planification à plus court terme.

L'objectif du projet évolue mais ce qui a été fait jusqu'à présent n'est pas perdu pour autant. Le PRD doit permettre de défricher le travail avec une première approche en vue d'une éventuelle thèse.

Questions :

- A partir de quand estime-t-on qu'un module a besoin d'être réalisé ? A quelle marge du jalon ?
- Quel horizon de planification ? semaine ? 15 jours ?
- Dans quels cas se sert-on de l'outil ? A quelle fréquence ? Gestion des aléas ?

D

Cahier des charges

Ce document a été rédigé initialement à partir des anciens besoins exprimés par le client qui ont évolué par la suite. Il permet de témoigner le travail qui a été fait à partir de cette première compréhension du problème mais n'est plus en vigueur aujourd'hui.

Projet de Recherche et Développement

Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF

Cahier des charges

Version 1

mardi 17 novembre 2020

Yohan Nouet

Encadrants : Ronan Bocquillon - Vincent T'Kindt

Historique des modifications

Version	Date	Auteur	Description de la modification
1	22/10/20	Yohan Nouet	Création de la version initiale

Table des matières

Cahier des charges.....	1
1. Introduction.....	4
a. Intervenants	4
b. Contexte de la réalisation.....	4
c. Objectif	5
2. Expression du besoin.....	6
3. Contraintes	6
a. Plan de transport.....	6
b. Disposition de l'atelier.....	6
c. Affectation des voies	6
d. Changement de voie.....	7
e. Ressources humaines	7
f. Ressources matérielles et consommables	7
g. Taches de maintenance préventive	7
h. Taches de maintenance corrective.....	7
i. Données en entrée	8
j. Données en sortie	8
k. Durée de planification	8

1. Introduction

Ce document constitue les charges du Projet de Recherche et Développement *Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF*, réalisé dans le cadre de la dernière année d'école d'ingénieur informatique à Polytech Tours.

Il présente dans un premier temps les différents aspects du projet : les parties prenantes, le cadre de la réalisation et ses objectifs. Par la suite, il détaille les contraintes amenées par l'expression du besoin.

L'objectif principal de ce document est de formaliser la demande afin d'assurer la bonne compréhension de la problématique.

a. Intervenants

Ce PRD est encadré par Ronan Bocquillon et Vincent T'Kindt, tous les deux enseignants à Polytech Tours et chercheurs au sein de l'équipe ROOT.

Ce projet est réalisé en collaboration avec le pôle de l'Ingénierie du Matériel de la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) de Saint-Pierre-des-Corps, à l'initiative de la demande. Il est représenté par Romuald Détroue, SET 2 l'Ingénierie du Matériel de la SNCF.

Ce projet met également en relation le technicentre SNCF de Nantes, représenté par XXX, pour lequel le projet est destiné.

Enfin, ce projet est réalisé par Yohan Nouet, étudiant en cinquième année d'école ingénieur informatique à Polytech Tours.

b. Contexte de la réalisation

Le technicentre SNCF Pays de la Loire, situé à Nantes réalise des opérations de maintenances du matériel roulant circulant sur le réseau de l'ouest. Il s'occupe principalement de la maintenance des rames STF Intercités et STF Pays de la Loire. Les opérations de maintenance sont séparées en 2 catégories :

- **Maintenance préventive** : opérations de maintenance programmées à l'avance à effectuer avant d'atteindre une limite d'utilisation imposée en kilomètres ou heures d'utilisation.
- **Maintenance corrective** : opérations visant à résoudre un problème, un comportement anormal apparu sur une rame (panne, accident, etc). Les différents incidents pouvant être subis par les rames sont classés par la SNCF.

Au sein du technicentre, un employé est en charge de la planification : Le COPROD. Cette personne réalise la planification et l'organisation des interventions de maintenance préventive et corrective à la journée répartie en 3 plages horaires : matin, soirée et nuit.

Aujourd'hui, cette planification est faite à la main et surtout grâce à l'expérience acquise au fil du temps. Elle se base sur différents outils :

- Les demandes de maintenance **préventive** pour les rames **Intercités** formulées sous la forme d'un tableau Excel. Elles indiquent notamment la période de temps durant laquelle l'engin sera disponible sur le site. Les opérations préventives étant prévues à l'avance, le fichier comporte les demandes de prise en charge sur 7 jours.
- Les demandes de maintenance **préventive**, similaire au fichier décrit ci-dessus mais pour les rames **Pays de la Loire**.
- Les demandes quotidiennes de maintenance **corrective** transmises par la Gestion Opérationnelle de Flotte (GOF), en charge de la planification à plus large échelle.
- Les ressources humaines à disposition chaque jour.
- La connaissance du site (nombre de voies et leur capacité, types de voies, stock de pièces de rechange à disposition).

Avec ces données, le COPROD fournit un planning de la journée. On y retrouve par voie d'atelier et par période journalière les affectations : numéro des engins, opérations à réaliser, métiers impactés et leur temps d'occupation.

c. Objectif

L'objectif du projet est de proposer une solution d'aide à la planification journalière pour le COPROD du technicentre de la région Pays de la Loire. Cela consiste en la conception d'un algorithme qui permette de trouver une solution pour ordonnancer les opérations de maintenance préventive et corrective en respectant les contraintes du plan de transport et des ressources à disposition.

2. Expression du besoin

Réaliser l'ordonnancement des opérations de maintenance préventive et corrective sur une durée de 24 heures au sein du technicentre SNCF de Nantes.

3. Contraintes

a. Plan de transport

Pour les opérations de maintenance préventive et corrective, il est important de respecter le plan de transport prévu pour la rame. Pour chaque rame, cela consiste en une date d'arrivée A au technicentre et une date de retour R. Ces dates sont connues à l'avance pour la maintenance préventive (planning semaine) ou le jour même pour la maintenance corrective.

Une opération de maintenance doit être planifiée dans cette plage horaire (A-R) :

- L'opération ne peut pas débuter avant que la rame ne soit disponible, A => date de début au plus tôt,
- L'opération doit être terminée avant la fin de mise à disposition de la rame, D => date de fin au plus tard.

b. Disposition de l'atelier

La disposition du technicentre de Nantes amène une nouvelle contrainte. En effet le site est disposé en cul-de-sac, par opposition à un atelier traversant, ce qui nécessite une gestion particulière pour manœuvrer les rames. Un seul sens d'accès aux ateliers, on ne peut rentrer dans les ateliers que depuis un seul côté. Deuxième spécificité : mode premier arrivé dernier sorti (LIFO). Cela implique de bien choisir l'ordre dans lequel on fait rentrer les rames sur les voies pour éviter d'avoir à déplacer une rame pour en libérer une autre (opération relativement longue). Contrainte des jeux de taquins.

c. Affectation des voies

Le technicentre de Nantes comporte différents types de voies équipées d'infrastructures différentes (voies surélevées pour accéder à la partie basse du train, pont, quais classique, voies de garage, à vérifier). Chacune de ces voies peuvent en général accueillir plusieurs rames positionnées les unes à la suite des autres selon leur capacité d'accueil établie selon les critères de longueur de la voie et/ou nombre d'outils à disposition (ex : 2 treuils par voie ce qui limite le nombre de rames simultanées à 2 je suppose).

d. Changement de voie

Au cours d'une opération de maintenance, une rame peut être amenée à être déplacée sur différents sites du technicentre en fonction des besoins en terme d'infrastructures. Chaque changement de voie est chronophage puisque très encadré pour réduire les risques. Lorsque des ouvriers travaillent sur une rame, la voie n'est plus électrifiée. Le processus de déplacement d'une rame consiste donc à ré-électrifier la voie (dé-sécurisation), déplacer la rame, désactiver à nouveau l'électrification.

e. Ressources humaines

Chaque jour les effectifs présents peuvent différer (congrés, absences, etc.). Ces données sont fournies par le fichier DPx. Les effectifs sont répartis dans diverses spécialités : électricité, mécanique, spécialistes portes, etc. A priori pour chaque opération il n'y a pas besoin de toute une équipe d'électriciens, 2 agents sur telle opération, 3 sur une autre... Si tel est le cas il va falloir quantifier le nombre de personnes nécessaires pour effectuer chaque opération, pour être en mesure de respecter cette contrainte.

f. Ressources matérielles et consommables

Chaque opération de maintenance peut nécessiter un nombre de pièces de rechanges (filtres, pièces mécaniques...) dont les ressources peuvent-être limitées. Nous pouvons supposer que pour les opérations préventives les pièces nécessaires sont disponibles étant donné que ce sont des opérations prévues à l'avance (tous les x km). En revanche pour les dépannages correctifs il est possible que certaines pièces ne soient pas en stock au moment voulu.

g. Taches de maintenance préventive

Comme une voiture, une rame est tenue d'effectuer des opérations préventives programmées à l'avance avant d'atteindre une limite d'utilisation imposée en km ou heures de fonctionnement. Ces opérations sont prévues à l'avance et se doivent d'être respectées.

h. Taches de maintenance corrective

Une rame qui tombe en panne, est accidentée, ou plus généralement subit un incident est envoyée en maintenance corrective. Les différents incidents pouvant être subis par les rames sont classés par la SNCF. Chaque type d'incident donne lieu à différentes interventions de maintenances pouvant nécessiter la coordination de plusieurs corps de métier.

i. Données en entrée

Les données qui vont permettre de générer la solution sont :

- Le planning sur 7 jours des opérations de maintenance préventive des rames Intercités
- Le planning sur 7 jours des opérations de maintenance préventive des rames Pays de la Loire
- Le planning sur 1 jour des opérations de maintenance corrective des rames
- Les plannings des agents des différentes équipes
- Les classifications des opérations de maintenance corrective
- Les stocks de pièces détachées/ consommables
- Les infrastructures du technicentre (types de voies, équipements)

j. Données en sortie

La solution générée par le programme sera constituée d'un tableau Excel présentant l'ordonnancement des opérations de maintenances de la journée à travers l'affectation des rames, infrastructures et ressources disponibles.

k. Durée de planification

La planification doit être réalisée sur un horizon d'une journée constituée des trois périodes : matin, après-midi et nuit.

E

Webographie

- [WWW1] Wikipedia CONTRIBUTORS. *Optimisation linéaire*. 2020. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimisation_lin%C3%A9aire.
- [WWW2] Wikipedia CONTRIBUTORS. *Programmation par contraintes*. 2020. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation_par_contraintes.
- [WWW3] Christine SOLMON. *Cours de PPC*. 2003. URL : <https://perso.liris.cnrs.fr/christine.solnon/Site-PPC/e-miage-ppc-som.htm>.

- [1] Maël BERVET. « Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF : » Projet Recherche & Développement. Tours, France : Ecole Polytechnique de l'Université François Rabelais de Tours, 2019-2020.
- [2] Ronald EVERS. « Algorithms for Scheduling of Train Maintenance ». Thèse de doct. 2011. URL : <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f488ea95-f560-46f3-869e-66c6e095103c>.
- [3] Tomas LIDÉN. « Railway Infrastructure Maintenance - A Survey of Planning Problems and Conducted Research ». In : *Transportation Research Procedia* 10 (2015). 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands, p. 574-583. ISSN : 2352-1465. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.011>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146515001982>.
- [4] Benjamin POUVREAU. « Ordonnancement des opérations de maintenance corrective des trains au sein de la SNCF ». Projet Recherche & Développement. Tours, France : Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, 2018-2019.
- [5] François RAMOND. « Planification optimisée des opérations dans les établissements de maintenance du matériel roulant de la SNCF ». 2008EMSE0014. Thèse de doct. 2008, 1 vol. (177 p.) URL : <http://www.theses.fr/2008EMSE0014>.
- [6] Hui SHANG. « Maintenance modelling, simulation and performance assessment for railway asset management ». 2015TROY0022. Thèse de doct. 2015. URL : <http://www.theses.fr/2015TROY0022/document>.

Planification de la maintenance au sein d'un technicentre de la SNCF

Résumé

Ce projet de Recherche et Développement se consacre à la réflexion et la conception d'un outil d'aide à la décision pour la SNCF. Son objectif est d'optimiser l'ordonnancement des opérations de maintenance préventive et corrective effectuées au sein du technicentre de la région des Pays de la Loire.

Mots-clés

Recherche et Développement, Conception, Ordonnancement, Planification, Maintenance, Préventif, Correctif, Rame, Train, SNCF

Abstract

This Research and Development project is dedicated to the reflection and development of a decision support tool for SNCF. Its objective is to optimize the scheduling of preventive and corrective maintenance operations carried out within the technicenter of the Pays de la Loire region.

Keywords

Research and Development, Scheduling, Planning, Maintenance, Preventive, Corrective, Rame, Train, SNCF

Entreprise

SNCF - Pôle Ingénierie du Matériel de Saint Pierre des Corps



Tuteurs entreprise

Romuald DETRUE

Tony BOURLIER

Étudiant

Yohan NOUET (DI5)

Tuteurs académiques

Ronan BOCQUILLON

Vincent T'KINDT