

LES MATERIAUX DE VOIE FERREE SUR LIGNE GRANDE VITESSE (LGV)

ROBERTO TEIXEIRA BOTELHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor António José FIDALGO DO COUTO

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À mes parents,

Tu ne connaîtras jamais la fin de l'histoire en faisant demi-tour à deux minutes de la victoire.

Oxmo Puccino

REMERCIEMENTS

Je remercie très chaleureusement Monsieur Antonio José FIDALGO DO COUTO, mon coordinateur de thèse, pour la confiance qu'il m'a accordé en me permettant de travailler sur un thème riche qu'est la présentation des matériaux d'une voie à grande vitesse.

J'ai apprécié sa patience tout au long de ce travail et j'ai été fasciné par la richesse de ses idées et par sa rigueur scientifique. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Mes plus sincères remerciements vont également à Monsieur Soufian ARMICH et Monsieur Florian REDON. Leur expérience, clarté d'esprit et leurs qualités humaines ont été un précieux recours pour mener à bien cette étude.

Je tiens à remercier vivement Victor LOURENÇO et Norberto LOURENÇO sans qui ce travail n'aurait certainement pas pris la forme actuelle. Les nombreuses et diverses discussions que nous avons eues ont été fort utiles. Grâce à eux, j'ai acquis une vision technique de la voie ferrée, m'éloignant de l'aspect théorique et m'ouvrant une autre dynamique.

Dans ce travail où le Féminin tient une si grande place dans la recherche de son émancipation, je n'aurai pas l'outrecuidance de ne pas citer une femme extraordinaire qui a touché ma vie, ma bien aimée Cristin Rodrigues, qui me soutient et m'encourage jours après jours.

Ma sincère sympathie va aussi à mes collègues et amis de la FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) pour l'ambiance chaleureuse et motivante qu'ils créent au sein de cette école. En particulier, ma gratitude va à Ricardo, João Diogo, Roberto avec qui j'ai eu des échanges très fructueux et partagé mon quotidien pendant près de trois ans.

Enfin, je voudrais adresser ma gratitude à mes parents pour leur soutien inconditionnel et leur patience pendant toutes ces années. J'exprime ma gratitude à tous les membres de ma famille et mes amis pour m'avoir supporté et encouragé.

RESUMO

A tese exposta versa, em toda a sua estrutura e composição, sobre o Mundo da Alta Velocidade. Este universo tão complexo e com tanto para descobrir foi aqui retratado através dos seus elementos mais importantes. Procura-se organizar a informação contemplada e analisada segundo uma construção que seja fiel ao princípio da linearidade, isto é, pretende-se expor os conteúdos de uma forma encadeada onde as matérias abordadas se perfilam de uma forma ordenada.

Teve-se sempre o cuidado de, cada vez que se introduzia um novo assunto, referir a sua base e contextualização para o leitor poder acompanhar rigorosamente a obra. Numa dissertação com este título, e subordinada à temática da alta velocidade, é imperativo apresentar a evolução das linhas ferroviárias a grande velocidade no mundo para dar um enquadramento geral a investigação.

As linhas ferroviárias de grande velocidade são infra-estruturas de importância fundamental na circulação das pessoas e bens, portanto será essencial garantir o maior nível de qualidade técnico e condições de segurança.

Sendo nessa óptica, a base da via, o elemento crucial nesse tema. O surgimento da implantação da alta velocidade em Portugal, levou a que este tema tenha uma importância no dia-a-dia. Nesse espírito, pretende-se com este trabalho trazer conhecimentos e respostas sobre este tema. No presente trabalho procurou-se dar a conhecer e entender da melhor forma a estrutura de uma via férrea para o transporte de alta velocidade.

A elaboração deste trabalho tem o intuito de explicar e resolver dificuldades de compreensão que podem surgir sobre o tema da Alta Velocidade.

A estratégia seguida no desenvolvimento deste trabalho compreende três fases distintas, uma divisão que segue a disposição das camadas da via da superior a inferior. Nesta lógica, primeiramente apresentam-se as características do carril; de seguida, efectuou-se uma descrição de um elemento importante, que é a travessa; finalmente, apresentou-se o universo do balastro com sua dupla identidade de via balastrada e via em placa.

É possível verificar no presente trabalho a sua utilidade no aprofundamento do conhecimento acerca das linhas ferroviárias de grande velocidade, indo de encontro ao principal objectivo proposto para este estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Alta velocidade, carril, travessa, balastro, via em placa.

RESUMÉ

Cette thèse analyse, dans toute sa structure et sa composition, le monde de la grande vitesse. Cet univers complexe et encore mystérieux fut par cette investigation étudié à travers ses éléments les plus importants. Tout au long de cette thèse, le but a été de contempler et d'approfondir une construction qui soit la plus fidèle au principe de linéarité, c'est-à-dire développer son contenu de manière logique et relié, où les matières abordées sont disposées de manière ordonnée.

Tout ce travail a été déroulé avec l'objectif de donner au lecteur un fil conducteur afin de suivre pas à pas l'évolution de la dissertation. Dans une thèse avec ce titre, l'obligation était de présenter l'évolution des lignes ferroviaires à grande vitesse à travers le monde pour donner un encadrement général au travail.

Les lignes ferroviaires à grande vitesse sont d'une importance fondamentale pour la circulation quotidienne de personnes et de marchandise, c'est pourquoi il est essentiel d'offrir un niveau de sécurité et d'exigences techniques élevées.

Sachant que dans cette optique, la base de la voie est un élément crucial dans ce domaine, tout élément repose sur elle. La décision d'implanter les lignes ferroviaires à grande vitesse au Portugal, donne une importance à ce thème qui devient dès lors un sujet de discussion quotidien. Malheureusement, ce pays ibérique ne possède ni expérience, ni connaissance pionnière dans ce domaine ferroviaire. Dans cet esprit, ce travail tente d'apporter des réponses à de multiples doutes qui peuvent surgir chez tous citoyens.

Dans ce travail, l'objectif a été de donner une vision globale et claire de la structure d'une voie ferroviaire pour un transport à grande vitesse, par l'intermédiaire des éléments qui la constitue. L'élaboration de cette dissertation vise à expliquer et résoudre certaines difficultés de compréhension qui peuvent surgir sur le thème de la LGV (Ligne à Grande Vitesse).

Dans cette investigation, la démarche d'approche du sujet s'est divisée en trois parties, une division suivie selon la logique de disposition de couche allant de l'élément supérieur vers l'inférieur. Donc selon cette logique, la thèse aborda, premièrement, les caractéristiques du rail; pour poursuivre avec la description d'un corps irréfutable pour la voie ferrée qu'est la traverse, pour enfin présenter l'univers du ballast avec sa double identité de voie ballastée ou de voie sur dalle.

Ce travail montre une vraie utilité, offrant un approfondissement des connaissances ferroviaires et tout particulièrement des lignes à grande vitesse, ceci conjuguant idéalement avec le principal objectif de cette étude.

MOTS-CLÉS : lignes grande vitesse, rail, traverse, ballast, voie sur dalle

ABSTRACT

This thesis analyses, in all its structure and its composition, the world of high-speed. This complex universe and still mysterious was through this investigation studied through its the most important elements.

Throughout this thesis, the goal has been to contemplate and to deepen a construction that is the most faithful to the principle of linearity; it is to say develop its content in a logical way and connected, where the subjects are arranged in an orderly manner.

All this work has been held with the aim to give the reader a thread to follow step by step the evolution of the dissertation.

In a thesis with this title, the obligation was to present the development of railway lines at high speed over the world to give a general framework to work. Rail lines to high-speed are of fundamental importance for the daily movement of persons and ware, therefore it is essential to offer a level of security and high technical requirements. Knowing that in this context, the basis of the track is a crucial element in this field, any element is based on it.

The decision to establish the railway lines at high speed in Portugal, gives an importance to this theme which becomes a subject of daily discussion. Unfortunately, this iberian country has neither experience, or knowledge pioneer in this field rail. In this spirit, this work tries to provide answers to many doubts which can arise in all citizens.

In this work, the aim was to give a global and clear vision on the structure of a railway for high speed transport, by the intermediary of the elements which constitutes.

Drawing of this essay is intended to explain and resolve certain difficulties of understanding which may arise on the theme of the TGV (high-speed Line).

In this investigation, the approach of the topic is divided into three parts, a division followed according to the logic of provision of layer ranging from higher element to lower. Therefore this logic, the thesis speaks, firstly, the characteristics of the rail; to continue with the description of an irrefutable element for the track that is the sleeper, and finally presents the universe of the ballast with its double identity of ballasted track or on slab track.

This work shows a real usefulness, offering a deepening of knowledge rail and particularly the high-speed lines, this combining ideally with the main objective of this study.

KEYWORDS: high speed railway, rail, sleeper, ballast, slab track

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	i
RESUMO	iii
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
1 INTRODUCTION	1
1.1 MOTIVATION ET ENCADREMENT DE LA DISSERTATION	1
1.2 APPLICATION DE LA THESE	2
1.3 OBJECTIF DE L'ETUDE ET METHODE D'INVESTIGATION	2
1.4 STRUCTURE DE LA THESE	2
2 LE RAIL	5
2.1 INTRODUCTION.....	5
2.1.1 DESCRIPTION	5
2.1.2 HISTOIRE.....	6
2.1.3 FONCTIONS	7
2.1.4 CARACTÉRISTIQUES.....	7
2.2 LE RAIL D'UNE LIGNE LGV	8
2.2.1 GÉNÉRALITÉS ET NORMES EUROPÉENNES.	8
2.2.2 MONTAGE DU RAIL	9
2.2.3 DÉFAUT ET USURE DU RAIL	12
2.2.4 LA MAINTENANCE DU RAIL	14
2.3 CONCLUSION	15
3 LA TRAVERSE	17
3.1 INTRODUCTION.....	17
3.1.1 HISTORIQUE.....	17
3.1.2 FONCTIONS	18
3.1.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE TRAVERSE.....	18
3.2 LA TRAVERSE SUR LIGNE GRANDE VITESSE	19

3.2.1 INTRODUCTION	19
3.2.2 LES TRAVERSES BIBLOCS.....	20
3.2.3 LES TRAVERSES MONOBLOCS	22
3.2.4 LES INNOVATIONS DE TRAVERSES.....	24
3.2.5 LES TYPES DE TRAVERSES UTILISÉS EN EUROPE.....	29
3.3 CONCLUSION	34
 4 AVEC OU SANS BALLAST	 35
4.1 INTRODUCTION.....	35
4.1.1 HISTORIQUE.....	35
4.1.2 FONCTIONS	36
4.2 LE BALLAST	36
4.2.1 DÉFINITION	36
4.2.2 RHÉOLOGIE DU BALLAST.....	38
4.2.3 MISE EN PLACE ET MAINTENANCE DU BALLAST.....	38
4.2.4 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS.....	41
4.3 LA VOIE SANS BALLAST.....	42
4.3.1 CARACTÉRISTIQUES ET FONCTIONS DES COMPOSANTS DE LA VOIE SUR DALLE	42
4.3.2 LES DIFFÉRENTS TYPES UTILISÉS.....	46
4.3.3 INCONVÉNIENTS	51
4.3.4 AVANTAGES	51
4.4 CONCLUSION : BALLAST VERSUS VOIE SUR DALLE.....	52
 5 CONCLUSION	 55
 BIBLIOGRAPHIE.....	 57
 ANNEXES	 61

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 profil Vignoles de rail (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)	5
Fig. 2 schéma du premier rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)	6
Fig 3 rail bull head (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)	7
Fig. 4 Pose de rails LRS (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)	10
Fig. 5 rupture du rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)	12
Fig. 6 fissures verticales de rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990).....	13
Fig. 7 schéma d'une usure ondulatoire sur rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990).....	13
Fig 8 traverse de la SNCF (Railway engineering, Profillidis, V.A. , 1995).....	21
Fig. 9 Traverse RS (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)	21
Fig. 10 la traverse B450 (SATEBA)	22
Fig. 11 traverse DW (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990).....	23
Fig. 12 traverse M450 (SATEBA)	24
Fig. 13 Exemple de voie constituée de traverses BBS sur la ligne Homburg-Bexbach (workshop track for high speed railways, 2006)	25
Fig 14 traverse monobloc UP 04 (workshop track for high speed railways, 2006)	26
Fig 15 “Frame sleeper” Böheimkirchen (workshop track for high speed railways, 2006)	27
Fig. 16 schéma général d’une attache avec l’exemple d’une attache Nabla (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)	30
Fig. 17 attache NABLA RNTC (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)	32
fig 18 attache Vossloh Skl 14 (Vossloh, 2010).....	33
Fig 19 attache Pandrol (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)	33
Fig. 20 attache Cil (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984).....	33
Fig. 21 voie avec ballast en Allemagne (workshop track for high speed railways, 2006).....	37
Fig. 22 exemple de propagation de ballast (workshop track for high speed railways, 2006)	38
Fig 23 cylindre de compression (Modern Railway Track, Esveld Coenrad,2001)	39
Fig. 24 le stabilisateur de voie (DTS) (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001).....	39
Fig. 25 la dégarnisseuse RM 80 (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)	40
Fig 26 AHM 800 R (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001).....	40
Fig. 27 exemple de réhabilitation de voie avec un géotextile (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)	41
Fig 28 RPM 2002 (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)	41

Fig. 29 Systèmes avec traverses placées dans un béton coulé in situ (workshop track for high speed railways, 2006).....	47
Fig. 30 Systèmes avec une disposition élastique des traverses sur une voie dallée en béton (workshop track for high speed railways, 2006).....	48
Fig. 31 Systèmes avec traverses soutenues directement par la dalle (workshop track for high speed railways, 2006).....	48
Fig. 32 Systèmes comprenant des éléments de dalle en béton préfabriqués (workshop track for high speed railways, 2006).....	49
Fig. 33 Systèmes avec un seul point d'appui, ancrée dans un béton coulé in situ (workshop track for high speed railways, 2006).....	50
Fig. 34 Systèmes avec rails noyés dans le béton sans traverse (workshop track for high speed railways, 2006).....	51

1

INTRODUCTION

1.1 MOTIVATION ET ENCADREMENT DE LA DISSERTATION

Tout d'abord ce thème m'a été proposé par M. Antonio José FIDALGO DO COUTO, un thème que j'ai trouvé de suite intéressant vu l'expansion des lignes à grande vitesse en Europe, et bien sûr un thème actuelle au Portugal avec la future construction des lignes Porto-Vigo et Lisbonne- Madrid. De plus, aujourd'hui, l'Europe présente un réseau de voies ferrées de lignes à grande vitesse important. Trop à l'étroit dans son pré carré français, le train rapide franchit les frontières gauloises, mais aussi technologiques comme en Espagne. Il dessine des axes qui pourraient devenir à terme des « dorsales », comme cet Amsterdam - Séville en grande vitesse quasi-ininterrompue, programmé pour 2008, avant un Londres - Naples, bel hommage aux inventeurs d'Italie que furent les Anglais du 18e siècle. D'ici 2020, près de 2 000 km de lignes nouvelles à très grande vitesse seront ouvertes en Europe.

Côté technique, le matériel roulant va être de plus en plus étranger, tel l'ICE3 (Inter-city express) allemand. Des pays comme l'Allemagne toute dévouée à l'automobile, sont entrain de basculer vers une culture ferroviaire. En 2010, le réseau espagnol de grande vitesse dépassera celui de la France. Les Pays-Bas et le Portugal, comme dit auparavant, rejoindront le club des pays à grande vitesse en 2008 et 2013.

Selon l'Union internationale des chemins de fer (UIC), d'autres régions du monde vont se convertir à la grande vitesse. En 2007 Taïwan, en 2008 la Turquie et la Chine, en 2010 la Russie, en 2020 l'Inde, en 2025 le Brésil entre Rio et Sao Paulo. La Chine ouvre sa première ligne pour les Jeux olympiques de 2008 entre Pékin et Tianjin, prélude à un équipement qui dépassera dans quelques années les 7500 kilomètres... soit plus que le total mondial actuel Entreront aussi le Maroc, l'Iran, l'Arabie saoudite, les Etats-Unis et, notamment, la Californie.

Ce thème « LES MATÉRIAUX DE VOIE FERRÉE SUR LIGNE GRANDE VITESSE (LGV) » s'inscrit dans cette dynamique.

De plus, l'intérêt existant pour les chemins de fer a joué un rôle important dans l'acceptation de cette investigation très captivante sur la grande vitesse.

L'étude des matériaux de voie ferrée permet d'apporter une vision globale et de débattre sur certaines questions économiques et techniques telles que Pourquoi utiliser une traverse monobloc au lieu d'une bibloc ? Les futures voies, seront-elles dallées ou ballastées ?

Cette dissertation tentera d'apporter des informations sur tous ces thèmes ambassadeurs d'un futur proche.

1.2 APPLICATION DE LA THESE

Cette dissertation prétend apporter une contribution au monde de la Ligne Grande Vitesse, c'est-à-dire donné à cette étude une ampleur telle que celle-ci puisse donner un intérêt accru à ce thème.

Il existe de multiples discussions sur le thème de la LGV (Ligne Grande Vitesse), cette thèse aspire à réunir des informations susceptibles d'apporter une collaboration sur ce thème.

Malgré que cette thèse ne soit pas une base pour un projet, elle permet d'analyser les différents aspects d'une ligne LGV.

De ce mode, cette investigation ne montre pas un approfondissement des thèmes mais elle recherche à aborder de multiples aspects de manière générale pour offrir à son lecteur une vision globale de la structure complexe qu'est la ligne ferroviaire à grande vitesse.

1.3 OBJECTIF DE L'ETUDE ET METHODE D'INVESTIGATION

Logiquement, l'objectif de cette thèse se concentre sur le monde de la grande vitesse, mais particulièrement sur certains aspects.

Comme dit auparavant, cette investigation a pour but d'être exhaustive, malgré tout certains concepts seront approfondis au détail par leur importance accrue pour le thème développé.

De ce mode, l'aspect principal de cette thèse est la constitution d'une ligne ferroviaire à grande vitesse avec une définition spécifique des matériaux suivants, le rail, la traverse et la voie soit ballastée, soit dallée.

Dans l'élaboration de cette investigation, il a été accompli une recherche et une consultation de multiples documents évoquant le thème de la grande vitesse. La recherche bibliographique a été effectuée dans diverses bibliothèques entre la France et le Portugal. Une prospection qui s'est développée par l'intermédiaire de livres techniques, de normes, de revues spécialisées sur la grande vitesse. Internet a aussi fait partie de la base de recherche avec la visualisation de débats et d'études élaborés par des spécialistes.

Enfin, au cours de l'investigation, les suggestions de mon coordinateur, mais aussi les conseils et la vision de techniciens de la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer) m'ont apporté des connaissances essentielles.

1.4 STRUCTURE DE LA THESE

La thèse respecte une organisation structurée au long des chapitres. Le contenu de cette investigation se divise en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre sera réalisée une brève exposition du thème de la thèse, en présentant ses objectifs principaux.

Le chapitre deux aborde le sujet du rail, à travers son histoire, ses fonctions, ses caractéristiques. Pour poursuivre avec son importance sur une ligne LGV (Ligne à Grande Vitesse), avec la présentation de normes utilisées pour une harmonisation du réseau ferroviaire européen, pour poursuivre avec ses spécificités de montage, les défauts et usure dans le temps et sa maintenance.

Le troisième chapitre accueille la traverse comme élément ciblé. Celui-ci expose son histoire, ses fonctions, pour ensuite l'intégrer au système à grande vitesse. Cette intégration met en avant les

traverses biblocs, les traverses monoblocs et les innovations correspondantes. Afin de montrer leur mise en place, un paragraphe présente les différents types d'attache.

Le chapitre quatre est dédié à la base de la voie ferrée, avec une comparaison de deux systèmes, la voie sur dalle et la voie ballastée. Pour réaliser cette comparaison, la présentation est rendu obligatoire. La voie ballastée est analysée par une succincte introduction avec son histoire et ses fonctions, pour postérieurement entrer dans le vif du sujet en dévoilant sa rhéologie, sa mise en place et sa maintenance, et l'exposition de ses avantages et ses inconvénients. D'autre part, la voie sur dalle est développée par ses caractéristiques et fonctions, ses différents types utilisés et la présentation des avantages et inconvénients. Suite au développement de ces deux possibilités pour l'assise d'une voie, une conclusion confronte la voie ballastée et la voie sur dalle. Pour terminer, le cinquième et dernier chapitre finalise la dissertation avec ses conclusions finales et une brève réflexion personnelle de l'auteur.

2

LE RAIL

Dans ce chapitre, l'étude du rail sera abordée sous divers angles. Sera défini le rail, à travers son histoire, ses fonctions, ses caractéristiques. D'autre part, il montrera le rail comme entité d'une ligne LGV (Ligne Grande Vitesse). Enfin, ce chapitre présentera les principes de mise en place et de maintenance d'un rail.

2.1 INTRODUCTION

Dans ce paragraphe, la définition d'un rail sera élaborée par une brève description, un passage historique et une présentation des fonctions et des caractéristiques.

2.1.1 DESCRIPTION

Les rails sont de longues barres d'acier profilées, qui mises bout à bout servent à former un chemin de fer. Les rails servent à la fois de guide et de support de roulement pour les trains. Le rail comporte un patin (partie inférieure), l'âme partie intermédiaire et le champignon (partie supérieure), (fig.1). Le poids du rail se divise de la manière suivante, 35 à 40 % du poids pour le champignon, pour l'âme de 22 à 27 % et pour le patin 38 % du poids.

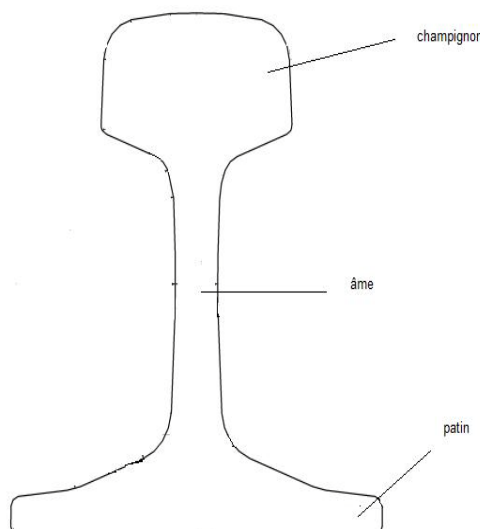


Fig. 1 profil Vignoles de rail (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)

2.1.2 HISTOIRE

Le chemin de fer, à ses débuts, comportait un type de rail (fig.2) qui s'appuyait sur un lit de pierre qui présentait une section variable.

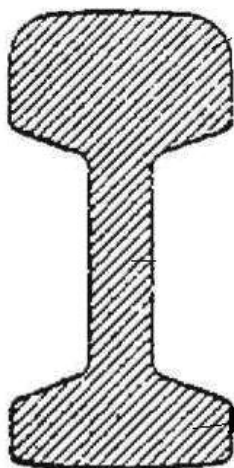


Fig. 2 schéma du premier rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)

La difficulté de fabrication a provoqué l'abandon de ce type de rail. Son profil a été l'objet d'amélioration continue depuis l'apparition des chemins de fer. Apparaît donc un rail avec une section en T qui paraît mieux s'adapter aux efforts soumis.

Des premiers profils de rails, les seuls survivants à ce jour sont ceux à double tête BULL HEAD (fig.3) et VIGNOLES. Le rail type qui a finalement prévalu, et est actuellement largement utilisé est celui de Vignoles, comportant une base (le patin), l'âme et la tête (le champignon).

La caractérisation du rail est faite par l'expression de son poids par mètre linéaire. Une caractérisation standardisée par l'UIC (Union International des Chemins de fer), les principaux types sont les suivants, UIC 50 (poids: 50 kg/m), UIC 54 (poids: 54.43 kg/m), UIC 60 (poids: 60.34 kg/m).

Le poids du rail se traduit par une augmentation. Augmentation due à l'augmentation de la charge par axe. Pour conserver un quotient inertie/masse raisonnable, il a donc aussi fallu augmenter la hauteur du rail.

Par exemple, il y a 160 ans, la fameuse locomotive Rocket de Stephenson pesait 4,3 tonnes/m avec un diamètre de roue de 1400 mm, aujourd'hui les trains de marchandises ont un poids qui varie entre 20 et 35 tonnes avec un diamètre de roue d'un mètre.

De plus, l'expérience sur 20 ans de la SNCF sur la ligne Paris-Marseille d'un rail de 62 kg au lieu de 49 kg a prouvé que l'augmentation du poids du rail impliquait une durée de vie supérieure de 10 ans.

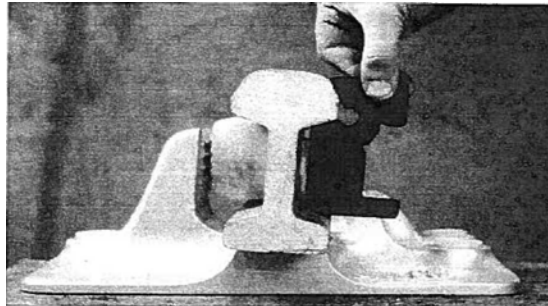


Fig 3 rail bull head (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)

2.1.3 FONCTIONS

Le rail constitue un élément fondamental de la structure de la voie ferrée et travaille comme semelle, dispositif de guidage et élément conducteur du courant électrique. Il doit donc répondre aux exigences suivantes :

- Résister directement aux tensions qu'il reçoit du véhicule et les transmettre aux autres éléments qui composent la structure de la voie. Ces efforts peuvent être verticaux, horizontaux et transversaux ;

Les efforts verticaux proviennent du poids du matériel avec une répartition hétérogène (charges statiques), le surpoids provoqué par la force centrifuge non-compensée (charges quasi-statique) et les surcharges dues à l'action de la masse (charge dynamique)

Pour les efforts transversaux, nous pouvons mentionner l'action de la force centrifuge par le mouvement de lacet ;

Les efforts longitudinaux sont prioritairement d'ordre thermique, nous pouvons de plus remarquer ces efforts à travers le mouvement de lacet, mais aussi par l'action d'accélération et de freinage brusque ;

- Réaliser le guidage des roues et ses mouvements ;
- Servir de conducteur du courant électrique, électricité utilisée pour la signalisation et pour la traction des véhicules sur lignes électrifiées.

2.1.4 CARACTERISTIQUES

La caractéristique, la plus importante d'une voie ferrée, est le contact entre la roue et le rail. Jusqu'à l'incorporation de traverse monobloc pour la structure d'une voie ferrée et l'apparition de voie sans ballast, le rail était l'élément le plus cher de la voie, aujourd'hui ce n'est qu'une partie du coût d'une voie ferrée.

La roue et le rail sont deux éléments qui ont été développés dans la première partie du XIX^{ème} siècle, et qui continuent unis pour constituer la base du moyen de transport terrestre le plus rentable socialement. Le développement à grande échelle de ces éléments ferroviaires se caractérise par l'augmentation des charges par axe qui sont passées de 3 tonnes à plus de 30 tonnes, et d'une vitesse commerciale qui dépasse les 200 km/h.

Au cours du temps, les méthodes de fabrication de l'acier puddlé ont évolué, passant par les systèmes Bessemer, Thomas et Martin, pour arriver à l'utilisation d'acier électrique et d'acier à oxygène.

Les éléments principaux qui constituent le rail sont rail : le carbone (0,5-0,7%), le manganèse (1,3-1,7%), la silice (moins de 0,5%), le phosphore (moins de 0,05%) et le soufre (moins de 0,05%), des proportions qui permettent une bonne réponse du rail aux efforts suscités.

2.2 LE RAIL D'UNE LIGNE LGV

Dans ce paragraphe, le rail sera analysé comme élément d'une ligne grande vitesse. Ceci par l'intermédiaire de 3 facettes incontournables, avec premièrement une observation de normes érigées en Europe, pour poursuivre avec le montage du rail, suit les défauts et enfin la maintenance de ce matériel ferroviaire.

2.2.1 GENERALITES ET NORMES EUROPEENNES.

2.2.1.1 INTRODUCTION

Dans le but d'homogénéiser le système ferroviaire européen, de multiples directives de la Commission Européenne sont publiées. Ces dernières permettent d'établir des normes communes à tous états de l'Union Européenne. Elles créent une base similaire qui pourra par la suite être interprété par chaque pays membres.

Pour le rail, on distingue 2 catégories de lignes grande vitesse :

- Les lignes spécialement construites pour la grande vitesse;
- Les lignes spécialement aménagées pour la grande vitesse et ligne de raccordement.

Selon ces deux variantes, trois thèmes sont pris en compte, l'inclinaison du rail, le profil du champignon du rail et le poids du rail.

2.2.1.2 L'INCLINAISON DU RAIL

L'inclinaison du rail représente l'angle entre l'axe de symétrie du profil neuf du rail fixé sur son support et la perpendiculaire au plan de roulement.

Pour les lignes spécialement construites pour la grande vitesse. Pour une vitesse inférieure ou égale à 280 km/h, l'angle d'inclinaison du rail peut être compris entre 1/20 et 1/40, avec une tolérance de réalisation à la mise en service de 0,010. Pour une vitesse supérieure à 280 km/h, les rails doivent être normalement posés avec une inclinaison de 1/20, qui permet de réaliser les valeurs de conicité attendues avec les profils de roues du « matériel roulant ». Pour les lignes à grande vitesse où la vitesse est inférieure ou égale à 250 km/h, la pose de rails peut se faire sans inclinaison.

Pour les lignes spécialement aménagées pour la grande vitesse et ligne de raccordement, pour les lignes où la vitesse sera égale à 280 km/h, les normes restent inchangées. La pose de rail sans inclinaison est permise à vitesse supérieure à 200 km/h.

Dans le tableau 1 sera présenté les caractéristiques de l'inclinaison selon la vitesse appliquée.

Tableau 1 récapitulatif des inclinaisons

	vitesse		
	200<v<250 km/h	<280 km/h	>280 km/h
inclinaison	sans inclinaison	2,5% - 5%	5%

2.2.1.3 PROFIL DU CHAMPIGNON

Dans ce cas, la différence ligne grande vitesse et ligne aménagé pour la grande vitesse ne sont pas prise en compte.

Le profil du champignon du rail (tête du rail) doit comporter une pente latérale de flanc du champignon comprise entre 1/20 et 1/17,2 par référence à l'axe vertical du champignon, suivie vers la face supérieur par une succession de courbes de rayons de 12,7 ou 13 mm, puis de 80 et 300 mm jusqu'à l'axe vertical du champignon du rail.

2.2.1.4 POIDS DU RAIL

Il s'agit d'une caractéristique essentielle des rails. Puisqu'elle reflète ses conditions résistantes; en effet si les rails étaient tous homothétiques, leurs modules de résistance serait proportionnelle au poids par mètre linéaire, élevés à un exposant de valeur 3/2. Pour les lignes LGV, la masse minimale du rail doit être supérieure à 53 kg/m. L'emploi du rail lourd est extrêmement efficace et on peut dire qu'une augmentation de 1 kg par mètre dans le poids du rail entraîne des économies qui, simplement en main-d'œuvre de conservation, peuvent être chiffré entre de 1,3 à 1,5%.

2.2.2 MONTAGE DU RAIL

Pour le montage du rail, deux systèmes existent l'éclissage et les longs rails soudés. L'éclissage est utilisé sur les voies normales et ne sera donc pas développé dans ce paragraphe. D'autres parts pour les LGV (Lignes à Grande Vitesse), le système utilisé est celui des longs rails soudés (LRS), celui-ci sera développé dans les sous parties qui suivent.

2.2.2.1 POSE DES LRS

A la pose (voir fig.4), on choisit une température de contrainte nulle (25°) située approximativement à égale distance entre les températures maximale et minimale (+ 60 et — 10°) ; cette température de 25° peut être obtenue en utilisant des groupes de réchauffage au propane lors de l'opération systématique de libération qui accompagne la pose de la voie. On peut également utiliser des dispositifs de traction par vérins hydrauliques.

Cette «libération des contraintes» est effectuée lorsque la voie est stabilisée, c'est-à-dire lorsque les résistances longitudinales et transversales de ballast ont atteint une valeur suffisante. A cet effet, une telle libération n'est effectuée que lorsque la stabilisation est acquise. Dans le cas des traverses en béton, cette stabilité est acquise après la circulation de 20 000 tonnes.

L'opération consiste à desserrer les attaches, mettre les rails sur rouleaux, éventuellement les chauffer à 25°C, puis remettre les rails en place et resserrer les attaches. Il est également possible d'utiliser des vérins hydrauliques : dans ce cas, on allonge les rails par traction d'une longueur égale à la dilatation libre qu'aurait le rail entre 25 °C et la température du moment relevé au rail.

Le profil de ballast est plus important que le profil en voie normale et en particulier les têtes de traverses sont chargées d'une hauteur d'une dizaine de centimètres ; les expériences de résistance

latérale de la voie ont, en effet, montré que la surcharge de ballast avait beaucoup plus d'effet qu'un élargissement du profil dans le plan horizontal.

Des règles précises d'entretien ont été édictées afin d'éviter que dans la période chaude, et en particulier lorsque la température du rail est supérieure à la température de libération des contraintes, on entreprenne des opérations qui risquent de déconsolider le ballast, en particulier les opérations de nivellement par bourrage ou par soufflage.

La surveillance du profil de ballast et de défauts de linéarité des rails jouent, en outre, nous l'avons vu, un rôle fondamental.



Fig. 4 Pose de rails LRS (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)

2.2.2.2 DILATATION DES LRS

Lorsque les conditions de tracé le permettent et lorsqu'il n'y a pas de points singuliers (appareils de voie, ouvrages d'art, zones instables) rien ne s'oppose à la pose de barres de longueur infinie puisque les efforts longitudinaux sont, en dehors de ces cas particuliers, indépendants de la longueur.

En fait, jusque vers 1966, la longueur maximale des LRS avait été, sur la S.N.C.F., limitée à 800 m. Les deux raisons principales en étaient :

- Le souci de procéder à une libération des contraintes dans un intervalle raisonnable (de l'ordre de 2 h 30) ;
- La nécessité de placer tous les 1500m à 1800m des joints isolants pour le fonctionnement du block automatique.

Mais les progrès techniques ont permis de mettre au point des méthodes de libération des LRS par tronçons et, d'autre part, on a réalisé soit des circuits de voie sans joints, soit des joints isolants collés, tirant profit des propriétés des résines époxydes et des boulons à haute résistance capables de résister aux efforts maximaux de compression et de traction auxquels sont soumises les barres.

Pour ce qui concerne les appareils de voie isolés, l'incorporation en LRS par soudure ou avec joints isolants ne pose actuellement plus de problèmes si- on respecte certaines règles (notamment incorporation à des températures proches mais inférieure à la température de libération des barres encadrantes). Toutefois, l'incorporation de groupes d'appareils de voie n'est pas systématique et doit faire l'objet d'études particulières relatives à la distribution des efforts longitudinaux.

Pour les ouvrages d'art dilatables (béton ou métalliques) des règles précises ont été établies. Ainsi, on interrompt les LRS sur les ponts dont la combinaison des mouvements dus à la dilatation et de ceux dus aux déformations sous surcharges risquent d'engendrer dans les barres des efforts longitudinaux trop importants. Par exemple, en alignement, les ponts en béton armé ou précontraint de longueur dilatable supérieure à 100 m ne sont pas équipés de LRS.

Sur les zones instables (argile, remblais non compactés, etc..) les LRS sont interrompus et remplacés par des rails posés à joints éclissés.

Pour les courbes, l'emploi de longs rails soudés posant un certain nombre de problèmes, il a paru prudent de ne pas les compliquer par la réduction de résistance apparente du frottement (F/R) de ballast dans les courbes et la pose sur traverses en bois a été limitée à un rayon $>$ à 800 m.

Des mesures de résistance latérale de différents types de voie sous charge ont montré que les traverses métalliques et les traverses en béton offraient aux efforts transversaux une résistance nettement plus élevée et plus constante que les traverses en bois et permettent de ramener la limite à des courbes de 500 m de rayon. L'introduction de coussinets en caoutchouc entre la boucle de l'attache élastique et l'épaulement d'appui sur les traverses en béton a permis d'éliminer le risque d'épaufrure de ces épaulements sous les efforts transversaux qui se développent dans la voie au passage des trains dans les courbes de faible rayon.

Ce perfectionnement, en apparence minime, est très important car il permet de conserver l'attache élastique jusqu'au rayon de 500 m et d'éviter le recours à l'abondance onéreuse d'anticheminants qui caractérise les barres longues américaines. Ces dernières comportent, pour chaque file de rails, des anticheminants à 192 traverses consécutives à chaque extrémité de la barre, à 150 traverses au milieu de la barre si elle dépasse 500 m et à une traverse sur quatre sur le reste de la longueur.

2.2.2.3 UTILISATION DES LRS

Actuellement, les poses neuves sont systématiquement faites dans la plupart des pays en L.R.S. En France, où il existe maintenant 22 000 km de voies équipées en L.R.S., les barres sont soudées par étincelage dans les ateliers en longueurs de 288 et 396 m, transportées l'emplacement de la pose, puis, après mise en voie, les tronçons de 288 ou 396 m sont raccordés entre eux par soudure aluminothermique ou par des soudeuses mobiles sur wagons.

Une fois la voie stabilisée (passage de 20000 t minimum), les barres sont libérées à une température voisine de 25°, obtenue naturellement, à l'aide de groupes de brûleurs au propane ou de vérins hydrauliques.

Les constatations faites sur les voies posées depuis vingt ans permettent d'estimer à 30 % environ l'ordre de grandeur des économies d'entretien procurées par ce type de pose. En effet, si l'on compare le comportement de deux voies, l'une soudée, l'autre non soudée, on constate, après achèvement de la période de stabilisation, que si la voie classique révèle en peu de temps des défauts de nivellement qui s'aggravent assez vite si l'on ne vient pas les corriger (particulièrement aux joints), les défauts de même nature de la voie soudée ont, par contre, une forme très allongée et n'évoluent que très lentement.

Cette différence de comportement est donc génératrice d'économies concernant :

- Les unes, l'entretien du nivellement ; celui-ci est moins fréquent dans la voie soudée que dans la voie non soudée, surtout à l'heure actuelle où le nivellement limité au joint a pris une forte extension dans les voies classiques ;

- Les autres, la conservation du matériel ; en dehors de la suppression totale des dépenses relatives au matériel des joints, l'utilisation de la voie soudée élimine également celles dues à la fatigue plus accentuée de la voie au voisinage du joint. Les renouvellements de voie sont, en définitive, plus espacés dans le temps. Le matériel roulant souffre également beaucoup moins.

2.2.3 DEF AUT ET USURE DU RAIL

2.2.3.1 INTRODUCTION

Les défauts des rails, qui entraînent son retrait prématuré de la voie, peuvent se diviser en deux grandes catégories, qui comprennent les fissures et les ruptures. Sa localisation est très variable, mais, en général, 60 % se situent dans les extrêmes des rails, tandis que les 40 % restants se produisent dans les sections intermédiaires.

D'autre part, le rail, comme élément actif de la structure ferroviaire, est soumis à diverses actions provenant du matériel roulant. Ceci provoque des dégâts pouvant donner lieu à sa désactivation par la présence d'une rupture. Dans ce paragraphe on se limitera à étudier, de manière générale, les types d'usure qui peuvent se produire dans les rails et les causes principales. Pour ensuite, développer la maintenance de la voie dans la partie suivante. En ce qui concerne les rails, le terme usure, comme on le sait peut se définir comme le changement de dimensions ou de nature à deux surfaces en contact, à cause de la pression réciproque ou du mouvement relatif entre deux matériaux. Actuellement, la question de l'usure des rails fait l'objet de recherche importante parmi la famille des chemins de fer.

2.2.3.2 RUPTURE DU RAIL

Les ruptures, qui représentent environ 35 - 45 % des défauts du rail, ont lieu dans les extrémités, les trous de brides, et dans les soudures; parfois la cause de la rupture est à l'auto trempe ou peau de serpent qui sont une espèce de taches qui apparaissent dans les zones de freinage et accélérations et qui sont dues à des changements de vitesse provoquant de forts frottements qui élèvent la température du rail, qui lors du refroidissement provoque le décollement de la lame supérieure du champignon, donnant lieu à des écailles. Une partie de ces ruptures est représenté par une fissure transversale du champignon, aussi appelée manche ovale, car la surface de la fracture du rail présente une tache ovale (fig.5) argentée très caractéristique.

Ce type de ruptures est très dangereux (très fragile), et souvent accompagner d'un inévitable déraillement des véhicules.

En général, lorsque la rupture d'un rail est due à une fissure transversale, tous les rails provenant de la même fabrication étaient retirés. Bien entendu cette procédure peut se révéler coûteuse et cela a permis la réalisation d'études et recherches pour pouvoir prévenir la rupture.

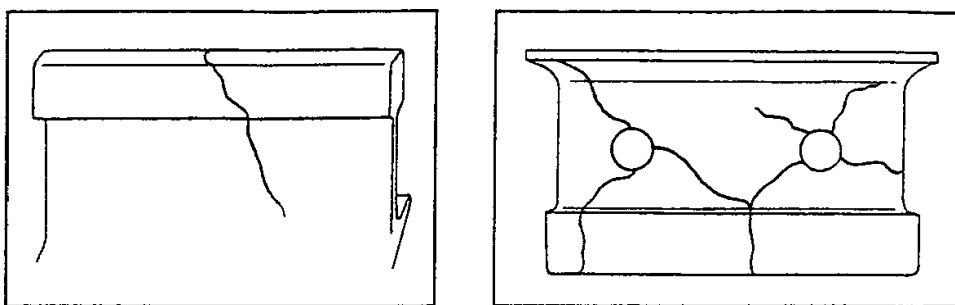


Fig. 5 rupture du rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean, Valdes, Antonio, 1990)

2.2.3.3 FISSURES DU RAIL

Les fissures (fig.6) représentent entre 55 et 65 % du total des défauts graves des rails. Sa localisation est variable, mais sont fréquentes des fissures horizontales et verticales du champignon et des fissures verticales de l'âme. Son risque est modéré parce qu'elles sont détectables, en partie, par observation directe, électronique ou ultrasonique.

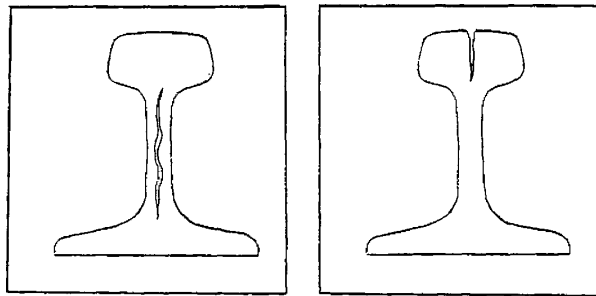


Fig. 6 fissures verticales de rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)

2.2.3.4 USURE NORMALE DU RAIL

L'usure normale du rail se produit, comme on l'a vu avant, par l'arrachement de la matière produit par le passage des charges, donnant lieu à une diminution de la section utile et résistante de la tête. Cette diminution est fonction de toutes les variables qui influent sur l'état pression de la surface de contact, mais il a été constaté que l'une des plus incidentes est le rayon de courbure de la voie ferrée.

2.2.3.5 USURE ONDULATOIRE

Il s'agit d'un défaut caractérisé, comme son nom l'indique, par la présence d'une série de déformations de longueur d'onde variable, au niveau du champignon du rail, détectable par la présence de creux brillant intercalé entre des creux de coloration normale (fig.7).

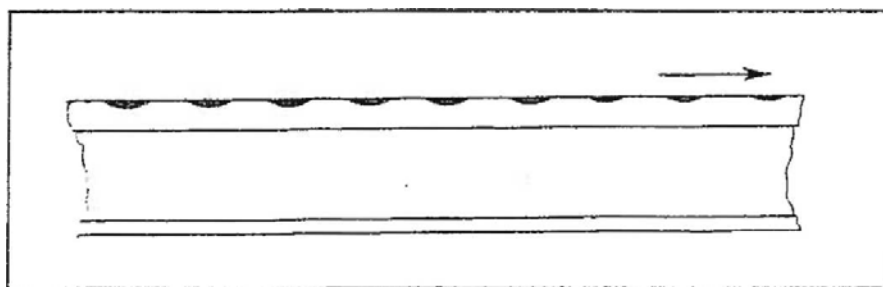


Fig. 7 schéma d'une usure ondulatoire sur rail (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)

Il existe deux types d'usure ondulatoire; la courte, avec des longueurs d'onde 45-60 mm et l'ampleur de 0,4 mm, et la longue avec des longueurs d'onde variable entre 500 et 2 000 mm et avec amplitudes l'ordre de 5 mm. Le premier d'entre eux, très fréquent dans les systèmes métropolitains. En ce qui concerne l'usure ondulatoire de grande longueur d'onde, son incidence sur la circulation est très

importante dans le cas de ligne grande vitesse, la voie devient très bruyante, et corrélativement, le matériel vibre sur les défauts du rail.

2.2.4 LA MAINTENANCE DU RAIL

2.2.4.1 MESURES PREVENTIVES

2.2.4.1.1 FICHES DE CONTROLE

Le risque du point de vue de la sécurité, que pose l'usure du rail, exige la prise de mesures de contrôle pour éviter, autant que possible, les dangers qui en découlent. Dans ce sens, il a été élaboré une fiche pour chaque défaut présenté dans un rail. Cette élaboration est de plus en plus précise. Se basant sur des catalogues standardisés par l'UIC, qui comportent jusqu'à 54 types différents de défaut.

Le traitement par ordinateur de ces fiches de rails endommagés permet, par comparaison avec les fiches correspondantes aux rails posés, et par une analyse statistique, de détecter, parfois, les causes possibles de défauts et de trouver des solutions appropriées.

Cette procédure a permis de révéler les effets nocifs produits par une plate-forme irrégulière qui présente des caractéristiques rigides et souples, répartis irrégulièrement. Ceci facilite le développement de tractions négatives, (traction sur le champignon du rail), qui favorisent la progression des fissures, par anneaux de croissance, pareil à des grumes de tronc d'arbres qui, finalement, peuvent déterminer l'apparition d'une rupture fragile, lorsque la fissure a atteint un développement critique.

2.2.4.1.2 Le contrôle des défauts

2.2.4.1.2.1 INTRODUCTION

Les défauts, (notamment internes), susceptibles de provoquer des ruptures fragiles, ont déterminé l'emploi, depuis un certain temps, de systèmes de contrôle non destructif des rails, tant au cours de son processus de fabrication, comme au cours de son service.

2.2.4.1.2.2 DEFANTS SUPERFICIELS

Il n'existe pas un appareil universel permettant de détecter tous les défauts. Les examens visuels directs, renforcés avec l'utilisation de liquides qui augmente la visibilité des défauts. L'insécurité de ce diagnostic a provoqué, dans les années 80, le développement d'un nouveau système, qui par des flux de Foucault permet de déceler, avec précision, les défauts superficiels et donc améliorer sensiblement les contrôles visuels.

La méthode consiste à faire défiler le rail face à des bobines inductrices, avec un entraxe constant, ce qui permet, à travers l'analyse différentielle des signaux transmis aux points de mesure, de détecter les anomalies superficielles qui ne sont pas toujours visibles à l'œil nu.

2.2.4.1.2.3 DEFANTS INTERNES

2.2.4.1.2.3.1 INTRODUCTION

Pour les défauts internes, les méthodes de percussion étaient utilisées dans le passé, aujourd'hui tous les systèmes sont électriques ou ultrasonores.

2.2.4.1.2.3.2 CONTROLE ELECTRIQUE

La plupart des appareils employés, à partir de 1950, reposent sur l'utilisation de 2 électrodes, qui vont glisser sur le rail, et auxquels s'applique un courant électrique de faible tension. Les variations par le champ magnétique créées autour du rail, agissant sur des bobines absorbeurs, reflètent la présence de défauts, dont l'ampleur peut être appréciée à travers les variations de tensions, mesurées par un microvoltmètre. Le contrôle est effectué enregistrant, sur une bande de papier, des variations de tension, et il existe un jeu de relais qui, lorsque les variations de tensions sont fortes, ceci provoquent la projection d'un signal de peinture dans la zone du rail touchée.

2.2.4.1.2.3.3 CONTROLE ULTRASONIQUE

À partir de 1960 a commencé à se généraliser sur tous les réseaux, le système ultrasonique pour la détection des défauts du rail. Tous les systèmes sont fondés sur la réversibilité de la piézoélectricité. On sait que appliquant un effort sur une lame de quartz ou de titanate de baryum, se produisent des forces électromotrices détectables. Ce type de contrôle est parfaitement approprié pour préparer les programmes de conservation et de rénovation de voie.

De plus, la rapidité du contrôle permet de répondre à une demande de plus en plus présente aujourd'hui, une maintenance de la voie rapide et sécurisée.

L'intérêt de ce contrôle est double:

- Eviter les ruptures en service;
- Donner une information rapide pour corriger les défauts.

2.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, le rail a été observé sous tous ses angles et a prouvé qu'il est un élément essentiel d'une ligne ferroviaire. Le rail présente de multiples spécificités qui s'appliquent aux lignes grandes vitesse, tous ceci normalisés par des directives européennes conçues suite à de multiples expériences en laboratoire et in situ.

Le rail, pour conserver sa stabilisation et son écartement, a besoin d'un élément clé, la traverse. Ce matériel de voie ferrée sera étudié dans le chapitre qui suit.

3

LA TRAVERSE

Dans ce chapitre, le sujet sur la traverse sera développé en deux grandes parties dissemblables. Tout d'abord, une présentation sera faite et ensuite sera observé la traverse sur une ligne grande vitesse avec ses différents types, ses innovations et les types d'attaches utilisés.

3.1 INTRODUCTION

Les traverses sont des éléments qui se situent perpendiculairement à l'axe des voies, sur lesquels sont posés les rails. Les traverses constituent, grâce à leur équilibre, la liaison entre le rail et le ballast, formant ainsi l'ossature de la voie.

La charge des roues agit directement sur les rails, transmettant une tension élevée. La traverse reçoit les tensions et les transmet au ballast. Finalement, la plateforme reçoit ces efforts atténués par le ballast. Nous allons, à présent, étudier la traverse sous ses différentes facettes.

3.1.1 HISTORIQUE

Le chemin de fer, à ses débuts, utilisait des blocs de pierres comme support de rails, mais rapidement, les chercheurs conclurent qu'ils devaient apporter une solution qui supporte les rails, mais qui, de plus maintient l'écart des rails avec exactitude. Tout ceci a donné naissance à la traverse, traverse en bois à cette époque.

Les traverses représentent un coût important, ceci est dû à son amortissement et à sa conservation. Dans ce sens, depuis le début de l'invention de la traverse, l'objectif était de trouver un matériel capable de résister aux effets du temps, du trafic et des intempéries.

Dans les premières années du chemin de fer, la traverse en bois avait une vie très courte, toutefois, le traitement du bois avec des produits spéciaux a permis d'augmenter sa durée de vie.

Malgré le succès de ces processus de traitement des traverses en bois, qui ont multiplié sa durée de vie par cinq, un certain nombre de pays ont débuté leurs tests pour l'emploi des traverses métalliques, lesquelles ont été freinées par la première guerre mondiale. Néanmoins, peu avant la deuxième guerre mondiale, les chemins de fer allemands avaient plus de 35 % de sa voie équipée de traverses métalliques, une grande partie a été employée comme ferraille, pour la production de matériel militaire au cours de la guerre. À l'heure actuelle, les traverses métalliques sont employées essentiellement dans les pays d'Afrique et en Asie, dont l'Inde est le plus grand consommateur.

L'expérimentation de traverses en béton armé a commencé il y a soixante ans. En Angleterre, France, Italie et ensuite en Allemagne, des recherches ont débuté en laboratoire et in situ, avec des traverses en

béton, soit simplement armées, soit précontraintes. Le développement des traverses en béton a apporté une vraie concurrence à celles en bois, principalement sur les lignes à grande vitesse.

Enfin, à l'heure actuelle et depuis environ huit ans, ont débuté des recherches qui pourraient donner vie à des traverses faites de plastiques ou de matériaux synthétiques, bien que les essais réalisés jusqu'ici, ceux sont limités uniquement à des domaines d'utilisation très réduits et spécifiques.

3.1.2 FONCTIONS

Dans cette optique, les traverses doivent répondre à un certain nombre de situations,

- Servir de support aux rails fixant et assurant sa position selon les côtes;
- Recevoir les charges verticales et horizontales transmis par le rail pour ensuite les répartir vers le ballast;
- Obtenir et maintenir une stabilité pour la voie tant sur le plan horizontal, que sur le plan vertical;
- Maintenir, le plus possible et sans aide extérieur (soutien d'éléments spécifiques), l'isolement électrique entre les fils de rail, lorsque la voie possède un circuit électrique pour la signalisation;
- La traverse joue un rôle d'isolant électrique.

Pour remplir ces fonctions, six facteurs peuvent être considérés pour définir la traverse: les trois premiers correspondent à sa dimension, le quatrième et cinquième son poids et l'élasticité de la voie, et le dernier, les caractéristiques d'isolants d'une traverse. À cet égard, nous pouvons indiquer que la longueur et largeur influent de manière fondamentale dans la stabilité de la voie, tandis que la largeur et l'angle constituent les agents les plus représentatifs d'une traverse en sa contribution à la stabilité latérale de la voie, en ce qui concerne le poids de la traverse, celui ci a une influence significative sur la stabilité longitudinal, voire la verticale de la voie. En ce qui concerne le cinquième facteur, la traverse doit contribuer à fournir à l'ensemble de la voie une capacité élastique pour absorber les actions dynamiques, ce qui réduit les frais d'entretien, et à cet égard, il convient de noter la rigidité qu'introduisent les lourdes traverses en béton. En ce qui concerne les traverses en bois, elles améliorent l'élasticité de la voie grâce à l'utilisation d'éléments plus souples. Il convient de noter, toutefois, que le rôle joué par la traverse a un caractère individuel, mais doit se placer dans le cadre de la collaboration avec d'autres éléments de la voie, notamment en ce qui concerne le maintien des caractéristiques géométriques, comme la largeur et l'alignement.

3.1.3 LES DIFFERENTS TYPES DE TRAVERSE

Deux aspects essentiels des traverses sont suffisants pour établir une classification des traverses. Ceux sont le matériel de construction et sa forme extérieure, bien que parfois le deuxième soit la conséquence du premier.

Les matériaux qui peuvent être employés dans la fabrication des traverses sont les suivants:

- Bois;
- Acier;
- Fonte;
- Béton armé;
- Béton précontraint;
- Matériaux synthétiques.

3.2 LA TRAVERSE SUR LIGNE GRANDE VITESSE

Sur les lignes grandes vitesses, les deux types de traverse utilisés sont les traverses béton monobloc et les traverses béton biblocs. Les traverses métalliques ne sont pas utilisables sur ce type de voie car le bruit créé est insupportable pour le voyageur. D'autre part, les traverses en bois ne sont pas employées car leur résistance, aux efforts dynamiques provoqués par un train à grande vitesse, n'est pas suffisante.

Dans cette optique, cette partie se déclinera sous 5 fronts, une introduction aux traverses béton, la présentation des traverses biblocs utilisés sur LGV, la définition des traverses monoblocs, une observation des innovations; et enfin les attaches employées.

3.2.1 INTRODUCTION

L'évolution des traverses en béton est due principalement à des considérations économiques, unies aux impératifs imposés par le changement des caractéristiques du trafic. L'évolution irrégulière du marché du bois a soulevé une grave crise d'approvisionnement, en particulier dans la période comprise entre les deux guerres mondiales. On peut citer, à cet égard, l'implantation de réductions de vitesse dans les lignes de la SNCF, pour ne pas pouvoir maintenir la sécurité du trafic par manque de traverses. Cette crise a été aggravée après la Seconde Guerre mondiale. Pendant la première guerre mondiale l'expérimentation sur traverses en béton simplement armé a eu un développement considérable, bien que cela ait conduit à une nouvelle baisse d'intérêt, en raison d'un comportement des traverses peu satisfaisant face aux efforts dynamiques.

Tout au long de la deuxième guerre mondiale, du fait des progrès accomplis dans la technique du béton précontraint et les difficultés d'obtention de traverses en bois, on enregistre une forte augmentation de l'intérêt pour les traverses en béton, qui se reflète dans le lancement de la part de pays tels que l'Angleterre, la France, l'Italie et l'Allemagne, de recherche, tant en laboratoire, qu'in situ, avec divers types de traverses en béton armé et pré contraint.

À la suite de ces recherches, on a déduit que les traverses en béton pourraient avoir une durée élevée en service, de l'ordre de deux à trois fois celle des traverses en bois. De plus, la traverse en béton conserve, tout au long de sa durée de vie, ses caractéristiques physiques.

Toutefois, ont également été remarqué: le coût plus élevé; les difficultés d'isolement de deux fils de rail et les difficultés de leur gestion à cause du poids élevé (deux à trois fois celui du bois). Par ailleurs, étant donné que la voie montée avec des traverses en béton présente une rigidité élevée, il doutait qu'elle puisse résister aux actions dynamiques due à la circulation de trains à grande vitesse, mais heureusement, ces craintes n'ont pas été confirmées dans la pratique.

L'évolution structurelle des traverses en béton armé dans la voie a eu lieu dans tous les cas de manière similaire; sont apparus rapidement des fissures sur la face supérieure de la partie centrale, produites par une flexion excessive de la pièce. Sous l'influence des charges alternatives, ces fissures augmentaient d'accord avec « l'intensité du trafic et des charges transmises, donnant lieu à l'entrée d'eau à l'intérieur de la traverse, ce qui produisait l'oxydation de l'armature, et donc l'augmentation du volume ».

Le jugement décrit des traverses en béton armé est imputée au fait que, sous les charges du trafic, le ballast situé sous les points de l'appui du rail sur la cheville, est compacté plus énergiquement que le ballast situé sous la caisse de la voie. Les traverses sont soumises à un fort moment négatif, qui agit sur leur section centrale.

Pour éviter ce problème a été conçu à l'époque de nombreux types structurels de traverses en béton armé à section variable, mais le problème se présentait de nouveau, dès que la partie centrale de la traverse s'appuyait sur un ballast.

L'apparition du béton précontraint a ouvert la possibilité de lutter contre la faible résistance à la fissuration des traverses en béton, ce qui a donné lieu à une nouvelle étape dans la conception de ces éléments, sur une nouvelle base technique.

Pour conclure, les progrès des techniques de fabrication de béton simplement armé ont permis l'apparition de traverses de ce matériel.

De toutes formes, il convient de souligner que, l'utilisation d'un certain type de traverse est une question non technique et économique, car il faut considérer non seulement le coût initial de la traverse et les dépenses de conservation qu'exige son exploitation; mais aussi les possibilités économiques du pays, quant à sa construction et la disponibilité des matières premières.

3.2.2 LES TRAVERSES BIBLOCS

3.2.2.1 INTRODUCTION

Elles représentent l'aboutissement du développement des traverses en béton armé, avec une forme adaptée au travail en service. En effet, pour transmettre les efforts du rail au ballast il n'est utile de disposer de matière que dans le volume compris entre la surface d'appui du rail sur la traverse et la surface d'appui de celle-ci sur le ballast. Il suffit donc de disposer, sous chaque file, d'un blochet protégé du contact direct du rail par une semelle en bois comprimé. Quant à la fonction écartement, qui ne met en jeu que des efforts de flexion, elle est assurée par un fer U en acier doux entretoisant les deux blochets.

Ces traverses ont eu, et ont encore, une très forte utilisation en France et en Espagne, entre autres pays d'Europe, ainsi qu'en Asie et en Amérique du Sud. Le succès se doit, sans doute, à la simplicité de leur forme, de la facilité de fabrication, en béton simplement armé et de l'excellente résistance latérale, qui est fournie à la voie.

D'autre part, elles souffrent, en général, d'une grande consommation d'acier, nécessaire à la poutre; une mauvaise capacité pour maintenir l'écartement, en raison de sa petite rigidité verticale et transversale; le danger de corrosion de poutre; son mauvais comportement face aux déraillements.

3.2.2.2 EXIGENCES SUR LIGNES GRANDES VITESSES

Les traverses biblocs exigent un ballast d'une épaisseur et d'une résistance supérieure à celle exigée pour les traverses en bois. Chaque fois que cette exigence a été remplie, les traverses bi bloc ont donné des résultats très satisfaisants. Un soin particulier doit être exercé lorsque la traverse biblocs repose sur un ballast de pauvre qualité. Dans ce cas, l'épaisseur du ballast devrait être encore accrue.

En outre, les lourdes charges (UIC 1, 2 groupes) et les vitesses supérieures à 200 km/h, implique l'utilisation d'un autre type de traverse bibloc (Fig. 8.).

Celle-ci présente les caractéristiques géométriques d'une traverse de chemins de fer français, connu comme U41. Cette traverse pèse 260 kg et est utilisée sur des lignes TGV, où des vitesses de 300 km/h sont atteintes.

En raison de la souplesse de la barre qui relie les deux blochets, les traverses bibloc exigent un entretien supplémentaire, afin d'assurer que les blocs ne réagissent différemment et modifie les caractéristiques du gabarit.

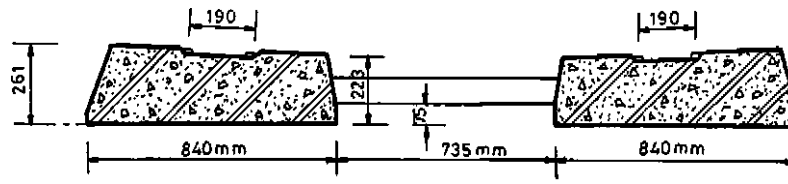


Fig 8 traverse de la SNCF (Railway engineering, Profillidis, V.A. , 1995)

3.2.2.3 LES TRAVERSES BIBLOCS UTILISEES SUR LIGNE GRANDE VITESSE

3.2.2.3.1 LA TRAVERSE RS

Son introduction a été simultanée à celle du rail continu soudé, et sa conception découle de la traverse Vagneux.

Toutefois le comportement en voie de la traverse RS (fig.9) adoptée en Espagne a été mauvais comparé à celui de la France, comme conséquence de l'adaptation de la conception française de largeur de voie internationale (1435 mm) à la largeur française (1668 mm), par l'allongement de la barre en acier, sans modifier les dimensions, ni les données du béton.

De plus, l'élasticité de la traverse espagnole est supérieure à celle de la française, ce qui s'est traduit par un maintien insatisfaisant de la largeur de voie.

Par ailleurs, en France ont été réalisés plusieurs améliorations dans le sens d'augmenter la taille des blocs et la rigidité de la barre d'acier.

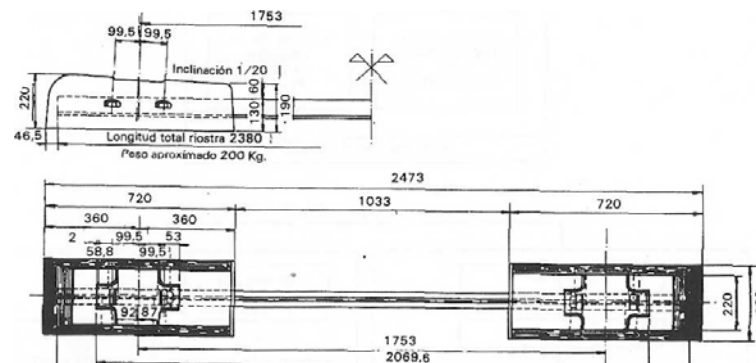


Fig. 9 Traverse RS (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)

3.2.2.3.2 LA TRAVERSE B450

En 2002 sur la ligne grande vitesse Poitiers-Limoges a été implanté la traverse B450 (fig. 10) homologuées suivant la NF EN13230 et la CT IG.EV 003 (provisoirement CPT d'octobre 2002) et marquées RFF.

Cette traverse vient remplacer l'ancienne traverse bibloc VAX U41, une innovation signée par l'entreprise SATEBA.

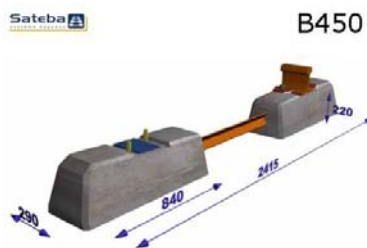


Fig. 10 la traverse B450 (SATEBA)

3.2.2.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Dus à son poids élevé, la traverse biblocs fournit une résistance transversale très satisfaisante, qui permet la circulation de trains à grande vitesse. Elle maintient l'écartement avec une tolérance satisfaisante et a une durée de vie de 50 ans.

Néanmoins, le comportement des traverses biblocs est moins satisfaisant lorsque le ballast n'a pas l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques appropriées. La répartition de la charge et de la flexibilité est moins satisfaisante avec une traverse biblocs qu'une traverse monobloc. En outre, ces traverses exigent des attaches élastiques et leur poids élevé ont pour conséquences une manutention difficile et coûteuse.

3.2.3 LES TRAVERSES MONOBLOCS

3.2.3.1 INTRODUCTION

Ce type de traverses imite, au début de son utilisation, la forme des traverses en bois. Elles étaient simplement parallélépipédiques, rapidement, il a été noté que cette forme n'était pas rationnelle, à cause des problèmes de fissuration des traverses, dues à l'appui sur le ballast de la partie centrale de la pièce. De plus, les premiers types de traverses-monoblocs qui se sont développés présentaient en outre l'inconvénient d'une masse très élevée de l'ordre de 300 à 350 kg.

Avant l'apparition et emploi détaillé de la technique du précontraint, certaines solutions ont été élaborées, afin de remédier au problème de la fissuration des traverses en béton monobloc.

La première tentative a consisté à agir, non pas sur la traverse, mais sur le ballast, créant un sillon longitudinal dans la partie centrale de la voie, qui éliminait la possibilité d'appui de la traverse dans cette zone. Cette procédure comportait un grave inconvénient, la disparition du sillon face aux actions du trafic. Une autre tentative, fondée sur la même idée que la précédente, mais agissant cette fois sur la traverse et non sur le lit du ballast, a consisté à réduire la largeur de la section dans la partie centrale de la traverse, de telle façon que la possibilité d'appui de la traverse dans cette zone s'éliminait. Ce système n'a eu qu'un succès éphémère. Une autre tentative pour éviter la fissuration des traverses dans son plan médian était représenté par un amincissement de la partie centrale de la traverse, au sens de réduire sa largeur, ce qui, en raison de la répartition des réactions d'appui du ballast sur la traverse, le moment de la section centrale diminue. Cet amaigrissement est atteint, soit par la réduction de la largeur de la partie centrale de la traverse sur toute la longueur, ou bien donnant à cette partie une section triangulaire, la pointe vers le bas. Cette procédure donne de bons résultats et aujourd'hui, il

existe plusieurs types de traverses, même en béton précontraint, qui utilise cette méthode, pour des raisons économiques.

Enfin, une autre procédure employée pour tenter de résoudre le problème qui consistait à donner à la surface d'appui de la traverse sur le ballast une forme idéale. Actuellement, les traverses monoblocs sont les plus répandues, et il a été constaté par expérience, que la forme la plus adaptée pour les traverses est une section trapézoïdale dans le centre, variant vers les extrêmes de façon progressive et continue, à l'intérieur de caractéristiques générales des différents types existants.

3.2.3.2 LES TRAVERSES MONOBLOCS UTILISEES SUR LIGNE GRANDE VITESSE

3.2.3.2.1 LA TRAVERSE DW (DYWIDAG)

La traverse monobloc Dywidag (fig.11) a été sélectionnée comme alternative à la RS après une série d'essais en laboratoire et une série de mesures en voie menées sur un tronçon d'essai installé sur la ligne Madrid-Barcelone, à proximité de Sigüenza.

La forme adoptée se différencie peu de la traverse utilisée en Allemagne, car la longueur est dans les deux cas quasiment la même, c'est-à-dire 260 cm.

Les modifications sont limitées à une modification de la position des attaches et à une légère augmentation du centre de gravité de l'armature pour mieux absorber des plus grands moments.

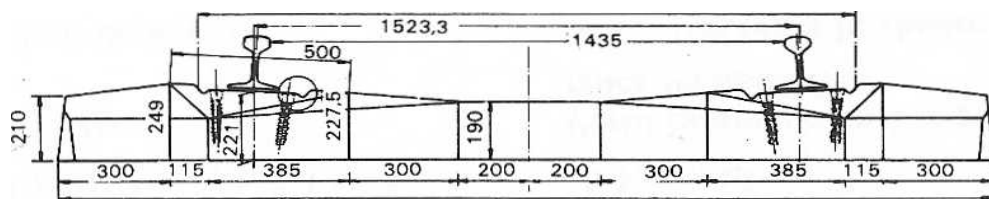


Fig. 11 traverse DW (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)

3.2.3.2.2 LA TRAVERSE SNCF-VW

Le béton précontraint a, dans une première étape, apporté il y a 25 ans une nouvelle solution séduisante. Il permet, en effet :

- D'obtenir une meilleure résistance aux efforts alternés puisque le béton y travaille toujours en compression;
- De diminuer la quantité d'acier mise en œuvre (7 kg au lieu de 21);
- De fabriquer des traverses plus légères que celles en béton armé ordinaire (environ 140 kg).

Les premières réalisations, intéressantes au point de vue technique, présentaient toutefois l'inconvénient d'être assez onéreuses, en particulier en raison du prix de l'acier spécial des fils de précontrainte.

En outre, la solution proposée pour l'attache était peu satisfaisante. Les spécialistes du béton armé se sont donc attachés à mettre au point une traverse plus économique, en même temps que les spécialistes de la voie reprenaient le problème de l'attache ; il en est résulté la traverse **S.N.C.F.-V.W.**

L'économie a été obtenue en utilisant des fils de gros diamètre, 5 à 7 mm² (R = 160 daN/mm²) dont la dureté finale est accrue par un écrouissage préalable. L'adhérence est obtenue par un ancrage fort simple consistant à croiser les fils deux à deux à chaque bout de traverse et à verrouiller ce croisement

par un fil coudé en U. Un enroulement en fil d'acier doux autour des armatures longitudinales constitue une défense efficace contre les fissurations.

3.2.3.2.3 LA TRAVERSE M450

Cette traverse est venue remplacer la BON U41. Sa première utilisation fut en 2002 sur la ligne Poitiers-Limoges. La traverse monobloc M450 (fig 12) a été créée par SATEBA, un groupe qui depuis des années travaillent en alliance avec la SNCF et la RFF.



Fig. 12 traverse M450 (SATEBA)

3.2.3.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les traverses monoblocs ont un comportement similaire à celui des traverses bibloc. Qu'ils maintiennent l'écartement de manière satisfaisante et ont une longue vie.

Toutefois, les traverses monoblocs distribuent mieux les charges que les traverses bibloc. Leur résistance transversale est inférieure à celle des traverses bibloc.

3.2.4 LES INNOVATIONS DE TRAVERSES

La traverse en béton est l'un des produits les plus matures dans le domaine ferroviaire. Bien sûr, des traverses en béton sont disponibles dans un grand nombre de variantes, selon le plan national des caractéristiques spécifiques et exigences relatives aux demandes individuelles. Depuis son développement, il y a seulement 50 ans, les traverses en béton remplaçaient celle en bois. En outre, l'optimisation de la formulation du béton et de procédés de production, ainsi que la normalisation de l'installation et son processus de renouvellement sur la ligne ferroviaire ont permis un développement des traverses.

3.2.4.1 UNE LARGE TRAVERSE EN BETON

En 1993, l'entreprise RAIL.ONE a commencé à développer sa traverse de béton précontraint B 70, pour fournir une nouvelle version avec un changement de sa largeur et de sa longueur, et avec les modifications correspondantes au poids.

Après 8 ans de développement et de recherche, la nouvelle traverse en béton large apparaît, avec sa désignation de BBS (fig.13). Elle obtient l'approbation générale du Bureau fédéral des chemins de fer allemand (EBA). Les avantages essentiels de cette traverse consistent en une réduction du compactage du ballast et une répartition plus uniforme de la pression sur le ballast, ainsi qu'une résistance accrue aux déplacements latéraux grâce à une plus grande surface portante.

En raison d'une stabilité accrue, cette traverse est effectivement adaptée pour le passage de plus grande charge par essieu à une température plus élevée.

La réduction des besoins en ballast permet une baisse du coût d'investissement.

Ces caractéristiques empêchent la pénétration de l'eau et de débris dans la voie.

Des études à long terme dans le cadre d'un projet pilote sur environ 12 km de voies ferrées en Allemagne ont révélé qu'après l'application d'une charge de 20 millions de tonnes, l'affaissement mesuré était égale à la moitié de celui connu pour une voie classique avec une traverse B70. Même après le passage de 150 millions de tonnes, la voie offre toujours un très haut niveau de conservation.



Fig. 13 Exemple de voie constituée de traverses BBS sur la ligne Homburg-Bexbach (workshop track for high speed railways, 2006)

3.2.4.2 TRAVERSE EN BETON PRECONTRAINT POUVANT SUPPORTER UNE CHARGE PAR ESSIEU DE 44 TONNES PAR METRE

La plus récente innovation de traverse précontrainte issue elle aussi de l'entreprise RAIL.ON a été développée avec succès et testée surtout pour le réseau ferroviaire nord-américain, dont les lignes doivent être conçues pour une charge statique pouvant aller jusqu'à 40 tonnes par mètre. Cette nouvelle traverse satisfait non seulement les exigences américaines (AREMA), mais aussi les dispositions de la norme européenne EN 13230.

À la suite de fortes charges, en particulier des trains de marchandises, l'expérience quotidienne dans les États-Unis a révélé des problèmes, avec la formation de fissures qui se produisent également avec les traverses en béton classiques, en particulier en leur milieu.

La différence des méthodes de conception et de dimensionnement entre les deux continents ont eu pour conséquences des exigences différentes pour les traverses.

Des tests approfondis effectués par l'université de Munich ont révélé que le nouveau type de traverse UP 04 (fig. 14) satisfait les dispositions stipulés dans les normes officielles :

- L'essai statique (pour la détermination de la fissuration et la résistance à la rupture);
- Les essais dynamiques (déterminer le comportement des fissurations lors du passage des trains);
- Les essais de fatigue (pour la détermination de comportement à long terme sur environ 30 ... 40 Ans).



Fig 14 traverse monobloc UP 04 (workshop track for high speed railways, 2006)

3.2.4.3 "FRAME" SLEEPER

3.2.4.3.1 DEFINITION ET MISE EN PLACE

La « frame sleeper » a pour objectif de remplacer la charge transmise par une structure traditionnelle de voie ballastée. Ce système comporte un support longitudinal formé de multiples cadres qui sont connectés et maintenu en place par le rail et les attaches qui sont situés à chaque extrémité de la « frame sleeper ».

Par conséquent, la charge de la roue est transmise de façon continue sur la base du ballast réduisant sensiblement la pression sous traverses.

Les « frame sleepers » reçoivent leurs inhérentes stabilités latérales principalement par la structure de la voie elle-même, avec les cadres agissant en tant que membres transmettant les efforts de cisaillement entre les deux rails.

La contribution de l'ancrage dans le ballast est relativement faible, pour ne pas dire négligeable. À l'inverse, ceci permet de diminuer la hauteur du ballast par rapport à une voie normale, une diminution de 12 à 15 cm.

Dans le but d'éviter le phénomène de déplacement du ballast, ce système est très positif.

Vu l'application pratique des lignes grande vitesse déjà existantes, il est important de développer une structure qui s'adapte à l'actuelle largeur des remblais. Pour ce système, aucun élargissement de la plateforme n'a été nécessaire pour l'installation de « frame sleeper ».

En 1999 une première section d'essai a été mise en place sur une ligne grande vitesse en Autriche. La figure 15 illustre bien ce qui a été dit. Sous la traverse, une couche de polymère de 12 mm d'épaisseur fournira une meilleure diffusion des chargements et un amortissement supplémentaire.

La procédure de réalisation de la voie est similaire aux pratiques actuelles, la seule différence existe dans le resserrement des attaches, qui s'effectue seulement après le dernier compactage. Un compactage supplémentaire perpendiculaire à la voie pour activer le surplus de zones de contact s'est avéré utile.

Le ballastage se fait avec les machines standard de façon normale. La stabilisation dynamique conclut la mise en place comme d'habitude.

Les enregistrements de voie confirment l'excellente durabilité de la géométrie de la voie, qui est confirmé aussi par d'autres essais autrichiens, suisses et italiens.

Selon une formule publiée par ORE [8], qui lit les efforts de maintien seraient réduit d'un facteur de 8, ou avec d'autres mots: sur une voie, où actuellement le compactage est nécessaire tous les 2 ans, frame-traverses augmenteraient le cycle d'intervention à 16 ans. Ou: dans une durée vie de 32 ans (si les rails le permettent) une seule intervention pourrait être nécessaire entre deux changements rails.

Des essais suisses, italiens et allemands confirment cette perspective.



Fig 15 “Frame sleeper” Böheimkirchen (workshop track for high speed railways, 2006)

3.2.4.3.2 ASPECT ÉCONOMIQUE

En outre de ces avantages techniques, les « frame sleepers » montrent selon certaines études un avantage économique.

Une étude autrichienne basée sur une ligne à grande vitesse avec un trafic de 150 trains par jour voyageant à une vitesse de 200 km/h, montre les résultats suivants (tableau 2).

Tableau 2 résultat d'une étude autrichienne (workshop track for high speed railways, 2006)

cost relations (150 trains/day, 200 km/h)	Conventional ballast track	Frame-Sleeper track
investment	100 %	120 %
critical investment	--	150 %
life	24 yr	36 yr
annual cost	100 %	76 %
investment	60 %	50 %
maintenance	23 %	13 %
operational hindrance	17 %	13 %
IRR (internal rate of return)	--	8 %

Cette étude autrichienne montre évidemment que le coût initial d'une voie avec des traverses « frame sleeper » est supérieur à celui d'une voie ordinaire dans l'ordre des 20 %, mais la diminution des coûts de maintenance permet à long terme un retour sur investissement de 8%. Monsieur KLAUS RIESSBERGER a démontré que les « frames sleeper » comportaient des avantages, tant technique qu'économique.

3.2.5 LES TYPES DE TRAVERSES UTILISES EN EUROPE

Dans le tableau suivant (tableau 3) sera présenté les différents types de traverses utilisées en Europe à travers leurs caractéristiques (largeur de voie, longueur de traverse, et les caractéristiques de l'acier principal).

Tableau 3 caractéristiques des principaux modèles de traverses en béton (La vía del ferrocarril, Alias, Jean,Valdes, Antonio, 1990)

TYPE DE TRAVERSE	PAYS	MODÈLE	LARGEUR DE VOIE (mm)	LONGUEUR DE TRAVERSE	CARACTERISTIQUES DE L'ACIER PRINCIPAL	
					QUANTITÉ	DIAMÈTRE (mm)
BIBLOC EN BÉTON ARMÉ	France	U41=B450	1435	840	10	8
	Espagne	RS	1435	720	10	8
	Belgique	RS	1435	720	10	8
MONOBLOC PRÉCONTRAIT	France	SNCF- VW	1435	2300	4	9
	Suède	53	1435	2500	60 CÂBLES	2
MONOBLOC POSTCONTRAIT	Allemagne	B70	1435	2600	4	9
	Espagne	DW	1435	2600	4	9
	Autriche	B70	1435	2600	4	9

3.2.6 TYPE D'ATTACHE

Le type d'attache utilisé ne montre pas de différences importantes entre les traverses monobloc et biblocs.

Pour cela, ce thème sera développé dans l'union des deux types de traverses.

Sera présenté, les types d'attaches élastiques et ses différentes particularités et une vague présentation d'autres types comme les attaches vissées.

3.2.6.1 INTRODUCTION

Autrefois, le tirefond ou le boulon était vissé dans un morceau de bois scellé dans la traverse ; ce dispositif est extrêmement mauvais car il cumule les inconvénients des traverses en bois et en béton.

Dans les traverses en béton modernes le rail est fixé à l'aide d'un boulon-tirefond vissé dans une gaine isolante ou non, elle-même scellée dans la traverse, ou à l'aide d'un boulon à tête marteau R.S.

Voies posées en courbe en diminuant les efforts exercés par le patin du rail sur la partie extérieure de la table de sabotage et sur les têtes de tirefonds.

Dans la voie posée avec selle, l'attache peut être directe ou indirecte. Dans l'attache directe, normalement utilisée en France, c'est le même dispositif (tirefond) qui sert à fixer à la fois la selle et le rail sur la traverse.

Au contraire dans la pose indirecte, dont le type principal est l'attache K des chemins de fer allemands très répandue dans toute l'Europe Centrale, la fixation de la selle sur la traverse est indépendante de la fixation du rail sur la selle. La selle est fixée sur la traverse soit avec des crampons, éventuellement élastiques, soit plus généralement avec des tirefonds sous la tête desquels on peut incorporer une rondelle élastique. Le rail est fixé sur la selle par l'intermédiaire de boulons dont la tête prend appui sur un épaulement de cette selle.

Le boulon est fixé avec des rondelles élastiques, mais on peut également le remplacer par des dispositifs élastiques (fig.16) comme nous le verrons un peu plus loin.

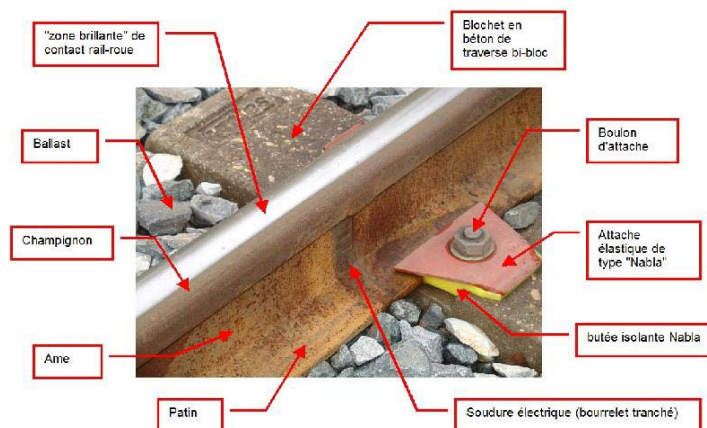


Fig. 16 schéma général d'une attache avec l'exemple d'une attache Nabla (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)

La fixation indirecte est nettement plus onéreuse que la fixation directe, mais si l'expérience montre une dégradation plus rapide des attaches directes ordinaires, elle n'a pas encore prouvé, dans le cas des attaches élastiques, si la fixation des tirefonds dans la traverse évoluait dans le temps en fonction du type de pose. C'est pourquoi la S.N.C.F. est restée fidèle au type de pose directe à cause de son faible prix de revient.

3.2.6.2 LES ATTACHES ELASTIQUES

Les constituants en sont tels que la progression de l'effort en fonction du déplacement vertical puisse être réglée et se maintienne à un taux convenable, ce qui est fondamental, nous le verrons, dans la théorie des rails soudés en grandes longueurs.

Pour absorber les efforts verticaux dirigés vers le bas, il était indiqué d'utiliser le caoutchouc ; mais le caoutchouc ne peut se comprimer dans une direction que si son expansion est libre dans l'une ou l'autre des directions perpendiculaires, sinon la dilatation contrariée se traduit par un échauffement néfaste à la conservation du caoutchouc et une reptation des semelles entre rail et traverse ; d'où l'idée développée par la S.N.C.F. de confectionner des semelles présentant des vides offrant des possibilités d'expansion latérale. Donc de disposer de semelles permettant une déformation de cette importance pour que les vibrations nées dans le rail s'arrêtent dans le caoutchouc et dissipent une énergie appréciable, d'où leur amortissement rapide.

La semelle retenue à l'origine, après de nombreux essais, avait une épaisseur de 4,5 mm et comportait des cannelures de 2 mm x 2 mm, espacées de 22 mm, alternativement sur la face supérieure et inférieure. Sur traverses en bois équipées de selles métalliques, pour la pose de rails UIC 60, la surface d'appui du rail est de 240 cm², les cannelures étant parallèles au rail ou en chevron.

Cette semelle est toujours utilisée dans la pose avec traverses bois.

Par contre, dans la pose avec traverses en béton, plus rigides, et pour limiter l'effet de surcharges dynamiques accrues par l'élévation des charges d'essieu et des vitesses, il est maintenant posé des semelles de 9 mm d'épaisseur dont les cannelures ont des dimensions de 4 mm x 4 mm. Sur traverses en béton, pour la pose de rails UIC 60, la surface d'appui du rail est de 270 cm².

D'autre part, pour les efforts dirigés vers le haut. Une attache rigide provoque un jeu lors de la compression, d'où résulte un choc violent, de bas en haut, sur l'attache, à la détente ; seule une attache élastique et puissante peut maintenir le rail, la semelle et la traverse étroitement liés par une précontrainte permanente. De plus, ses caractéristiques doivent être exactement adaptées à celles de la semelle, de façon à donner à cette dernière le maximum d'efficacité dans son rôle d'amortisseur.

La figure 17 représente la fixation doublement élastique par crapaud RN, utilisée par la S.N.C.F. jusqu'en 1977 sur traverses en béton. Le rail est maintenu entre la semelle en caoutchouc cannelée vers le bas, et deux crapauds en acier à ressort, vers le haut. Le rail possède de ce fait une certaine liberté à l'échelle de l'amplitude des vibrations à amortir, mais les déplacements correspondants se font sans jeu, sans chocs et sans que le rail ait la latitude de cheminer car la fréquence propre de la fixation est très supérieure à celle du rail (2500 Hz pour l'attache, 1000 Hz pour le rail).

3.2.6.2.1 LES NOUVELLES ATTACHES ELASTIQUES

Les attaches élastiques RN décrites ci avant ont été utilisées de façon systématique, sans modification notable, sur le réseau de la S.N.C.F. pendant 30 ans. Le succès de ces attaches à travers le monde a été considérable puisque 400 millions d'attaches de ce type ont été mises en voie et qu'on en trouve dans plus de 50 pays.

Mais depuis 30 ans le trafic s'est considérablement développé et des vitesses de 160 et même 200 km/h sont maintenant couramment pratiquées. Il a été nécessaire de rechercher un matériel de voie de plus grande longévité et nécessitent moins de maintenance.

Les nouvelles attaches «NABLA» (ainsi appelées en raison de leur forme sensiblement triangulaire, comme l'opérateur mathématique) sont les descendantes directes de l'attache RN. Elles font appel à des ressorts en acier plat et ce sont également des attaches vissées. Et peuvent donc être posées sur toutes les natures de traverses.

Les attaches «NABLA» existent en trois variantes :

- griffon NABLA RNTN (pose sans selle) et RNTS (pose avec selle), pour traverse en bois;
- crapaud NABLA RNTC pour traverses en béton (fig.17);
- crapaud NABLA RNTM pour traverses métalliques.

Dans les différentes réalisations la conception est la même. La forme de la lame élastique à double cambrure est trapézoïdale. L'effort de serrage est transmis sur le bord du patin du rail par les deux extrémités de la grande base parallèle au rail tandis que la petite base prend appui sur la traverse par une pièce intermédiaire. L'effort de serrage sur l'attache est appliqué vers le centre d'inertie du trapèze, disposition qui assure un rendement élevé de l'attache.

Le serrage est suffisant lorsque la flèche de la grande base est sensiblement annulée, mais un surserrage ne risque pas de déformer la lame. Le «serrage mesuré» n'est plus nécessaire. Il suffit d'utiliser une tirefonneuse à limiteur de couple.

Comme l'effort de serrage, particulièrement élevé, est appliqué sur le bord du patin, le déversement du rail sous l'action d'un effort transversal est limité.

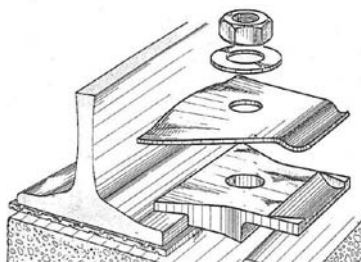


Fig. 17 attache NABLA RNTC (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)

3.2.6.2.2 AUTRES ATTACHES ELASTIQUES

Il existe de nombreux types d'attaches élastiques dans le monde. On peut les classer de la façon suivante, avec la présence de voies clouées, des attaches de type « Fit and Forget » et les attaches vissées.

3.2.6.2.3 VOIES CLOUEES

Il s'agit de crampons élastiques, dont les plus répandus sont « l'elastic spike » et l'attache Macbeth, ces deux types d'attaches pouvant être utilisés en pose directe ou indirecte. Le Rail-Anchor n'est en réalité pas une attache ; il remplace les anticheminants dans certaines voies américaines. Ces systèmes sont peu efficaces.

3.2.6.2.4 LES ATTACHES DU TYPE « FIT AND FORGET »

On appelle ainsi des attaches du type non vissé, qui parfois séduisent. Elles présentent cependant les inconvénients de ne permettre aucun contrôle, même visuel, du serrage, et d'avoir une grande dispersion des efforts de serrage réalisés sur le patin du rail car se cumulent les tolérances de fabrication du ressort et des inserts, ainsi que de mise en place des inserts dans la traverse. Par ailleurs, aucun rattrapage de jeu n'est possible. La plus connue est la Vossloh (fig.18), qui a été développée en Allemagne dans les années 60, répondant au nom de l'entreprise fabricant et a les initiales de l'ingénieur auteur du développement, Hermán Maier. Ce système est applicable tant à traverses en béton comme de bois, il existe deux versions différentes une directe, la skl applicable seulement à béton et l'autre indirecte avec plaque suivant en acier, dénommée skl 12 et applicable tant au béton comme au bois. L'élément essentiel de cette réserve est le clip élastique, dont la forme dans ce cas est de i grec. Le confinement latérale du rail est assurée dans le cas du modèle de réserve directe par une pièce dénommée plaque coudée de guide qui, en outre fournit l'appui et le positionnement du clip. La plaque coudée est fabriqué en polyamide renforcée de fibres de verre ou en acier, d'où le coût de la première version légèrement supérieure, mais fournissant un isolement électrique parfait, ce qui est nécessaire pour le fonctionnement des systèmes modernes de signalisation, de haute fréquence.



fig 18 attache Vossloh Skl 14 (Vossloh, 2010)

Il convient de citer, aussi, dans ce type :

- l'attache Pandrol anglaise, (fig.19)
- l'étrier DE hollandais,
- l'attache Fist suédoise

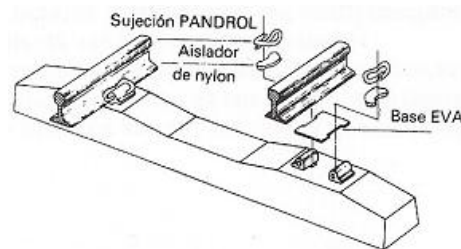


Fig 19 attache Pandrol (La vía del ferrocarril, Alias, Jean, Valdes, Antonio, 1990)

3.2.6.2.4.5 ATTACHES VISSEES

- attaches japonaises, très analogues aux attaches RN françaises,
- attache K allemande,
- attache CIL (fig.20) qui avait été essayée par la S.N.C.F. sur traverses en béton et qui fait appel comme l'attache NABLA à une pièce isolante en plastomère (crapaud nylon) qui assure la butée du patin et l'isolation électrique du rail,
- attache C allemande.

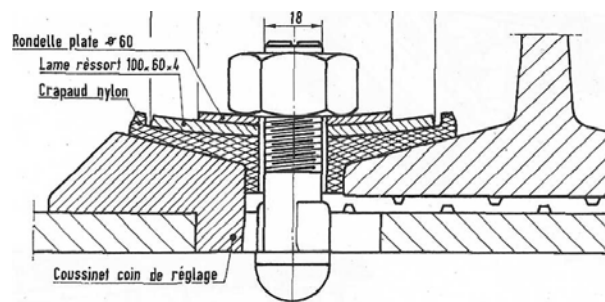


Fig. 20 attache Cil (La voie ferrée, Alias Jean, Gentil, P. , 1984)

3.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons analysé la traverse par ses fonctions, ses caractéristiques, et son emploi sur les lignes LGV. Ceci permis d'observer le rôle de ce substrat dans la structure complexe, qu'est la voie ferrée.

Les attaches ont étalé une grande de gamme de variantes possible, montrant que le développement, tant au niveau de la traverse, que de sa pose est présent, et permettra une évolution accrue des voie ferrée dans le futur.

Dorénavant, notre étude va porter sur une base fondamentale d'une ligne ferroviaire, sur laquelle tout repose, le ballast.

4

AVEC OU SANS BALLAST

Désormais, notre étude va porter sur la base de la voie ferrée. Dans ce sens, nous allons analyser, d'une part les voies avec ballast, d'autre part les voies sans ballast.

4.1 INTRODUCTION

4.1.1 HISTORIQUE

A ses débuts, la voie ferrée comportait des pierres sur lesquelles se posaient directement les rails, sans dispositif de transmission avec la plateforme. Plus tard, les pierres ont été remplacées par des éléments que nous connaissons aujourd'hui, les traverses.

Cependant, en général, les traverses pénétraient la plate-forme, du fait que les charges transmises par elles dépassaient la capacité portante de la plate-forme. Il a donc été introduit sous la traverse un élément granulaire, dénommé ballast, afin de répartir les charges sur une plus grande surface.

Bien que le ballast fasse partie rapidement de la structure de la voie, on ne peut pas dire que son histoire commence en même temps que celle du chemin de fer. En ce qui concerne, le ballast comme élément structurel, son développement n'a pas connu la même avancée que les autres composants de la voie.

En effet, à la lecture des traités classiques, on trouve aussi bien des lignes sur sa fonction, sa nature et sa granulométrie, qu'une brève référence empirique sur l'épaisseur nécessaire sous la face inférieure de la traverse, il n'est pas possible de trouver des références sur les lois tension déformation régissant leurs mouvements, aspect important lors du dimensionnement d'une voie.

Seulement dans certains communiqués, de divers auteurs aux congrès de chemins de fer et mécanique du sol, se trouvent des tentatives d'explication sur le fonctionnement complexe du ballast. Il convient de souligner les travaux, entre autres, de Hantzschel (1878), Schubert (1898), Bauchal (1900) et Byers (1909), ainsi que les plus récents comme ceux de Protzeller (1949), Schultze (1961) et Klugar (1963).

La cause d'une telle limitation de connaissances se trouve, peut-être, dans la difficulté intrinsèque d'un problème, dont l'énoncé est déjà complexe. Le nombre de variables est tellement important, de plus elles sont interdépendantes. Malgré quinze ans de recherche, in situ et en laboratoire, les chercheurs n'ont pu atteindre un niveau de solutions complet.

Nous pouvons donc conclure, qu'il n'existe pas de règles établies, ni de lois sur le comportement du ballast. Malgré tout, des normes sont élaborées afin d'harmoniser le système ferroviaire européen, la norme **EN 13450** décrit les caractéristiques géométriques et physiques du ballast, ainsi que les éléments négatifs et les évaluations de conformité à réaliser.

La question par M. FONTGALLAND (1969), a conduit à un échange de connaissances sur l'expérience disponible par les administrations ferroviaires plus avancées dans le domaine de la grande vitesse. Suite à cette «confrontation », et sur la base d'une plausible extrapolation, il a été établi d'un mode général que la limite de vitesse technico-économique du système roue-rail se trouve dans les 270km/h, ce qui permettrait une vitesse commerciale de 250 km/h, et, par conséquent, des trajets compétitifs de 500 km de long.

Comme on le sait, la construction de la ligne de Tokaido en 1964, avait révélé que la dégradation de la géométrie de la voie était importante à la vitesse maximale établie sur cette ligne, 210 km/h. Pour corriger ces problèmes de dégradation, un processus avait été mis en place pour conserver le confort de cette ligne. Mais ce processus rapide présentait des défaillances. Parallèlement à ce phénomène, et à la suite également du difficile maintien de la qualité de la voie dans les tunnels, notamment dans ceux qui présentaient d'importants problèmes de drainage. Surgit l'idée de développer une structure de voie qui aurait un besoin mineur de conservation. Étant donné que le ballast était l'élément critique du problème. La recherche a porté, soit sur sa stabilisation par des procédures naturelles ou artificielles, soit à son remplacement par un élément moins déformable. De cette manière est née la voie sans ballast composée de béton.

4.1.2 FONCTIONS

Les voies ballastées et les VSB (Voie Sans Ballast) ont 7 fonctions principales, qui sont les suivantes :

- Répartir uniformément les charges reçues, vers la plateforme;
- Stabiliser verticalement, horizontalement et latéralement la voie;
- Amortir à travers sa structure pseudo élastique, les efforts du véhicule sur la voie;
- Fournir un certain confort aux passagers;
- Protéger la plate-forme des variations d'humidité;
- Faciliter le drainage des eaux pluviales;
- Permettre la récupération de la qualité de la voie par des opérations d'alignement et de nivellement.

4.2 LE BALLAST

4.2.1 DEFINITION

4.2.1.1 CARACTERISTIQUES

Le ballast est une pierre dure concassée d'origine volcanique ; les roches tendres ou altérables sont à proscrire pour l'utilisation sur les lignes à grande vitesse. La granulométrie est de 25mm/50 mm avec un fuseau d'acceptabilité restreint. La propreté exigée correspond à un maximum de 0,5% d'éléments inférieurs au tamis 1,6 mm.

Deux essais mécaniques de la roche sont effectués :

- Un essai de Los Angeles pour déterminer la résistance à la rupture;
- Un essai Deval pour quantifier la résistance d'abrasion.

Une combinaison de ces deux tests détermine un coefficient de dureté globale, ce coefficient étant plus restrictif pour les lignes grandes vitesses que pour les lignes du réseau standard.

L'épaisseur minimale du ballast est de 35 cm sous la traverse, soit un tiers de plus qu'une sur une ligne normale. Les profils sont spécifiques pour donner une résistance transversale de la voie adaptée aux conditions de pose de la voie en longs rails soudés (LRS).

Le ballast est de nature siliceuse. La qualité du ballast a une influence notable sur la durée de la voie et sur la rentabilité de l'entretien. Si ce problème est abordé sous l'angle de l'entretien futur, l'expérience avec les lignes à grande vitesse montre que la plupart des actions coûteuses, sont, d'une part, le compactage et d'autre part, le bourrage de la voie.

Pour pouvoir s'acquitter des fonctions que nous avons évoqué au paragraphe précédent, les matériaux utilisés comme ballast dans les voies ferrées doivent posséder certaines caractéristiques en relation à sa:

- Nature;
- Courbe granulométrique;
- Forme géométrique des particules;
- Résistance au choc;
- Résistance à l'usure;
- Résistance à l'action du gel.

Ces caractéristiques sont reprises, en général, dans les différentes spécifications que les administrations ferroviaires possèdent sur les matériaux à utiliser comme ballast. Comme le décrit la norme EN 13450, la valeur du coefficient de Los Angeles définira deux catégories distincts de ballast: Type 1 pour les systèmes ferroviaires à grande vitesse, si la valeur est inférieure ou égale à 16% ; Type 2, pour les réseaux conventionnels, si cette valeur est inférieure à 20%. Les résultats d'autres essais spécifiques en rapport avec d'autres caractéristiques techniques détermineront si le ballast est accepté, avec ou sans restriction, ou carrément rejeté (Annexe 2).

Pour pouvoir supporter les charges que la traverse lui transmet, le ballast (fig.21) doit être compacté; de ce fait, les matériaux utilisés doivent résister à l'action de compactage sans parvenir à la rupture.

Il convient de souligner en relation à l'abrasion avec la couche du ballast, que sur les lignes à grande vitesse, et suite à l'apparition d'un phénomène de contact entre le panneau de pont et la surface inférieure du ballast. Il a été prévu de placer entre le ballast et l'élément du pont un élément élastique, tel que la gomme de pneus usagés, pour réduire l'abrasion, la ligne de Tokaido a été le théâtre de ce phénomène.



Fig. 21 voie avec ballast en Allemagne (workshop track for high speed railways, 2006)

4.2.1.2 CONDITIONS CLIMATIQUES

En ce qui concerne l'aptitude du ballast à résister aux effets du gel dans les pays où il est à craindre sa présence. Il est bon de savoir que cette aptitude dépend essentiellement, des caractéristiques propres de la provenance de la roche et de sa porosité. Karimov signale que si le coefficient d'absorption de la roche est supérieur à 0,8 (avec une capacité d'absorption supérieure à 1,5 %), alors il faut espérer une action destructrice du gel dans le ballast. Dans la pratique, l'aptitude face au gel est déterminée par l'essai de résistance aux sulfates, qui consiste à introduire le ballast dans une solution de sulfate qui cristallisée augmente de volume et simule l'action du gel.

4.2.2 RHEOLOGIE DU BALLAST

Le ballast est, sans doute, l'élément de la voie ferrée qui a le plus d'influence sur les processus de déformations. Ce fait qualitatif trouve confirmation quantitative dans la pratique, où l'on constate, comme l'a noté Birmann, que l'affaissement total de la voie sous une charge ponctuelle verticale est dû à la couche d'assise du ballast à 75%.

Il ressort, en conséquence, l'intérêt que présente l'étude du comportement tension-déformation de cet élément.

Toutefois, il est difficile d'effectuer in situ cette étude, puisque l'interaction existante entre les différents composants de la voie ne permet pas, en général, de distinguer l'influence des différents facteurs agissant simultanément avec le ballast, le rail, la traverse, les attaches et la plate-forme. Le ballast est un élément complexe constitué d'inconnues dépendantes une des autres.

Il est fait appel, alors, à l'étude pilote en laboratoire, grâce à laquelle on obtient des résultats, qui apportent des conclusions d'un grand intérêt. Mais il est toujours nécessaire d'effectuer des essais in situ pour détecter leur comportement en grandeur réelle et par la suite mettre en relation avec les résultats obtenus par les essais.

4.2.3 MISE EN PLACE ET MAINTENANCE DU BALLAST

4.2.3.1 DISPOSITION DU BALLAST ET SA STABILISATION

4.2.3.1.1 LA DISPOSITION DU BALLAST

La section transversale est d'une grande importance, elle est définie par de multiples normes de voie ferrée. Toute propagation inutile de la couche du ballast (fig. 22) représente un facteur de coût supplémentaire.

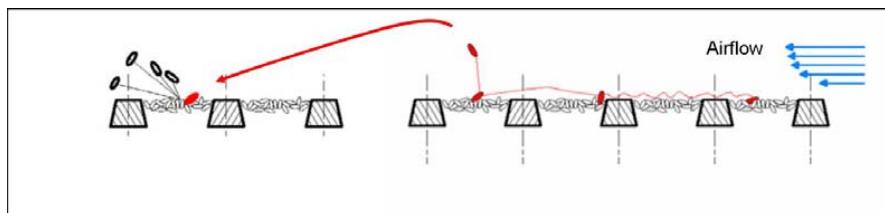


Fig. 22 exemple de propagation de ballast (workshop track for high speed railways, 2006)

Pour contrecarrer cette tendance, il est essentiel de réaliser une section transversale qui respecte les dimensions réglementaires, lors de l'entretien de la voie, mais aussi lors de l'implantation d'un nouveau ballast.

Si cette maintenance n'est pas effectuée régulièrement, d'énormes quantités de ballast pourraient être inutilisées sur la ligne ferroviaire

Les niveleuses de ballast stabilisent la base du ballast et sont utilisées en même temps que les opérations de compactage. Les niveleuses de ballast standard repositionnent la base du ballast avec de multiples allers-retours.

4.2.3.1.2 Stabilisation

La disposition du ballast est suivie d'une stabilisation à l'aide du « Dynamic Track Stabiliser ». L'objectif de cette stabilisation est d'atteindre un meilleur ancrage de la voie à la base du ballast. Après cette stabilisation, la voie offre une plus grande sécurité d'exploitation et permet sur les nouvelles lignes, en particulier, une circulation à des vitesses maximales. Cela contribue à éviter des limitations de vitesse.

Le stabilisateur de voie (DTS) (fig 24) est constitué de 4 essieux, d'un moteur diesel de 370 kW et de cylindres pression cylindres qui exercent une pression sur le rail (fig 23). Avec cette machine le ballast est compacté via les rails. La méthode est fondée sur l'excitation latérale de la voie alors que la voie est chargée verticalement avec une charge d'environ 356 kN.

La fréquence d'excitation peut être réglée entre 0 et 42 Hz, avec une force d'amplitude qui augmente à un maximum de 320 kN. Les vibrations transmises au ballast résident dans la fréquence naturelle du ballast et provoque une organisation entre les différentes pierres, en obstruant les différents vides. Le résultat est une force-libre de réarrangement des pierres du ballast. Le nombre de cavités est réduit. Ce système augmente la surface de contact entre les traverses et le ballast.



Fig. 24 le stabilisateur de voie (DTS) (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)

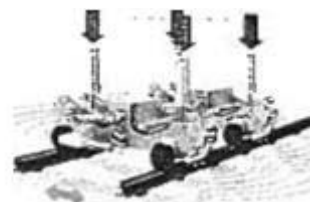


Fig 23 cylindre de compression (Modern Railway Track, Esveld Coenraad,2001)

4.2.3.2 Nettoyage du ballast

La dégarnisseuse (fig 25) est utilisée pour creuser plus loin le ballast à une profondeur minimale de 25 cm au-dessous des traverses à l'aide d'une chaîne sur laquelle sont attachées des dents excavatrices. La chaîne transporte le ballast vers un système de vibration constitué de tamis où le matériel avec un diamètre inférieur de 35 mm est filtré. Le matériel restant retourne en voie. Au cours de l'opération de dégarnissage environ 1,5 t de mauvais ballast est libéré par mètre de voie.

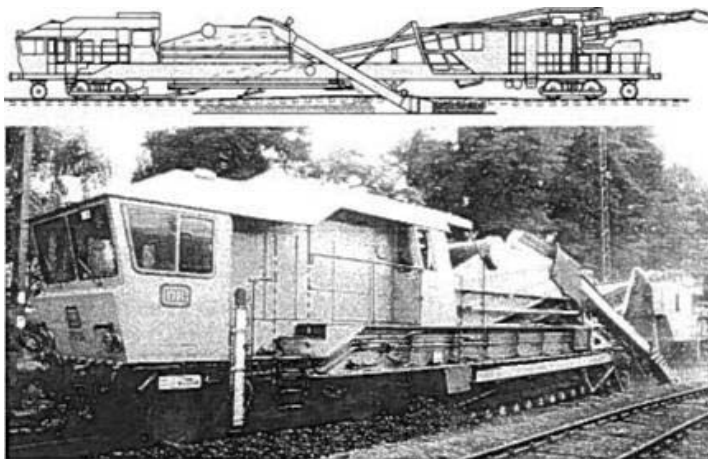


Fig. 25 la dégarnisseuse RM 80 (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)

4.2.3.3 REHABILITATION DU BALLAST

L'insertion à la main de couche de sable n'est pas seulement coûteuse, de plus la compacité et l'homogénéité de cette couche n'est pas conservée. Différentes machines et systèmes existent pour insérer cette couche de sable couvertures, de géo synthétiques ou d'autres couches protection sous la voie.

L'AHM 800 R (Aushubmaschine) (fig 26) est une machine de creusement qui utilise le ballast recyclé pour la formation d'une couche protectrice. L'AHM 800 R a deux excavatrices indépendantes. La plus petite ramasse la couche supérieure du vieux ballast (20 à 25 cm). La deuxième procède aux grands travaux d'excavation supprimant le vieux ballast et la couche supérieure de l'ancienne plateforme. Les compacteurs lissent la surface restante.



Fig 26 AHM 800 R (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)

Si nécessaire, un géotextile peut être posé (fig 27)

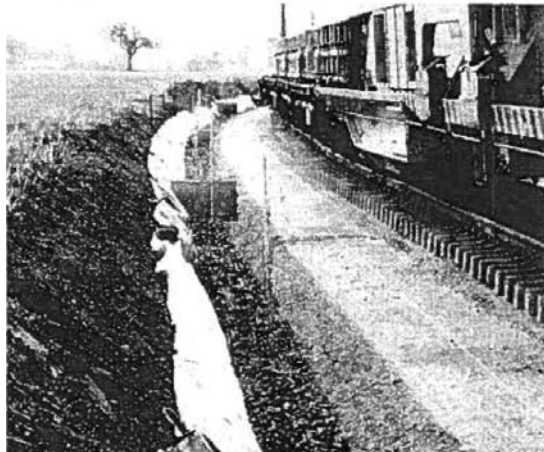


Fig. 27 exemple de réhabilitation de voie avec un géotextile (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)

Une autre machine de réhabilitation, la RPM 2002 (fig. 28) a été développée spécialement pour les besoins de chemins de fer allemands: la couche supérieure est enlevée séparément et nettoyée au sein de la machine. Les pierres sont aiguisées dans une usine de broyage. Après que la couche protectrice soit insérée et compactée, le ballast régénéré est distribué sur la voie avec le nouveau ballast.



Fig 28 RPM 2002 (Modern Railway Track, Esveld Coenraad, 2001)

4.2.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les principaux avantages d'une voie avec ballast sont:

- L'existence d'un grand nombre de test type, une réelle expérience;
- Son comportement est connu jusqu'à des vitesses d'environ 300 km/h;
- Un haut degré de mécanisation est possible, ce qui signifie une réduction des coûts;
- Les défauts de fabrication sont faibles;
- Le coût de construction est modéré;

- La précision et la conservation de la géométrie de la voie est suffisante, en dépit des hauts coûts d'entretien que le ballast exige;
- Les nuisances sonores sont réduites;
- L'homogénéité dans la répartition des charges;
- Les efforts dynamiques sont réduits;
- L'assemblage a un comportement viscoélastique adéquat;
- Pour l'entretien, les emplois sont simples et sont très automatisés, de plus il est possible de redonner à la voie ses caractéristiques initiales.

D'autre part, ce système présente des inconvénients :

- L'inspection et les tâches de maintenance sont très importantes, résultant, par conséquent, un coût d'entretien élevé. Il doit être conservé à l'esprit que, dans le cas de la voie sur dalle, l'entretien est généralement limitée à resserrer attaches dans la plupart des cas;
- La section transversale requiert une plus grande exigence, par conséquent, une plus grande région d'expropriation et une augmentation du volume de terrassement;
- Les voies avec ballast pour les lignes à grande vitesse sont dimensionnées à partir de nombreuses études en laboratoire et essais de vitesse, ce qui montre un certain manque de connaissance in situ.

4.3 LA VOIE SANS BALLAST

4.3.1 CARACTERISTIQUES ET FONCTIONS DES COMPOSANTS DE LA VOIE SUR DALLE

Nous avons déjà indiqué que les difficultés inhérentes à la conservation de la voie sur ballast pour des vitesses de l'ordre de 200 km/h, conduisent à la conception de voie sur dalle, pour éviter la déformabilité permanente et croissante du ballast, dues aux charges du trafic à des vitesses supérieures à la valeur indiquée.

À cet égard, le projet d'une voie sans ballast doit avoir lieu; compte tenu des importantes fonctions que cet élément joue dans la voie conventionnelle pour établir, en conséquence, un autre élément ou un ensemble d'éléments qui remplissent ces fonctions.

Dans cet ordre d'idées, deux aspects doivent être considérés de manière fondamentale : l'élasticité et l'amortissement que fournit le ballast, d'une part, et, d'autre part, la répartition uniforme de pressions sur la plate-forme, compatible avec leurs caractéristiques résistantes.

En ce qui concerne ces fonctions, la voie non conventionnelle dispose d'un matériau élastomère qui lui fournit une certaine élasticité ; et d'une dalle de béton hydraulique ou bitumineuse qui fournit à la structure de la voie des caractéristiques de stabilité uniforme et de faible déformabilité.

Outre ces composants, considérés à caractère fondamental, il faut noter, de plus, la disposition d'un élément complémentaire, la dalle de base, de sol stabilisé à l'aide du bitume, du ciment ou d'un autre liant, située entre la dalle de béton et l'infrastructure, afin d'obtenir un appui uniforme de celle-ci; réduire l'effet de remontées d'eaux et atténuer les effets destructeurs des gelées.

Ensuite, et considérant en premier lieu la plate-forme, nous étudierons les caractéristiques générales des divers éléments d'une voie sur plaque, en commençant par l'élastomère, la dalle de base, la dalle principal, déjà cités, pour terminer avec la traverse, les attaches et le rail, ce dernier groupe d'éléments a déjà été présenté dans la chapitre 1 et 2 mais seront à présent définis dans le système de voie sur dalle.

4.3.1.1 LA PLATEFORME

Ses caractéristiques sont fondamentales dans le comportement de la voie sur dalle, car l'expérience acquise dans la construction d'autoroutes avec du béton hydraulique, montre que la principale cause de rupture de ces revêtements de sol est le phénomène de remontées d'eaux ou «pumping ».Ce phénomène se produit lorsque les facteurs suivants sont présents:

- Eau libre sous la dalle;
- Sol susceptible d'entrer en suspension;
- Charges fortes et fréquentes.

Si le problème précédent s'ajoute, de plus, à une réparation des déformations sur la voie sur dalle, on comprend l'importance de la qualité de la plate-forme sur laquelle repose la dalle.

Tout cela oblige à éliminer l'eau libre sous la dalle, grâce à un drainage efficace, soit superficielle ou profond.

Il convient en outre, si le sol naturel possède une faible capacité portante, d'améliorer celle-ci par différentes « subbases » d'empierrements granulaires, de macadam, d'un sol ciment ou autres solutions similaires.

Dans le cas de sols susceptibles au gel, il convient de prévoir une couche calorifuge, qui peut être de béton poreux ou d'un produit synthétique.

4.3.1.2 LA DALLE DE BASE

Se situe sur la plateforme afin d'assurer une meilleure répartition des charges sur le terrain, et d'atténuer l'effet de remontées des eaux qui peut apparaître comme conséquence à la présence d'eau agissant sur le sol, mais aussi réduire les effets destructeurs des gelées.

La nature et la résistance de la dalle de base peuvent avoir une influence sur le projet de la dalle principale, mais, en général, cette influence n'est pas très importante.

Plus que l'augmentation de résistance, ce qui se poursuit avec la création de cette base est l'acquisition d'une uniformité de portance à la plaque principale, pour améliorer sa condition de travail.

Il n'est pas recommandé que l'épaisseur de la plaque de base soit inférieure à 10 centimètres, étant souhaitable les 15 centimètres d'épaisseur, non pour des causes de résistance structurel, mais pour des raisons constructives. On utilise avec succès des bases de sol stabilisé au bitume, ciment, chaux ou grâce à un béton pauvre.

4.3.1.3 LA DALLE PRINCIPALE

Constitue l'ensemble qui supporte les rails, lesquels sont fixés par le biais des éléments d'attache, en combinaison avec l'élastomère, respectant les fonctions du ballast et des traverses.

Selon les différents types de structure de dalle, la forme de la dalle principale variera et sont à considérer les différents aspects suivants:

- Dans le cas de plaque continue, l'existence de fissures transversales ne tient pas en compte les effets de la flexion négative;
- Les types de plaque qui admettent l'incorporation de traverses, on suppose que l'effort transversal est absorbé par celles-ci.

L'analyse des caractéristiques des matériaux à utiliser sur cette plaque principale, s'effectue de la manière suivante, les principales caractéristiques du béton sont:

- sa résistance mécanique supérieure à 350 kg/cm^2 ;
- sa docilité qui s'adapte aux exigences de mise en œuvre et dépendra de plusieurs facteurs (température ambiante, nature des granulats, etc.).

Le facteur essentiel, qui conditionne ces deux caractéristiques, est la relation eau ciment, qui doit être comprise entre 0,4 et 0,6.

Les conditions auxquelles doit satisfaire le ciment varient peu de celles du béton hydraulique.

Les plaques de grande surface, sont très sensibles à l'évaporation et effets thermiques.

Pour cela, la composition chimique, finesse de moulu et la température du ciment utilisé doit être exact. Il est essentiel de maintenir à l'intérieur un strict degré d'uniformité tout au long de la construction; cela amène à interdire l'emploi simultané de ciments provenant de différentes usines. Il est recommandé l'utilisation de ciments à faible teneur en aluminat tricalcique, car, comme on le sait, ils produisent une réaction exothermique élevée, ayant pour conséquence l'apparition de fissurations.

Les caractéristiques de l'eau seront identiques à celle d'un béton hydraulique.

Outre les conditions générales, le gravier et sable doivent être exempts de matières friables, d'argile, de matériaux composés de soufre, de substances produisant des réactions préjudiciables avec les alcalines du ciment.

Les additifs plastifiants améliorent un meilleur travail et une résistance au gel qui proportionne une certaine thixotropie, celle-ci permet un décoffrage quasi immédiat.

Les systèmes de séchage consistent, par diverses procédures, à obtenir à tout moment suffisamment d'eau pour l'hydratation des composants du ciment. La procédure usuelle consiste à couvrir la dalle nouvellement bétonnée avec un produit de scellé, qui, appliqué avec un pulvérisateur, crée un film imperméable, qui peut être ou non réfléchissant, empêchant l'évaporation du béton. Parvenir à un bon séchage est essentiel dans ce type d'ouvrage, pour réduire autant que possible le nombre de fentes de rétraction. S'agissant d'une œuvre linéaire, cette dernière est exposée à temps plein à l'action de variations atmosphériques.

Toutefois, il n'est pas nécessaire que la résistance mécanique soit excessive, car il faut tenir compte du fait que le train est une charge mobile.

4.3.1.4 L'ELASTOMERE

Sa présence est indispensable à l'heure de reproduire, en quelque sorte, la capacité caractéristique de la voie conventionnelle pour absorber de fortes charges par petites déformations, en règle générale, il est mis en place des éléments de caoutchouc entre le rail et la dalle principale.

Ces éléments sont de formes diverses, selon les différents types de voie sur dalle, nous nous limiterons à citer uniquement les suivants :

- Élastomères du type dalle d'assise, pour être incorporés dessous du rail. Ses dimensions sont souvent proches de celles de 15x25cm et son épaisseur de 10 à 15 mm. Elles sont employées dans les dalles avec traverses (type RHEDA), dans des blocs ou longrine (type NS);
- Élastomères du type bande, pour être incorporés entre le rail et la dalle continue. Ses dimensions sont souvent de 15 x 200 cm, avec une épaisseur de 10 mm environ. ce type est employé dans les dalles type BR construites sur place, comme celle de Calatorao;
- Élastomères du type enveloppe, pour être incorporés entre l'élément préfabriqué et la dalle principale. Sa forme est adéquate pour entourer la partie inférieure de la traverse bibloc. Ce type d'élastomères, présente la particularité, d'exercer sa fonction non seulement dans le sens vertical, mais aussi dans le sens transversal. Ces éléments sont utilisés pour les voies sur dalle Sonneville ou NS.

Pour qu'un élastomère se comporte de façon appropriée, le professeur Eisenmann propose quant à sa rigidité :

- La déformation du rail au passage d'un axe de 20 Tonnes soit de 1,5 mm;
- L'élasticité doit être conservé au maximum, et en ce qui concerne leur comportement sur l'exploitation recommande que la pression verticale supportée soit inférieure à 15 kg/cm², afin de parvenir à une longue durée du matériel et d'obtenir, en même temps, un amortissement acceptable des fréquences en cas de basses températures.

Ces conditions sont remplies par le caoutchouc naturel et d'autres élastomères, auxquels sont ajoutés du liège.

4.3.1.5 LA TRAVERSE

Dans certains types de voie sur dalle ont continue de confier aux traverses la mission de supporter directement les rails et de les maintenir séparés.

En effet, comme on le verra dans le paragraphe **4.3.2**, il existe certaines classes de voie sur dalle, dans lesquelles la traverse est incorporée comme un élément structurel fondamental.

Il y a 2 variantes pour l'incorporation de la traverse à la dalle :

- La première consiste à bétonner la dalle une fois les traverses placées, constituant un ensemble solidaire et monolithique;
- L'autre possibilité consiste à introduire un élément de relation, de nature élastique, entre la dalle principal, en général bétonné in situ, et les traverses qui supportent les rails.

Le premier type de plaque a été développé en Allemagne, ayant été établi avec traverses Dywidag, analogues à celles décrites au chapitre 2; le deuxième type a été développé, par la SNCF, en collaboration avec la société STEDEF et avec le créateur du Sonneville; les traverses employées ont été les mixtes RS, on le verra dans le sous paragraphe **4.3.2.2** de ce chapitre, mais avec de légères modifications pour les adapter à cette nouvelle fonction.

4.3.1.6 ATTACHES ELASTIQUES

Les différentes attaches employées dans les types de voie sur dalle comportent des légères modifications, depuis longtemps, des traverses sont utilisées sur ce type de voie, comme indiqué dans le chapitre 2. Pour les voies sur dalle, pour lesquelles l'attache s'ancre directement à la dalle, il faut accorder beaucoup d'attention au mortier de résines époxydes ou polyester utilisés pour cette action.

4.3.1.7 LE RAIL

L'analyse tension résistance du rail est, en principe similaire à la réalisation pour une voie conventionnel ballastée, bien que les meilleures conditions de travail impliquent que les exigences de la section du rail soit réduites, jusqu'au point que, pour des vitesses de 200 km/h et des charge de 22 Tonnes/axe, on prévoit que le poids du rail ne doit pas être obligatoirement supérieur à 54 kg/m.

On peut conclure qu'il existe deux catégories de VSD selon leurs conceptions respectives :

- Les types monolithiques à traverses encastrées dans le béton ou à blocs d'appui de type RHEDA ou ZÜBLIN;
- Les types « décomposés », constitués de couche d'assise béton ou asphalte en « sandwich » avec châssis de voie en pose directe.

4.3.2 LES DIFFERENTS TYPES UTILISES

4.3.2.1 SYSTEMES AVEC TRAVERSES PLACEES DANS UN BETON COULE IN SITU

Les systèmes les plus connues sont ceux du type Rheda (voir fig.29) avec ces différentes variantes comme RHEDA 2000®, Rheda Berlin HGV, Rheda classique etc. Le système RHEDA a été conçu à partir de 1970 et a connu de multiples évolutions. Aujourd'hui, le RHEDA 2000 est utilisé, ce système s'inscrit dans la continuité des développements du bien connu système RHEDA. En 1994, la modification du système est devenue connue sous le nom de Rheda Berlin System. Le système Rheda 2000 a été installé en juillet 2000 sur la ligne grande vitesse entre Leipzig et Halle.

En outre, il existe également les systèmes Heitkamp ou Züblin. Cette configuration a vu le jour pour la première fois en 1977 sur la ceinture nord de Munich. D'autres applications sont apparues à fin 1993 début 1994 sur la section Wittenberge-Dergenthin de la ligne aménagée Berlin-Hambourg (tronçon à double voie d'environ 2x6 km).

Les principales caractéristiques de ces systèmes de voie sans ballast sont les suivantes :

- Le dernier rajustement de la position de la voie est effectué juste avant la mise en place du béton ce qui corrige les défauts préalables. Par conséquent toutes les inexactitudes faites dans la structure couches ci-dessous sont éliminées (top-down alignment);
- L'utilisation de traverses n'implique pas l'utilisation de dispositifs supplémentaires pour conserver la position du rail (inclinaison, écartement). Si le système comporte des blocs pour soutenir le tout, alors il devra être utilisé des dispositifs qui conservent l'écartement;
- L'utilisation de traverses biblocs a amélioré le comportement des voies sans ballast. Les anciens modèles avec des traverses monoblocs présentaient un mauvais comportement;
- Toutes les pièces d'usure comme le rail, les attaches élastiques ne sont pas parties intégrantes de la voie dallée. Par conséquent, elles peuvent être changées assez facilement sans affecter la structure;
- Les traverses sont fermement fixées dans la dalle de béton, il n'y a donc aucune possibilité de mouvement de ces éléments ;
- En cas de déraillements la réparation de la voie exige des efforts et du temps. Bien sûr la difficulté de la réparation dépend de la gravité de l'incident. Dans le pire des cas (la dalle est endommagée), la section de la voie touchée doit être entièrement changée. C'est assez compliqué et ceci prend du temps, c'est un des principaux inconvénients.



Fig. 29 Systèmes avec traverses placées dans un béton coulé in situ (workshop track for high speed railways, 2006)

4.3.2.2 SYSTEMES AVEC UNE DISPOSITION ELASTIQUE DES TRAVERSES SUR UNE VOIE DALLEE EN BETON

Les systèmes typiques de ce type de montage sont Sonneville (LVT, HA LVT), Bözberg ou Stedef (voir fig.30).

Les principales caractéristiques de ces systèmes de voie dallée sont les suivantes :

- En raison de complètement élastiques pour l'attache des traverses, les vibrations résultant de la circulation sont très considérablement réduites;
- La dalle de béton de ces systèmes n'est pas renforcée;
- Les traverses sont coulées de manière élastique, il n'y a donc aucun lien solide entre elles et la dalle. Ceci rend le retrait et l'échange facile des traverses;
- Les éléments élastiques font partie intégrante de la voie sur dalle. Pour le remplacement de ces derniers, le retrait préalable des traverses est obligatoire;
- Les traverses ne sont pas solidement fixées dans la dalle de béton. Par conséquent, des ajustements de la géométrie (par exemple en raison de déplacements latéraux) peuvent être effectués ultérieurement.

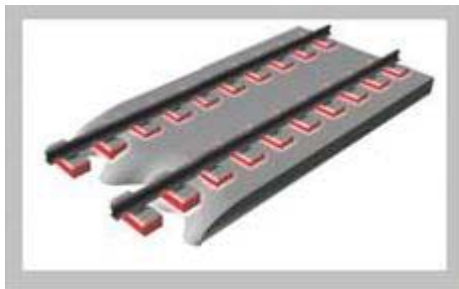


Fig. 30 Systèmes avec une disposition élastique des traverses sur une voie dallée en béton (workshop track for high speed railways, 2006)

4.3.2.3 SYSTEMES AVEC TRAVERSES SOUTENUES DIRECTEMENT PAR LA DALLE

Les systèmes typiques sont ATD et GETRAC (fig.31).

Les principales caractéristiques de ces systèmes sont :

- La dernière position de piste (notamment la position verticale) dépend directement de l'exactitude de la structure de la couche (en particulier de la couche supérieure) et sur l'exactitude de la traverse utilisée. Par conséquent, les inexactitudes de chaque couche ont une influence directe sur la dernière (bottom-up alignment);
- L'utilisation de traverses (ce qui est habituellement le cas) n'implique pas l'utilisation de dispositifs supplémentaires d'ajustement pour la position du rail (inclinaison du rail, écartement);
- Les éléments d'attaches du rail sont ancrés dans des préfabriqués réalisés avec un béton de haute qualité ;
- En raison de l'accroche limitée entre les traverses et la dalle de béton, il est habituellement facile de les remplacer en cas de dommage;
- Toutes les pièces d'usure comme le rail, les attaches élastiques ne font pas partie intégrante de la voie sur dalle. Par conséquent qu'ils peuvent être supprimés assez facilement.

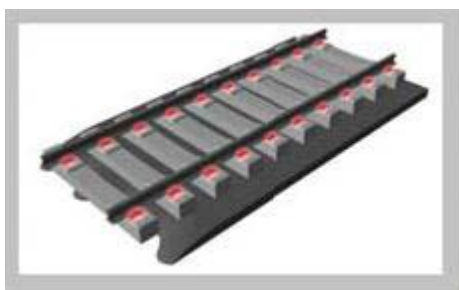


Fig. 31 Systèmes avec traverses soutenues directement par la dalle (workshop track for high speed railways, 2006)

4.3.2.4 SYSTEMES COMPRENANT DES ELEMENTS DE DALLE EN BETON PREFABRIQUES

Le système le plus connu (et un des plus anciens systèmes de voie sur dalle) est composé de plaques de béton préfabriqué et fut utilisé pour la ligne ferroviaire japonaise de Shinkansen. Ce système est né en 1964, suite à une mauvaise expérience sur les 516 kilomètres de la ligne grande vitesse de Tokaido. Cette voie était constituée d'un ballast, ce qui a provoqué le développement d'une VSD (Voie Sur Dalle).

Mais aussi les systèmes Bögl ou PORR (fig.32) représentent ce type de structure. Le système Bögl est en grande partie semblable à Shinkansen, sauf que la fibre d'acier utilisé est une B55 et que l'épaisseur de la couche de béton est de 20 cm.

Les principales caractéristiques de ces systèmes dalle piste sont :

- Le dernier rajustement de la position de piste est effectué juste avant le positionnement des éléments respectifs sous les plaques qui corrige les défauts. Par conséquent toutes les inexactitudes faites dans la structure couches ci-dessous sont éliminées (top-down alignement);
- La position du rail (inclinaison du rail, écartement) est déjà réglée lors de la mise en place sur la voie. Par conséquent, aucun dispositif supplémentaire n'est nécessaire pour atteindre l'exactitude de ces paramètres géométriques;
- Toutes les pièces d'usure comme le rail, les attaches élastiques ne font pas partie intégrante de la voie. Ils peuvent donc être supprimés assez facilement sans causer de problème à la voie dallée;
- Presque la totalité de la superstructure doit être produite dans une usine (plaques / éléments) et transportés sur le chantier (généralement) dans le bon ordre. Ce fait rend le transport et la logistique très complexe en comparaison avec d'autres systèmes;
- En raison du poids des éléments de la voie, leur échange est complexe et nécessite du matériel lourd;
- La géométrie de la voie dallée est déjà prédéterminée dans l'usine.



Fig. 32 Systèmes comprenant des éléments de dalle en béton préfabriqués (workshop track for high speed railways, 2006)

4.3.2.5 SYSTEMES AVEC UN SEUL POINT D'APPUI, ANCREE DANS UN BETON COULE IN SITU

Ce système se compose de rails, d'attaches et de la voie dallée elle-même. Les exemples typiques sont les Vossloh 336 et FFC (fig.33).

Les principales caractéristiques de ce système sont les suivantes:

- Le dernier rajustement de la position de la voie est effectué juste avant la mise en place du béton. Par conséquent toutes les inexactitudes faites dans la couche inférieure sont éliminées (top down alignement);
- En raison de l'absence de traverses et de dispositifs supplémentaires, l'ajustement de la position du rail (inclinaison du rail, écartement) est toujours nécessaire;
- Les éléments d'attache sont ancrés dans le béton coulé in situ. En raison d'une qualité de béton faible (comparativement à des éléments préfabriqués) il n'est pas possible de parvenir à une qualité uniforme de la fixation;
- En raison de l'absence d'une connexion entre les deux rails, ceci réduit la stabilité de la voie dallée;
- Toutes les pièces d'usure comme le rail, les éléments d'attaches ne font pas partie intégrante de la voie dallée. Par conséquent elles peuvent être changées facilement sans affecter la structure;
- En raison des difficultés mentionnées ci-dessus, il est important que des personnes avec de l'expérience travaillent sur ce type de chantier.



Fig. 33 Systèmes avec un seul point d'appui, ancrée dans un béton coulé in situ (workshop track for high speed railways, 2006)

4.3.2.6 SYSTEMES AVEC RAILS NOYES DANS LE BETON SANS TRAVERSE

Cette dalle comporte des rails directement implantés dans le béton (fig.34). Il n'y a ni traverses, ni éléments d'attache.

Les exemples typiques sont les EDILON, INFUNDO et Balfour Beatty. Les principales caractéristiques de ces systèmes dalle piste sont les suivantes :

- Le dernier rajustement de la position des deux rails est effectué juste avant la mise en place du béton. Par conséquent toutes les inexactitudes existantes dans les couches inférieurs sont éliminés (top-down alignement);
- Deux rails sont incorporés indépendamment dans deux cavités au sein de la dalle. Pour cette raison, l'ajustement et la fixation des rails est réalisée à l'aide d'outils spéciaux et de piquet ce qui rend l'installation de la voie très difficile et exigeante;
- Au contraire de la plupart des autres systèmes de voie sur dalle il n'y a pas d'appui discret, mais un appui continu du rail;

- En raison de la haute résistance au glissement des rails dans ce type de système, il a donc une utilisation très limitée dans les ponts de longueurs importantes (possibilité d'expansion ferroviaire limitée);
- Pour l'incorporation des éléments élastiques du rail, des matériaux spéciaux sont nécessaires.
- Les pièces d'usure (rails, etc...) font partie intégrante de la voie sur dalle. Ils doivent être complètement éliminés ensemble. Il n'y a aucune possibilité de les supprimer séparément;
- Jusqu'à maintenant ce système a été installé uniquement sur de petites longueurs.

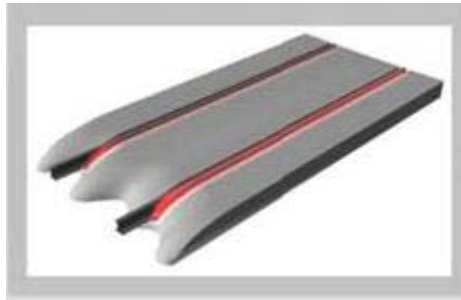


Fig. 34 Systèmes avec rails noyés dans le béton sans traverse (workshop track for high speed railways, 2006)

4.3.3 INCONVENIENTS

Les inconvénients principaux d'une voie sur dalle sont les suivants :

- Le coût de construction de ce type de voie est considérablement élevé;
- Le processus de construction n'est pas suffisamment automatisé, ce qui implique une rapidité d'exécution non optimale;
- La construction de ce type de superstructure sans ballast nécessite des tolérances très restrictives;
- Dans le cas d'existences d'erreurs commises dans l'alignement et le nivellement de la voie, la réparation comportera un coût important avec une perte d'exploitation de la voie;
- Il est nécessaire de construire une zone de transition entre la voie sans ballast et la voie ballastée.

4.3.4 AVANTAGES

La VSD (Voie Sur Dalle) présente de multiples avantages, ce qui en fait un système avec un grand succès pour les lignes à grande vitesse :

- Par sa structure solide, elle présente une durée de vie importante et une conservation de la géométrie de la voie extraordinaire. Ceci implique un confort pour le passager;
- Les voies sans ballast ont une durée de vie de 60 ans avec une maintenance et un entretien minimum, ce qui implique une diminution des coûts d'entretien;
- Une maintenance réduite qui permet une disponibilité de voie accrue;
- La structure supporte des charges horizontales élevées, ceci permet d'envisager l'utilisation de nouveaux trains ou d'augmenter la vitesse de circulation;
- Enfin, ce système peut être utilisé dans la conception de pont pour réduire les charges statiques et donc d'avoir un dimensionnement de la structure plus économique.

4.4 CONCLUSION : BALLAST VERSUS VOIE SUR DALLE

Nous avons, donc, étudiés dans les paragraphes ci-dessus les spécifications d'une voie ballastée à travers sa définition, sa rhéologie et sa maintenance au cours du temps ; d'autre part un autre système a été analysé celui de voie sur dalle. Une étude développée sous 2 grands aspects, qui sont les suivants, ses caractéristiques et les différents types existants sur les lignes ferroviaires aujourd'hui.

A présent, cette conclusion va nous permettre de confronter ces deux modèles de base pour une ligne grande vitesse. Une confrontation qui mettra en avant deux thèmes récurrents, d'une part une étude économique de ces deux systèmes, d'autre part une comparaison des qualités techniques de chacune.

Notre étude économique va s'orienter à travers celui d'une ligne grande vitesse espagnole.

Pour l'étude économique de la ligne Madrid-Séville, les données témoins sont les suivantes :

- Utilisation du VAN (Valeur Actuelle Net)
- Investissement initial :
 - Voie avec ballast : 500,5 millions euros (base ligne Madrid-Séville);
 - Voie sans ballast : 1019 millions euros (expérience espagnole);
- Entretien de la voie :
 - Voie avec ballast :
 - scénario 1 (trafic faible) 25 millions euros par an;
 - scénario 2 (trafic modéré) 26,48 millions euros par an;
 - scénario 3 (trafic élevé) 27,8 millions euros par an;
 - Voie sans ballast : le coût est calculé à partir des coûts connus des voies avec ballast, en appliquant un coefficient de réduction de 47%.

Les résultats obtenus par cette étude de l'ingénieur espagnol Antonio Fernandez sont les suivants (tableau 4).

Tableau 4 récapitulatif des résultats obtenus pour le VAN (workshop track for high speed railways, 2006)

VAN (millions d'euros)			
trafic	élevé	modéré	faible
voie avec ballast	1,045	1,067	1,089
voie sans ballast	1,248	1,259	1,269

En ce qui concerne la durée de l'investissement, il convient de considérer que la voie sur dalle a une durée de vie utile prévue de 60 ans et la voie avec ballast exigera une rénovation de la superstructure 30 ans après sa mise en place, un investissement qui sera ajouté au coût d'entretien coût.

En conclusion, et en tenant compte des considérations qui précèdent, dans les trois scénarios examinés l'utilisation de la voie sur dalle entraîne un coût plus important en comparaison avec la voie sur ballast.

Désormais, le côté technique sera abordé comparant les deux systèmes selon leur comportement face à la grande vitesse.

L'avantage fonctionnel de la VSD est manifeste par rapport à la voie ballastée. A vitesse croissante, la dispersion des sollicitations verticales et horizontales, c'est-à-dire la déformation de la voie, dépend de la qualité géométrique de celle-ci.

Et ce phénomène s'explique par les irrégularités affectant le positionnement en creux des traverses d'une part et l'élasticité du ballast et de la plate-forme d'autre part.

Du fait de la nature différente d'une traverse à l'autre, l'élasticité globale de la voie ballastée résultera donc du comportement spécifique de l'attache du rail, du ballast et des sous-couches, qui active en retour la fonction porteuse et répartitrice de charge remplie par le rail.

Il en va différemment de la VSD dont l'élasticité est réalisée presque exclusivement par des semelles élastiques ou par des appuis élastiques montés sous les traverses. Cette technique garantit un haut degré d'homogénéité ainsi qu'une dispersion limitée et aisément quantifiable des valeurs de rigidité verticale, un aspect tout à fait essentiel pour les interactions véhicule/voie à grande vitesse. Le problème de l'activation de la portance du rail en fonction de l'élasticité des appuis et des caractéristiques de leurs matériaux requiert encore un important effort de recherche, notamment en ce qui concerne l'harmonisation d'ensemble du système, tant pour la voie ballastée que pour la voie sur dalle. C'est pourquoi la proposition consistant à concevoir un profil de rail à patin large doit retenir l'attention.

5

CONCLUSION

Les lignes à grande vitesse assument une grande importance dans la dynamisation du transport, qu'il soit de marchandises ou de passagers au niveau mondial, ceci en réponse à une demande et une compétitivité accrue des modes de transport ces dernières décennies.

Dans ce contexte, il a fallu mettre en place des voies répondant à un certains nombres de critères de sécurité, d'usure, de confort du passager, en sachant que tout ceci a une incidence sur la vie quotidienne de tous citoyens mondiales.

Malgré tout, les œuvres et les documents concernant ce sujet « LES MATÉRIAUX DE VOIE FERRÉE SUR LIGNE GRANDE VITESSE (LGV) », sont très rares, ceci s'explique par une volonté de chaque pays de garder le secret, la confidentialité sur certains projets et certaines innovations, pour garder le monopole et un savoir dépendant tout a chacun.

Dans cette thèse, l'objectif a été de donner une vision globale du profil transversal d'une voie LGV (Ligne Grande Vitesse). Une analyse focalisé sur le rail, la traverse et le ballast.

Le but était de réunir et compiler des informations sur ce thème afin de créer une base solide pour de futures analyses plus approfondies et d'apporter un document présentant les spécificités d'une ligne ferroviaire à grande vitesse en comparaison à une voie dite « normale ».

D'un point de vue personnel, cette dissertation m'a démontré que le matériel de voie pour les lignes à grande vitesse, s'il n'est pas différent fondamentalement du matériel de voie courant, doit être de très haute qualité et correspondre aux exigences particulières des grandes vitesses. Toutes les précautions ont été prises au niveau des études, du développement et de la vérification au cours des essais de montées en vitesse pour que ce matériel soit bien défini quant à ses performances. Les plans d'assurance qualité mis en place dans les usines de fabrication sont les garants de la production.

Ce thème m'a apporté une autre image de la voie ferrée et une satisfaction proportionnée par un approfondissement de connaissances jadis abordés de manière succinct par les cours de Chemins de Fer.

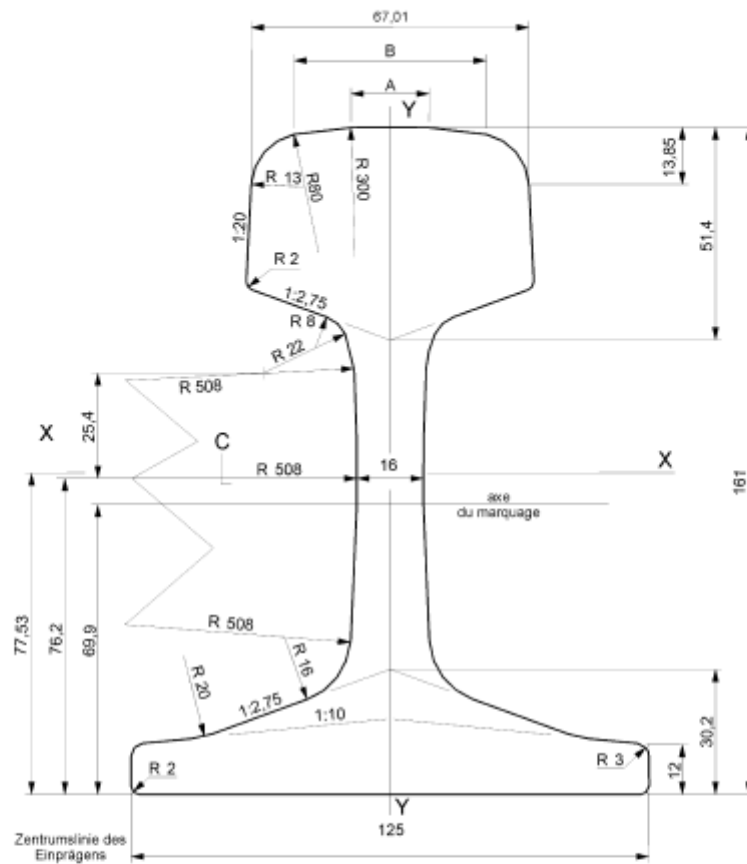
BIBLIOGRAPHIE

- Alias Jean, Gentil, P. (1984). *Voie ferrée (la) : Techniques de construction et d'entretien- 2eme éd.* EYROLLES, PARIS.
- Alias, Jean, Valdes, Antonio (1990). *La via del ferrocarril*. Libreria Editorial Bellisco, Madrid.
- Bonnett, Clifford F., (2005). *Practical railway engineering, 2nd ed.* Imperial College Press, London.
- Cervi Gérard, *Lignes à grande vitesse*, Le rail, 28/08/1991, pg 18-23, Atlas, Paris.
- Cervi Gérard, *La voie à grande vitesse*, Le rail, 28/08/1991, pg 30-35, Atlas, Paris.
- Cervi Gérard, *La voie sur dalle*, Le rail, 28/08/1991, pg 36-38, Atlas, Paris.
- Cervi Gérard, *Les appareils de voie*, Le rail, 28/08/1991, pg 40-41, Atlas, Paris.
- EN 13230-2, (2009) - *Aplicações ferroviárias Via-Travessas de betão - Parte 2: Travessas monobloco de betão pré-esforçado* - CEN, Brussels.
- EN 13230-3, (2009) - *Aplicações ferroviárias Via-Travessas de betão - Parte 3: Travessas bi-bloco de betão armado*- CEN, Brussels.
- EN 13230-4, (2009) - *Aplicações ferroviárias Via-Travessas de betão - Parte 4: Travessas de betão pré-esforçado para aparelhos de via* - CEN, Brussels.
- EN 13230-5, (2009) - *Aplicações ferroviárias Via-Travessas de betão - Parte 5: Elementos especiais* - CEN, Brussels.
- EN 13450, (2005) - *Agregados para balastros de via férrea* - CEN, Brussels.
- Esveld, Coenraad (2001). *Modern railway track 2nd éd.* MRT Productions, Zaltbommel.
- Pires da Costa.A, Campos e Matos.A, Fidalgo do Couto.A, Vale.C, Calçada.R, (2006), *Workshop "Track for high speed railways"*, FEUP, Porto.
- Losada, Manuel, (2001). *Curso de ferrocarriles, Estructura de la via*. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid.
- La commission des communautés européennes (30 mai 2002), *concernant la spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système « infrastructure » du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse visée à l'article 6, paragraphe 1, de la directive 96/48/CE*, Journal officiel des Communautés européennes Brussels.
- Profillidis, V.A. (1995). *Railway engineering*. Avebury Technical, Aldershot.
- Revue Générale des Chemins de Fer (1958). *French railway techniques*. Dunod-C.D.R.-Centrale des Revues, Montreuil.
- ST 590 Indice B, (2001) *Application Ferroviaire, Spécification Technique, FOURNITURE DE GRANULATS UTILISÉS POUR LA RÉALISATION ET L'ENTRETIEN DES VOIES FERRÉES A USAGE ELECTRIQUE*, SNCF, Paris.
- Suiker, Akke Simon Johanna, (2002). *The mechanical behaviour of ballasted railway tracks*. Delft University Press, Delft.
- Union Internationale des Chemins de Fer (2000). *UIC railway dictionary: english-german-french 3rd ed.* UIC, Paris.

<http://www.sateba.com/rubrique8.html> 20/12/2009

http://www.vossloh-fastening-systems.de/cms/de/products/system_w14/system_w14.html
15/01/2010

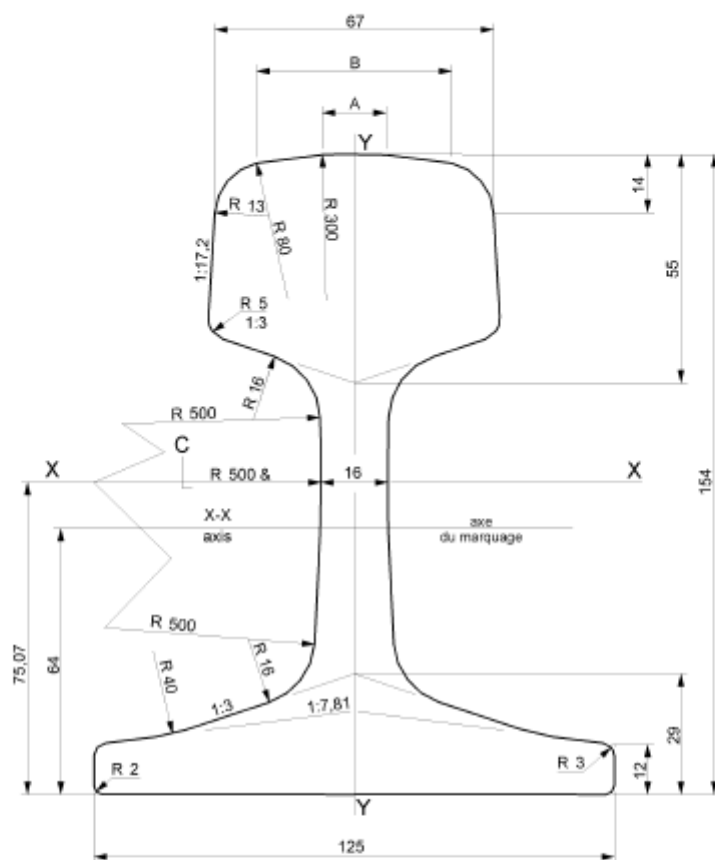
ANNEXES



Surface section transversale:	68,56	cm ²
Masse par mètre:	53,82	kg/m
Moment d'inertie axe x-x:	2 307	cm ⁴
Module section — Tête:	276,4	cm ³
Module section — Base:	297,6	cm ³
Moment d'inertie axe y-y:	341,5	cm ⁴
Module section axe y-y:	54,6	cm ³

Dimensions indicatives: A = 18,946 mm
B = 46,310 mm

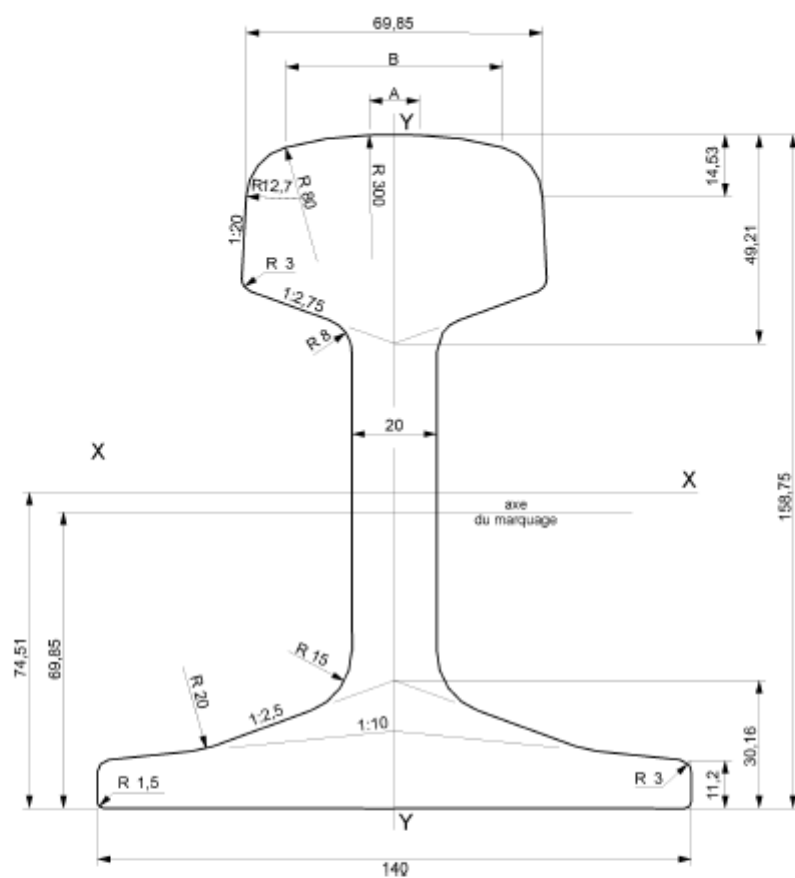
Profil de rail 54 E 2



Surface section transversale:	69,52	cm ²
Masse par mètre:	54,57	kg/m
Moment d'inertie axe x-x:	2 074	cm ⁴
Module section — Tête:	262,8	cm ³
Module section — Base:	276,3	cm ³
Moment d'inertie axe y-y:	354,8	cm ⁴
Module section axe y-y:	56,8	cm ³

Dimensions indicatives: A = 15,267 mm
B = 46,835 mm

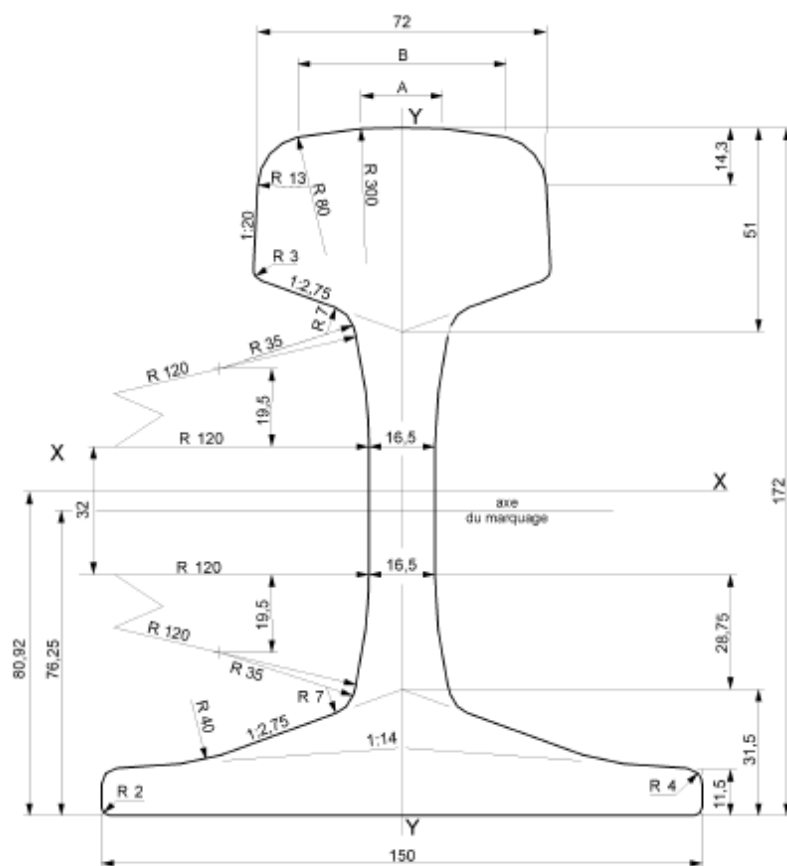
Profil de rail 54 E 3



Surface section transversale:	71,69	cm ²
Masse par mètre:	56,3	kg/m
Moment d'inertie axe x-x:	2 321	cm ⁴
Module section — Tête:	275,5	cm ³
Module section — Base:	311,5	cm ³
Moment d'inertie axe y-y:	421,6	cm ⁴
Module section axe y-y:	60,2	cm ³

Dimensions indicatives: A = 11,787 mm
B = 51,235 mm

Profil de rail 56 E 1



Surface section transversale:	76,70	cm ²
Masse par mètre:	60,21	kg/m
Moment d'inertie axe x-x:	3 038,3	cm ⁴
Module section — Tête:	333,6	cm ³
Module section — Base:	375,5	cm ³
Moment d'inertie axe y-y:	512,3	cm ⁴
Module section axe y-y:	68,3	cm ³

Dimensions indicatives: A = 20,456
B = 52,053

Profil de rail 60 E 1

ANNEXE 2: Critères d'acceptation de ballast selon la **REFER- IT.GEO.001.02**

Características técnicas		Valores de aceitação sem restrições				Número do articulado
		Balastro		Gravilha		
Los Angeles (%) L_{AB}		≤ 16 (tipo I) ≤ 20 (tipo II)		≤ 20		4.3.1
Micro-Deval (%) MDE_{RB}		a definir (tipo I) ≤ 11 (tipo II)		≤ 15		
Granulometria		Peneiros (mm)	Acumulados que passam (%)	Peneiros (mm)	Acumulados que passam (%)	4.3.2
		80	100	-	-	
		63	≥ 95 ≤ 99	25	100	
		50	≥ 55 ≤ 99	20	≥ 99	
		40	≥ 25 ≤ 75	14	≥ 80 ≤ 99	
		31,5	≥ 1 ≤ 25	10	≤ 20	
		22,4	≤ 3	6,3	≤ 5	
Partículas finas (%)		$\leq 0,6$		$\leq 0,6$		4.3.3
Finos (%)		$\leq 0,5$		$\leq 0,5$		4.3.4
Forma	Índice de achatamento (%)	≤ 15		≤ 15		4.3.5.1
	Índice de forma (%)	≤ 10		≤ 10		4.3.5.2
	Comprimento (%)	≤ 4		≤ 4		4.3.5.3
Elementos prejudiciais (%)		≤ 3		≤ 3		4.3.6

⁽¹⁾ – Rede percorrida geralmente por:

- Comboios de passageiros: velocidade $V \leq 220$ km/h, 20 t de carga por eixo;
- Comboios de mercadorias: velocidade $V \leq 100$ km/h, 25 t de carga por eixo.

Características técnicas		Valores de rejeição				Número do articulado
		Balastro		Gravilha		
Los Angeles (%)		>19 (Tipo I) >23 (Tipo II)		>25		4.4.1
Micro-Deval (%) MDE _{RB}		A definir (Tipo I) >13 (Tipo II)		>20		
Granulometria		Peneir os (mm)	Acumulados que passam (%)	Peneiros (mm)	Acumulados que passam (%)	4.4.2
		80	100	-	-	
		63	<90	25	<95	
		50	<50	20	<94	
		40	<20 >80	14	<75	
		31,5	>30	10	>25	
		22,4	>8	6,3	>10	
Partículas finas (%)		>1,2		>1,2		4.4.3
Finos (%)		>1		>1		4.4.4
Forma	Índice de achatamento (%)	>30		>30		4.4.5.1
	Índice de forma (%)	>20		>20		4.4.5.2
	Comprimento (%)	>8		>8		4.4.5.3
Elementos prejudiciais (%)		>6		>6		4.4.6

Características técnicas	Valores de aceitação sem restrições				Penalizações: Redução do preço de venda, à data da expedição, por cada 1% ou fracção desta % de afastamento dos limites de aceitação sem restrições (%).
	Balastro		Gravilha		
Los Angeles (%) LA_{RB}	≤ 16 (tipo I) ≤ 20 (tipo II)		≤ 20		10
Micro-Deval (%) MDE_{RB}	A definir (tipo I) ≤ 11 (tipo II)		≤ 15		10
Granulometria	Peneiros (mm)	Acumulados que passam (%)	Peneiros (mm)	Acumulados que passam (%)	
	80	100	-	-	3
	63	≥ 95	25	100	3
	50	≥ 55 ≤ 99	20	≥ 99	3
	40	≥ 25 ≤ 75	14	≥ 80 ≤ 99	3
	31,5	≥ 1 ≤ 25	10	≤ 20	3
	22,4	≤ 3	6,3	≤ 5	3
Partículas finas (%)	$\leq 0,6$		$\leq 0,6$		Redução do preço de venda, à data da expedição por cada 0,5% ou fracção desta %, de afastamento dos limites de aceitação sem restrições (%).
					4
Finos (%)	$\leq 0,5$		$\leq 0,5$		4
Forma	Índice de achatamento (%)	≤ 15	≤ 15		2
	Índice de forma (%)	≤ 10	≤ 10		2
	Comprimento (%)	≤ 4	≤ 4		2
elementos prejudiciais (%)	< 3		≤ 3		3

Obs. - Exemplos:

a)- Para o coeficiente de Los Angeles, o limite de aceitação sem restrições para o balastro tipo II, é de 20%; deste modo, para valores de 21%, 22% e 23%, as penalizações são respectivamente: 10%, 20% e 30%.

b) Para o comprimento, o limite de aceitação sem restrições é de 4%; deste modo, de 4,1% (inclusive) até 4,5% (inclusive), a penalização no preço de venda é de 2%. De 4,6% (inclusive) até 5% (inclusive), a penalização é de 4%.

c) Para os finos o limite de aceitação sem restrições é de 0,5%; deste modo, de 0,6% (inclusive) até 1,0% (inclusive), a penalização no preço de venda é de 4%. Para 1,1% (inclusive) já se verifica rejeição