

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITÉ : Construction et aménagement

OPTION : Aménagement et environnement

par

Jalal GOUNNA

**Modernisation des infrastructures ferroviaires en zone dense :
renouvellement des voies ballast du tronçon central de la ligne A du
Réseau Express Régional, un défi logistique.**

Soutenu le 02 juin 2016

JURY

PRESIDENT :	M. Olivier FOUCHÉ	CNAM
MEMBRES :	M. Jean-Sébastien VILLEFORT	CNAM
	M. Alain PHILIPPE	CNAM
	M. Yanis KEROUANI	RATP
	M. Stéphane BEAL	RATP
	M. Bruno MAHEUT	SNCF

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

En premier lieu, je remercie M. FOUCHÉ, maître de conférences au Cnam et responsable national du diplôme préparé. En tant que directeur de mémoire, il m'a guidé dans l'approche de mon travail et m'a aidé à trouver les orientations dans mes réflexions. Il a également contribué à renforcer mes connaissances sur la méthodologie de réalisation d'une recherche bibliographique.

Je remercie M. KEROUANI, responsable de l'entité Équipement Ferroviaire dont je dépends au sein du département ING. En qualité de référent pour la rédaction de mon mémoire, il a contribué à façonner mon mémoire. Sa relecture avisée et les nombreux conseils dispensés ont permis la concrétisation de ce projet. Le hasard des parcours professionnels a fait qu'il était déjà mon responsable lorsque j'ai initié les démarches de reprise d'études en 2011. Cinq années plus tard, il est à la conclusion de ce long parcours au sein d'un département différent.

Je remercie M. BEAL, responsable du groupe travaux et adjoint au responsable d'entité. Au-delà des relectures et des précieux conseils distillés, il m'a permis, en réorganisant notre équipe et en reprenant ma charge de travail à son compte, de pouvoir me consacrer pleinement à la rédaction de cette étude.

Je remercie l'équipe du bureau d'étude de notre entité notamment MM. BREARD, BARRANDON, METALIER, LEVY et Mme ALVES pour leur patience et le temps qu'ils m'ont accordé pour me renseigner.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mes parents qui ont toujours cru en moi et en mon potentiel. Une des valeurs transmises est la persévérance. Je citerai une maxime de mon père : *« c'est dans l'adversité que se trouve l'aisance »*.

Enfin, je remercie énormément mon épouse et mon fils pour leur soutien au quotidien. Ils sont pour moi une source de motivation inépuisable sans laquelle je n'aurais pu arriver au terme de ce long périple que représente le cursus d'ingénieur Cnam.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ADV : appareil de voie
- AVP : phase d'étude d'avant-projet
- BML : bourreuse mécanique lourde
- BS : branchement simple
- CDV : circuit de voie
- CDP : conduite de projet ou chef de projet
- CIN : cintrage intérieur
- CEX : cintrage extérieur
- CMP : Compagnie du chemin de fer métropolitain de Paris, créée en 1900 et ancêtre de la RATP
- DDI : dossier de décision d'investissement
- DOE : dossier des ouvrages exécutés
- DOI : dossier d'opportunité d'investissement
- EPIC : entreprise public à caractère industriel et commercial
- EXE : phase d'étude d'exécution
- GAME : globalement au moins équivalent
- GDI : département du gestionnaire d'infrastructures
- HB : *hardness* Brinell (dureté Brinell)
- HSCT : hygiène et sécurité des conditions de travail
- HV : *hardness* Vickers (dureté Vickers)
- IAURIF : institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France, créé en 1976 à partir de l'IAURP, IAU de la région parisienne fondé en 1960.
- ING : département de l'ingénierie de la RATP
- INRETS : institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (1985-2010)
- JIC : joint isolant collé
- LGV : ligne à grande vitesse
- LHT: *low alloyed heat treated* (traité thermiquement faiblement allié)
- LRS : long rail soudé
- LTV : limitation temporaire de vitesse
- MHH: *maximum head hardness* (rail à dureté maximale)

MOA : maîtrise d'ouvrage ou maître d'ouvrage
MOE : maîtrise d'œuvre ou maître d'œuvre
NIT : niveau inférieur sous traverse
PADOG : plan d'aménagement et d'organisation générale de la région parisienne
PAQD : plan d'assurance qualité définitif
PCC : poste de contrôle et de commandement
PGF : plan de gestion des fournitures
PRA : patin réducteur d'attrition
PRO : phase d'études de projet
PST : parc des services techniques
RATP : régie autonome des transports parisiens
RER : réseau express régional
RFN : réseau ferré national
RPC : règlement particulier de consultation
RTES : règlement temporaire d'exploitation et de sécurité
RVB : renouvellement de voie ballast
SACEM : système d'aide à la conduite et à la maintenance
SDAU : schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme
SDLA : schéma directeur de la ligne A (du RER francilien)
SNCF : société nationale des chemins de fer français
STIF : syndicat des transports d'Île-de-France
TER : transport express régional
TO : traversée oblique
UIC : union internationale des chemins de fer
WAD : wagon auto stockeur déchargeur

GLOSSAIRE

Aiguillage : appareil de voie.

Appareil de voie : dispositif permettant le changement d'itinéraire d'un train.

Barbacane : réservation dans le radier permettant de collecter les eaux de ruissellement et de les évacuer de la plateforme.

Bogie : chariot situé sous un véhicule ferroviaire sur lequel sont fixés les essieux.

Caténaire : ensemble de câbles porteurs et de fils de contact destinés à l'alimentation des trains. Le captage du courant s'effectue par le pantographe.

Clothoïde : courbe dont la courbure est proportionnelle à l'abscisse curviligne.

Crapaudine : dispositif, installé au-dessus d'un orifice d'évacuation, empêchant la chute de ballast.

Danse : défaut de nivellement causé par un tassement localisé.

Devers : surélévation d'une file de rail par rapport à l'autre pour compenser les effets de la force centrifuge.

Flambement : phénomène d'instabilité d'une structure, qui soumise à des efforts de compression, se déforme perpendiculairement à l'axe de compression.

Fret : activité de transport ferroviaire de marchandise.

Gauche : différence de devers

Head check : défaut de fatigue se caractérisant par une fissuration de la surface des rails. Il se forme en général sur la surface de roulement du rail extérieur de la courbe (file haute) suite au patinage et aux efforts longitudinaux.

Plastirail : gaine en matériau polymère, qui noyée dans le béton de la traverse, permet de recevoir le tirefond.

Rippabilité : capacité d'un sol ou d'un matériau à être creusé.

Sabotage : usinage d'une surface permettant d'accueillir une selle.

Shelling : défaut de fatigue se caractérisant par une fissuration du champignon du rail.

Scorie : Écume remontant à la surface d'un matériau en fusion considérée comme un déchet.

Squat : défaut de surface se caractérisant par des taches sombres en alignement ou en courbe de grand rayon. Sous ces taches, la fissuration peut être profonde

Thiollier : garniture métallique destinée au vissage des boulons-tirefonds

Tonnage : charge transmise par les trains à la voie

Travelage : répartition longitudinale des traverses

Usure ondulatoire : phénomène d'usure périodique qui apparaît principalement sur la table de roulement des rails sous forme d'une alternance de zones brillantes et mates.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
LISTE DES ABRÉVIATIONS	5
GLOSSAIRE	7
TABLE DES MATIÈRES	9
INTRODUCTION	15
I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	19
I.1 LA VOIE FERRÉE ET SES CONSTITUANTS	19
I.1.1 La voie ferrée	19
<i>I.1.1.1 Généralités</i>	<i>19</i>
<i>I.1.1.2 Structures</i>	<i>20</i>
I.1.2 Constituants de la voie	22
<i>I.1.2.1 Le rail</i>	<i>22</i>
<i>I.1.2.2 Les traverses</i>	<i>33</i>
<i>I.1.2.3 Assemblage rail-rail</i>	<i>48</i>
<i>I.1.2.4 Le ballast</i>	<i>64</i>
<i>I.1.2.5 Les appareils de voie</i>	<i>69</i>
I.2 CONCEPTION ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE LA VOIE	75
I.2.1 Le tracé de voie en plan	76
<i>I.2.1.1 Le dévers</i>	<i>77</i>
<i>I.2.1.2 Introduction des courbes de raccordement</i>	<i>79</i>
<i>I.2.1.3 Les courbes de transition</i>	<i>80</i>
I.2.2 Le tracé de voie en profil	81
I.3 DÉGRADATION ET MAINTENANCE	83
I.3.1 Généralités	83
I.3.2 Dégradation des rails	83
I.3.3 Maintenance des rails	85
I.3.4 Dégradation des systèmes d'attaches	87
I.3.5 Maintenance des attaches	88
I.3.6 Dégradation de la géométrie de la voie	88
I.3.7 Maintenance de la géométrie de la voie	89
<i>I.3.7.1 Bourrage manuel</i>	<i>89</i>

1.3.7.2	<i>Bourrage mécanique lourd</i>	89
1.3.7.3	<i>Stabilisation dynamique des voies</i>	91
I.4	MÉTHODES DE RENOUVELLEMENT LOURD DE VOIE	93
I.4.1	Dégarnisseuse transversale	93
I.4.2	Dégarnisseuse longitudinale	94
I.4.3	Train PUSCAL	95
I.4.4	Train aspirateur à ballast	97
I.4.5	Engins de travaux publics et wagons spéciaux	98
I.4.6	Engins de travaux publics et wagons courants	98
I.4.7	Synthèse des méthodologies de renouvellement	99
II.	CONCEPTION DU PROJET	101
II.1	LA LIGNE A DU RÉSEAU EXPRESS RÉGIONAL	101
II.1.1	Genèse du RER A	101
II.1.2	Vers le tronçon central du RER	108
II.1.3	Évolution du trafic	109
II.2	PRÉSENTATION DU GROUPE RATP	111
II.2.1	En France	111
II.2.2	À l'international	112
II.2.3	Les ambitions de l'EPIC	112
II.2.3.1	<i>Moderniser</i>	112
II.2.3.2	<i>Développer</i>	113
II.2.4	Le groupe en quelques chiffres	113
II.2.5	L'ingénierie à la RATP	114
II.3	CONTEXTE ET ENJEUX DU PROJET	117
II.3.1	Localisation du projet	117
II.3.2	Enjeux et objectifs du projet	119
II.3.3	Montage financier	121
II.3.3.1	<i>Généralités</i>	121
II.3.3.2	<i>Jalonnement du projet</i>	121
II.4	CARACTÉRISATION TECHNIQUE DU PROJET	124
II.4.1	État des lieux	124
II.4.1.1	<i>Types de pose de rail dans le tronçon central</i>	124
II.4.1.2	<i>Ouvrages et assainissement</i>	126
II.4.2	Diagnostics et reconnaissances	128
II.4.3	Incertitudes et risques	129
II.4.4	Scénarios	130

II.4.5	Modes d'exécution envisageables.....	133
II.4.6	Définition du périmètre	134
II.5	ÉTUDES DÉTAILLÉES	135
II.5.1	Équipement de la voie.....	135
II.5.1.1	<i>Choix des constituants de la voie</i>	<i>135</i>
II.5.1.2	<i>Choix de la technologie des appareils de voies.....</i>	<i>142</i>
II.5.2	Caractérisation des volumes de ballast	145
II.5.2.1	<i>Approche par l'exploitation du référentiel.....</i>	<i>145</i>
II.5.2.2	<i>Approche géophysique par la méthode géoradar</i>	<i>147</i>
II.5.2.3	<i>Sondages.....</i>	<i>149</i>
II.5.2.4	<i>Synthèse.....</i>	<i>149</i>
II.5.3	Tracé de voie.....	150
II.5.3.1	<i>Tracé en plan.....</i>	<i>150</i>
II.5.3.2	<i>Tracé en profil.....</i>	<i>151</i>
III.	RÉALISATION DU CHANTIER	153
III.1	PRÉAMBULE.....	153
III.2	ORGANISATION DU CHANTIER	154
III.2.1	Au sein de la RATP	154
III.2.2	La maîtrise d'œuvre.....	154
III.2.3	La maîtrise d'ouvrage.....	156
III.2.4	La conduite de projet.....	157
III.2.5	Organisation du titulaire du marché.....	157
III.3	PLANIFICATION GÉNÉRALE DU CHANTIER 2015	159
III.3.1	Période de préparation	159
III.3.1.1	<i>Pilotage du marché travaux</i>	<i>159</i>
III.3.1.2	<i>Le plan de gestion des fournitures</i>	<i>159</i>
III.3.1.3	<i>Le Plan d'Assurance Qualité Définitif.....</i>	<i>160</i>
III.3.1.4	<i>Dossier d'homologation des matériels ferroviaires</i>	<i>161</i>
III.3.1.5	<i>Méthodologies particulières d'exécution</i>	<i>164</i>
III.3.2	Travaux préparatoires.....	166
III.3.2.1	<i>Sondages et reconnaissance géophysique</i>	<i>168</i>
III.3.2.2	<i>Essai de manœuvres de trains</i>	<i>168</i>
III.3.2.3	<i>Relevés topographiques.....</i>	<i>169</i>
III.3.2.4	<i>Déchargement des LRS</i>	<i>170</i>
III.3.2.5	<i>Installation des réseaux divers</i>	<i>171</i>
III.3.3	Travaux de renouvellement des voies en interruption.....	172

III.3.3.1	<i>Mise en sécurité du chantier</i>	173
III.3.3.2	<i>Ordonnancement des tâches du lot voie</i>	177
III.3.3.3	<i>Cadence d'avancement du chantier</i>	196
III.4	BILAN DU CHANTIER DU RVB 2015	197
IV.	RETOUR D'EXPÉRIENCE	198
IV.1	ASPECT TRAVAUX : ANALYSE DES MÉTHODOLOGIES TRAVAUX ET DES MOYENS MOBILISÉS	198
IV.1.1	Tronçonnage et dépose de panneaux	198
IV.1.2	Dégarnissage	198
IV.1.3	Nettoyage du radier et remise en conformité du système de drainage	200
IV.1.4	Pose de tapis antivibratile	200
IV.1.5	Mise en œuvre de la sous-couche	200
IV.1.6	Pose de traverses au palonnier et bouclage	201
IV.1.7	Relevages et bourrage mécanique de la voie	201
IV.1.8	Réalisation des soudures électriques	201
IV.1.9	Réseaux divers	202
IV.1.9.1	<i>Éclairage du chantier</i>	202
IV.1.9.2	<i>Arrosage du chantier</i>	202
IV.1.10	Analyse de la pertinence des études au regard du linéaire réalisé	203
IV.1.10.1	<i>Estimation des volumes de ballast lors du terrassement</i>	203
IV.1.10.2	<i>Vérification du dimensionnement</i>	205
IV.2	ASPECTS ORGANISATIONNELS	208
IV.2.1	Analyse de l'organisation du titulaire	208
IV.2.1.1	<i>Gestion du poste de sécurité et de commandement</i>	208
IV.2.1.2	<i>Encadrement opérationnel</i>	209
IV.2.2	Analyse de l'organisation de la MOE prévue et réajustée durant le chantier 209	
IV.3	SÉCURITÉ ET PROTECTION DE LA SANTÉ	210
IV.4	PROPOSITION D'AXES D'AMÉLIORATION	210
IV.4.1	Logistique	211
IV.4.2	Travaux	212
IV.4.3	Organisation	213
IV.4.3.1	<i>Communication de chantier</i>	213
IV.4.3.2	<i>Sécurité de chantier</i>	213
IV.4.3.3	<i>Organisation projetée pour les équipes ING/GDI/Titulaire</i>	214

CONCLUSION	216
BIBLIOGRAPHIE.....	218
TABLE DES ANNEXES	223
LISTE DES FIGURES	251
LISTE DES TABLEAUX	255
RESUME	256
SUMMARY	257

INTRODUCTION

La ligne A du RER (Réseau Express Régional), un axe névralgique du réseau francilien, assure la mobilité de millions de voyageurs chaque jour. Ses caractéristiques d'exploitation en font la ligne la plus chargée d'Europe. Au-delà d'un moyen de transport collectif dense, il est un facteur de développement économique et un vecteur social. À ce titre, le RER A se doit d'offrir une qualité de service de haut niveau dont la performance, en termes de régularité de trafic et de confort offert aux voyageurs à travers un réseau fiable et moderne, doit rester à la hauteur des enjeux politiques, démographiques et d'aménagement de la région Île-de-France.

Le réseau express régional illustre bien cette vérité générale que l'aménagement du territoire est intimement lié aux décisions politiques. L'idée d'un réseau rapide traversant Paris remonte à 1880. L'État souhaitait alors construire un réseau à grand gabarit assurant la liaison entre les grandes lignes dont les gares de terminus étaient situées à la périphérie de Paris. Malgré l'intérêt régional de l'opération, les débats conflictuels n'aboutirent pas à une solution partagée et le projet s'en trouva durablement affecté. Sa construction fut finalement décidée en 1960 pour un lancement des travaux en 1961. Roland NUNGESSER, alors président du conseil d'administration du District¹ de la région Paris, prononça ces mots qui, malgré les années passées, s'avèrent toujours d'actualité : « il faut enfin que le transport précède l'habitant et non l'inverse comme cela a été le cas jusqu'ici. ». Pourtant, dès le début des années 80, soit environ 10 ans après la mise en service du premier tronçon le 21 février 1970, la ligne montra des signes de saturation. Le trafic prévisionnel avait été sous-évalué au regard du développement économique et démographique de la région. Le RER A devait transporter chaque matin les voyageurs depuis les zones d'habitation à l'est vers les bassins d'emploi à l'ouest, et retour le soir. Cette migration pendulaire² fut rapidement aggravée par la densification démographique qui se poursuit d'ailleurs aujourd'hui.

¹ Le District, créé le 2 août 1961, est l'ancêtre de la région Île-de-France dont le rôle principal est d'étudier les questions d'aménagement et d'équipement de la région afin de remédier aux déséquilibres entre Paris et sa périphérie.

² Ce terme désigne l'ensemble des déplacements quotidiens domicile / travail et inversement.

Après quarante années d'exploitation au cours desquelles les infrastructures ont été fortement sollicitées, le tronçon central doit être modernisé pour s'adapter au déploiement des trains à deux étages dont la généralisation est prévue pour la fin d'année 2017. Il s'agit d'une opération phare pour la RATP qui se lance dans un projet aussi indispensable qu'audacieux : le renouvellement des voies ballast du tronçon central du RER A.

Comment transformer une infrastructure vieille de 40 ans en une infrastructure moderne à la pointe de la technologie avec un impact le plus réduit possible sur la mobilité des franciliens ?

Il s'agit là d'un projet d'ingénierie complet dont toutes les phases sont sous la responsabilité de la RATP et plus particulièrement du département de l'Ingénierie (ING) dont je fais partie.

Un chantier de renouvellement de voie ballast n'a pourtant rien d'innovant sur des lignes ferroviaires classiques au regard des 1000 kilomètres de voie rénovés sur le réseau ferré national pour la seule année 2015. En revanche, le renouvellement complet de l'infrastructure des voies du tronçon central du RER A représente un véritable défi en termes de logistique à mettre en place en conditions d'exploitation à haute densité de trafic et en environnement souterrain. Il exige des études rigoureuses à la hauteur de la complexité du chantier tandis que l'impact des travaux doit être le plus réduit possible pour les voyageurs.

Ma position privilégiée de responsable de la maîtrise d'œuvre voie sur ce projet de renouvellement m'a permis de suivre l'ensemble des étapes du projet et d'en tirer le maximum d'enseignements à mettre en application dans le cadre des prochaines phases de travaux. La période de rédaction du mémoire se prêtait particulièrement bien à cet exercice puisqu'elle était à cheval entre l'analyse du chantier 2015 et le lancement des études du chantier 2016. C'est en m'appuyant sur un modèle statique/dynamique que j'ai construit ce mémoire d'ingénieur. Dans un premier temps, un état de l'art est présenté puis une analyse technique et organisationnelle du chantier est développée, pour enfin mettre en perspective les mesures ayant donné satisfaction et celles à améliorer ou à revoir afin de répondre aux défis des prochaines années.

Les quatre grands chapitres du mémoire sont les suivants :

1. une recherche bibliographique sur la voie ferrée, la construction du RER A et les méthodologies de renouvellement lourd de voie ;

2. la conception du projet et la définition du périmètre des travaux ;
3. la réalisation du premier été de travaux ;
4. un retour d'expérience orienté vers la recherche d'axes d'amélioration.

Dans le chapitre 1, le contexte de l'étude sera présenté. Après avoir décrit la voie ferrée, ses constituants, les règles de conception, les mécanismes de dégradation et la maintenance, on fera l'historique de la construction du RER A qui permet de comprendre la diversité des sections de tunnel et de poses de voie. Enfin, un état de l'art sera réalisé concernant les méthodes de renouvellement lourd de voie et leur transposition dans le cadre d'un chantier en tunnel tel que celui de la ligne A.

Dans le chapitre 2 sera dressé un panorama des études d'avant-projet qui ont permis de bâtir le scénario de réalisation des travaux, d'envisager les modes d'exécution possibles et de faire le choix des constituants à mettre en œuvre.

Dans le chapitre 3, la réalisation du premier été de travaux sera abordée de façon détaillée. L'ensemble des tâches travaux seront décrites au regard de l'organisation, des rendements attendus et de l'ordonnancement des tâches entre elles.

Enfin, dans le chapitre 4, une analyse des paramètres dimensionnants du chantier sera développée. Des axes d'amélioration seront proposés, dont l'application immédiate devra permettre d'améliorer la performance de la réalisation du deuxième été de chantier.

On aura à cœur, tout au long de ce mémoire, de faire découvrir au lecteur une discipline technique méconnue du « grand public » et de lui faire percevoir le défi tant technique que logistique.

I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le philosophe empiriste CONDILLAC (1714-1780) disait : « *Que je veuille connaître une machine, je la découperai pour en étudier séparément chaque partie. Quand j'aurai de chacune une idée exacte et que je pourrai les remettre dans le même ordre où elles étaient, alors je concevrai parfaitement cette machine, parce que je l'aurai décomposée et recomposée* ». Cette citation illustre la démarche de mon étude bibliographique. Ce chapitre présente les éléments techniques indispensables à la compréhension de ce mémoire.

I.1 LA VOIE FERRÉE ET SES CONSTITUANTS

I.1.1 La voie ferrée

I.1.1.1 Généralités

La voie, au sens le plus large du terme, est tout le système qui permet la circulation des trains, en dehors des caténaires. Elle comprend donc : la plateforme, les équipements qui permettent d'asseoir la voie, la voie ferrée proprement dite, enfin les installations qui permettent de garantir la sécurité et l'efficacité de la circulation. La voie ferrée (Figure 1) est l'ensemble des matériaux assemblés pour constituer un chemin de roulement qui supportera et guidera les charges roulantes. Elle répartira également ces lourdes charges sur la plateforme de manière à conserver la stabilité nécessaire au roulement des trains et au confort des voyageurs.

La voie se compose essentiellement de deux files de métal parallèles, généralement de l'acier, composées de rails de longueur variable maintenus en place par des pièces en bois dur ou en béton appelées traverses. Cet ensemble repose sur une assise (constituée de béton ou de matériaux granulaires) reposant elle-même sur un terrain préparé à le recevoir appelé plateforme.



Figure 1. La voie ferrée et ses constituants

De façon schématique, la voie ferrée qui sera dorénavant la voie est constituée par :

- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - les rails ; - les fixations des rails ; - les traverses ; - les assemblages rails à rails ; - le ballast ; - la plateforme. | } | <p>Châssis de la voie
ou armement</p> |
|--|---|---|

La voie n'est pas seulement composée d'éléments pouvant être considérés individuellement. Elle fait partie intégrante du système matériel roulant / rail.

La voie a pour fonction de :

- porter le train et diriger les efforts vers la plateforme par l'intermédiaire du châssis et de la couche de ballast ;
- guider latéralement les trains pour qu'ils ne dérailent pas ;
- absorber les sollicitations (horizontales et verticales) des trains ;
- garantir aux passagers un niveau de confort acceptable ;
- être disponible pour l'exploitation.

1.1.1.2 Structures

Le matériel roulant transmet sa charge à la voie par l'intermédiaire de ses roues. La voie reprend donc les efforts verticaux (poids) et horizontaux (force centrifuge, accélération, freinage) transmis par le train. Elle est également soumise à des efforts longitudinaux

généralisés par la dilatation ou la rétraction des rails soumis à des variations de température. On reviendra plus en détail sur ces efforts qui sont fonction de la température car ils constituent une discipline à part entière de la technologie voie appelée théorie des longs rails soudés.

La Figure 2 présente la structure type de la voie. Cette structure ne se limite pas à l'armement et au ballast, elle intègre également l'infrastructure composée d'une couche d'assise, d'une couche de forme et de la plateforme ferroviaire. Cette structure se rencontre exclusivement en voie aérienne où la voie est « posée » sur le terrain naturel (déblais ou remblais). En tunnel, cas de notre étude, l'infrastructure se limite à l'ouvrage de génie civil sur lequel vient reposer le ballast et l'armement de la voie.

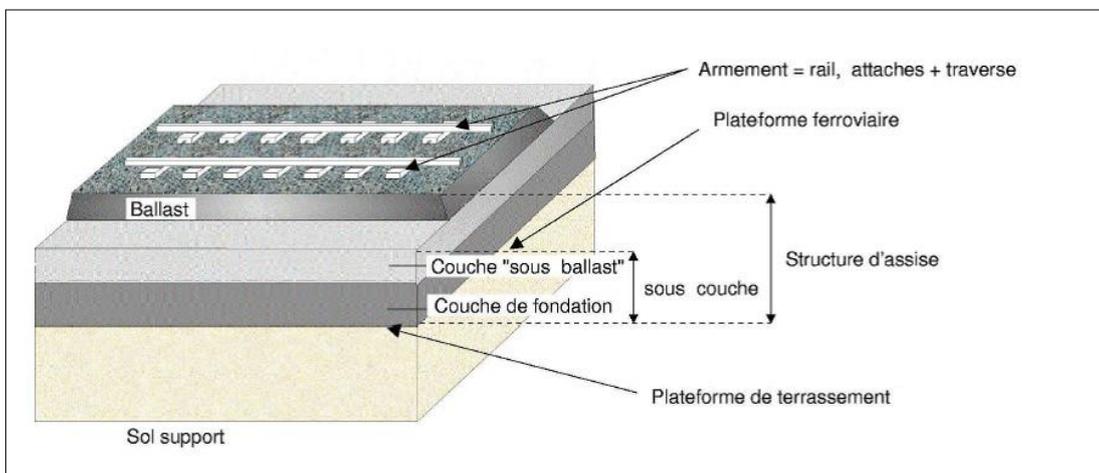


Figure 2. Représentation de la structure de la voie sur ballast

La Figure 3 présente les trois types de structures courantes sur les lignes ferroviaires existantes. Sur les projets de ligne à grande vitesse, des structures avec des couches d'assises en matériaux bitumineux voient le jour. Cette couche plus souple permet une meilleure absorption des sollicitations dues à la circulation. L'étude portant sur la modernisation d'un réseau existant, il n'y a pas lieu de s'attarder sur cette évolution.

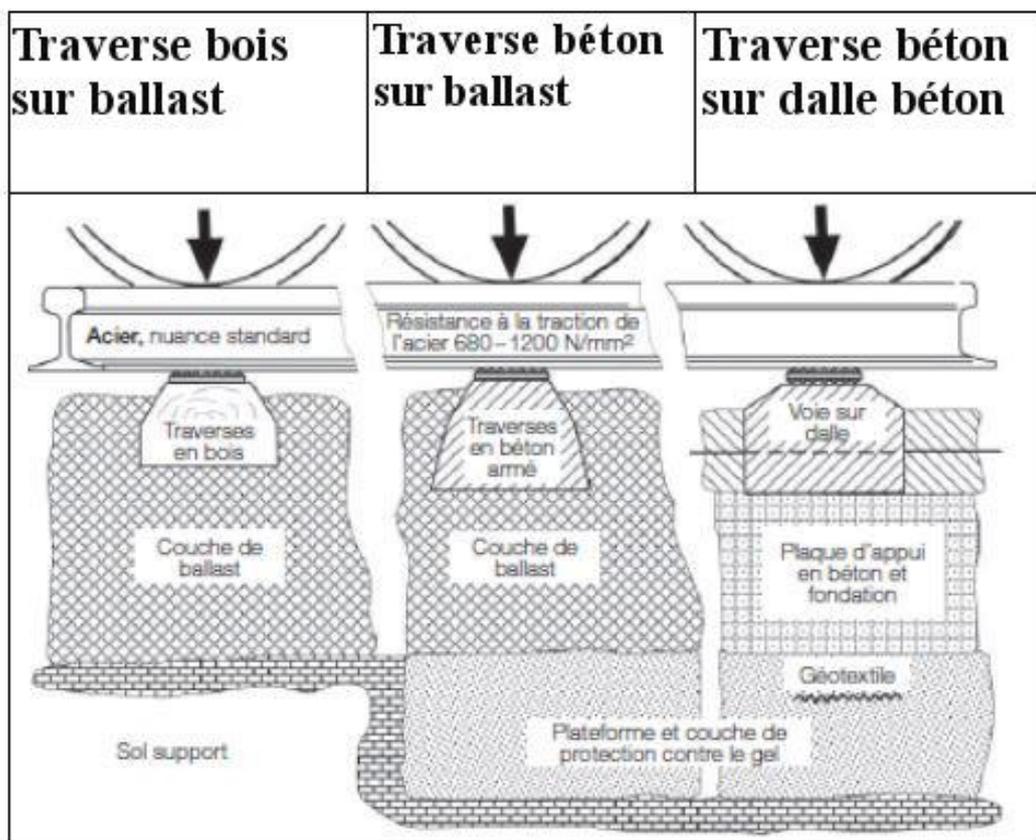


Figure 3. Structures des principaux types de voie [LIC 2009]

La qualité de chaque constituant et l'optimisation de ses caractéristiques permettent de réaliser une voie dont la durée de vie sera allongée et dont les coûts de maintenance seront diminués à long terme [ZWA 2007].

Avant d'analyser la performance globale de la voie ferrée, chaque constituant sera détaillé afin de comprendre le rôle qu'il joue dans le système voie ferrée.

I.1.2 Constituants de la voie

I.1.2.1 Le rail

I.1.2.1.1 Généralités

Le rail constitue un chemin de roulement et de guidage dimensionné pour supporter les charges et les efforts générés par la circulation des trains. Il sert aussi de conducteur électrique pour le retour du courant vers les postes de redressement, et de support au courant de signalisation.

Le circuit du « retour traction » (Figure 4) est composé :

- du positif qui est à un potentiel de 1 500 volts sur le réseau RATP ou 25 000 volts sur le réseau SNCF. Il part du poste de redressement, circule dans le fil caténaire et est capté par le pantographe pour alimenter les moteurs du train ;
- du négatif qui est à un potentiel de 0 à 50 volts. Il quitte le train par les roues via le contact entre le rail et la roue et circule dans les rails pour retourner au poste de redressement via les câblages de retour traction.

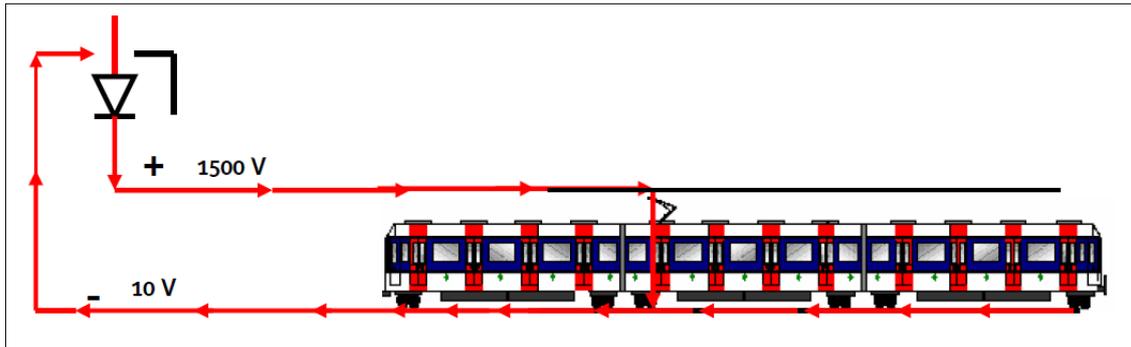


Figure 4. Principe d'alimentation électrique d'un train

Le courant de signalisation participe à la détection des trains et permet d'assurer la sécurité ferroviaire en garantissant l'espacement entre les trains. Le principe est simple (Figure 5) : la voie est divisée en portions appelées cantons à la SNCF et qui seront ici nommées circuits de voie (CDV). Sur le réseau RER de la RATP, la longueur de ces portions varie de 1000 mètres entre deux gares à 200 mètres aux abords d'une gare³.

Quand la voie est libre de toute circulation, la continuité du courant de signalisation est assurée dans le rail et le signal délivré par l'émetteur parvient au récepteur. Le feu ou signal d'entrée du CDV est alors vert.

Quand la voie est occupée par une circulation, les essieux du convoi créent un court-circuit en shuntant la voie. Le signal de l'émetteur ne parvient plus au récepteur déclenchant en conséquence un feu rouge à l'entrée du CDV.

³ Sur le réseau ferré national, les cantons sont beaucoup plus longs, ils varient de 1500 mètres à plusieurs kilomètres.

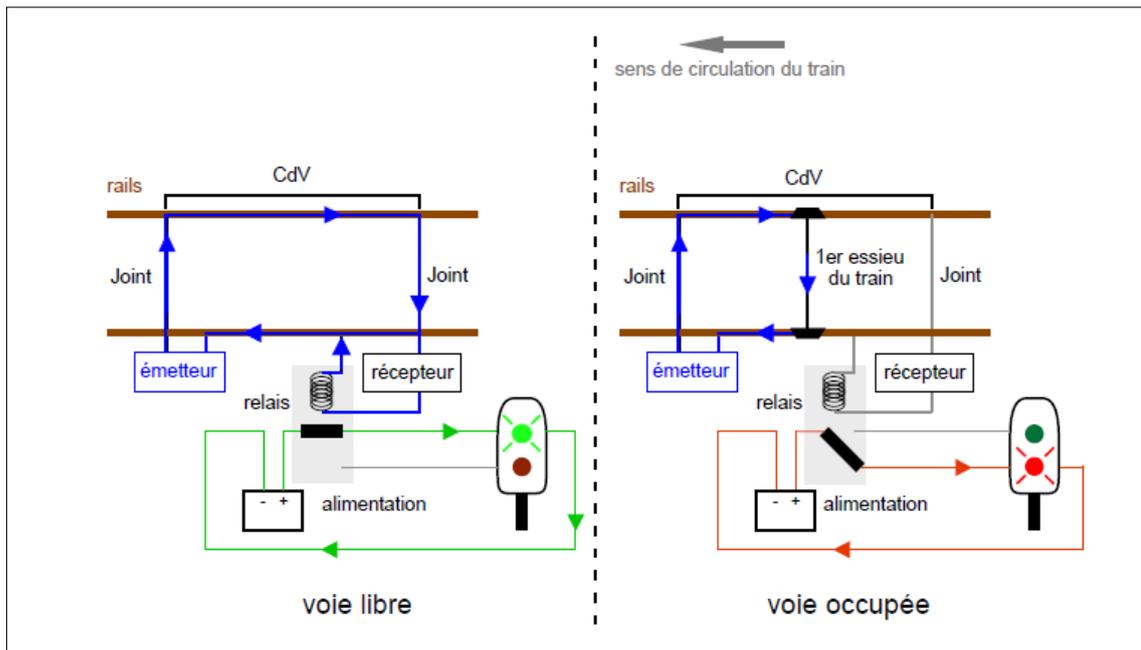


Figure 5. Principe de fonctionnement d'un circuit de voie [DEB 2007]

Le rail est un profilé métallique issu du laminage en fonderie. Il a subi au cours du temps une évolution visant à optimiser sa performance et son coût de fabrication et à faciliter sa mise en œuvre.

La première version du rail actuel était le rail à double champignon (Figure 6) qui a disparu de la majorité des lignes principales [GRE 1911]. En effet, sa géométrie symétrique ne permettait pas une fixation directe sur la traverse. L'utilisation d'un support ou coussinet était indispensable.

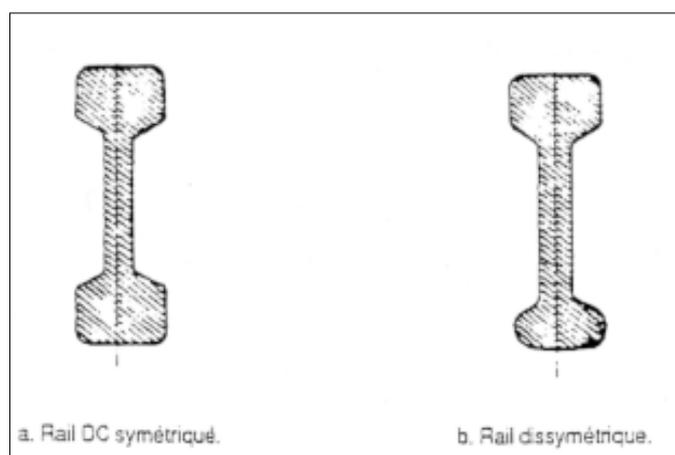


Figure 6. Rail à double champignon et rail dissymétrique

Un profil de rail mieux adapté aux besoins a donc été recherché puis développé : le profil Vignoles⁴ (Figure 7).

Il se distingue par sa partie supérieure renflée appelée champignon qui supporte la roue et la guide. Sa surface se nomme le chemin ou table de roulement.

- La partie inférieure large et plate s'appelle le patin qui s'appuie et se fixe sur la traverse. Sa surface inférieure se nomme surface d'appui.
- La partie intermédiaire qui relie le champignon et le patin s'appelle l'âme.
- L'âme est raccordée au champignon et au patin par l'intermédiaire de parties arrondies appelées congés de raccordement.

Les portées d'éclissage (cf. Figure 7), parties inclinées du dessous du champignon et du dessus du patin, ont pour fonction de recevoir les pièces d'assemblage des rails appelées éclisses.

Les rails utilisés sont encore d'une grande diversité à travers le monde (Tableau 1). Elle s'explique par des cultures ferroviaires développées nationalement (France, Grande Bretagne, Allemagne, Russie, États-Unis, etc.) et par des compromis performance / coût en fonction du mode d'exploitation de la ligne (fret, voyageurs, grande vitesse, fréquence, nature des trains, etc.).

Ils sont généralement posés inclinés par rapport au plan de roulement : pente au $1/20^\circ$ en France, $1/40^\circ$ en Allemagne et $1/30^\circ$ en Europe du Nord [ALL 1984].

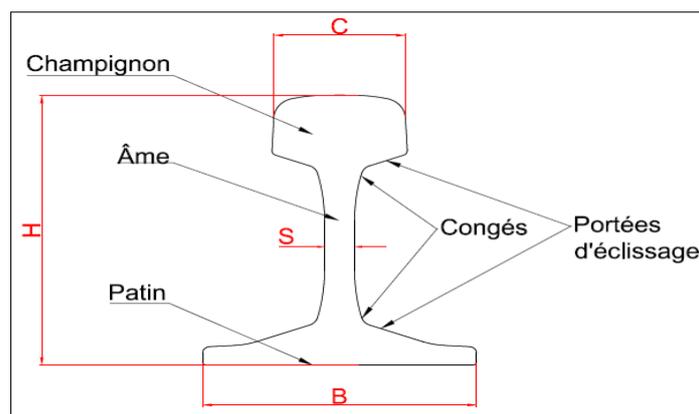


Figure 7. Coupe d'un rail Vignoles

⁴ Du nom de l'ingénieur anglais Sir Charles VIGNOLES (1793-1875) qui a introduit en Angleterre ce type de rail inventé par l'américain Robert L. STEVENS (1787-1856).

Tableau 1. Paramètres de différents profils de rails

Désignation	Hauteur de rail H en mm	Largeur de patin B en mm	Largeur de champignon C en mm	Âme S en mm	Poids linéique G Kg/m
Profils allemands					
SMR29	115	90	55	12	29,8
S30	108	108	60,3	12,3	30
S33	134	105	58	11	33,5
S41, 10R	138	125	67	12	41,4
S41, 14R	138	125	67	12	41
49E1 (S49)	149	125	70	14	49,4
54E3 (S54)	154	125	70	16	54,5
Profils UIC					
50E6 (UIC 50)	153	140	65	15,5	50,9
54E2 (UIC 54E)	161	125	69,5	16	53,8
54E1 (UIC 54)	159	140	72,2	16	54,4
60E1 (UIC 60)	172	150	72	16,5	60,3
Profils américains					
CB122	172,2	152,4	74,7	16,5	60,8
ASCE132	181	152,4	76,2	16,7	65,5
ASCE133	179,4	152,4	76,2	17,5	66,2
ASCE136	185,7	152,4	74,6	17,5	67,6
Profils anglais					
BS60R	114,3	109,5	57,2	11,1	29,8
BS90R	142,9	136,5	66,7	13,9	44,6
BS90A	142,9	127	68,75	13,9	45

L'augmentation constante des charges à l'essieu supportées par les rails et la nécessité de minimiser les dépenses d'entretien ont conduit à augmenter l'inertie verticale des rails et par conséquent à adopter des profils de plus en plus lourds. Les profils utilisés actuellement en Europe⁵ ont un poids linéique compris entre 49 et 60 kg/m [ALL 1987], tandis qu'aux États-Unis et dans les pays de l'est européen, où les charges à l'essieu sont plus élevées, on emploie des rails de 65 à 70 kg/m [ALL 1987]. En France, les profils courants sont le 50E6, le 54E1 et le 60E1 suivant la norme EN-13674.

Sur le réseau RATP, les profils 50E6 et 60E1 sont utilisés sur le RER. En 2004, il y avait environ 2/3 de rails 60E1 contre 1/3 de rails 50E6. Le profil 60E1 est présent sur les zones à

⁵ Sur des réseaux urbains équivalents au RER.

fort tonnage cumulé. La tendance, au fur et à mesure des renouvellements de voie, est au remplacement du profil 50E6 par du 60E1 même dans les zones à tonnage plus faible. Cette politique a pour objectif d'uniformiser les profils de rail sur un même réseau et d'anticiper l'évolution des tonnages à venir et l'augmentation de la capacité de transport.

I.1.2.1.2 Exigences applicables aux rails

En ferroviaire, le rail sert de surface de roulement mais assure également le guidage des trains. Il est soumis à des sollicitations statiques et dynamiques importantes. Pour s'adapter aux nouvelles normes de sécurité, confort et performance, les matériels roulants ont évolué et leurs charges à l'essieu (Figure 8) atteignent 35 tonnes pour du trafic fret lourd. Même constat pour les vitesses commerciales qui atteignent 350 km/h. De plus, les contraintes de tracé imposent des rails implantés dans des courbes de rayons très serrés (inférieurs à 300 mètres). La conséquence d'une telle géométrie est l'exposition à des sollicitations latérales importantes.

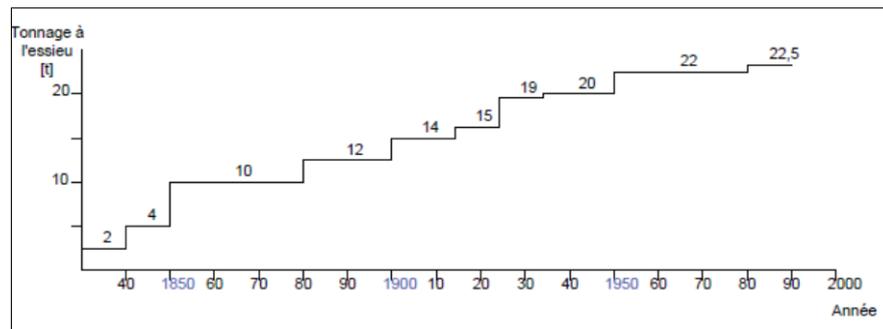


Figure 8. Évolution de la charge à l'essieu

Ainsi, pour supporter ces sollicitations, les rails doivent respecter certains critères tels que [ALL 1987] :

- résistance à l'usure ;
- résistance à l'écrasement ;
- résistance à la fatigue ;
- résistance à la traction ;
- résistance à la rupture ;
- bonne aptitude à la soudure ;

- bonnes propriétés et qualités métallurgiques⁶ ;
- bon état de surface ;
- planéité et respect du profil longitudinal ;
- faibles contraintes internes après production.

I.1.2.1.3 Longueur des rails

La longueur des rails depuis les origines du chemin de fer (1 m environ) a constamment augmenté. Aujourd'hui, les longueurs laminées sont de 18 mètres, 24 mètres, 36 mètres. Pour éviter le nombre de soudures, les dernières installations des sidérurgistes permettent de sortir des barres jusqu'à 108 mètres⁷ de longueur.

Sur le réseau RATP, on constitue des longs rails soudés (LRS par la suite) par soudage aluminothermique de barres de 36 mètres à 288 mètres. Ces dernières sont constituées elles-mêmes de rails de 18 mètres, 36 mètres ou 108 mètres soudés électriquement en atelier.

Comprenons que des rails de plus en plus longs sont un objectif à atteindre par tous les gestionnaires de réseaux. En effet, de par leur nature discontinue, les liaisons entre rails constituent des points de faiblesse qui détériorent les extrémités des rails et le nivellement de la voie en raison des chocs causés à chaque passage d'essieu. Un rail sans discontinuité permet de réduire les risques d'atteinte à la sécurité ferroviaire, de limiter les opérations de maintenance et d'augmenter le confort des voyageurs.

I.1.2.1.4 Fabrication des rails

Les phases de production d'un rail sont :

- la production de fonte à partir du minerai de fer. En chauffant dans un four à 800°C environ une roche ferreuse, des additifs minéraux et du coke⁸, on obtient de la fonte brute et des scories⁹ ;

⁶ Les qualités recherchées sont la pureté de l'acier, l'homogénéité du matériau et l'absence d'inclusions.

⁷ Avant le 29 juin 2011 et l'augmentation de capacité des lignes de production de TATA STEEL, en France la longueur élémentaire de rail laminée en une fois était de 72 mètres.

⁸ Le coke est un combustible issu de la pyrolyse de la houille dans un four à l'abri de l'air.

⁹ Écume minérale remontant à la surface d'un matériau en fusion considérée comme un déchet.

- la transformation de la fonte en acier. Cette opération est réalisée à l'aide d'un convertisseur à oxygène dans lequel on introduit la fonte liquide. On y injecte de manière contrôlée l'oxygène pur pour brûler le carbone contenu dans la fonte et ainsi obtenir de l'acier liquide dans la formulation souhaitée ;
- la coulée et le laminage. L'acier liquide est versé dans des lingotières, puis entreposé pour refroidir jusqu'à la température de laminage de 1250°C. Le formage des rails nécessite une vingtaine de cycles de laminage. Pour une fabrication uniforme de rails longs le paramètre température doit être réglé très précisément.
- le sciage et le dressage. Le sciage consiste à chuter les extrémités des rails déformés par les galets du laminoir et à mettre le rail à sa longueur définitive. Lors du refroidissement, les rails se déforment et doivent donc être redressés à 50°C. Cette dernière opération vise à donner au rail une rectitude parfaite. Le dressage avec des galets génère des contraintes résiduelles dans les rails qui subsistent par la suite.

En ce qui concerne la RATP, les rails sont soumis, à la sortie du laminoir, à des contrôles aux ultrasons visant à détecter les défauts internes (inclusions, pores, retassures¹⁰, etc.).

I.1.2.1.5 Types de rails

Afin de bien comprendre les choix de types de rails utilisés sur le réseau RATP, il faut revenir sur les procédés d'amélioration des caractéristiques des rails, notamment la dureté. Cette caractéristique présente une importance capitale car il s'agit du critère de résistance à l'usure.

¹⁰ Défaut interne causé lors du refroidissement sous l'effet du retrait.

Un rail n'ayant subi aucun traitement d'amélioration est dans un état de dureté dit naturel. Par exemple, un rail de « nuance normale » de type R260 présente un taux d'usure verticale d'environ 0,7 à 1 mm pour 100 millions de tonnes en alignement (équivalent à une année de circulation du RER A). Cette valeur d'usure verticale passe de 2 à 3 mm pour 100 millions de tonnes en courbe de rayon 600 mètres. Pour des courbes de rayon inférieur à 600 mètres, la résistance à l'usure de ce type de rail est insuffisante.

Le Tableau 2 indique la composition chimique des aciers des rails courants :

Tableau 2. Caractéristiques chimiques et mécaniques des aciers des rails courants

Norme	Nuance de rail	État de livraison	Composition chimique				Résistance à la traction R en N/mm ²	Dureté Brinell
			C	Si	Mn	Cr		
UIC 860 O	700	dureté naturelle	0,4/0,6	0,05/0,35	0,8/1,25	-	680	
	900 A	dureté naturelle	0,6/0,8	0,1/0,5	0,8/1,3	-	860	
EN 13674-1 EN 13674-2	R260	dureté naturelle	0,62/0,8	0,15/0,58	0,7/1,2	≤0,15	≥880	260/300
	R350 HT	traité thermiquement	0,72/0,8	0,15/0,58	0,7/1,2	≤0,15	≥1180	350/390
	R350 LHT	traité thermiquement	0,72/0,8	0,15/0,58	0,7/1,2	≤0,15	≥1180	350/390
	MHH375 /388	traité thermiquement	0,72/0,82	0,4/0,8	0,8/1,1	0,4/0,6	≥1280	381/408

Pour augmenter la résistance, un traitement thermique peut s'avérer nécessaire. La reformulation chimique est une autre piste que l'on ne présentera pas mais qui permet d'améliorer les performances mécanique des aciers à rail.

Deux procédés de traitement thermique sont couramment utilisés : la trempe « off-line » et « in-line ».

La trempe « off-line » consiste à chauffer le rail par induction à une température de 850 à 950°C puis à refroidir brutalement le champignon avec de l'air comprimé et la brumisation d'eau. Ce refroidissement contrôlé permet d'augmenter la dureté et la résistance à la traction du rail.

La trempe « in-line » consiste à plonger immédiatement le champignon du rail encore chaud (800°C) dans un bain de trempe composé d'eau et d'additifs synthétiques.

La Figure 9 montre l'influence du traitement thermique en surface et au cœur du champignon du rail.

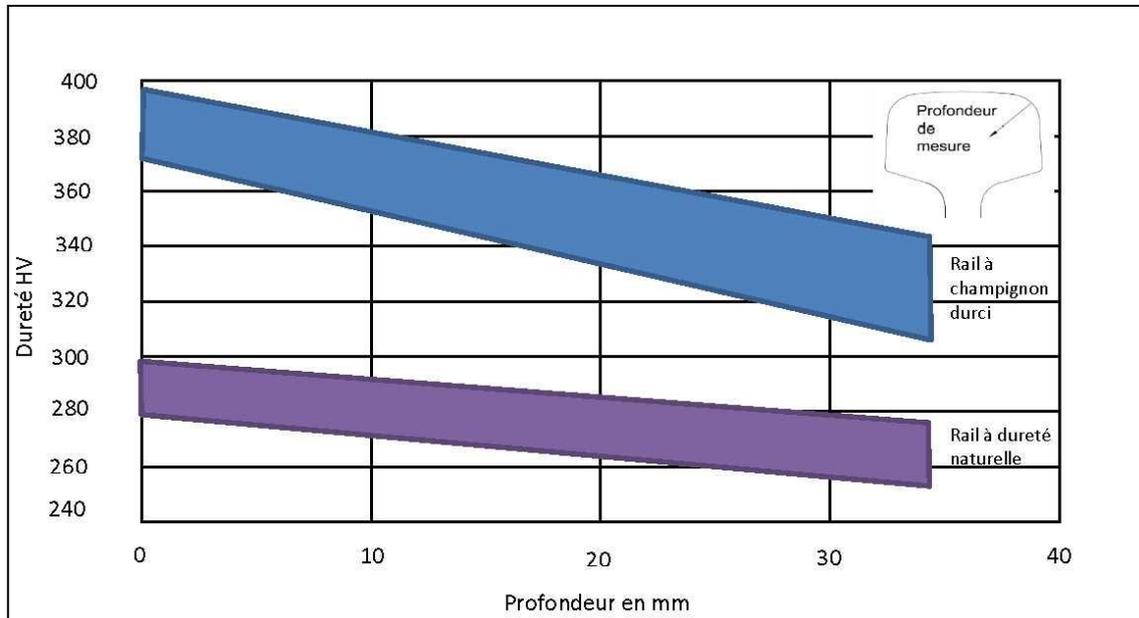


Figure 9. Influence du traitement thermique sur la dureté Vickers (HV) [LIC 2009]

La dureté dans la Figure 9 est une grandeur qui représente la résistance à l'enfoncement d'un matériau. L'essai de dureté consiste à mesurer l'enfoncement dans une face polie du métal d'une bille (dureté Brinell), d'un cône (dureté Rockwell) ou d'une pyramide (dureté Vickers) sous l'action d'une charge déterminée. Ces mesures constituent un bon indicateur des propriétés de résistance à l'écrasement et donc de résistance à l'usure du métal. Une corrélation existe entre la dureté (Brinell HB ou Vickers HV) et la résistance à la traction R telle que :

$$R = 3.38 \times HB \quad \text{avec } R \text{ en } \text{N/mm}^2$$

$$R = 3.21 \times HV \quad \text{avec } R \text{ en } \text{N/mm}^2$$

D'après l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC), les rails traités thermiquement sont préconisés dans les courbes à faible rayon et sur les chemins de fer dits lourds (Figure 10).

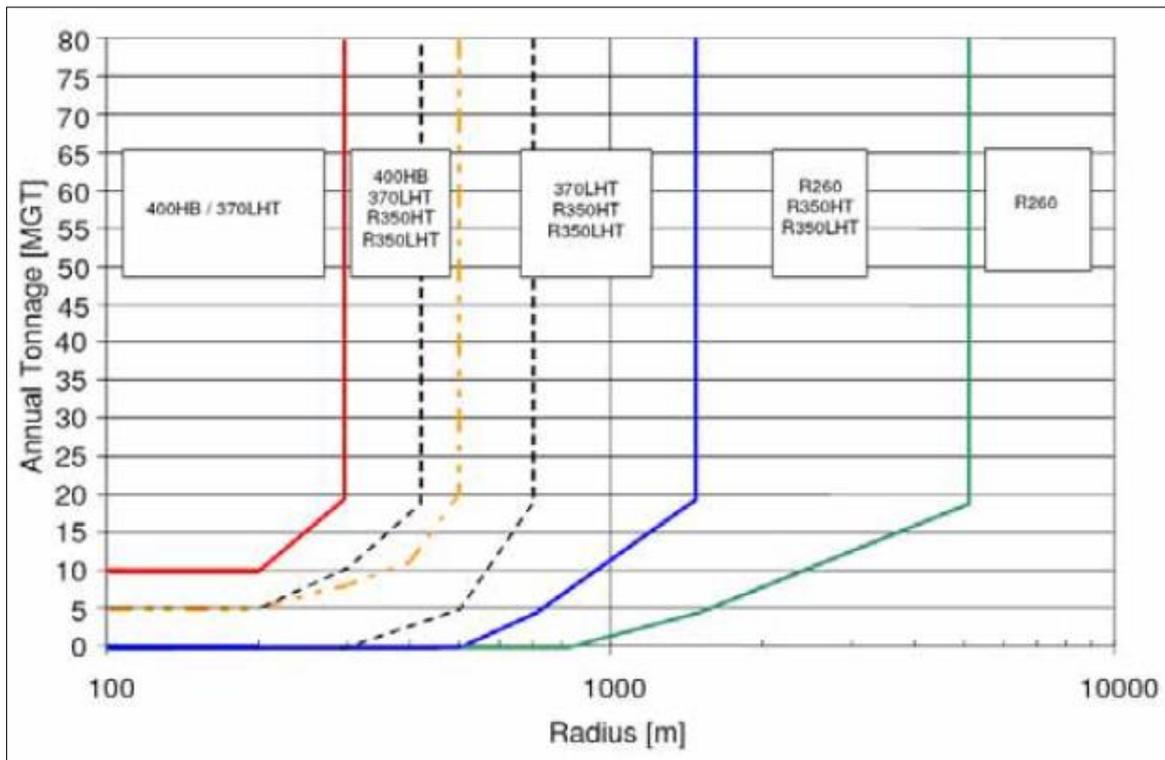


Figure 10. Préconisation de la nuance de rail (cf. tableau 2) en fonction du rayon de courbure et de la charge ou tonnage annuel

Toujours dans le but d'améliorer la résistance à l'usure des rails, une nouvelle nuance d'acier dit bainitique a été développée par la British Steel et l'université de Cambridge. Cette nuance d'acier s'obtient par un meilleur contrôle de la température de refroidissement après laminage. La bainite est le nom d'une microstructure de l'acier découverte en 1930 par E. S. Davenport et Edgar Bain lors de leurs études sur la décomposition isotherme de l'austénite. Comme l'indique la Figure 11, extraite des travaux de Pointer et al. [POI 2008], la microstructure ressemble à celle d'un acier perlitique avec une orientation aléatoire de la cémentite et de la ferrite. La structure cristallographique particulièrement fine et l'orientation aléatoire confère à l'acier bainitique une résistance à l'usure plus importante.

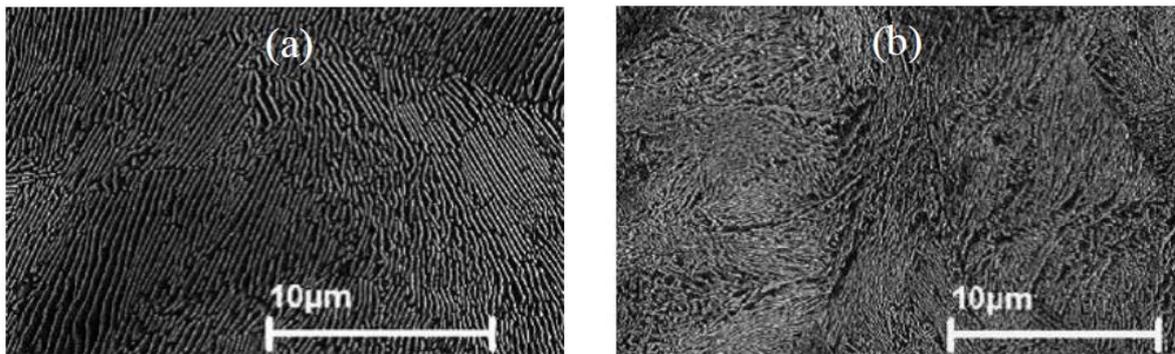


Figure 11. Effet de la vitesse de refroidissement sur l'acier, (a) acier perlitique, (b) acier bainitique [POI 2008]

Des rails bainitiques, de nuance B320 et B360, sont en cours d'essais sur le réseau RATP. Les premières analyses montrent une résistance plus élevée au phénomène de *head check* sur lequel on reviendra plus tard.

I.1.2.2 Les traverses

I.1.2.2.1 Généralités

En voie courante, les rails reposent sur un plancher constitué le plus souvent par des traverses.

Les traverses assurent les rôles suivants :

- maintenir les rails à leur écartement et à leur inclinaison, dans les tolérances prescrites ;
- répartir sur le ballast ou sur la plateforme béton les charges transmises par les rails.

Au début de l'ère des chemins de fer, les traverses étaient exclusivement en bois. Le bois demeura le matériau le plus utilisé dans le monde malgré sa sensibilité aux intempéries. Cependant, le boom ferroviaire des années 1840 soutenant la première révolution industrielle et la production massive d'acier, des traverses métalliques ont été utilisées dans de nombreuses régions d'Europe et du monde [GRE 1911].

L'évolution constante des charges à l'essieu (Figure 8) et des vitesses de circulation des trains (Figure 12) a nécessité des traverses toujours plus denses. Les premières traverses en béton datent de la fin du 19^{ème} siècle.

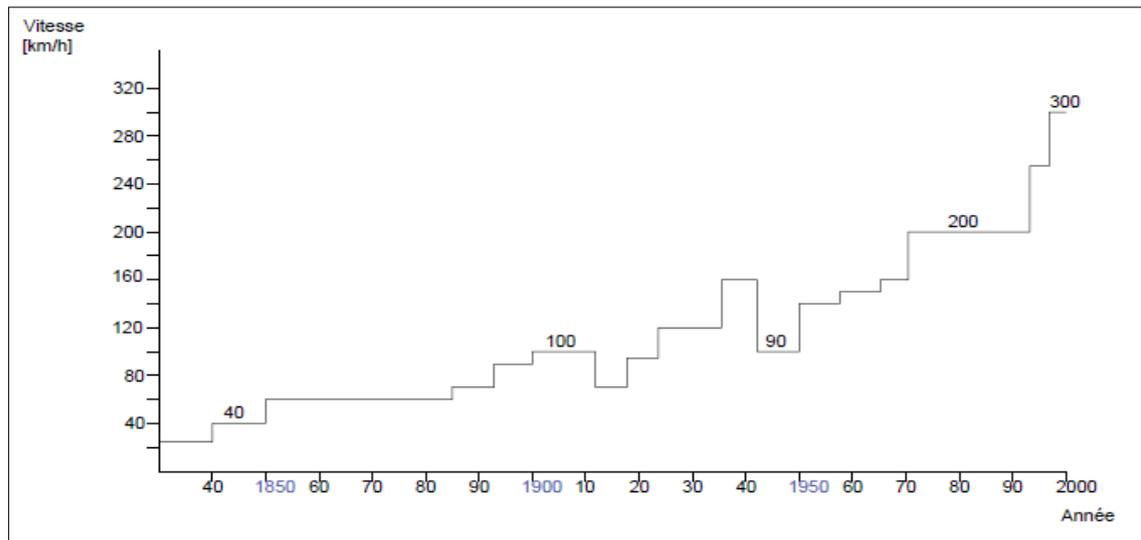


Figure 12. Évolution de la vitesse commerciale des trains en France

I.1.2.2.2 Types de traverses

Aux traverses en bois et en métal ont succédé les traverses en béton (fin XIX^{ème}) et enfin les traverses en matériaux composites (début du XXI^{ème}).

Il ne sera question que des traverses les plus utilisées en France :

- les traverses bois,
- les traverses béton,
 - bibloc¹¹ : deux blocs de béton ou blochets sont reliés par une entretoise en acier pour maintenir l'écartement. Le double ancrage dans le ballast procure un avantage en terme de stabilité latérale sous l'effet des forces centrifuges;
 - monobloc : poutre en béton précontraint. Elle offre une meilleure résistance à la flexion que la traverse bibloc et une meilleur répartition des charges verticales permettant de réduire les défauts de géométrie de voie (pas de poinçonnage comme pour la traverse bibloc).

On reviendra plus en détail sur la comparaison entre traverse bois et traverse béton.

¹¹Edmond Vagneux, ancien élève de l'École polytechnique et ingénieur des Ponts des Chaussées, est l'inventeur en 1932 de la traverse béton du type bibloc et d'un système de fixation des rails aux traverses par tirefond.

Le choix d'un type de traverse résulte la plupart du temps d'un problème économique pouvant être résolu par un calcul de prix de revient moyen annuel par traverse dans lequel interviennent les éléments suivants :

- prix d'achat de la traverse et de son système de fixation au rail associé ;
- prix de pose ;
- durée de vie ;
- frais d'entretien actualisés pour la durée de vie totale ;
- prix de dépose ;
- valeur de récupération ou de réemploi.

Un dernier critère prend de plus en plus d'importance en raison de la prise de conscience des questions environnementales ; il s'agit du contexte social et politique (écologie, développement durable, écoconception, etc.). Ainsi, la RATP a abandonné il y a quelques années les essences de bois exotiques au profit du chêne qui est un bois local. L'utilisation d'azobé, arbre croissant dans les forêts équatoriales et exploité pour son bois imputrescible, constitue une exception réservée aux applications les plus sévères pour les planchers d'appareils de voie.

1.1.2.2.1 Traverses bois

L'azobé, évoqué à l'instant, est une essence provenant d'Afrique équatoriale (Cameroun, Gabon, etc.) ; d'autres bois tels que l'èveuss, le bilinga ou le moabi sont également aptes à la fabrication de traverses, mais l'azobé reste le plus répandu. Ces essences présentent des caractéristiques voisines ; il s'agit de bois très durs, de densité élevée et imputrescibles. Les traverses en bois doivent posséder certaines propriétés leur permettant de résister durablement aux différents agents de détérioration qui les affectent.

Elles doivent :

- être suffisamment solides pour supporter sans déformation les charges verticales et transversales notamment en courbe ;
- présenter une résistance à l'arrachement suffisante, en réponse aux efforts de traction exercés sur le système de fixation rail/traverse ;
- être façonnables pour s'adapter à l'ensemble des dispositifs de fixation du rail (sabotage, perçage, lamage, décapage, etc.)

- permettre les opérations de maintenance, notamment les serrages/desserrages répétés liés aux activités de renouvellement de rails sans risque de destruction rapide des filets ;
- être peu sensible aux variations hygrométriques qui génèrent des variations dimensionnelles des traverses pouvant faire naître des fentes préjudiciables à l'efficacité du serrage ;
- être imputrescibles.

À l'exception de celles constituées de bois exotiques, les traverses à l'état brut sont séchées pendant 1 à 2 ans, puis traditionnellement imprégnées de créosote chaude sous pression. La créosote est un produit permettant de protéger le bois et donc de prolonger sa durée de vie. Issue de la distillation du goudron de houille, son utilisation implique des contraintes fortes en fin de vie telles que l'interdiction de revente aux particuliers et l'obligation de retraitement par des filières spécialisées. La créosote est classée cancérigène du groupe 2A, c'est-à-dire « probablement cancérigène pour l'homme »¹². Le traitement à la créosote est interdit à la RATP depuis la fin des années 90.

Les durées de vie moyennes prévisibles des traverses bois (traitées à la créosote) sont les suivantes :

- hêtre : 40 ans
- chêne : 32 ans
- pin : 30 ans
- mélèze : 30 ans [LIC 2009]

Pour fixer le rail sur les traverses, un système d'attache est indispensable. Au même titre que le rail et la traverse, la technologie des systèmes d'attaches n'a cessé d'évoluer pour s'adapter aux sollicitations en constante augmentation. Les différents types de poses couramment employés sur le réseau français seront présentés.

❖ **Pose rigide**

Ce système d'attache, qui a précédé la pose élastique, n'a pour seul avantage que sa simplicité de mise en œuvre et son faible coût. La pose rigide utilise trois tirefonds serrant

¹² Substances suspectées d'être cancérigène pour l'homme. <http://www.prc.cnrs-gif.fr/>

le patin du rail par l'intermédiaire de leur chapeau, et éventuellement une selle (Figure 13 et Figure 14).

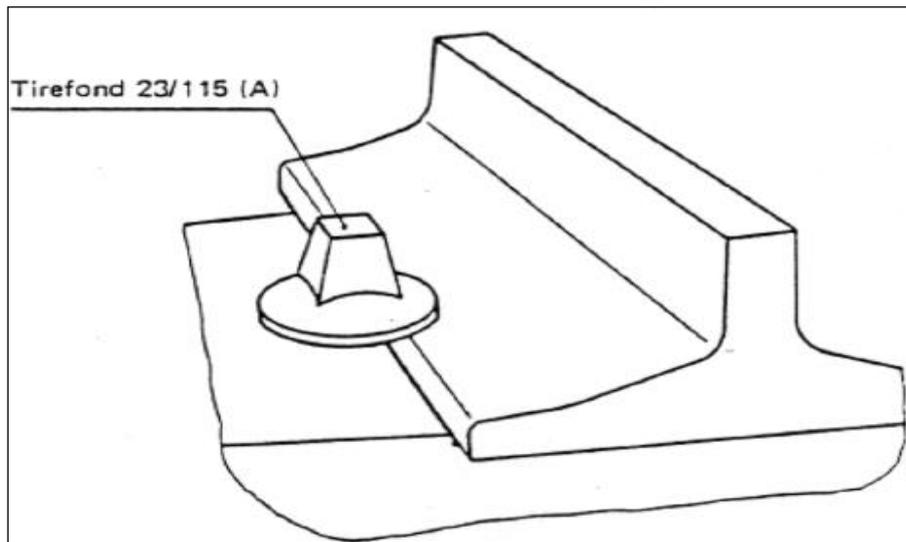


Figure 13. Lien rail / traverse : pose rigide sans selle

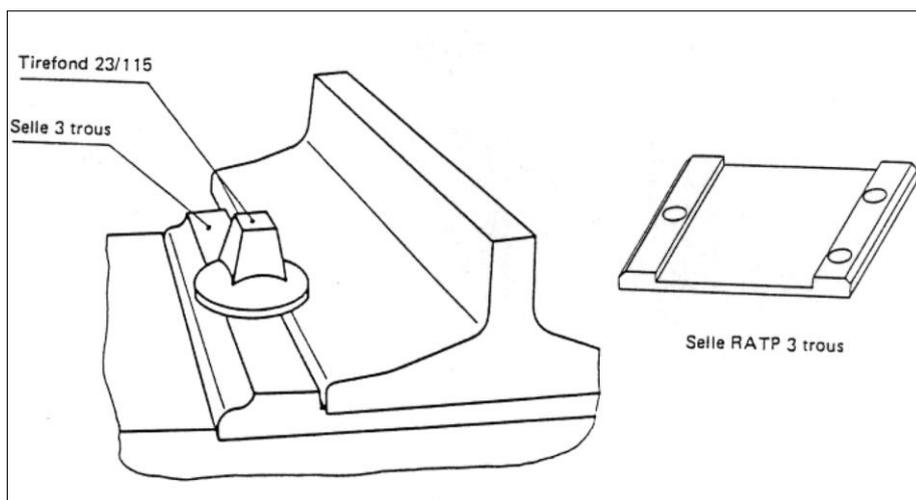


Figure 14. Lien rail / traverse : pose rigide avec selle à 3 trous

La pose avec selle métallique intercalée entre le patin du rail et la traverse permet de :

- diminuer l'usure de la table d'appui du rail sur la traverse en augmentant la surface de contact entre le patin du rail et la traverse ;
- réduire, notamment en courbe, les efforts exercés par le patin du rail sur l'épaulement extérieur de la table de sabotage et sur les attaches correspondantes ; le rôle du tirefond associé à la selle est donc limité au blocage vertical du rail.

Dans la voie posée avec selle, l'attache peut être directe ou indirecte.

- Dans la pose directe, le tirefond sert à la fois à fixer la selle et le rail sur la traverse.
- En revanche, la pose indirecte, la fixation de la selle sur la traverse est indépendante de la fixation du rail sur la selle ; la première se fait par tirefonds, la seconde par l'intermédiaire de boulons prenant appui dans un encastrement de la selle (Figure 15).

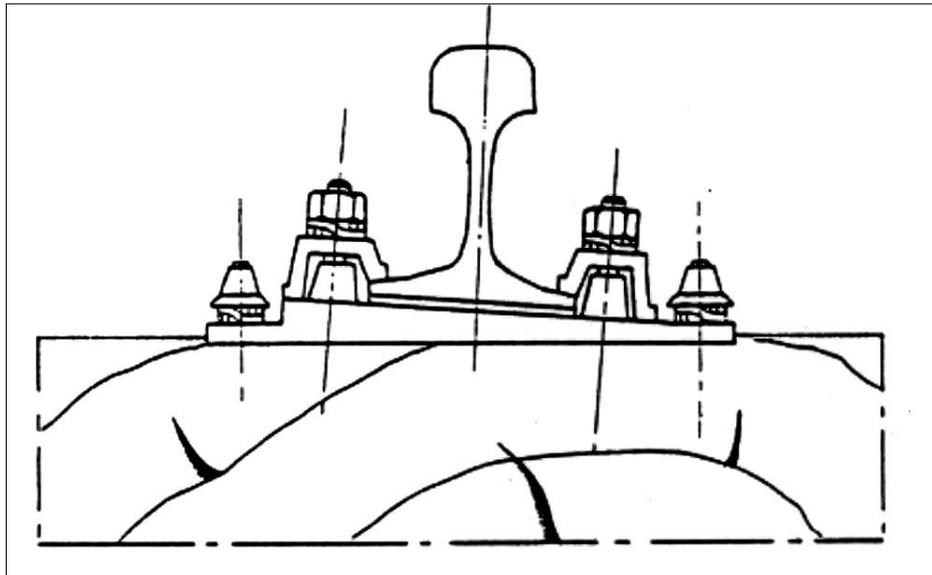


Figure 15. Pose rigide avec attache indirecte

La fixation indirecte présente un coût supérieur à la pose mais demeure plus avantageuse que la fixation directe. La pose indirecte sollicite moins le tirefond et évite les détirfonnages¹³ répétés, lors d'opérations de renouvellement de rail, pouvant nuire à l'intégrité de la traverse (ovalisation du trou, destruction du filet et casse du tirefond).

❖ Pose élastique

Des essais, menés par la SNCF en laboratoire et en voie, ont montré que :

- la pénétration du rail ou de la selle dans la traverse bois est due, la plupart du temps, à la destruction des fibres superficielles de la table de sabotage par les vibrations. Si le tirefond n'est pas resserré en temps utile, il se produira au passage des trains une perte de contact avec le rail créant un battement du rail sur la traverse provoquant l'usure de la table de sabotage et générant un phénomène

¹³ Ce terme désigne l'action de desserrage du tirefond à l'aide d'une clé à tirefond ou d'une tirefonneuse.

d'amplification des battements. Ce phénomène est significativement atténué si une semelle cannelée en caoutchouc est intercalée sous le rail. Les résultats de l'étude SNCF réalisée en voie ont montré que l'utilisation de semelles cannelées sous rail permet de faire passer l'usure de la table de sabotage, soumis à un trafic de 80 millions de tonnes, de 1,1mm à 0,2mm soit six fois moins.

- la mise en place entre le tirefond et le rail d'une lame élastique permet de filtrer la plus grande partie des vibrations du rail. Le tirefond, moins sollicité, reste quasiment fixe dans la traverse évitant l'usure anticipée de la table de sabotage et les opérations de maintenance, notamment les resserrages d'attaches.

Ces essais ont donc permis de confirmer l'intérêt de la pose élastique sur traverses bois en indiquant qu'elle diminuait simultanément la fatigue de l'attache et celle de la table de sabotage.

Pour toutes ces raisons, dès 1950, ce type de pose s'est rapidement répandu à la SNCF. La pose élastique sur traverses bois comprend des tirefonds, des griffons et des semelles cannelées en caoutchouc de 4,5mm d'épaisseur et de qualité isolante.

Actuellement deux familles de griffons se distinguent :

- les griffons RN (Figure 16),
- les griffons Nabla (Figure 17).

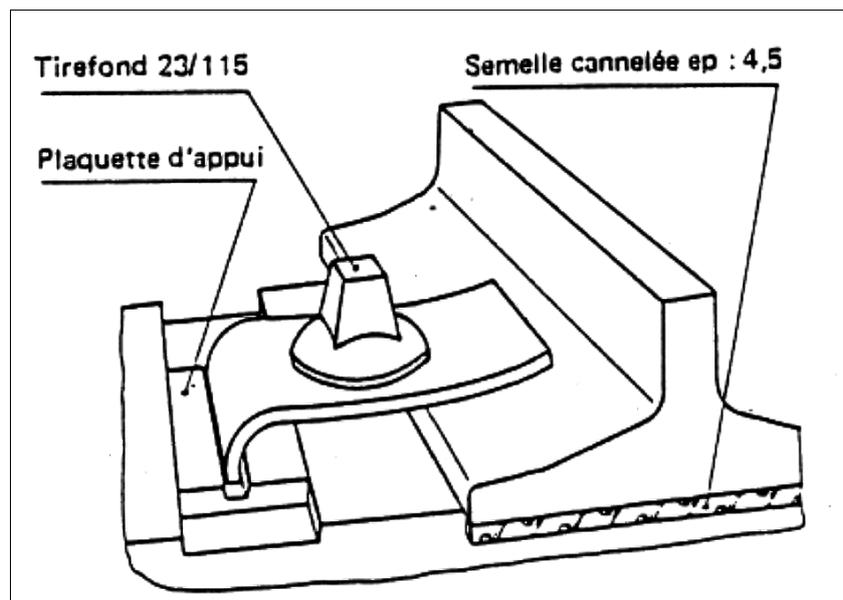


Figure 16. Pose élastique directe sans selle avec griffon RN

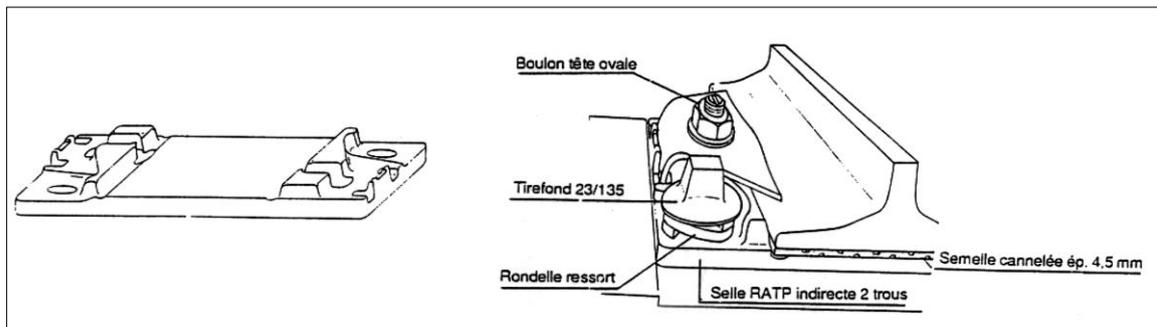


Figure 17. Pose élastique indirecte avec griffon Nabla et selle

I.1.2.2.2.2 Traverses béton

Historiquement, les traverses en béton étaient équipées d'attaches rigides. Deux problèmes furent alors rencontrés :

- l'écrasement et la fissuration du béton sous le rail spécialement aux droits des joints de rails fortement sollicités par les chocs de roues ;
- la faiblesse et le coût d'entretien trop élevé des systèmes d'attaches.

Pour résoudre ces problèmes il a fallu :

- supprimer le contact direct du rail sur le béton en introduisant un matériau élastique (semelle) pour limiter la surcharge dynamique. Cela a rendu impératif l'utilisation d'attaches élastiques ; de fait, l'élasticité des griffons Nabla leur permet d'accompagner le mouvement vertical du rail qui écrase la semelle et ainsi de maintenir un contact permanent attache/patin ;
- n'utiliser, pour les pièces noyées dans le béton recevant les tirefonds, que des matériaux d'une durée de vie similaire à celle du béton (élimination des chevilles en bois).

Le développement de la traverse en béton a ainsi pu se faire grâce à l'apparition en 1947 du crapaud élastique RN et de la semelle cannelée en caoutchouc permettant d'arriver aux traverses en béton que nous connaissons aujourd'hui.

Actuellement, on distingue :

- les traverses bibloc constituées de deux blochets en béton armé reliés par une entretoise métallique ; ce modèle a été le plus utilisé en France pendant très longtemps en raison de son faible coût et ce, malgré la problématique de corrosion de l'entretoise entraînant de fréquentes ruptures ;

- les traverses monoblocs ; elles sont en béton précontraint, ce qui, à l'origine, les rendaient onéreuses notamment à cause du prix de l'acier spécial des câbles de précontrainte. De nos jours, les coûts ont baissé permettant une généralisation de ces traverses.

❖ Traverse bibloc

Les blochets, de forme parallélépipédique, assurent la fonction support de la traverse sur laquelle repose le rail. Une semelle cannelée en caoutchouc est intercalée entre le rail et la surface d'appui de la traverse. De part et d'autre de cette surface d'appui, la traverse comporte soit deux cuvettes servant à l'appui des crapauds RN (Figure 18), soit deux épaulements sur lesquelles les crapauds AP (Figure 19) ou Nabla RNTC (Figure 20) prennent appui. Les épaulements contribuent à la résistance latérale du système d'attaches et soulagent le boulon en termes d'efforts à la flexion.

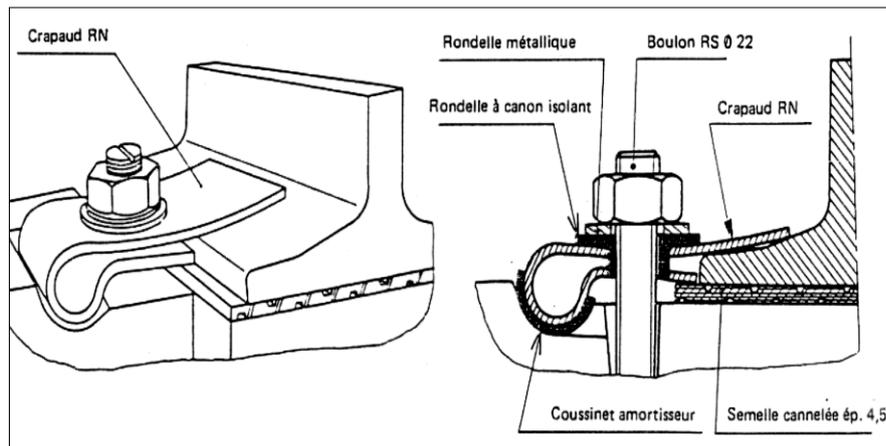


Figure 18. Représentation d'un crapaud RN

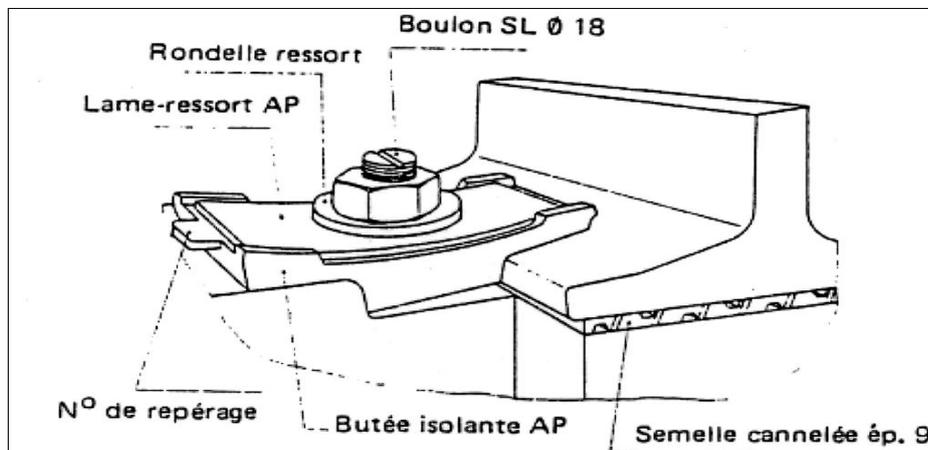


Figure 19. Représentation d'un crapaud AP

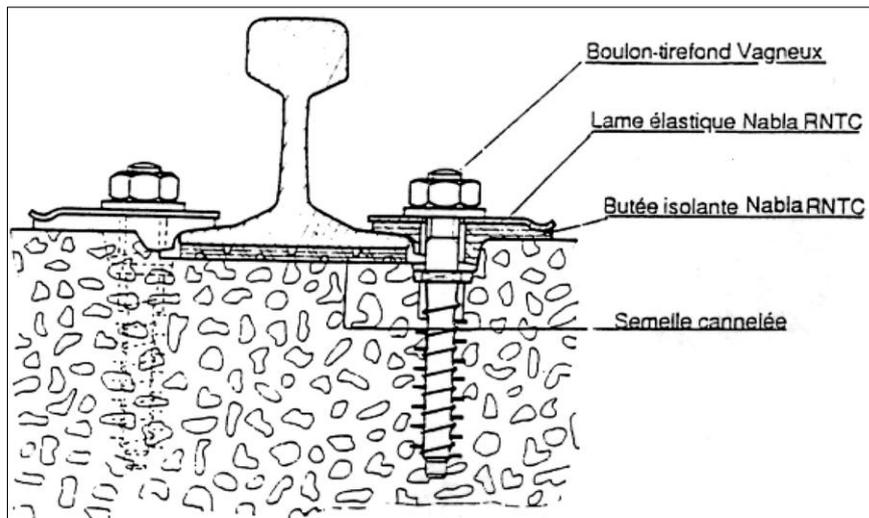


Figure 20. Représentation d'un crapaud Nabla RNTC

Différents modèles de traverses bibloc ont été utilisés au cours du temps :

- au début, la traverse appelée Vagneux (Figure 21) ;
- ensuite, la traverse RS (Roger Sonneville) (Figure 22) ;
- enfin, en 1961 la traverse SL remplace la traverse RS (Figure 23).

La différence entre ces traverses réside dans le système d'attache utilisé pour la fixation du rail.

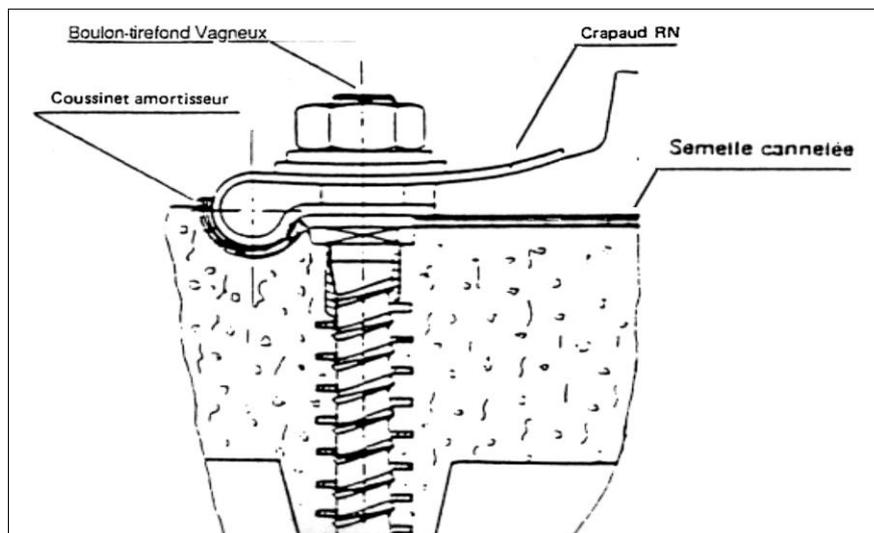


Figure 21. Système de fixation d'une traverse Vagneux

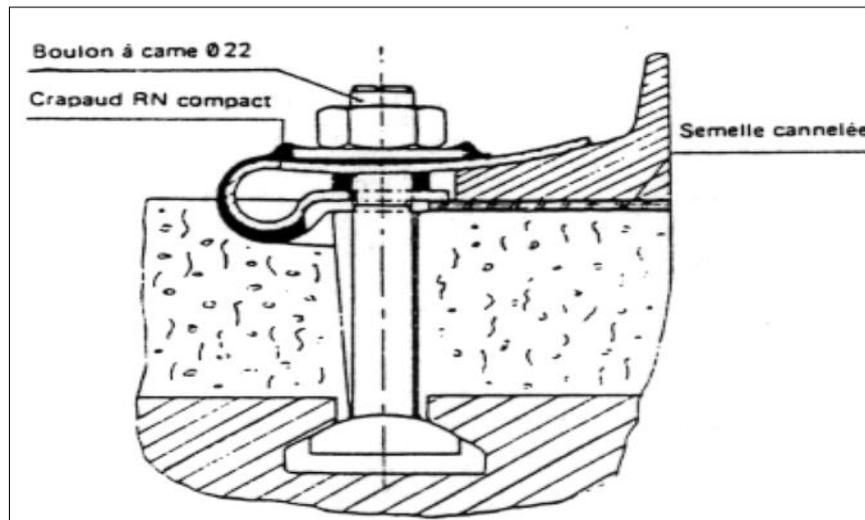


Figure 22. Système de fixation d'une traverse RS

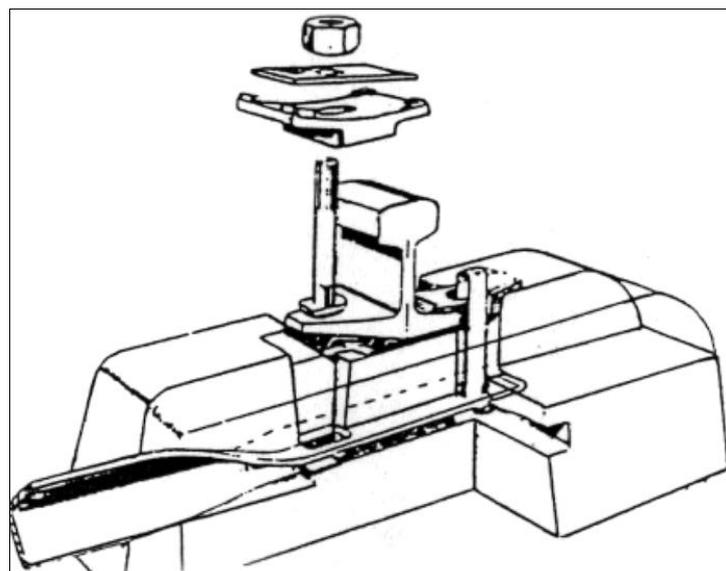


Figure 23. Système de fixation d'une traverse SL

❖ Traverse monobloc

Comme la SNCF, la RATP utilise aujourd'hui des traverses béton monobloc. Elles mettent en œuvre la technique des câbles de précontraintes ancrés aux extrémités.

Le béton précontraint a permis d'apporter des solutions intéressantes aux problèmes de rigidité et de poids des traverses monobloc. En effet, les premières traverses en béton, datant de 1920 pesaient entre 300 et 350 kg et présentaient une fragilité à la flexion. Il a

rapidement été observé une nette tendance aux ruptures de fragilité se manifestant par des fissurations du béton au contact du patin provoquant la ruine de la traverse.

La technique de la précontrainte permet :

- d'augmenter la résistance aux efforts alternés permettant de faire travailler préférentiellement en compression;
- de diminuer l'épaisseur des traverses notamment en leur centre puisque que les câbles de précontrainte n'exigent pas d'être placés le plus loin possible de la fibre neutre comme pour un béton ordinaire ;
- de diviser par trois la quantité d'acier mise en œuvre (7kg au lieu de 21) ;
- de diminuer le poids des traverses et d'augmenter ainsi leur maniabilité pour les opérateurs de maintenance.

Sur le réseau RER, les traverses utilisées sont les mêmes que celles utilisées par la SNCF. La plus fréquemment utilisée est la U31 NAT¹⁴ (avec boulons-tirefonds) dont l'épaisseur, sous le patin du rail, est de 17 cm (Figure 24)

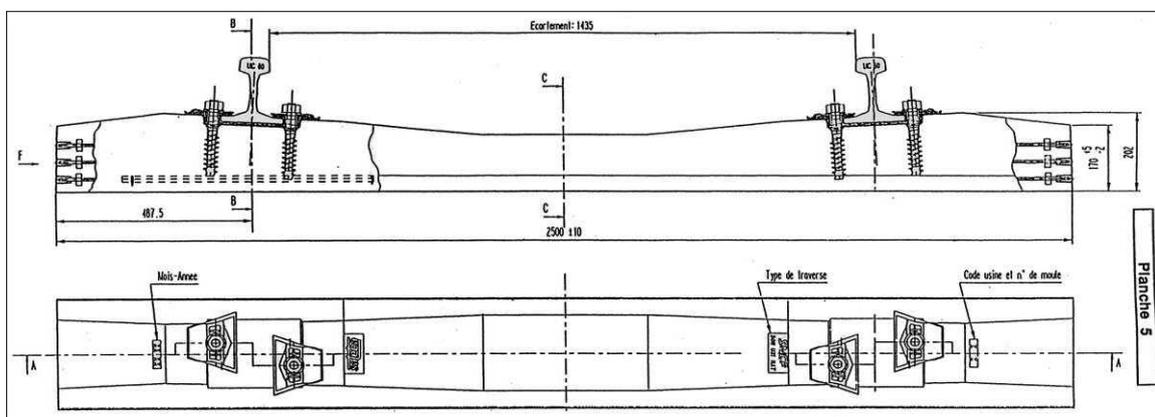


Figure 24. Traverse monobloc U31 NAT

La traverse U31 NAG est également utilisée. Il s'agit exactement de la même traverse que celle exposée précédemment. La seule différence réside dans le système d'attache qui est assuré par un tirefond vissé dans une gaine noyée dans le béton de la traverse (Figure 25).

¹⁴ M260 avec la nouvelle terminologie

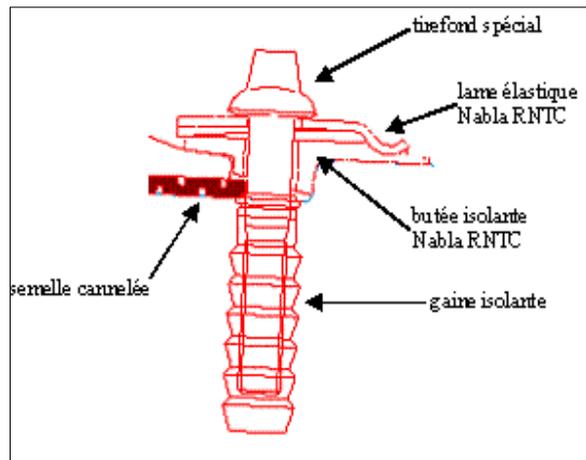


Figure 25. Système de fixation de la traverse U31 NAG ou NP

Au gré de l'évolution du matériel roulant et de l'augmentation des fréquences de passage et de la fréquentation des voyageurs, le tonnage ne cesse d'augmenter sur les voies ferrées. Les gestionnaires d'infrastructures ont décidé de développer des traverses monoblocs plus massives permettant de mieux répondre aux sollicitations de plus en plus importantes tant en valeur qu'en fréquence. Ces traverses sont dites de classe 4. Dans ce classement qui tient également compte de la capacité de la traverse à contribuer à la résistance transversale de la voie, la classe 1 est la moins performante.

Les deux modèles¹⁵ utilisés lors de renouvellement de voie ou de création de ligne nouvelle de type LGV sont :

- la traverse M450 (Figure 26),
- la traverse M240 (Figure 27).

¹⁵ La traverse « mince » M140 est exceptionnellement utilisée en cas d'assise ballast de faible épaisseur.

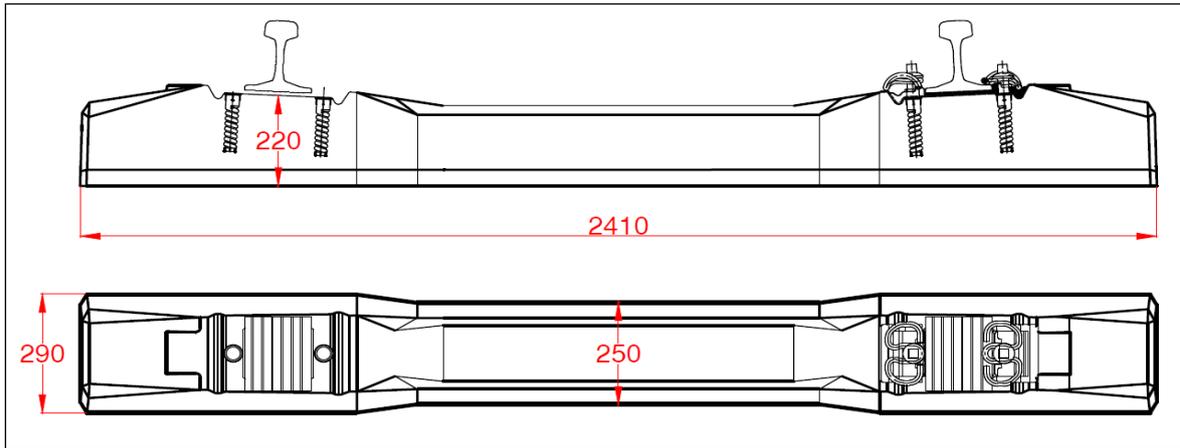


Figure 26. Représentation d'une traverse M450

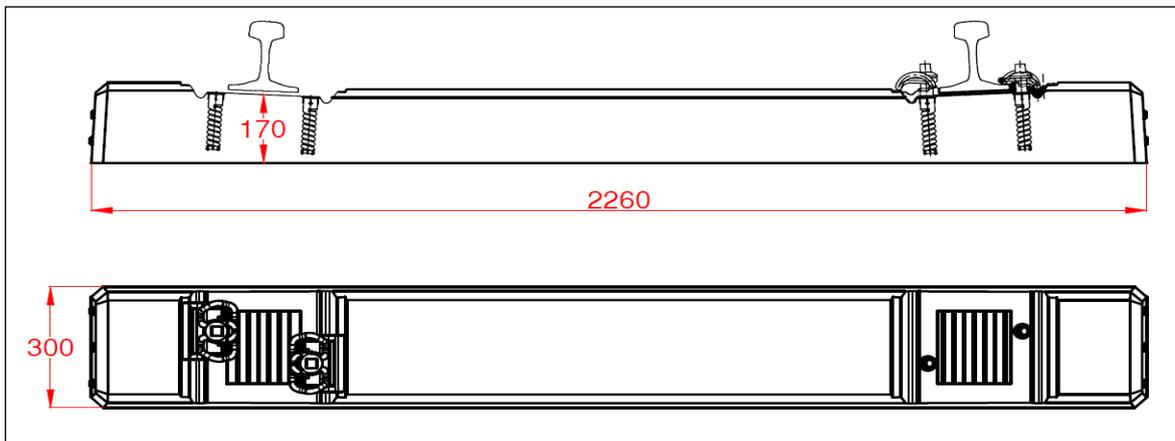


Figure 27. Représentation d'une traverse M240

Ces deux traverses existent avec différents types d'attaches tels que :

- Nabla-Thiollier (NT),
- Nabla-Plastrail (NP),
- Fastclips (PI) (Figure 28),
- Attache à fil type Vossloh (WG) (Figure 29) sur M240 (commande spécifique RATP).

Dans les zones où les épaisseurs de ballast sont insuffisantes (comprises entre 200 et 250 mm), les traverses sont équipées de patins réducteurs d'attrition (PRA). Ce patin est constitué d'une couche de matériau souple en polyuréthane qui est déposée sur la partie inférieure de la traverse dans la zone d'appui sur le ballast. Ce dispositif a pour objectif de réduire les frottements sur le ballast et sur la traverse ; la conséquence est une diminution

de l'usure du ballast et la préservation, par voie de conséquence, de la qualité du nivellement de la voie.

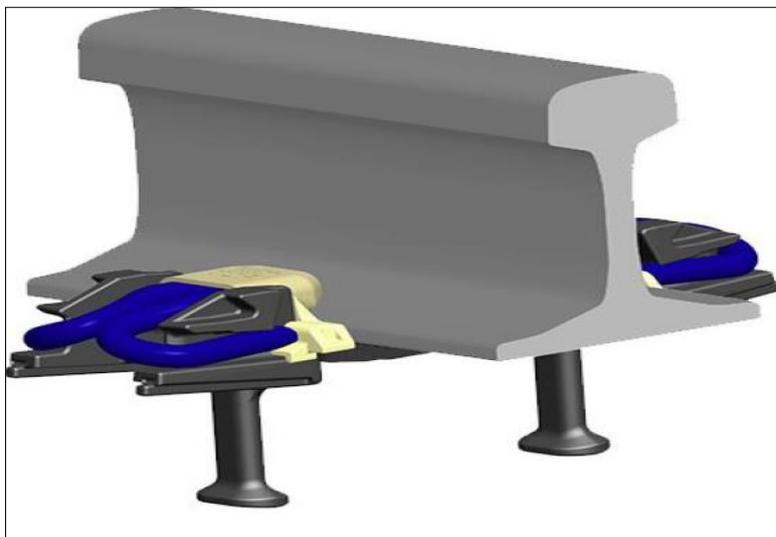


Figure 28. Système de fixation Fastclips (PI)



Figure 29. Système de fixation Vossloh (WG)

1.1.2.2.3 Comparaison technique entre traverse béton et traverse bois

Les traverses en béton de nouvelle génération présentent de nombreux avantages tels que :

- une très grande longévité de l'ordre de 50 ans ;
- un entretien et un serrage des attaches moins fréquent, lié à la meilleure stabilité de la voie conférée par les qualités intrinsèques des traverses en béton ;
- la géométrie de la traverse et son poids plus importants que pour une traverse en bois permettent une meilleure résistance transversale notamment pour la traverse bibloc qui offre une double butée latérale.

Cependant, son poids et sa rigidité génèrent les inconvénients suivants :

- une difficulté de manutention en raison du poids ;
- une fragilité du béton au choc lors de la manutention des traverses ou de blessures liées à la chute d'outillage ou des chocs avec le rail. Un léger choc en extrémité peut engendrer une épaufrure importante pouvant immédiatement ou à court terme après un cycle gel/dégel mettre à nu les câbles de précontrainte et ainsi provoquer sa ruine. De plus, cette fragilité exclut pratiquement l'utilisation de traverses en béton en voie éclissées. On reviendra sur ce point dans la section suivante.
- l'obligation de mettre en place des dispositifs d'isolement électrique pour garantir le bon fonctionnement des circuits de voie. Les traverses béton sont conçues de manière à être isolables soit par l'utilisation d'une butée isolante en nylon (pose AP et Nabla abordées précédemment) soit par l'interposition d'une rondelle isolante à canon (pose RN abordée précédemment).
- une maintenance limitée voire inexistante en cas de dégradation du système de fixation (casse du boulon-tirefond ou détérioration de la gaine Plastirail noyée).

1.1.2.3 Assemblage rail-rail

1.1.2.3.1 Voie éclissée

Avant la généralisation de procédés de soudage aluminothermique, la continuité du roulement et du guidage était assurée par un assemblage mécanique constitué d'une paire d'éclisses métalliques solidarisées au rail au moyen de boulons. L'ensemble porte le nom d'éclissage ou de joint.

On distingue deux sortes de joints :

- le joint mécanique (Figure 30) dont la fonction est non seulement d'assembler deux rails entre eux mais aussi de permettre en zone aérienne (hors tunnel) la dilatation des rails grâce au jeu de montage qu'il réserve entre eux. Cette dilatation doit rester compatible avec le jeu permis par le montage du joint mécanique. Par conséquent, la longueur maximum des rails dont la dilatation peut être absorbée par les jeux de montage des joints est 36 m.
- le joint isolant collé ou bois qui permet d'assurer la continuité des rails mais doit également s'opposer au passage du courant de signalisation d'un circuit de voie au circuit de voie concomitant. À l'inverse du joint mécanique qui permet

d'absorber les dilatations des rails, le joint isolant incorporé dans un long rail soudé (on reviendra sur le sujet dans la section suivante) doit être collé pour entraver la dilatation. Les éclisses métalliques sont collées sur les rails et l'isolement électrique est assuré par des canons isolants et des toiles isolantes insérées entre les éclisses et les rails.

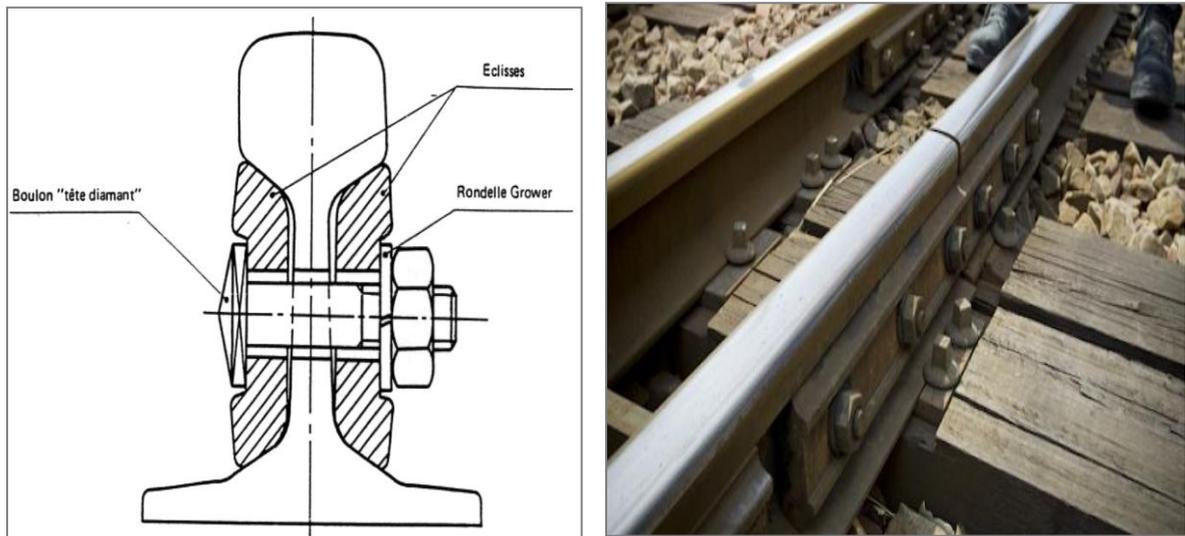


Figure 30. Représentation d'un joint mécanique entre deux rails

Jusque dans les années 60, les rails étaient posés en « barres » de longueur limitées (quelques mètres à l'origine et 36 mètres dès les années 1960) fixées aux traverses par des attaches rigides (tirefonds en Europe et crampons cloutés aux États-Unis). À chaque joint entre rails, la roue franchissant la lacune du joint créait un effort dynamique intense, bref et de haute fréquence (quelques centaines de hertz), le matériel roulant était sollicité dynamiquement et répondait par un effort dynamique un peu plus long quelques millisecondes plus tard. Cet effort dynamique, un peu moins intense, est dans une gamme de fréquence allant de quelques dizaines à quelques centaines de hertz.

Le premier effort a pour conséquence une faible déformation irréversible du rail. Cette déformation porte le nom de « matage » des abouts des rails aux droits du joint mécanique [GRE 1911].

Le second effort a pour effet de solliciter le ballast au voisinage du joint et de créer un déplacement de celui-ci sous les traverses porteuses du joint. Ce déplacement du ballast provoque un vide qui ne permet plus à la traverse d'être supportée convenablement. On dit que la traverse est « danseuse ». La danse se caractérise par une couleur plus claire du

ballast conséquence d'une remontée du ballast profond non teinté par la rouille et pollué par les fines provenant de l'attrition.

Ce phénomène de traverse danseuse accentue la dégradation de la voie dans son ensemble. Ainsi, le vide sous traverse provoque l'enfoncement plus important de celle-ci, sa vitesse de contact sur le ballast augmente générant un effort transmis au ballast plus important. Le ballast perd sa cohésion et devient plus mobile augmentant de plus en plus vite le vide sous traverse...

Des solutions ont été proposées pour remédier à la dégradation de la voie au voisinage d'un joint mécanique telles que :

- la modification du travelage¹⁶ et mise en place de traverses de joint de chaque côté de la lacune du joint. Ces traverses sont de préférence en bois ou en béton monobloc avec semelle sous traverse ;
- le remplacement des éclisses « 4 trous » par des éclisses « 6 trous » ;
- le développement d'autres types de joint. Les joints traditionnels perpendiculaires sont remplacés par des joints en biseau. Cette disposition ne concerne que les joints isolants collés.

La meilleure solution pour éviter le problème des joints est de les supprimer. La continuité du rail est assurée par soudure. On appelle cela la « voie en LRS », pour long rail soudé.

I.1.2.3.2 Voie en LRS

La suppression des joints règle de façon définitive les problèmes évoqués précédemment mais engendre d'autres problématiques. Tout d'abord, revenons sur les procédés de soudure des rails. Il existe deux méthodes de soudure couramment utilisées dont la différence tient au lieu de réalisation de la soudure. La méthode par aluminothermie permet de réaliser des soudures en voie et répond bien aux besoins liés à la maintenance des voies. La méthode par étincelage est avant tout un procédé réalisé en atelier mais il tend à être développé en voie grâce à des unités mobiles de soudage.

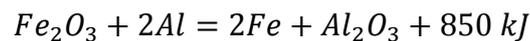
¹⁶ Ce terme désigne la répartition longitudinale des traverses en voie.

1.1.2.3.2.1 Soudure de rails

❖ Procédé par aluminothermie

Le principe de ce procédé consiste à couler, dans un moule en matériaux réfractaire entourant le joint du rail à souder, un mélange d'acier en fusion. Ce mélange en fusion est obtenu par la réaction exothermique suivante :

Aluminium + oxyde de fer \rightarrow fer + oxyde d'aluminium + chaleur



Cette réaction fortement exothermique porte la charge à 2800 °C ; celle-ci se liquéfie et peut alors être coulée dans le moule (Figure 31).

Dans un premier temps, on règle l'intervalle entre les deux rails à assembler à une valeur déterminée appelée intercalaire et on dresse en plan et en profil les deux abouts de rails à souder. Le moule de sable est disposé de part et d'autre des deux rails. Un préchauffage du moule et des abouts est ensuite réalisé. Un creuset, obturé à sa base par une douille auto-combustible, dite à débouchage automatique, est déposé sur le tout et rempli de la charge de métal en poudre appelée calorite. Celle-ci est enflammée pour initier la réaction qui donne lieu à un mélange hétérogène d'acier et de corindon liquides. L'acier plus dense que le corindon se trouve en bas du creuset. Dix à quinze secondes après la fin de la réaction, le creuset est automatiquement débouché et le métal s'écoule par gravité dans le moule.

Après un temps de refroidissement suffisant, on procède au démoulage, puis au tranchage du métal excédentaire. Un meulage de dégrossissage puis de finition terminent l'opération.

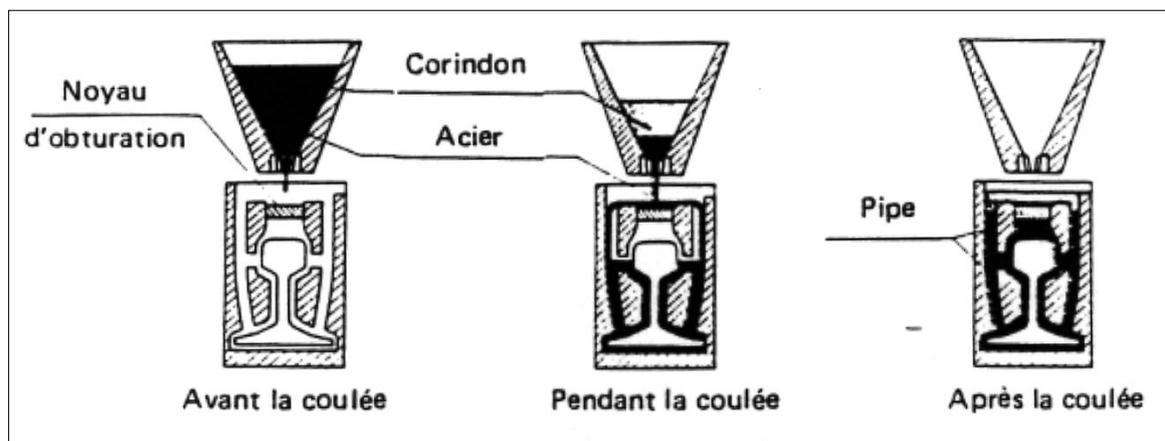


Figure 31. Procédé de soudure par aluminothermie

❖ Procédé par étincelage-forgeage

La voie en long rails soudés est l'innovation la plus remarquable et la plus économique au cours du dernier siècle. En atelier, les rails d'une longueur élémentaire minimum de 36 mètres quittent le laminoir pour être acheminés en usine où ils sont soudés par étincelage. Ce procédé est particulièrement intéressant car la structure de la soudure est très proche de celle du matériau de base conséquente à un non apport de métal. Les abouts de rails sont chauffés par induction puis un effort est appliqué aux abouts pour les rapprocher et le forger.

Le soudage par étincelage comporte cinq phases décrites ci-dessous :

- préparation des abouts de rail
 - Les abouts sont recoupés pour éliminer les trous de manutention.
 - L'âme du rail est brossée pour éliminer la calamine et permettre un bon contact électrique entre le rail et les électrodes.
 - Les extrémités des rails à souder sont positionnées entre deux paires de mâchoires, l'une fixe, l'autre mobile qui permet les accostages successifs lors du préchauffage. C'est à cette occasion que le réglage de l'alignement est effectué.
- préchauffage
 - Les mâchoires de la soudeuse servent d'électrodes qui amènent le courant dans chaque rail.
 - Cette phase est une succession d'accostages qui permettent l'amorçage des arcs électriques : lors d'un accostage, les deux extrémités de rails entrent en contact et s'échauffent jusqu'à la fusion du métal.
 - Progressivement, suite aux accostages, la chaleur se transmet aux deux extrémités de rails qui atteignent alors la température à laquelle la phase d'étincelage peut commencer.
- étincelage

Cette phase correspond à l'avance, à vitesse constante puis accélérée, du rail mobile. Cette phase doit son nom à la projection de particules à grande vitesse en gerbe d'étincelles.
- forgeage

Une pression de forgeage est exercée procurant la cohésion de la soudure. Suite à cette phase, un bourrelet s'est formé.

- ébavurage

Le bourrelet est enlevé dès la soudure terminée par deux couteaux épousant la forme du rail.

Ce procédé demande un important appel de courant entre 40 000 et 60 000 ampères et absorbe 3 à 5 cm de rail pour chaque soudure.

Des unités mobiles permettent de réaliser des soudures par étincelage en voie. La tête de soudage peut équiper des machines automotrices mobiles (Figure 32) ou des engins rail-route (Figure 33).



Figure 32. Machine de soudage mobile PLASSER APT 600S



Figure 33. Unité de soudage mobile sur camion rail-route Vossloh

La soudure électrique est un procédé plus fiable que la soudure aluminothermique car elle diminue les risques de fissuration et à terme, de rupture de rail. La SNCF a constaté une fiabilité cinq fois supérieure à celle de la soudure aluminothermique. À la RATP, sur les lignes A et B, il est constaté entre 0 et 1 défaut sur soudure électrique par an.

Depuis de nombreuses années, les rails posés sur le RER sont approvisionnés en longues barres constituées de barres élémentaires soudées électriquement en atelier. Ces barres longues arrivent depuis le laminoir sur un train spécial constitué d'une unité de stockage (Figure 34) d'une unité de déchargement (Figure 35).



Figure 34. Photo d'unité de stockage

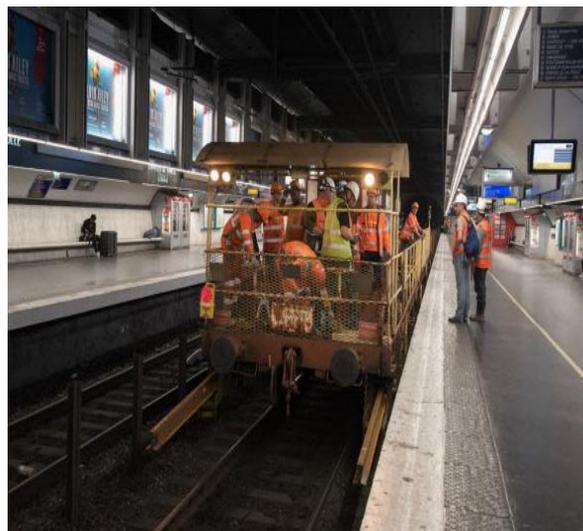


Figure 35. Photo d'unité de déchargement

1.1.2.3.2.2 Les longs rails soudés

Lorsque les rails sont tous soudés les uns aux autres, les variations de température peuvent générer des contraintes thermiques très élevées.

En période froide, le rail se rétracte et des efforts importants de traction peuvent entraîner des ruptures de rail au niveau des soudures (Figure 36).



Figure 36. Rupture de rail sur soudure en période froide

En période chaude, le rail se dilate créant des efforts de compression qui peuvent, si la résistance transversale de la voie est trop faible, créer le flambement du rail (Figure 37).



Figure 37. Phénomène de flambement en période chaude

Le long rail soudé qu'on nommera LRS doit répondre à deux exigences :

- transmettre les efforts longitudinaux de traction et de compression au ballast ;
- reprendre les efforts transversaux (effet de courbe et flambement).

❖ Théorie du LRS

➤ Dilatation libre et dilatation contrariée

Un rail posé sur rouleaux se dilate librement (si la température s'élève) ou se contracte (si la température baisse). Le déplacement à son extrémité (Figure 38), si l'autre est fixe, a pour équation :

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Avec :

α : coefficient de dilatation de l'acier ($\alpha = 10.5 \cdot 10^{-6}$ correspondant à 1,05 mm pour 100 mètres par degré Celsius de variation de température)

L : longueur en mètres à température initiale

ΔL : variation de longueur en m

ΔT : variation de température en °C

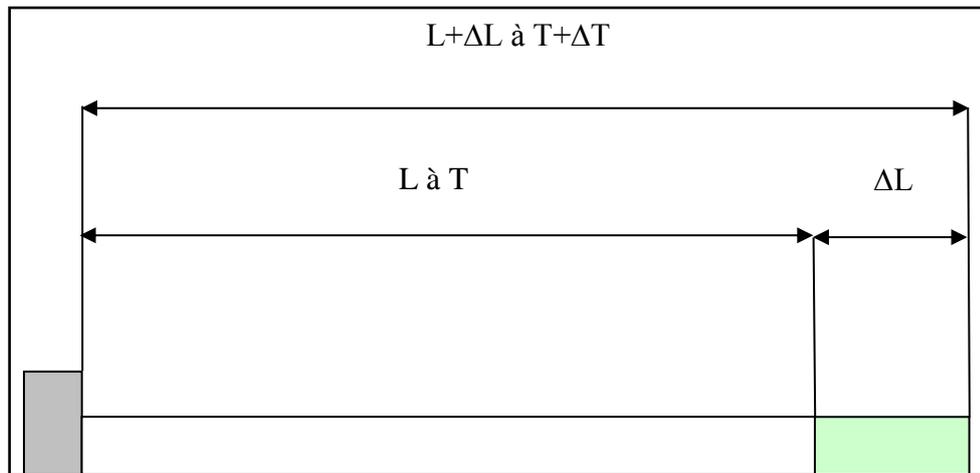


Figure 38. Représentation d'une poutre encastée en dilatation libre

Si l'on bloque totalement la possibilité de dilatation (ou de rétraction), la variation de température induit une contrainte de traction ou de compression selon la loi de l'élasticité :

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Avec :

$E = 210 \text{ kN/mm}^2$ module d'Young de l'acier

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

On obtient,

$$\sigma = \frac{E \alpha L}{L} \cdot \Delta T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Pour un rail de section S, la force longitudinale s'exprime comme suit :

$$F = E \cdot S \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Avec,

F : effort dans le rail en kN

S : section du rail en mm² (pour un rail de profil 60E1, S=7686 mm²)

Calcul d'effort dans un rail

Prenons l'exemple d'une voie équipée en rail Vignoles de profil 60E1.

La résistance de la voie est prise forfaitairement égale à 10kN par mètre (voie stabilisée).

La température de libération, température correspondant à un rail soumis à des contraintes longitudinales quasi-nulles, est comprise entre 25°C et 32°C. On reviendra ultérieurement et plus précisément sur cette notion de température de libération.

On prend en compte un écart de température maximum de 45°C par rapport à cette température de libération. Cette valeur provient des valeurs extrêmes de température dans le rail possibles en France à savoir -10°C à +60°C. Ces extrêmes donnent une valeur moyenne de 25°C avec un intervalle de variation possible de ±35°C. Une marge de sécurité de 10°C supplémentaire porte à ±45°C l'écart maximum de température pouvant être observé en France [VOI 1998].

Ainsi, pour une file de rail, avec $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, la force exercée est :

$$F = 210 \times 10,5 \cdot 10^{-6} \times 45 \times 7686$$

$$F = 762,5 \text{ kN pour une file de rail}$$

Ainsi pour les deux files de rails :

$$F = 2 \times 762,5$$

$$\underline{F = 1525 \text{ kN}}$$

Sachant que la résistance d'une voie stabilisée au mètre linéaire est de 10 kN/m il faudra :

$$\frac{1525}{10} = 152,5 \text{ mètres de voie pour résister à cette poussée.}$$

Cette application démontre la valeur forfaitaire de 150 mètres retenue pour une zone de respiration (Figure 40) qui sera définie à la section suivante.

➤ Cas de la voie ballast

Les rails étant fixés sur les traverses par des attaches élastiques, l'assemblage présente une résistance au glissement longitudinal du rail sur la traverse largement supérieure à la résistance opposée par le ballast à la traverse.

Considérons un LRS fixé sans contrainte sur une voie ballastée à la température T et subissant une montée uniforme de température de ΔT .

L'effort dû à la dilatation sera transmis intégralement au ballast par l'intermédiaire des traverses solidaires du rail grâce aux attaches élastiques.

Le frottement sur la face inférieure des traverses et leur butée longitudinale sur le ballast exercent une résistance qui s'oppose à la variation de longueur du rail.

La résistance « r » du ballast a une valeur comprise entre 4 et 12 kN par mètre de voie selon le degré de stabilisation de la voie.

➤ Distribution des efforts dans un LRS

On appelle LRS une barre dont la longueur est suffisante pour qu'il existe une longueur de rail non nulle sur laquelle les déplacements sont complètement bloqués quelles que soient les variations de température.

On distingue deux zones dans un LRS :

- une zone centrale où il n'y a pas de déplacement sous l'effet des variations de température grâce à la résistance offerte par le ballast d'une voie stabilisée. C'est

dans cette zone que les efforts atteignent les plus fortes valeurs aux températures extrêmes.

- deux zones de respiration de part et d'autre de la zone centrale dans lesquelles les mouvements ne sont qu'en partie bloqués. Aux extrémités des LRS, les mouvements sont les plus importants et sont absorbés par des dispositifs de dilatation (Figure 39). Plus on se rapproche de la zone centrale, moins les mouvements sont importants. Dans les zones de respiration, les traverses solidaires des rails se déplacent avec le rail.

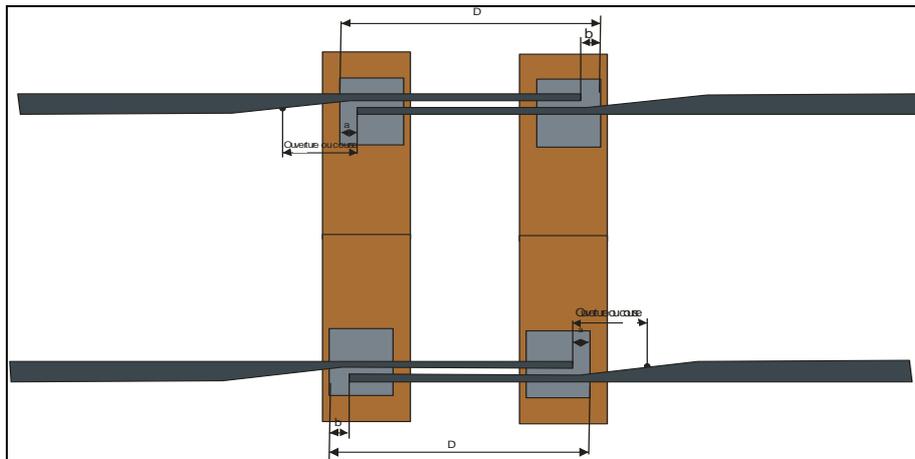


Figure 39. Représentation schématique d'un appareil de dilatation

Un LRS (Figure 40) n'a pas de longueur maximum. Sa longueur minimum est fixée forfaitairement à 300 mètres, soit deux fois la longueur minimum de 150 mètres d'une zone de respiration.

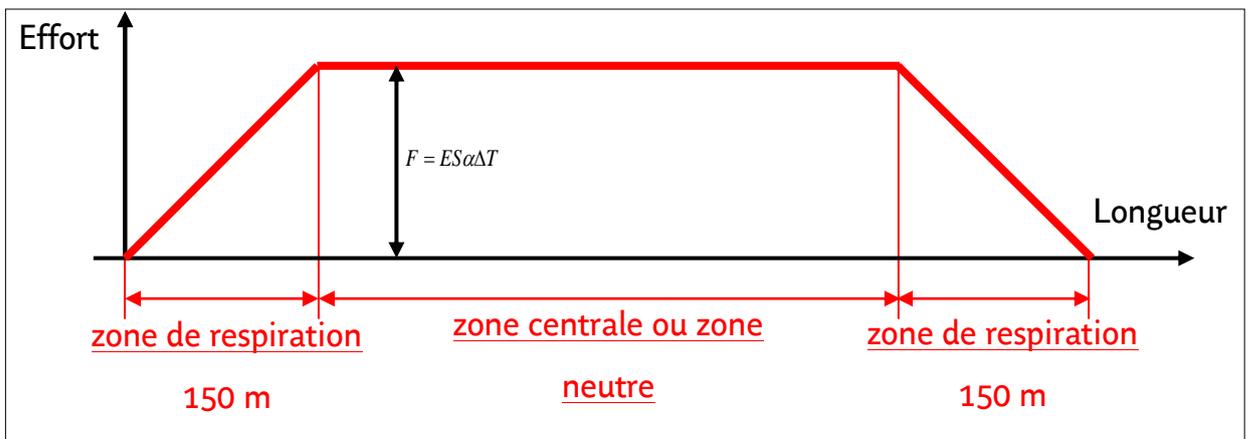


Figure 40. Représentation schématique d'un LRS

➤ Influence de la température de fixation des barres élémentaires

Un LRS est constitué de plusieurs barres longues élémentaires soudées en place sur le chantier et qui, avant d'être assemblées, comportaient chacune une zone centrale et deux zones de respiration.

Aussi, même en admettant que les barres aient toutes été posées à une température T_0 , puis soudées quelques jours plus tard à la même température, on peut avoir à cette température, une succession de diagrammes de contraintes tels que ceux représentés sur la Figure 41.

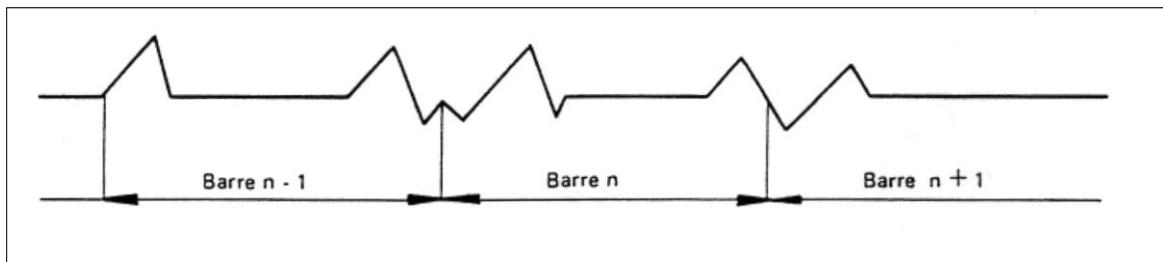


Figure 41. Diagramme possible de contraintes dans plusieurs barres avant soudage

Ce diagramme s'explique par les différents cycles thermiques subis par les rails avant la réalisation des soudures. À la pose (température T_0), il n'y a ni déplacement, ni contrainte. Après une première élévation de température ΔT_1 . On obtient le diagramme représenté par la Figure 42 (contour OMM'O'). Une baisse de température de T_1 à T_2 donne le contour ONPP'N'O' correspondant à la somme des contours (1) et (3).

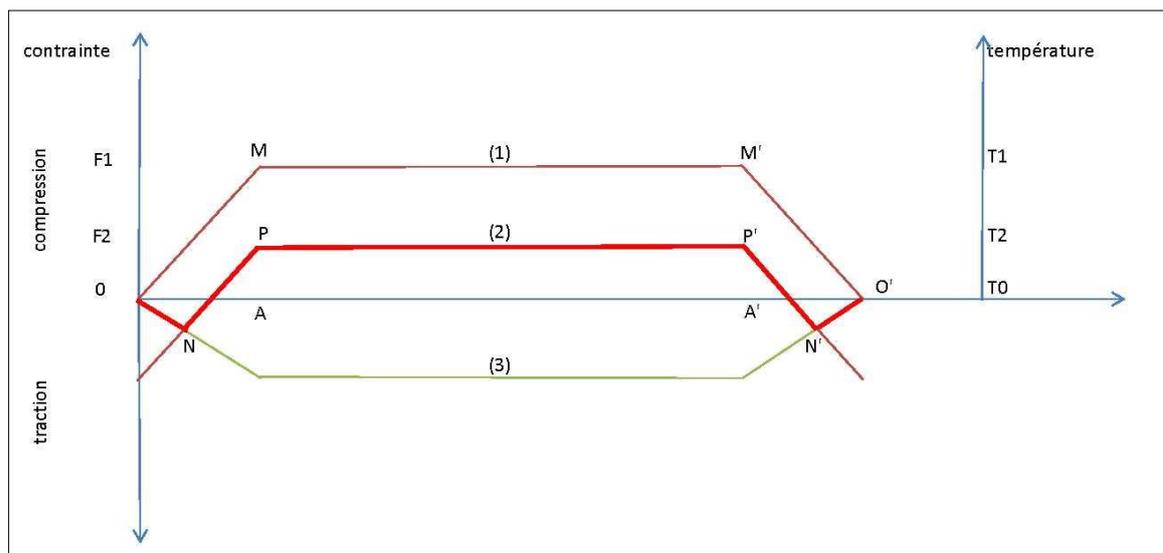


Figure 42. Diagramme des efforts dans le LRS après une montée de T_0 à T_1 puis une diminution de T_1 à T_2

On limitera volontairement la démonstration à deux variations de température. En réalité, les rails subissent de multiples variations donnant le diagramme de la Figure 41.

Cette figure illustre que les pics de contraintes qui régnaient dans les zones de respiration intermédiaires se trouvent définitivement figés après soudures dans la zone centrale de la barre complète. Ces pics seront conservés au cours des variations de température ultérieures et peuvent conduire à des situations dangereuses à des températures extrêmes.

Également, lorsque les températures de fixation des barres élémentaires, ou lorsque les variations de température entre fixation et soudure sont très différentes d'une barre à l'autre, il peut s'introduire des pics de contraintes importants dans la partie centrale du LRS.

Pour éliminer ces pics de contraintes, une opération s'appelant « libération » correspondant à la libération des contraintes, est systématiquement réalisée lors de la pose d'une certaine longueur de rail [VOI 1998].

➤ Libération des contraintes

La libération d'un LRS est une opération qui a pour objet d'annuler, pour une température donnée, toutes les contraintes susceptibles d'exister notamment en zone centrale en permettant la libre dilatation du rail.

Aussi, lorsque les exigences du chantier (travaux de nuit et à température basse) ont obligé à poser le LRS en dehors de la fourchette 20°C-32°C, la libération permet de replacer le LRS en équilibre dans cette fourchette idéalement à 25°C.

La libération doit être menée (idéalement sur les deux files de rails simultanément), à une température sensiblement constante et lorsque la résistance longitudinale de la voie a atteint une valeur suffisante.

En effet, une voie venant d'être posée, renouvelée ou affectée par des travaux ne dispose que d'une partie de sa résistance définitive. Celle-ci s'acquiert progressivement sous l'action de la circulation.

On considère que la stabilisation est atteinte lorsque l'on satisfait à la double condition de délai et de tonnage supporté :

- 48 heures minimum correspondant à deux cycles thermiques (jour-nuit) ;
- 20 000 tonnes de circulation sur plancher béton ;

- 100 000 tonnes de circulation sur plancher bois.

Libération à température naturelle

Les grandes étapes d'une libération à température naturelle sont les suivantes :

1. démonter les installations fixées au rail (balises de signalisation, câbles, etc.) ;
2. découper le rail, en général au centre de la zone à libérer ;
3. desserrer les attaches en partant de la coupe et mettre le rail sur rouleaux en s'assurant que la semelle cannelée n'est pas restée collée au rail ;
4. frapper le rail à l'aide de maillets en caoutchouc ou de frappeurs hydrauliques pour le mettre à contrainte nulle ;
5. relever la température du rail T_0 et tracer des traits repère tous les 50 mètres sur le rail et les traverses. Ces repères ont pour but de mesurer le déplacement du rail ;
6. déposer les rouleaux et rattacher le rail aux traverses ;
7. mesurer les déplacements au droit de chaque trait repère. Les déplacements mesurés doivent augmenter régulièrement plus à l'approche de la coupe du rail. Les allongements, sur chaque portion de 50 mètres, sont calculés en faisant la différence des déplacements mesurés au droit des repères encadrant la portion. L'allongement total, noté Δl , est calculé sur la portion de 50 mètres ;
8. réaliser la lacune de soudure (25 mm) et souder les rails.

Libération avec tendeurs hydrauliques

Les opérations de préparation du chantier de libération par tendeurs hydrauliques consistent à :

1. définir les zones d'ancrage de part et d'autre de la zone à libérer : resserrage des attaches des zones d'ancrage si nécessaire. Leur longueur minimum est égale à :
 - $3 \times (25 - T_0)$ pour un rail de profil 50E6 ;
 - $3,5 \times (25 - T_0)$ pour un rail de profil 60E1.Où T_0 est la température du rail.
2. numéroter les traverses tous les 50 mètres de la zone à libérer ;
3. démonter les installations fixées au rail (balises de signalisation, câbles, etc.) ;

On reprend les étapes 4, 5, 6 et 7 de la libération naturelle.

8. calculer et créer la lacune notée « a » aussitôt après le relevé de la température T_0 ;

$$a = 0,0105 \times L \times (25 - T_0) + (S - 1) + b$$

Avec :

L est la longueur (en m) à libérer ;

T_0 est la température du rail après mise en contrainte nulle ;

S est l'intercalaire¹⁷ soudure (en mm) ;

b est le déplacement théorique total des extrémités des zones d'ancrage dont la valeur est donnée dans le Tableau 3.

Tableau 3. Valeur du terme b

Température	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rail 50 E 6	23	21	20	18	16	15	13	12	11	9	8	7	6
Rail 60 E 1	28	26	23	21	20	18	16	14	13	11	10	9	7
Température	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Rail 50 E 6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0
Rail 60 E 1	6	5	4	4	3	2	2	1	0	0	0	0	0

9. mettre le rail en tension à l'aide des tendeurs hydrauliques et le frapper pour amener la lacune à une valeur d'intercalaire de soudure à savoir 25mm ;

10. mesurer les allongements ;

11. réaliser la soudure ;

12. déposer les rouleaux et resserrer les attaches ;

13. remonter les installations fixées au rail.

Les barres soudées dites en LRS, même à l'air libre où elles réclament une surveillance particulière, présentent des avantages déterminants sur les barres normales : une moindre fatigue du matériel, une économie d'entretien et une augmentation du confort. Ceci explique la généralisation du soudage des rails sur la plupart des réseaux modernes.

¹⁷ L'intercalaire a une valeur de 25 mm pour des soudures classiques et de 55 mm pour des soudures dites larges.

À la RATP, le soudage est systématique en voies principales lors des opérations de pose neuve ou de renouvellement sauf sur les viaducs anciens du Métro où la structure supportant les voies n'est pas adaptée aux efforts importants dus à la dilatation contrariée.

Sur le RER, les voies éclissées ont quasiment toutes disparu. En définitive, l'emploi de l'éclissage se limite désormais presque exclusivement aux voies secondaires.

1.1.2.4 Le ballast

1.1.2.4.1 Le rôle du ballast

Le ballast est un matériau constitué de roches concassées formant un matelas sous les traverses. Le ballast est généralement issu de roches telles que le microgranite, le porphyre et le basalte.

Le ballast doit :

- assurer la répartition sur le radier ou sur la plateforme des charges concentrées qu'il reçoit des traverses ;
- opposer une résistance au déplacement de la voie ;
- assurer, en raison de sa granulométrie particulière, le drainage et l'évacuation des eaux infiltrées ;
- assurer une certaine élasticité de la voie ;
- amortir les vibrations créées par la circulation des trains (dissipation de l'énergie vibratoire par attrition des éléments du ballast), en basse fréquence (20 – 200 Hz) ;
- permettre la rectification rapide du nivellement et du tracé, au moyen de méthodes appropriées.

Il n'est pas nécessaire, lorsque la voie est posée sur plateforme (sol support en déblais ou remblais), que le matériau soit le même sur toute son épaisseur. On distingue, comme pour les infrastructures routières :

- la couche d'assise (ou couche supérieure ou même couche de bourrage) a pour fonction de donner à la voie un profil correct en nivellement transversal et longitudinal. Elle permet, en cas de défauts, d'intervenir à l'aide d'engins spécialisés tels qu'une bourreuse mécanique lourde (BML). Ces engins (figure 67) permettent de remettre la voie à sa position initiale et de compacter (ou

« bourrer ») le ballast sous les têtes de traverses. Cette couche doit être épaisse au moins de 25 cm sous le niveau inférieur de traverse pour des traverses en bois et 20 cm pour des traverses en béton. On verra par la suite qu'il est préférable qu'elle soit constituée de matériaux durs et anguleux.

- la couche de forme ou sous-couche est un matelas perméable mono ou multicouche comportant, lorsque la nature du sol le nécessite, des géotextiles de nature diverse (anti-contaminant, imperméable, etc.). Elle doit rendre plus homogènes et améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux du sol support et le protéger du gel. Elle permet également d'assurer la répartition des charges sur la plateforme et l'écoulement de l'eau pour permettre l'assèchement de la couche supérieure. Cette couche doit être constituée en matériaux grenus ou fins (grave 0/31,5 ou sables).

En souterrain ou sur viaduc, les problèmes de drainage sont différents. La voie ne repose alors que sur la seule couche d'assise exclusivement constituée de ballast.

I.1.2.4.2 Les caractéristiques du ballast

Pour assurer les fonctions décrites ci-dessous, le ballast doit être propre et perméable. Les caractéristiques physiques du ballast ainsi que son degré de pollution influent sur son aptitude à remplir son rôle. Pour être efficace, un ballast doit posséder les propriétés suivantes :

- être dur afin de résister aux efforts reçus et à l'usure par attrition due aux vibrations ;
- offrir une certaine élasticité. Cette élasticité, qui permet d'amortir la transmission des charges et d'atténuer l'amplitude des efforts dynamiques, se manifeste par un affaissement de la traverse de 1 mm au passage des essieux suivi d'un retour à sa position d'origine ;
- être dense car un ballast lourd résiste mieux aux sollicitations et aux efforts latéraux de la voie ;
- être meuble ou mobile pour faciliter le bourrage et les reprises de nivellement ;
- contenir des éléments anguleux et rugueux. Les arêtes vives et la rugosité de surface contribuent à la cohésion du ballast et au bon maintien de la voie. Aussi, la rugosité de surface du ballast permet d'assurer le blocage des traverses dans le ballast par la pénétration des arêtes vives dans la masse des traverses en bois ;

- être perméable. Les vides entre les grains de ballast permettent d'assurer un bon écoulement de l'eau. Cette faculté tient compte bien évidemment de la granulométrie du ballast mais également de sa dureté. En effet, le phénomène d'attrition génère des fines pouvant combler progressivement les vides et perturber l'écoulement des eaux.

I.1.2.4.3 Les contrôles de qualité du ballast

Le ballast de voie ferrée doit être conforme à la norme européenne EN 13450. Des contrôles ont été conçus afin de tester la qualité d'un ballast dont les seuils d'acceptation sont repris dans la norme.

Les contrôles portent sur :

- **la granulométrie** : il consiste à faire passer un échantillon du ballast à contrôler à travers une colonne de tamis à mailles carrées, dont les dimensions sont de plus en plus petites et à peser la masse de matériau retenue par chaque tamis. Un fuseau granulométrique compris entre deux courbes de répartition de la masse de matériau permet de vérifier si les proportions en masse du ballast sont conformes à la norme.
- **la forme** : le contrôle porte sur la longueur et l'épaisseur des éléments de ballast passant au tamis de 50 mm. La longueur est mesurée à l'aide d'un gabarit. La masse relative des matériaux de longueur supérieure à 92 mm par rapport à la masse totale ne doit pas excéder 7 %. L'épaisseur est déterminée par le calcul d'un coefficient d'aplatissement obtenu à partir de l'échantillon ayant servi au contrôle granulométrique. L'essai consiste à trier les fractions de ballast (50/63 ; 40/50 ; 31,5/40 ; 25/31,5) puis à les tamiser sur des grilles à fentes de largeurs spécifiques par fraction (31,5 mm pour 50/63 ; 20 mm pour 31,5/40 ; 16 mm pour 25/31,5). La somme des proportions de masse passante, appelée « coefficient d'aplatissement » doit être inférieure ou égale à 12 % pour le ballast.
- **l'homogénéité** : la proportion en masse d'éléments friables ou altérés ne doit pas excéder 6 %.
- **la propreté** : la proportion en masse de sable, de poussières, débris terreux ou toutes autres matières étrangères passant au tamis carrés de 1,6 mm ne doit pas dépasser 0,5 %.

- **la dureté** : elle s'exprime à l'aide de deux essais. Le premier, appelé essai micro Deval noté MDE (par exemple dans le Tableau 4), vérifie la résistance à l'usure du ballast. Le second, appelé essai Los Angeles et noté LA, vérifie la résistance à la fragmentation ou la fragilité du ballast.

I.1.2.4.4 Les profils de ballast

La résistance transversale de la voie augmente avec la surface de contact traverse/ballast. Pour qu'elle soit suffisante, le ballast ne doit pas être arasé en deçà du niveau supérieur des traverses (Figure 43). Dans le cas de la voie en LRS, cette résistance transversale doit être augmentée. On y parvient par le chargement des têtes de traverses avec une certaine hauteur de ballast (Figure 44).

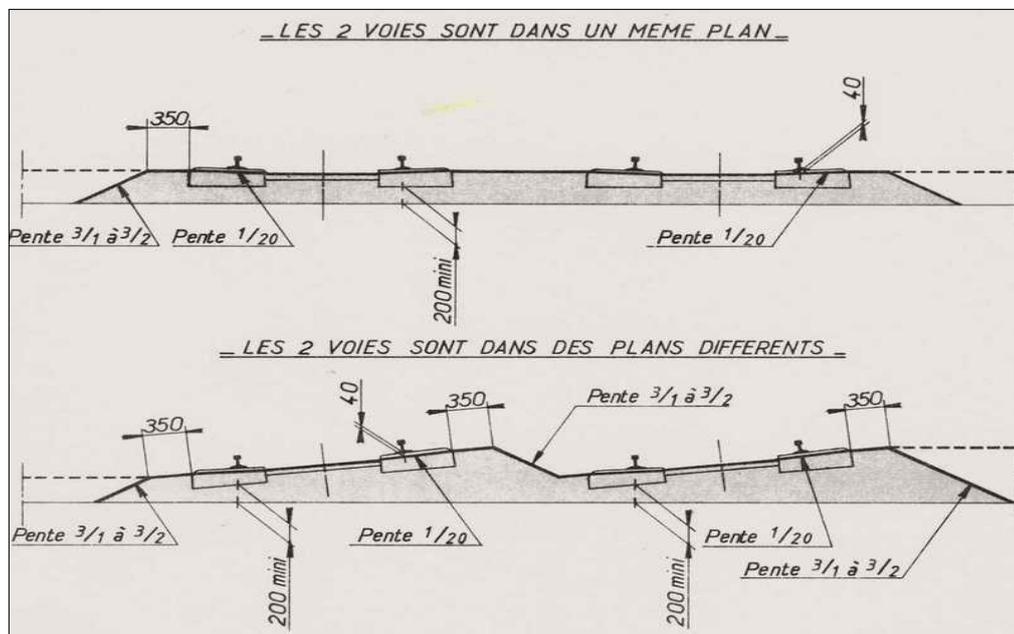


Figure 43. Profil de ballast plein

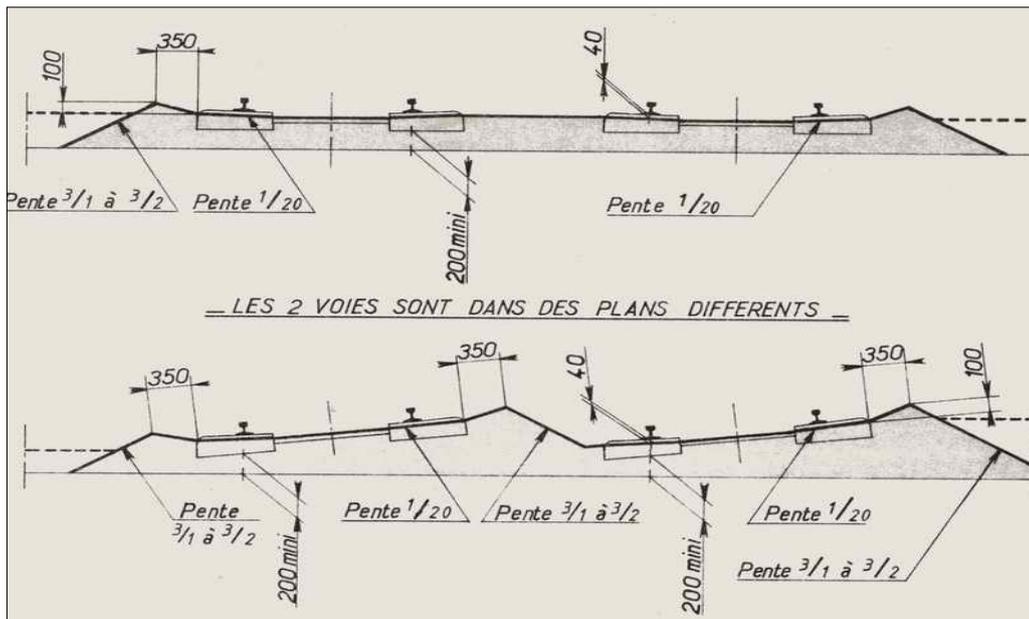


Figure 44. Profil de ballast renforcé

En France, les voies sont classées en fonction du tonnage qu'elles supportent. L'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) a établi une classification des lignes en fonction des charges supportées par l'infrastructure et du type de trafic :

- groupe 1 : $Tf2 > 120\ 000$
- groupe 2 : $120\ 000 \geq Tf2 \geq 85\ 000$
- groupe 3 : $85\ 000 \geq Tf2 \geq 50\ 000$
- groupe 4 : $50\ 000 \geq Tf2 \geq 28\ 000$
- groupe 5 : $28\ 000 \geq Tf2 \geq 14\ 000$
- groupe 6 : $14\ 000 \geq Tf2 \geq 7\ 000$
- groupe 7 : $7\ 000 \geq Tf2 \geq 3\ 500$
- groupe 8 : $3\ 500 \geq Tf2 \geq 1\ 500$
- groupe 9 : $1\ 500 \geq Tf2$

où $Tf2$ est le trafic fictif journalier calculé par une formule extraite de l'IN 198V4V fourni en annexe.

Les lignes LGV sont comprises dans les groupes 1 à 4. La ligne du RER A, objet de ce mémoire, fait partie du groupe 1.

Il existe trois catégories de ballast tenant compte des groupes UIC abordés précédemment :

- ballast C2 réservé aux lignes à grande vitesse ;

- ballast C4 réservé aux lignes classiques ;
- ballast C6 réservé aux lignes secondaires.

Les spécifications françaises pour ces trois catégories sont données dans le Tableau 4 :

Tableau 4. Spécification française du ballast d'après la norme EN 13450

	C2	C4	C6
LA	14	16	20
MDE	5	7	11
Catégorie de granularité	A	A	C ou F
Catégorie de grains fins	A	A	B
Catégorie de propreté/teneur en fine	A	A	C
Coefficient d'aplatissement	F115	F115	F120
Catégorie de pierres longues	A	A	B

1.1.2.5 Les appareils de voie

On limitera volontairement cette section aux grands principes permettant de comprendre les fonctionnalités, le vocabulaire et les technologies d'appareil de voie mises en œuvre à la RATP.

1.1.2.5.1 Généralités

L'exploitation des voies ferrées impose des moyens de liaison et de traversée des itinéraires que l'on désigne par le terme « appareil de voie » (ADV).

Les ADV sont des organes de la voie dont les coûts d'investissement et de maintenance sont élevés et qui peuvent compromettre sensiblement l'exploitation en cas de dysfonctionnement. En moyenne, le prix de pose (achat de l'ADV, coût de la main d'œuvre) au mètre de voie d'un ADV peut être dix fois plus élevé que celui de la voie courante comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 5. Comparaison du prix de pose de voie courante et d'appareil de voie au mètre linéaire de voie

<i>pose de voie ballast (100 ml)</i>			<i>pose d'un ADV (60 ml)</i>		
Main d'œuvre		22 835 €			166 150 €
Fournitures		34 000 €			176 000 €
Frais chantier	5%	1 142 €	5%		8 308 €
Frais généraux	12%	2 877 €	12%		20 935 €
Marge	4%	959 €	4%		6 978 €
Compte prorata	2%	360 €	2%		2 765 €
Total		62 173 €			381 135 €
Prix au ml de voie		622 €			6 352 €

Les deux appareils de voie élémentaires sont le branchement simple et la traversée [LEB 1947].

On ne présentera que les types d'ADV les plus courants. Cela suffira à comprendre la suite de notre étude.

Le branchement simple permet la convergence et la divergence de deux itinéraires dont l'un au moins comporte une courbe.

Il existe trois types de branchements :

- le branchement à déviation à droite : l'un des itinéraires est rectiligne, l'autre décrit une courbe située à la droite d'un observateur placé à l'origine de la divergence et faisant face au branchement (Figure 45).

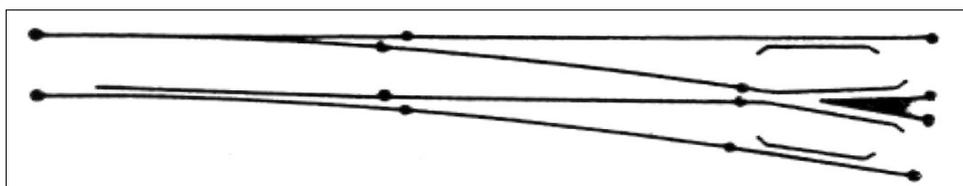


Figure 45. Branchement simple à déviation à droite

- le branchement à déviation à gauche (Figure 46).

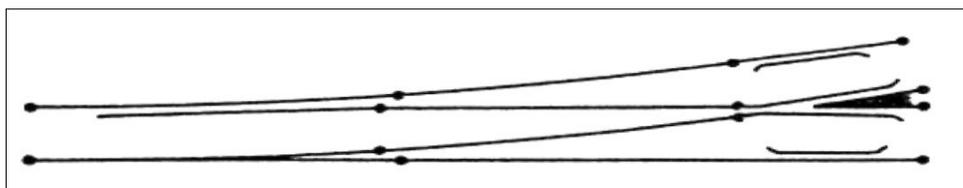


Figure 46. Branchement simple à déviation à gauche

- le branchement symétrique : les deux itinéraires s'écartent symétriquement par rapport à la branche commune (Figure 47).

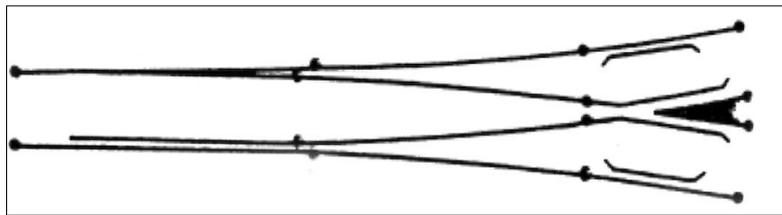


Figure 47. Branchement symétrique

La traversée oblique (TO) est l'appareil de voie permettant le franchissement d'un itinéraire par un autre (Figure 48).

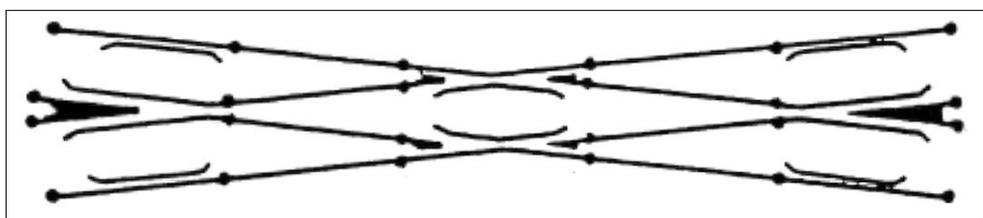


Figure 48. Traversée oblique

Tous les autres appareils de voie, présentés par la suite, sont le fruit de combinaison de deux ou plusieurs ADV élémentaires. On ne citera que la communication, combinaison de deux branchements simples, qui permet de relier entre eux deux itinéraires principaux (Figure 49).

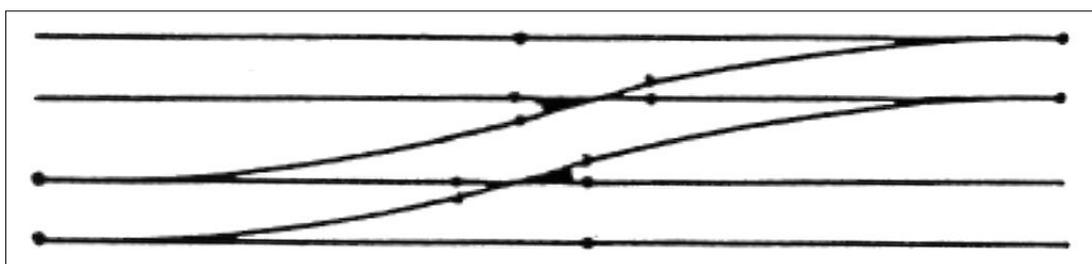


Figure 49. Communication composée de branchements simples

I.1.2.5.2 Géométrie d'un branchement simple

Le branchement simple est composé de trois parties (Figure 50) :

- la partie aiguillage (mobile) permettant la séparation des deux itinéraires ;
- la partie croisement assurant l'intersection de deux rails de voies différentes ;

- la partie intermédiaire reliant les deux parties précédemment citées.

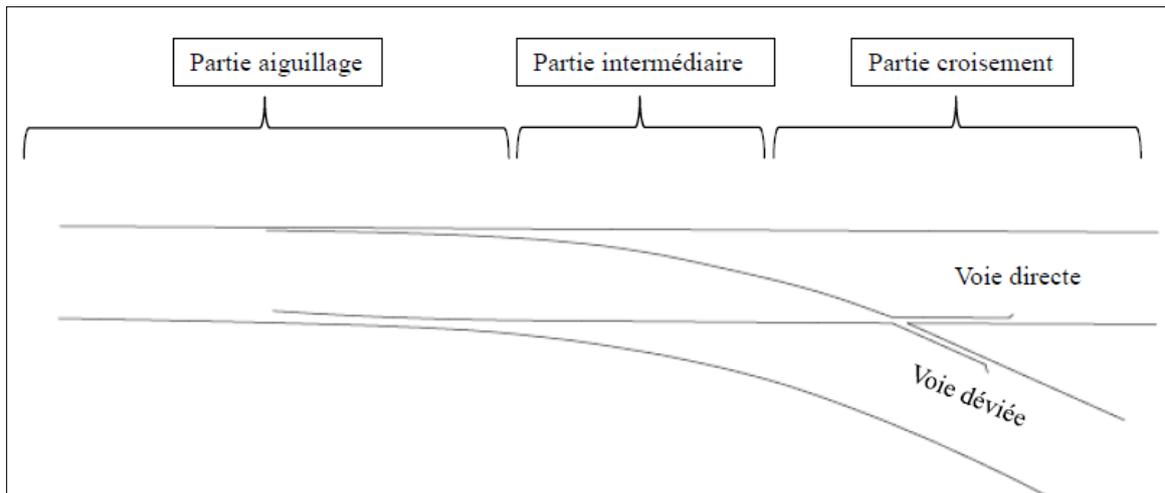


Figure 50. Différentes parties d'un branchement simple

Le branchement simple courant comporte une voie en alignement (généralement la voie directe) et une voie en courbe (généralement la voie déviée).

Le tracé d'un branchement simple (Figure 51) est caractérisé avant tout par son angle α de déviation entre les deux voies. Le point C appelé sommet de l'appareil est l'intersection entre l'axe médian de la voie directe et l'axe médian de la voie déviée défini au talon (point D).

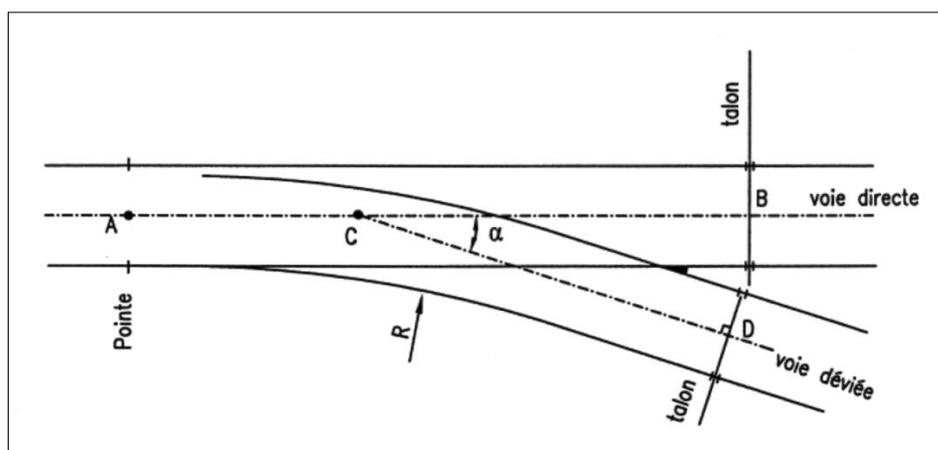


Figure 51. Géométrie d'un branchement simple

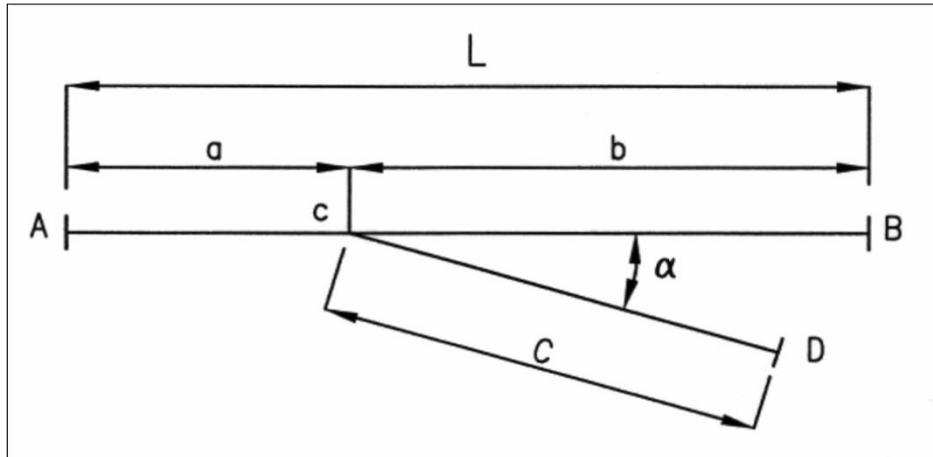


Figure 52. Représentation schématique d'un branchement simple

Dans certains cas, l'implantation d'un branchement simple courant, c'est-à-dire avec une voie directe en alignement, n'est pas possible. La solution est une implantation en courbe en utilisant un branchement dit « cintré ». Ce type de branchement est obtenu à partir d'un modèle classique auquel on a fait subir un cintrage (à la presse hydraulique) de l'aiguillage. On parle également d'appareil « enroulé ».

Ce cintrage peut se faire suivant deux directions :

- la courbe de la voie directe est dans le même sens que la voie déviée, on parle de cintrage intérieur ou CIN (Figure 53),

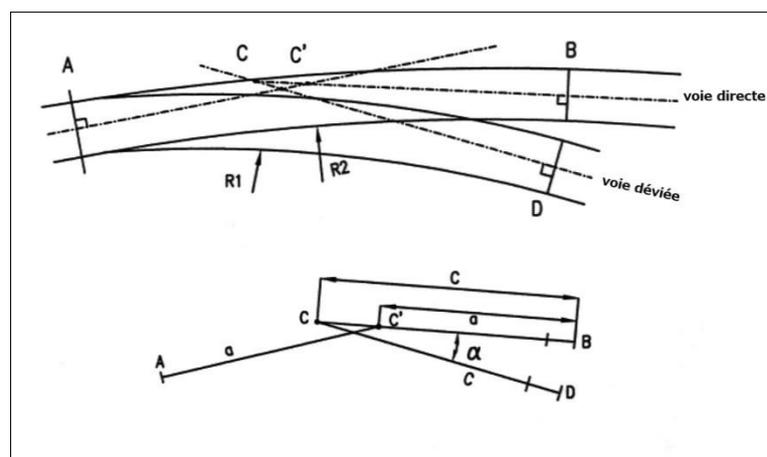


Figure 53. Branchement cintré intérieur CIN

- la courbe de la voie directe et celle de la voie déviée sont de sens opposés, on parle de cintrage extérieur ou CEX (Figure 54).

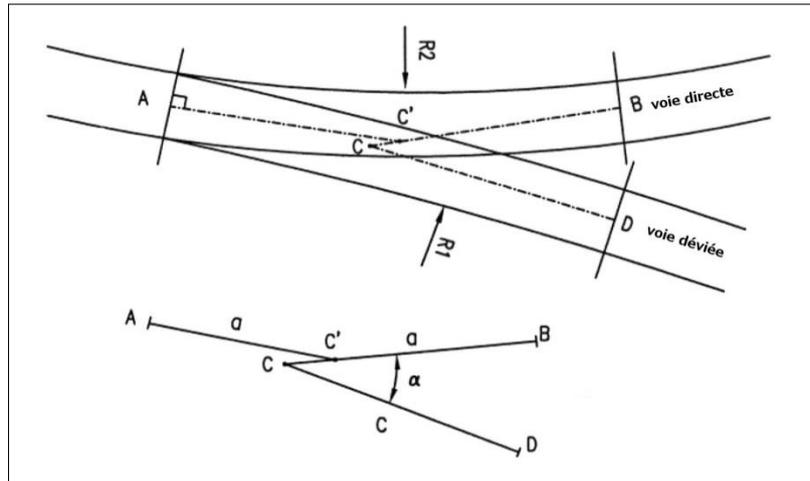


Figure 54. Branchement cintré extérieur CEX

On caractérise ces appareils par la valeur de la tangente du branchement d'origine associée à la valeur du rayon de cintrage de la voie directe (par exemple tg 0,11 CIN 600).

I.1.2.5.3 Vitesse de franchissement d'un appareil de voie

En voie directe, sauf pour les appareils enroulés, il n'y a pas de limitation de vitesse. Sur la voie déviée, en courbe, la vitesse est limitée pour des raisons de confort.

La force centrifuge en est la principale raison. Cette restriction de vitesse s'explique également par l'accélération latérale subie en pointe d'aiguille appelée « secousse ».

En résumé, selon les rayons des voies déviées d'un branchement simple courant, les vitesses de franchissement admissibles sont tabulées dans le Tableau 6:

Tableau 6. Vitesse de franchissement dans les voies déviées en fonction de la tangente

	TANGENTE	RAYON VOIE DÉVIÉE (M)	VITESSE (KM/H)
Profil 50E6	0,167	140	30
	0,13 EC ¹⁸	140	30
	0,13 C	190	30
	0,11 C	210	40
	0,11 L	280	40
	0,085	485	60
	0,05	1300	100
Profil 60E1	0,11 L	291	40
	0,085	489	60
	0,05	1387	100

Il y a tant à dire sur les appareils de voie qu'un mémoire ne permet pas d'en cerner tous les aspects. Retenons cependant que les appareils de voie doivent être conçus et implantés de manière à s'intégrer de manière optimale au tracé de voie. Une mauvaise conception ou implantation peut conduire à des défauts géométriques importants et des usures prématurées ayant pour conséquences soit un engagement de la sécurité ferroviaire soit un impact fort sur les conditions d'exploitation ou la disponibilité des installations.

I.2 CONCEPTION ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE LA VOIE

Les caractéristiques d'une ligne de chemin de fer sont :

- le type de ligne, soit voie unique ou double voie ;
- l'écartement de la voie ;
- le gabarit du matériel roulant déterminé à partir de la silhouette du matériel, en tenant compte des jeux latéraux et verticaux ;
- les profils en travers types qui définissent les dimensions transversales de la voie ;

¹⁸ Pour s'adapter aux contraintes de tracé notamment les raccordements sur des courbes de rayon serré, il existe sur les appareils de tangente 0,13 et 0,11 des alternatives liées à la longueur de la partie intermédiaire. Les modèles extra court (EC), court (C) et long (L) permettent de répondre à tous les types d'implantation.

- le gabarit de construction qui définit la section libre minimum des ouvrages et la distance minimum à la voie des obstacles isolés ;
- la déclivité maximale admise ;
- le rayon minimal admis pour les courbes.

I.2.1 Le tracé de voie en plan

Le tracé des voies, en plan comme en profil, est une problématique essentielle de la conception des infrastructures linéaires de transport, qu'elles soient routières ou ferroviaires. Pour la RATP qui conçoit et exploite des lignes de transports rapides en milieu urbain dense, environnement où les emprises sont rares en surface et les obstacles nombreux en sous-sol, les questions de tracé sont particulièrement critiques. Le tracé de voie a alors pour mission d'inscrire les nouvelles lignes dans ce paysage surchargé. C'est lui également qui détermine les distances¹⁹ et les vitesses maximales de parcours, données essentielles pour le transport urbain massifié de voyageurs [TRA 1974].

Le tracé de voie décrit par la conjugaison du plan et du profil la géométrie précise des voies dans l'espace. Il est ainsi le support du gabarit ferroviaire et par là un des éléments fondamentaux de la sécurité des circulations (risques de collision). Ceci implique que tous les autres systèmes du transport ainsi que le génie civil (tunnels, quais et autres obstacles) en dépendent. La conception générale d'une infrastructure neuve se fera donc autour de lui. Pour les infrastructures existantes, la maintenance s'assurera que le tracé ne s'écarte pas plus d'une certaine tolérance du tracé théorique. Un tracé équilibré réduira le coût d'usage de l'infrastructure. Enfin, le choix des courbures est déterminant pour la sécurité (risque de déraillement) et pour le confort des voyageurs. En résumé, le tracé de voie réalise l'optimisation du quadriptyque « inscription, vitesse, équilibre, confort » que l'on pourrait substituer par « coût de réalisation, offre de transport, coût de maintenance, qualité de transport ». La sécurité est volontairement laissée de côté. En effet, celle-ci n'est pas « optimisable » mais améliorable, toujours.

¹⁹ Dans les projets linéaires, les coûts de construction d'une infrastructure nouvelle sont essentiellement déterminés par le génie civil (tunnel en souterrain ou plateforme en surface). La minimisation des linéaires intéressent donc tout autant l'exploitant (temps de parcours le plus court possible) que la collectivité (coûts réduits de la construction).

1.2.1.1 Le dévers

Le tracé en plan d'une voie ferrée est constitué essentiellement d'alignements droits et d'arcs de rayons constants²⁰. L'alignement droit (AD) est la courbe la plus simple : les efforts sur la voie y sont faibles, ce qui augmente la longévité et en réduit les coûts de maintenance. C'est également la courbe qui permet la vitesse de circulation la plus grande. Les arcs quant à eux permettent de changer de gisement entre deux alignements droits pour éviter les obstacles naturels et réduire le coût de construction de la ligne. Des arcs de plus grand rayon possible sont recherchés pour là encore réduire les efforts dynamiques sur les voies et augmenter les vitesses de circulation.

Les véhicules en mouvement uniforme sur un alignement droit ne sont soumis qu'à leur poids²¹. En pleine courbe, les véhicules sont également soumis à l'action de la force centrifuge qui tend à les déporter vers l'extérieur de la courbe (Figure 55). Pour limiter l'effort transversal, on cherche à ramener la résultante de ces deux forces au plus près de la normale au plan de voie. On introduit pour se faire une surélévation du rail extérieur. C'est le dévers.

²⁰ La majorité des grands principes de tracé en plan des voies ferrées est également valable pour les infrastructures routières. Cette grande similitude fait qu'on parle parfois de projets linéaires pour généraliser les notions abordées.

²¹ Dans la réalité, les véhicules sont également soumis à des forces de frottement au niveau du contact rail / roue, à des forces de frottement aérodynamique et à une force de traction pour compenser ces dernières. On se place dans un cas « parfait » où ces forces n'interviennent pas.

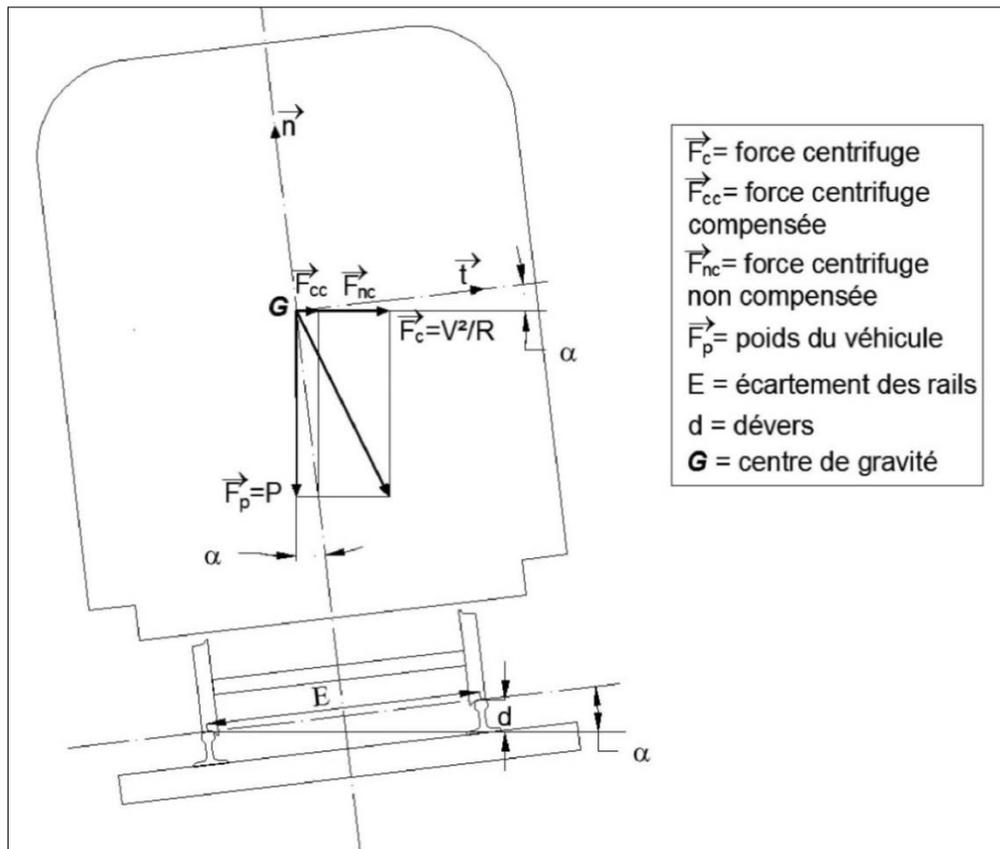


Figure 55. Véhicule en mouvement soumis à son poids et à la force centrifuge

Le dévers théorique d_{th} correspond à la surélévation du rail extérieur qui permet d'annuler la réaction transversale de la voie pour un véhicule en mouvement dans une courbe. En se référant à la figure, on voit que cela revient à annuler la composante \vec{F}_{nc} de la force centrifuge. On peut alors écrire, avec m la masse du véhicule, g l'accélération de la pesanteur et α l'inclinaison du plan de roulement :

$$\alpha \ll 1 \Rightarrow \tan(\alpha) \approx \alpha = \frac{F}{P} = \frac{V^2}{R} \text{ et } \sin(\alpha) \approx \alpha = \frac{d_{th}}{E}$$

On en déduit la valeur du dévers théorique :

$$d_{th} = \frac{E \cdot V^2}{R \cdot g}$$

En prenant une voie d'écartement nominal $E=1500$ mm, on obtient avec V en km/h et R en m :

$$d_{th} = 11.8 \cdot \frac{V^2}{R}$$

On remarque que le dévers théorique est inversement proportionnel au rayon. Cette propriété se révèle essentielle dans la définition des courbes de raccordement en plan.

1.2.1.2 Introduction des courbes de raccordement

Considérons désormais ce qui se passe si l'on construit le tracé en plan de la ligne à l'aide d'alignements droits et d'arcs tangents. On constate d'abord qu'au passage d'un alignement à une pleine courbe²² se crée un échelon de force transversale qui n'est autre que la force centrifuge. Si l'on compensait instantanément cette force par l'introduction du dévers théorique associé, on aurait localement non plus un échelon de force transversale mais une marche... dans le rayon de courbure de la voie et l'accélération transversale. Les caractéristiques d'un tel raccord sont présentées à la Figure 56:

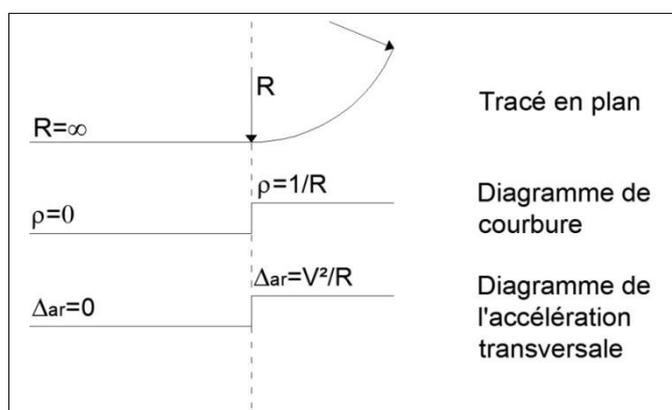


Figure 56. Courbure et accélération transversale d'une voie en « cercle tangent »

En réalité, le taux de variation du rayon de courbure au droit de la transition est très fort mais non infini. Ce tracé est utilisé dans les faits, pour les voies d'atelier notamment, mais ne permet que de très faibles vitesses de parcours²³.

Pour les voies exploitées à vitesse normale, on voit la nécessité de rajouter une dernière catégorie de courbes pour la réalisation des tracés en plan. Ces courbes, appelées courbes de transition ou encore raccords progressifs, viennent s'intercaler entre les alignements droits et les arcs pour permettre un passage doux du matériel roulant entre les deux.

²² Cette expression désigne une courbe à rayon constant.

²³ Au tout début du chemin de fer, le tracé en plan était constitué de la sorte également. Une première solution au problème a constitué en la répartition du dévers entre l'alignement droit et la courbe sur des longueurs égales. Ceci n'était cependant pas satisfaisant et les chocs subis par la voie au voisinage du raccord tangent ont poussé les concepteurs vers la solution des raccords décrits ci-après.

1.2.1.3 Les courbes de transition

Il existe plusieurs courbes de transition utilisées sur des réseaux étrangers. Seule sera présentée ici la courbe de transition la plus couramment utilisée notamment en France à la RATP et à la SNCF. Il s'agit de la clothoïde.

On a vu plus haut qu'un véhicule en mouvement uniforme subit une accélération transversale proportionnelle à la courbure de la voie. Une courbe de transition doit donc permettre le passage le plus doux possible d'une voie de courbure nulle (AD) à un rayon de courbure constant en plein cercle et cela, de façon continue.

On a vu également que l'on introduit en pleine courbe un surhaussement de la file extérieure appelé dévers afin de minimiser les efforts latéraux subit par les voies et les passagers. Une courbe de transition doit également permettre une montée progressive d'un dévers nul dans l'AD au dévers du plein cercle. Pour plus de simplicité, on cherche donc une courbe de transition qui permette une montée linéaire du dévers. La courbe suivante répond à cette condition :

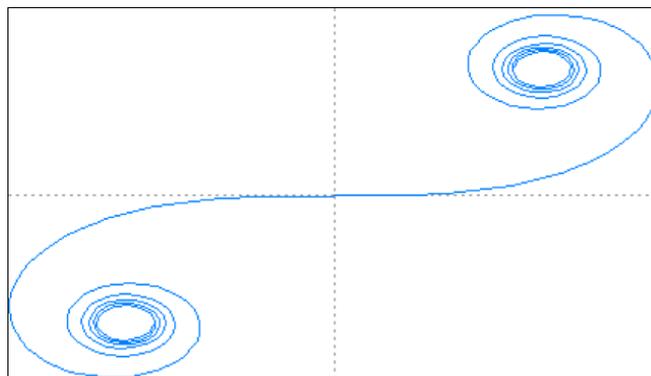


Figure 57. Raccord progressif de type clothoïde

Les clothoïdes (Figure 57), appelées également spirales de Cornu, sont les courbes planes dont la courbure est proportionnelle à l'abscisse curviligne [BRU 1987].

On ne présentera que ce type de raccordement progressif car il constitue la meilleure solution. En effet, grâce à la relation linéaire entre la courbure et l'abscisse curviligne, on peut augmenter le dévers de façon proportionnelle à la longueur de la courbe parcourue par le train. On notera également que c'est la seule famille de courbe de raccord progressif dont la courbure est continûment croissante, ce qui valide son usage quels que soient les rayons à raccorder.

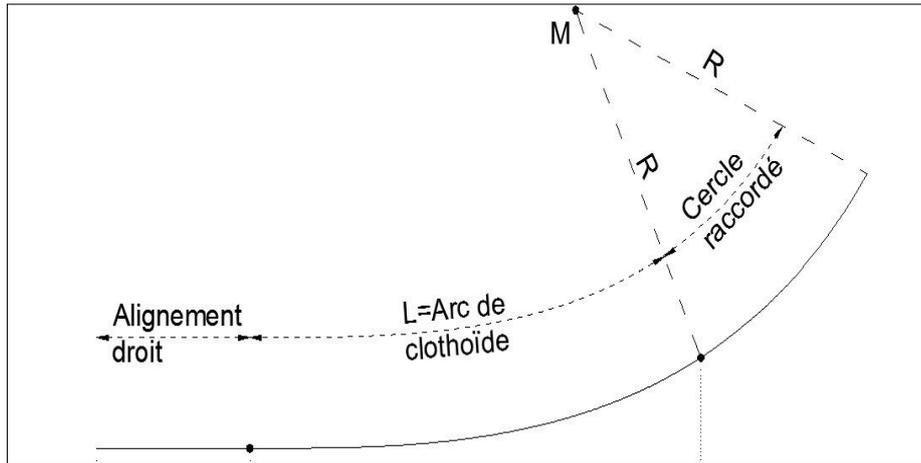


Figure 58. Raccord par arc de clothoïde

I.2.2 Le tracé de voie en profil

Dans cette section, seuls les aspects du profil relatifs à la déclivité (pente ou rampe) sont présentés. Les conséquences du dévers sur le profil en long et les différentes conceptions qui en découlent seront laissées volontairement de côté.

Sur une rampe de pente α , un véhicule à l'arrêt doit produire pour démarrer ou franchir une rampe une accélération supérieure à la composante de l'accélération de la pesanteur s'opposant à son déplacement et égale à $g \cdot \alpha$ (Figure 59).

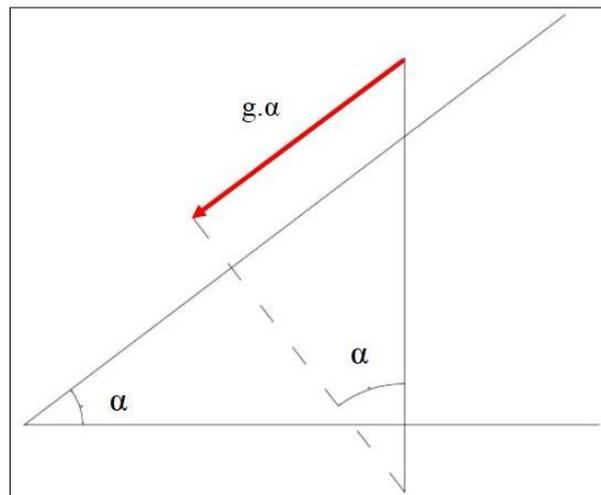


Figure 59. Composante de l'accélération de la pesanteur en déclivité

Un matériel roulant classique pour un roulement fer sur fer, conçu pour avoir des accélérations ou des décélérations de $1,35 \text{ m/s}^2$ peut dans la théorie circuler dans toutes les déclivités de pente α inférieures à $\frac{1,35}{g}$

En prenant $g=10 \text{ m/s}^2$:

$$\alpha < 0.135$$

C'est-à-dire une pente ou rampe de 135 ‰ (135 mm/m).

En pratique, la déclivité doit être limitée à des valeurs bien inférieures du fait de la valeur assez faible du coefficient de frottement rail / roue (0,15 environ). Cette valeur diminue fortement en cas d'évènements extérieurs tels que les intempéries, un graissage accidentel ou la présence de feuilles mortes en automne. Ainsi, la déclivité est limitée à 40 mm/m sur le réseau RER, ou par dérogation exceptionnelle à 50 mm/m sur le métro fer. Cette contrainte est l'un des paramètres ayant conduit au développement du métro sur pneumatiques.

Les quais, les voies de manœuvres, les terminus et les voies de garage sont dans la mesure du possible à plat ou en déclivité inférieure ou égale à 2 mm/m pour éviter la dérive d'une rame dont les freins ne seraient pas bloqués. Sur le RER, cette valeur est limitée à 1,3 mm/m pour les nouvelles voies et après travaux de maintenance lourde telle qu'un renouvellement de voie ballast (type RVB).

Enfin, pour raccorder deux sections de voie de déclivités différentes, on a recours au raccordement circulaire. Le rayon de ce dernier est choisi afin que l'accélération centrifuge verticale γ_v qui s'ajoute à la pesanteur dans le cas d'un raccordement concave (en cuvette) et qui se retranche dans le cas d'un raccordement convexe (dos d'âne), ne génère pas d'inconfort pour les voyageurs.

Il est admis que sur le réseau RER, le rayon minimum théorique des raccordements circulaires est :

- $R_{mini} = 2200 \text{ m}$ pour un raccordement concave,
- $R_{mini} = 1600 \text{ m}$ pour un raccordement convexe.

En pratique, pour les lignes nouvelles, dans la mesure du possible, on utilise un rayon de 2500 m pour le métro et 5000 m pour le RER.

I.3 DÉGRADATION ET MAINTENANCE

I.3.1 Généralités

Les circulations ferroviaires sollicitent fortement les installations. Le rail est soumis à des contraintes importantes et répétées au voisinage du contact rail / roue. Les charges dynamiques, les efforts de freinage et d'accélération, les intempéries cumulées avec le phénomène de glissement entre la roue et le rail, entraînent une dégradation du rail qui aboutit après un certain temps à la nécessité de son remplacement. Des dégradations accidentelles lors de travaux participent également à l'affaiblissement et à la détérioration de la voie. Cette lutte continuelle contre les éléments extérieurs constitue l'entretien ou la maintenance. Celle-ci doit être assurée par des équipes dont la compétence permet de garantir la sécurité ferroviaire. Les défauts seront abordés dans leur ordre d'apparition.

I.3.2 Dégradation des rails

La contrainte au voisinage du point de contact entre le rail et la roue dépassant la limite élastique, conjuguée au phénomène de glissement, entraîne l'arrachement microscopique de matière générant à terme une usure du rail et de la roue. L'usure varie en fonction du tracé de la voie, du type de matériel roulant et des conditions d'exploitation.

En alignement droit et hors zone de freinage et d'accélération, il y a peu d'efforts latéraux et peu de glissements. L'usure selon la direction verticale est très lente et il n'y a quasiment pas d'usure dans la direction horizontale.

La valeur de l'usure est, en première approximation, proportionnelle au tonnage supporté. Un ordre de grandeur couramment admis est de 1 mm pour 100 millions de tonnes. Ainsi, pour le RER A dont le tonnage journalier dans le tronçon central avoisine les 200 000 tonnes par jour²⁴, l'usure verticale est de 2 mm pour 3 ans environ. Cela correspondrait à une durée de vie théorique voisine de 30 ans si l'on considérait une usure maximum admissible de 20 mm. Mais les rails sont en général remplacés bien avant en raison d'autres pathologies qui seront listées plus loin.

²⁴ Chiffres du bureau des transports RATP de 2009.

En courbe, sur la file extérieure (file haute en raison du dévers), la valeur de l'effort du contact entre le rail et la roue est très élevée en raison de la force centrifuge. Sur la file intérieure, il existe un effort horizontal de frottement pouvant atteindre 1 tonne. Ces efforts s'ajoutent aux efforts verticaux et au phénomène de glissement rail / roue importants sur la table de roulement de la file intérieure et sur le flanc intérieur du champignon de la file extérieure (ou la face active du rail). Cela se traduit par des usures rapides aux profils différents entre le rail de la file extérieure et le rail de la file intérieure (Figure 60).

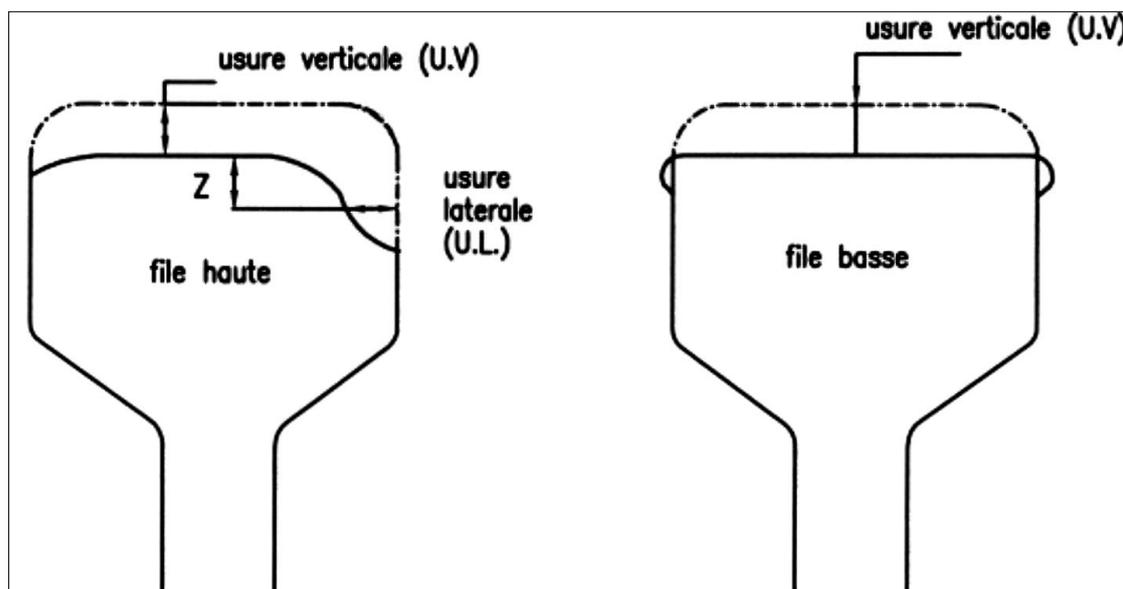


Figure 60. Profils d'usure de rails en courbe, file haute et file basse

La durée de vie du rail est donc fortement réduite en courbe. Plus la courbe est serrée, plus les efforts latéraux et les glissements sont importants. Sur le RER A, la durée de vie du rail en courbe peut varier de 5 à 20 ans selon le rayon de la courbe et les vitesses de circulation. Cette durée se trouve même réduite à 2 ans pour les courbes critiques dont les rayons sont inférieurs à 700 mètres.

D'autres phénomènes obligent à programmer des travaux de renouvellement de rail alors même que celui-ci n'est pas à limite d'usure. Cela se traduit par la naissance et le développement de fissures de fatigue sur la surface de contact. Ces fissures finissent par engendrer en surface du *head check* (Figure 61), du *shelling* (Figure 62), de l'usure ondulatoire (Figure 63), du *squat* (Figure 64), et d'autres défauts répertoriés dans la notice SNCF NG EF 2 C 33 N°2.



Figure 61. *Head check*

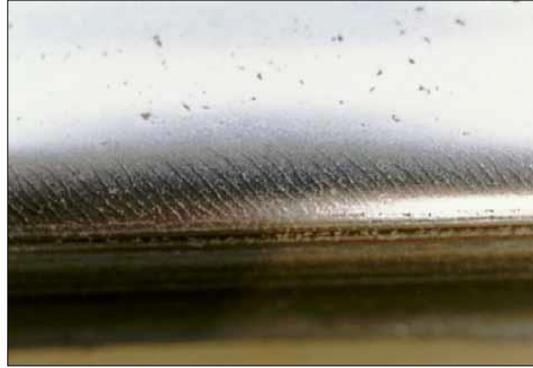


Figure 62. *Shelling*



Figure 63. *Usure ondulatoire*



Figure 64 *Squat*

Ces défauts de fatigue, s'ils ne sont pas traités, aboutissent à des ruptures de rail.

Pour anticiper l'apparition de ruptures pouvant engager la sécurité ferroviaire et perturbant fortement l'exploitation, la RATP ainsi que la plupart des gestionnaires d'infrastructures se sont dotés de trains d'auscultation par ultrasons. Ils permettent de détecter les défauts internes dans le rail et donc de les corriger avant la ruine.

Le train de mesure RATP (appelé V365) ausculte la voie de façon cyclique à raison d'un passage toutes les deux semaines dans le tronçon central du RER A et un passage toutes les trois semaines sur le reste de la ligne.

I.3.3 Maintenance des rails

Les défauts de surface (*head check*, *shelling* et usure ondulatoire) font l'objet d'une maintenance préventive qui vise à les atténuer et à prolonger la durée de vie du rail en évitant son renouvellement.

La suppression de ce type de défauts est réalisée à l'aide d'un train de meulage (Figure 65) équipé de meules rotatives (16, 24, 32 ou 48 meules selon les modèles de machine).



Figure 65. Photo d'un train de meulage SPENO

Ce train spécialisé permet :

- un reprofilage des rails avec ou sans profil spécifique (appareil de voie),
- un meulage de profil de rails asymétriques notamment dans les courbes de petit rayon.

Le meulage de rail génère d'importantes gerbes d'étincelles, ce qui nécessite une attention particulière dans les gares (détritus pouvant prendre feu) et dans les zones où la voie est équipée de traverses bois. Pour limiter le risque d'incendie, le train de meulage est donc équipé de pare-étincelles et d'un système d'arrosage.

Pour le contrôle de la qualité du reprofilage, il dispose également d'un système de mesure du profil en long et en travers du rail pour contrôler la conformité du meulage en cours de réalisation et après achèvement.

Le train de meulage enlève en moyenne 2 à 3 centièmes de mm par passe pour un retrait de matière moyen de 0,3 mm (d'après la politique de maintenance RATP).

Le meulage de l'usure ondulatoire par meules oscillantes contribue à la réduction des nuisances sonores aux abords des habitations et dans les trains. La réduction des nuisances peut atteindre 12 dB [LIC 2009].

Il a été constaté qu'un meulage préventif réalisé sur un rail neuf pour en supprimer la calamine et les défauts de surface permet de retarder l'apparition des défauts de surface.

Il existe également des trains de fraisage à grand rendement qui permettent d'enlever jusqu'à 1,5 mm de matière en une seule passe.

I.3.4 Dégradation des systèmes d'attaches

Les sollicitations dynamiques en courbe génèrent des efforts importants qui nuisent à la tenue des attaches. Les désordres apparaissent essentiellement sur les boulons de fixations (boulons-tirefonds, et boulons à came voir §I.1.2.2.2 Traverses béton)

Quel que soit le type de boulon, des ruptures ont été constatées, particulièrement dans les courbes de faible rayon. Les boulons sont rompus à la limite de l'écrou (Figure 66). La fissuration s'amorce à partir du fond de filet par des contraintes de flexion s'ajoutant aux contraintes de traction dues au serrage. Cette flexion s'explique par le basculement du rail, le côté extérieur du patin s'enfonçant et le côté intérieur se soulevant.

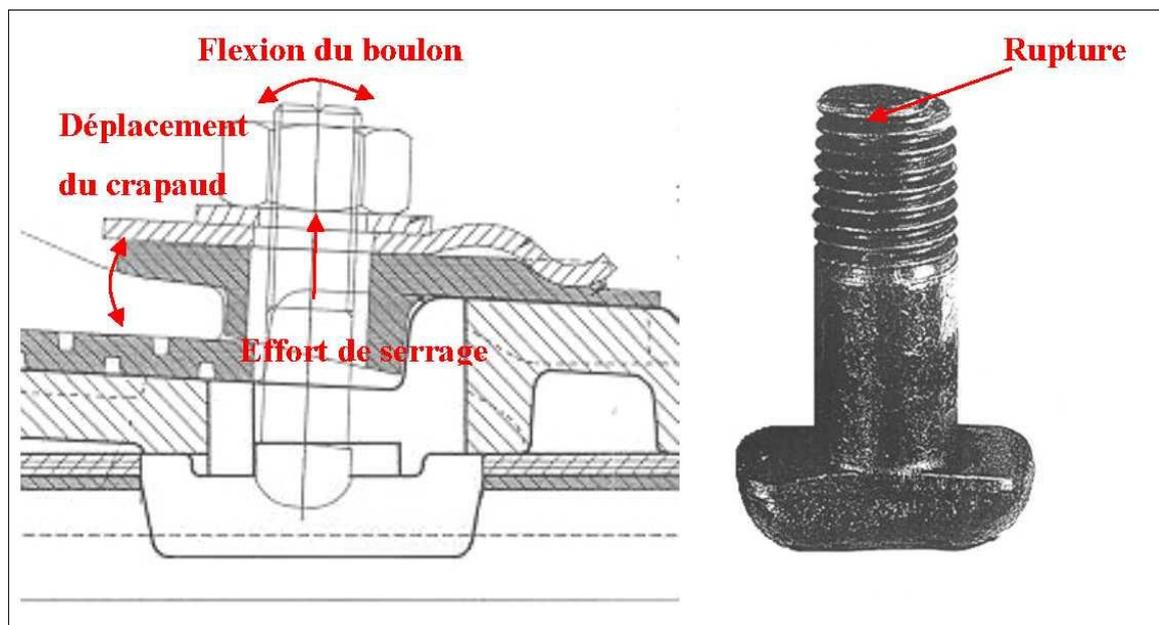


Figure 66. Sollicitation et rupture d'un boulon à came

Au-delà de 3 attaches consécutives rompues, l'instruction technique 04 RATP impose une intervention pour corriger le signalement.

Sur les zones équipées de traverses bois, les principaux désordres rencontrés sont des tirefonds « fous ». Ce terme signifie qu'une ovalisation du trou ou un arrachement des filets dans la traverse ne permet plus d'assurer un effort de serrage satisfaisant.

I.3.5 Maintenance des attaches

L'état général des attaches (efficacité du serrage, intégrité de l'attache, etc.) est contrôlé lors de parcours à pied réalisés par les équipes de maintenance toutes les deux semaines. Ces parcours font l'objet de signalements qui provoquent, en fonction du degré de vétusté, des opérations de remise en état.

Chaque année, des campagnes d'expertise, plus poussées, de l'état des attaches sont réalisées. Cela consiste, par échantillonnage, à démonter une attache pour en contrôler l'efficacité de serrage, le degré d'usure de la butée isolante, de la lame élastique et de la semelle sous rail. Ainsi en 2015, 25 kilomètres de voie ont été expertisées (d'après les chiffres du gestionnaire d'infrastructure) dont 30 % ont fait l'objet de travaux de remise en conformité.

I.3.6 Dégradation de la géométrie de la voie

Comme on l'a indiqué précédemment, une voie correctement nivelée et dressée doit avoir des dévers, nuls en alignement, constants et égaux en pleine courbe et en progression linéaire dans les raccords en clothoïde. La déclivité doit être constante ou à variation progressive dans les raccordements de profil.

Les irrégularités de compactage du ballast et des efforts transmis par les traverses provoquent une dégradation de la géométrie de la voie. Les défauts qui apparaissent ont tendance à s'amplifier avec le temps. Cela nuit à l'intégrité du matériel roulant et aux comforts des voyageurs.

Non corrigés, ces défauts peuvent engager la sécurité ferroviaire et perturber la circulation. En effet, l'instruction technique 04 prévoit, en cas d'atteinte de seuil²⁵, un ralentissement de la vitesse commerciale de 90 km/h à 30km/h, voire même un arrêt de circulation s'il y a un risque de déraillement.

²⁵ Gauche court compris entre 15 mm et 17 mm application d'une limitation temporaire de vitesse.

I.3.7 Maintenance de la géométrie de la voie

Comme pour la maintenance des rails, un train de mesure de la géométrie est utilisé sur tous les réseaux ferroviaires (V 355 à la RATP, MAUZIN à la SNCF). Ce véhicule, dont le cycle est de deux passages par an à la RATP, permet de mesurer :

- l'écartement de la voie (mise en évidence de sur ou sous-écartement) ;
- dressage de la voie (mise en évidence de défauts de dressage pouvant générer un engagement du gabarit ou une déformation par flambement de la voie et diminuer le confort des voyageurs) ;
- nivellement de la voie (mise en évidence de flash²⁶ ou de gauche²⁷) ;
- le dévers ;
- le profil du rail et les usures verticales et horizontales de celui-ci.

Les données extraites permettent de corriger les défauts urgents (par bourrage manuel) et de programmer les campagnes d'entretien de la géométrie de la voie (bourrage mécanique lourd et stabilisation dynamique).

I.3.7.1 Bourrage manuel

Il s'agit d'une opération de maintenance d'urgence visant à corriger les défauts de nivellement. La méthode consiste à lever la voie à l'aide de crics à la hauteur souhaitée et à compacter le ballast sous les traverses afin qu'elles conservent cette altimétrie après la dépose des crics.

I.3.7.2 Bourrage mécanique lourd

Le bourrage manuel ne permet pas, en termes de rendement et d'efficacité, d'envisager des reprises de nivellement sur de grandes longueurs. Pour ce faire, il convient d'utiliser des moyens plus puissants et mécanisés la bourreuse mécanique lourde (Figure 67).

²⁶ Affaissement simultané des deux files de rails.

²⁷ Affaissement d'une file de rail par rapport à l'autre. Ce désordre peut causer le déchargement d'une roue du train et provoquer un déraillement.



Figure 67. Photo d'une bouresseuse mécanique lourde

Ce véhicule spécialisé est une machine automotrice permettant de réaliser l'ensemble des opérations suivantes :

- mesure en temps réel de la position de la voie ;
- relevage de la voie ;
- ripage²⁸ ;
- bourrage ou compactage ;
- régalage²⁹ ;

Pour ce faire, ces machines sont équipées d'instruments de mesure qui relèvent la géométrie de la voie existante, calculent les corrections à appliquer et commandent directement les dispositifs de relevage et de ripage.

Les relevages et ripages sont effectués par des galets (Figure 68) ou des pinces actionnées par des vérins prenant appui sur les rails entre deux essieux de la machine suffisamment écartés.

Le bourrage est effectué par un ou deux groupes de bourrage équipés de bourroirs (Figure 67) en acier. Ces derniers plongent dans le ballast et appliquent une énergie de

²⁸ Ce terme désigne la correction en planimétrie de la voie.

²⁹ Ce terme désigne l'opération de nettoyage du ballast afin de faciliter l'accessibilité aux attaches.

consolidation transmise autour de 35 Hz. Cette vibration orientée permet d'assurer le compactage souhaité sous la traverse.



Figure 68. Représentation des galets de relevage et des bourroirs

Pour finir, ces machines présentent un rendement moyen avoisinant les 1000 mètres par heure. Ce rendement est très souvent contrarié par l'obligation de déposer les équipements de signalisation qui pourraient être endommagés lors du bourrage. Un temps incompressible de dépose et repose des équipements limite le rendement machine à 1000 mètres sur un poste de 3 heures.

1.3.7.3 Stabilisation dynamique des voies

Le bourrage mécanique n'agissant qu'au voisinage des têtes de traverses, le compactage du ballast n'est donc pas homogène ce qui a pour conséquence de limiter dans le temps l'efficacité du bourrage. L'hétérogénéité du compactage ne permet pas de garantir la cohésion du matériau et génère des tassements différentiels qui s'accroissent de plus en plus au passage des trains. Un groupe hydraulique (Figure 69) saisit les deux files de rail à l'aide de pinces à galets et fait vibrer horizontalement le châssis de la voie en appliquant une pression verticale à l'aide de vérins hydrauliques.

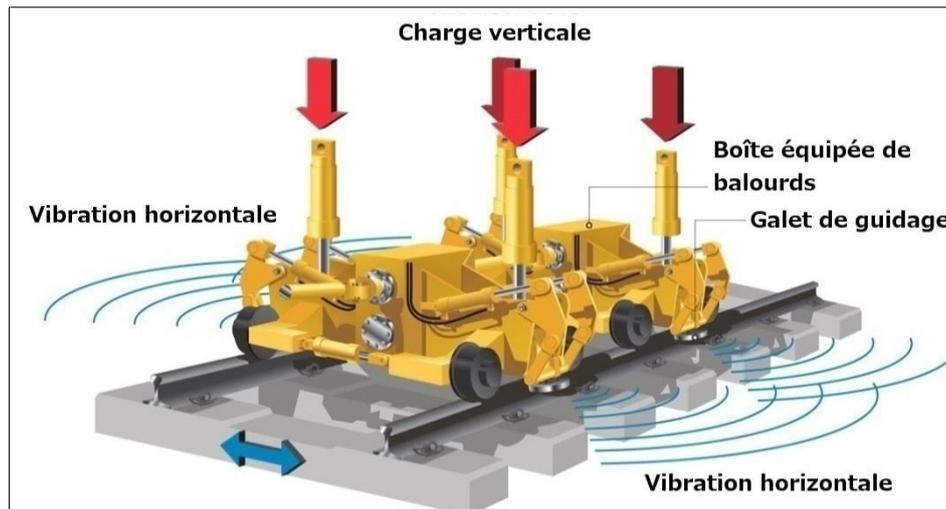


Figure 69. Schéma de principe de la stabilisation dynamique

La stabilisation dynamique permet de stabiliser et d'homogénéiser la totalité de la couche de ballast. Le compactage est réalisé dans les trois directions, permettant d'augmenter la résistance transversale et longitudinale du ballast. Sur les chantiers de renouvellement de voie type suite rapide dont il sera question prochainement, la stabilisation dynamique est réalisée de pair avec le bourrage mécanique lourd pour une meilleure efficacité.

Pour terminer, les chiffres de la maintenance du RER A sont présentés dans le Tableau 7 pour l'année 2014. Il en ressort clairement que les opérations de maintenance sont conséquentes pour maintenir les infrastructures dans les conditions de sécurité imposées par l'exploitation très dense de la ligne. Le RER A ne « vieillit » pas comme une ligne classique. Cela nécessite un coût de maintenance supérieur de 30 % et oblige la RATP à renouveler la ligne pour absorber l'augmentation du tonnage dans les années à venir.

Tableau 7. État quantitatif des opérations de maintenance sur le RER A en 2014

ACTIVITÉ DE MAINTENANCE	QUANTITÉ
Renouvellement de rail LRS	42000 mlv*
Renouvellement de cœur	29 u
Renouvellement d'aiguillage	22 u
Renouvellement complet d'appareil de voie	7 u
RVB	1200 mlv
Renouvellement de traverses	4668 mlv
Expertises d'attaches	25000 mlv
Révision d'attaches	7400 mlv
Révision d'appareil de voie	299 mlv
Bourrage	37000 mlv

* mètre linéaire de voie

I.4 MÉTHODES DE RENOUVELLEMENT LOURD DE VOIE

Dans cette partie, on réalisera un état de l'art en présentant les méthodes et moyens de renouvellement lourd des voies dans le cadre d'opérations de maintenance patrimoniale.

Il sera question des principales méthodes les plus couramment utilisées sur les réseaux européens afin de comprendre la pertinence de la solution technique retenue pour ce chantier d'envergure. On présentera les grands principes sans préciser tous les modèles de trains spécialisés développés par des sociétés concurrentes.

Enfin, cette partie s'orientera exclusivement sur l'opération de dégarnissage. En effet, les opérations de reconstruction de voie ne sont pas sur le chemin critique et ne nécessitent pas d'études approfondies. Le terrassement et la logistique du ballast sont les deux éléments dimensionnants d'un chantier de renouvellement lourds des voies.

I.4.1 Dégarnisseuse transversale

La dégarnisseuse à chaîne (Figure 70) est une machine automotrice, montée sur boggie équipée d'une part de dispositifs permettant de soulever la voie et d'autre part d'un outil à

chaîne de type drague qui, sous la voie surélevée, extrait le ballast pollué de la plateforme. Une dégarnisseuse est toujours jumelée à une unité de criblage qui permet de recycler le ballast pour le réinjecter dans la voie. Les éléments de granulométrie adéquate (fraction 25/50) sont remis dans la voie, le reste des produits de dégarnissage sont stockées dans des wagons équipés de bandes transporteuses. La profondeur de dégarnissage sous voie en une seule passe peut atteindre jusqu'à 30 cm de profondeur sous NIT.



Figure 70. Photo d'une dégarnisseuse à chaîne PLASSER&THEURER

La chaîne est équipée de pelles de dégarnissage avec doigts gratteurs. Le rendement de la chaîne de dégarnissage dépend des éléments suivants :

- vitesse de la chaîne,
- types de pelles de dégarnissage (nombre de doigts, matériau choisi, etc.)
- section du couloir de monté du ballast,
- puissance d'entraînement de la chaîne.

Les rendements classiques des chaînes de dégarnissage est compris entre 600 et 1000m³/h. Le rendement global d'une dégarnisseuse dépend également de la vitesse de criblage et de mise en œuvre du ballast traité. On retiendra un rendement moyen de 700 mètres par poste de 8 heures.

I.4.2 Dégarnisseuse longitudinale

Ce mode d'excavation a été développé pour améliorer la méthode du dégarnissage transversal. En effet, la méthode précédemment citée souffre d'un problème de gabarit ne

permettant pas une généralisation dans toutes les configurations de voie (tunnel, quai, voie unique, etc.). La chaîne passant sous la voie impose l'utilisation d'espace à proximité de celle-ci. La solution est donc de réaliser le dégarnissage dans le sens de la voie (Figure 71). La dégarnisseuse de type DRL 21 (du fabricant SCHEUCHZER) est équipée de quatre étroites chaînes à godets qui excavent le ballast parallèlement à la voie. Cette méthode, ne nécessitant pas de sur-largeur, impose un ordonnancement particulier des tâches puisque la dépose des anciennes traverses doit être réalisée en amont. La dégarnisseuse s'accompagne donc d'une unité déposant les traverses bois en amont et d'une unité d'injection de nouvelles traverses en aval.



Figure 71. Photo d'une chaîne à godet et excavation longitudinale

La profondeur de dégarnissage est limitée à 30 cm en une passe.

Le rendement global de cet engin dépend principalement du linéaire de traverses déposées en amont du front de dégarnissage. Sur un poste de 8 heures, le rendement moyen varie entre 300 et 400 mètres.

I.4.3 Train PUSCAL

Le train type PUSCAL 2 est un train usine qui permet le renouvellement complet d'une voie ainsi que la plateforme. Il est conçu de manière à pouvoir travailler sur une voie sans engager le gabarit de la voie contigüe. L'excavation est assurée par une vis sans fin (Figure 72). Les déblais sont acheminés dans des wagons de stockage. Des bennes de 4 m³ permettent d'acheminer des matériaux d'assises (sable, grave, etc.) ou du ballast de sous-couche (Figure 73). Une lame vibrante permet la mise en place, le réglage précis (avec ou sans pente pour assurer le drainage) et le compactage des matériaux (Figure 74). La voie

neuve est stockée par panneau de 18 mètres sur le train. Ils sont acheminés à l'aide d'un portique qui se déplace sur toute la longueur du train. Ce train, à la base développé pour les travaux d'assainissement, peut dégarnir jusqu'à 1,30 mètres de profondeur. Il travaille par front de 18 mètres, la voie de part et d'autre de la poutre de 20 mètres doit être maintenue pour assurer le déplacement du train.

Le rendement moyen est d'un panneau de 18 mètres toutes les 45 minutes avec une mise en place d'une heure. Cela correspond à environ 150 mètres sur un poste de 8 heures.



Figure 72. Photo d'excavation à l'aide d'une vis sans fin



Figure 73. Photo de bennes basculantes



Figure 74. Photo de lame vibrante

I.4.4 Train aspirateur à ballast

Ce mode de dégarnissage (Figure 75) paraît à première vue intéressant car il permet de répondre aux contraintes environnementales telles que les émissions de poussière, le bruit et un dégarnissage précautionneux. Composé d'une ou deux buses d'aspiration, il peut également être utilisé pour approvisionner du ballast neuf. Les rendements compris entre 20 et 40 m³/h sont relativement faibles.



Figure 75. Photo de train aspirateur type VM 250 JUMBO

I.4.5 Engins de travaux publics et wagons spéciaux

Cette méthode consiste à utiliser des pelles mécaniques rail-route qui excavent et déposent les produits de dégarnissage directement dans des wagons auto stockeurs déchargeurs (WAD). Il s'agit d'une méthode courante de réalisation de travaux qui présente l'intérêt de pouvoir s'adapter aux singularités et aux aléas du terrain. Le rendement moyen d'une pelle rail-route est d'environ 80 m³/heure, il suffit donc de multiplier le nombre de pelles pour multiplier les rendements. Il existe plusieurs types de WAD (Tableau 8) en fonction de leur capacité de stockage. Ces wagons sont intéressants car ils peuvent être vidés en quelques minutes et de façon autonome.

Tableau 8. Type de wagon auto stockeur déchargeur (WAD)

TYPE	MFS 40	MFS 100	MFS 250
Capacité de stockage	40 m ³	68 m ³	100 m ³

I.4.6 Engins de travaux publics et wagons courants

Il s'agit du même mode de dégarnissage précédemment cité. Le chargement se fait sur des wagons plats (Figure 76) d'une capacité de 18 à 23 m³. Cette méthode peu mécanisée est cependant robuste. Elle permet notamment de s'affranchir des risques de panne qui pourrait subvenir sur un train usine car les pelles mécaniques sont interchangeables sur le chantier. Cette méthode est flexible, les rendements (80 m³/heure) sont ajustables et fonction du nombre d'engin.

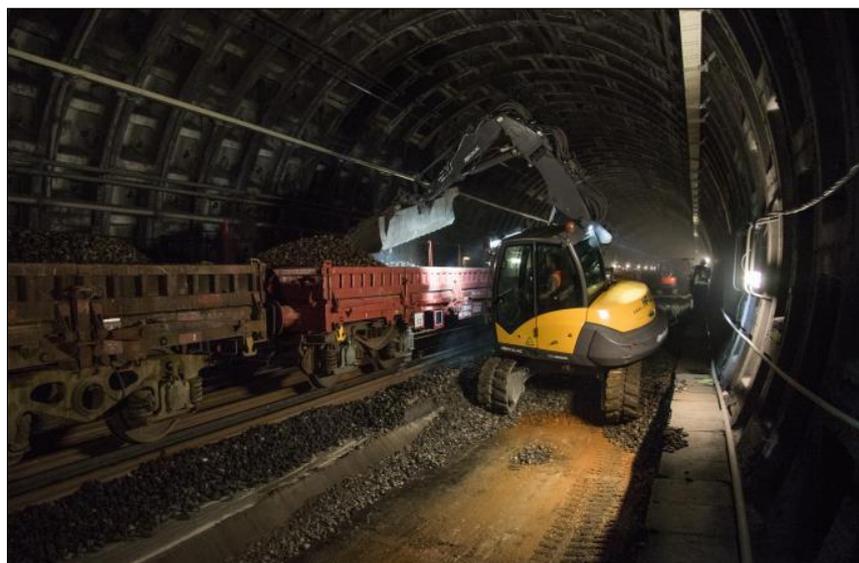


Figure 76. Photo de dégarnissage à la pelle mécanique sur wagons plats

I.4.7 Synthèse des méthodologies de renouvellement

Le Tableau 9 présente un comparatif multicritère des différentes méthodologies évoquées. À la lumière de cette synthèse, on remarque qu'il n'existe pas de solution idéale. La solution technique choisie résulte d'un compromis tenant compte de la facilité de mise en œuvre, le rendement théorique, le coût et les risques associés à la solution.

Tableau 9. Synthèse des méthodologies de renouvellement

Critère	Dégarnisseuse transversale	Dégarnisseuse longitudinale	PUSCAL	Train aspirateur	Engins TP et WAD	Engins TP et wagons plats
Profondeur de ballast	30 cm en une passe	30 cm en une passe	130 cm	non limité	non limité	non limité
Accessibilité au fond de fouille ou à la plateforme	impossible	impossible	réalisable par front de 18 mètres	réalisable si le train aspirateur est sur la voie contigüe aux travaux	possible	possible
Rendement	700 mlv/poste	400 mlv/poste	150 mlv/poste	110 mlv/poste*	590 mlv/poste	590 mlv/poste
Contraintes techniques	Nécessité de couper les têtes de traverses	Dépose des traverses en amont du dégarnissage	Front de dégarnissage limité à 18 m	Stockage des déblais limité	Heurts possibles sur l'ouvrage et la caténaire	Heurts possibles sur l'ouvrage et la caténaire
Adaptabilité	voie double uniquement	voie unique et double et zones de quai	voie unique et double et zones de quai	voie unique et double et zones de quai	voie unique et double et zones de quai	voie double uniquement
Coût	1000€/mlv	1300€/mlv	1500€/mlv	non connu	700€/mlv	500€/mlv
Fiabilité	pas de solution de repli en cas de panne	pas de solution de repli en cas de panne	pas de solution de repli en cas de panne	pas de solution de repli en cas de panne	Présence d'engin de secours	Présence d'engin de secours



critère favorable

critère acceptable sous réserve

critère inacceptable

* rendement à minorer car la trémie de stockage des déblais doit être vidée très souvent en raison de sa faible capacité

Cette analyse montre qu'il n'existe aucune solution optimale qui pourrait être généralisée sur tous les chantiers de renouvellements lourds. La solution à retenir est forcément un compromis entre plusieurs paramètres.

Les connaissances acquises de la voie, de ses constituants et de ses modes de renouvellement lourd permettent à présent d'appréhender le projet objet de ce mémoire.

II. CONCEPTION DU PROJET

II.1 LA LIGNE A DU RÉSEAU EXPRESS RÉGIONAL

II.1.1 Genèse du RER A

L'idée d'un « Métro régional » ne date pas d'hier. Déjà dans les années 1880, l'État avait pour ambition de construire un réseau à grand gabarit (par opposition au réseau de métro parisien à petit gabarit) assurant la liaison entre les grandes lignes aboutissant aux grandes gares parisiennes situées à la périphérie du centre de la capitale, sans rupture de charge³⁰ pour les voyageurs (voir l'étude de Wardman et Hine 2000 sur le « coût des correspondances » à Londres).

Cependant, la ville de Paris s'opposait à une telle approche car elle préférait la constitution d'un réseau maillé de l'espace intra-muros permettant une desserte fine [MAR 1989]. Elle préconisait donc un mode de transport à gabarit réduit, plus facile à construire car s'inscrivant dans le tracé des chaussées de voirie et donc à un coût plus faible. L'histoire nous rappelle que c'est bien évidemment la solution du réseau à gabarit réduit qui fût retenue malgré un conflit de plus de dix ans entre l'État et la ville de Paris.

Ce conflit s'expliquait par l'opposition de deux visions du développement de Paris, le Métro centré sur Paris intra-muros et la jonction des lignes de chemin de fer à grand gabarit traversant la capitale.

On retiendra les trois principaux projets de la fin du XIX^e qui furent abandonnés avec l'avènement du métro parisien mais qui plantèrent les premières graines de la réflexion d'un réseau à grand gabarit traversant Paris :

- le projet HAAG de 1883 avait pour objet de joindre les principales gares avec une liaison entre le faisceau de Paris Saint-Lazare et la ligne de Vincennes ;

³⁰ Une rupture de charge est, dans le domaine des transports, une étape durant laquelle des passagers transportés par un premier véhicule sont transférés dans un second véhicule immédiatement ou après une période de stockage.

- le projet de la compagnie d'Orléans qui préconisait le prolongement de la ligne de Sceaux³¹ ;
- le projet Eiffel qui prévoyait une transversale Nord-Sceaux [MAR 1989].

La victoire du projet de la ville de Paris repoussa à de nombreuses années les ambitions de développement d'un réseau à grand gabarit traversant Paris. Le succès du métro provoqua même la fermeture de la ligne de ceinture et la ligne de Boullainvilliers. Cette réussite entraîna également l'expansion du métro en dehors de la capitale. Le plan de 1929 prévoyait des prolongements courts en banlieue.

La question de la dimension régionale devînt de plus en plus une préoccupation des représentants politiques. Cette dimension régionale se nommait déjà « le Grand Paris ».

En 1927, le Conseil supérieur des chemins de fer préconisa la création de systèmes de transports rapides à grand débit par la réalisation de « lignes métropolitaines express », incorporés au réseau régional des lignes de Sceaux, Vincennes, Saint-Germain et Versailles.

Comme pour la notion de « Grand Paris », les idées proposées aujourd'hui pour le développement des transports franciliens ne sont que la réactualisation de concepts imaginés il y a près d'un siècle...

Dès cette époque, les réflexions s'orientèrent vers la ligne de la Bastille. Cette ligne reliait Paris à la gare de Marles-en-Brie en passant par Boissy-Saint-Léger (Figure 77).

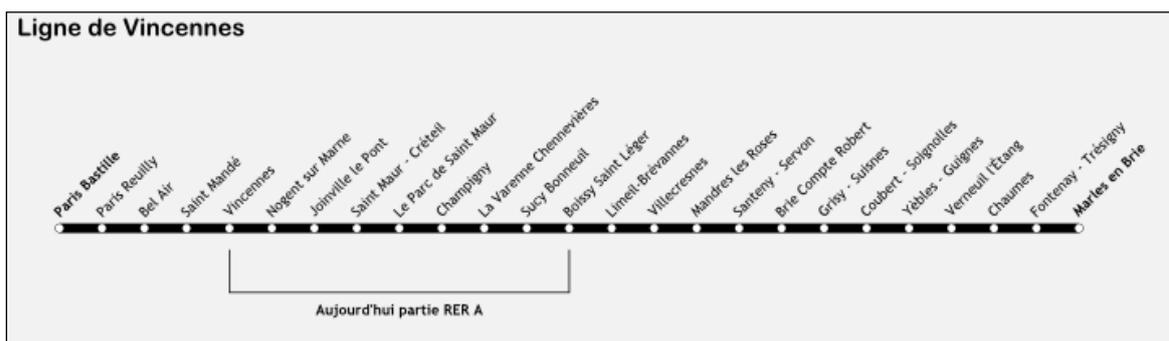


Figure 77. Ligne de Bastille en 1860

³¹ Ouverte en 1846, la ligne de Sceaux reliait la place Denfert-Rochereau à la ville de Sceaux. Elle fut prolongée par étapes vers le sud vers Robinson puis vers Orsay, Saint-Rémy-les-Chevreuse et enfin Limours.

Il était question de son utilisation en l'état ou de son raccordement à la ligne 1 ou à la ligne 8 du Métro (Projet Jayot).

À l'ouest, l'engorgement de la gare Saint-Lazare était inévitable malgré les prolongements de lignes de Métro dans la proche banlieue Nord-Ouest, notamment les lignes 1 et 3. Pour répondre à cette problématique, il était envisagé une déviation de la ligne de Saint-Germain aux abords de Levallois-Perret (Figure 78) sur une ligne en souterrain à créer pour aboutir à la Madeleine.

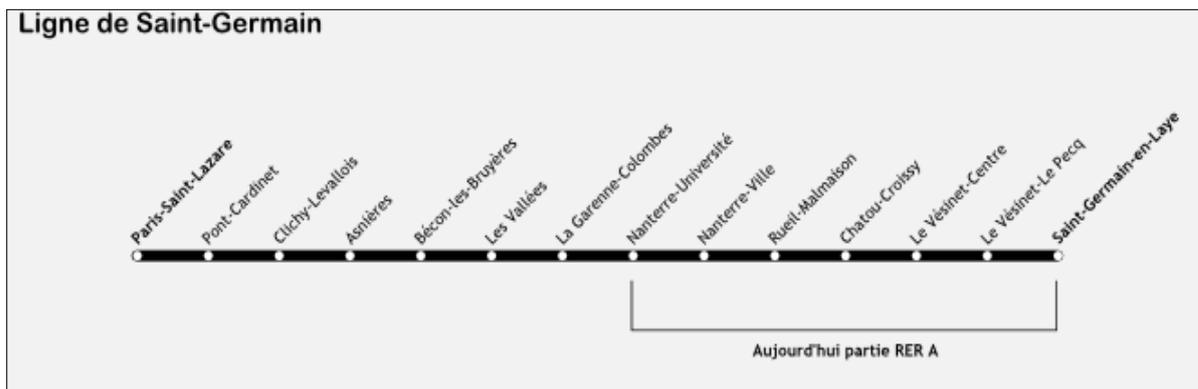


Figure 78. Ligne de Saint-Germain en 1859

La CMP³², une des ancêtres de la RATP, se pencha de très près sur cette question. Les compagnies de chemin de fer avaient pour objectif de mieux desservir Paris intra-muros dont la desserte exclusive était dévolue au réseau Métro. La CMP voyait d'un mauvais œil l'idée de relier des lignes de chemin de fer aux lignes de Métro. Non seulement la question du gabarit réduit du Métro ne permettait pas d'envisager de telles liaisons mais aussi la gestion de l'exploitation s'opposait à une mise en cohérence des deux systèmes de transport notamment en raison du caractère omnibus du Métro. Cette idée fut abandonnée car les grandes compagnies de chemin de fer n'étaient pas enclines à financer les aménagements lourds permettant de relier le réseau d'État du chemin de fer au réseau maillé du futur Métro.

Le projet du Métro n'étant plus un sujet de discorde entre la ville de Paris et les compagnies de chemin de fer, il était maintenant envisageable d'imaginer de raccorder dans Paris intra-muros quelques lignes ferroviaires diamétralement opposées.

³² Compagnie du chemin de fer Métropolitain de Paris.

Cette idée avait déjà été concrétisée à Berlin fin du XIX^e avec la construction d'une ligne est-ouest, la « Stadtbahn », très utile car elle permettait d'éviter les changements de gares en fiacre et facilitait le transport de marchandises. Elle fut complétée en 1939 par une ligne nord-sud.

1936 fut l'année où la CMP dévoila son projet de « métropolitain express », juxtaposition de deux notions antinomiques dans la pensée parisienne de l'époque. Ces notions finiront par s'unir pour donner le RER « Réseau Express Régional » appelé pendant quelque temps le « Métro régional ». Ce projet plus connu sous le nom de plan Ruhlmann-Langevin³³ prévoyait la réalisation d'un « métropolitain express » composé de trois lignes transversales grand gabarit traversant Paris en plusieurs points nodaux³⁴ :

- une sud-nord entre Luxembourg, Châtelet et Gare du Nord ;
- une est-ouest entre Reuilly/Gare de Lyon, Bastille, Châtelet, Opéra et Saint-Lazare ;
- une sud-ouest-sud-est entre Invalides et Orsay.

Ces lignes devaient être électrifiées en 1500 volts continu par ligne aérienne de contact et équipées du système de signalisation SNCF afin d'augmenter la capacité de transport en diminuant les intervalles entre chaque train. La question du temps et des cadences de circulation avaient été identifiées : « *C'est là, répétons-le, le véritable nœud de la question des transports à Paris. Il faut à tout prix gagner du temps, réduire les durées de parcours. Ce n'est que par les transversales qu'on pourra y parvenir. C'est la seule réforme qui soit véritablement efficace et d'un rendement certain* » écrivit Marc LANGEVIN en 1942.

L'absence de décision politique³⁵ et la guerre empêcheront la mise en application de ce plan.

³³ Marc Langevin et Henri Ruhlmann, éminents ingénieurs de la CMP qui ont élaboré ce concept en 1929 et 1930.

³⁴ Ce terme désigne une situation carrefour dans un réseau où est favorisée la multimodalité (combinaison de différents modes de transport permettant l'acheminement de voyageurs ou de marchandises.

³⁵ Aucun cadre administratif d'envergure régionale ne permettait de coordonner les transports urbains. Des querelles entre le conseil municipal de Paris, le département de la Seine et des élus locaux ou nationaux ont considérablement ralenti l'échéancier des prises de décisions. [MAR 2002]

Néanmoins, le 18 janvier 1938, une première étape de la réalisation d'un réseau régional de transport eut lieu avec l'incorporation au sein du réseau de la CMP de la ligne de Sceaux alors exploitée par la compagnie de chemin de fer Paris-Orléans.

Au lendemain de cinq années de guerre, il fallait reconstruire le pays et améliorer les réseaux de transport. C'est ainsi que l'État prit en main la destinée de ce qui deviendra plus tard la Région capitale. Un plan d'aménagement et d'organisation générale de la région parisienne (PADOG) fut approuvé par décret le 6 août 1960. Il prescrivait que sauf exception justifiée, toute opération de construction devrait être impérativement localisée dans le périmètre des agglomérations existantes. Il fallait donc que l'accueil du million d'habitants prévu en plus d'ici 1970 se fasse exclusivement par la restructuration de tissus urbains existants de la banlieue. Dans le domaine du transport, le PADOG donnait le coup d'envoi au Réseau Express Régional (RER) d'après le plan de la CMP devenue en 1949 la régie autonome des transports parisiens, la RATP. En effet, un des principaux objectifs du PADOG était de rattraper le retard considérable en équipement de la région parisienne, notamment en infrastructure de transports : *« les travaux d'ouverture de voies nouvelles et notamment d'autoroutes de dégagement ou d'aménagement de voie existantes, l'amélioration des transports en commun, n'ont pu suivre et de loin, la cadence d'augmentation, tant en population, que de la circulation et des migrations journalières de cette population de plus en plus nombreuse »*³⁶.

Le point de départ de la construction du RER coïncide avec le début de la création du quartier d'affaire de la Défense. La priorité fut donnée à l'axe est-ouest face à l'urgence des besoins de desserte du nouveau quartier d'affaire de la Défense, de soulagement de la ligne 1 du Métro dont la charge atteignait 140 % [MAR 2002], de dégagement de la gare Saint-Lazare et d'amélioration de la diffusion des voyageurs de la gare de Lyon. Le 14 mars 1960, le comité interministériel décida « la construction d'une ligne directe de Métro à grand gabarit entre le rond-point de la Défense et le Pont de Neuilly ». Le 6 juillet 1961, le ministre des transports, Robert BURON, donna symboliquement le premier coup de pioche (Figure 79).

³⁶ PADOG, annexe A : circulation et stationnement.



Figure 79. Robert BURON donne le 1^{er} coup de pioche du RER

La dernière impulsion à la concrétisation du RER fut la création par le président de la République, Charles de Gaulle, du District de la région parisienne le 02 août 1961. Paul Delouvrier fut nommé à sa tête avec le titre de délégué général. Son objectif premier fut d'établir un nouveau schéma d'aménagement de la région pour remplacer le PADOG devenu obsolète. En effet, à peine promulgué, le PADOG fit l'objet d'incessantes dérogations surtout dans le domaine du bâtiment, ce qui affecta sa crédibilité et amena très vite à la nécessité d'un nouveau plan pour la région parisienne, plan en cours d'élaboration dès 1961 sous la direction de Paul Delouvrier et qui donnera naissance au Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région de Paris (SDAURP) de 1965.

En parallèle, après que le tronçon La Folie-Étoile fut déclaré d'utilité publique le 02 mars 1962, les travaux de creusement débutèrent réellement.

En 1965, le SDAURP présente le nouveau RER composé de trois lignes (Figure 80) :

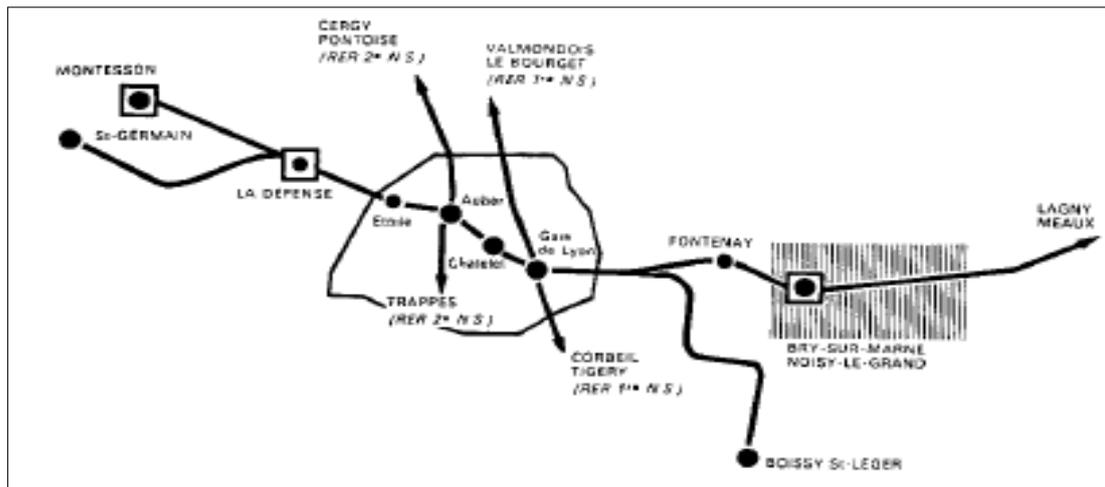


Figure 80. Réseau express régional ligne est-ouest et lignes nord-sud [SDA 1965]

Le SDAURP préconisait, comme le PADOG, la création de villes nouvelles desservies par un réseau de transport puissant : le RER. Le 08 mars 1965 fut déclarée d'utilité publique l'électrification de la ligne de Bastille jusqu'à Boissy-Saint-Léger et la création d'un nouveau tracé Vincennes-Nation afin de reporter le terminus provisoire de la ligne dans cette dernière gare. 1965 fut également l'année où la RATP créa une direction des Travaux Neufs pour être en capacité de conduire les projets contenus dans le SDAU. Après quatre ans de travaux, le premier tronçon de la future ligne A du RER entre Nation et Boissy-Saint-Léger fut mis en service le 14 décembre 1969.

Le 21 février 1970, le tronçon de quatre kilomètres Défense-Étoile était mis en service tandis que les travaux continuaient de part et d'autre vers Saint-Germain et Auber. Le 20 novembre 1971, le président POMPIDOU, inaugura la gare d'Auber ainsi que le tronçon Étoile-Auber. Les deux quartiers d'affaires de La Défense et d'Opéra étaient ainsi reliés.

Encore plus à l'ouest, la SNCF achevait les travaux de mise en conformité du réseau électrique d'alimentation des trains. Le troisième rail alimenté en 750 volts continu cédait la place à la ligne aérienne de contact alimentée en 1500 volt continu. Les gares furent reconstruites et les viaducs franchissant la Seine furent consolidés ou reconstruits. Une fois ces travaux achevés, la portion de ligne fut transférée à la RATP.

Le 1^{er} octobre 1972, le tronçon Saint-Germain-Défense fut ouvert au public.

Ainsi le District de la région de Paris qui allait devenir la région Ile-de-France en 1976 (loi n° 76-394 du 6 mai 1976 portant création et organisation de la région d'Île-de-France),

était doté de trois lignes régionales, deux tronçons de l'axe est-ouest et la ligne de Sceaux, sans aucun lien direct entre elles.

II.1.2 Vers le tronçon central du RER

Le SDAURP de 1965 avait été établi sans conditions de coûts et de délais. Il se révéla rapidement trop ambitieux et fut l'objet d'une première révision en 1969 qui insistait sur une desserte de la proche banlieue par des prolongements de lignes de métro et adoptait pour la desserte des villes nouvelles des solutions moins coûteuses utilisant plus largement les voies SNCF.

La RATP de son côté poursuivait l'étude du tronçon central du RER et débutait celle du prolongement de la ligne de Sceaux vers Châtelet avec pour objectif un prolongement vers la gare du Nord.

Le tronçon central du RER entre Nation et Auber fut déclaré d'utilité publique en 1971. À cela s'ajouta la décision de réaliser le tronçon central du RER et le prolongement de la ligne de Sceaux à Châtelet en même temps. À la demande du préfet de Région, la gare de Châtelet devait permettre des correspondances quai à quai entre le RER est-ouest et la ligne de Sceaux. De plus, la possibilité de créer une gare à Saint-Michel permettant une correspondance avec la SNCF était envisagée.

Devant l'intention de la SNCF de disposer d'une gare souterraine en gare de Lyon pour son réseau de banlieue, il s'avérait opportun de réaliser un ouvrage commun RATP/SNCF superposant la station du RER et cette gare projetée. Ce nouveau projet entraîna une modification du tracé entre Nation et gare de Lyon.

Enfin, l'ampleur des investissements prévus poussait à optimiser l'utilisation des nouvelles infrastructures et à envisager la circulation de trains de banlieue de la SNCF dans les nouveaux tunnels construits dans Paris. L'interconnexion était née. Cette idée novatrice d'optimisation des infrastructures entre la SNCF et la RATP permit de garantir la faisabilité du projet du tronçon central qui fut approuvé par les pouvoirs publics en novembre 1972.

En parallèle, le gouvernement décidait de construire une ligne desservant la ville nouvelle de Marne-la-Vallée en créant une branche supplémentaire à la ligne historique de Bastille qui constituait un des deux axes du RER.

Le tronçon central entre Auber et Nation fut inauguré le 08 décembre 1977 par le président Valéry Giscard d'Estaing. L'ensemble des nouveaux tronçons devinrent ce jour-là les lignes A et B du RER.

Plus tard, d'autres nouveaux tronçons furent mis en service à l'est vers Torcy le 19 décembre 1980 puis Chessy le 1^{er} avril 1992 et à l'ouest vers Cergy le 29 mai 1988 et vers Poissy le 29 mai 1989 avec l'interconnexion SNCF.

II.1.3 Évolution du trafic

Dès la mise en service du tronçon central, le trafic augmenta très rapidement. Cette augmentation importante s'explique par l'évolution du développement urbain (et des déplacements pendulaires) associée aux interconnexions avec la SNCF. La ligne A se trouva rapidement saturée entre la gare de Lyon et Auber. Ainsi en 1985, le trafic atteignit 50 000 voyageurs [BAR 2004] à l'heure pour une capacité de 43 520 voyageurs (pour 24 trains à l'heure de pointe).

La RATP entreprit une démarche de recherches de solutions pour décongestionner le tronçon central et fluidifier la circulation. Cette démarche fut reprise par le secrétaire d'État aux transports qui créa un groupe de travail composé des acteurs des transports urbains en Ile-de-France tels que des représentants de l'État, de la Région, de l'IAURIF, de la RATP, de la SNCF et de l'INRETS créé justement en 1985.

Les plans d'actions proposées envisageaient des mesures à court terme et des mesures plus lourdes à effets différés, notamment des investissements d'infrastructure ou de matériel roulant plus capacitaire.

La mesure à court terme qui fut proposée s'inspirait des transports japonais, elle consistait à déployer, en période de pointe, des « pousseurs ». Ces agents ont pour mission de faciliter la descente des voyageurs, de veiller au bon dégagement des quais et de sécuriser la fermeture des portes. Cette mesure, simple à mettre en place, a un impact réel sur le temps de stationnement des trains à quai et donc sur les intervalles entre les trains.

Aussi, la RATP mit au point un système de régulation de la marche des trains appelé SACEM (système d'aide à la conduite et à la maintenance) qui permet d'optimiser l'intervalle minimal entre deux trains à 2 minutes. Ce système, mis en service en juillet 1989 permet d'augmenter la capacité nominale théorique à 54 000 voyageurs à l'heure,

équivalent à un accroissement de capacité de 25 % (30 trains à l'heure de pointe contre 24 précédemment).

Le dispositif SACEM fonctionne ainsi :

- dans chaque gare, les informations d'itinéraires et la position de chaque rame sont reçues et traitées. Ces informations sont instantanément transmises à chaque rame.
- dans chaque rame, à partir des informations reçues, la vitesse maximale autorisée est calculée en fonction de sa propre position, des caractéristiques de la voie (pente, rampes, rayons des courbes, etc.) et de l'état d'occupation de cette même voie, en aval.
- la vitesse calculée et autorisée et les indications de signalisation sont visibles par le conducteur en cabine qui peut ainsi réguler et optimiser sa vitesse.
- enfin, la vitesse de la rame est en permanence comparée à la vitesse de consigne calculée. En cas de dépassement, le freinage d'urgence se déclenche automatiquement.

D'autres mesures à court terme préconisées n'ont pas été retenues telles qu'une tarification dissuasive, une réduction significative des places assises, et enfin la création d'une ligne de bus en site propre entre la gare du Nord et Auber-Saint-Lazare.

Parmi les mesures d'investissement, plusieurs solutions ont été imaginées telles que l'allongement des quais et des trains de la ligne A, la création sur la ligne B d'une gare intermédiaire « Bonne Nouvelle » permettant la correspondance avec les lignes de Métro 8 et 9, et la déviation de la ligne B par Auber. Cette dernière solution aurait été la plus efficace car elle permettait de réduire la capacité théorique nominale de la ligne A de 20 000 voyageurs par heure entre la gare de Lyon et Châtelet. Son inconvénient majeur était un coût très élevé de l'ordre de 5 milliards de francs (1,4 milliard d'euro 2015)³⁷.

Enfin, il a été envisagé d'augmenter la capacité de transport en utilisant des trains à deux étages. La RATP n'adhéra pas à cette solution en raison des caractéristiques du trafic dans le tronçon central, notamment l'importance des flux voyageurs à quai. Le temps de stationnement à quai ne doit pas excéder les 50 secondes sous peine de répercussion sur

³⁷ Il ne s'agit pas d'une conversion automatique d'un montant en franc en euro. Cette conversion tient compte de l'évolution de l'inflation des années 80 à nos jours (d'après les valeurs de l'INSEE).

l'intervalle entre les trains et donc sur la capacité de la ligne (un train à deux étages doit écouler davantage de voyageurs avec deux portes en moins par voiture).

L'histoire retiendra que les solutions d'investissement d'infrastructure retenues pour désengorger la ligne A qui présentait un trafic de 59 000 voyageurs en 1990³⁸ ont été :

- l'achèvement de la ligne D (ouverte par étapes de 1987 à 1996, SNCF) avec un doublement des voies entre la gare de Lyon et Châtelet ;
- la construction des lignes METEOR (ligne 14 du métro parisien, RATP, inaugurée en 1998) et EOLE (ouverte par étapes de 1999 à 2003, SNCF).

II.2 PRÉSENTATION DU GROUPE RATP

II.2.1 En France

Le groupe RATP, Régie Autonome des Transports Parisiens, est composé de l'entreprise publique à caractère industriel et commercial (EPIC) et de ses filiales (RATP DEV, IXXI, PROMO METRO, etc.)

Il assure la mobilité journalière de plus de 10 millions de personnes, ce qui représente un total de 3 milliards de voyages par an en Ile-de-France. L'entreprise est associée depuis toujours aux services de mobilité parisiens : le métro centenaire, le RER, les bus et tramways. La RATP assure ses besoins dans des domaines aussi variés que la conception, la gestion de projet, l'exploitation et la maintenance de tous ses moyens de transports publics urbains et interurbains.

Le réseau RATP est l'un des plus grands réseaux multimodaux au monde.

Il comprend :

- 14 lignes de Métro,
- 2 lignes de RER, A et B
- 3 lignes de tramway,
- plus de 300 lignes de bus,

³⁸ Trafic mesuré le mardi 9 janvier 1990 à Châtelet-Les-Halles (direction Saint-Germain-en-Laye) entre 7h55 et 8h55.

- une navette automatique reliant l'aéroport de Paris Orly à la ligne B du RER.

Ce réseau qui concerne 11 millions d'habitants est l'un des plus denses du monde.

II.2.2 À l'international

Le groupe RATP a la volonté de se positionner comme une entreprise de dimension nationale et internationale. Il exporte son savoir-faire dans 14 pays grâce à sa filiale RATP Dev (Figure 81). Le groupe jouit d'une compétence mondialement reconnue sur le Métro automatique de grande capacité avec en 2012 la réalisation d'une prouesse technique : l'automatisation intégrale de la ligne 1 (ligne centenaire du Métro parisien) sans interruption majeure de trafic.

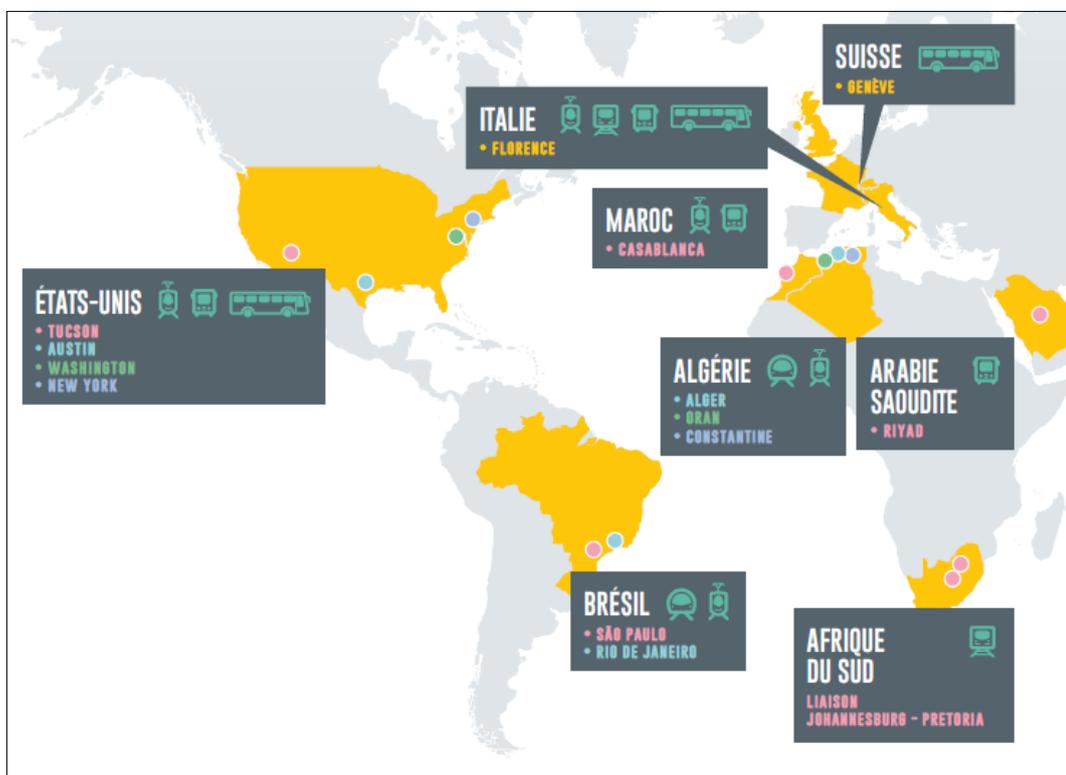


Figure 81. Implantation du groupe RATP dans le monde

II.2.3 Les ambitions de l'EPIC

II.2.3.1 Moderniser

Les objectifs et projets de l'entreprise sont multiples. En plus de maintenir et moderniser le réseau existant, la RATP renouvelle ses infrastructures, agrandit son réseau, favorise le développement du wifi dans ses rames et stations, et aménage son patrimoine pour ses

voyageurs. Modernité et développement sont les mots d'ordre. Les projets sont bien concrets. Les projets en cours sont le prolongement des lignes 11 et 14, l'automatisation de la ligne 4 du Métro parisien, l'ouverture des lignes de tramway T6 entre Châtillon et Vélizy et T8 entre Saint-Denis et Epinay-sur-Seine.

Mais la RATP doit surtout faire face à des enjeux importants tels que la qualité du service en anticipant les nouvelles attentes des voyageurs en matière d'information, d'accessibilité, de régularité et de sécurité ferroviaire. C'est ce point majeur qui est devenu la priorité de l'entreprise.

II.2.3.2 Développer

Avec l'ouverture à la concurrence, l'entreprise se mobilise pour gagner l'exploitation des futures lignes du Grand Paris, les lignes 15, 16, 17 et 18, afin de consolider son ancrage historique en Ile-de-France. Le futur de l'entreprise est dans une mobilité durable : infrastructures éco-conçues, matériels économes en énergie, véhicules moins polluants, éco-conduite, autant de projets passionnants. Le premier objectif écologique est le remplacement d'ici 2025 de tous les bus par des véhicules à moteurs 100 % électrique ou biogaz.

II.2.4 Le groupe en quelques chiffres

La Figure 82 met en évidence la santé financière du groupe RATP. Ainsi le chiffre d'affaire de la RATP est en constante progression (+ 6% entre 2012 et 2014). Cette croissance est portée par la hausse de l'offre de transport en Île-de-France et par la dynamique des filiales. Elle est principalement liée à l'internationalisation plus importante de RATP Dev (70 % de son chiffre d'affaire est réalisé à l'international).

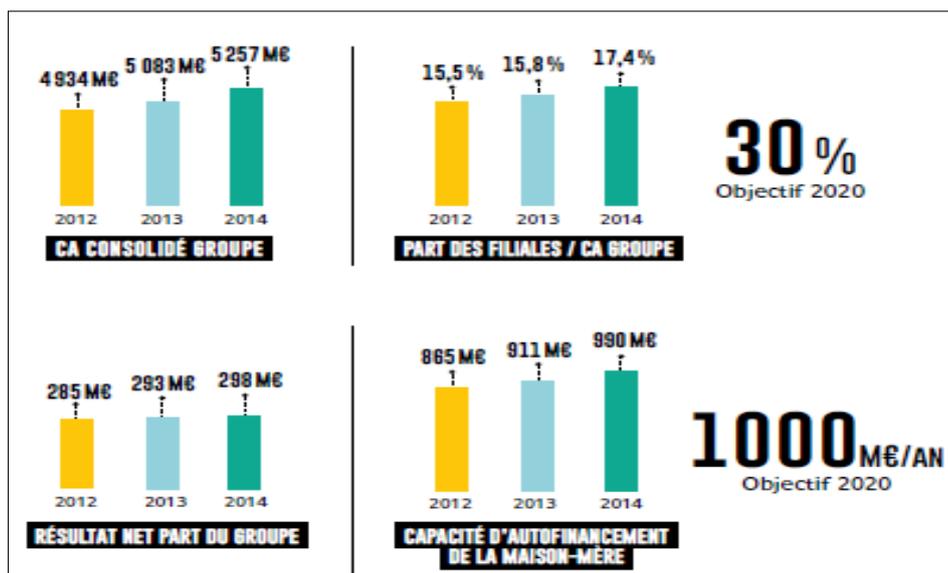


Figure 82. Résultats du groupe RATP en 2014

En Île-de-France, cette solidité s'exprime par des investissements qui ne cessent d'augmenter, passant de 818 millions d'euros en 2007 à 1580 millions d'euros pour l'année 2014. Ce montant est réparti comme suit :

- 584 millions d'euros pour la modernisation des infrastructures et des équipements existants,
- 470 millions d'euros pour l'augmentation de la capacité de transport,
- 526 millions d'euros pour la rénovation et le renouvellement du matériel roulant.

II.2.5 L'ingénierie à la RATP

Le département de l'Ingénierie (ING) est chargé de l'ingénierie des infrastructures de transport, des espaces et des systèmes de contrôle des équipements pour les réseaux Métro, RER, BUS et Tramway.

Dans le cadre de projets de construction, de rénovation ou de modernisation, le département ING effectue des prestations de conception et de réalisation des ouvrages ainsi que des équipements et des systèmes qui leur sont associés. Il englobe la plupart des maîtrises d'œuvre nécessaires à l'implémentation des projets, et offre ainsi une approche intégrée pour les prestations qui lui sont confiées.

Il assure ainsi :

- les missions de maîtrise d'œuvre proprement dites, partielle ou complète. Le maître d'œuvre est alors responsable, dans sa discipline, de la conception technique et de la réalisation des produits dans le respect des délais et des coûts, vis-à-vis du chef de projet. Dans certains cas, une mission de coordination technique peut également être souhaitée par le chef de projet.
- des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage, par exemple pour des évaluations financières, les négociations avec les fournisseurs, l'assistance au pilotage de maîtrise d'œuvre externe, le montage de dossiers de sécurité, l'expression de besoin de maintenance dans les projets,...

Le département ING est constitué d'un pôle technique comprenant quatre unités métiers :

- ISE (Installations et Systèmes Électriques),
- OIT (Ouvrages et Infrastructures du Transport),
- STF (Systèmes du Transport Ferroviaire),
- SVM (Systèmes Voyageurs et Mobilité).

Je travaille au sein du pôle OIT plus particulièrement dans l'entité EF (Équipement Ferroviaire). Ce pôle technique dispose d'un savoir-faire reconnu dans les domaines répertoriés dans le tableau 10 :

Tableau 10. Savoir-faire au sein du pôle OIT

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluides ▪ Électromécanique ▪ Électricité ▪ Bâtiment, génie civil ▪ Traction métro 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informatique industrielle ▪ Systèmes ferroviaires ▪ Infrastructures ferroviaires ▪ Équipements et systèmes d'information
---	--

Dans le cadre de projets de construction ou de rénovation, l'unité OIT est principalement chargée des études de conception et de la réalisation des ouvrages et infrastructures du transport pour les réseaux Métro, RER, Tramway et Bus.

Les disciplines techniques concernées sont **la voie**, la caténaire (hors dimensionnement énergétique assuré par l'entité ISE/EDE), le génie civil y compris la rénovation des ouvrages d'art, l'architecture notamment des gares, stations et ateliers, les aménagements de second œuvre hors lots techniques, la signalétique des espaces voyageurs, les aménagements de bureaux tous corps d'états, la géotechnique et la dépollution, la topographie.

L'unité OIT comprend cinq entités opérationnelles études/travaux regroupant des types de projets similaires afin de réaliser une intégration des métiers sur chaque projet, en soutien des unités d'intégration des projets DIT/IPI (Intégration des Projets d'Infrastructure, cf. infra) ou STF/PS (Système du Transport Ferroviaire Projet des Systèmes) ou directement pour les clients externes, tout en conservant les creusets de compétences métiers au sein d'une même entité :

- l'entité Bâtiments et Ouvrages Souterrains (BOS) regroupe les projets de pôles multinodaux, ouvrages souterrains et ateliers et comprend les compétences de bâtiment, génie civil et aménagements des ouvrages souterrains.
- l'entité Aménagements Second Œuvre (ASO) regroupe les projets de déploiement d'aménagements standards dans les espaces ou d'opérations transversales de génie civil et second œuvre et regroupe les compétences aménagements, signalétique et régénération des ouvrages souterrains.
- l'entité bâtiments Tout Corps d'État (TCE) regroupe les projets de taille moyenne réalisés en tous corps d'état (locaux d'exploitation TCE, locaux sur voie publique, parties d'atelier, etc.) et comprend les compétences d'aménagement, d'équipements électriques, fluides et ventilation de bâtiment.
- l'entité Génie Civil (GC) regroupe les projets de réparation ou de rénovation des ouvrages RATP, les projets de génie civil en interface forte avec l'exploitation ferroviaire, les ouvrages linéaires y compris les ouvrages d'art associés et enfin les compétences génie civil et confortement des structures.
- **l'entité Équipements Ferroviaires (EF)** regroupe les projets de voie ferrée sur lignes nouvelles ou exploitées, et les projets en atelier. Elle comprend les compétences caténaire et voie, y compris tracé de voie et conception des appareils de voie.

L'unité comprend également deux entités transversales intervenant sur l'ensemble des projets confiés à OIT, pouvant effectuer des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage d'art (AMOA) ou d'expertise pour les autres unités du département ou pour les autres départements, ainsi qu'une entité d'intégration assurant le pilotage des projets transversaux :

- l'entité Agence d'Architecture (ARC)
- l'entité Géologie Structures et Topographie (GST)

- l'entité Intégration des Projets d'Infrastructure (IPI)

II.3 CONTEXTE ET ENJEUX DU PROJET

II.3.1 Localisation du projet

Pionnière des cinq lignes de RER, le RER ligne A (Figure 83) est de loin la plus chargée du réseau avec 305 millions de voyageurs en 2014, soit 1,16 millions de voyageurs par jour ouvrable et régulièrement proche de la saturation, ce qui en fait également, en matière de trafic, une des lignes les plus denses du monde et la plus dense d'Europe. Elle assure à elle seule plus d'un quart du trafic ferroviaire de la banlieue parisienne, et transporte certains jours plus de personnes que la totalité des réseaux TER³⁹ hors Transilien [SDL 2012].

Le tronçon central, de Nanterre Préfecture à Vincennes, draine plus de la moitié du trafic annuel (Tableau 11).

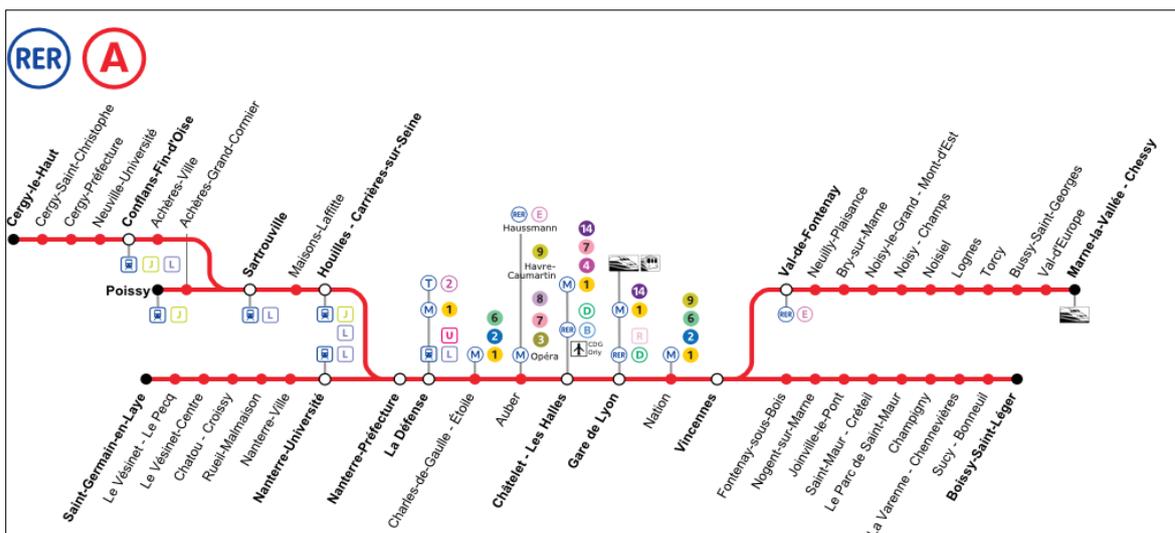


Figure 83. Plan de ligne du RER A

Tableau 11. Répartition du trafic par secteur [SDL 2012]

SECTEUR	TRAFIC ANNUEL 2011 (MILLIONS DE VOYAGES)	HEURE DE POINTE DU SOIR (POURCENTAGE)

³⁹ Le réseau TER dessert les vingt régions administratives françaises avec 5700 trains par jour contre 606 trains par jour pour le RER A.

Tronçon central	174,94	56,5%
Branche de Marne-la-Vallée	47,78	15,4%
Branche de Cergy et Poissy	32,08	10,4%
Branche de Saint-Germain	30,91	10,0%
Branche de Boissy-Saint-Léger	23,65	7,7%
Total	309,36	100%

Longue de 109 kilomètres, orientée est/ouest, elle est un axe structurant du réseau de transport en Ile-de-France. Son exploitation est partagée entre la SNCF et la RATP. La SNCF exploite les tronçons de Nanterre Préfecture à Poissy et de Nanterre Préfecture à Cergy-Le Haut. Le reste de la ligne est exploité par la RATP.

Les caractéristiques principales de la ligne sont reprises ci-dessous :

- longueur de la ligne : 109 km dont 76 km RATP,
- heures d'exploitation : 5h00 à 1h20,
- nombre de gares : 46 dont 35 RATP,
- type de réseau : réseau ferré à grand gabarit,
- infrastructure : voie ferrée à écartement standard 1435 mm,
- électrification : 1500 volts en zone RATP, 25 000 volts en zone SNCF,
- tunnel : de Nanterre Préfecture à Nation et de Vincennes à Val de Fontenay.

Progressivement ouverte dans les années soixante-dix, l'infrastructure ferrée n'a depuis cette époque pas bénéficié de renouvellement majeur. Pourtant, le RER A a vu son trafic augmenter régulièrement depuis sa mise en service. L'arrivée de nouveaux matériels roulants, à 2 niveaux notamment, est venue solliciter encore plus les infrastructures ferrées.

En comparaison avec la ligne D du RER (SNCF) qui assure 450 trains par jour pour 550 000 voyageurs transportés [GRA 2011], la ligne A assure 633 missions quotidiennes pour 1,16 millions de voyageurs transportés [SDL 2012].

La ligne A bénéficie d'ailleurs d'une maintenance attentionnée, basée sur des cycles très rapprochés en adéquation avec les sollicitations subies par les installations : charges à l'essieu importantes, fréquence des mouvements d'aiguillage élevée, nombreux passages de pantographes sur les caténaires.

Ainsi, 30 km de rails sont remplacés tous les ans et dans le tronçon central, sur certaines courbes, les rails sont remplacés tous les 2 ans contre 25 ans en moyenne sur le réseau ferré de la RATP.

Sur le réseau RATP, les surcoûts annuels liés à cette maintenance attentionnée comparés aux coûts d'une maintenance classique sont estimés entre 7 à 8 millions d'euros pour les équipements relatifs à la voie (les renouvellements de rails, des traverses et des aiguillages).

Au total, chaque année, la RATP investit entre 13 et 18 millions d'euros pour des travaux de maintenance de voie, signalisation et caténaire pour la ligne A [SDL 2012].

Le STIF (Syndicat des Transports Ile-de-France) prévoit une augmentation sur la période 2013-2017 de ces montants qui passeraient à 22 à 30 millions d'euros par an en raison du déploiement des trains à deux étages type MI09.

Ces trains sont plus lourds et présentent des pantographes plus agressifs pour un meilleur captage de l'énergie.

II.3.2 Enjeux et objectifs du projet

Un diagnostic de la voie, dans la zone du tronçon central, réalisé par la RATP et confirmé par une expertise de la direction de l'ingénierie de la SNCF, a montré qu'un renouvellement complet des voies ballastées est indispensable afin de conserver une maintenance des voies compatible avec les exigences d'exploitation de la ligne. Le déploiement du matériel roulant à deux étages de type MI09 entrainera une augmentation du tonnage journalier de 27% à l'horizon 2017 (à nombre de mission quotidienne constante) [SDLA 2012].

Le projet du renouvellement des voies ballast appelé dorénavant RVB du RER ligne A consiste à réaliser un renouvellement sur des portions de l'infrastructure ferrée situées entre les gares de Nanterre-Préfecture et Vincennes. Cette partie de la ligne est dénommée le tronçon central de la ligne A. Elle est exclusivement située en tunnel.

Les objectifs de l'opération sont en particulier de :

- réaliser un RVB renforcé⁴⁰ en remplaçant les traverses, le ballast jusqu'au fond du radier, les ADV, l'assainissement de la plateforme de voie ;
- restituer à l'exploitant⁴¹ une voie conforme pour la fin de déploiement des rames MI09 ;
- accroître les niveaux de sécurité ferroviaire et de disponibilité des équipements.

Il s'agit donc de réaliser un RVB sur les portions de voie ballastées⁴² soit 23,68 kilomètres de voie ainsi que le renouvellement de 27 appareils de voie entre l'été de l'année 2015 et l'été de l'année 2021.

Sur les portions de voie situées entre La Défense et Nation exclues, les travaux seront réalisés en interruption totale de trafic de quatre semaines l'été, et cela sur quatre années. Durant ces quatre années (2015 à 2018), au terme des quatre semaines de travaux, la voie doit être rendue à l'exploitation sans aucune limitation temporaire de vitesse.

Sur les portions de voie situées entre Nation et Vincennes incluses, les travaux seront réalisés en nuit longue⁴³ (de 22h30 à 5h00) avec reddition des voies à l'exploitant sous couvert d'une limitation temporaire de vitesse (LTV) sur une période de sept semaines lors des étés 2019 et 2020.

Sur les portions de voie situées entre La Défense et Nanterre-Préfecture incluses, les travaux seront réalisés dans les mêmes conditions que précédemment (nuit longue) mais sur une période de neuf semaines lors de l'été 2021.

Le projet de RVB a pour finalité d'assurer la disponibilité et la sécurité des installations pour une nouvelle période, au minimum pour les quarante prochaines années. Il permet de répondre à la nécessité d'adapter l'infrastructure ferrée à la charge du nouveau matériel roulant à 2 niveaux type MI09. À ce titre, ce renouvellement de la voie est une étape

⁴⁰ Un RVB renforcé s'oppose à un RVB classique où le ballast n'est renouvelé que sur les 25 premiers centimètres de profondeur.

⁴¹ La loi ARAF du 3 décembre 2009 a clarifié les rôles du STIF et de la RATP. Un transfert s'est opéré pour que la RATP assure l'entretien des installations en devenant le gestionnaire d'infrastructure et exploite pour une durée déterminée les lignes existantes jusqu'à une prochaine mise en concurrence. Le STIF se voit transférer le matériel roulant.

⁴² Les portions de voie bétonnées, de type STEDEF, ne sont pas concernées par les travaux de renouvellement.

⁴³ Les travaux de maintenance courante sont réalisés en nuit courte (1h30 à 5h00) à la fin du service voyageur.

indispensable pour permettre la modernisation et l'amélioration de l'exploitation, pour une meilleure qualité de service, prévues par le Schéma Directeur de la Ligne A.

Ce projet est un défi technique au regard :

- des cadences journalières à tenir pour respecter la planification des interruptions négociées avec le STIF ;
- des flux logistiques quotidiens hors des heures d'exploitation commerciale de la ligne qui doit fonctionner de part et d'autre de la zone centrale interrompue.

De plus, les interruptions de trafic dans la zone centrale ne doivent pas perturber les déplacements des usagers lors des quatre semaines de travaux. Cela suppose la mise en place d'un plan de transport de substitution adapté et un accompagnement renforcé des voyageurs pour les informer, les orienter et les canaliser.

II.3.3 Montage financier

II.3.3.1 Généralités

Le projet du RVB du tronçon central de la ligne A s'inscrit dans le cadre de la maintenance patrimoniale. Il s'agit d'opérations lourdes visant à redonner aux infrastructures ferroviaires une durée de vie d'au moins 40 ans et permettre l'adaptation de celles-ci au déploiement des rames à deux étages. La maintenance patrimoniale se distingue de la maintenance classique (préventive, corrective ou curative) réalisée en permanence et dont l'objectif est de garantir des conditions de circulation conformes aux exigences de sécurité ferroviaire.

S'agissant de maintenance, les travaux de RVB de la ligne A sont intégralement financés par la RATP en qualité de gestionnaire d'infrastructure.

La RATP, établissement public à caractère industriel et commercial, est rémunérée dans le cadre du contrat STIF au titre de ces activités de gestion d'infrastructure.

II.3.3.2 Jalonnement du projet

Afin de bien comprendre les étapes du montage financier du projet, il convient de faire un rappel des notions de management de projet au sein de la RATP. Le Maître d'ouvrage (MOA) en la personne du directeur de l'unité VOIE du département du Gestionnaire d'Infrastructure (GDI), désigné par la RATP pour assurer la direction de projet, est le responsable vis-à-vis de la RATP de l'atteinte des objectifs. Il est garant de l'opportunité

du projet. Dans le cadre de cette responsabilité, il doit formellement approuver les principaux jalons du projet (Figure 84). Le détail des termes de la figure 84 sera donné en annexe.

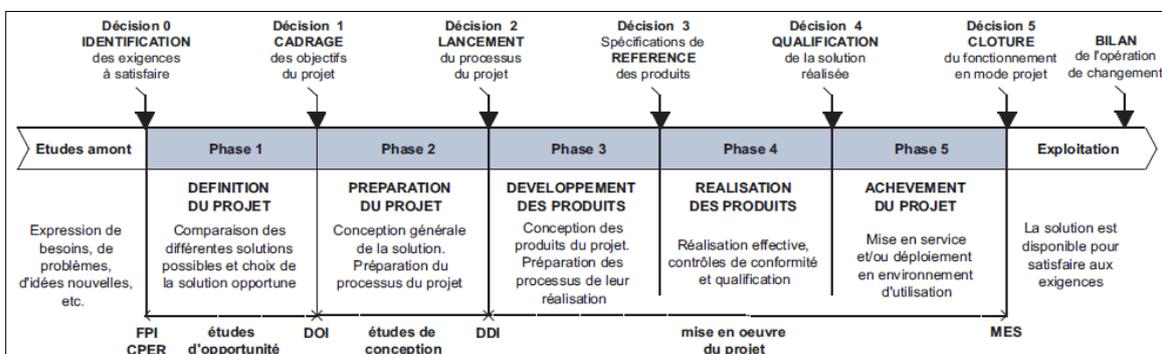


Figure 84. Jalonnement du projet par les décisions du maître d'ouvrage

Les travaux de RVB ayant été reconnus comme indispensables, la première étape a été l'établissement d'un dossier d'opportunité d'investissement ou DOI. Ce dossier a été instruit en juin 2010.

Il permet de :

- lancer les études d'avant-projet (AVP) avec un provisionnement : 380 k€ ;
- estimer grossièrement l'enveloppe budgétaire du projet : 34 000 k€.

Le DOI n'engage pas la MOA à la réalisation des travaux.

En juillet 2012, la MOA approuvait le dossier de décision d'investissement ou DDI. Ce dossier approuve les modalités d'achèvement du projet et lance le processus de mise en œuvre du projet. Il permet de :

- provisionner le reste des études et de surveillance : 5 300 k€ ;
- affiner le financement du projet : 75 800 k€.

Le DDI précise le détail estimatif du coût du projet et quantifie le gain apporté par le projet à la maintenance des infrastructures.

En juillet 2012, l'impact financier de l'interruption du trafic n'était pas maîtrisé, entraînant une sous-évaluation de l'enveloppe financière du projet. Le DDI a donc été modifié en décembre 2014 avec un provisionnement prévu de 99 700 k€.

Le STIF a accepté de prendre en charge une partie des coûts liés au renfort de l'offre de transport. Cette prise en charge permet au STIF d'être partie prenante dans la validation de l'offre de transport mise en œuvre pour faire face à l'interruption du trafic.

Tableau 12. Détail du financement assuré par le STIF

PRESTATION	COÛT EN k€ HT 2011
Offre de transport RER Restitution au titre de l'offre non réalisée (perte de production)	-644
Offre de transport métro Renforcement des lignes 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 13, 14	1959
Offre de transport bus et tramway Renforcement des lignes 73, 275, 43, 244, T2, T3a, STL	1041
L'accompagnement de l'offre de transport L'accueil, la gestion des flux voyageurs dans les espaces et la relation client	1955
Total	4311

Tableau 13. Financement assuré par la RATP

PRESTATION	COÛT GLOBAL PROJET EN k€ HT 2014
Travaux principaux (voie, caténaire, génie civil)	55466
Travaux d'accompagnement (signalisation, KV, BT)	13503
Fournitures et équipements	937
Communication de chantier	2050
FES(*) Maîtrise d'œuvre	15806
FES Conduite de projet	4976
Aléas (sur travaux hors FES)	6958
Total	99696

(*) Frais d'études et de surveillance

II.4 CARACTÉRISATION TECHNIQUE DU PROJET

II.4.1 État des lieux

II.4.1.1 Types de pose de rail dans le tronçon central

Le tronçon central est équipé majoritairement de rails de profil 60E1 et de quelques courtes zones de rails 50E6. Les zones en profil 50E6 correspondent à des transitions entre des voies au profil 60E1 et des appareils de voie en 50E6. Ces zones restent tout de même marginales au regard des zones au profil 60E1. Ces rails sont posés sur des traverses bois

(dans les zones ballastées). Le rail est de nuance dite normale (R260) sur l'ensemble du linéaire hormis les courbes critiques (annexe 3) qui sont en rails traités thermiquement (R350LHT), cf. tableau 2 et tableau 14. Le linéaire de rail en R350 LHT représente 16,4% du linéaire total de rails.

Tableau 14. Répartition des linéaires de rails en nuance R260 et R350 LHT (après exploitation de l'annexe 3)

NUANCE DE RAILS	LINÉAIRE EN ML	PROPORTION
R350 LHT	6671	16,40%
R260	40689	83,60%

Le type d'attache est varié et change très fréquemment le long du tronçon central (voir listing des types de pose en annexe 4.

Il se dégage néanmoins la répartition indiquée au Tableau 15 :

Tableau 15. Répartition des différents types de pose du tronçon central du RER A

TYPE DE POSE	LINÉAIRE	PROPORTION
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	12	0,05%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 67	15	0,07%
POSE SUR PUISARD	58	0,26%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - AVEC PLAQUETTES	121	0,53%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	283	1,25%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	309	1,37%
TRAVERSE BETON BIBLOC SUR BALLAST - UIC60 - AP - A CAME	629	2,78%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1193	5,27%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	1582	6,99%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	2002	8,85%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	4751	21,00%
TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	11671	51,58%

Le projet RVB aura pour objectif d'uniformiser les types de pose afin de faciliter les opérations de maintenance et la logistique des pièces de rechange.

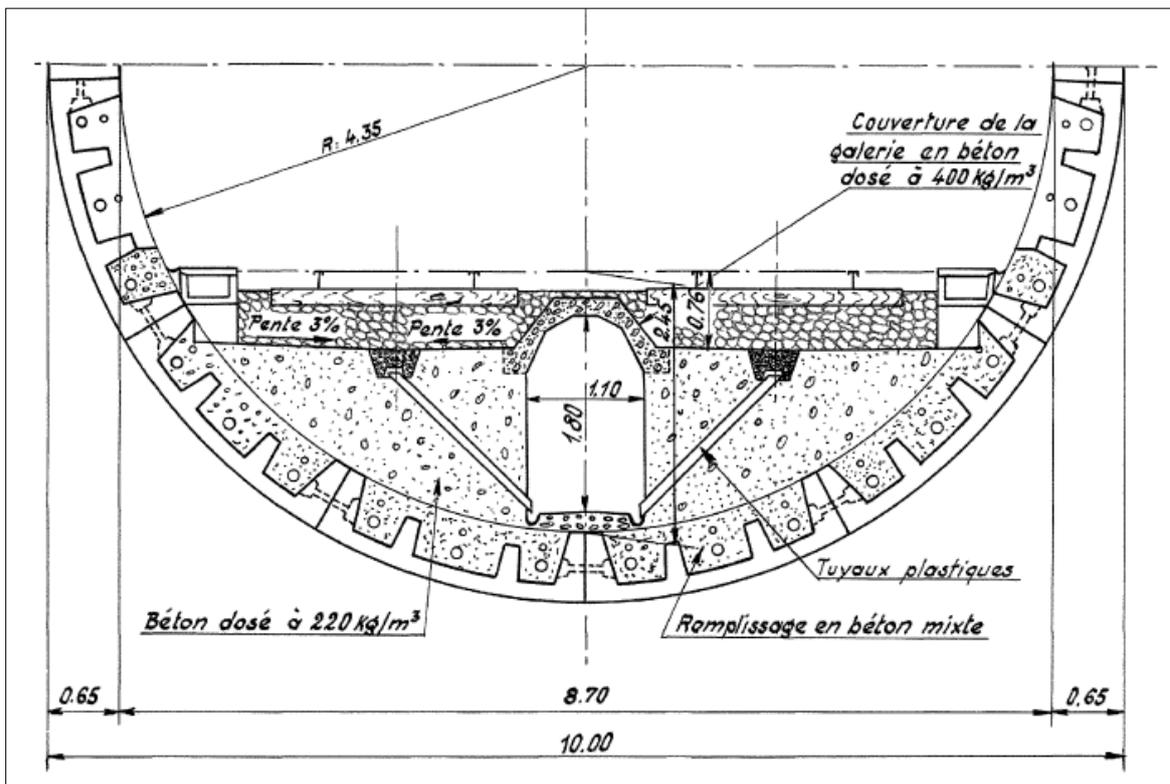
L'annexe 4 précise les différentes dates de pose par zone. On retiendra que les dates de pose des traverses s'étalent entre 1969 et 1977.

II.4.1.2 Ouvrages et assainissement

La ligne A du RER est constituée de deux grands types d'ouvrages. Des tunnels construits de manière traditionnelle et des ouvrages réalisés au tunnelier.

Les ouvrages réalisés au tunnelier sont situés entre les stations La Défense et Charles-de Gaulle-Étoile ainsi qu'entre Châtelet-les-Halles et Gare de Lyon.

Entre La Défense et CDG-Étoile, les ouvrages réalisés au tunnelier ont une ouverture de 8,70 mètres. Ce sont des tunnels à double voie (Figure 85). La plateforme des voies comporte environ 40 centimètres de ballast. Des caniveaux latéraux assurent les passages de câbles. Le drainage est assuré par une galerie technique centrale d'environ 1,80 m de hauteur et 1,10 m de large. Les eaux de ruissellement sont centralisées en axe de voie puis évacuées vers la galerie technique grâce à des réservations disposées tous les 7 m.



Entre les stations Châtelet-les-Halles et Gare de Lyon, les ouvrages présentent une ouverture de 6,30 mètres. Il s'agit de tunnels à voie unique. L'assainissement est assuré par un drain en béton à section circulaire en entraxe de voies.

Les ouvrages traditionnels (Figure 86) sont en tunnel unique ou double. Ils comportent généralement un radier incurvé avec un rechargement en béton. L'assainissement est assuré par des éléments trapézoïdaux préfabriqués situés dans l'entraxe de la plateforme.

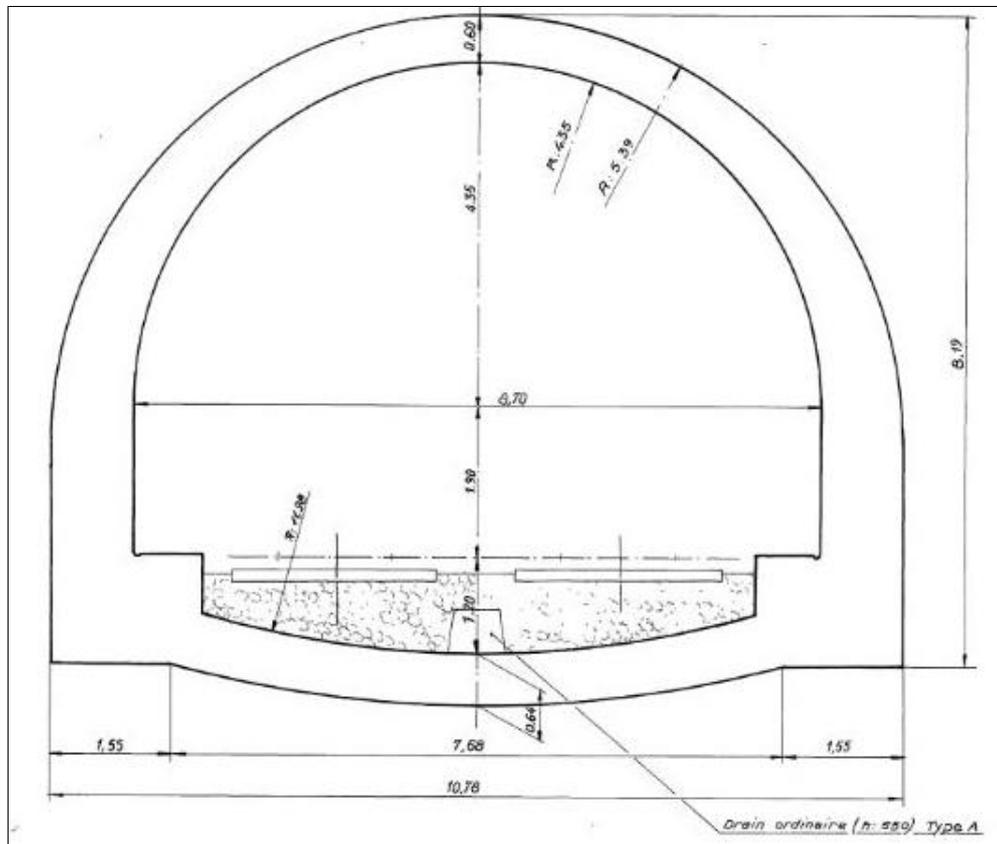


Figure 86. Coupe schématique d'ouvrage traditionnel et assainissement par éléments trapézoïdaux préfabriqués

Le franchissement de la Seine a été réalisé à l'aide de caissons foncés (Figure 87) d'une ouverture de 8,90 à voie double. La méthode consiste à immerger des caissons préfabriqués bout à bout dans une tranchée creusée par fonçage vertical dans le lit de la Seine. L'assainissement est assuré par un caniveau central en béton d'environ 23 centimètres de hauteur.

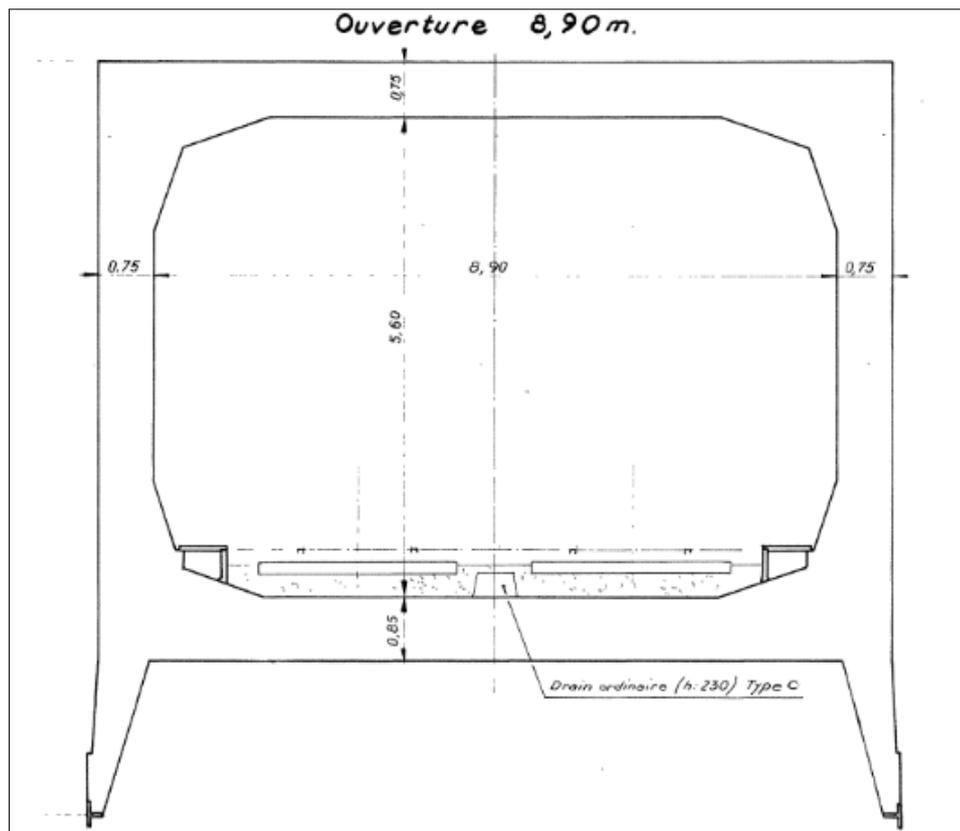


Figure 87. Coupe schématisique d'ouvrage de type caisson foncé

II.4.2 Diagnostics et reconnaissances

Deux diagnostics de l'état des voies du tronçon central ont été réalisés.

Le premier, effectué en interne par la RATP, avait pour données d'entrée :

- les éléments de préconisation du gestionnaire d'infrastructure, mainteneur historique des infrastructures (unité VOIE du département GDI). Ce document présente l'avis du mainteneur et ses recommandations quant à la priorisation des zones à renouveler.
- la synthèse des campagnes de reprise de nivellement par bourrage mécanique lourd sur les dix dernières années.
- les signalements des défauts de nivellement hors norme de 2005 à 2010. Ces éléments permettent de définir la présence de zones à défaut récurrent.
- la synthèse des campagnes de meulage des rails. Ces éléments nous informent des zones de sollicitation importantes des rails où naissent les défauts évoqués précédemment.

- les sondages de ballast qui visent à déterminer les profondeurs de ballast sous traverses, l'état d'usure du ballast et l'état du système de drainage.

Le second, réalisé en externe par la direction de l'ingénierie de la SNCF, avait pour but d'avoir un état contradictoire de l'état des voies.

Les conclusions apportées par ces deux diagnostics étaient que :

- sur les 28 sondages réalisés, le ballast est plus ou moins pollué sans être fortement dégradé. Son état n'est pas suffisamment bon pour risquer un nouveau cycle de vie complet. Le rapport SNCF préconise un renouvellement sur une profondeur de 0,30 mètre sous NIT (niveau inférieur de traverse). Le rapport RATP préconise un renouvellement complet du ballast.
- le drainage paraît fonctionnel et en bon état sauf entre Nation et Vincennes. Une confirmation par inspection endoscopique est tout de même nécessaire pour confirmer la continuité du drainage
- les traverses bois sont en assez bon état mais l'hétérogénéité des types de pose ne facilite pas les opérations de maintenance.
- des infiltrations importantes nuisent à l'état général de la voie. Ces infiltrations polluent le ballast et favorisent la putréfaction des traverses bois. Le rapport SNCF insiste sur le fait que les travaux de RVB ne pourront être réalisés avant un traitement complet des infiltrations.
- les travaux du RVB doivent être phasés en fonction du degré d'urgence déterminé à l'aide des données d'entrée évoquées précédemment.

Enfin, il apparaît que l'état général de la voie est dégradé mais pas critique. Cependant, il a été ainsi confirmé que le renouvellement des voies est nécessaire pour faire face à l'augmentation du tonnage journalier de 27% sur 8 ans liée au déploiement des MI09 et garder une maintenance des voies compatible avec les exigences d'exploitation de la ligne.

II.4.3 Incertitudes et risques

La RATP ne dispose pas des plans de recollement de l'époque de la construction des voies. De plus, de nombreux plans ont été égarés dans le temps et n'ont pu être numérisés. Il est donc difficile de connaître exactement la position des réseaux présents le long de la voie ou la traversant.

Les seuls éléments disponibles sont des plans de conception de niveau « PRO » qui faisaient office de plan d'exécution. Il faut rappeler que des réseaux très sensibles sont à proximité des voies, notamment la haute tension qui alimente la ligne 1 du Métro et des câbles de signalisation vétustes qui permettent d'envoyer des informations sur la position des trains au poste de commandement et de contrôle de Vincennes.

Il est évident que la méconnaissance de la position de ces réseaux peut générer des pertes de rendement lors des terrassements et provoquer des arrêts d'exploitation sur la ligne A ou sur d'autres lignes à proximité.

Aussi, les caniveaux de câbles longeant les voies sont équipés d'intercalaires en amiante. Une attention particulière doit être apportée lors des terrassements pour éviter la détérioration des caniveaux et la mise à jour d'éléments amiantés.

Enfin, l'état du radier et des ouvrages de génie civil étaient pour le projet une inconnue supplémentaire. On ne connaissait pas la quantité des concrétions qui pouvaient être sur le radier ou qui pouvaient colmater le ballast.

II.4.4 Scénarios

Afin d'établir le meilleur scénario de réalisation de travaux, la RATP a étudié plusieurs solutions techniques et les a comparées à l'aide d'une analyse multicritère.

Les trois critères principaux sont les coûts, les délais et la performance. Ces trois critères ont été déclinés comme suit :

- coût :
 - o coût de mise en œuvre : plus ils sont élevés, plus la notation est faible
 - o coût d'entretien : plus ils sont élevés, plus la notation est faible

Les coûts de mise en œuvre d'une plateforme béton sont les plus élevés car la mise en œuvre d'une voie béton est plus complexe qu'une voie ballastée. Aussi, moins on renouvelle de ballast et plus la solution est économique.

Les coûts d'entretien augmentent, d'une part avec le type de renouvellement qui a été réalisé (une voie dont seule la partie supérieure de ballast a été renouvelée coûtera plus chère à maintenir qu'une voie dont le ballast a été complètement renouvelé), d'autre part avec la technologie déployée.

- délais : plus ils sont élevés, plus la notation est faible.

Les délais de mise en œuvre d'une plateforme béton sont plus élevés que les délais de mise en œuvre d'une voie ballastée. Aussi, moins il y a de ballast à renouveler et plus les délais de réalisation sont courts.

- performance :
 - o augmentation du tonnage : la solution répond au critère (4 points), elle ne répond pas (0 point) et elle répond peut-être (1 point) ;
 - o longévité : plus la solution est pérenne, plus la notation sera élevée ;
 - o complexité de mise en œuvre : plus la solution est difficile à mettre en œuvre, moins la notation sera élevée ;
 - o contrainte d'exploitation : plus la contrainte est forte, plus la notation est faible ;
 - o drainage : plus les reprises sont nombreuses, plus la notation est faible.

À tonnage constant, la longévité d'une solution technique est fonction du type d'armement (type de traverses, d'attaches et de rails). On retiendra qu'une plateforme béton sera plus durable qu'une plateforme ballast et qu'une traverse béton sera moins sensible à l'agressivité du milieu qu'une traverse bois.

Également, les solutions de mises en œuvre de béton s'avèrent complexes en raison de la mauvaise accessibilité pour approvisionner le béton et en raison du temps de séchage incompatible avec les impératifs de remise en exploitation.

Cette étude comparative (Tableau 16) fait clairement apparaître que les solutions de RVB classique (renouvellement de 25 cm de ballast sous NIT) et de RVB type SNCF (trains mécanisés type suite rapide) ne permettent pas de répondre aux exigences du projet pour les raisons suivantes :

- le renouvellement partiel du ballast ne permet pas de réaliser l'auscultation du radier et des systèmes de drainage ;
- la mise en œuvre de trains mécanisés type suite rapide n'est pas envisageable en raison du gabarit et des rendements incompatibles avec les linéaires à renouveler (700 ml/jour) [RFF 2008].

Les solutions techniques avec limitation temporaire de vitesse (LTV) ne sont pas acceptables au regard des exigences d'exploitation imposées par les services de la réglementation MOP/GEF (Maîtrise d'Ouvrage des Projets/ Génie Ferroviaire) et des horaires.

En effet, l’instruction de sécurité ferroviaire 221 interdit la mise en place de LTV en dehors de la période estivale (tableau horaire d’été). De plus, un chantier linéaire à fort rendement, impose un glissement des LTV qui se trouve être incompatible avec le système de signalisation SACEM. Des travaux sous LTV et en nuit longue⁴⁴ pénalisent fortement l’offre de transport. Enfin, une interruption de trafic sur quatre semaines en été est envisageable et doit être privilégiée car elle permet de réduire de façon significative la durée globale du projet sans restriction de vitesse.

Tableau 16. Analyse comparative des différentes solutions de renouvellement

Solution technique	Méthode	Condition de réalisation	Rendement	Durée	Avantages	Inconvénients	Coût unitaire	Coût total en K€
RVB classique	Peu mécanisée Dégarnissage à -25 cm sous NIT	Nuit courte	36ml/nuit	3 ans (5 nuits/semaine)	Méthode maîtrisée	LTV annuelle Rendement faible Renouvellement partiel	1 890 €	46 003 €
RVB type SNCF	Très mécanisée Dégarnissage à -25 cm sous NIT	Interruption (5 sem/été)	700 ml/jour	2 étés	Méthode maîtrisée et rendement élevé	Renouvellement partiel Gêne voyageur Matériel inadapté pour des travaux en tunnel	1 150 €	27 991 €
RVB renforcé	Très mécanisée Dégarnissage à complet	Nuit courte	12 ml/nuit	8 ans (5 nuits/sem)	Inspection du radier et du drainage possible	LTV annuelle Rendement faible	2 917 €	71 000 €
		Nuit longue	24 ml/nuit	4 ans (5 nuits/sem)	Inspection du radier et du drainage possible	LTV annuelle	2 260 €	55 008 €
		Interruption (5 sem/été)	200 ml/jour	5 étés	Inspection du radier et du drainage possible	Gêne voyageur	1 808 €	44 007 €
RVB par changement de plateforme ballast par du béton	Très mécanisée Dégarnissage à complet	Nuit courte	10 ml/nuit	10 ans	Coûts de maintenance réduit	Temps de prise du béton rendement faible Coûts d'investissement élevés	5 341 €	130 000 €
		Nuit longue	20 ml/nuit	5 ans	Coûts de maintenance réduit	Temps de prise du béton rendement faible Coûts d'investissement élevés	4 108 €	99 989 €
		Interruption (5 sem/été)	100 ml/jour	9 étés	Coûts de maintenance réduit	Temps de prise du béton rendement faible Coûts d'investissement élevés	3 451 €	83 997 €

La solution technique retenue par la MOA au regard de l’analyse présentée est un renouvellement de voie ballast renforcé correspondant à une régénération complète du ballast jusqu’au fond de radier.

La RATP a opté pour un scénario mixte (Figure 88), validé par le STIF, comprenant :

- 4 étés de travaux en interruption de trafic sur 4 semaines,
- 3 étés de travaux en nuit longue.

⁴⁴ Cette appellation correspond à une plage d’intervention de 22H00 à 5H00, contrairement aux nuits courtes où la plage d’intervention est de 1h00 à 5H00.

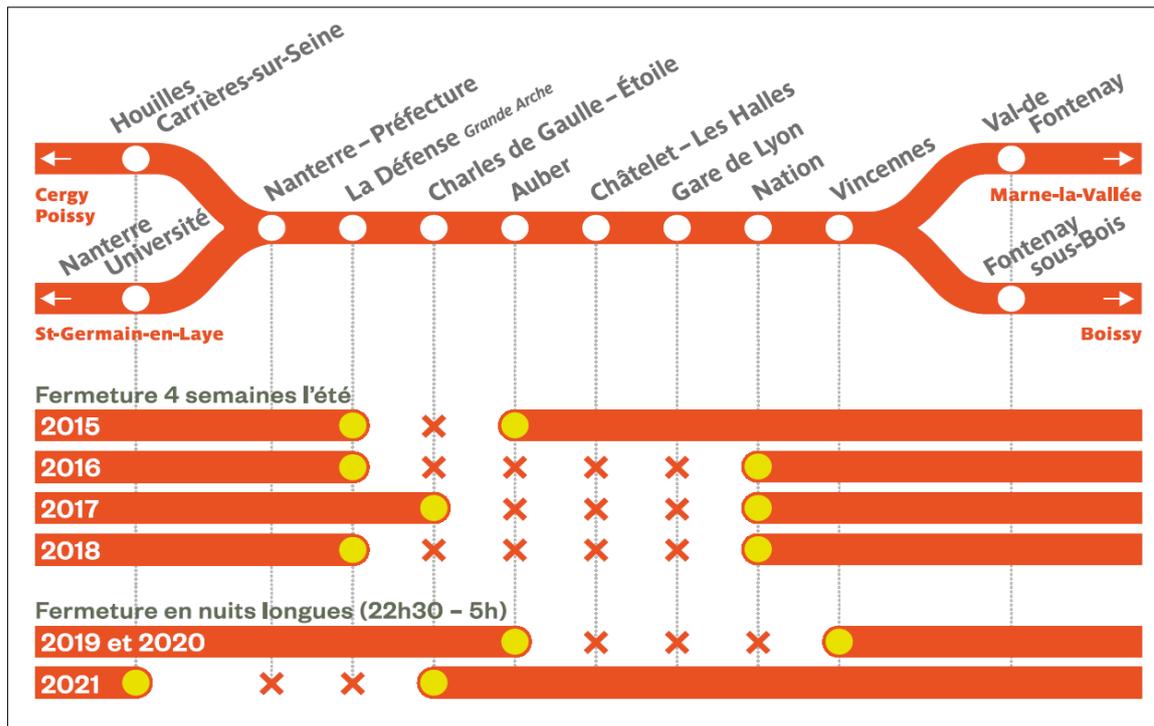


Figure 88. Scénarios de réalisation des travaux

II.4.5 Modes d'exécution envisageables

Lors de la phase d'études d'avant-projet, la RATP a envisagé plusieurs modes d'exécution des travaux. En effet, l'importance du linéaire à traiter cumulée au choix d'une régénération complète du ballast implique des volumes considérables à évacuer. À cela s'ajoute les contraintes d'exploitation, notamment le fait que les circulations commerciales soient maintenues de part et d'autre de la zone interrompue.

Il se dégage deux approches possibles (Tableau 17) pour assurer les flux logistiques liés aux évacuations et approvisionnements du ballast et des autres fournitures. Ces deux approches seront combinées dans le choix effectué.

D'une part, l'utilisation de puits de ventilation existant sur le réseau pour les convertir en puits logistiques. En effet, le tronçon central se trouvant en tunnel, des puits de ventilation ont été créés pour assurer le renouvellement de l'air. L'idée est donc d'utiliser ces installations existantes modulo des travaux d'aménagement.

D'autre part, la faisabilité a été étudiée d'assurer les flux logistiques grâce aux infrastructures ferroviaires existantes en dehors des circulations commerciales (entre 1h00 et 5h00). Pour ce faire, la RATP dispose de deux bases de travaux (une telle base est appelée un Parc des Services Techniques (PST) aux extrémités de la ligne. L'exercice

consiste à vérifier que les volumes de déblais journaliers peuvent être convoyés par trains de travaux vers ces deux sites.

Tableau 17. Analyse comparée des deux modes d'exécution envisageables

MODE D'EXÉCUTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Flux par puits logistiques	Rendement élevé Non saturation des PST Flexibilité	Aménagement de mise en accessibilité lourd (dévoisement de la caténaire, percement de l'ouvrage GC, etc.) Coûts Ne réduit pas l'utilisation de trains de travaux
Flux par trains de travaux	Méthode éprouvée Aucun aménagement spécifique à prévoir Double fret possible	Peu flexible Saturation des PST Utilisation maximale des trains de travaux Capacité limitée aux 6 trains de travaux disponibles

II.4.6 Définition du périmètre

Les travaux ont pour objet le renouvellement complet de la voie ferrée dans le tronçon central de la ligne A du RER (entre les gares de Nanterre-Préfecture et Vincennes).

Le périmètre de ce projet est défini selon deux modes :

- mode A : environ 15 km de voie simple et 10 appareils de voie à renouveler sous coupure d'exploitation d'une durée de quatre semaines lors de la période estivale (au mois d'août en majorité), chaque été de 2015 à 2018 inclus comprenant :
 1. Études des conditions logistiques et de l'exécution des travaux
 2. Mise en place et gestion de l'ensemble des bases logistiques (bases vie, bases d'approvisionnement)
 3. Travaux de modifications structurelles sur les puits de ventilation à transformer en puits d'accès au tunnel
 4. Réalisation d'un renouvellement complet des constituants de la voie ferrée
 5. Reprise du réseau de drainage
 6. Réalisation de travaux induits sur la caténaire (dévoisement de la ligne aérienne de contact et réglages de celle-ci)

- mode B : environ 8 km de voie simple et environ 17 appareils de voie à renouveler lors d'arrêts nocturnes d'exploitation entre 22h30 et 5h00 environ sur la période juillet/août pendant 3 années de 2019 à 2021 inclus.

La RATP met à disposition du titulaire ses deux PST et permet l'ouverture de deux puits logistiques, un au bassin de l'Arsenal à l'est et l'autre à l'Île du Pont à l'ouest. Elle limite le nombre de trains de travaux à six. Trois trains pouvant se rendre du chantier au PST de Nanterre le Marteau, et trois du chantier au PST de Sucy. Il s'agit des seules contraintes imposées, l'idée étant de permettre l'ouverture à tous types d'approches.

Enfin, les fournitures de voie (rails, ballast, traverses, sauf les appareils de voie) sont à la charge du titulaire. Par cette mesure, la RATP s'oriente vers la constitution d'un marché « clé en main ».

II.5 ÉTUDES DÉTAILLÉES

II.5.1 Équipement de la voie

Les travaux du RVB ont pour objectif de redonner à l'infrastructure un cycle de vie d'au moins 40 ans. La voie renouvelée doit donc être choisie pour répondre aux sollicitations présentes et futures tout en minimisant les opérations de maintenance.

II.5.1.1 Choix des constituants de la voie

II.5.1.1.1 Rail

Le tonnage journalier de 200 000 tonnes impose de maintenir un profil de rail de type 60E1. Seules certains appareils de voie présentent un profil de type 50E6. Le projet RVB étudie la possibilité de généraliser un profil de rail lourd aux appareils de voie si les règles de conception le permettent. On reviendra sur ce point dans la section du mémoire sur le choix de technologie des appareils de voie.

Le projet RVB est aussi l'occasion de remettre en conformité les nuances de rail en fonction des rayons des courbes du tronçon central. En effet, la situation existante fait état de non-conformités quant au respect des nuances de rails dans les courbes dites critiques. L'annexe 3 indique les points kilométriques des zones devant impérativement être équipées de rails en nuance R350 LHT.

Une modification de nuance d'acier peut engendrer une problématique de signalisation. En effet, la nuance d'acier influe sur la résistivité du courant traversant les rails. De ce fait, un changement de nuance non maîtrisé peut entraîner un déséquilibre du circuit de voie et perturber la circulation des trains. Il est important de toujours avoir les deux files de rail dans la même nuance d'acier.

Le rail sera posé en LRS de longueur maximale de 288 mètres et dont les barres élémentaires (36 mètres) sont soudées électriquement en atelier. La RATP vient d'homologuer le processus de laminage de barre LRS de 108 mètres. Cette nouveauté permet de limiter le nombre de soudures électriques (point de faiblesse) dans un long rail soudé.

II.5.1.1.2 Types d'attaches

Le choix du type d'attaches dans le tronçon central s'est immédiatement porté vers l'attache à fil SKL 14 (Figure 89) éprouvée sur de nombreux réseaux étrangers et validée par des essais en voie sur les lignes A et B du RER. Les traverses équipées du système d'attache Vossloh SKL 14 portent le suffixe WG.



Figure 89. Attache à fil Vossloh SKL 14

Cette attache en forme de W permet de maintenir en permanence le rail serré sur la traverse. Le rail est positionné latéralement par des butées qui assurent la transmission de l'effort de serrage à la traverse, dans le but de ne jamais solliciter les tirefonds.

Autre avantage non négligeable, il est possible de commander une traverse déjà équipée en usine permettant d'éviter la gestion d'un stock sur le chantier, la perte de composants et d'optimiser la productivité du chantier.

Le système d'attache est totalement isolé électriquement. Il n'est pas nécessaire d'ajouter une autre pièce isolante entre le patin du rail et l'attache.

II.5.1.1.3 Choix et processus de qualification des traverses

Le tonnage actuel et l'évolution de celui-ci pour les prochaines années imposent le remplacement des traverses bois par des traverses monoblocs en béton précontraint de classe 4. Les traverses répondant à ces critères sont les suivantes :

- M450 (Figure 26) : remplaçante de la BON U41 de longueur 2,41 m, épaisseur 22 cm, largeur variable 25 cm (centre) – 29 cm (rail), et masse 285 kg.
- M240 (Figure 27) : remplaçante de la M260 (ex BON U31) de longueur 2,26 m, épaisseur 17 cm, largeur constante 30 cm, et masse 285 kg.

Le modèle M260 a été écarté en raison de sa fragilité, constatée sur le réseau ferré national (RFN) et RATP. Cette faiblesse a été confirmée par des essais d'homologation complets réalisés en 2012 au laboratoire SNCF sur demande du département de l'ingénierie de la RATP.

Avant homologation sur le réseau RATP, les traverses M240 et M450 produites par SATEBA ont été testées en laboratoire et en voie.

Les versions M243 et M453 sont destinées à accueillir des rails de sécurité, elles seront utilisées pour servir de support à des châssis neufs d'équipements de signalisation (balise de contrôle de vitesse).

Afin d'améliorer le contact entre la traverse et le ballast et limiter l'usure prématurée du ballast, la RATP a décidé d'étudier l'ajout de patins réducteurs d'attrition (PRA) sous les traverses. Ces PRA (Figure 90) permettent également d'améliorer la géométrie de la voie tout en réduisant de 5 cm l'épaisseur de ballast sous le niveau inférieur de la traverse (NIT).

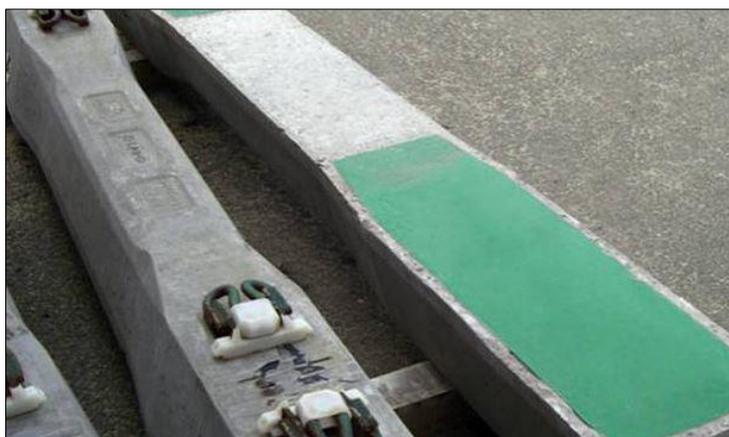


Figure 90. Photo d'un patin réducteur d'attrition FIMOR

Dans le cas d'une pose de voie sur ballast, les épaisseurs minimales de ballast sous NIT, mesurées au droit du rail, sont données dans le Tableau 18 :

Tableau 18. Épaisseur de ballast à mettre en œuvre en fonction du type de plancher

TYPE D'OUVRAGE	TRAVERSE BOIS	TRAVERSE BÉTON	TRAVERSE BÉTON ÉQUIPÉE DE PRA
Tunnel ou ouvrage d'art	25 cm	25 cm	20 cm
Plateforme terrassée	20 cm	25 cm	20 cm

Les PRA doivent être testés en laboratoire. Le modèle testé est le G3 de GETZNER. Les traverses équipées de ces PRA sont désignées par le suffixe WGA.

Les essais en laboratoire réalisés sont les suivants :

- contrôles dimensionnels et masse,
- porosité du béton,
- essais statiques de la section sous rail et de la section centrale,
- essais dynamiques de la section sous rail,
- essai de résistance à l'usure ou essai « VIBROGIR ». Cet essai permet de simuler 5,5 ans d'exploitation du tronçon central du RER A sur la base d'un tonnage journalier de 200 000 tonnes,

- essai de résistance sous chargement oblique,
- résistance électrique des fixations,
- résistance à l'arrachement des gaines,
- raideur statique et dynamique des traverses avec PRA,
- résistance à l'arrachement des PRA,
- essai VIBROGIR des traverses avec PRA.

À l'issue de l'ensemble des essais, les traverses M240 et M450 ont été homologuées pour une utilisation sur le réseau RATP. Cette homologation concerne les traverses M240 (WG/WGA), M243 (WG/WGA), M450 (WG/WGA), et M453 (WG/WGA).

Ces essais font apparaître que la traverse M450 résiste mieux aux efforts de flexion que la M240 (essais sous rail et au centre).

Un effort plus élevé est également nécessaire pour arracher les gaines de fixation de la traverse M450. En revanche, la M450, plus rigide, se comporte légèrement moins bien lors de l'essai VIBROGIR, en satisfaisant cependant au critère de succès.

Au regard du tonnage projeté sur le tronçon central de la ligne A (supérieur à 200 000 tonnes par jour), la préconisation du bureau d'étude voie, en date du 13 juin 2014, était d'équiper la voie avec la traverse la plus résistante et bénéficiant du retour d'expérience le plus significatif, à savoir la M450. La M240 équiperait tout de même les zones où les conditions géométriques ne permettraient pas de déployer la M450. Une étude d'armement (épaisseur de ballast sous traverse) permettra d'arrêter les linéaires concernés par chaque type de traverse.

En juillet 2014, 3 traverses M240 et 3 traverses M450 prélevées en voie sur une zone d'essai, ainsi qu'une traverse M450 neuve, ont fait l'objet d'essais d'homologation complémentaires. Les traverses extraites de la zone d'essai n'ont pas fait appel à des remarques particulières. En revanche, la traverse neuve, issue d'un stock RATP, s'est fissurée suite à l'essai VIBROGIR. Ce constat a poussé la SNCF et SATEBA à lancer des investigations. Il en ressort que le banc d'essai VIBROGIR met en résonance les traverses M450 équipées de PRA provoquant la ruine de celles-ci.

En conséquence, la RATP a retenu uniquement la traverse M240 pour le chantier de l'été 2015. L'ingénierie RATP maintient tout de même une veille technologique sur l'évolution des résultats des traverses M450 équipées de PRA.

II.5.1.1.4 Tapis antivibratile

Dans le cadre du projet RVB, la maîtrise d'ouvrage a communiqué à la maîtrise d'œuvre la liste des zones de l'infrastructure à faire équiper en tapis antivibratile. Ces zones ont été identifiées par le bureau des plaintes qui recense les plaintes des riverains. Ces plaintes sont analysées sur site pour vérifier s'il s'agit d'un défaut localisé (empreinte de patinage, éclat important, etc.) ou tout simplement les vibrations générées par la circulation des trains. Dans le cas d'un défaut isolé, la plainte est transmise au service de la maintenance pour action et suppression du défaut. Concernant les vibrations et le bruit solidien, l'ouvrage doit être équipé d'un matériau permettant d'atténuer les nuisances.

On appelle « bruit solidien » le son généré par la mise en vibration des éléments de la structure d'un bâtiment. Ce bruit peut être produit par un équipement situé dans le bâtiment (climatisation, ascenseur, etc.) ou par le passage de véhicules (camions, Métro, RER, Tramway, etc.) à proximité des bâtiments. Lorsque la source est extérieure au bâtiment, la transmission emprunte 5 chemins différents (Figure 91) [LEV 2012]:

- 1 : création et transmission des vibrations à travers la voie et la plateforme,
- 2 : transmission par le sol,
- 3 : transmission par les fondations,
- 4 : transmission par la structure,
- 5 : rayonnement acoustique.

Chacun de ces chemins est susceptible d'atténuer ou d'amplifier certaines fréquences du spectre d'émission.

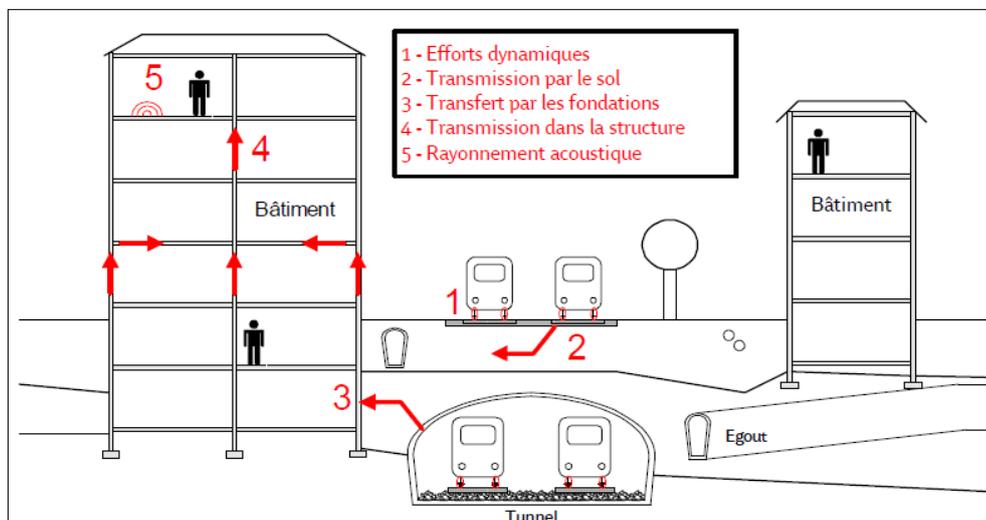


Figure 91. Transmission du bruit solidien en milieu urbain dense

Le tapis antivibratile est placé sous la voie entre la couche de ballast et le radier en béton d'un tunnel ou d'un ouvrage.

Les rôles du tapis sous ballast sont les suivants :

- assurer l'élasticité de la voie,
- limiter l'usure par attrition du ballast sur le radier de l'ouvrage,
- limiter la transmission des vibrations.

Ces tapis doivent résister à toutes les sollicitations provenant de la structure de la voie et de la circulation normale des trains, y compris les efforts de freinage et d'accélération. La circulation des trains sur les voies du RER satisfait aux conditions suivantes :

- charge à l'essieu : 22,5 tonnes,
- vitesse maximale : 100 km/h.

Les tapis doivent permettre d'obtenir une atténuation du bruit solidien de 25 dB.

Dans le cadre du projet, le département de l'ingénierie a testé deux références de tapis antivibratiles pour en prononcer l'homologation :

- un tapis GETZNER référence Sylodyn DN 325 d'épaisseur 2,5 cm en une couche,
- un tapis CDM référence UBM-H22-S d'épaisseur 4 cm en deux couches et géotextile.

Ces deux modèles sont complétés par des références de tapis pour les zones de transition et les remontées latérales.

Le rapport d'essais en annexe 8 met en évidence les bonnes performances du produit GETZNER. Il est très stable selon tous les types de sollicitations (fatigue mécanique, humidité, vieillissement accéléré, etc.).

En comparaison, le tapis CDM présente 3 défauts :

- une raideur dynamique plus importante pouvant diminuer les performances antivibratiles ;
- une rigidification du tapis suite aux essais de fatigue pouvant nuire à la durabilité du produit ;
- une épaisseur plus importante (4 cm contre 2,5 cm) ne permettant pas une mise en œuvre sur les zones où l'épaisseur de ballast est réduite.

En conséquence, seuls les produits GETZNER sont homologués par la RATP pour le projet RVB.

II.5.1.2 Choix de la technologie des appareils de voies

La majeure partie des appareils de voie (ADV) doivent être renouvelés. Au total, 27 ADV sont concernés, parmi lesquels figurent 13 branchements simples, 6 communications et 2 branchements 3 voies.

Les études ont été partagées entre les bureaux d'études RATP du département du gestionnaire d'infrastructure (mainteneur historique) et du département de l'ingénierie.

L'objectif de ces études est d'optimiser l'ensemble des paramètres permettant d'obtenir des appareils de voie qui s'inscrivent le mieux dans la voie et assurent une disponibilité renforcée des installations. Le type de traverses, le tracé, l'implantation, le profil de rail et le choix du modèle d'appareil sont les paramètres à considérer dans le cadre de ces études.

II.5.1.2.1 Types de plancher

Les contraintes d'exploitation imposent, dans la mesure du réalisable, la généralisation des appareils de voie sur traverses béton mais on verra que certaines particularités obligent à conserver un plancher bois.

Tout d'abord, les traverses béton sont plus épaisses que les traverses bois (20 cm en moyenne contre 15 cm pour les traverses bois). On ne peut déployer d'appareil de voie avec plancher béton dans les zones où les épaisseurs de ballast sont trop faibles.

De plus, le passage d'une communication sur plancher bois à une communication sur plancher béton impose une modification de l'entraxe des voies qui n'est pas toujours possible. L'entraxe des voies (Figure 92) passe de 3,57 m sur une pose bois contre 3,62 m sur une pose béton. Cette modification non négligeable ne doit pas compromettre la position de la voie au regard de l'ouvrage (problématique de gabarit) et de la caténaire.

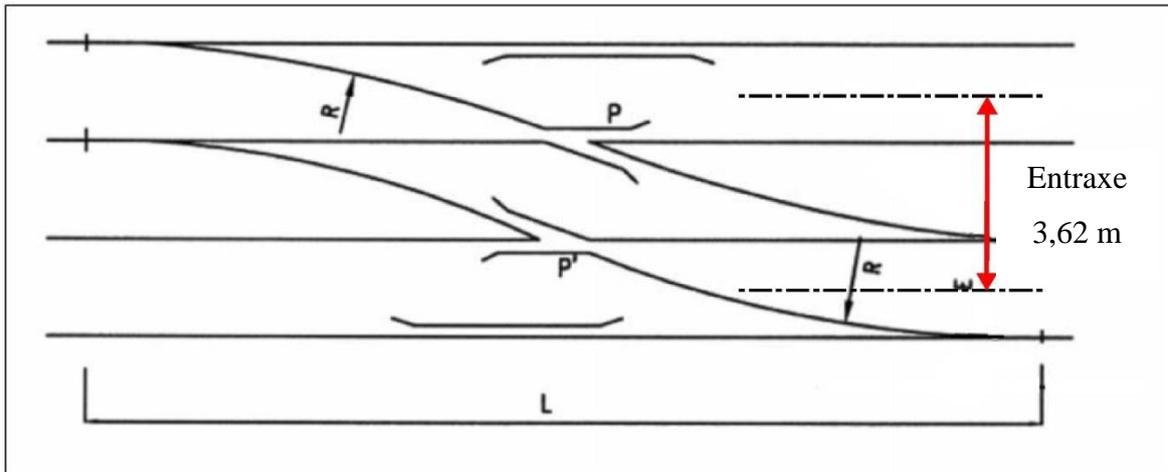


Figure 92. Schéma d'implantation d'une communication

II.5.1.2.2 Choix du modèle

Les derniers modèles d'appareil de voie standard SNCF pour ligne classique sont les modèles 1992, 1995 et 2002. Il paraît donc normal d'étudier la possibilité de remplacer tous les appareils de voie, quand cela est possible, par le modèle SNCF le plus récent à savoir le modèle 2002. La voie courante se dote des dernières innovations, il doit en être de même concernant les appareils.

On peut donc s'interroger sur la différence entre les modèles 92/95 (sensiblement les mêmes) et le modèle 2002.

Tout d'abord, le modèle 2002 comporte des soudures de talon d'aiguille et de contre-aiguille décalées (Figure 93). Ce changement s'explique par le fait que la SNCF a voulu faire disparaître le passage simultané des roues d'un même essieu sur les soudures des talons d'aiguilles. Ainsi les soudures de talon d'aiguillage ne sont pas franchies en même temps limitant les contraintes sur ces points de faiblesse.

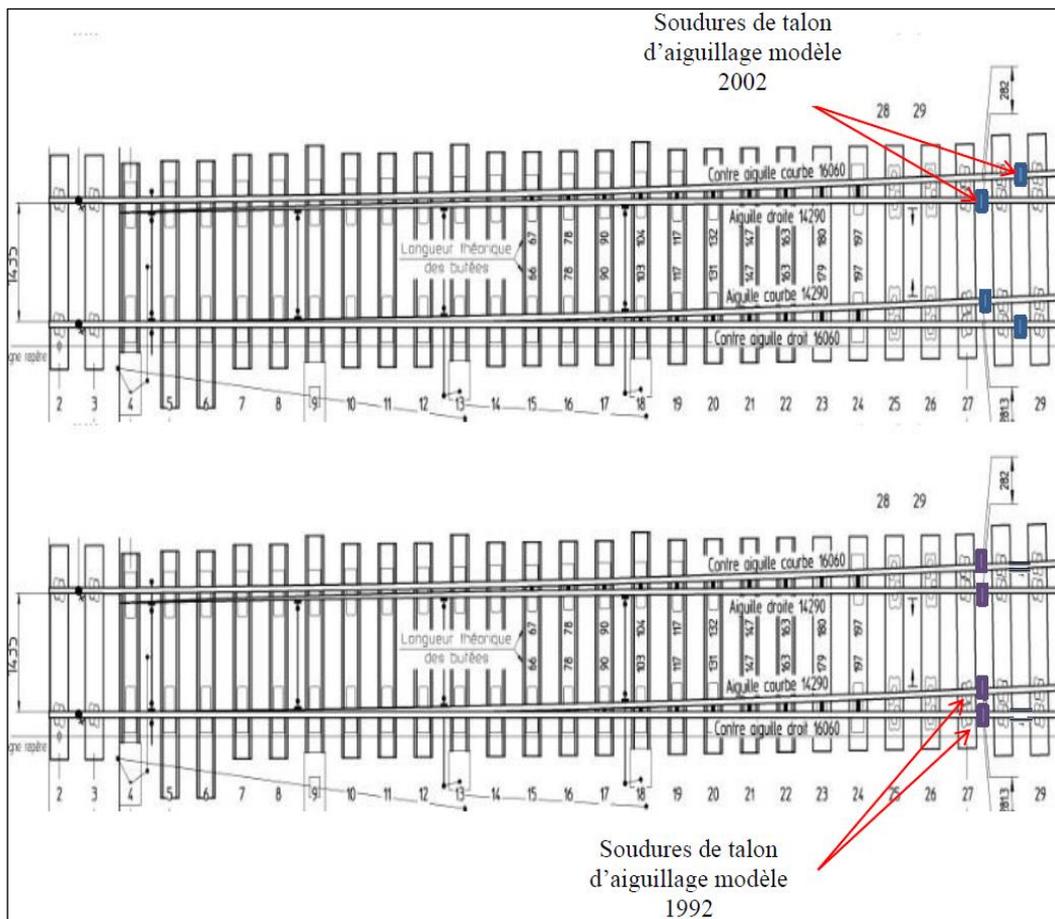


Figure 93. Position des soudures de talon d'aiguillage modèle 2002 et 1992

Autre différence importante, l'absence d'entretoise de liaison en talon d'aiguille sur le modèle 02. La disparition de cette pièce présente l'avantage de réduire le nombre de pièces dans le demi-aiguillage. Cela évite le démontage de la pièce lors d'un renouvellement du demi-aiguillage lors des interventions de maintenance. Notons que cette pièce servait de point fixe (référence) lors des opérations de remplacement de demi-aiguillage, facilitant la prise de cote avant tronçonnage.

II.5.1.2.3 Choix du profil de rail

Le tronçon central présente des appareils de voie au profil 50E6 et 60E1. Le projet RVB doit viser à généraliser le profil 60E1 sur tous les ADV renouvelés. En effet, la voie courante étant au profil 60E1, tous les appareils de voie de profil 50E6 sont raccordés à la voie courante par l'intermédiaire de coupons mixtes (rail de profil mixte 50E6/60E1) présentant un point de faiblesse. Aussi, le profil 60E1, comme pour la voie courante permet de supporter le tonnage en constante augmentation sur le RER A.

En revanche, l'appareil de voie tangente 0,13C a nécessité une étude d'homologation particulière car il ne s'agit pas d'un modèle standard à la SNCF.

La RATP a missionné la SNCF pour une prestation de revue de conception quant à l'utilisation d'un branchement tangente 0,13C de profil 60E1. Cette analyse doit permettre de prononcer un avis argumenté sur la géométrie et la conception de l'appareil en question en se basant sur l'expérience de la SNCF.

L'analyse montre :

- un tracé GAME (Globalement Au Moins Équivalent) par rapport au tracé du branchement tangente 0,13C de profil 50E6 modèle 1988 de la SNCF,
- une conception conforme aux règles de l'art,
- le respect des exigences sécuritaires.

Cette expertise permet de conclure à l'aptitude à l'emploi du branchement tangente 0,13C en profil 60E1.

L'annexe 5 précise la liste des appareils à renouveler dans le cadre du projet.

II.5.2 Caractérisation des volumes de ballast

La volonté de réaliser un RVB renforcé en dégarnissant le ballast jusqu'en fond de radier génère des volumes à extraire très importants. Ce projet se caractérise par les flux de matériaux à évacuer d'une part, et à remettre en œuvre d'autre part. Il est donc primordial de bien évaluer les volumes de ballast.

II.5.2.1 Approche par l'exploitation du référentiel

En phase d'étude, comme abordé au paragraphe II.2.5, la RATP a dû vérifier que les volumes de ballast dans le tunnel pouvaient être évacués par trains de travaux et par l'utilisation d'un puits logistique, ou des deux disponibles. La première approche a donc consisté à utiliser les coupes de tunnel (Figure 94). La surface de ballast multipliée par le linéaire de ladite section soustraite du volume des traverses bois permet d'obtenir le volume de ballast en place.

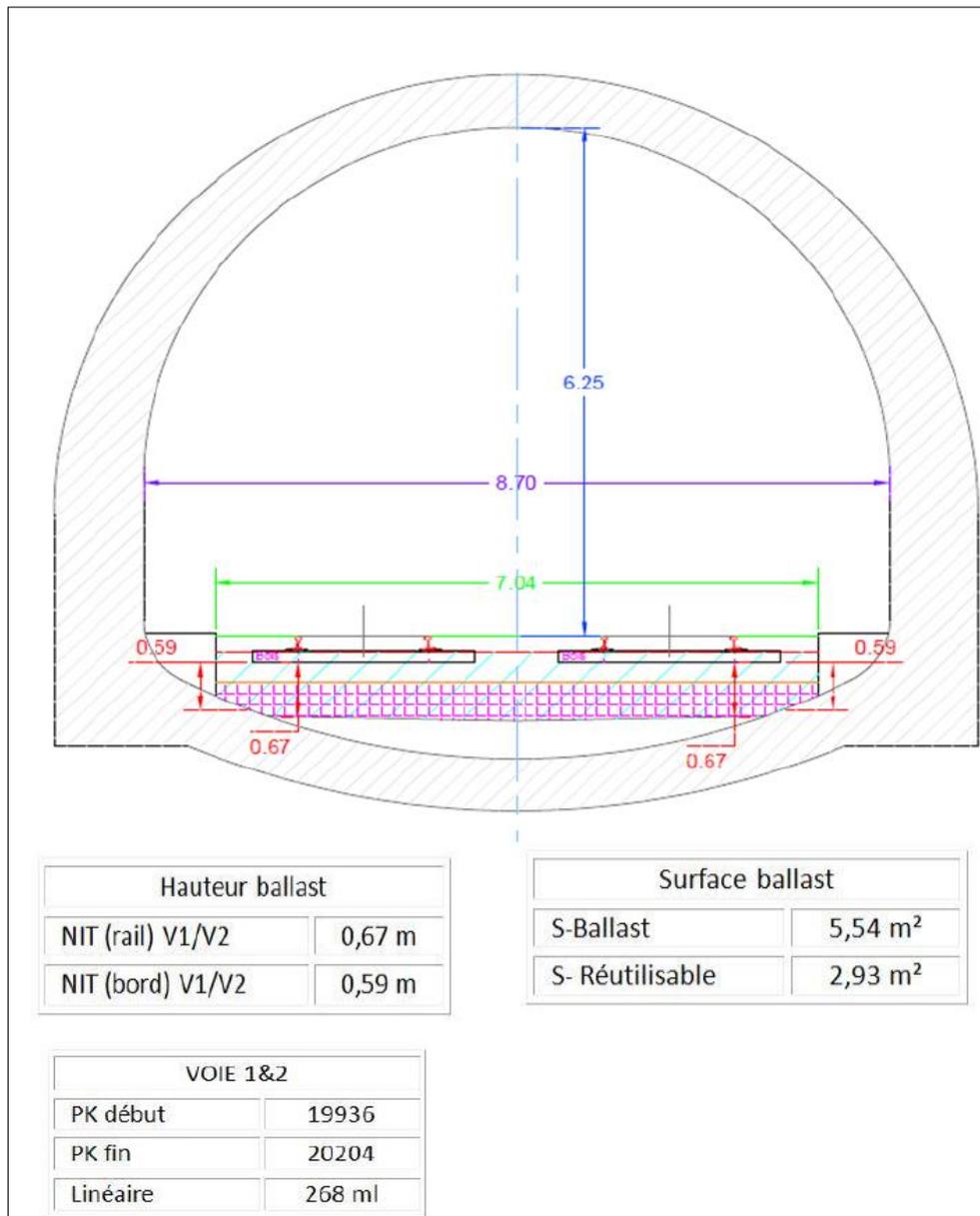


Figure 94. Coupe schématique de tunnel et calcul des sections de ballast

De plus, l'utilisation des coupes de tunnel permet également d'estimer la quantité de ballast pouvant faire l'objet d'une réutilisation après un recyclage. Cette opération de traitement s'appelle le criblage⁴⁵, il peut être réalisé dans le tunnel ou sur une base arrière. La solution in situ est économiquement et techniquement plus avantageuse. Elle permet de s'affranchir du transport et de la logistique particulière à mettre en œuvre pour acheminer ce matériau recyclé. En effet, les règles de l'art imposent l'utilisation de matériaux nobles

⁴⁵ Le ballast usagé est lavé pour éliminer les fines et les polluants puis passé dans des tamis pour ne conserver que la fraction 25/50 réutilisable en matériaux de sous-couche.

(ballast neuf) sur une épaisseur de 25 cm sous NIT, le reste peut être remblayé par du ballast criblé. Cela implique l'utilisation de deux trains différents avec des manœuvres à réaliser pour la mise en œuvre des deux types de ballast. La synthèse des volumes calculés à l'aide des coupes de tunnel, jointe en annexe 9, permet d'estimer :

Tableau 19. Synthèse des volumes de ballast

	V1	V2	TOTAL
En place	26037 m ³	26071 m ³	52108 m ³
Réutilisable	6540 m ³	6552 m ³	13092 m ³
Neuf	18484 m ³	18513 m ³	36997 m ³

Cette méthode présente quelques limites :

- elle suppose que les plans de coupes de tunnel soient exacts ;
- elle ne tient pas compte des différentes phases de bourrage mécanique lourd qui remonte la voie pour en corriger les défauts de nivellement. Cela s'accompagne par une mise en œuvre de ballast neuf. On estime le relevage de voie à 5 mm tous les 3 ans ;
- les cordons de ballast sur les bords extérieurs de traverses et le dôme en entrevoie ne sont pas évalués.

En conséquence, la RATP a décidé d'affermir l'estimation des volumes par l'utilisation d'une méthode géophysique

II.5.2.2 Approche géophysique par la méthode géoradar

Afin de connaître la profondeur du radier et d'en déduire l'épaisseur de ballast en place, on a eu recours à une prestation d'auscultation par ultrason. Il s'agit en fait de prospection sismique et plus particulièrement de sismique réflexion dont le principe est détaillé ci-dessous :

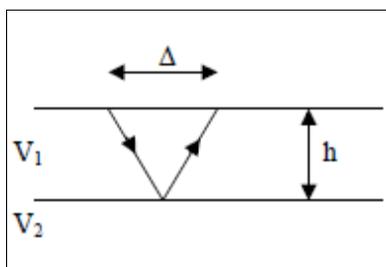


Figure 95. Principe de la sismique réflexion

V_1 et V_2 sont les vitesses de propagation dans les milieux 1 et 2. Dans notre cas, il s'agit respectivement du ballast et du béton. Du fait de l'égalité entre les angles d'incidence et de réflexion, le parcours de l'onde réfléchi se divise en deux segments égaux et son temps d'arrivée a pour expression :

$$t_r = \frac{\sqrt{\Delta^2/(4 + h^2)}}{V_1}$$

La sismique réflexion est très intéressante, elle permet de détecter toutes les interfaces avec une très bonne résolution, à condition d'avoir effectué un bon étalonnage par des sondages.

Cette méthode, nommée dorénavant « géoradar », est effectuée grâce à 3 émetteurs/récepteurs disposés sur un châssis lui-même fixé à l'avant d'un locotracteur comme le montre la figure ci-dessous :

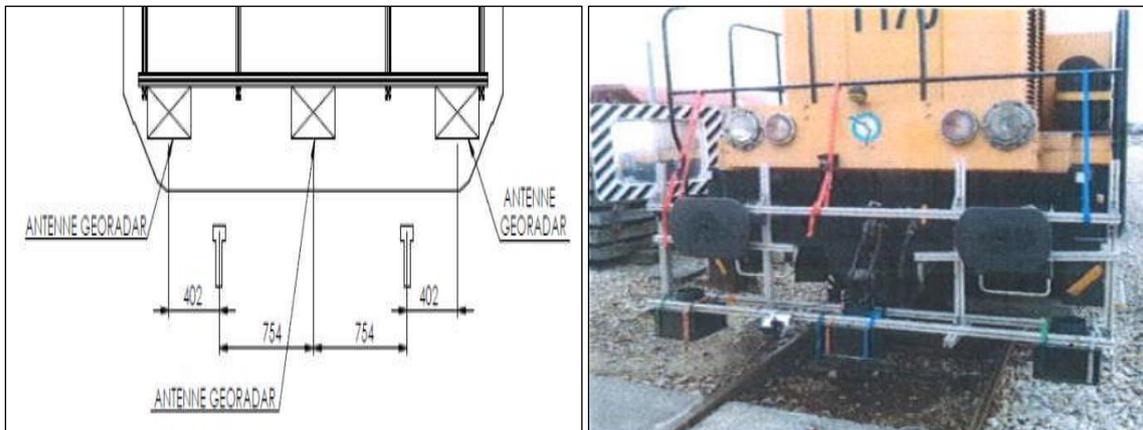


Figure 96. Dispositif géoradar et distance des antennes aux files de rail

Les trois antennes mesurent à l'avancement les échos radar retournés par l'interface ballast/radier tous les 10 cm environ. Ces mesures sont de type « temps de retour » en secondes. Elles sont ensuite épurées pour donner les profondeurs du radier par rapport au plan de roulement tous les 10 mètres.

Des essais complémentaires au pénétromètre enfoncé à refus (essais dits « PANDA ») à un certain nombre d'endroits dans le tronçon central a ensuite permis d'étalonner les mesures renvoyées par les antennes radar. Une profondeur a pu être localement corrélée à un temps de retour de l'onde permettant la traduction des données radar en distance. Les résultats sont repris dans le Tableau 20 :

Tableau 20. Comparaison des volumes issus des coupes et des relevés géoradar

MÉTHODE	VOLUME TOTAL EN PLACE
Coupe de tunnel	52108 m ³
Géoradar	44484 m ³
Écart	15%

Cet écart important (7624 m³) remet en cause la précision des relevés issus de la prospection sismique. Aussi, des écarts significatifs de profondeur de radier entre l'exploitation des coupes de tunnel et les relevés géoradar ont conduit la RATP à réaliser des sondages complémentaires.

II.5.2.3 Sondages

Les points kilométriques où des écarts importants entre la profondeur du radier issue des coupes et celle issue de l'exploitation des données géoradar ont été observés sont retenus pour la réalisation de sondages manuels. La zone retenue correspond à la portion de voie prévue en renouvellement dans le cadre des travaux de l'été 2015 à savoir l'interstation de La Défense et Charles de Gaulle-Étoile.

Il a été demandé aux équipes devant réaliser les sondages d'indiquer la profondeur du radier mais aussi la profondeur à laquelle ils trouvaient une couche de ballast d'avantage compactée. Il s'agissait de relever la profondeur à partir de laquelle la fourche ne suffisait plus à creuser et où l'opérateur devait utiliser une pioche. Cette donnée empirique, que l'on pourrait critiquer pour son « manque de définition » et son imprécision scientifique, a néanmoins été d'un grand intérêt.

II.5.2.4 Synthèse

L'étude [MET 2014] visant à déterminer l'incertitude entre les valeurs théoriques (coupes de tunnel) et les données géoradar met clairement en évidence que la compacité de la couche de ballast la plus profonde influe sur les résultats géoradar. Cette étude part des postulats suivants :

- les sondages manuels sont considérés comme « réels » et sans biais, ils servent de valeur de référence,
- les hauteurs de ballast « compacté » et la profondeur du radier issue des données géoradar sont exprimées en pourcentage de la hauteur « réelle » issue du sondage manuel (Figure 97).

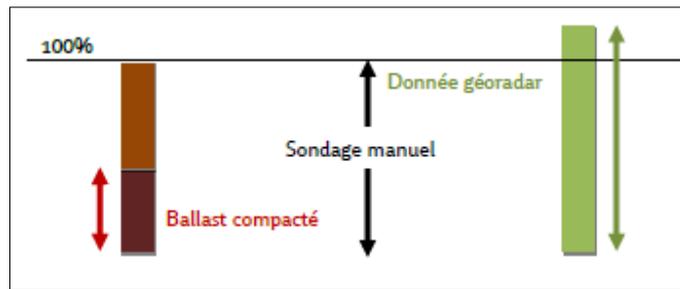


Figure 97. Expression de hauteur de ballast compacté et des données géoradar en pourcentage de la hauteur réelle issue du sondage manuel [MET 2014]

Dans les zones où l'épaisseur de ballast compactée est très importante (36%), le radier est détecté 25% plus haut que ce qu'il est réellement. La conclusion de cette étude est cohérente avec le fait que la vitesse des ondes mécaniques est d'autant plus importante que le milieu est cohérent.

Cette étude permet également d'avoir une indication sur la cohésion des horizons de ballast les plus profonds et donc de vérifier la puissance des engins de terrassement au regard des critères de rippabilité.

II.5.3 Tracé de voie

II.5.3.1 Tracé en plan

Les opérations de maintenance lourde de la voie présentent une particularité marquée pour les études relatives au tracé. Ces opérations, au cours desquelles la voie est reposée à neuf sur de grands linéaires, offrent une occasion de reprendre le tracé et d'en corriger les défauts⁴⁶ apparus du fait d'une utilisation intensive de l'infrastructure. Les lignes gérées par la RATP étant pour la plupart anciennes, il n'existe souvent pas de tracé théorique exploitable et implantable sur le terrain pour guider la repose. Le travail des études consiste alors, à partir de la position existante de la voie relevée par des moyens topographiques, à recréer un tracé théorique le plus proche possible de l'existant. On parle alors de reprise ou de lissage de tracé (optimisation). Les études doivent également garantir que ce nouveau tracé ne conduit pas à des engagements de gabarit de l'infrastructure existante (contraintes).

⁴⁶Ceci est essentiellement vrai de la voie posée sur ballast. Pour la voie posée sur plateforme béton, si le tracé a été correctement réalisé et posé à la construction, un simple changement de rails redonne à la voie toutes ses qualités d'origine.

Le tracé en plan optimisé intègre les principes de base suivants :

- utilisation de relevés topographiques récents donnant un point tous les 15 cm environ ;
- tracé en centres conservés entre les voies 1 et 2 avec un entraxe de 3,57 m minimisant les écarts avec le tracé actuel ;
- tolérance d'écart avec le tracé actuel de l'ordre de 40 mm ;
- reconduction des dévers théoriques existants.

Il prend également en compte les exceptions suivantes :

- l'entraxe des nouvelles communications béton imposé à 3,62 m,
- l'entraxe des voies dans les quais résultant de la position existante des quais. Cela consiste en la recherche de deux voies parallèles situées à la cote de quai avec tolérance,
- les raccords à des zones de voie sur plateforme béton : le tracé projeté doit exactement se raccorder à chaque voie de la zone béton.

II.5.3.2 Tracé en profil

L'optimisation du profil en long vise essentiellement à rabaisser la voie au droit de certains supports de caténaire où la hauteur du fil de contact était déjà critique. Cette disposition ne peut être réalisée qu'en dehors des zones de quais où la modification du profil entraîne des risques d'engagement de gabarit. Le profil projeté vise à remettre en conformité la position de la voie par rapport aux quais. Souvenons-nous que la voie sert de référence pour le génie civil, les quais et les autres systèmes. L'abaissement de la voie a pour but de se donner plus de souplesse par rapport à la caténaire. En effet, dans le tronçon central, la caténaire se trouve à une hauteur inférieure à 5 m par rapport à la voie. Les opérations de reprise de nivellement de voie par bourrage mécanique lourd entraînent un relevage d'environ 5 mm tous les 3 ans, réduisant à mesure des années, la hauteur du fil de contact par rapport à la voie. La correction du nivellement ne peut être réalisée sans relevage de la voie.

Ces modifications de profil doivent faire l'objet d'une vérification du gabarit au droit des obstacles dans le tunnel et au droit des appareils de voie dans leur implantation projetée.

Les études détaillées ont permis d'arrêter le choix des constituants à mettre en œuvre dans le cadre du renouvellement des voies du tronçon central de la ligne A. Ce projet est

l'occasion pour la RATP de redonner à la voie un cycle de vie d'au moins 40 ans tout en la dotant des dernières innovations en termes de constituants. Ces études ont été conclues par l'édition d'une spécification technique qui faisait partie des pièces du dossier de consultation à destination des entreprises.

III. RÉALISATION DU CHANTIER

Dans cette partie, on traitera du chantier 2015. On présentera le programme travaux, l'organisation mise en place, la planification et l'exécution des travaux.

III.1 PRÉAMBULE

Tout d'abord, revenons sur le programme des travaux (Figure 98) arrêté pour l'été 2015.

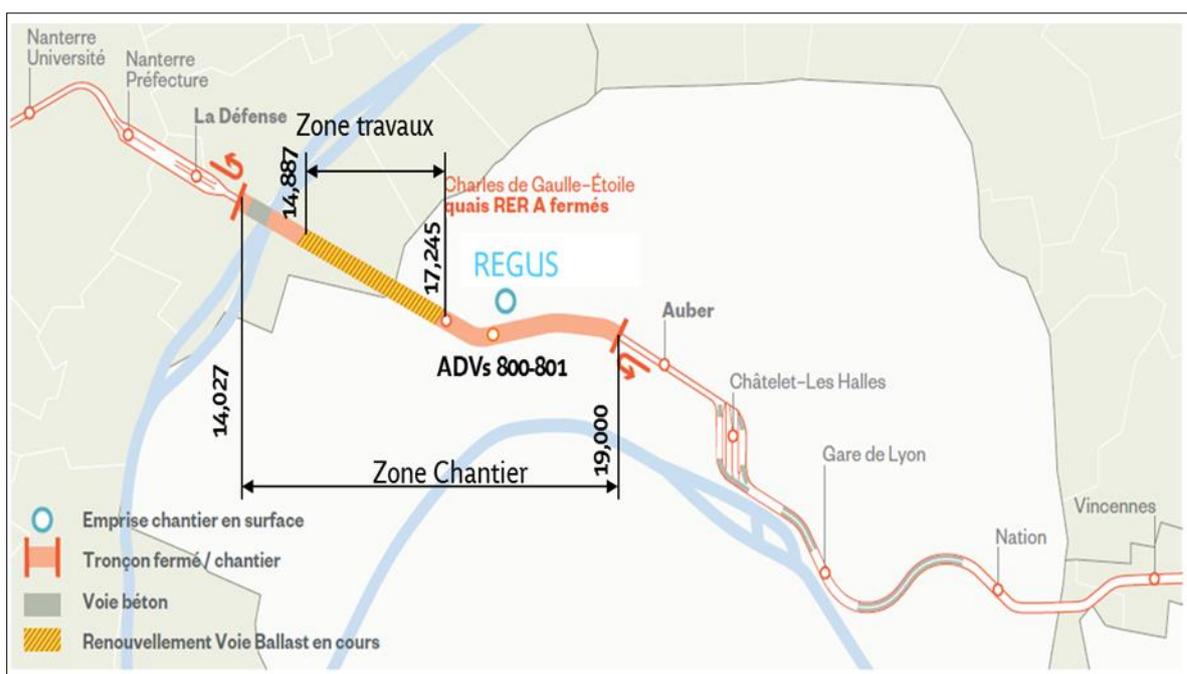


Figure 98. Programme des travaux du RVB 2015

La zone de chantier ou zone d'interruption se trouve entre les gares d'Auber et La Défense notamment entre les points kilométriques 14 027 et 19 000.

Les gares d'Auber et La Défense restent circulées et sont utilisés pour le retournement des trains voyageurs en jour.

La zone à renouveler se situe entre La Défense et Charles de Gaulle-Étoile, plus particulièrement entre les points kilométriques 14 887 et 17245 et la communication 800/801. Le tronçon à renouveler s'étend sur 2358 mètres soit un total de 4716 mètres de voie.

La période d'interruption est du 24 juillet 2015 en fin de service jusqu'au 23 août à la prise de service.

III.2 ORGANISATION DU CHANTIER

III.2.1 Au sein de la RATP

Dans le cadre de ce projet, la RATP assure aussi bien la maîtrise d'ouvrage que la maîtrise d'œuvre. Ce chapitre présentera l'organisation mise en place pour la surveillance du chantier en période d'exécution. Volontairement, on ne reviendra pas sur l'organisation de la RATP en phase d'études.

III.2.2 La maîtrise d'œuvre

Pour rappel, la Maîtrise d'Œuvre (MOE) est le « fournisseur du projet ». Elle prend deux engagements clés portant sur le processus du projet :

- qualifier les modalités d'exécution et d'achèvement du projet à partir de son savoir-faire et de ses ressources, et définir l'ensemble des activités pour concevoir et/ou réaliser le produit du projet ;
- garantir la conformité du produit, c'est-à-dire coordonner le processus du projet pour développer un produit conforme aux objectifs du projet.

La gestion d'un chantier sur quatre semaines en 3x8 et en 7 jours sur 7, nécessite une organisation des équipes de maîtrise d'œuvre importante. Les enjeux, évoqués dans un chapitre précédent, imposent une réactivité à toute épreuve et donc une surveillance attentionnée des activités du titulaire. Pour assurer cette mission, la MOE, sur la base de l'organisation du titulaire du marché d'exécution des travaux, a réalisé un roulement sur une journée type et a défini les besoins en ressources humaines.

Ce roulement est complété des profils des agents nécessaires pour assurer notre mission avec :

- les responsables de poste, de profil cadre, dont le rôle est d'encadrer le personnel sur le poste dont ils ont la charge (6h/14h, 14h/22h, 22h/6h). Ils sont issus du département ING.

- les surveillants de travaux, de profil agent de maîtrise, dont le rôle est de surveiller les activités travaux du titulaire. Ils encadrent deux surveillants de chantier qu'ils affectent à des tâches élémentaires en fonction des besoins du chantier. Ils sont issus du département ING.
- enfin, les surveillants de chantier, de profil opérateur ou technicien, sont choisis en fonction de leur compétence. Ils assurent la surveillance et le contrôle des tâches du chantier. Certains ont une technicité particulière telle que la géométrie de la voie, la technologie des appareils de voie, la soudure de rail ou encore la gestion des manœuvres des trains de travaux. Ces compétences opérationnelles n'existent pas dans le département ING. On a fait appel au département du gestionnaire d'infrastructure (GDI), responsable de la maintenance des installations.

Durant la période de préparation du chantier, la MOE a dû construire le planning ressourcé des effectifs mobilisés pour la surveillance de chantier. La période de préparation a démarré à la signature du marché avec le titulaire en février 2014 jusqu'au début du premier été de chantier en juillet 2015.

À partir du roulement type et des profils nécessaires pour assurer la mission de surveillance, nous avons établi les fiches de poste détaillant l'ensemble des missions à réaliser et les compétences attendues. Notre besoin a été transmis au département GDI en juin 2014. Le retour de l'appel à volontariat nous a été remis en novembre 2014. En interne ING, le responsable de groupe a alloué le personnel sur les postes identifiés.

La nomination des responsables de poste dès janvier 2015 a permis d'organiser des groupes de travail. La démarche a été d'associer très en amont du chantier, les futurs encadrants pour les responsabiliser et partager avec eux le fruit du travail réalisé depuis la signature du marché. On reviendra ultérieurement sur l'analyse de cette démarche.

La dernière étape a été de former l'ensemble du personnel aux spécificités du chantier. Un plan de formation a été établi afin de présenter le chantier et préciser les attentes de la MOE pour assurer notre mission de surveillance.

Ces formations, animées par la MOE, se sont tenues en juin 2015. Le programme de formation est repris dans l'annexe 6.

Pour finir, la Figure 99 présente l'organisation de la MOE pour le chantier 2015.

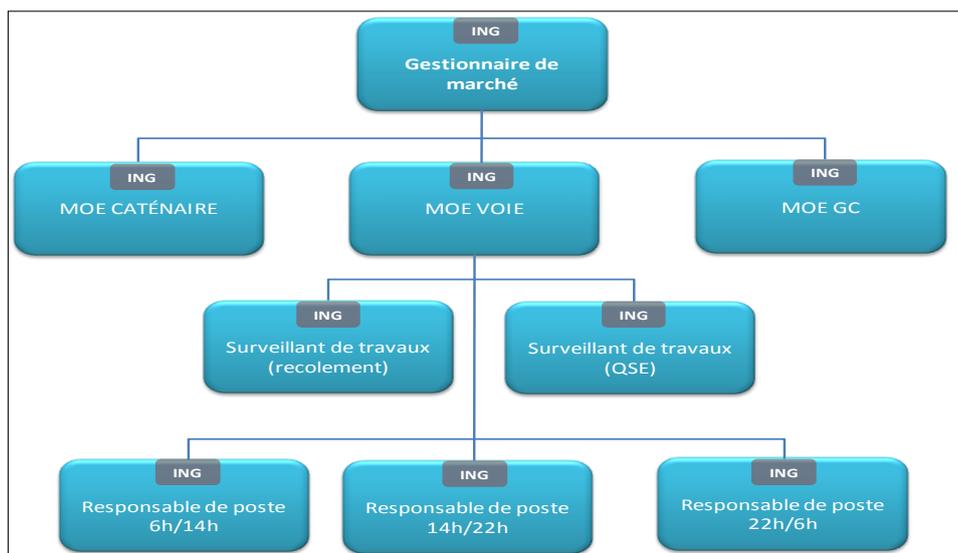


Figure 99. Organigramme de l'encadrement de la MOE

III.2.3 La maîtrise d'ouvrage

Rappelons qu'aux termes de la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985, dite loi MOP, la RATP a l'obligation d'assurer la maîtrise d'ouvrage (MOA) des constructions pour son compte. À ce titre, la loi lui confère des prérogatives dont elle ne peut se démettre.

Le MOA remplit une fonction d'intérêt général à laquelle il ne peut pas se soustraire. Il s'assure de la faisabilité et de l'opportunité de l'opération. Il lui revient de déterminer la localisation de l'ouvrage, d'en définir le programme (objectifs de l'opération et besoins qu'elle doit satisfaire), d'en arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement, de choisir le processus de réalisation de l'ouvrage et de choisir les maîtres d'œuvre (MOE). La Figure 100 présente l'organisation de la Maîtrise d'Ouvrage, le projet étant tout de même porté par la Maîtrise d'Ouvrage Opération du département du Gestionnaire d'infrastructure.

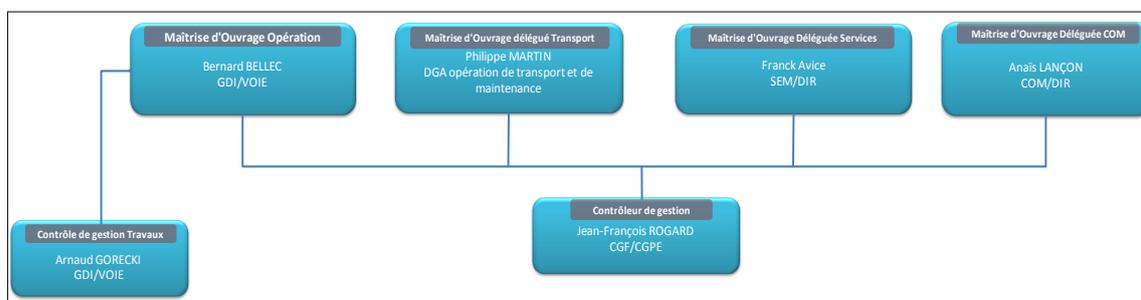


Figure 100. Organigramme de la MOA

III.2.4 La conduite de projet

La conduite de projet (Figure 101) désigne l'équipe dirigée par le chef de projet. Celui-ci est désigné, dès lors que les objectifs du projet sont cadrés (se référer au § II.3.3.2 et la notion de Demande d'Opportunité et d'Investissement), pour assurer la responsabilité globale et unifiée du projet.

Pour ce faire, le chef de projet est aidé dans la gestion du projet par :

- un contrôleur de gestion projet (CGP) désigné pour apporter un soutien dans la gestion économique et financière du projet ;
- un acheteur projet (HAP) désigné pour apporter un soutien dans la gestion des achats et de la logistique du projet ;
- un juriste projet désigné pour apporter un soutien dans l'analyse et le traitement des risques ainsi que pour établir les conventions et contrats, assurer le suivi des litiges et contentieux et d'une manière générale conseiller sur toutes les questions juridiques.

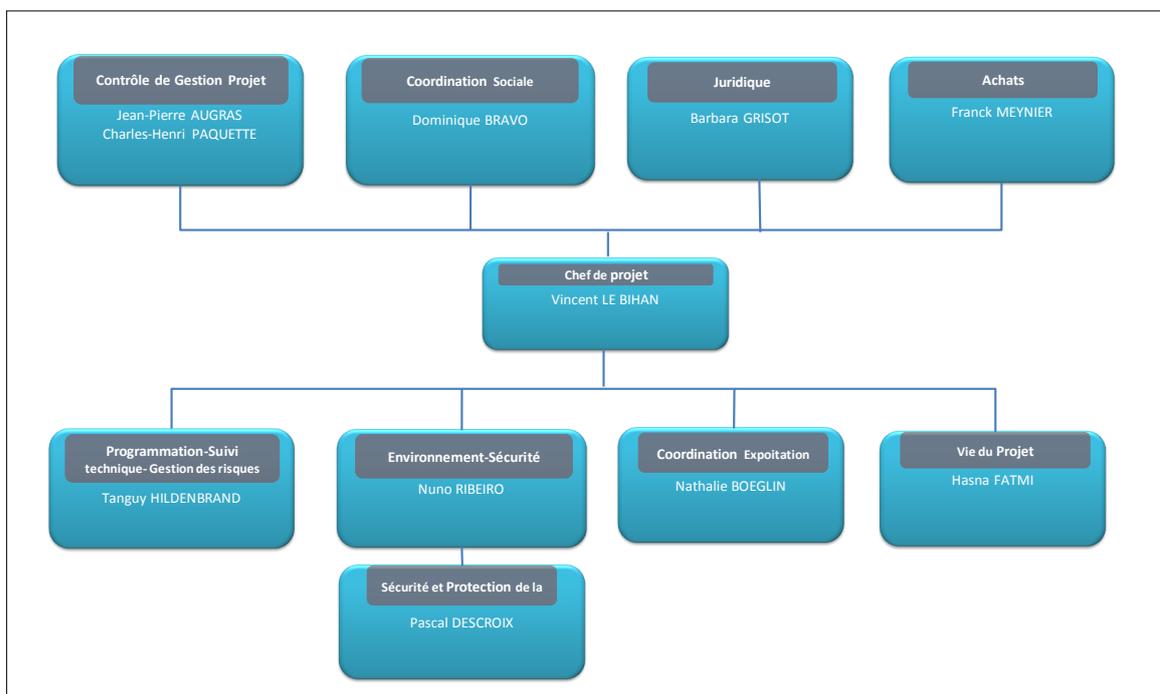


Figure 101. Organisation de la conduite de projet

III.2.5 Organisation du titulaire du marché

Le titulaire retenu par la RATP est une des majors des travaux ferroviaires : Colas Rail.

Le groupe Colas Rail (Figure 102) compte 5000 collaborateurs, des implantations dans 14 pays et une diversité de métiers permettant au groupe de proposer des solutions « clé en main ».

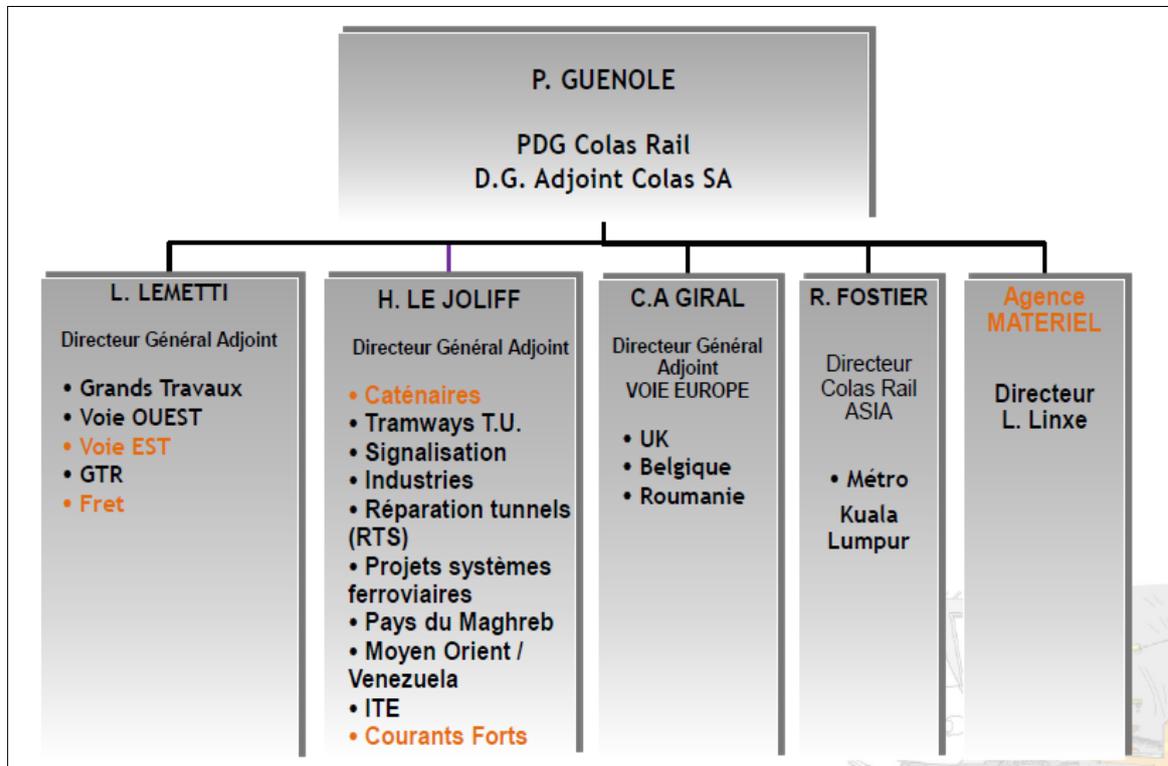


Figure 102. Organigramme du groupe Colas Rail

En orange, sont représentées les entités mobilisées dans le cadre du chantier RVB. On remarque que la stratégie de Colas a été de proposer une solution régionale au défi du RVB. Le choix a été fait de ne pas s'appuyer sur l'entité Grands Travaux et de proposer les services de l'agence Voie Est avec laquelle la RATP est habituée à travailler. Ce chantier en 3x8 et 7j/7 nécessite une mobilisation importante de :

- compagnons : en moyenne 70 sur 24h avec des pics à 110 ;
- conducteurs d'engins : en moyenne 10 ;
- conducteur de locotracteurs : en moyenne 20.

L'organigramme opérationnel de l'encadrement de chantier est donné en annexe 7.

III.3 PLANIFICATION GÉNÉRALE DU CHANTIER 2015

III.3.1 Période de préparation

Pour rappel, la période de préparation du premier été de chantier a débuté à la signature du marché en février 2014. Elle s'est terminée à la date d'interruption du RER A le 23 juillet 2015.

III.3.1.1 Pilotage du marché travaux

Le marché travaux liant la RATP à l'entreprise Colas Rail, prévoit la réalisation des études d'exécution, l'homologation des matériels et des matériaux, la fourniture des matériaux et la production de méthodologies particulières d'exécution. Pour garantir le respect des jalons contractuels, la MOE pilote le suivi des démarches listées précédemment et s'assure du respect des délais et de la cohérence des études remises. Pour ce faire, elle s'appuie sur des outils de suivi qu'on présentera dans cette partie.

III.3.1.2 Le plan de gestion des fournitures

Ce document a pour objet de lister l'ensemble des fournitures à la charge du titulaire et de préciser pour chaque fourniture les éléments suivants :

- les informations permettant l'homologation des fournitures (désignation, référence, fournisseur, spécification technique, etc.) ;
- les informations relatives à la commande (date butoir de passation de commande, date des essais d'homologation, date des essais de réception, etc.) ;
- le planning de production (mode et lieu de livraison).

Les fournisseurs, consultés par Colas Rail, doivent être référencés et agréés par la RATP. Cela signifie que les fournisseurs ont fait l'objet d'un audit des installations de production et du système qualité par un contrôleur usine RATP.

Le Tableau 21 reprend les quantités des principales fournitures pour le chantier 2015 :

Tableau 21.Principales fournitures du RVB 2015

Fourniture RVB 2015	
Désignation	Quantité
Rail nuance R260	9360 ml
Rail nuance 350 LHT	288 ml
Traverse M240	7885 U
Traverse M243	200 U
Ballast 0/31,5	12867 T
Tapis antivibratile	4122 m ²

III.3.1.3 Le Plan d'Assurance Qualité Définitif

Le Plan d'Assurance Qualité définitif décrit les dispositions spécifiques en matière de qualité qui seront prises pour le chantier du RVB tronçon central. Son contenu répond aux principes expliqués dans le dossier de consultation des entreprises notamment dans le Règlement Particulier de Consultation (RPC) remis par la RATP.

Ce document précise les dispositions organisationnelles prévues par le titulaire pour garantir la conformité des travaux réalisés et des fournitures mises en œuvre.

Concernant le contrôle qualité, le titulaire identifie ses points de contrôle dans un plan de contrôle qu'il soumet à la validation du MOE. Il définit la qualification des agents qui réalisent les contrôles.

Ce plan de contrôle précise les éléments suivants :

- les travaux et la tâche concernée par le contrôle,
- la nature du contrôle,
- les critères d'acceptation et les tolérances,
- les différents types de contrôle (interne ou externe),
- les points critiques⁴⁷ et les points d'arrêts⁴⁸,
- les documents de référence (procédures et fiches de contrôles).

Le plan de contrôle précise également si les fiches de contrôles renseignées pendant le chantier alimenteront ou pas le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE).

⁴⁷ Ce terme désigne un point de contrôle défini, réalisé par le titulaire, au-delà duquel une activité ne peut se produire sans l'accord de la fonction désignée dans le plan de contrôle.

⁴⁸ Ce terme désigne un point de contrôle défini au-delà duquel une activité ne doit pas se produire sans l'accord de la MOE.

III.3.1.4 Dossier d'homologation des matériels ferroviaires

La réalisation des travaux nécessitent l'utilisation de trains de travaux à traction thermique. En effet, la sécurisation du chantier au regard du risque électrique impose une consignation longue durée de l'alimentation électrique au niveau de la caténaire durant les quatre semaines d'interruption. La traction thermique est réalisée à l'aide de locotracteurs. Ces derniers doivent faire l'objet d'une homologation afin d'être autorisés à circuler sur le réseau RATP. Ces homologations sont suivies par l'édition de fiches de circulation signées par l'exploitant du RER A.

Les besoins du chantier sont de 12 locotracteurs (Figure 103 et Figure 104), 100 wagons R90 (Figure 105), 1 bousseuse mécanique lourde et 20 ballastières (Figure 106).



Figure 103. Photo d'un locotracteur G1206



Figure 104. Photo d'un locotracteur V212



Figure 105. Photo d'un wagon type R90



Figure 106. Photo de ballastière type BEX

La MOE a également dû instruire une demande de dérogation quant à la capacité de traction des locotracteurs. En effet, pour chaque locotracteur, la fiche de circulation précise la charge remorquable (Tableau 22) en fonction des déclivités (Tableau 23) du réseau. Ainsi, plus les rampes sont importantes et moins la charge remorquable admissible par locotracteur est importante.

Tableau 22. Capacité de traction pour un locotracteur modèle G1206

LOCOTRACTEUR TYPE G1206	
Rampes	Charges remorquables
0 ‰	1500 T
5 ‰	1500 T
10 ‰	1040 T
15 ‰	640 T
20 ‰	520 T
25 ‰	380 T

30 ‰	325 T
35 ‰	265 T
41 ‰	265 T

Tableau 23. Déclivités du RER A supérieures à 25 ‰

DÉCLIVITÉS DU RER A SUPÉRIEURES À 25 ‰	
Sections	Déclivités caractéristiques
St-Germain-en-Laye / Le Vésinet	35 ‰
Nanterre-Université/ Nanterre-Préfecture	36 ‰
Interconnexion SNCF/ Nanterre-Préfecture	39 ‰
La Défense/ Charles de Gaulle-Étoile	30 ‰
Charles de Gaulle-Étoile/ Auber	30 ‰
Gare de Lyon/Nation	30 ‰
Vincennes/ Val de Fontenay	30 ‰
Val de Fontenay/Neuilly-Plaisance	29 ‰
Noisy-Champs/Noisiel	30 ‰
Torcy/Chessy	30 ‰

La demande de dérogation a pour objet de faire évoluer les fiches de circulation pour augmenter les capacités de traction des locotracteurs. Le train le plus lourd du chantier (environ 900 tonnes) ne peut être tracté, pour des raisons administratives, par les locotracteurs mobilisés sur le chantier. Il est évident que les locotracteurs prévus par le titulaire ont des capacités de traction bien supérieures à celles indiquées par les fiches de circulation RATP.

L'instruction de cette demande a permis de faire évoluer les capacités comme indiquées dans le Tableau 24. Pour ce qui concerne le tronçon commun, les capacités de charges remorquables ont été à la hausse, atteignant une augmentation de près de 50% par rapport à la charge remorquable initiale.

Tableau 24. Charges remorquables modifiées suite à la dérogation

LOCOTRACTEUR TYPE G1206		
Rampes	Charges remorquables	Charges remorquables modifiées
0 ‰	1500 T	> 3000 T
5 ‰	1500 T	2510 T
10 ‰	1040 T	1370 T
15 ‰	640 T	930 T
20 ‰	520 T	690 T
25 ‰	380 T	550 T
30 ‰	325 T	420 T

35 ‰	265 T	420 T
41 ‰	265 T	420 T

En complément de ce travail administratif, un essai de traction en grandeur réelle a été réalisé. Cet essai avait pour but de vérifier la capacité réelle des locotracteurs en comparaison des capacités affichées dans les fiches de circulation. Plusieurs situations ont été testées sur une rampe à 36 ‰ et un train de 850 tonnes telles que :

- départ lancé,
- départ arrêté en pied de rampe,
- départ arrêté en milieu de rampe.

Ces essais ont justifié nos démarches de modification des capacités de traction.

III.3.1.5 Méthodologies particulières d'exécution

La phase d'étude opérationnelle a pour objet de valider les processus travaux ou méthodologies particulières d'exécution proposés par le titulaire. Ces méthodologies ont pour but d'expliquer la réalisation de tâches élémentaires en précisant :

- le mode opératoire ;
- les avancements escomptés ;
- les moyens matériels ;
- les moyens humains ;
- l'analyse de risques afférente à la tâche.

Les tâches devant faire l'objet d'une méthodologie particulière d'exécution sont les suivantes :

- dépose de la voie,
- dégarnissage,
- nettoyage du radier et des barbacanes,
- pose du tapis antivibratile,
- mise en œuvre de la sous-couche de ballast,
- pose des traverses au palonnier,
- pose de rail et bouclage de la voie,
- réalisation des soudures aluminothermiques,

- réalisation des soudures électriques par étincelage,
- bourrage de la voie,
- stabilisation de la voie,
- libération et homogénéisation des contraintes,
- renouvellement des appareils de voie 800/801.

On reviendra plus en détail sur l'ensemble de ces tâches dans la suite de l'étude.

Pour conclure ce chapitre, tous les documents à remettre par le titulaire sont identifiés dans un Calendrier Prévisionnel de Remise Documentaire qui précise la nature du document et les jalons de remise contractuels. La remise de document entre le titulaire et la MOE se fait par le biais d'une plateforme de gestion électronique de documents (GED). Dans le cadre du chantier RVB, il s'agit de MEZZOTEAM.

Les documents proposés par le titulaire sont visés par la MOE qui établit une fiche d'observations. Le titulaire est tenu de répondre à chacune de ces observations dans une version nouvellement indiquée.

Les visas pouvant être rendus par la MOE sont de quatre types :

- refusé : le document ne répond pas du tout aux attentes de la MOE ;
- visé sous réserve (VSR) : le document est incomplet et présente de nombreuses carences ;
- visé avec observation (VAO) : des éléments demandent à être précisés ;
- visé sans observation (VSO) : le document est conforme et est considéré comme bon pour exécution.

Le type de visa rendu par la MOE déclenche un pourcentage de paiement sur l'étude réalisée.

Le pilotage du marché est réalisé au travers d'une réunion hebdomadaire avec le titulaire. Aussi, pour fluidifier les échanges, la RATP a souhaité mettre ses locaux à disposition du titulaire. La validation des méthodologies particulières d'exécution a permis à la cellule OPC de réaliser le planning directeur des travaux (Figure 107).

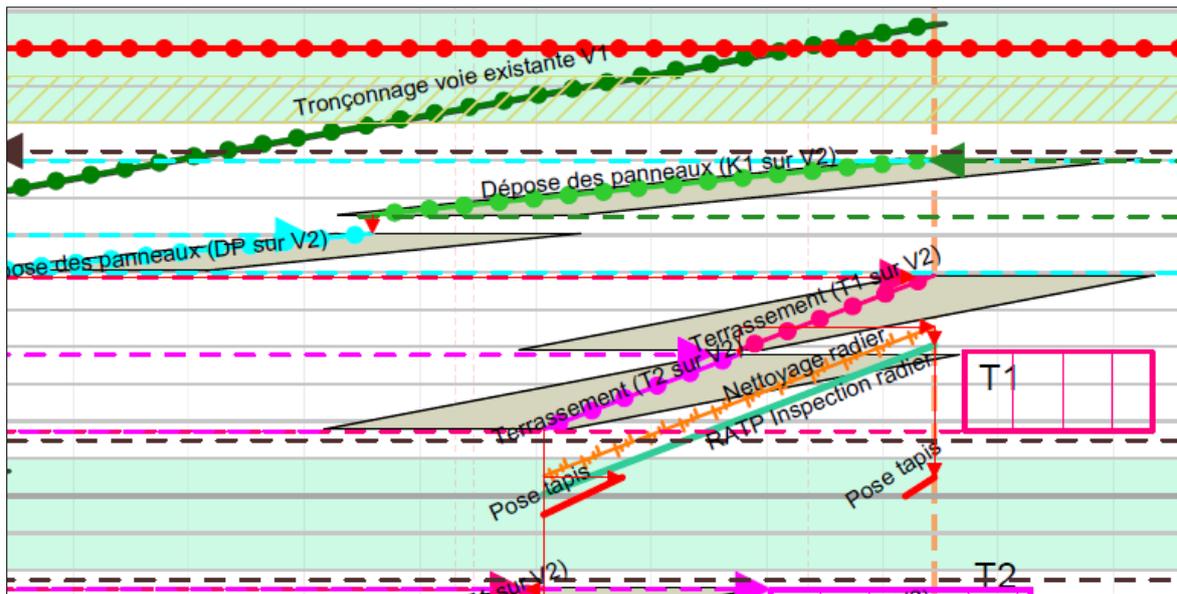


Figure 107. Extrait du planning chemin de fer du RVB 2015

Pour faciliter la compréhension de ce document, on rappelle que l'axe des abscisses représente le schéma de ligne (une unité correspond à 100 mètres) et l'axe des ordonnées représente le temps (une unité correspond à 2 heures). Le planning chemin de fer permet une meilleure visualisation des cadences et facilite les recalages de planning. Il permet également de représenter les mouvements de train.

III.3.2 Travaux préparatoires

Les travaux préparatoires sont l'ensemble des travaux indispensables au démarrage du chantier de RVB en interruption. Ces travaux sont à réaliser en nuits courtes entre 1h10 et 5h00 en dehors du service voyageur. Ils doivent également s'insérer dans la planification de l'ensemble des travaux du tronçon central. En effet, durant l'année, chaque mainteneur (voie, signalisation, caténaire, ouvrage) planifie ses opérations de maintenance préventives et correctives, et réserve des zones de travaux avec ou sans train de travaux.

La MOE doit donc centraliser l'ensemble des demandes de travaux préparatoires du titulaire, vérifier la cohérence de celles-ci et faire des demandes de réservation de moyens.

Ces réservations de moyens se font dans trois temporalités différentes :

- annuellement : un an avant la tenue des travaux, la MOE rend ses besoins macroscopiques (zones travaux, nombre de pilotes de trains de travaux et nombre de consignation caténaire),

- mensuellement : un mois avant les travaux, la MOE ajuste et confirme ses besoins,
- hebdomadairement : une semaine avant les travaux, la MOE confirme son intervention.

Les conférences annuelles, mensuelles et hebdomadaires font l'objet d'un procès-verbal (Figure 108) qui fige les demandes de chaque service.

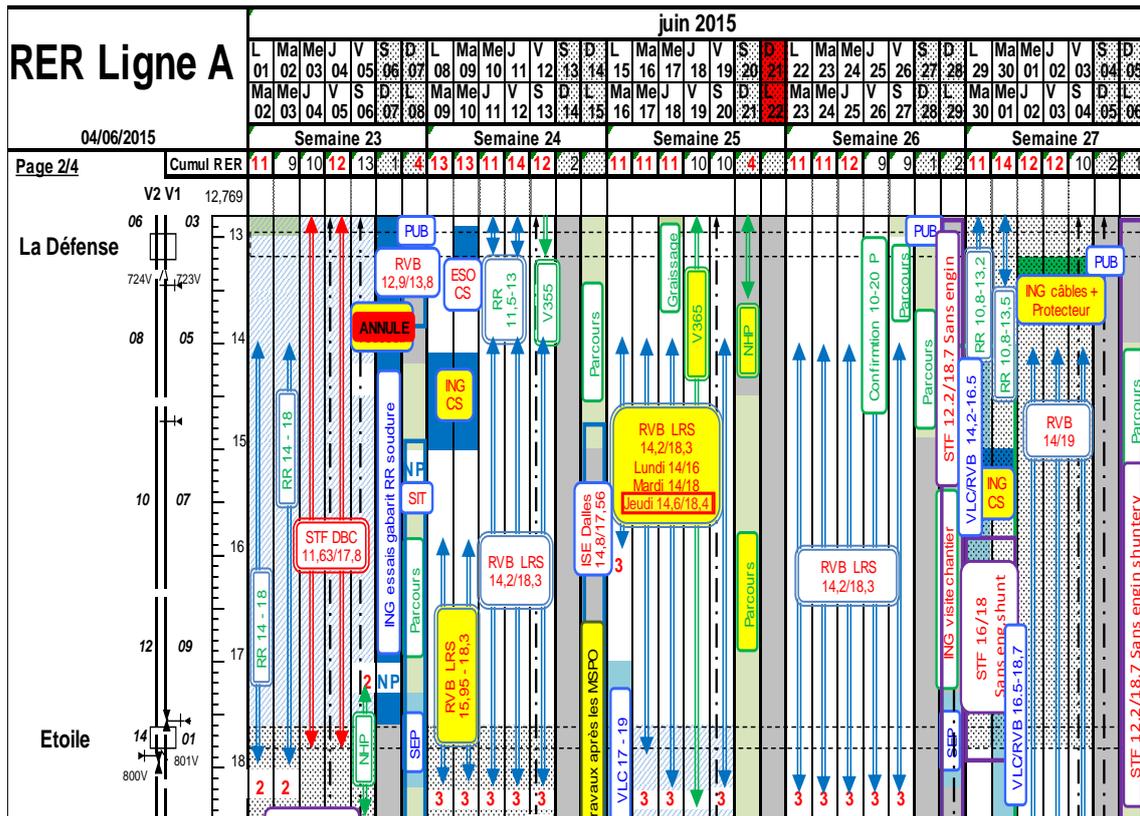


Figure 108. Extrait du PV de conférence mensuelle de juin 2015

Les doubles flèches bleues désignent la zone d'évolution d'un train de travaux sous consignation caténaire. Cela signifie qu'aucun chantier ne peut s'implanter sur la zone d'évolution d'un train pour des raisons évidentes de sécurité.

La Figure 109 présente l'ensemble des travaux préparatoires indispensables au chantier RVB 2015.

	2014				2015													
	T1	T2	T3	T4	T1	Avril	Mai	Juin			Juillet			Août			Septembre	T4
Phases	Pré-Opérationnelle				Opérationnelle												REX	
<u>Données d'entrées</u>	signature marché																	
<u>Préparation</u>																		
Auscultation GEORADAR																		
RATP (SOL SOLUTION)																		
COLAS (GEXIA FONCIER)																		
Relevés topographiques+sondages																		
Essais traction+manœuvres																		
Travaux préparatoires caténaires																		
Déchargement LRS																		
Prise de possession des bases travaux																		
Implantation Topo, éclairage,réseaux d'eau																		
<u>Achat fournitures</u>																		
<u>Réalisation</u>																		
Finitions/reprises de BML/V355																		
<u>DOE+REX</u>																		

Figure 109. Planification des travaux préparatoires 2015

III.3.2.1 Sondages et reconnaissance géophysique

Les sondages réalisés par le titulaire ont pour objet de vérifier certaines hypothèses retenues dans la constitution du dossier de réponse à l'appel d'offre. Ils visaient également à comparer la prestation géophysique réalisée par la RATP de celle réalisée par le titulaire.

En effet, des écarts importants entre les deux campagnes ont poussé la RATP et le titulaire à investiguer les raisons de ces décalages. Les travaux de sondages qui consistent à dégarnir le ballast pour accéder au radier sont des travaux impactant la géométrie de la voie. De ce fait, une attention particulière est accordée à la fin du regarnissage pour vérifier après bourrage manuel de la voie que les tolérances de nivellement sont bien respectées.

III.3.2.2 Essai de manœuvres de trains

La solution « 100 % ferroviaire », proposée par le titulaire, prévoit de réaliser les flux logistiques (déblais/matériaux neufs) exclusivement par trains de travaux. Cette donnée, vérifiée théoriquement par nos soins lors des études AVP et PRO, nécessite une vérification grandeur réelle. L'essai vise à vérifier, dans les mêmes conditions que lors du chantier RVB, que les cinq trains de travaux quittant la zone interrompue à 1h10 (fin du service voyageur) soient capables de rejoindre les deux bases travaux du parc des services techniques de Sucy et de Nanterre le Marteau, échanger leurs locotracteurs sur des jeux de wagons préparés en jour et revenir vers la zone interrompue avant 5h00.

Cette vérification est très importante car il en va de la stratégie du titulaire pour réussir le chantier.

Ces essais ont été réalisés en août 2014, en weekend, afin de ne pas perturber l'exploitation commerciale de la ligne en cas d'incident. Aussi, les essais ont dû être réalisés en deux nuits pour des raisons de ressources. La disponibilité des pilotes RATP est beaucoup plus limitée en week-end qu'en semaine.

Ainsi, dans la nuit de samedi à dimanche, un transfert des trois trains de travaux depuis la gare Charles de Gaulle-Étoile vers le PST de Sucy a été simulé. La nuit de dimanche à lundi, quant à elle, a servi à simuler un transfert de deux trains depuis Étoile vers le PST de Nanterre le Marteau. Ces essais ont permis de confirmer la faisabilité technique des transferts de trains. Ils ont également contribué à estimer tous les temps de trajet qui serviront de base pour le chantier.

Concernant le PST de Nanterre le Marteau, il n'est accessible qu'en empruntant une portion de 800 mètres sur le réseau ferré national (RFN). À la différence du PST de Sucy, le PST du Marteau n'est pas directement « branché » sur le réseau RATP. Cette particularité impose la réservation de droit de passage appelé sillon qu'il faut impérativement anticiper.

III.3.2.3 Relevés topographiques

Ces travaux ont pour but l'installation de plaques repères (Figure 110) sur la voûte du tunnel à raison d'une plaque tous les dix mètres. Ces plaques sont équipées d'une tige filetée permettant de fixer un prisme et ensuite de repérer la position altimétrique et planimétrique de la voie.



Figure 110. Photo d'une plaque topographique.

III.3.2.4 Déchargement des LRS

Comme on l'a évoqué dans notre étude bibliographique, notamment dans la section concernant les rails, plus les rails posés sont longs et plus on limite les singularités considérées comme des points de faiblesse. Ces longs rails soudés proviennent du laminoir, chargés sur un train spécial qui permet leur stockage et aussi leur déchargement. Ce train spécial est appelé rame LRS.

Les longs rails soudés nécessaires au chantier sont approvisionnés en avance de phase.

La MOE doit planifier l'entrée de la rame LRS sur le réseau RATP depuis le RFN, prévoir son garage (train de 450 mètres) et organiser le déchargement en réservant les pilotes RATP, les zones de déchargement et les consignations caténares. Le déchargement LRS fait partie du marché et doit donc être assuré par le titulaire. Il s'agit d'une grande première car habituellement ce sont les équipes de maintenance du département du gestionnaire des infrastructures qui réalisent ces opérations.

Pour résumer l'opération, le déchargement LRS consiste à fixer les rails stockés sur le train au châssis de la voie à l'aide d'élingues en acier (Figure 111 et Figure 112) puis de mettre en mouvement le train. Cette mise en mouvement du train permet aux rails ancrés de descendre du train par l'intermédiaire du wagon tremplin et des goulottes.



Figure 111. Photo d'un ancrage du LRS au châssis de la voie



Figure 112. Photo de déchargement LRS

Le déchargement de longs rails soudés constitue une opération délicate pour laquelle des précautions doivent être prises afin d'assurer la sécurité du personnel. L'utilisation d'élingues très longues (40 mètres) couplée aux à-coups du train génère des tensions importantes pouvant provoquer des accidents graves en cas de rupture.

Le rendement de déchargement est d'environ six à huit longs rails soudés par nuit courte.

Le déchargement étant réalisé quatre semaines avant les travaux, une attention particulière est à apporter aux stockages des LRS en voie. Ces derniers ne doivent pas engager le gabarit ferroviaire et entraver les circulations. Aussi, un contact entre les rails de roulement et les rails déchargés peut entraîner un risque de découverte. Il s'agit d'un risque ferroviaire important car un train circulant sur cette zone ne serait plus détecté et pourrait être rattrapé par un autre train.

III.3.2.5 Installation des réseaux divers

Les derniers travaux préparatoires, réalisés trois semaines avant le début des travaux RVB 2015 consistent à installer un réseau d'éclairage et un réseau d'eau pour les besoins du chantier. La difficulté première réside dans le déploiement de ces réseaux sur des linéaires importants et un approvisionnement exclusif par trains de travaux. On rappelle que le chantier s'étale sur environ 2,4 km.

Il n'est pas nécessaire de rappeler les raisons de l'installation d'un réseau d'éclairage en tunnel. Pour ce qui concerne le réseau d'eau, il s'impose en raison du risque d'empoussièremement causé par le terrassement ou le déchargement de ballast neuf. Pour des raisons sanitaires évidentes, le titulaire est tenu de supprimer ce risque.

On ne présentera pas en détail l'installation de ces équipements. Nous précisons simplement que le réseau d'éclairage est alimenté par un groupe électrogène et que le réseau d'eau est constitué d'éléments PVC de six mètres collés les uns aux autres et posé sur les caniveaux de câbles à même le sol. Des raccords, prévus tous les 50 mètres, permettent d'y brancher un tuyau (Figure 113). Ces précisions prendront un sens lorsqu'on évoquera les travaux du RVB.



Figure 113. Photo d'un point de branchement sur le réseau d'arrosage

III.3.3 Travaux de renouvellement des voies en interruption

La chronologie du déroulement des travaux est la suivante :



- Condamnation et mise en place du chantier
 - 25 juillet
- Renouvellement de la voie courante
 - 26 juillet au 11 août
- Renouvellement des appareils de voie 800/801
 - 11 au 16 août
- Remise en alimentation caténaire
 - Nuit du 17 au 18 août
- Essais dynamiques de signalisation et contrôle de vitesse
 - 18 au 21 août
- Réception et remise en service
 - Nuit du 22 au 23 août

III.3.3.1 *Mise en sécurité du chantier*

Ce terme désigne l'ensemble des actions permettant d'isoler la zone de chantier (pour rappel du 14 027 au 19 000) des zones exploitées. Aucune circulation ne doit être possible entre la zone de chantier et les zones exploitées. Pour ce faire, les différents lots techniques doivent intervenir lors de la nuit de condamnation qui correspond à la première nuit du chantier le 24 juillet 2015. Pour réussir à réaliser l'ensemble de ces travaux de condamnation dans le délai très court de la nuit (1h10 à 5h00), un carnet de bord est établi entre les différents acteurs et détaille la partition à jouer pour garantir l'isolation de la zone de chantier.

III.3.3.1.1 **Lot voie**

Les tâches à réaliser sont nombreuses et délicates.

Nous devons :

- acheminer les pelles mécaniques rail-route au nombre de cinq depuis une zone d'enraillement à la future zone de chantier (de Nanterre-Ville à La Défense) soit environ six kilomètres,
- acheminer deux trains de travaux chargés du matériel nécessaire à la ventilation et à l'installation des parois amovibles⁴⁹,
- installer des dispositifs de sécurité appelés taquets dérailleurs (Figure 114) permettant d'éviter une entrée intempestive d'un train voyageur en zone de chantier ou d'un train de travaux en zone exploitée en le faisant dérailler,
- condamner les accès aux quais en gare de CdG-Étoile.

⁴⁹ L'étude de ventilation du titulaire prévoyait une fermeture physique du chantier à l'aide de deux parois. Elles devaient pouvoir s'ouvrir pour laisser passer les trains de travaux en nuit lors des transferts.



Figure 114. Photo d'un taquet dérailleur

Concernant la pose des taquets dérailleurs, une difficulté de taille a obligé la MOE à imposer une solution technique de pose. En effet, ces équipements ne sont prévus d'être installés que sur des traverses bois et sur des plateformes ballast. Comme le montre la photo ci-dessus, la fixation se fait à l'aide de tirefonds vissés dans les traverses bois. Or dans la zone de pose de ces taquets dans la zone de La Défense, la voie est de type STEDEF. C'est-à-dire en traverses béton sur plateforme béton. Il est donc impossible de poser ce modèle de taquet (le seul à être homologué par la RATP et la SNCF) en l'état.

Le titulaire a instruit un dossier d'homologation d'un taquet dérailleur anglais qui se fixe au rail et non aux traverses. Cette disposition présente un intérêt certain pour la RATP, cependant les données techniques ne permettent pas de répondre aux exigences des taquets homologués par la RATP et la SNCF. Le fournisseur du taquet anglais ne garantit le déraillement que pour des vitesses de circulation inférieures à 8 km/h.

La solution imposée par la MOE (Figure 115) consiste à insérer deux traverses bois plus minces entre le radier et le patin du rail. Ces traverses bois sont ensuite fixées au radier béton à l'aide de tiges ancrées par scellement chimique.

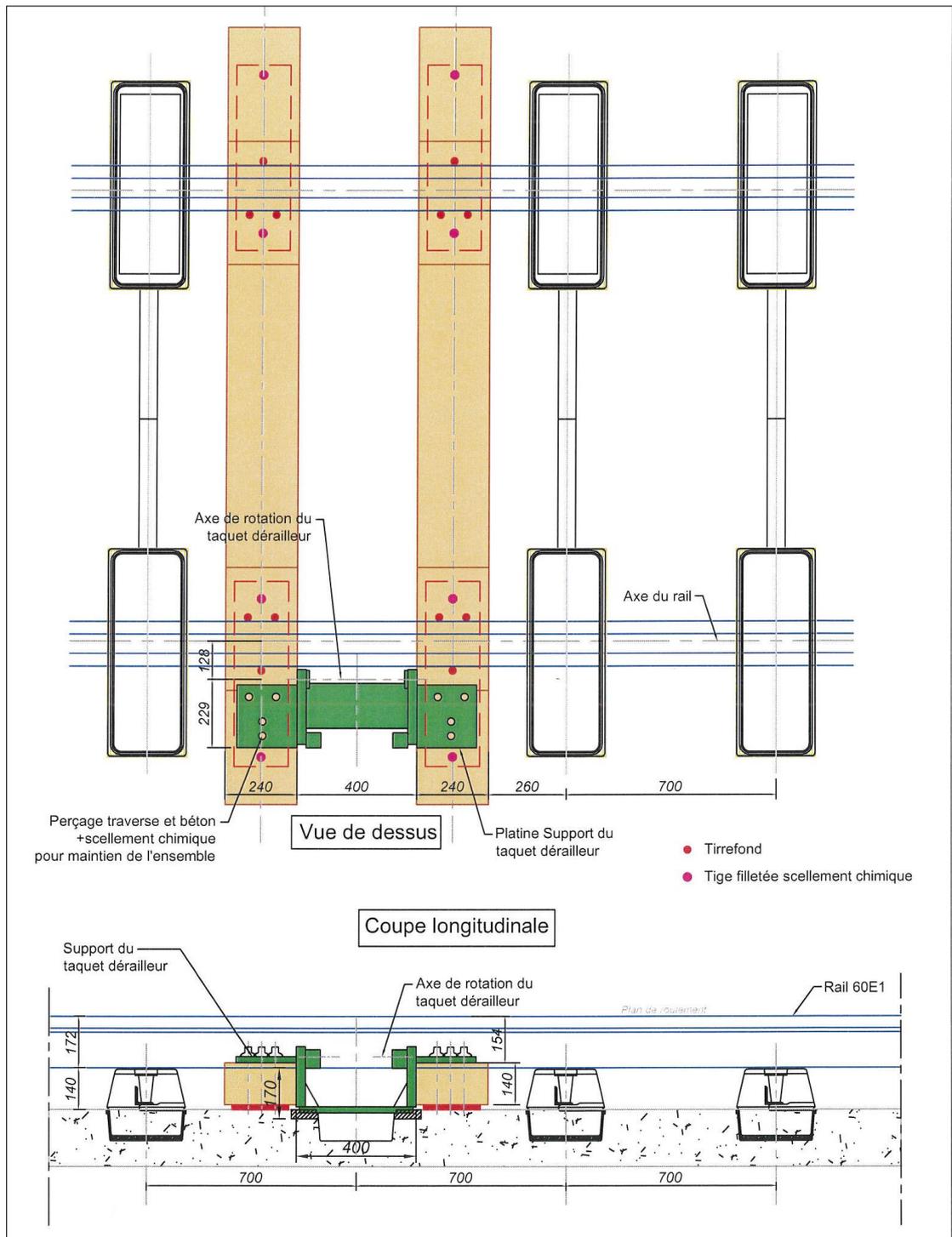


Figure 115. Principe de pose d'un taquet dérailleur standard sur une voie STEDEF

L'ensemble des tâches dévolues au lot voie ont été réalisées. Néanmoins, on déplore la désorganisation et le manque de moyens matériels du titulaire sur la pose des taquets dérailleurs sur voie STEDEF. Cela a causé une reddition tardive des voies à l'exploitation accusant un retard de 17 minutes.

III.3.3.1.2 Lot signalisation

Dans le cadre de la nuit de condamnation, la MOE signalisation et son titulaire ont pour missions de:

- condamner les postes de signalisation de La Défense et d'Étoile. Cette opération permet de rendre invisible la zone de chantier au poste de commandement et de contrôle (PCC) qui gère les circulations des trains voyageurs.
- empêcher la manœuvre électrique des appareils de voie dans la zone de chantier. Cette opération a pour but de rendre inopérant les appareils de voie qui ne sont plus utilisés pour l'exploitation commerciale. Ils sont rendus manœuvrables manuellement pour les besoins des travaux.
- masquer les feux de signalisation dans la zone de chantier. Ces derniers ne pouvant être éteints, le masquage permet aux trains de travaux de pouvoir circuler dans la zone de chantier sans avoir à respecter la signalisation lumineuse.

Dans le cadre du chantier RVB, la prestation du lot signalisation consiste à déposer l'ensemble des équipements au sol (balise de répétition de signal, balise de contrôle de vitesse, connexion inductive au droit des JICs), à les reposer une fois les travaux de voie terminés et enfin de réaliser des essais statiques et dynamiques de vérification du bon fonctionnement avant reprise d'exploitation.

III.3.3.1.3 Lot caténaire

Les travaux de condamnation du lot caténaire consistent à isoler électriquement la caténaire des zones exploitées. On parle de consignation caténaire longue durée. Cela est rendu possible par la pose d'isolateurs de section qui permettent de créer deux zones neutres ou zones tampon en extrémité de la zone de chantier. Ces dispositifs sont complétés par la pose de perche entre la caténaire et le rail permettant de court-circuiter la zone en cas de passage du courant.

La prestation caténaire doit également déposer puis protéger tous les câbles de retour traction permettant d'assurer la continuité du courant 1500 volts qui alimente les trains et qui retourne aux postes de redressement par l'intermédiaire des rails.

Ces câbles sont ensuite reconnectés à la voie en interface avec le lot signalisation.

Une fois la zone de chantier isolée physiquement et électriquement des zones exploitées, celle-ci est transférée en responsabilité au titulaire du lot voie. À 6h00, le 24 juillet 2015, la zone de chantier du 14 027 au 19 000 est pour la première fois, depuis la création de la ligne, sous la responsabilité d'une entreprise autre que la RATP.

Le titulaire est le garant :

- de la sécurité de tous les personnels intervenant sur le chantier,
- des mouvements de trains,
- de l'implantation des chantiers élémentaires.

Le titulaire s'appuie sur un règlement temporaire d'exploitation et de sécurité (RTES) extrait du règlement SNCF qui régit les travaux en ligne fermée, le S9A3.

III.3.3.2 Ordonnancement des tâches du lot voie

Dans cette partie on présentera les différentes tâches du chantier. Ces tâches sont répétées chaque jour du J2 (26 juillet) au J17 (10 août inclus).

Chaque jour, cinq trains de travaux sont utilisés. Afin de les repérer plus aisément, chacun porte un nom :

- train DP pour dépose/pose : composé de 9 wagons R90, il est chargé de d'évacuer les panneaux de voie en sortie du chantier et de l'approvisionner en traverses neuves ;
- train K1 : composé de 9 wagons R90, ce train permet d'évacuer les déblais en sortie du chantier et d'approvisionner en ballast de sous-couche ;
- train K2 : composé de 10 ballastières, ce train permet d'approvisionner le ballast nécessaire aux opérations de relevage de la voie ;
- train T1 : composé de 9 wagons R90, ce train permet d'évacuer les déblais du chantier ;
- train T2 : composé de 9 wagons R90, ce second train permet aussi d'évacuer les déblais du chantier.

Les trains DP, K1 et K2 ont pour base logistique le PST de Sucy, les trains T1 et T2 ont pour base logistique le PST de Nanterre le Marteau.

L'ensemble des tâches réalisées en 24 heures visent un rendement quotidien de 336 mètres de voie.

III.3.3.2.1 Tronçonnage des rails

III.3.3.2.1.1 Description

Cette tâche a pour but de découper la voie en panneaux pouvant être extraits et stockés dans un wagon de chargement type R90 dont la longueur utile est de 20 mètres.

Les rails sont donc tronçonnés (Figure 116) tous les 18 mètres sur les deux files. La solution du tronçonnage a été préférée à l'oxycoupage (coupe par torche plasma) car elle permet la réutilisation des rails.



Figure 116. Photo de tronçonnage de rail

III.3.3.2.1.2 Rendement

Il faut compter 5 minutes pour réaliser une coupe de rail. En multipliant le nombre d'agents et de tronçonneuses, il est donc possible de traiter de longues zones. Cependant, volontairement, la MOE a limité la longueur maximale déconstruite à 1300 mètres. Cette disposition vise à sécuriser la remise en service de la ligne en cas d'incidents ou d'aléas majeurs.

III.3.3.2.1.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise deux équipes de quatre agents.

III.3.3.2.2 Dépose des panneaux

III.3.3.2.2.1 Description

Cette tâche (Figure 117) consiste à extraire les panneaux de voie préalablement tronçonnés à l'aide de pelles mécaniques positionnées sur la voie contigüe et de les charger sur les wagons R90 du train situé à proximité. Le levage des panneaux est réalisé à l'aide de chaînes de levage (une pelle mécanique à chaque extrémité du panneau).



Figure 117. Photo de dépose de panneaux de voie

III.3.3.2.2.2 Rendement

Le chargement des panneaux ne peut excéder trois panneaux par wagon R90.

Quotidiennement, 33 panneaux sont déposés et sont chargés sur les trains de travaux suivants :

- 12 panneaux sur le train K1 ;
- 21 panneaux sur le train DP.

Cela représente une longueur de voie déposée d'environ 594 mètres par jour.

Le rendement moyen est de 160 mètres linéaires de voie par heure.

III.3.3.2.2.3 Moyens mobilisés

Pour cette tâche, le titulaire utilise deux pelles mécaniques rail-route équipées de chaînes de levage et deux trains de travaux K1 et DP.

III.3.3.2.3 Terrassement

III.3.3.2.3.1 Description

Cette tâche a pour objet le terrassement et l'évacuation du ballast sur 336 mètres par jour. Elle vise à mettre à nu le radier pour en permettre l'inspection et la pose de tapis antivibratiles dans certaines zones identifiées.

Les moyens mis en œuvre résultent du calcul des volumes de ballast à extraire par front de 336 mètres (Figure 118).

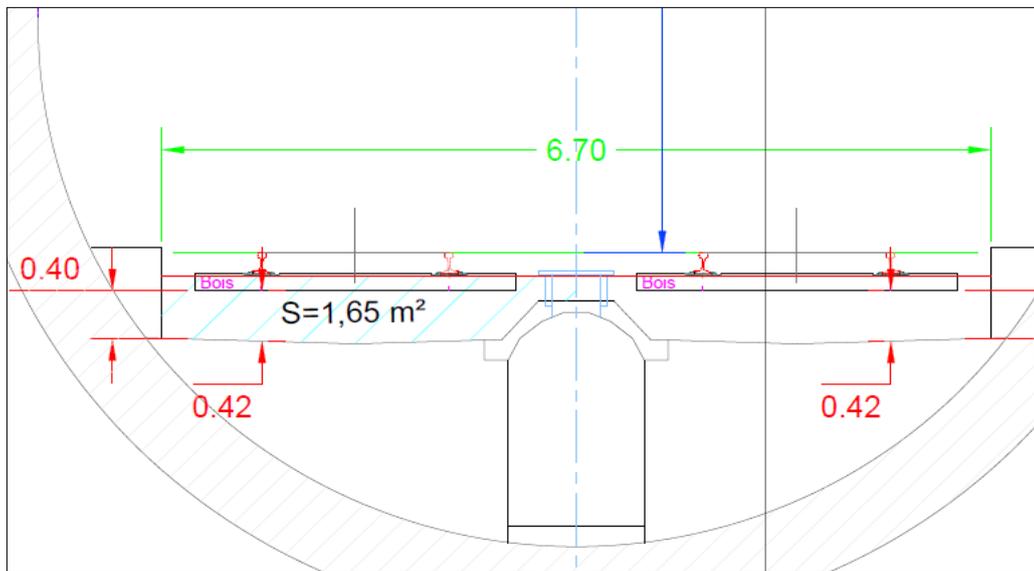


Figure 118. Calcul de la section de ballast

La section de ballast sur une voie est $1,65 \text{ m}^2$.

À cela on doit soustraire le volume des traverses :

- volume d'une traverse : $2,55 \times 0,24 \times 0,14 = 0,08568 \text{ m}^3$;
- nombre de traverses sur un front de 336 mètres : le nombre de traverses au kilomètre est de 1666 on en déduit que sur 336 mètres on a 560 traverses.

D'où le volume de traverses sur 336 mètres :

Tableau 25. Dimension des traverses

Longueur moyenne	2,55
Hauteur moyenne	0,14
Largeur moyenne	0,24
Volume traverse	0,086 m ³
Travelage	0,6 m
Volume total traverses	47,98 m ³

Le volume de ballast en place est donc :

$$(336 \times 1.65) - 47.98 = 506.42 \text{ m}^3$$

Enfin, pour dimensionner le nombre de wagons nécessaires à l'évacuation des déblais, il faut tenir compte du foisonnement du ballast. La littérature ferroviaire retient un coefficient de foisonnement de 1,3.

On obtient :

$$506.42 \times 1.3 = 658 \text{ m}^3$$

Le dégarnissage (Figure 119) est réalisé par des pelles mécaniques qui déversent les produits de terrassement dans des trains de travaux situés sur la voie contigüe.



Figure 119. Photo de dégarnissage à la pelle mécanique sur trains de travaux

III.3.3.2.3.2 Rendement

Le rendement admis pour une pelle mécanique rail/route est de 80 m³/h. Le doublement des pelles permet de réaliser théoriquement le terrassement en 3h30.

Néanmoins, il faut majorer ce temps pour les raisons suivantes :

- le terrassement est dépendant des mouvements de trains. Les wagons R90 doivent être disposés en face des pelles. Aussi, lorsqu'un train est plein, il faut le déplacer et en amener un autre. Ces mouvements font perdre de l'efficacité au terrassement.
- le risque de dégradation des caniveaux de câbles sur les extrémités, la présence de la caténaire au-dessus et le risque potentiel de réseaux traversant nécessitent une attention particulière lors du terrassement réduisant de façon significative les cadences.

Pour ces raisons, le terrassement d'un front de 336 mètres est prévu sur une plage de 8 heures.

III.3.3.2.4 Moyens mobilisés

Le titulaire utilise deux pelles mécaniques (une pelle rail-route et une pelle MECALAC à chenille). Ce choix technique est motivé par deux raisons. D'une part, la pelle rail/route, au gabarit plus imposant, ne peut terrasser que les premiers horizons de ballast. Une pelle au gabarit plus réduit est nécessaire pour terminer le terrassement en fond de radier. D'autre part, une pelle à chenille peut circuler sur des zones équipées en tapis sans le dégrader.

Les trains utilisés pour recevoir les produits de terrassement sont :

- train T1 : 9 wagons R90 soit 100 % du convoi,
- train T2 : 9 wagons R90 soit 100 % du convoi,
- train K1 : 5 wagons R90 soit 55 % du convoi.

On reviendra plus tard sur l'analyse de ce dimensionnement.

III.3.3.2.4.1 Nettoyage du radier

III.3.3.2.4.2 Description

Cette tâche a pour but de supprimer les concrétions qui se sont formées en fond de radier et de permettre la pose de tapis dans les zones prévues à cet effet. Ce nettoyage attentionné permet également d'inspecter l'état général de l'ouvrage et de vérifier son intégrité.

III.3.3.2.4.3 Rendement

Notre méconnaissance de l'état du radier nous a poussés à prévoir une plage de 8 heures. Cette plage intègre également la remise en état du réseau de drainage dont on parlera dans le paragraphe suivant.

III.3.3.2.4.4 Moyens mobilisés

Le titulaire a prévu une mini pelle équipée d'une raclette en téflon. Des marteaux piqueurs électriques sont prévus en cas de découvertes de concrétions importantes ou de blocs de ballast amalgamé.

III.3.3.2.5 Remise en état du réseau de drainage

III.3.3.2.5.1 Description

À la demande de la MOA, cette prestation a été ajoutée à la dernière minute. De plus, aucune donnée d'entrée telle que le diagnostic du système de drainage, ne nous a été transmis. Cette demande concerne le nettoyage et la remise en état complet des barbacanes⁵⁰ permettant d'évacuer les eaux de ruissellement vers un ouvrage visitable. La figure 85 représente le système de drainage sur le tronçon de voie impacté par les travaux 2015.

La plateforme compte une barbacane tous les six mètres sur chaque voie. La prestation de nettoyage consiste donc à :

- extraire le matériau drainant ;
- vérifier l'état de la crépine en fonte et la remplacer en cas de casse ;
- déboucher le tuyau plastique au nettoyeur haute pression équipé d'une tête rotative ;
- remplacer le matériau drainant.

⁵⁰ Dans cette étude, ce terme désigne une réservation de 40 × 60 × 25 rempli d'un matériau drainant permettant d'évacuer les eaux de ruissellement de la plateforme. Cette définition s'éloigne de celle habituellement donnée à ce terme qui désigne généralement une fente dans un ouvrage de soutènement visant à évacuer l'eau pour réduire la poussée des terres.

III.3.3.2.5.2 Rendement.

La méconnaissance de l'état des barbacanes a poussé à être prudents en considérant une plage de 8 heures pour traiter les 48 barbacanes que compte un front de 336 mètres.

III.3.3.2.5.3 Moyens mobilisés

Une équipe sous-traitante composée d'un chef d'équipe et de six opérateurs est prévue afin d'être en mesure de traiter deux barbacanes en parallèle. Des marteaux piqueurs électriques et un nettoyeur haute pression sont prévus pour extraire le matériau drainant colmaté et pour déboucher le tuyau PVC.

III.3.3.2.6 Pose du tapis antivibratile

III.3.3.2.6.1 Description

Le titulaire doit équiper certaines zones identifiées par la MOA en tapis antivibratile (1178 m pour le RVB 2015). Les zones prévues sur l'ensemble du tronçon central sont données dans l'annexe 8.

Le tapis se présente sous trois références (Figure 120) :

- le tapis principal (référence DN 325) posé sur le radier,
- le tapis latéral (référence SL 319) posé contre les caniveaux,
- le tapis de transition (référence DN 619) qui équipe les 18 mètres de part et d'autre d'une zone de tapis comme l'indique la Figure 121.

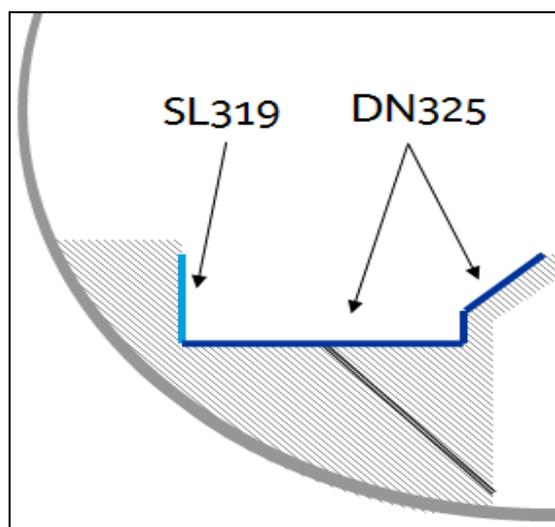


Figure 120. Représentation des différentes références de tapis

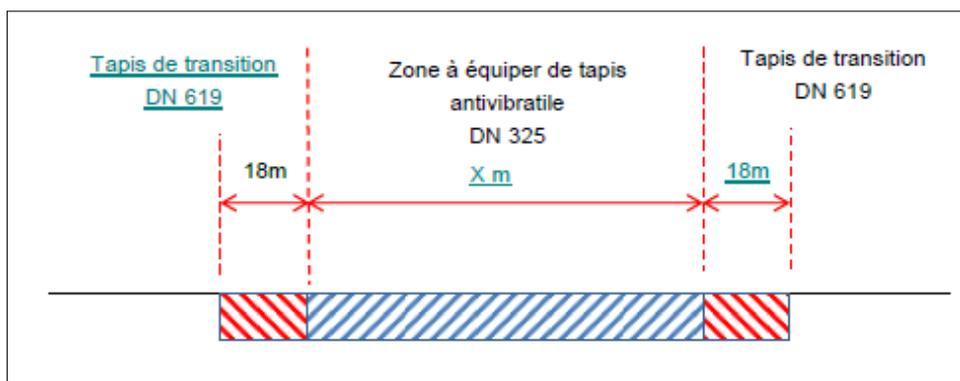


Figure 121. Préconisation de pose du tapis de transition

Les différentes références sont conditionnées en bandes d'1,5 m de largeur.

La longueur dépend du type de tapis et est prévue pour s'adapter au support sur lequel il est posé :

- tapis principal et transition : la longueur correspond à une demi-plateforme (3,6 m) ;
- tapis latéral : la longueur correspond à la hauteur des caniveaux (0,65 m).

Pour éviter les ponts phoniques, la continuité entre tous les lés de tapis doit être assurée à l'aide de bandes de jonction thermocollées (Figure 122).



Figure 122. Photo du thermocollage des bandes de jonction

Le tapis latéral est spité sur le caniveau. Cette disposition a été proposée par la RATP et validée par le fournisseur pour faciliter la mise en œuvre du tapis au droit de zones présentant des infiltrations importantes et ne permettant pas l'application d'une colle.

Concernant les tapis principal et de transition, deux solutions techniques sont préconisées par le fournisseur :

- le collage du tapis sur le radier avec l'utilisation d'une colle époxy appliquée par plots pour permettre la circulation des eaux de ruissellement ;
- la pose du tapis sans colle mais avec l'interdiction de circuler directement dessus avec des engins de chantier.

Cette seconde solution a été retenue car elle permet de s'affranchir de l'état d'humidification du support.

La présence des barbacanes impose un traitement particulier sur les zones devant être recouvertes de tapis. La présence de tapis ne doit pas entraver le drainage. Dans ce but, la MOE a proposé une solution technique au titulaire s'inspirant de retour d'expérience notamment de chantier de remise en conformité de l'étanchéité de viaducs. La solution consiste à percer le tapis au droit des barbacanes et d'insérer une crapaudine (Figure 123).

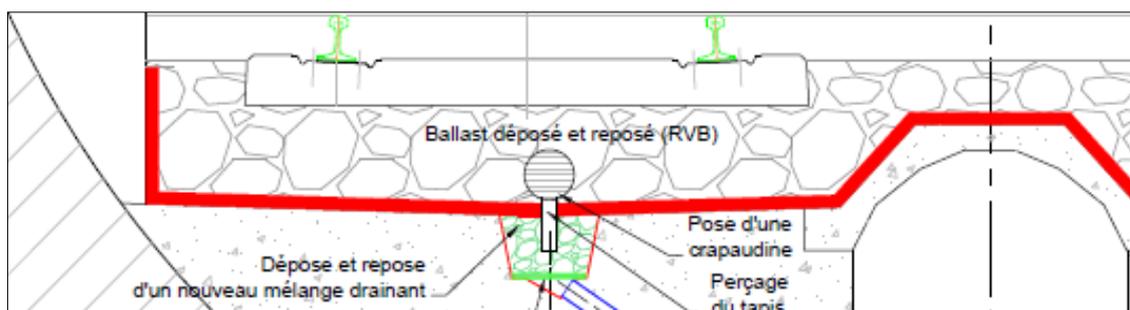


Figure 123. Coupe schématique de pose de crapaudine au droit des barbacanes

III.3.3.2.6.2 Rendement

Le rendement indiqué par le fournisseur est de 30 m/h. Il est important de signaler qu'il s'agit là d'un rendement critique car il conditionne toutes les opérations de repose de la voie.

III.3.3.2.6.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une équipe composée d'un chef de chantier et de 8 opérateurs. L'utilisation d'une pelle rail/route est également prévue pour manutentionner les rouleaux de tapis. Notons que l'équipe prévue pour cette opération a été formée à la pose de tapis par le fournisseur sur une réplique de demi-plateforme construite pour cet effet sur le PST de Sucy. Le titulaire a choisi de spécialiser une équipe à la pose du tapis, rendant cette compétence critique alors qu'elle ne l'est pas. On reviendra plus tard sur ce point.

III.3.3.2.7 Mise en œuvre de la sous-couche

III.3.3.2.7.1 Description

Cette tâche est déclenchée après la levée du point d'arrêt correspondant :

- à la conformité du nettoyage du radier et du traitement des barbacanes,
- à la conformité de la pose du tapis dans les zones prévues.

Cette tâche a pour objet la mise en place de ballast de sous-couche (Figure 124) jusqu'à une altimétrie définie correspondant à la valeur de l'altimétrie projetée diminuée de 100 mm. Les 100 mm restants seront complétés lors des phases de ballastage et de relevage à la boureuse mécanique lourde.

Le ballast de sous-couche est déchargé à l'aide d'une pelle mécanique depuis un train de travaux stationné sur la voie contigüe. Pour éviter l'empoussièrement excessif, le ballast de sous-couche doit avoir fait l'objet d'un arrosage préventif avant son chargement sur le train de travaux. Cet arrosage préventif est réalisé directement dans les fosses de stockage à ballast présentes sur les PST de Sucy et de Nanterre le Marteau. Un arrosage complémentaire doit être réalisé à pied d'œuvre lors du déchargement par les engins.

Pour éviter les tassements, le ballast est mis en œuvre par couche de 10 à 15 cm maximum et chaque couche subit un compactage à l'aide d'un cylindre double billes autoporté.

La planéité de la sous-couche de ballast doit être la meilleure possible. En effet, une sur-épaisseur de ballast peut provoquer un mauvais appui de la traverse et causer sa ruine lors de la circulation du train composé des ballastières⁵¹.

⁵¹ Le train K2 est le premier train circulant sur la voie renouvelée et non stabilisée. Les traverses ne doivent pas porter en leur centre au risque de fissurer et d'être impropres à leur destination.



Figure 124. Photo de sous-couche de ballast

III.3.3.2.7.2 Rendement

Le rendement prévu pour cette tâche est de l'ordre de 80 m/h.

III.3.3.2.7.3 Moyens mobilisés

Pour les mêmes raisons que celles évoquées lors du dégarnissage, il faut deux types de pelles pour réaliser cette opération. Une pelle au gabarit (MECALAC) réduit pour mettre en œuvre les premières épaisseurs de ballast. Une seconde au gabarit standard (pelle rail/route) permet de terminer l'opération. La Figure 125 présente la position des engins en fonction de l'avancement du chantier.

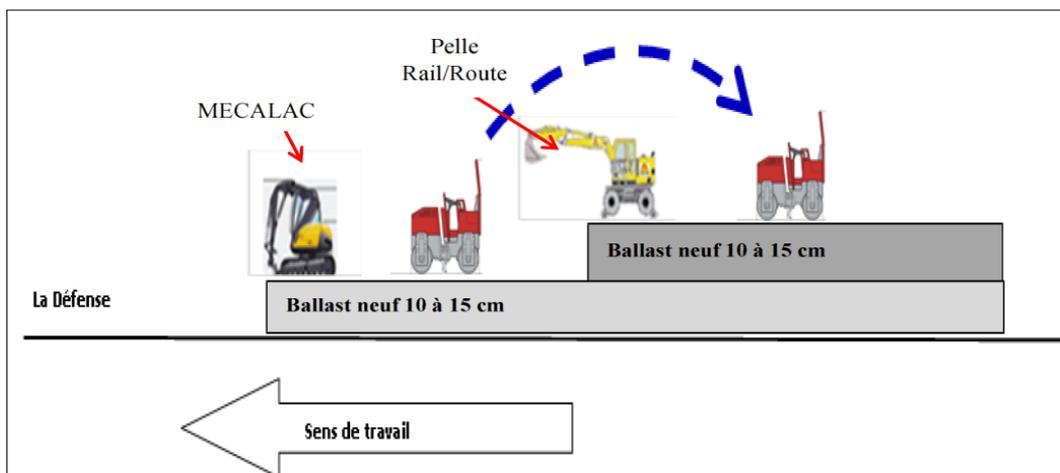


Figure 125. Position des engins lors de la phase de mise en place de la sous-couche

Les trains T2 et K1 composés de wagons R90 permettent d’approvisionner le ballast neuf depuis les PST.

III.3.3.2.8 Pose des traverses

III.3.3.2.8.1 Description

Dès que la sous-couche est réglée et compactée, elle peut recevoir les traverses en béton. Les traverses, stockées sur le train DP, sont déchargées à l’aide d’un palonnier à chaînes et disposées sur la sous-couche (Figure 126). Il est important de signaler que la manutention des traverses béton sur le PST ou sur chantier doit être réalisée avec la plus grande précaution. Le moindre choc peut générer des épaufrures, de gravité mesurée jusqu’à très haute, en rendant la traverse impropre à sa destination.

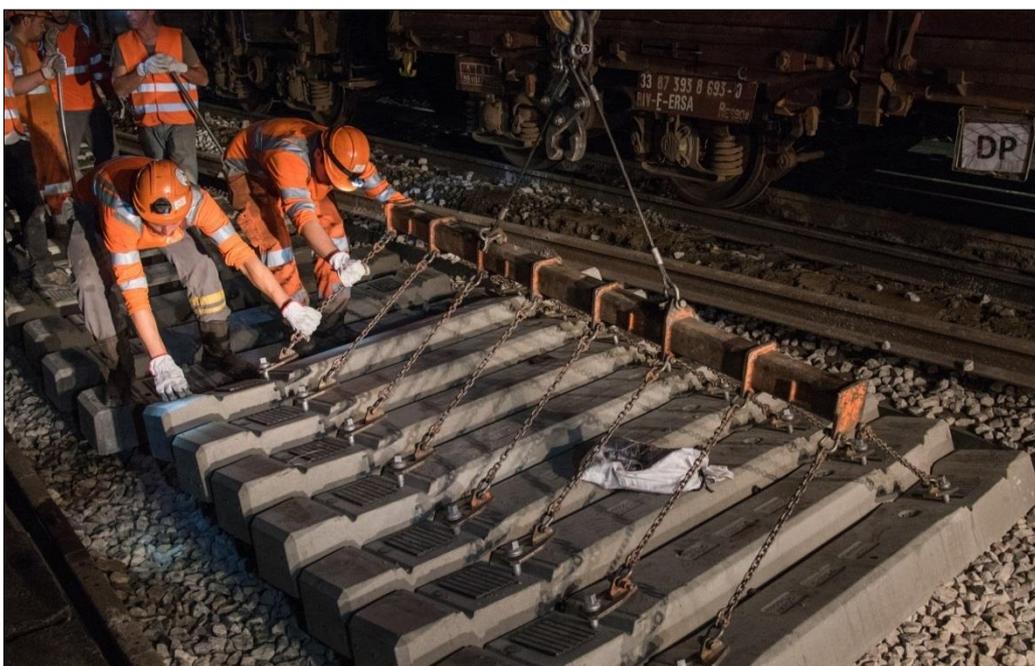


Figure 126. Photo de pose de traverses au palonnier

III.3.3.2.8.2 Rendement

Le titulaire prévoit un rendement de 80 m/h.

III.3.3.2.8.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une pelle rail/route équipée d’un palonnier à chaînes. Les traverses sont acheminées depuis le PST de Sucy par le train DP. Les zones à équiper en traverses M243 sont identifiées par un marquage à la peinture sur la voûte du tunnel.

Une équipe composée d'un chef de chantier, d'un chef d'équipe et de cinq opérateurs complète le dispositif.

III.3.3.2.9 Bouclage de la voie

III.3.3.2.9.1 Description

Le bouclage de la voie consiste à poser les longs rails soudés et à les fixer sur les traverses. Préalablement à la manutention des LRS, le menu matériel (attaches de rail, tirefonds, butées isolantes) a été approvisionné à proximité des traverses tandis que le travelage a été vérifié notamment au droit des joints isolants collés (Figure 127).

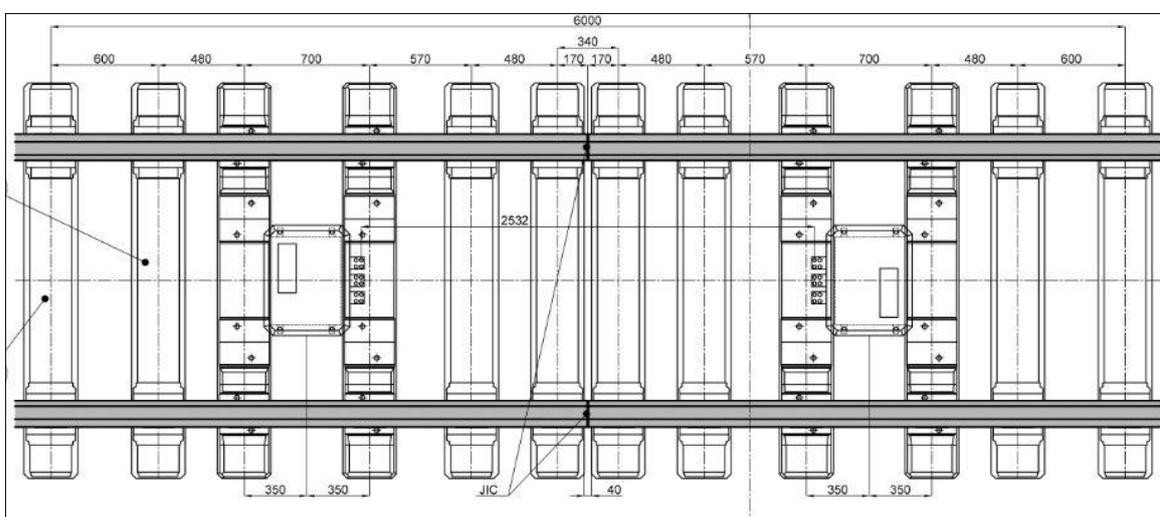


Figure 127. Plan de travelage au droit d'un JIC

Les LRS, déchargés sur la voie contigüe à la voie renouvelée, sont saisis par une pelle rail/route et basculés sur la voie renouvelée pour être positionnés sur les traverses. Des opérateurs terminent de positionner le rail et d'installer le menu matériel. Enfin les LRS sont fixés aux traverses.

Les LRS de longueurs élémentaires 108 ou 216 mètres sont raccordés les uns aux autres par des éclissages provisoires en attente de la réalisation des soudures.

III.3.3.2.9.2 Rendement

Le titulaire prévoit un rendement de 50 m/h. Cette valeur est volontairement minorée car le basculement des LRS est une activité accidentogène et peut également dégrader fortement les traverses.

III.3.3.2.9.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une pelle rail/route équipée d'une benne preneuse à dents. Cet équipement est indispensable à la préhension des LRS. Une équipe composée d'un chef de chantier et de dix opérateurs complète le dispositif.

III.3.3.2.10 Ballastage et relevages de la voie

III.3.3.2.10.1 Description

La voie, préalablement bouclée et à une altimétrie provisoire (100 mm en dessous du niveau fini), va subir une première passe de ballastage. Cette opération consiste à faire circuler le train de travaux K2 composé de dix ballastières sur la voie renouvelée. Ce premier passage est très sensible. Les traverses n'étant pas callées, le moindre défaut de nivellement peut provoquer le déraillement du train.

Le ballastage est réalisé en deux passages du train sur la portion de voie renouvelée. Le premier passage permet de regarnir les têtes de traverses, le second passage permet de regarnir les cases⁵². Cet apport de ballast va servir à caller la voie après le relevage opéré par la bourreuse mécanique lourde. Celle-ci relève la voie à 50 mm en dessous du niveau fini. La bourreuse permet de positionner la voie en altimétrie et en planimétrie en utilisant les plaques topographiques disposées sur la voute du tunnel.

Un complément de ballast est apporté en vue du second relevage. La bourreuse relève la voie à 20 mm en dessous du niveau fini. Avant toute opération de ballastage, un arrosage du ballast doit absolument être réalisé pour éviter l'empoussièrément. L'arrosage (Figure 128) est réalisé dans les quais d'Étoile durant la journée.

⁵² Ce terme désigne l'espace entre deux traverses.

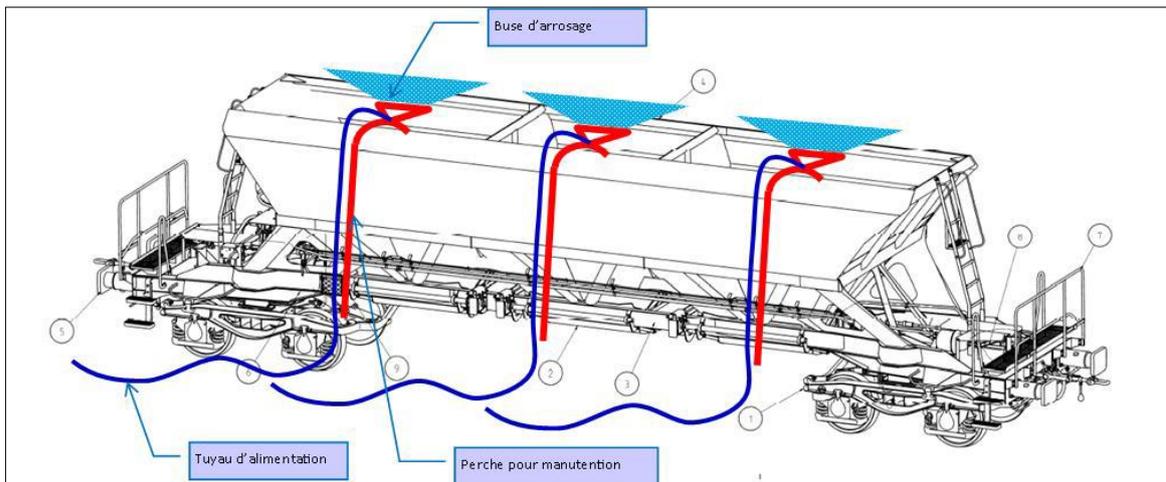


Figure 128. Principe d'arrosage des ballastières

III.3.3.2.10.2 Rendement

Le rendement du ballastage est limité à la capacité de chargement du train K2 composé des neuf ballastières. Sa contenance est de 450 tonnes ce qui permet d'assurer le ballastage d'une longueur de 336 mètres pour un premier relevage. Le second relevage consommant moins de ballast, il est possible de ballaster une longueur de 540 mètres.

La bousseuse mécanique lourde permet un rendement de 500 m/h.

III.3.3.2.10.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une bousseuse mécanique lourde de type B66 et un train de travaux équipé de neuf ballastières à commande automatique. Une équipe composée d'un chef d'équipe et de quatre opérateurs complète le dispositif.

III.3.3.2.11 Réalisation des soudures

III.3.3.2.11.1 Description

À la demande de la MOA, la MOE a imposé au titulaire la réalisation de soudure par étincelage. Cette prestation est réalisée à l'aide d'un camion de soudure électrique rail/route. On décrira rapidement les grandes étapes pour la confection d'une soudure électrique :

- dépose des éclissages provisoires,
- desserrage des attaches de rail sur les LRS en aval du camion de soudure,
- meulage du rail pour faciliter le passage du courant induit,

- mise en place de la tête de soudure,
- réalisation de la soudure,
- meulage de dégrossissage
- réalisation de la soudure sur la file de rail opposée.

Chaque soudure consomme 30 mm de métal.

III.3.3.2.11.2 Rendement

Dans les conditions de notre chantier, le camion permet de réaliser 4 soudures à l'heure. Ce rendement est bien en dessous des capacités réelles du camion.

III.3.3.2.11.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une pelle rail/route et une équipe composée d'un chef d'équipe et de huit agents. Le prestataire mobilise un camion de soudure et une équipe de trois techniciens.

III.3.3.2.12 Stabilisation

III.3.3.2.12.1 Description

Afin de pouvoir rendre les voies à l'exploitant sans limitation temporaire de vitesse, celles-ci doivent subir une stabilisation. Cette opération s'effectue par des passages répétés de trains afin d'atteindre un tonnage de 20 000 tonnes pour des traverses béton et 100 000 tonnes pour des traverses bois.

Cette opération a lieu après les premier et second relevages de la voie, et après la réalisation des soudures. En effet, des circulations répétées de trains de travaux sur des joints mécaniques (éclissage provisoire) provoqueraient un matage des abouts et les chocs induits dégraderaient le nivellement de la voie.

Cette solution a été proposée par le titulaire car le marché ne permet pas le recours à un train de stabilisation dynamique. La raison invoquée est un risque de dégradation des ouvrages de génie civil par les vibrations.

La stabilisation par trains de travaux consiste à faire circuler sur les voies renouvelées le train le plus lourd du chantier (K2). Ce train ayant une masse de 984 tonnes, il doit réaliser 21 passages sur les voies renouvelées pour atteindre les 20 000 tonnes.

III.3.3.2.12.2 Rendement

La vitesse de circulation des trains de travaux étant limitée à 30 km/h, les 21 passages de train s'effectuent en 6 heures.

III.3.3.2.12.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise le train de travaux K2 et un agent qualité qui comptabilise le nombre de passage du train.

III.3.3.2.13 Nivellement complémentaire

III.3.3.2.13.1 Description

Cette tâche a pour but de positionner la voie à sa position définitive en altimétrie et en planimétrie. Les tolérances sont de plus ou moins 5 mm en tracé et en profil. La bourreuse relève la voie sur les 20 mm restants majorés des éventuels tassements provoqués par la stabilisation. La bourreuse permet également de réaliser un balayage de la voie permettant d'enlever le ballast au niveau des attaches de rail et de le renvoyer sur les têtes de traverses.

III.3.3.2.13.2 Rendement

La bourreuse mécanique lourde permet un rendement 1000 m/ h dans le cadre d'un nivellement complémentaire. À la différence d'un premier ou second relevage, le nivellement complémentaire ne nécessite qu'une simple plongée des bourroirs dans le ballast.

III.3.3.2.13.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une bourreuse mécanique lourde de type B66. Une équipe de six opérateurs prévue pour régaler le ballast après le passage de la bourreuse et un agent qualité complètent le dispositif. L'agent qualité contrôle la conformité géométrique de la voie en tracé et en profil.

III.3.3.2.14 Homogénéisation des contraintes

III.3.3.2.14.1 Description

Cette tâche a pour but d'uniformiser les contraintes internes dans le rail. Ces contraintes proviennent du retrait thermique lié au refroidissement des soudures, aux différences de température de pose des rails et enfin aux contraintes résiduelles générées par les galets du

laminoir. L'opération consiste à détacher le rail sur 150 mètres et à le frapper à l'aide de maillet en caoutchouc ou de frappeur hydraulique. Une fois frappée, la zone est rattachée et la zone suivante est traitée. À la différence de la libération des contraintes, évoquées dans le paragraphe I.1.2.3.2.2, l'homogénéisation ne permet pas de ramener le rail à une température fictive de 25°C ; elle permet néanmoins de lisser les contraintes sans en affecter leur valeur moyenne.

III.3.3.2.14.2 Rendement

Le rendement moyen pour une homogénéisation de 150 mètres sur les deux files de rail est d'environ une heure.

III.3.3.2.14.3 Moyens mobilisés

Le titulaire mobilise une équipe composée d'un chef de chantier et de quatre opérateurs.

III.3.3.2.15 Passage des véhicules de mesures

Avant le passage de train d'essais, nous avons fait circuler des trains de mesures (géométrie de la voie et auscultation par ultrason des rails) et un chariot de contrôle du gabarit. Ces mesures, dépouillées dans la foulée, ont permis de confirmer la conformité générale des travaux et ont permis de restituer la voie pour la tenue des essais dynamiques.

III.3.3.2.16 Essais dynamiques

À l'issue des travaux de repose des équipements de signalisation, des essais statiques sont réalisés. Ces essais consistent à vérifier :

- les alimentations des balises de contrôle ;
- la continuité des transmissions ;
- le niveau de transmission ;
- le fonctionnement des armoires SACEM qui auront été condamnées.

Enfin, avant la remise en service de la ligne des essais dynamiques permettent de vérifier le bon fonctionnement des équipements de signalisation. Ces essais consistent à :

- étalonner le train d'essai ;

- réaliser des vérifications d'invariants⁵³ à basse vitesse ;
- vérifier les entrées de zones équipées SACEM pour chaque balise de contrôle de vitesse.

III.3.3.3 Cadence d'avancement du chantier

Dans cette partie, on présentera les cadences réalisées sur le chantier (Figure 129). L'analyse des phénomènes ayant perturbé la productivité sera traitée dans la dernière partie de notre étude.

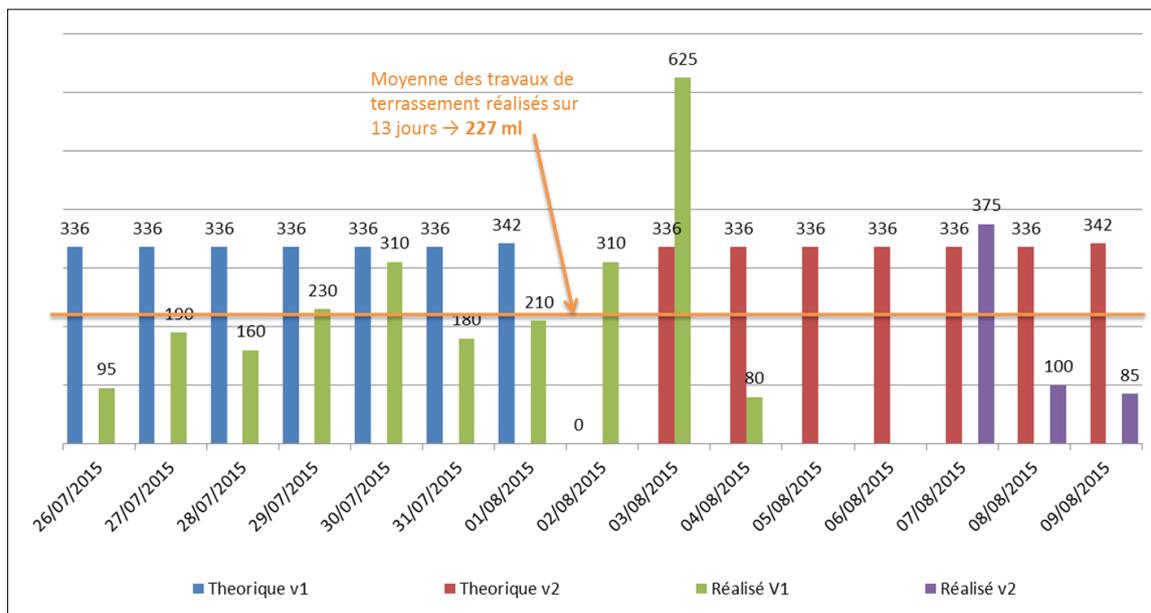


Figure 129. Graphique de comparaison des cadences théoriques et réelles du RVB 2015

Ce graphique met en évidence que les cadences réalisées sont bien inférieures aux cadences théoriques. Il démontre également que l'ajout d'un train supplémentaire, à partir du 2 août a permis d'atteindre les rendements souhaités. Enfin, il ressort que le changement de voie de travail (basculement de la voie 1 à la voie 2) a fortement perturbé les cadences. Cela est principalement dû à la cinématique des trains de travaux dont la complexité ne permettait pas une adaptabilité performante.

⁵³ Ce terme désigne tous les points fixes ou références utilisés par le train lui permettant de connaître sa position sur la ligne (pointe d'appareil de voie, entrée et sortie de quai, courbes, etc.)

III.4 BILAN DU CHANTIER DU RVB 2015

Le linéaire traité s'est élevé à 2260 ml sur la voie 1 et 558 ml sur la voie 2.

Le linéaire prévu par le titulaire était de 4,7 km soit une atteinte des objectifs de l'ordre de 60%. Ce chiffre est à nuancer car le linéaire prévu par la RATP était de 4 km portant le pourcentage de linéaire traité à 75%.

Le volume de ballast en place évacué a été de 4610 m³.

Les appareils de voies 800/801 ont bien été renouvelés mais en 4 jours au lieu de 3.

Les essais dynamiques ont été réalisés en 4 nuits au lieu des 5 nuits prévues.

Pour conclure cette partie, les voies ont été remises en service avec très peu de réserves ce qui est plutôt rare dans le cas d'un chantier de cette envergure. De plus, dix mois après la reprise d'exploitation, aucun désordre n'a été signalé, ce qui témoigne de la qualité du travail réalisé. Enfin, malgré des conditions de travail difficiles, nous n'avons eu à déplorer aucun accident du travail majeur.

IV. RETOUR D'EXPÉRIENCE

Cette dernière partie du mémoire a pour but d'analyser les paramètres ayant généré les pertes de production évoquées précédemment.

On s'attachera à observer les failles dans les méthodologies travaux, dans l'ordonnancement des tâches et dans l'organisation générale du chantier, pour proposer des axes de progrès à mettre immédiatement en pratique dans le cadre des études d'exécution du chantier à venir en 2016.

Les méthodologies ayant fait leur preuve durant le chantier seront bien entendu reconduites voire renforcées pour le chantier du RVB 2016.

IV.1 ASPECT TRAVAUX : ANALYSE DES MÉTHODOLOGIES TRAVAUX ET DES MOYENS MOBILISÉS

IV.1.1 Tronçonnage et dépose de panneaux

Le réalisé est conforme à la méthodologie proposée par le titulaire. Le marché prévoit la possibilité de déposer 1300 mètres en une fois, cette mesure n'a pas été utilisée car le linéaire maximum déposé en une fois a été de 594 mètres. Déposer des linéaires importants permet de spécialiser des trains sur des activités bien précises et d'optimiser leur utilisation.

Cette méthode sera renforcée par une dépose de panneau de voie sur de plus grand linéaire.

IV.1.2 Dégarnissage

La spécificité de ce chantier était et restera, pour les prochaines années, la logistique du ballast. On concentrera notre expertise sur cette tâche afin d'en tirer le maximum d'enseignements.

Le dimensionnement des trains de travaux s'est avéré insuffisant : 23 wagons R90 étaient prévus pour accueillir les produits de dégarnissage. Dans la réalité, seulement 20 wagons étaient réellement aptes à recevoir les déblais puisque tous les premiers wagons de chaque train contenaient du matériel notamment des cuves de carburant pour ravitailler les engins.

Le rendement linéaire prévu de 336 mètres par jour n'a jamais été atteint.

La première et immédiate mesure a été de rallonger les trains pour augmenter leur capacité de chargement. Mais cette mesure prise en urgence s'est avérée limitée car le titulaire n'avait pas de wagons supplémentaires. La RATP a dû prêter sept wagons durant le chantier. De plus, les voies de manœuvres de Sucy étant insuffisantes en longueur, on ne pouvait rallonger d'avantage les trains. Chaque train du chantier a été augmenté d'un wagon supplémentaire, portant le nombre de wagons alloués au dégarnissage à 26. Cette mesure ne permit pas d'atteindre le rendement prévu.

La seconde mesure mise en œuvre pendant le chantier, à partir de la deuxième semaine de chantier, a été d'ajouter un train supplémentaire. En effet, le marché autorise l'utilisation de six trains de travaux, trois circulant à l'est et trois à l'ouest. Cette solution fut rendue possible car le titulaire avait prévu à la demande de la MOE deux locotracteurs de secours (un sur chaque PST). Concernant les wagons, il a été décidé d'emprunter un jeu de wagons initialement utilisé par les trains T1 ou T2 et qui était permuté chaque nuit. Cette mesure a obligé, en nuit, de réaliser le déchargement des déblais de deux trains pendant que le troisième permutait ses wagons. Le déchargement en nuit de deux trains s'est néanmoins bien déroulé. Cela nous a permis de pouvoir disposer de 32 wagons. La Figure 129 illustre qu'à partir du 2 août les rendements théoriques ont pu être respectés.

Outre le sous-dimensionnement du nombre de wagons alloués au dégarnissage, il est important de signaler que le chargement de ces derniers n'était pas optimal. Les pelles étaient plus préoccupées par le temps qu'ils mettaient à terrasser que par la réalisation d'un chargement optimal des wagons.

Le recours à des pelles à chenille type MECALAC dont la spécificité est un chargement frontal et non en rétro s'est avéré très utile. Ce mode de terrassement apparenté au chargeur permet des rendements de dégarnissage plus forts qu'un chargement en rétro. On a mesuré un rendement moyen de 100 mlvs⁵⁴/h. Cela correspond à un rendement de 150 m³/h, bien supérieur aux 80 m³/h d'une pelle rail/route en chargement rétro. Pour conclure, le gabarit réduit de ce modèle en fait un engin polyvalent, performant et adapté aux travaux en milieu confiné.

⁵⁴ Mètre linéaire de voie simple

Le dimensionnement des wagons est à revoir. Les trains prévus aux opérations de dégarnissage doivent permettre plus de souplesse.

L'utilisation des pelles à chenille type MECALAC est à renforcer au profit des pelles rail-route. Ces dernières s'adaptent mieux à l'environnement confiné du tunnel et ont des rendements plus intéressants.

IV.1.3 Nettoyage du radier et remise en conformité du système de drainage

L'utilisation de la raclette en téflon montée sur la mini pelle s'est avérée très efficace.

Le nettoyage des barbacanes par hydrocurage haute pression à tête rotative a été performant. Seulement 2 % des barbacanes n'ont pu être traitées pour cause de concrétions trop importantes. Cette méthodologie pourra être reconduite en veillant à réaliser ces opérations en temps masqué de façon à ne pas bloquer les travaux de pose de tapis et de mise en place de la sous-couche dont le début est conditionné par la fin de cette tâche.

Le titulaire doit privilégier l'utilisation d'un marteau piqueur pneumatique. Les marteaux piqueurs électriques ne permettaient pas un traitement rapide des concrétions et des blocs de ballast amalgamés.

IV.1.4 Pose de tapis antivibratile

La méthodologie proposée a dans l'ensemble été respectée. Une dérogation a tout de même été acceptée par la MOE durant le chantier. En effet, dans les zones humides (causées par des infiltrations abondantes), il était impossible d'appliquer la bande thermocollée. Pour ne pas retarder le chantier, la RATP consentit à « spiter » le tapis principal de façon à le maintenir avant la mise en place du ballast. La seule consigne était que les spits ne devaient pas se trouver dans la zone de répartition des efforts partant de la surface d'appui du rail afin de s'affranchir du risque de création de pont vibratoire.

IV.1.5 Mise en œuvre de la sous-couche

Le titulaire prévoyait de mettre en œuvre 30 % de ballast criblé. En effet, le ballast quittant le chantier devait être traité chez un partenaire du titulaire pour être réutilisé sur le chantier. La réalité a été toute autre : le ballast d'origine n'a fait l'objet d'aucun recyclage, et ce pour deux raisons. Le titulaire n'a pas fourni les éléments indispensables à la qualification

du matériau recyclé. D'autre part, la mise en œuvre d'un matériau recyclé aurait nécessité la mise en place d'une cinématique de train particulière incompatible avec le chantier où les mouvements de trains étaient déjà très difficiles à orchestrer dans un espace aussi réduit limité à deux voies de circulation. Aucun ballast recyclé n'a été mis en œuvre en sous-couche.

La voie courante, où les épaisseurs de ballast sous NIT étaient d'environ 40 cm, n'a pas subi de tassement au passage des trains voyageurs. En revanche, sur la zone de renouvellement des appareils de voie 800/801, où la profondeur du radier était beaucoup plus importante (environ 90 cm sous NIT) en raison d'un changement de section du tunnel, on a observé des tassements de 10 à 15 mm.

En conséquence, la méthodologie devra être complétée d'indications claires concernant le compactage des couches de ballast au cylindre autoporté. Le nombre de passes de cylindre pour garantir un compactage efficace devra être précisé.

IV.1.6 Pose de traverses au palonnier et bouclage

La méthode est à reconduire. Très peu de traverses ont été épaufrées (moins de 1 %).

On portera tout de même une attention particulière lors du déchargement des traverses depuis le train. La préhension de ces dernières, sur le lit le plus haut, a occasionné des heurts sur la caténaire.

Ces chocs répétés, véritables points de faiblesse sur la caténaire, génèrent des arcs électriques au passage des trains. Ce phénomène, qui accentue la dégradation de la caténaire et du pantographe, nécessite un traitement particulier long et coûteux.

IV.1.7 Relevages et bourrage mécanique de la voie

La géométrie de la voie, en tracé et profil, a été particulièrement bien réalisée. La méthodologie est à reconduire. On indiquera simplement que la bourreuse de secours devra se trouver sur le réseau RATP ou sur un faisceau SNCF à proximité immédiate.

IV.1.8 Réalisation des soudures électriques

La présence du camion de soudure dans la zone de chantier a fortement perturbé la cinématique des mouvements de trains. Seul l'équipage du camion pouvait déplacer celui-ci. Or cet équipage n'était présent que la nuit.

La méthodologie proposée par le titulaire consistant à souder sur des rails en place impose que la voie ait subi le premier et deuxième relevage ainsi que les ballastages complémentaires. Cela implique que la tâche soudure est totalement dépendante de la réalisation des deux tâches précédentes. Par ailleurs, le fait de réaliser une soudure sur un rail en place posé sur une voie non stabilisée génère des défauts géométriques sur la soudure. Ainsi 70 % des soudures électriques réalisées ont fait l'objet d'une reprise à la presse hydraulique pour corriger le décalage de hauteur des deux abouts soudés. La solution pourrait être envisagée de réaliser les soudures sur des LRS non posés. Le camion réaliserait les soudures sur des LRS stockés mais non posés. Il souderait les LRS de longueur élémentaire 216 mètres pour créer des LRS de 800 mètres. Ces LRS plus long seraient posés après le renouvellement de la voie. Cette solution, facile à mettre en œuvre, impose tout de même une modification significative dans l'ordonnement des tâches.

IV.1.9 Réseaux divers

IV.1.9.1 Éclairage du chantier

L'éclairage du chantier a été satisfaisant, apportant la luminosité nécessaire pour un travail en sécurité. En revanche, l'alimentation de ce dernier par groupe électrogène ne s'est pas montrée à la hauteur. Des interruptions fréquentes de l'éclairage ont perturbé la réalisation des travaux, notamment des tâches les plus sensibles (dégarnissage, sous-couche, etc.). La perte de production relative à ce dysfonctionnement a été estimée à 36 heures (arrêt de chantier).

La mesure corrective apportée pendant le chantier et qui devra être généralisée pour les prochains étés de travaux a été un raccordement à un poste d'éclairage force (PEF).

IV.1.9.2 Arrosage du chantier

Le dimensionnement du réseau avec l'utilisation d'un surpresseur répondait bien aux besoins du chantier. Cependant, le type de matériau choisi n'a pas été satisfaisant. Le recours à des tubes en PVC de six mètres raccordés les uns aux autres par collage s'est

avéré être un mauvais choix. La conduite, posée à même les caniveaux de câbles⁵⁵, a subi de nombreuses dégradations conséquentes aux cheminements des personnes.

D'autre part, la brumisation qui était la solution technique innovante proposée par le titulaire pour éliminer l'empoussièrément n'a pas été mise en œuvre. La perte de production liée à ce dysfonctionnement a été estimée à 38 heures.

IV.1.10 Analyse de la pertinence des études au regard du linéaire réalisé

Cette partie a pour but de comprendre les causes responsables des erreurs dans l'estimation des volumes de ballast à extraire et de fait, dans le dimensionnement des trains. Cette étude a été menée durant le chantier. En effet, dès les premiers jours de terrassement, les rendements mesurés ne correspondaient pas à ceux prévus et il a fallu réagir rapidement pour adapter l'organisation et les moyens mobilisés dans le but d'améliorer les cadences.

IV.1.10.1 Estimation des volumes de ballast lors du terrassement

Pour réaliser cette estimation, nous disposions d'un relevé topographique du radier et des plaquettes repères entre les points kilométriques 17240 et 16400. Cela représente un linéaire de 840 mètres soit 35 % du linéaire à traiter sur cette voie. Ceci était suffisant pour dégager une tendance claire dans la mesure où la section du tunnel traitée pendant le chantier 2015 était homogène. On disposait également de relevés scanners de la voie existante (réalisés à l'aide du chariot GRP500 du service topographique RATP). Ces relevés ont permis de déterminer les coupes de profil au droit des plaques repères et par extension les cordons de ballast en entrevoie et sur les extrémités. La Figure 130 indique le principe :

⁵⁵ Dans les tunnels de voies ferrées, les caniveaux de câbles servent également de cheminement pour les personnels de maintenance et pour les voyageurs en cas d'évacuation.

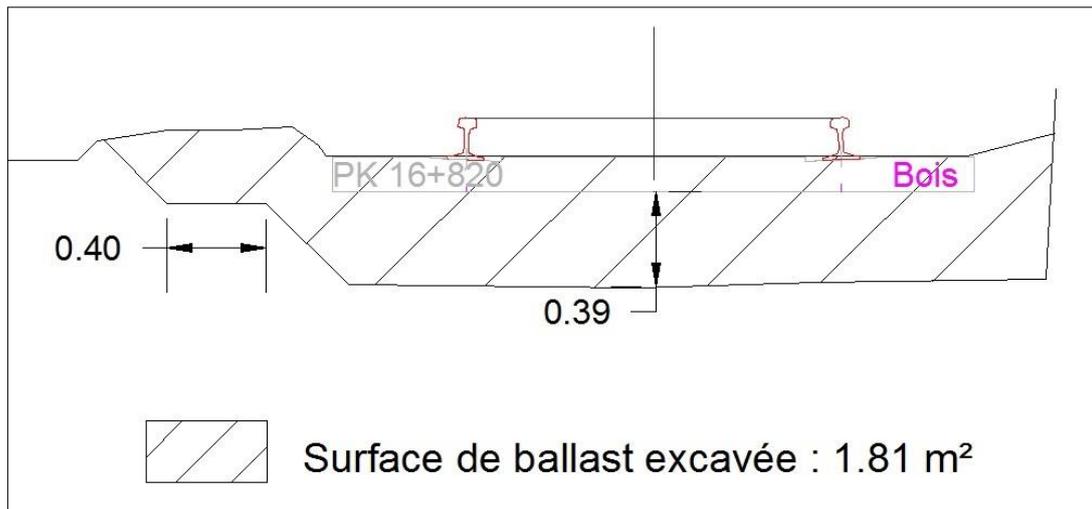


Figure 130. Coupe du radier et du ballast excavé au PK 16 820 V1

La surface de ballast excavée est environ 6 % plus importante que la surface déterminée à l'aide des coupes de tunnel initialement disponibles (cf. Figure 94). Le volume de ballast est ensuite évalué en multipliant les surfaces de ballast évacué au droit de chaque repère par une longueur dite d'application et égale à la somme de la moitié de la distance à la coupe précédente et de la moitié de la distance à la coupe suivante.

Cela donne un volume de ballast de 1458 m³. Le tableau de calcul des volumes de ballast évacués entre les PK 16400 et 17240 V1 est donné en annexe 9.

À ce volume calculé, il faut retrancher le volume des traverses bois existantes. Ces traverses ont des dimensions moyennes de :

$$2.55 \times 0.24 \times 0.14 \text{ soit } 0,08568 \text{ m}^3 .$$

Elles sont disposées selon un travelage de 0,6 m. Le Tableau 26 présente l'estimation du volume moyen en place de ballast à évacuer au mètre linéaire :

Tableau 26. Calcul du volume de ballast au mètre linéaire de voie

Volume total de ballast	
PK min	16401,700
PK max	17240,800
Linéaire total	839,1 m
Volume total ballast (coupes)	1458,278 m ³
Dimensions traverses	
Longueur moyenne	2,55
Hauteur moyenne	0,14
Largeur moyenne	0,24
Volume traverse	0,086 m ³
Travelage	0,6 m
Volume total traverses	119,823 m ³
Volume de ballast corrigé	
Volume total corrigé	1338,455 m ³
Vballast / ml	1,595 m ³
Hauteur sous NIT moyenne	0,395 m

Cette contre étude (réalisée à l'aide de relevé topographique) effectuée pendant le dégarnissage indique que la méthode utilisée en phase d'étude était suffisamment précise. L'écart de 6 % n'est pas la cause du non-respect des rendements prévus.

La détermination fine des volumes de ballast excavés répondait à deux objectifs :

1. La robustesse des volumes calculés par la RATP à opposer à celle estimée par le titulaire reposant sur des bordereaux de livraison de camion de ballast au centre de revalorisation (quantité de ballast exprimée en tonne). Cette robustesse a permis à la RATP de défendre ses intérêts financiers et d'économiser un temps de travail conséquent à la MOE.
2. La prestation topographique commandée a permis de réaliser une cartographie fine du radier permettant d'alimenter le référentiel du gestionnaire d'infrastructure qui ne disposait que de coupes d'études.

Le suivi topographique tel que défini en 2015 sera conservé en 2016.

IV.1.10.2 Vérification du dimensionnement

Les capacités du titulaire avant ajout d'un troisième train de terrassement étaient de 2 trains comprenant chacun 9 wagons de type R90 ainsi qu'une réserve de 5 wagons R90 supplémentaires, soit 23 wagons R90 en tout. En considérant les volumes moyens de

ballast calculés entre les PK 17240 et 16400, l'évaluation du titulaire de la capacité de chargement des wagons R90 (29,25 m³) et la valeur du volume utile d'un wagon R90 donnée par la SNCF (23,1 m³), on obtient les capacités de traitement journalières suivantes :

Tableau 27. Comparaison du linéaire réalisable en fonction du volume utile

	HYPOTHÈSE COLAS	DONNÉES SNCF	RÉALISÉ 2015
Volume utile R90	29,25	23,1	19
Vballast/ml	1,6 m ³ /ml	1,6 m ³ /ml	1,6 m ³ /ml
Nb wagons	23	23	23
Foisonnement	1,3	1,3	1,3
Linéaire effectué	323 ml	255 ml	210 ml

Il apparaît clairement que la valeur du volume utile évaluée par le titulaire ne reflète pas la capacité réelle de chargement d'un wagon. Les renouvellements de voie ballast classique sur le réseau RATP (rendement moyen de 54 mètres) n'imposaient pas de vérification du dimensionnement des wagons et des volumes utiles de chargement. En phase d'étude, la MOE aurait dû comparer le volume utile proposée par le titulaire issu d'un calcul géométrique aux caractéristiques techniques des wagons qui intègrent des coefficients de sécurité. Ainsi, en considérant la valeur du volume utile donnée par la SNCF, le linéaire réalisable au moyen des 23 wagons est de 255 mètres.

Le nombre de wagons alloués au terrassement s'avéra insuffisant. Cela a été corrigé à partir du 2 août avec l'ajout d'un train supplémentaire.

Le Tableau 28 exprime le linéaire traité en fonction du nombre de wagons et du volume utile donnée par la SNCF :

Tableau 28. Évaluation des linéaires traités en fonction du nombre d'équivalent R90 chargés

Nombre de wagons R90	Ballast hypothèse basse (1,6m³/ml)	Ballast hypothèse haute (1,7m³/ml)
23	255 ml	240 ml
24	267ml	251 ml
25	278 ml	261 ml
26	289 ml	272 ml
27	300 ml	282 ml
28	311 ml	293 ml
29	322 ml	303 ml
30	333 ml	314 ml
31	344 ml	324 ml
32	355 ml	334 ml
33	366 ml	345 ml
34	378 ml	355 ml
35	389 ml	366 ml

Pour conclure, la différence entre le rendement attendu et le rendement constaté sur le terrain semble provenir essentiellement d'une mauvaise évaluation du volume utile d'un wagon R90. Aussi, il a été constaté que le chargement non optimal des wagons est également en cause.

Enfin, la valeur du coefficient de foisonnement (donnée empirique pour le ballast) mériterait d'être étudiée en distinguant le matériau neuf présentant peu de fine du matériau ancien constitué de fine, de graisse et de concrétion.

IV.2 ASPECTS ORGANISATIONNELS

IV.2.1 Analyse de l'organisation du titulaire

IV.2.1.1 Gestion du poste de sécurité et de commandement

Dans le cadre de son marché, le titulaire a pour mission d'organiser la sécurité du chantier de l'ensemble des intervenants du chantier. La sécurité ferroviaire, dans la zone interrompue, est régie par le règlement temporaire d'exploitation et de sécurité (RTES). Ce document précise les conditions d'implantation de chantiers élémentaires et de circulation des mobiles travaux (trains, pelles, etc.). Le poste de sécurité fonctionne en 3x8 et est en relation permanente avec l'ensemble des intervenants présents dans le tunnel.

La communication entre le PC chantier et les intervenants se faisait sur un unique canal qui se retrouva rapidement saturé. Il devait, initialement, n'être utilisé que par les responsables de chantiers élémentaires au moment où ils implantaient leur chantier. D'autres canaux étaient prévus pour permettre les échanges inter MOE mais ces derniers ont été délaissés au profit du canal PC chantier. Cela généra des problèmes de communication notamment entre le PC chantier et les conducteurs de trains.

La gestion des mouvements de trains était réalisée à partir d'un tableau sur lequel était indiquée la position des trains (Figure 131).

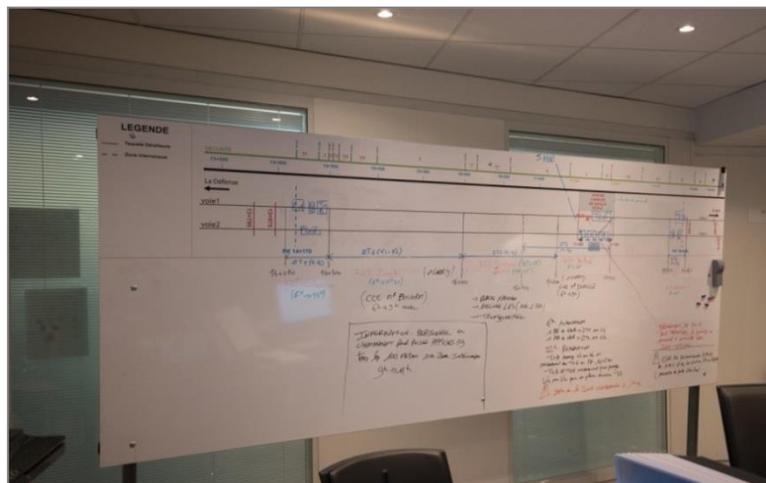


Figure 131. Gestion des mouvements de mobiles travaux

Ce mode de gestion, inspiré des chantiers en ligne fermée SNCF, ne permet pas une réactivité optimum face aux aléas. Ce tableau, s'il n'est pas mis à jour en temps réel, ne permet pas de connaître la position précise des trains à l'arrêt mais aussi lorsqu'ils se

déplacent. Cette méconnaissance de la position en temps réel a engendré des pertes de production.

IV.2.1.2 Encadrement opérationnel

L'organigramme du titulaire était bâti sur une gestion des trois postes de jours par des conducteurs travaux « terrain » supervisés par un conducteur travaux principal. Ce dernier avait pour rôle de représenter le titulaire en réunion OPC et de recalculer le planning en fonction des dérives constatées. Le roulement proposé ne prévoyait pas de suppléants sur les postes stratégiques de conducteur travaux principal et de chef de projet. Cette organisation, trop rigide, ne permettait aucune souplesse.

Après une semaine de chantier, il n'y avait plus de continuité sur le poste de conducteur travaux principal et les décisions prises en réunion OPC ne redescendaient plus.

Le même problème a été constaté sur le poste de responsable FRET. Une seule personne était prévue pour couvrir les trois postes quotidiens. Dans ce cas précis, les conséquences ont été plus lourdes pour la productivité du chantier car la continuité des postes de conducteurs n'était plus suivie. Quotidiennement, le chantier accusait des pertes de production de 4 heures causées par des relèves de conducteurs non assurées.

La perte de production liée aux problématiques d'organisation du titulaire a été estimée à 127 heures.

IV.2.2 Analyse de l'organisation de la MOE prévue et réajustée durant le chantier

Globalement, l'organisation de la MOE a permis de couvrir l'ensemble des activités du titulaire. Néanmoins, le recours aux agents du département GDI du gestionnaire d'infrastructures RATP dont les règles de temps de travail n'étaient pas identiques aux nôtres a complexifié l'organisation.

Les agents GDI avaient un temps de travail effectif de 10 heures contre 8 heures pour les agents ING. Ce décalage ne permettait pas un briefing en début de poste avec la transmission des informations et des documents nécessaires avant de descendre sur le chantier. Ce fut la même problématique pour les fins de poste et les débriefings.

On ajoutera que la production documentaire (fiches de contrôle, rapports d'activité, constats contradictoires) n'était pas exhaustive. Les documents renseignés sur le chantier

ne précisait pas les évènements qui perturbaient la production (panne de l'éclairage, de l'arrosage, etc.).

Enfin, la MOE n'a pas été suffisamment intrusive dans sa mission de surveillance. L'objectif n'étant pas, bien évidemment, d'interférer dans la chaîne de commandement du titulaire mais plutôt de les accompagner dans une démarche proactive. L'idée étant d'anticiper les points de blocage pour proposer et mettre en place des solutions efficaces.

En conclusion de cette partie, le tableau présente le récapitulatif des pertes de production.

Tableau 29. Estimation des pertes de production

Convoi annulé	Arrosage	Éclairage	Relève conducteur de train et pelles	Organisation
30 unités	38 heures	36 heures	89 heures	127 heures

IV.3 SÉCURITÉ ET PROTECTION DE LA SANTÉ

La sécurité et la protection de la santé ont fait l'objet de mesures importantes et contrôlées pendant les travaux.

Le comptage des effectifs dans le tunnel n'a pas donné satisfaction. En cas d'incendie, il n'aurait pas été possible de recenser correctement les agents évacués de ceux restés dans le tunnel.

Les dispositifs de contrôle de la qualité de l'air se sont montrés efficaces. À plusieurs reprises les seuils d'alertes ont été atteints et l'arrêt des engins travaux a permis la dilution des gaz.

IV.4 PROPOSITION D'AXES D'AMÉLIORATION

Au regard des analyses faites précédemment, on proposera des axes de travail et des solutions techniques dont l'efficacité sera éprouvée dès le prochain été de travaux. L'objectif est d'optimiser les rendements qui dimensionnent le chantier pour réussir le renouvellement complet de la voie du tronçon central de la ligne A après les quatre étés d'interruption.

Pour assurer les rendements, faciliter la cinématique des trains et limiter les interfaces, la configuration des travaux 2016 est exclusivement orientée sur le traitement de la voie 2.

Cette solution permettra d'étirer le chantier tout en donnant plus de souplesse à la circulation des trains.

IV.4.1 Logistique

Considérant le retour d'expérience sur les travaux de l'été 2015, il nous est apparu essentiel de fonder notre réflexion sur le paramètre premier qu'est la capacité du titulaire à gérer l'évacuation et l'approvisionnement du ballast pour traiter les linéaires prévus.

En effet, le REX 2015 a démontré que le titulaire n'avait pas maîtrisé les volumes de ballast à traiter. Les capacités de chargement de ballast ayant été sous évaluées, le dimensionnement des ressources et des moyens mis en œuvre n'était pas adapté aux objectifs prévus.

De plus, dans la configuration de travaux 2016 et au regard des différentes sections de tunnel rencontrées, les rapports linaire/ballast issus du référentiel ne sont pas exploitables.

En conséquence, l'élément primordial et incontournable permettant d'analyser le programme de travaux 2016 est la maîtrise des volumes de ballast à évacuer.

L'estimation des volumes de ballast pour le chantier 2016 tient compte :

- de l'exploitation des coupes de tunnel,
- de l'exploitation des données Géoradar,
- d'une majoration de 5 % liée au ballast en tête de traverses et en entrevoie,
- d'un coefficient 1,3 de foisonnement,
- de l'exploitation des nombreux sondages dont un récapitulatif est donnée en annexe 10.

Il en ressort un volume de ballast foisonné affermi de 16013 m³. Cette augmentation de plus de 150 % par rapport au réalisé de 2015 (4600 m³ confirmé par la prestation topographique) est due à des sections de tunnel où les épaisseurs de ballast sont beaucoup plus importantes que celles de 2015. Ce volume a été estimé contradictoirement par le titulaire et la RATP. Il est le point de départ du dimensionnement des moyens à mettre en place afin d'en garantir l'évacuation.

On retiendra une valeur minorée de volume utile d'un wagon R90. La SNCF prévoit un volume utile de 23,1 m³. On considère un volume utile de 19 m³ correspondant à un

volume de chargement moyen mesuré lors du chantier 2015. Cette minoration de 17 % est vue comme un coefficient de sécurité.

Cette augmentation significative des volumes à extraire ne peut être réalisée au moyen des deux bases travaux mises à disposition par la RATP. Le recours à une base travaux supplémentaire est indispensable. Il s'agit de la base travaux CIV située à Isles-lès-Villenoy, près de Meaux. Sa localisation privilégiée permet un temps de trajet entre Meaux et Sucy en Brie d'environ 40 minutes.

L'utilisation d'une base supplémentaire permet l'augmentation du nombre de trains mobilisables pour le chantier, portant ainsi le nombre de wagons à 90. Cela correspond à une capacité journalière de 1710 m³.

IV.4.2 Travaux

L'axe principal d'amélioration permettant d'optimiser les rendements consiste à revoir l'ordonnancement des tâches. Le chantier 2015 a montré qu'il était impossible d'utiliser au mieux les trains quand ces derniers ont plusieurs fonctions sur le chantier. Les trains doivent avoir une unique fonction.

Aussi, l'augmentation du nombre de trains permet de mener en parallèle deux fronts de travaux convergents. Le premier, de La Défense vers Étoile, utilisera deux trains de travaux qui auront pour base le PST de Nanterre. Le second, d'Auber vers Étoile, utilisera les cinq autres trains qui auront pour base le PST de Sucy et la carrière CIV.

Le planning macroscopique (Figure 132) du chantier 2016 est construit dans ce sens et privilégie la spécialisation des trains dans une unique tâche :

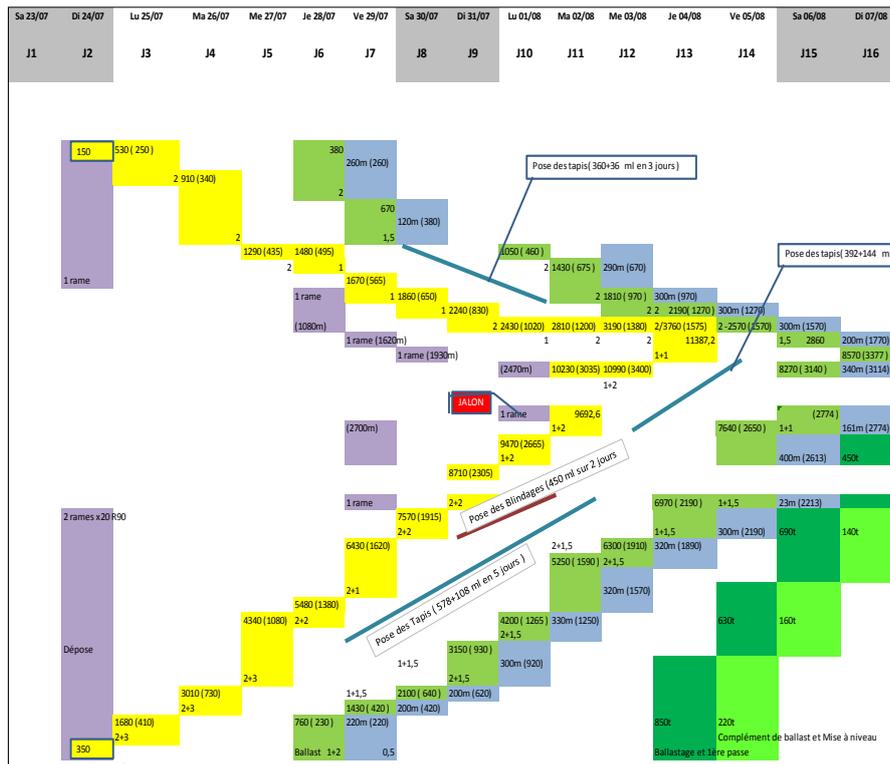


Figure 132. Planning macroscopique du chantier 2016

IV.4.3 Organisation

IV.4.3.1 Communication de chantier

Un prototype d'application tablette PC a été testé durant les travaux 2015 pour accompagner les missions de maîtrise d'œuvre au sein du lot Voie. Une version plus élaborée est en cours d'étude pour être opérationnelle durant l'été 2016. Cette démarche doit permettre d'améliorer les transmissions d'information de l'ensemble des équipes, rendues compliquées en 3x8, 7 jours sur 7.

Le format du compte-rendu de réunion OPC doit également être revu afin de le rendre plus fonctionnel. L'ajout de schémas ou graphiques des circulations de trains facilitera le suivi et la surveillance des tâches quotidiennes.

IV.4.3.2 Sécurité de chantier

La gestion de la sécurité ferroviaire ne sera plus à la charge du titulaire des travaux de voie. Cette prestation doit être externalisée de façon à garantir une équité de traitement entre tous les intervenants. Le PC chantier principal devra être au plus près du terrain avec la possibilité d'un PC secondaire compte tenu de l'étendue du chantier en 2016. Enfin la

géolocalisation des trains permettra de connaître précisément leur position afin de sécuriser les circulations ferroviaires.

IV.4.3.3 Organisation projetée pour les équipes ING/GDI/Titulaire

Pour assurer un temps de transfert d'information raisonnable entre chaque poste et adapter la présence des agents en fonction des activités du titulaire, l'organisation des équipes devra respecter :

- 2 amplitudes de 10h de travail en journée pour le suivi des travaux,
- 1 amplitude normale en nuit pour la gestion des entrées et sorties de trains de travaux.

Cette organisation est partagée avec l'unité GDI/Voie qui ne peut, à ce jour, assurer une mobilisation de ressources suffisantes pour assurer un roulement sur 4 postes.

Seuls les responsables de postes resteront sur une organisation de travail en 3 postes avec un recouvrement induit par la présence de personnel d'encadrement MOE présent en journée.

Les 2 postes de travail en journée sont prévus comme suit :

- 8 heures de présence dans le tunnel,
- 10 heures de travail effectif dont une heure de pause.

Le poste de travail en nuit est prévu comme suit :

- 6 heures de présence dans le tunnel,
- 8 heures de travail effectif,
- gestion des prestations d'accompagnement en nuit (bouclage, bourrage, soudures, etc.),
- recalage du planning des tâches journalières en nuit en cas de dérive.

Pour synthétiser, le retour d'expérience 2015 fait ressortir des axes organisationnels à travailler pour améliorer le chantier :

- la RATP reprend à sa charge les études des dispositifs d'accompagnement (ventilation, éclairage, arrosage, etc.) ;
- la programmation et le pilotage des travaux de voie par la cellule OPC ;

- une meilleure coordination et coactivité entre les métiers ;
- l'externalisation de la gestion du PC chantier et de la sécurité ferroviaire ;
- l'optimisation des travaux et essais du lot signalisation et contrôle de vitesse ;
- l'intégration d'une phase de répétition générale lors de la préparation du chantier 2016.

CONCLUSION

Les dernières parties du mémoire illustrent bien les différentes phases d'un projet d'ingénierie. À l'instar des projets continus, le retour d'expérience s'avère, dans notre situation, être d'une importance cruciale puisque la réussite des travaux de l'été n+1 y est intimement liée. La première saison de travaux a été riche en enseignements, tant sur l'organisation des travaux que sur celle des équipes RATP et entreprises extérieures.

Le responsable de la maîtrise d'œuvre que je suis considère le bilan de l'opération largement positif. La remise en service a été réalisée dans les délais exigés et dans des conditions de sécurité ferroviaire irréprochables. Le bilan HSCT (Hygiène, Sécurité et Conditions de Travail) est excellent puisqu'une seule blessure de faible gravité a été recensée.

Le responsable de maintenance que je reste souligne la qualité du travail réalisé : depuis la mise en service de fin août 2015, aucun incident n'est à signaler.

Fort de mon expérience professionnelle, du REX 2015 et du recul que j'ai pris pour rédiger le présent mémoire, je mesure pleinement le challenge qui nous attend sur la saison 2016. Le défi du renouvellement des ADV, deux fois plus nombreux, et la gestion des déblais/remblais, quatre fois plus volumineux qu'en 2015, ne pourra être relevé qu'en capitalisant sur les bonnes et mauvaises pratiques du chantier 2015.

Les trois axes de travail mis en évidence par l'analyse du chantier 2015 sont la logistique du ballast, l'organisation générale du chantier et la gestion du confortement de la voie 1 qui servira de voie de circulation aux trains de travaux en charge du renouvellement de la voie 2.

La logistique du ballast devra être maîtrisée sur l'ensemble de la chaîne. Une meilleure évaluation des volumes permettra d'aboutir à un dimensionnement adapté des moyens d'évacuation. Il conviendra néanmoins d'être vigilant sur l'exploitation d'une base travaux extérieure au réseau RATP car nous n'aurons aucun levier d'action en cas d'indisponibilité des installations RFN les séparant du RER A.

L'organisation générale du chantier, tant celle du titulaire que de la MOE, devra permettre une réalisation conforme aux prévisions. Elle devra également être souple et s'adapter à tous les aléas.

La proposition d'étaler les travaux sur un plus grand linéaire en ne renouvelant que la voie 2 est un avantage pour les mouvements des trains de travaux mais implique la gestion d'une contrainte supplémentaire. En effet, le dégarnissage sur des profondeurs importantes pose la problématique de la stabilité de la voie contiguë pendant les travaux et celle de la voie renouvelée après la remise en service. On devra retenir une méthodologie de blindage qui garantira les circulations des trains de travaux sans affecter la réalisation des travaux de terrassement.

On veillera enfin à améliorer encore les conditions d'hygiène et sécurité dont le niveau d'exigence n'est pas négociable.

D'un point de vue professionnel, ce projet m'a permis de mettre à profit mes compétences techniques et relationnelles dans la direction d'une trentaine d'agents.

Malgré les difficultés rencontrées, cette expérience a été très enrichissante. Elle a fédéré la quasi-intégralité de l'entité « Équipement Ferroviaire » autour d'un objectif commun.

La rédaction du mémoire a été une opportunité unique de prendre du recul sur mon activité et ainsi analyser notre production, apprécier les retours quantitatifs et qualitatifs, et mieux apprécier mon rôle. Les recherches menées m'ont également permis de perfectionner mes connaissances techniques, d'établir une bibliothèque de cadences et de prix exploitables dans d'autres chantiers, et aussi de renforcer mon sens critique.

Pour conclure, je suis intimement convaincu que, sous l'effet du vieillissement des réseaux et celui de l'augmentation du tonnage journalier, les projets de renouvellement de voie en milieu dense s'intensifieront. Cette nécessité future exige de lancer une grande réflexion sur les moyens de renouvellement mécanisés. Ils devront être robustes, efficaces, adaptés aux gabarits et modulables afin de pouvoir évoluer dans toutes les configurations de chantier en zone dense (tunnel unique, tunnel double, exploitation, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

[ALL 1984] ALIAS J, 1984. La voie ferrée, techniques de construction et d'entretien. EYROLLES, Paris, 510 p.

[ALL 1987] ALIAS J, 1987. Le rail. EYROLLES, Paris, 678 p.

[TRA 1974] AUTEUR INCONNU, 1974. Tracé de la voie : étude et rectification des courbes. SNCF – Direction de l'équipement – cours à l'usage des chefs de district, 115 p.

[VOI 1998] AUTEUR INCONNU, 1998. La voie tome II : entretien du matériel de voie. SNCF – Équipement SUD-EST – memento pédagogique, 146 p.

[BRU 1987] BRUNIQUEL C, 1987. Pratique de la clothoïde. Document interne RATP, 42 p.

[DEB 2007] DEBIOLLES D, 2007. Diagnostic de systèmes complexes à base de modèle interne, reconnaissance des formes et fusion d'information. Application au diagnostic des Circuits de Voie ferroviaire. Technologie de l'information et des Systèmes, UTC Compiègne, 173 p.

[GRE 1911] GRÉGOIRE, IMBERT, DAUTRY, 1911. Cours de chemin de fer, Matériel Fixe de la voie. ESTP, Paris, 45 p.

[LAM 1951] LAMALLE U, 1951. Tome III, La voie. In : Cours d'exploitation des chemins de fer. DUNOD, 257 p.

[LEB 1947] LEBBE F, 1947. Au fil du rail, la constitution de la voie ferrée. EDITORIAL OFFICE, Bruxelles, 37 p.

[LEV 2012] LÉVY C, 2012. Traitement des vibrations dues à la voie. RATP, Fontenay-sous-Bois, 49 p.

[LIC 2009] LICHTBERGER B, 2009. Le manuel de la voie. EURAIL PRESS, Hambourg, 596 p.

[MAR 1989] MARGAIRAZ M, 1989. Histoire de la RATP. La singulière aventure des transports parisiens. Albin Michel, 173 p.

[MET 2014] METALLIER N, 2014. Préconisation quant à l'incertitude sur les mesures géoradar. Document interne RATP, 10 p.

[POI 2008] POINTENER P, 2008. High strength rail steels. The importance of material properties in contact mechanics problems. WEAR, p 1373-1379.

[RFF 2008] RFF, 2008. Fiche d'identité, chantier de modernisation des voies par suite rapide. RFF, Strasbourg, 6 p.

[SDA 1965] SDAU, 1965. Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme. 247 p.

[SDL 2012] SDLA, 2012. Schéma directeur du RER A. Document interne RATP, 158 p.

[ZWA 2007] ZWANENBURG WJ, 2007. Gestion de la maintenance des infrastructures. LITEP, Lausanne, 44 p.

Articles de périodiques imprimés

[BAR 2004] BARBIER M, 2004. Genèse et développement du RER. PCM Le Pont, (**mars**), p 1-16.

[DEL 1982] DELAGARDE F, GRELET R, 1982. Organisation d'un chantier de renouvellement de voie et de ballast à cadence rapide. *Travaux*, (**n°566**), p 70-78.

[DUZ 2012] DULEZ R, 2012. La modernisation des RER : l'inévitable complexité. *Le rail*, (**n°191**), p 13-15.

[GRA 2011] GRASSART P, 2011. RER D. Une usine roulante pour changer 54 km de rail à toute vitesse. *La vie du rail*, (**n°3310**), p 14-15.

[GUE 2010] GUEZEL J-C, 2010. Le renouvellement de la voie et du ballast accélère la cadence. *Le Moniteur*, (**n° 5571**), p 46-47.

[HUA 1980] HUART F, 1980. Les renouvellements de voie. *Travaux*, (**n°547**), p 83-91.

[MAL 2011] MALOD J, PANISSET J, 2011. Voie ballastée ou voie sans ballast : un sujet pertinent pour les acteurs du ferroviaire. *Revue générale des routes et des aérodromes*, (**n°898**), p 61-67.

[POT 2013] POTIER J-M, 2013. Plateformes et voies ferroviaires en tunnels : recommandation de l'AFTES n° GT40R2F1. *Tunnels et espace souterrain*, (**n° 237**), p 194-226.

Normes

Norme NF EN 13674-1. Applications ferroviaires – Voie – Rails – Partie 1 : rails Vignole de masse supérieure ou égale à 46 kg/m.

Norme NF EN 13674-2+A1. Applications ferroviaires – Voie – Rails – Partie 2 : rails pour appareils de voie utilisés avec des rails Vignole de masse supérieure ou égale à 46kg/m.

Norme NF EN 13145+A1. Applications ferroviaires – Voie – Traverses et supports en bois.

Norme NF EN 13230-1. Applications ferroviaires – Voie – Traverses et supports en béton.

Norme NF EN 13450. Granulats pour ballasts de voies ferrées.

Sites web

FERRAND A. Les raccordements à rayon progressif, [en ligne].

Disponible sur : <www.topogr.perso.neuf.fr/rayprogr.htm#Raccordements> (consulté le 15 décembre 2015).

GOLDSCHMIDT. Ballast stabilisation, [en ligne].

Disponible sur : <www.goldschmidt-thermit.com/en/portfolio/rail-services/ballast-stabilization/> (consulté en janvier 2016).

PLASSER&THEURER. Stabilisation et compactage, [en ligne].

Disponible sur : <www.plassertheurer.com/fr/machines-systemes/stabilisation-compactage> (consulté en février 2016).

SATEBA. Patins réducteur d'attrition, [en ligne].

Disponible sur : <www.sateba.com/nos-solutions/patins-reducteurs-dattrition> (consulté en janvier 2016).

SYMBIOZ. La ligne de Vincennes, [en ligne].

Disponible sur : <<http://www.symbioz.net/index.php?id=27>> (consulté en novembre 2015).

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 Extrait de l'IN 198V4V	224
Annexe 2 Définition des termes liés au jalonnement d'un projet RATP	226
Annexe 3 Listing des courbes critiques RER A	229
Annexe 4 Listing des types de pose du TC LA	231
Annexe 5 Listing des ADV à renouveler dans le cadre du projet	237
Annexe 6 Programme de formation RATP	239
Annexe 7 Organigramme Colas Rail	241
Annexe 8 Listing des zones à équiper en tapis sous ballast	243
Annexe 9 Calcul des volumes de ballast évacués entre le 16 400 et le 17 240 V1	245
Annexe 10 Synthèse des sondages manuels complémentaires RVB 2016	248

Annexe 1

Extrait de l'IN 198V4V

ARTICLE 3 - PRINCIPE DE CLASSEMENT

Le mode de calcul du trafic fictif des voies d'un tronçon de ligne et la classification adoptée font l'objet des dispositions ci-après.

- 1 - La classification des voies de lignes est établie sur la base d'un trafic fictif T_{f2} calculé d'après la formule :

$$T_{f2} = S \times T_{f1}$$

dans laquelle T_{f1} désigne un tonnage fictif dont l'expression est la suivante :

$$T_{f1} = T_v + K_m T_m + K_t T_t$$

Dans les formules ci-dessus :

T_v désigne le tonnage journalier voyageurs exprimé en tonnes brutes remorquées,

T_m désigne le tonnage journalier marchandises exprimé en tonnes brutes remorquées,

T_t désigne le tonnage journalier des engins de traction exprimé en tonnes (1)

K_m (2) est un coefficient qui vaudra normalement 1,15, et pour les voies supportant un trafic prépondérant d'essieux de 20 tonnes, 1,30,

K_t (2) est un coefficient égal à 1,40.

S est un coefficient de qualité de la voie qui pourra prendre des valeurs suivantes :

- $S = 1$ Lignes sans trafic voyageurs ou comportant un trafic voyageurs essentiellement local.
- $S = 1,10$ Lignes dont le trafic voyageurs comporte des trains dont la vitesse est au plus égale à 120 km/h.
- $S = 1,20$ Lignes dont le trafic voyageurs comporte des trains dont la vitesse est supérieure à 120 km/h et au plus égale à 140 km/h.
- $S = 1,25$ Lignes dont le trafic voyageurs comporte des trains dont la vitesse est supérieure à 140 km/h.

- (1) On comprendra en principe dans le tonnage des engins de traction T_t les automotrices à voyageurs dont la charge par essieu est supérieure à 17 tonnes, les autres étant comprises dans le tonnage voyageurs T_v .
- (2) K_m et K_t sont des coefficients tenant compte à la fois de la charge et de l'agressivité des essieux actuels.

Annexe 2

Définition des termes liés au jalonnement d'un projet RATP

Le projet RATP est jalonné par les **décisions du maître d'ouvrage** :

- **D0- Identification** : Le maître d'ouvrage approuve le périmètre des exigences à satisfaire et lance les études qui visent à définir la meilleure solution dans l'environnement d'utilisation. Il inscrit le projet dans son programme pluriannuel d'investissement (Fiche d'Inscription au Programme d'investissement).
- **D1- Cadrage** : Le maître d'ouvrage approuve l'opportunité de la solution proposée et lance les études qui visent à définir les produits et préparer le processus de mise en œuvre du projet. Il met en place le financement de ces études (Dossier d'Opportunité d'Investissement).
- **D2- Lancement** : Le maître d'ouvrage approuve les modalités d'achèvement du projet et lance le processus de mise en œuvre du projet. Il met en place le financement du projet (Dossier de Décision d'Investissement).
- **D3- Référence** : Le maître d'ouvrage approuve les spécifications détaillées de référence et autorise la réalisation effective des produits (construction d'ouvrage, production de pré-série, fabrication industrielle).

Point clef

L'identification des projets relevant du Contrat de Plan Etat-Région (CPER) est de la compétence de l'Autorité organisatrice des transports (AOT).



Points clés

Il n'y a pas de durée minimale entre deux jalons de décision consécutifs, mais toute omission ou toute inversion de leur ordre est préjudiciable au succès du projet.

Les activités réalisées entre deux jalons consécutifs varient en fonction des processus de développement du produit et donc du type de projet.



- **D4- Qualification** : Le maître d'ouvrage approuve la qualification des produits et autorise leur mise en œuvre dans l'environnement d'utilisation (mise en service, déploiement, production de série).
- **D5- Clôture** : Le maître d'ouvrage approuve la clôture du projet après vérification des conditions d'achèvement et remise de l'ouvrage ou du système aux exploitants et mainteneurs (mise en service).

La décision d'identification marque la fin des études amont et l'entrée formelle dans le cycle du projet. La décision de clôture marque la fin de l'organisme temporaire qu'est le projet.

En plus de ces jalons du maître d'ouvrage, les processus de développement peuvent introduire des jalons supplémentaires dans le déroulement du projet : ceux-ci sont alors définis dans le Plan de management de projet.

Annexe 3

Listing des courbes critiques RER A

N°courbe	N° voie	PK début	PK fin	Rayon	Longueur
43	1	11861	12451	600	590
45	1	12657	12977	600	320
46	2	11887	12474	600	587
48	2	12576	12936	850	360
55	1	14179	14624	700	445
57	1	14647	14990	700	343
58	2	14179	14624	700	445
61	1	17771	18012	600	241
64	2	17771	18012	600	241
71	1	20530	20914	1000	384
75	1	21338	21606	500	268
79	1	22298	22312	600	14
80	2	21533	21630	400	97
81	1	22730	22860	500	130
88	2	22730	22860	500	130
89	1	25262	25273	370	11
91	1	26651	26742	500	91
95	1	27152	27428	500	276
97	1	27502	27964	570	462
98	2	25262	25273	370	11
100	2	26651	26697	450	46
101	1	28580	28850	515	270
102	2	26697	26825	530	128
108	2	27112	27440	555	328
110	2	27497	27950	500	453

Annexe 4

Listing des types de pose du TC LA

Référence	Type de pose	N° voie	PK début	PK fin	Linéaire	Date de pose
P-BIBA/01	TRAVERSE BETON BIBLOC SUR BALLAST - UIC60 - AP - A CAME	1	28 893	29 074	181	14/12/1969
P-BIBA/01	TRAVERSE BETON BIBLOC SUR BALLAST - UIC60 - AP - A CAME	2	28 900	29 086	186	14/12/1969
P-BIBA/03	TRAVERSE BETON BIBLOC SUR BALLAST - U50 - AP - A CAME	2	12 710	12 796	86	01/10/1972
P-BIBA/03	TRAVERSE BETON BIBLOC SUR BALLAST - U50 - AP - A CAME	2	12 871	12 972	101	01/10/1972
P-BIBA/15	TRAVERSE BETON BIBLOC U31 NAG - U50 UIC60	2	12 796	12 871	75	01/10/1972
P-BOBA/20	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - AVEC PLAQUETTES	1	12 453	12 565	112	01/10/1972
P-BOBA/20	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - AVEC PLAQUETTES	1	12 615	12 624	9	01/10/1972
P-BOBA/21	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 67	1	26 816	26 820	4	09/12/1977
P-BOBA/21	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 67	1	26 890	26 895	5	09/12/1977
P-BOBA/21	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 67	2	26 853	26 857	4	09/12/1977
P-BOBA/21	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 67	2	26 899	26 901	2	09/12/1977
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	1	20 029	20 068	39	09/01/1970
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	1	26 820	26 890	70	09/12/1977
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	1	13 346	13 355	9	09/01/1970
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	1	13 355	13 414	59	09/01/1970
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	1	26 767	26 785	18	09/12/1977
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	1	26 933	26 953	20	09/12/1977
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	2	12 553	12 569	16	01/10/1972
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	2	12 569	12 578	9	01/10/1972
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	2	13 349	13 357	8	09/01/1970
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	2	13 398	13 407	9	09/01/1970
P-BOBA/22	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE U 75	2	26 800	26 826	26	09/12/1977
P-BOBA/23	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	21 957	21 965	8	23/11/1971
P-BOBA/23	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - U50 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	26 785	26 789	4	09/12/1977
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	20 209	20 420	211	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	24 181	24 325	144	09/12/1977
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	12 471	12 514	43	01/10/1972
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES A 2 Int/Ext	2	14 992	15 177	185	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	18 000	19 053	1 053	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES A	1	11 692	11 860	168	01/10/1972

P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	12 565	12 573	8	01/10/1972
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	12 624	12 656	32	01/10/1972
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	12 985	13 216	231	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	13 325	13 346	21	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	13 508	13 616	108	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	14 995	15 175	180	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	15 275	17 290	2 015	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	17 534	17 815	281	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	17 998	19 052	1 054	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	19 384	19 920	536	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	20 914	20 951	37	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	21 006	21 044	38	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	21 937	21 957	20	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	21 965	21 987	22	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	22 005	22 022	17	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	1	27 426	27 498	72	14/12/1969
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES A	1	27 963	28 583	620	14/12/1969
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	11 688	11 877	189	01/10/1972
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	12 972	13 201	229	01/10/1972
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES A	2	13 320	13 349	29	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	13 510	13 620	110	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES A 2 Int/Ext	2	15 278	16 703	1 425	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	16 703	17 293	590	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	17 538	17 792	254	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	19 382	19 920	538	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	20 205	20 414	209	09/01/1970
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	20 508	20 549	41	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	20 912	20 982	70	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	21 037	21 043	6	23/11/1971
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	26 916	27 115	199	14/12/1969
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	27 449	27 499	50	14/12/1969
P-BOBA/24	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - AVEC PLAQUETTES	2	27 946	28 582	636	14/12/1969
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	20 544	20 823	279	23/11/1971

P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	12 075	12 078	3	01/10/1972
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	17 290	17 534	244	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	17 868	17 998	130	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	19 052	19 384	332	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	19 920	20 029	109	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	20 108	20 209	101	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	1	21 044	21 093	49	23/11/1971
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	2	17 859	18 000	141	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	2	19 053	19 382	329	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	2	19 920	19 988	68	09/01/1970
P-BOBA/25	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 82	2	20 573	20 790	217	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	22 779	22 910	131	09/12/1977
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	15 177	15 278	101	09/01/1970
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	21 092	21 154	62	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	22 729	22 853	124	09/12/1977
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	20 527	20 544	17	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	20 823	20 878	55	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	20 878	20 914	36	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	21 335	21 368	33	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	21 436	21 505	69	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	21 580	21 607	27	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	21 987	22 005	18	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	22 339	22 351	12	09/12/1977
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	20 549	20 573	24	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	20 790	20 838	48	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	21 335	21 423	88	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	21 510	21 607	97	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	21 943	21 971	28	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	21 995	22 041	46	23/11/1971
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	24 251	24 351	100	09/12/1977
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	2	26 901	26 916	15	09/12/1977
P-BOBA/26	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE U 90	1	21 093	21 155	62	23/11/1971
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	2	14 523	14 992	469	09/01/1970

P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	1	11 860	12 075	215	01/10/1972
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	1	12 150	12 453	303	01/10/1972
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	2	11 961	11 969	8	01/10/1972
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	2	13 439	13 510	71	09/01/1970
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	2	14 288	14 512	224	09/01/1970
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	2	17 293	17 538	245	09/01/1970
P-BOBA/27	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST- UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 2TF - NABLA	2	20 158	20 205	47	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	12 970	12 985	15	01/10/1972
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	13 216	13 325	109	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	14 523	14 995	472	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	15 175	15 275	100	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	26 653	26 767	114	09/12/1977
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	27 154	27 250	96	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	27 498	27 606	108	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	28 583	28 893	310	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	12 031	12 471	440	01/10/1972
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	28 582	28 900	318	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	12 656	12 770	114	01/10/1972
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	13 414	13 508	94	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	14 180	14 278	98	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	14 288	14 512	224	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	17 815	17 819	4	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	17 858	17 868	10	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	20 420	20 496	76	23/11/1971
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	21 368	21 436	68	23/11/1971
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	21 505	21 580	75	23/11/1971
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	27 286	27 426	140	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	1	27 639	27 963	324	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	11 877	11 961	84	01/10/1972
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	12 578	12 710	132	01/10/1972
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	13 201	13 320	119	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	13 407	13 439	32	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	17 792	17 801	9	09/01/1970

P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	17 836	17 859	23	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	19 988	20 088	100	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	20 127	20 158	31	09/01/1970
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	20 414	20 469	55	23/11/1971
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	21 423	21 510	87	23/11/1971
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	26 735	26 800	65	09/12/1977
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	27 115	27 243	128	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	27 281	27 449	168	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	27 499	27 602	103	14/12/1969
P-BOBA/28	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 4 TROUS 4TF - NABLA	2	27 640	27 946	306	14/12/1969
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	20 998	21 006	8	23/11/1971
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	12 078	12 085	7	01/10/1972
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	17 819	17 826	7	09/01/1970
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	20 100	20 108	8	09/01/1970
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	20 496	20 501	5	23/11/1971
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	20 951	20 954	3	23/11/1971
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	26 953	27 154	201	09/12/1977
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	1	27 280	27 286	6	14/12/1969
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	17 829	17 836	7	09/01/1970
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	20 088	20 097	9	09/01/1970
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	20 501	20 508	7	23/11/1971
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	20 982	20 991	9	23/11/1971
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	21 034	21 037	3	23/11/1971
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	22 298	22 313	15	09/12/1977
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	27 275	27 281	6	14/12/1969
P-BOBA/29	TRAVERSE BOIS SUR BALLAST - UIC60 - SELLE AI 2 TROUS - NABLA	2	27 602	27 610	8	14/12/1969
P-PUISARD/01	POSE SUR PUISARD	2	14 512	14 523	11	09/01/1970
P-PUISARD/01	POSE SUR PUISARD	1	14 278	14 288	10	09/01/1970
P-PUISARD/01	POSE SUR PUISARD	1	14 512	14 523	11	01/01/2000
P-PUISARD/01	POSE SUR PUISARD	1	21 607	21 615	8	23/11/1971
P-PUISARD/01	POSE SUR PUISARD	2	14 278	14 288	10	18/05/2010
P-PUISARD/01	POSE SUR PUISARD	2	21 607	21 615	8	23/11/1971

Annexe 5

Listing des ADV à renouveler dans le cadre du projet

Gare	Numéro d'ADV	Situation existante			Situation projetée	
		Type d'appareil	Type de planche	Profil de rail	Type de planche	Profil de rail
Nanterre Préfecture	710	Branchement tg 0,05 à G CEX 600	Bois	60E1	Bois	60E1
	712	Branchement tg 0,05 à G CEX 600	Bois	60E1	Bois	60E1
Nanterre Pref/Défense	715	Branchement tg 0,085 à D	Bois	50E6	Béton	60E1
Défense	716	Branchement tg 0,13C à G	Bois	50E6	Bois	non déterminé
	717	Branchement tg 0,085 à G	Bois	50E6	Bois	60E1
	718	Branchement tg 0,13C à D	Bois	50E6	Bois	non déterminé
	723	Branchement tg 0,085 à G	Bois	50E6	Bois	60E1
Étoile	800-801	Communication tg 0,11L CIN/CEX 600	Bois	60E1	Béton	60E1
Auber	903-904	Communication tg 0,11L CIN/CEX 500	Bois	60E1	Béton	60E1
	905-906	Communication tg 0,11L à G	Bois	60E1	Bois	60E1
Auber/Châtelet	1001-1002	Communication tg 0,085L à D	Bois	60E1	non déterminé	60E1
Châtelet	1005	Branchement tg 0,13C à D	Bois	50E6	Bois	60E1
	1011	Branchement tg 0,13C à G	Bois	50E6	Bois	60E1
Nation	1101-1102	Communication tg 0,11C à D CIN 1100/CEX 1300	Bois	50E6	Béton	60E1
	1103-1104	Communication tg 0,085 à G CEX 5000/non cintrée	Bois	50E6	Béton	60E1
	1105	Branchement tg 0,11L à D CIN 500	Bois	60E1	Bois	60E1
	1107	Branchement tg 0,11L à G CIN 500	Bois	60E1	Bois	60E1
	1106-1108	Branchement 3 voies tg 0,11-0,222 GG	Bois	50E6	Bois	50E6
	1109-1111	Branchement 3 voies tg 0,11-0,11DG	Bois	50E6	Bois	50E6
	1110	Branchement tg 0,11L à D CIN 525	Bois	60E1	Béton	60E1
1112	Branchement tg 0,11 à G CEX 570	Bois	60E1	Béton	60E1	

Annexe 6

Programme de formation RATP

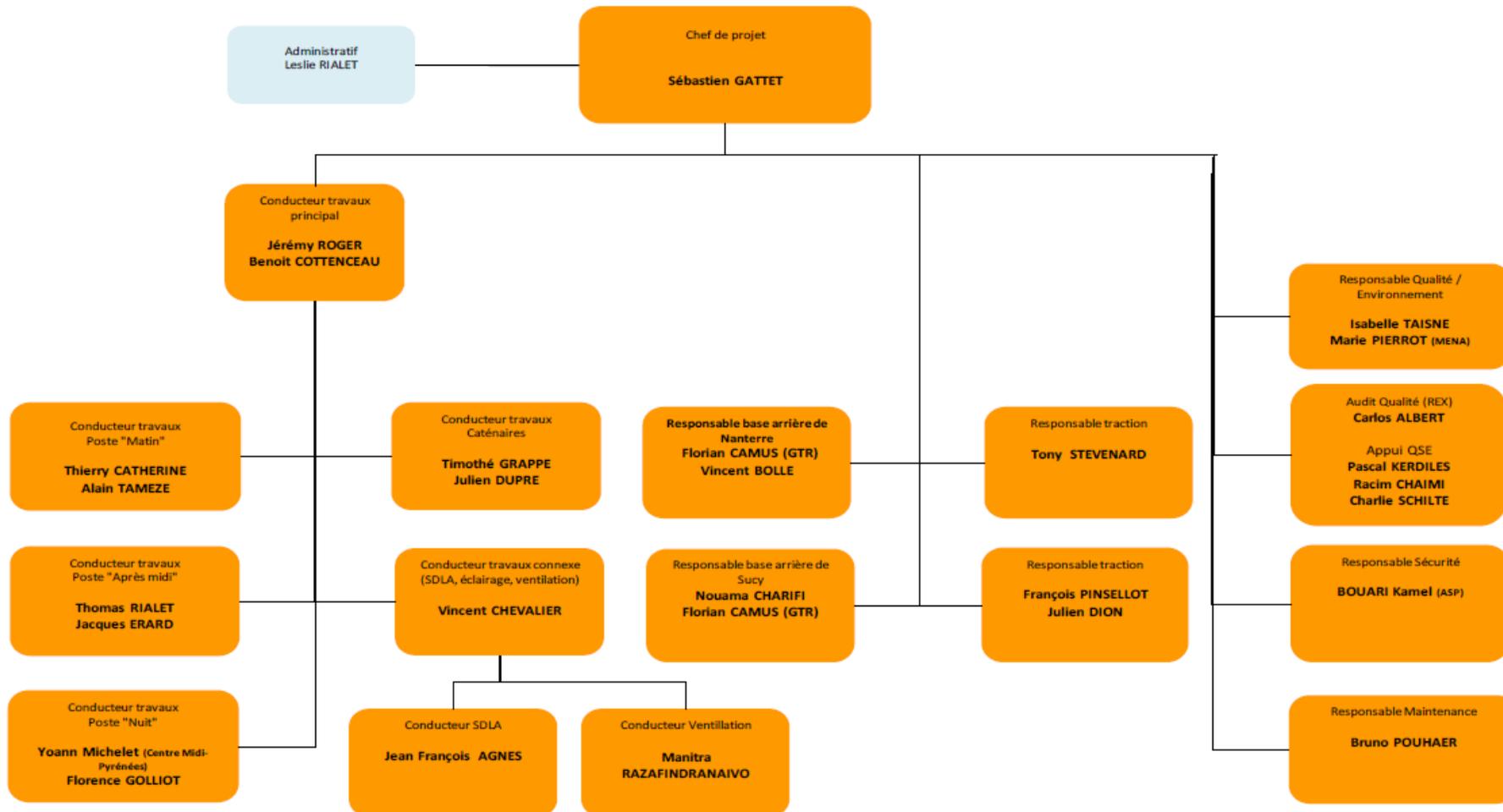
MOE LOT VOIE



S24	Lieu	9h00 - 12h00		Lieu	13h30h - 16h30		00h00-5h00	
		Thème	Agents concernés		Thème	Agents concernés	Thème	Agents concernés
lundi 8 juin 2015	Val de Fontenay Immeuble Belledonne Salle polyvalente Périastre (buffet à midi)	Formation générale: Présentation du projet Enjeux du projet Rôle de la MOE	Lempereur, Cossin, Paufigue, Vincent, Martinez, Bellone, Beguïn, Tourbin, Matias, Benkemoun, Gounna F, Nahi, Bustraen, Ferreira, Herlin, Paindorge, Reginard	Val de Fontenay Immeuble Belledonne Salle polyvalente Périastre	Présentation du RTES Carnet de bord Hygiène et sécurité	Lempereur, Cossin, Paufigue, Vincent, Martinez, Bellone, Beguïn, Tourbin, Matias, Benkemoun, Gounna F, Nahi, Bustraen, Ferreira, Herlin, Paindorge, Renfort, Reginard		
mardi 9 juin 2015	Val de Fontenay Immeuble Belledonne Salle C3096	Méthodologies travaux zone chantier	Lempereur, Cossin, Paufigue, Vincent, Matias, Benkemoun, Gounna F, Nahi, Paindorge, Reginard	Val de Fontenay Immeuble Belledonne Salle BE0038	Plan de contrôle Production documentaire	Lempereur, Cossin, Paufigue, Vincent, Matias, Benkemoun, Gounna F, Nahi, Paindorge, Reginard		
mercredi 10 juin 2015	PST RER A Sucy en Brie Salle de formation sur le PST	Gestion PST Sucy théorie et pratique	Lempereur, Cossin, Bellone, Matias, Benkemoun, Ferreira, Herlin	PST RER A Marteau Salle de formation sur le PST	Gestion PST Marteau théorie et pratique	Lempereur, Cossin, Martinez, Matias, Benkemoun, Bustraen, Nahi, Vincent		
jeudi 11 juin 2015	Val de Fontenay Immeuble Belledonne Salle PONT NEUF DOLOMITES	Transfert TTX théorie avant pratique en nuit	Paindorge, Reginard		Repos avant nuit		Visite zone chantier	Lempereur, Cossin, Paufigue, Vincent, Matias, Benkemoun, Gounna F, Nahi, Paindorge, Reginard
vendredi 12 juin 2015							Simulation Transferts TTX Fonctionnement des Parcs des Services Techniques Salle de formation sur le PST	Paindorge, Reginard

Annexe 7

Organigramme Colas Rail



Annexe 8

Listing des zones à équiper en tapis sous ballast

Voie	Pko	Pkf	Longueur (m)	Appareil de voie
1 + 2	28600	28900	600	
1 + 2	28050	28300	500	
1 + 2	27650	27910	520	
1	27580	27650	70	1112
2	27580	27650	70	1110
Z	27553	27609	56	1109-1111
1 + 2	27282	27580	596	
Z	27235	27329	94	1106-1108
1	27235	27282	47	1105
2	27235	27282	47	1107
1	26652	26939	287	1101-1102-1103-
2	26731	26939	208	1104
1 + 2	26785	26935	300	
1	22778	22910	132	
2	21938	22000	62	1011
1	21960	21993	33	1005
1 + 2	21338	21505	334	
1 + 2	20950	21038	176	1001-1002
1 + 2	20466	20535	138	905-906
1 + 2	20064	20132	136	903-904
1 + 2	18960	19120	320	
1 + 2	18430	18710	560	
1 + 2	17862	18000	276	
1 + 2	17783	17862	158	800-801
1 + 2	17350	17467	234	
1 + 2	17220	17350	260	
1 + 2	16100	16200	200	
1 + 2	15900	15970	140	
1 + 2	14600	14960	720	
1 + A	13319	13370	51	723
B	12567	12613	46	718
2	12585	12613	28	
2	12432	12585	153	717
A	12609	12654	45	716
1	12619	12654	35	
1	12570	12619	49	715
1	12370	12570	200	
1	12060	12175	115	712
2	11940	12055	115	710
2	11850	11865	15	
Total			8126	

Annexe 9

Calcul des volumes de ballast évacués entre le 16 400 et le 17 240 V1

PK COUPE	PLAQUE	Hauteur sous NIT	Surface ballast évacué	Volume ballast évacué
17240.800	505	0.38 m	1.823 m ²	9.116 m ³
17230.800	503	0.39 m	1.749 m ²	17.494 m ³
17220.800	501	0.38 m	1.687 m ²	16.872 m ³
17210.800	499	0.42 m	1.903 m ²	19.120 m ³
17200.700	497	0.41 m	1.862 m ²	18.712 m ³
17190.700	495	0.38 m	1.703 m ²	17.031 m ³
17180.700	493	0.38 m	1.808 m ²	18.082 m ³
17170.700	491	0.41 m	1.922 m ²	19.216 m ³
17160.700	489	0.39 m	1.719 m ²	17.185 m ³
17150.700	487	0.40 m	1.749 m ²	17.490 m ³
17140.700	485	0.40 m	1.694 m ²	16.935 m ³
17130.700	483	0.37 m	1.728 m ²	17.284 m ³
17120.700	481	0.38 m	1.721 m ²	17.206 m ³
17110.700	479	0.42 m	1.846 m ²	18.552 m ³
17100.600	477	0.38 m	1.755 m ²	17.633 m ³
17090.600	475	0.37 m	1.635 m ²	16.353 m ³
17080.600	473	0.40 m	1.709 m ²	17.087 m ³
17070.600	471	0.36 m	1.569 m ²	15.687 m ³
17060.600	469	0.37 m	1.620 m ²	16.204 m ³
17050.600	467	0.38 m	1.819 m ²	17.830 m ³
17041.000	465	0.36 m	1.678 m ²	16.108 m ³
17031.400	463	0.37 m	1.605 m ²	15.970 m ³
17021.100	461	0.37 m	1.635 m ²	16.762 m ³
17010.900	459	0.35 m	1.648 m ²	16.566 m ³
17001.000	457	0.35 m	1.574 m ²	15.656 m ³
16991.000	455	0.41 m	1.705 m ²	17.050 m ³
16981.000	453	0.35 m	1.603 m ²	16.025 m ³
16971.000	451	0.35 m	1.742 m ²	17.421 m ³
16961.000	449	0.38 m	1.721 m ²	17.214 m ³
16951.000	447	0.38 m	1.614 m ²	16.062 m ³
16941.100	445	0.39 m	1.658 m ²	16.497 m ³
16931.100	443	0.38 m	1.612 m ²	16.117 m ³
16921.100	441	0.39 m	1.682 m ²	16.647 m ³
16911.300	439	0.37 m	1.799 m ²	17.993 m ³
16901.100	437	0.39 m	1.722 m ²	17.302 m ³
16891.200	435	0.39 m	1.634 m ²	17.158 m ³
16880.100	433	0.41 m	1.761 m ²	17.782 m ³
16871.000	431	0.41 m	1.757 m ²	16.606 m ³
16861.200	429	0.38 m	1.729 m ²	17.201 m ³
16851.100	427	0.38 m	1.676 m ²	16.508 m ³
16841.500	425	0.39 m	1.787 m ²	17.874 m ³
16831.100	423	0.36 m	1.690 m ²	17.241 m ³
16821.100	421	0.39 m	1.811 m ²	17.207 m ³
16812.100	419	0.41 m	1.801 m ²	18.095 m ³

16801.000	417	0.39 m	1.848 m ²	19.491 m ³
16791.000	415	0.37 m	1.704 m ²	17.043 m ³
16781.000	413	0.36 m	1.558 m ²	14.954 m ³
16771.800	411	0.36 m	1.606 m ²	15.415 m ³
16761.800	409	0.39 m	1.554 m ²	15.537 m ³
16751.800	407	0.39 m	1.602 m ²	16.739 m ³
16740.900	405	0.36 m	1.626 m ²	16.256 m ³
16731.800	403	0.37 m	1.624 m ²	15.838 m ³
16721.400	401	0.38 m	1.641 m ²	16.327 m ³
16711.900	399	0.37 m	1.621 m ²	16.205 m ³
16701.400	397	0.37 m	1.592 m ²	16.313 m ³
16691.400	395	0.38 m	1.619 m ²	16.268 m ³
16681.300	393	0.41 m	1.796 m ²	17.964 m ³
16671.400	391	0.41 m	1.744 m ²	17.348 m ³
16661.400	389	0.39 m	1.620 m ²	15.959 m ³
16651.700	387	0.41 m	1.742 m ²	17.156 m ³
16641.700	385	0.44 m	1.860 m ²	18.969 m ³
16631.300	383	0.45 m	1.998 m ²	20.077 m ³
16621.600	381	0.43 m	1.928 m ²	18.794 m ³
16611.800	379	0.46 m	2.049 m ²	20.383 m ³
16601.700	377	0.42 m	1.953 m ²	19.628 m ³
16591.700	375	0.43 m	1.914 m ²	19.137 m ³
16581.700	373	0.45 m	1.897 m ²	19.541 m ³
16571.100	371	0.45 m	1.874 m ²	18.833 m ³
16561.600	369	0.44 m	1.910 m ²	18.622 m ³
16551.600	367	0.42 m	1.792 m ²	17.825 m ³
16541.700	365	0.44 m	1.889 m ²	18.888 m ³
16531.600	363	0.45 m	1.858 m ²	18.767 m ³
16521.500	361	0.46 m	1.888 m ²	18.976 m ³
16511.500	359	0.40 m	1.852 m ²	18.238 m ³
16501.800	357	0.43 m	1.742 m ²	17.244 m ³
16491.700	355	0.43 m	1.834 m ²	18.340 m ³
16481.800	353	0.39 m	1.666 m ²	16.576 m ³
16471.800	351	0.40 m	1.779 m ²	17.785 m ³
16461.800	349	0.38 m	1.737 m ²	18.061 m ³
16451.000	347	0.38 m	1.657 m ²	16.241 m ³
16442.200	345	0.41 m	1.687 m ²	16.281 m ³
16431.700	343	0.38 m	1.678 m ²	16.863 m ³
16422.100	341	0.39 m	1.675 m ²	16.754 m ³
16411.700	339	0.39 m	1.726 m ²	17.605 m ³
16401.700	337	0.43 m	1.778 m ²	8.889 m ³
Total				1458 m³

Annexe 10

Synthèse des sondages manuels complémentaires RVB 2016

Campagne de sondage pour RVB TC RER A - Eté 2016												
Zone RVB 2016	PK	Date	Sondage	Sondage supplémentaire	Valeurs théoriques			Valeurs réelles			Présence de drains	Observations
					A (entre tête TB et file ext) en mm	B (Milieu V2) en mm	C (entre tête TB et file int) en mm	A (file ext) en mm	B (Milieu V2) en mm	C (file int) en mm		
Zone 1	14+300	19/20 - 11	n°30		280	280	280		245	245	Oui - 320mm sous NIT (dôme 150mm)	
	14+500	19/20 - 11	n°29		280	280	280	280	250	310	Oui - 320mm sous NIT (dôme 150mm)	
		12 01 16		14+560	660	680	700	845	842 (V1)	870	Oui - 550mm sous NIT (dôme 200mm)	
	14+610	12 01 16	n°28	14+610	760	780	800	740 (V1)	845 (V1)	845	Oui - 450mm sous NIT (dôme 200mm)	40mm de plus
		12 01 16		14+660	760	780	800	750 (V1)	740 (V1)	841	Oui - 440mm sous NIT (dôme 200mm)	40mm de plus
		12 01 16		14+710	760	780	800	800	780	760	Oui - 480mm sous NIT (dôme 200mm)	
		12 01 16		14+760	530	560	620	800	780	780	Oui - 480mm sous NIT (dôme 200mm)	Plus de 100mm de plus : Non cohérent
	14+800	20/21 - 11	n°27		420	440	420	790	850	780	Oui - 470mm sous NIT (dôme 200mm)	Plus de 100mm de plus : Non cohérent
				14+850	400	440	420	600	540		Gallerie technique	Plus de 100mm de plus : Non cohérent
		15+100	20/21 - 11	n°26		400	440	420	380		390	Gallerie technique
	15+600	A faire	n°1		400	440	420				Gallerie technique	
	16+100	A faire	n°2		400	440	420				Gallerie technique	
	16+600	16/17 - 11	n°3		400	440	420	Coupon JIC	460		Gallerie technique	
RVB 2015	16+850	18/19 - 11	n°4					300	300		Gallerie technique	RVB été 2015
	17+100	18/19 - 11	n°5					320	320		Gallerie technique	RVB été 2015
Zone 2	17+350	16/17 - 11	n°6		400	440	420	400	440		Gallerie technique	
	17+550	06/07 - 12									Oui - 350mm	
	17+565	06/07 - 12									Oui (Limite du drain) - 370mm	
	17+600	17/18 - 11	n°7		310	330	350	290		310	Non - 700mm	
	17+850	25/26 - 11	n°8		450	570	640	500	650	720	Pas de drain	40mm à 80mm en plus
		25/26 - 11		17+900	450	570	640	450	590	650	Pas de drain	
		25/26 - 11		17+950	450	570	640	490	550	645	Pas de drain	
		25/26 - 11		18+000	450	570	640	450	550	630	Pas de drain	
		25/26 - 11		18+050	450	570	640	450	600	650	Pas de drain	
		25/26 - 11		18+100	450	570	640	450	580	630	Pas de drain	
		25/26 - 11		18+150	450	570	640	450	590	660	Pas de drain	20mm de plus
		26/27 - 11		18+200	520	750	860	600	750	850	Pas de drain	30mm de plus
		26/27 - 11		18+250	520	750	860	620	780	910	Pas de drain	50mm de plus
		26/27 - 11		18+300	520	750	860	570	750	890	Limite drain PK 18+293	
	18+350	26/27 - 11	n°10		520	750	860	550	750	850	Oui	
		26/27 - 11		18+400	520	750	860	510	730	900	Oui	20mm de plus
		27/28 - 11		18+450	520	750	860	520	750	900	Oui	20mm de plus
		27/28 - 11		18+500	450	640	660	570	780	970	Oui	Plus de 100mm de plus : Non cohérent
	27/28 - 11		18+550	450	640	660	530	750	850	Oui	Plus de 100mm de plus : Non cohérent	

Zone 3	18+600	27/28 - 11	n°11	18+610	450	640	660	480	740	790	Oui	Plus de 100mm de plus : Non cohérent
		27/28 - 11		18+650	480	775	800	650	670	740	Oui	Non cohérent
		27/28 - 11		18+700	480	775	800	600	770	790	Oui	Valeur A plus profonde
		27/28 - 11		18+750	480	775	800	610	780	820	Oui	Valeur A plus profonde
	18+800	06/07 - 12	n°12	18+800	480	775	800	480	750	810	Oui - 350mm (Sous NIT)	
		06/07 - 12		18+850	480	775	800	570	750	770	Oui - 330mm (sous NIT)	Valeur A plus profonde
		06/07 - 12		18+900	480	775	800	590	710	680	Oui	Valeur A plus profonde
		06/07 - 12		18+950	480	775	800	600	770	770	Oui - 280mm (Sous NIT)	Valeur A plus profonde
		06/07 - 12		19+000	480	775	800	600	750	800	Oui - 250mm sous NIT (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
	19+050	06/07 - 12	n°25	19+050	480	775	800	670	810	800	Oui - 250mm sous NIT (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
	19+100	06/07 - 12	n°13	19+100	480	775	800	650	810	760	Oui - 290mm sous NIT (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
		06/07 - 12		19+150	480	580	600	580	740	760	Oui - 290mm sous NIT (dôme 200mm)	Coupe de tunnel fausse?
		07 08 - 12		19+200	480	580	600	580	750	848	Oui - 340mm (Sous NIT) (dôme 200mm)	Coupe de tunnel fausse?
		07 08 - 12		19+250	480	580	600	580	730	880	Oui - 340mm (Sous NIT) (dôme 200mm)	Coupe de tunnel fausse?
		07 08 - 12		19+300	480	580	600	570	700	790	Oui - 360mm (Sous NIT) (dôme 100mm)	Coupe de tunnel fausse?
	19+350	07 08 - 12	n°14	19+350	480	775	800	610	750	880	Oui - 360mm (Sous NIT) (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
		07 08 - 12		19+400	480	775	800	670	700	860	Oui - 340mm (Sous NIT) (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
		07 08 - 12		19+450	480	775	800	630	700	720	Oui - 340mm (Sous NIT) (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
		07 08 - 12		19+500	480	775	800	580	780	700	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
	19+550	07 08 - 12	n°15	19+550	480	775	800	600	720	750	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
		08 09 - 12		19+600	480	775	800	670	760	810	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	Valeur A plus profonde
		08 09 - 12		19+650	620	775	800	590	750	710	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	
		08 09 - 12		19+700	620	775	800	600	800	820	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	
		08 09 - 12		19+750	620	775	800	580	700	770	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	
		08 09 - 12		19+800	620	775	800	630	790	790	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	
	19+850	08 09 - 12	n°16	19+850	620	775	800	610	750	800	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 100mm)	
		08 09 - 12		19+900	620	775	800	Concrétion	820	Concrétion	Oui - 330mm (sous NIT) (dôme 200mm)	
		09 10 - 12		19+950	650	690	700	660	810	730	Oui - 430mm (sous NIT) (dôme 200mm)	Drain de type différent?
		09 10 - 12		20+000	650	690	700	590	610	610	Oui - 430mm (sous NIT) (dôme 200mm)	Drain de type différent?
		26 27 - 01		20+050	650	690	700	550	720	680	Limite Drain 20+000	
20+100	26 27 - 01	n°17	20+100	650	690	700	620	740	Concrétion	Pas trouver de présence de drain		
	26 27 - 01		20+150	650	690	700	780	850	850	Oui - Limite PK 20+150		
Fin RVB : PK 20+146												
ADV 1005 (V1)		14 15 - 12		21+965	280	400	370	170	180	320	Voie unique	En moyenne 300mm sous NIT
		14 15 - 12		21+974	280	400	370	330	320	320	Voie unique	
		14 15 - 12		21+985	280	400	370	180	330	380	Voie unique	
		14 15 - 12		21+990	280	400	370	200	300	370	Voie unique	
		14 15 - 12		22+000	280	400	370	290	420	390	Voie unique	
ADV 1011 (V2)		14 15 - 12		21+970	370	405		260	360	360	Voie unique	+ de profondeur / à ADV 1005 : 440mm sous NIT
		14 15 - 12		21+980	370	405		320	510	480	Voie unique	
		14 15 - 12		21+990	370	405		410	570	460	Voie unique	
		14 15 - 12		21+995	370	405		450	360	450	Voie unique	
		14 15 - 12		22+010	370	405		510	600	480	Voie unique	

LISTE DES FIGURES

Figure 1. La voie ferrée et ses constituants	20
Figure 2. Représentation de la structure de la voie sur ballast	21
Figure 3. Structures des principaux types de voie [LIC 2009].....	22
Figure 4. Principe d'alimentation électrique d'un train	23
Figure 5. Principe de fonctionnement d'un circuit de voie [DEB 2007].....	24
Figure 6. Rail à double champignon et rail dissymétrique.....	24
Figure 7. Coupe d'un rail Vignoles.....	25
Figure 8. Évolution de la charge à l'essieu	27
Figure 9. Influence du traitement thermique sur la dureté Vickers (HV) [LIC 2009]	31
Figure 10. Préconisation de la nuance de rail (cf. tableau 2) en fonction du rayon de courbure et de la charge ou tonnage annuel	32
Figure 11. Effet de la vitesse de refroidissement sur l'acier, (a) acier perlitique, (b) acier bainitique [POI 2008]	33
Figure 12. Évolution de la vitesse commerciale des trains en France.....	34
Figure 13. Lien rail / traverse : pose rigide sans selle	37
Figure 14. Lien rail / traverse : pose rigide avec selle à 3 trous	37
Figure 15. Pose rigide avec attache indirecte	38
Figure 16. Pose élastique directe sans selle avec griffon RN.....	39
Figure 17. Pose élastique indirecte avec griffon Nabla et selle.....	40
Figure 18. Représentation d'un crapaud RN	41
Figure 19. Représentation d'un crapaud AP	41
Figure 20. Représentation d'un crapaud Nabla RNTC	42
Figure 21. Système de fixation d'une traverse Vagneux.....	42
Figure 22. Système de fixation d'une traverse RS.....	43
Figure 23. Système de fixation d'une traverse SL	43
Figure 24. Traverse monobloc U31 NAT	44
Figure 25. Système de fixation de la traverse U31 NAG ou NP.....	45
Figure 26. Représentation d'une traverse M450	46
Figure 27. Représentation d'une traverse M240	46
Figure 28. Système de fixation Fastclips (PI)	47
Figure 29. Système de fixation Vossloh (WG)	47
Figure 30. Représentation d'un joint mécanique entre deux rails.....	49
Figure 31. Procédé de soudure par aluminothermie.....	51
Figure 32. Machine de soudage mobile PLASSER APT 600S.....	53

Figure 33. Unité de soudage mobile sur camion rail-route Vossloh	53
Figure 34. Photo d'unité de stockage	54
Figure 35. Photo d'unité de déchargement.....	54
Figure 36. Rupture de rail sur soudure en période froide.....	55
Figure 37. Phénomène de flambement en période chaude	55
Figure 38. Représentation d'une poutre encastree en dilatation libre	56
Figure 39. Représentation schématique d'un appareil de dilatation.....	59
Figure 40. Représentation schématique d'un LRS.....	59
Figure 41. Diagramme possible de contraintes dans plusieurs barres avant soudage	60
Figure 42. Diagramme des efforts dans le LRS après une montée de T0 à T1 puis une diminution de T1 à T2.....	60
Figure 43. Profil de ballast plein	67
Figure 44. Profil de ballast renforcé.....	68
Figure 45. Branchement simple à déviation à droite.....	70
Figure 46. Branchement simple à déviation à gauche.....	70
Figure 47. Branchement symétrique	71
Figure 48. Traversée oblique.....	71
Figure 49. Communication composée de branchements simples.....	71
Figure 50. Différentes parties d'un branchement simple	72
Figure 51. Géométrie d'un branchement simple.....	72
Figure 52. Représentation schématique d'un branchement simple	73
Figure 53. Branchement cintré intérieur CIN.....	73
Figure 54. Branchement cintré extérieur CEX.....	74
Figure 55. Véhicule en mouvement soumis à son poids et à la force centrifuge	78
Figure 56. Courbure et accélération transversale d'une voie en « cercle tangent »	79
Figure 57. Raccord progressif de type clothoïde.....	80
Figure 58. Raccord par arc de clothoïde	81
Figure 59. Composante de l'accélération de la pesanteur en déclivité.....	81
Figure 60. Profils d'usure de rails en courbe, file haute et file basse.....	84
Figure 61. <i>Head check</i>	85
Figure 62. <i>Shelling</i>	85
Figure 63. Usure ondulatoire.....	85
Figure 64 Squat	85
Figure 65. Photo d'un train de meulage SPENO.....	86
Figure 66. Sollicitation et rupture d'un boulon à came	87
Figure 67. Photo d'une bourreuse mécanique lourde.....	90
Figure 68. Représentation des galets de relevage et des bourroirs.....	91

Figure 69. Schéma de principe de la stabilisation dynamique	92
Figure 70. Photo d'une dégarnisseuse à chaîne PLASSER&THEURER	94
Figure 71. Photo d'une chaîne à godet et excavation longitudinale.....	95
Figure 72. Photo d'excavation à l'aide d'une vis sans fin.....	96
Figure 73. Photo de bennes basculantes.....	96
Figure 74. Photo de lame vibrante	97
Figure 75. Photo de train aspirateur type VM 250 JUMBO	97
Figure 76. Photo de dégarnissage à la pelle mécanique sur wagons plats	98
Figure 77. Ligne de Bastille en 1860	102
Figure 78. Ligne de Saint-Germain en 1859	103
Figure 79. Robert BURON donne le 1 ^{er} coup de pioche du RER	106
Figure 80. Réseau express régional ligne est-ouest et lignes nord-sud [SDA 1965]	107
Figure 81. Implantation du groupe RATP dans le monde.....	112
Figure 82. Résultats du groupe RATP en 2014.....	114
Figure 83. Plan de ligne du RER A.....	117
Figure 84. Jalonnement du projet par les décisions du maître d'ouvrage	122
Figure 85. Coupe schématique d'ouvrage type tunnelier avec galerie centrale servant au drainage	126
Figure 86. Coupe schématique d'ouvrage traditionnel et assainissement par éléments trapézoïdaux préfabriqués	127
Figure 87. Coupe schématique d'ouvrage de type caisson foncé.....	128
Figure 88. Scénarios de réalisation des travaux	133
Figure 89. Attache à fil Vossloh SKL 14	136
Figure 90. Photo d'un patin réducteur d'attrition FIMOR	138
Figure 91. Transmission du bruit solidien en milieu urbain dense.....	140
Figure 92. Schéma d'implantation d'une communication	143
Figure 93. Position des soudures de talon d'aiguillage modèle 2002 et 1992	144
Figure 94. Coupe schématique de tunnel et calcul des sections de ballast.....	146
Figure 95. Principe de la sismique réflexion.....	147
Figure 96. Dispositif géoradar et distance des antennes aux files de rail.....	148
Figure 97. Expression de hauteur de ballast compacte et des données géoradar en pourcentage de la hauteur réelle issue du sondage manuel [MET 2014]	150
Figure 98. Programme des travaux du RVB 2015	153
Figure 99. Organigramme de l'encadrement de la MOE	156
Figure 100. Organigramme de la MOA	156
Figure 101. Organisation de la conduite de projet	157
Figure 102. Organigramme du groupe Colas Rail	158

Figure 103. Photo d'un locotracteur G1206.....	161
Figure 104. Photo d'un locotracteur V212.....	161
Figure 105. Photo d'un wagon type R90.....	162
Figure 106. Photo de ballastière type BEX.....	162
Figure 107. Extrait du planning chemin de fer du RVB 2015.....	166
Figure 108. Extrait du PV de conférence mensuelle de juin 2015.....	167
Figure 109. Planification des travaux préparatoires 2015.....	168
Figure 110. Photo d'une plaque topographique.....	169
Figure 111. Photo d'un ancrage du LRS au châssis de la voie.....	170
Figure 112. Photo de déchargement LRS.....	171
Figure 113. Photo d'un point de branchement sur le réseau d'arrosage.....	172
Figure 114. Photo d'un taquet dérailleur.....	174
Figure 115. Principe de pose d'un taquet dérailleur standard sur une voie STEDEF.....	175
Figure 116. Photo de tronçonnage de rail.....	178
Figure 117. Photo de dépose de panneaux de voie.....	179
Figure 118. Calcul de la section de ballast.....	180
Figure 119. Photo de dégarnissage à la pelle mécanique sur trains de travaux.....	181
Figure 120. Représentation des différentes références de tapis.....	184
Figure 121. Préconisation de pose du tapis de transition.....	185
Figure 122. Photo du thermocollage des bandes de jonction.....	185
Figure 123. Coupe schématique de pose de crapaudine au droit des barbacanes.....	186
Figure 124. Photo de sous-couche de ballast.....	188
Figure 125. Position des engins lors de la phase de mise en place de la sous-couche.....	188
Figure 126. Photo de pose de traverses au palonnier.....	189
Figure 127. Plan de travelage au droit d'un JIC.....	190
Figure 128. Principe d'arrosage des ballastières.....	192
Figure 129. Graphique de comparaison des cadences théoriques et réelles du RVB 2015.....	196
Figure 130. Coupe du radier et du ballast excavé au PK 16 820 V1.....	204
Figure 131. Gestion des mouvements de mobiles travaux.....	208
Figure 132. Planning macroscopique du chantier 2016.....	213

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres de différents profils de rails	26
Tableau 2. Caractéristiques chimiques et mécaniques des aciers des rails courants	30
Tableau 3. Valeur du terme b	63
Tableau 4. Spécification française du ballast d'après la norme EN 13450	69
Tableau 5. Comparaison du prix de pose de voie courante et d'appareil de voie au mètre linéaire de voie	70
Tableau 6. Vitesse de franchissement dans les voies déviées en fonction de la tangente	75
Tableau 7. État quantitatif des opérations de maintenance sur le RER A en 2014	93
Tableau 8. Type de wagon auto stockeur déchargeur (WAD)	98
Tableau 9. Synthèse des méthodologies de renouvellement	99
Tableau 10. Savoir-faire au sein du pôle OIT	115
Tableau 11. Répartition du trafic par secteur [SDL 2012]	117
Tableau 12. Détail du financement assuré par le STIF	124
Tableau 13. Financement assuré par la RATP	124
Tableau 14. Répartition des linéaires de rails en nuance R260 et R350 LHT (après exploitation de l'annexe 3)	125
Tableau 15. Répartition des différents types de pose du tronçon central du RER A	125
Tableau 16. Analyse comparative des différentes solutions de renouvellement	132
Tableau 17. Analyse comparée des deux modes d'exécution envisageables	134
Tableau 18. Épaisseur de ballast à mettre en œuvre en fonction du type de plancher	138
Tableau 19. Synthèse des volumes de ballast	147
Tableau 20. Comparaison des volumes issus des coupes et des relevés géoradar	149
Tableau 21. Principales fournitures du RVB 2015	160
Tableau 22. Capacité de traction pour un locotracteur modèle G1206	162
Tableau 23. Déclivités du RER A supérieures à 25 ‰	163
Tableau 24. Charges remorquables modifiées suite à la dérogation	163
Tableau 25. Dimension des traverses	181
Tableau 26. Calcul du volume de ballast au mètre linéaire de voie	205
Tableau 27. Comparaison du linéaire réalisable en fonction du volume utile	206
Tableau 28. Évaluation des linéaires traités en fonction du nombre d'équivalent R90 chargés	207
Tableau 29. Estimation des pertes de production	210

Modernisation des infrastructures ferroviaires en zone dense : renouvellement des voies ballast du tronçon central de la ligne A du RER, un défi logistique.

Mémoire d'Ingénieur du Cnam, Paris, 2016

RESUMÉ

Pionnière des cinq lignes de RER, la ligne A transporte quotidiennement plus d'un million de voyageurs chaque jour. Progressivement ouverte dans les années soixante-dix, l'infrastructure ferroviaire n'a depuis ce jour pas subi de renouvellement majeur. Pourtant le RER A a vu, depuis sa mise en service, son trafic augmenter tant en fréquence qu'en tonnage. L'arrivée de nouveaux matériels roulants à deux niveaux est venue accroître les sollicitations sur les infrastructures.

La RATP doit réussir le défi de moderniser la voie ferrée du tronçon central de la ligne A en la dotant des toutes dernières technologies d'équipements. Le but étant de lui redonner un cycle de vie d'au moins 40 ans, lui permettre d'absorber les augmentations de trafic à venir et garantir un niveau de sécurité et de confort optimal.

Ce projet complet d'ingénierie, qui mobilise tous les départements de la RATP, doit en 7 ans permettre le renouvellement de 24 kilomètres de voie et de 27 appareils de voie.

Les travaux, exclusivement en tunnel et dans un contexte urbain dense, doivent être réalisés sans impacts sur les transports en Île-de-France. Ainsi, les travaux sont planifiés exclusivement en été avec une interruption de trafic de quatre semaines et un renfort de l'offre de transport sur les itinéraires de substitution.

La première phase de travaux, qui s'est tenue en 2015, a été un succès. Les enseignements tirés à l'issue de cette première édition ainsi que les échanges avec d'autres opérateurs de transport permettront d'améliorer la réalisation des travaux lors des prochaines phases.

Mots clés : ingénierie, aménagement, transport urbain, RATP, Paris, voie ferrée, chantier souterrain, retour d'expérience, maîtrise d'œuvre, maintenance, déblai.

SUMMARY

With more than one million passengers every day, Line A is a pioneer among the five RER railway lines of the regional express network (RER) across Paris and the Ile-de-France region.

Open segment by segment to the public in the seventies and despite a steady increase of the traffic, both in frequency and tonnage, the railway infrastructure has not undergone any major changes for forty years. Moreover, the introduction of double decker trains nearly in the ninety's has intensified mechanical stresses on the rail tracks.

Upgrading the railway of the central section of RER Line A by providing the latest technologies is a major challenge for the Public Autonomous Operator of Parisian Transport, RATP. To reach a life cycle of at least 40 years is the main goal, in order to allow for the absorption of future traffic increase while ensuring an optimal level of railway safety and comfort. This engineering project which involves all departments of the RATP is designed to allow for the renewal of 24 kilometres of rail tracks and 27 switches within 7 years. Exclusively achieved in the tunnel section under Paris city, in dense urban context, works must be performed without interruption of the passengers transport in Ile-de-France. For this reason, the works are planned on summer during a 4 weeks cessation of the circulation with a substitute offer of transport by bus. The first cessation period in summer 2015 was successful and the operation will be repeated 3 times with improvements based on the feedback and sharing of experience with other railway operators.

Key words: Engineering, public transport, Paris Public Transport System (RATP), railway, construction site underground passage, feedback, project management, maintenance, excavation materials.