

*«...The detailed modeling of the dynamics of railway vehicles is made possible by the several excellent computer packages that are available, which provide sufficiently detailed and validated mathematical models that can be used with confidence in engineering design and development. These models permit the simulation of the actual motion on a specified stretch of track so that the performance of a specific design can be analyzed, or a particular incident recreated. Thus, by simulation the overall performance of a vehicle can be checked. Realism is, of course, essential in design but equates to complexity, and computer output must be tempered with understanding and skepticism. It is important, therefore, that fundamental principles are well understood....»*

A.H. WICKENS [82]



## Cento e più anni di ricerche sullo svio. I “deragliatori”

## A hundred and more years of research on derailments. The “Derailleurs”

Dott. Ing. Massimiliano BRUNER<sup>(\*)</sup>, Prof. Ing. Giuseppe Romolo CORAZZA<sup>(\*\*)</sup>, Dott. Ing. Emilio COSCIOTTI<sup>(\*)</sup>

**Sommario** - Vengono esaminate le ricerche sperimentali sullo svio compiute in Europa nel secolo scorso, con l'impiego di veicoli speciali. I risultati confermano qualitativamente le teorie più avanzate, di CHARTET ed HEUMANN, ponendo altresì nuovi problemi legati alla deformabilità della via ed alla complessità dei fenomeni tribologici attivi nello svio. Ciò impone l'adozione di limiti cautelativi per H ed Y/Q, recepiti anche nella normativa tuttora in vigore, disgiunti dai modelli teorici. Una recente ripresa della sperimentazione, fondata sull'impiego di tecnologie di misura e computazionali avanzate, ha prodotto illuminanti risultati ed ha da un lato confermato i problemi già noti e dall'altro evidenziato fenomeni dinamici imprevedibili a velocità elevate.

### 1. Introduzione

Due note sulla storia delle ricerche sullo svio sono già apparse su questo periodico nei numeri di dicembre 2009 e dicembre 2010. Le ricerche presentate erano tutte di carattere teorico ed erano frutto di lavoro individuale. Tra-

**Summary** - The experimental researches on derailments made in Europe in the last century with the use of special vehicles are examined. The results qualitatively confirm the more advanced theories of HEUMANN and CHARTET but they also pose new problems related to the track deformability and to the complexity of tribological phenomena involved in derailments. This requires the adoption of precautionary limits for H and Y/Q independent from theoretical models. These limits can be found in the technical legislation currently in force. A recent resumption of experimentation, based on the use of advanced computational and measurement technologies, produced enlightening results and on the one hand confirmed already known problems and on the other hand highlighted unforeseen dynamic phenomena at high speeds.

### 1. Introduction

Two notes on the history of research on derailments have already appeared in this magazine in the December 2009 and December 2010 issues. All those researches

<sup>(\*)</sup> Assegnisti di Ricerca presso “Sapienza” Università di Roma – DICEA.

<sup>(\*\*)</sup> Ordinario a r. di Sistemi di Trazione presso “Sapienza” Università di Roma – DICEA.

<sup>(\*)</sup> Research Assistants at the “Sapienza” University of Rome – DICEA.

<sup>(\*\*)</sup> Former Full Professor of Traction Systems at “Sapienza” University of Rome – DICEA.

spariva chiaramente da quegli studi la necessità di verifiche sperimentali che da un lato confermassero l'impianto teorico su cui si fondavano e dall'altro consentissero una più sicura valutazione di taluni parametri, come il coefficiente d'attrito, sui quali gravavano non poche incertezze. L'arco temporale di quei lavori si estendeva per circa settant'anni, dalla fine dell'ottocento a tutta la prima metà del secolo scorso. Quello caratterizzato da una preponderante attività sperimentale durerà a sua volta dalla fine degli anni trenta all'inizio di questo secolo, con una lunga interruzione dovuta alla seconda guerra mondiale. A differenza delle indagini teoriche del primo periodo, quelle sperimentali si caratterizzavano per la notevole quantità di risorse umane e materiali coinvolte. Gli attori principali di queste ultime non potevano che essere le grandi amministrazioni ferroviarie, isolate o più generalmente consorziate fra loro.

## 2. I deragliatori

**2.1.** Lo svio è fenomeno raro ed imprevedibile, per cui non si presta ad osservazioni dirette e le sue conseguenze sono di difficile lettura ed analisi. Per uno studio sperimentale è quindi auspicabile disporre di un meccanismo capace di provocare a comando lo svio di una sala montata e di disporre altresì di un sistema di misura capace di rilevare una serie di grandezze geometriche, cinematiche e dinamiche, tali da consentire o l'identificazione di un modello analitico interpretativo o la verifica di una o più teorie prese a riferimento.

**2.2.** Un artificio generalmente seguito consisteva nell'innescare il fenomeno in un veicolo e nel lasciarlo progredire, salvo interromperlo prima di uno svio catastrofico. Un'alternativa evidenziata dalla letteratura era quella dei modelli in scala, tuttavia bisogna notare che la casistica di prove su modelli non è particolarmente ricca o significativa. I veicoli impiegati nelle sperimentazioni sullo svio furono di vario tipo e da qui in avanti saranno denominati deragliatori, mutuando il nome dal francese "wagon deraillleur" associato alle grandi campagne sperimentali eseguite dalla SNCF.

## 3. I primi esperimenti

**3.1.** Nel 1926 l'Unione delle Amministrazioni Ferroviarie tedesche costituì una Commissione per lo studio del comportamento in marcia delle locomotive, alla quale aderirono quasi subito le ferrovie olandesi e austriache. Da questo organismo derivò nel 1930 una apposita Commissione incaricata dello studio della marcia delle locomotive in curva e sui deviatoi. Le attività di questi organi, assicurate da ampi mezzi, cessarono nel 1939 con lo scoppio della seconda guerra mondiale. Nell'immediato dopoguerra il LABRIJN, già alto dirigente delle ferrovie olandesi, nel timore che tutto il lavoro teorico e sperimentale compiuto nell'anteguerra andasse disperso, pub-

were of a theoretical nature and were the result of individual work. The need of experimental tests appeared clearly, in order to verify the theories and to get more reliable evaluation of certain parameters, such as the friction coefficient, which accounted for quite a few uncertainties. The time span of those works stretched over about seventy years, from the late nineteenth century to the first half of the last century. Those characterised by predominant experimental activities will in turn last from the late 1930s to the beginning of this century, with a long interruption due to World War II. Unlike the theoretical investigations of the first period, the experimental ones were characterised by the big amount of human and material resources involved. The main actors of the latter could only be the great railway administrations, isolated or more commonly in association.

## 2. The Derailleurs

**2.1.** Derailment is a rare and unpredictable phenomenon, it therefore doesn't lend itself to direct observation and its consequences are difficult to read and analyse. For an experimental study, it is therefore desirable to have a mechanism capable of causing derailments at command and a measurement system capable of detecting a series of geometric, kinematic and dynamic measures, to allow, either the identification of analytical models or the verification theories taken as reference.

**2.2.** A method broadly used was to trigger the derailment phenomenon in a vehicle and let it go on until interrupting it before a catastrophic derailment. An alternative highlighted in literature was that of scale models, however it should be noted that the extension of tests on models is not particularly rich or significant. Full scale vehicles used in experiments on derailments were of various kinds and they will be furtherly called derailleurs, from the French name "wagon deraillleur" associated with large experimental campaigns run by SNCF.

## 3. The first experiments

**3.1.** In 1926, the German Railway Administrations Union formed a Committee for the study of the running behaviour of locomotives, which the Dutch and Austrian railways almost immediately joined. In 1930, a special Commission derived from this organism, charged of the study of locomotives running in curve and on turnouts. The activities of these bodies, provided with ample means, ceased in 1939 with the outbreak of the Second World War. In the immediate post-war period, LABRIJN, former Senior Executive of the Dutch railways published a large work, [73] in two parts, in the AICCF Bulletin, that documented the results obtained from the Dutch railways, fearing that all experimental and theo-

blicò sul Bulletin AICCF un ampio lavoro, [73], in due puntate, che documentava la parte dei risultati ottenuti dalle ferrovie olandesi.

**3.2.** Lo svio è al centro del quadro tratteggiato dal LABRIJN. La trattazione si apre con la teoria di HEUMANN, che viene ampiamente esposta. Segue la descrizione degli esperimenti e delle attrezzature via via usate. La mole di risultati è notevole ed il loro grado di significatività elevato. La loro lettura lascia percepire la difficoltà che derivava da una tecnologia di misura ancora immatura rispetto al problema affrontato. Gli aspetti più salienti di una sintesi di questi importanti lavori attengono a:

- a) fenomeni fisici di base come l'aderenza e l'attrito;
- b) meccanismi sperimentali in scala ed in vera grandezza;
- c) parametri influenzanti come carico gravante sulla ruota, forze trasversali, profili di ruote e rotaie, ecc;
- d) limiti di stabilità allo svio.

**3.3.** Alcuni diagrammi, scelti fra molti altri presentati da LABRIJN, introducono grosse novità sull'attrito e sui parametri influenzanti. I tre diagrammi di fig. 13 e le modalità di rilievo mediante il banco di fig. 14 permettono di apprezzare l'importanza dello sforzo compiuto da quegli studiosi e soprattutto la loro modernità giustificata dalla confrontabilità coi diagrammi dei coefficienti di attrito/aderenza che appaiono sulla letteratura più recente. In fig. 13 il coefficiente d'attrito viene posto in relazione a tre parametri fondamentali e cioè:

- angolo d'attacco ruota-rotaia;
- rapporto fra la velocità di rotolamento  $V_R$  e quella di scorrimento trasversale  $V_S$ ;
- carico verticale della ruota.

Al fine di stabilire una migliore rispondenza con la realtà un dispositivo analogo a quello di fig. 14 fu usato su un veicolo a due assi a cui ne era stato aggiunto un terzo in posizione centrale, precursore del "wagon derailleur" di cui si dirà più avanti. Va annotato che il dispositivo di fig. 14 subì molteplici modifiche nel corso delle prove. Senza dilungarsi sul tema delle attrezzature è più interessante riportare alcuni diagrammi finali, ottenuti sperimentalmente su un tender di locomotiva a vapore. In fig. 15 vengono messe a confronto le seguenti grandezze:

- rapporto  $Y/Q$ ;
- angolo d'attacco ruota-rotaia;
- angolo del bordino;
- carico sulla ruota;
- profilo delle rotaie, per le quali son considerati tre diversi stadi di usura.

Per la prima volta compariva così una rappresentazione abbastanza esaustiva del fenomeno dello svio mediante lo studio sistematico dei parametri influenti. C'è da richiamare "un unicum" caratteristico di queste prove

retical work accomplished in the pre-war period would go missing.

**3.2.** The derailment is at the centre of the panorama dashed by LABRIJN. The discussion begins with the theory of HEUMANN, broadly described. The description of experiments and of the equipment used along the way follows. The amount of results is remarkable, and their degree of significance is high. Their reading allows perceiving the difficulty deriving from a still immature measurement technology compared to the problem addressed. The most important aspects of a summary of these works relate to:

- a) basic physical phenomena such as adhesion and friction;
- b) experimental mechanisms and in true and scaled size;
- c) influencing parameters such as load on the wheel, transverse forces, wheel and rail profiles, etc.;
- d) stability limits against derailment.

**3.3.** Some diagrams, chosen among many others presented by LABRIJN, introduce big news on friction and influencing parameters. The three diagrams in fig. 13 and the test bench in Fig. 14 allow appreciating the importance of efforts made by those researchers and especially their modernity justified by the comparability with diagrams of the friction/traction coefficients that appear in the latest literature. In fig. 13, the friction coefficient is placed in relation to three fundamental parameters and that is:

- wheel-rail attack angle;
- relationship between rolling speed  $V_R$  and transverse sliding speed  $V_S$ ;
- wheel vertical load.

In order to establish a better correspondence with reality, a device similar to that of fig. 14 was used on a two-axle vehicle to which a third wheelset added in the middle position, forerunner of the "wagon derailleur" that will be considered later on. It should be noted that the device in fig. 14 underwent many changes during tests. Without dwelling on the equipment topic, it is more interesting to report some final diagrams, obtained experimentally on a steam locomotive tender. In fig. 15 the following quantities are compared:

- $Y/Q$  ratio;
- wheel/rail attack angle;
- wheel flange angle;
- wheel load;
- rail profile, for which three different stages of wear are considered.

For the first time, a fairly comprehensive representation of the phenomenon of derailments featured through systematic study of influential parameters. A characteristic of these tests must be recalled, that is the effect of the rail profile that will be seldom taken into account. However, we must not forget to observe that

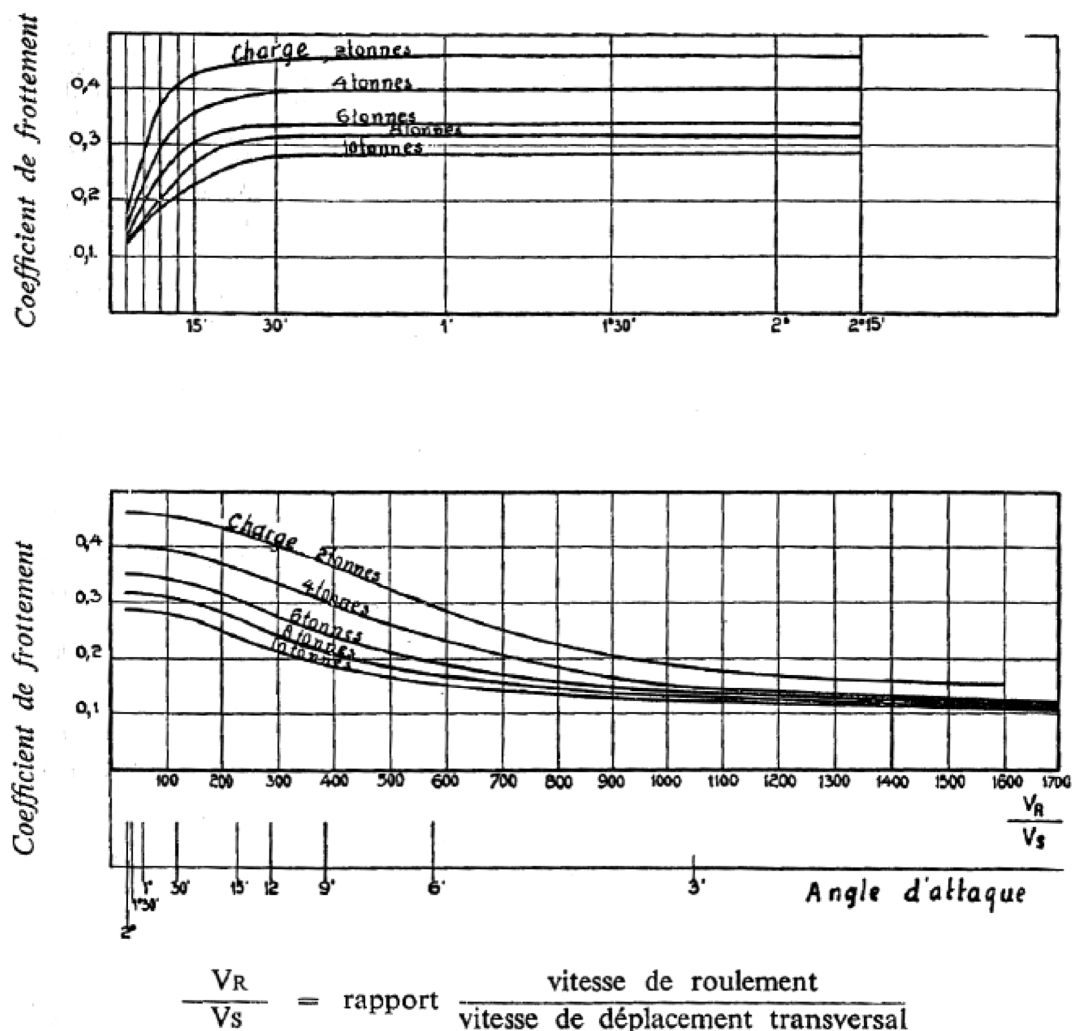


Fig. 13 – In ordinata i coefficienti d'attrito rilevati sperimentalmente in funzione del carico per ruota, dell'angolo di attacco e del rapporto tra le velocità longitudinali e trasversali. The ordinate show the coefficients of friction experimentally detected as a function the of wheel load, the angle of attack and of the ratio between the longitudinal and transverse speed.

che è l'effetto del profilo delle rotaie, che non sarà più preso in considerazione in seguito. Tuttavia non va dimenticato di osservare che tutta la sperimentazione in vera grandezza veniva condotta a velocità molto bassa e ben lontana da quelle di normale esercizio. Ciò indusse quei ricercatori a studiare l'influenza delle velocità sul fenomeno dello svio, con un dispositivo in scala 1:5 e riprodotto e descritto in fig.16. I risultati furono, con l'ottica di oggi, piuttosto deludenti, in quanto dai risultati sperimentali venne ricavata solo una relazione fra la ve-

the whole trial in true size was conducted at very low speed, far from those of normal operation. This led the researchers to study the influence of speed on the phenomenon of derailments, with a 1:5 scale device reproduced and described in fig. 16. The results were rather disappointing, with today's perspective, as only a relationship between the derailment speed  $V$ , in km/h and the load  $Q$ , in t, acting on the front axle was derived from experimental results:

$$V = 6Q + 60 \quad (32)$$

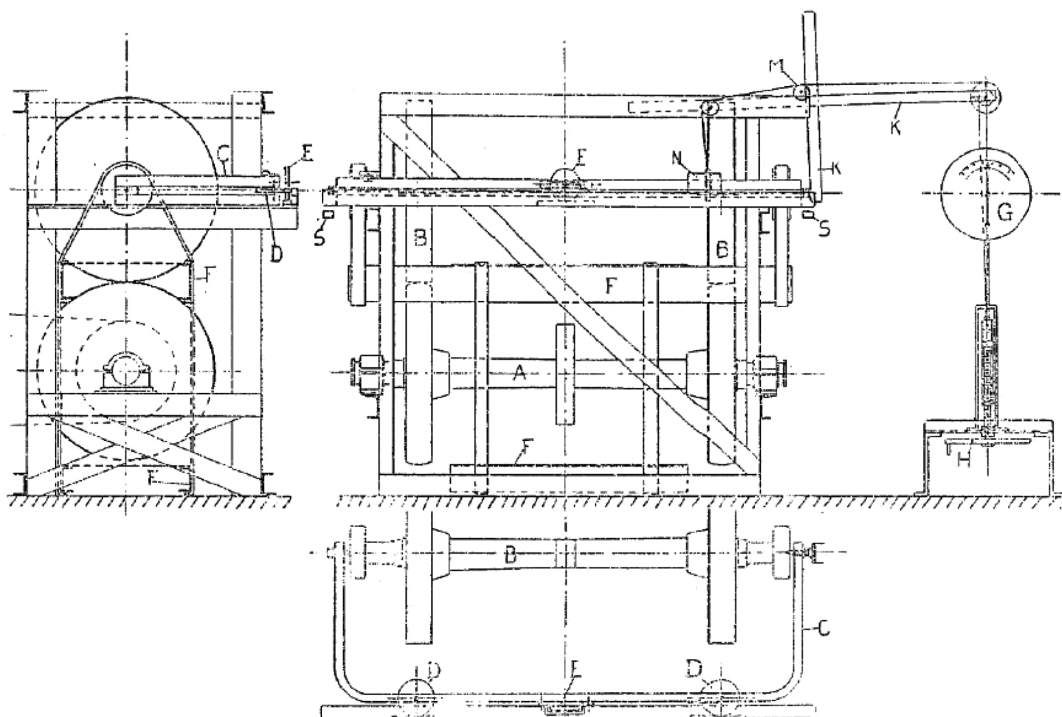


Fig. 14 – Banco prova per la misura dei coefficienti di attrito costituito da due sale contrapposte in un telaio. La sala A simula il binario: essa è mobile assialmente ed è guidata dal telaio C. Un dinamometro, regolato tramite la manetta H applica una forza orizzontale mediante la leva a squadra K, articolata in M. I pesi raccolti nel cestello F trasmettono un carico verticale alla sala superiore A. Le ruote della sala A hanno profilo arrotondato come il fungo di una rotaia, quelle della sala B cilindriche. *Test bench for the measurement of the coefficients of friction consists of two opposing wheelset in a frame. The wheelset A simulates the track: it can move axially and is guided by the frame C. A dynamometer, adjusted by the throttle H applies a horizontal force through the leverage K, articulated in M. The weights collected in the drum F transmit a vertical load to the upper wheelset A. The wheels of the wheelset A have a rounded profile as a rail, those of wheelset B are cylindrical.*

locità di svio V, in km/h ed il carico Q, in t, gravante sull'asse anteriore:

$$V = 6Q + 60 \quad (32)$$

Sulla possibilità di usare in relazione a veicoli reali la (32) le perplessità non sono poche: da un lato appare strano che non vi compaia un qualche parametro caratteristico della deviazione di fondo valle che doveva provocare lo svio, né una qualche indicazione della spinta di bordino agente.

Al termine della lettura dei due articoli di LABRIJN non è possibile sottrarsi all'impressione negativa che deriva dal trovarsi di fronte ad un enorme lavoro incompiuto, non per colpa degli autori, bensì per lo scoppio della guerra. Manca infatti ogni collegamento di natura critica fra la sperimentazione descritta e l'impianto teorico heumanniano che avrebbero dovuto esserne la base e soprattutto le conclusioni. Resta in ogni caso la novità di molti risultati nonché va reso omaggio allo sforzo immaginati-

There are quite a few concerns on the possibility of using (32) in relation to real vehicles: on the one hand it looks strange that a characteristic parameter of the downstream deviation which was to cause derailment, does not appear, nor any indication of the thrust of the guiding wheel flange.

After reading the two papers of LABRIJN one cannot avoid the negative impression that comes from facing a huge unfinished work, through no fault of the authors, but for the outbreak of war. In fact, each link of a critical nature, between the described experimentation and HEUMANN'S theoretical system, supposed to be the basis and above all the conclusions, are missing. In any case, the novelty of many results remains and tribute must be paid for the imaginative effort in design and implementation of test-technology at a time when this was far from matching those in use later in the 1960s.

LABRIJN was apparently involved in the works described and for his work in editing and saving results, otherwise

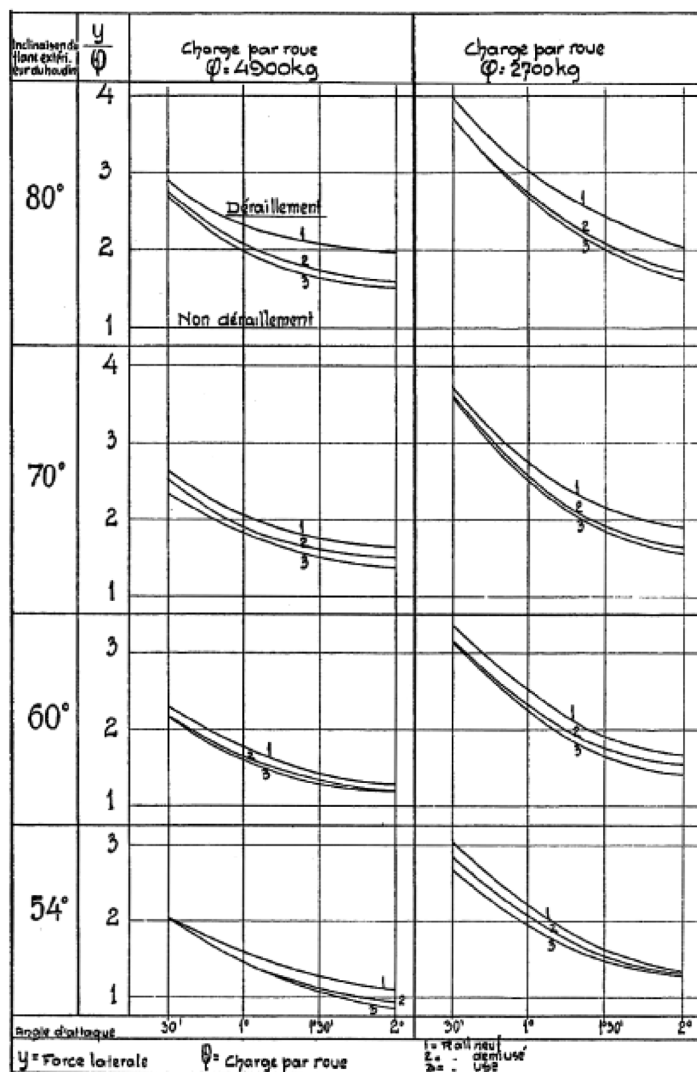


Fig. 15 – Rapporto  $Y/Q$  per quattro diversi angoli della conicità del bordino ( $80^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $54^\circ$ ), in funzione dell'angolo di attacco. Gli indici 1-2-3 sui diagrammi si riferiscono rispettivamente a rotaia nuova, semi usata ed usurata. Ratio  $Y/Q$  for four different angles of taper of the flange ( $80^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $54^\circ$ ), as a function of the angle of attack. The indices on 1-2-3 diagrams refer respectively to track new, used and worn out.

vo per la concezione e la realizzazione della tecnologia per la sperimentazione in un'epoca in cui questa era ben lungi dal poter essere paragonata a quelle in uso a partire dagli anni sessanta.

LABRIJN era stato evidentemente partecipe dei lavori descritti e per la sua opera di elaborazione e salvataggio di risultati, destinati ad andare dispersi, va considerato al

destined to go missing, he should be considered in the same way as others, as a cornerstone of research on derailments. LABRIJN did not continue the work because, at the date of publication of his second paper was dead.

3.4. One final note to the topic mentioned here concerns the fact that HEUMANN had to be informed of the results of these researches as he shortly quotes the relation between sliding and friction between wheel and rail in one of his numerous works [57].

#### 4. The experiences of French Railways

##### 4.1. A general framework

In the early 1950s, the French Railways started a series of experiments on derailments and on the stability of the track, which envisaged the use of derailer vehicles. It concerned the tests previously announced by CHARTET [15], who expected clarifying confirmations of his theory. Numerous developments in France resulted from these experiences, where they continued until 1964 and were resumed on a large scale by ORE.

Before entering into the matter, it should also be highlighted that these studies had connection with researches started in the 1930s on the hunting motions, when the progressive formation of alignment defects in tracks run at speeds then considered as high, was observed. The two phenomena, derailment and misalignment, imposed a dual address of the studies: one concerning vehicles, to mitigate their aggressiveness towards the track and increase the running stability, and the other concerning the track and particularly lateral resistance. This dual address is reflected in contemporary French literature and makes reference to the works by MAUZIN for the first and SONNEVILLE

for the second, indicating only the first among the many that had to deal later with the matter.

##### 4.2. The technology of SNCF experiences

If one recalls the devices documented by LABRIJN, one



railment. For a given final speed, in horizontal section, the angle  $\alpha$  was made to vary to cause derailment.

cannot help but see elements of simplification and rationalisation introduced in these researches. Having abandoned the scale models, the tests were conducted on normal vehicles, equipped for special testing purposes; moreover, the problem of force measurement was bypassed, by applying to the testing wheelset known forces generated on board of the vehicle.

In fig. 17 there is a picture of the first “wagon deraillieur” used in France: it was an old luggage van to which a third special wheelset had been added at the

Fig. 17 – Il “Wagon Dérailleurs” di SNCF. Si noti il “bissel” al centro del veicolo. *The “Wagon Dérailleurs” SNCF. Note the “bissel” at the center of the vehicle.*

5 - 6/2012

5 - 6/2012

meni, svio e disallineamento imposero un duplice indirizzo di studi: uno riguardante i veicoli per attenuarne l'aggressività verso la via ed accrescerne la stabilità di marcia, l'altro riguardante il binario per accentuarne la resistenza laterale. Questo duplice indirizzo si riflette nella pubblicistica francese dell'epoca e fa riferimento ai lavori di MAUZIN per il primo e SONNEVILLE per il secondo, indicando con essi solo i primi fra i numerosi che ebbero ad occuparsi della materia.

#### 4.2. La tecnologia delle esperienze SNCF

Se si ricordano gli artifici documentati da LABRIJN, non si può far a meno di constatare gli elementi di semplificazione e razionalizzazione introdotti in queste ricerche. Abbandonati i modelli in scala ridotta, le prove venivano eseguite su veicoli normali, ovviamente attrezzati per gli scopi particolari di sperimentazione; inoltre veniva aggirato il problema della misura di forze, applicando alla sala di misura forze note generate a bordo del veicolo.

In fig. 17 è riprodotta una foto del primo "wagon derailleur" usato in Francia: si trattava di un vecchio bagagliaio al quale era stata aggiunta al centro una terza sala montata oggetto delle osservazioni sperimentali. In fig. 18 è riportato uno schema di principio dell'articolazione della sala nel veicolo, nonché il sistema leve e bilancieri per l'applicazione delle forze. La sala di misura, contrassegnata alle estremità dalle lettere A e B, è articolata in C come un bissele e non riceve pesi dal telaio del veicolo. Sul telaio del veicolo sono sistemati due cilindri pneumatici CP1 e CP2 mediante i quali si producono le forze laterale e verticale agenti sulla sala, in particolare la spinta laterale H deriva dall'azione di CP1 tramite un leveraggio e viene applicata alla ruota mediante un rullo ad asse vertica-

centre. Fig. 18 shows a principle sketch of articulation of the wheelset in the vehicle, with the levered equalizer system for the application of forces. It can only be subjected to the forces produced by two pneumatic cylinders CP1 and CP2, placed on the vehicle's under frame. This way the lateral and vertical forces acting on the wheelset are produced, in particular the H side thrust derives from the action of CP1 through a leverage and is applied to the wheel by mean of a roller with a vertical axis. The wheel that receives the H thrust has a normal conical profile with wheel flange, while the opposite wheel has a cylindrical profile. This solution aimed to transfer all or almost all the H thrust to the wheel flange. For simplicity of representation, the diagram in fig. 18 is flat: actually, the leverage transmitting the H force is vertical; this difference however has no influence on the results that follow. Due to a series of drawbacks, the "wagon derailleur" was replaced by a completely different device shown in fig. 19. These are two side-by-side vehicles, running in a straight line on two parallel straight tracks. From the vehicle on track 1, a rope system transmitted force H to the measuring wheelset placed on the wagon on track 2, directly to the measuring wheel. The transfer to another vehicle of the operation system allowed varying the vertical load in a wide range on the measuring wheelset regardless of the H side thrust value. On the "wagon derailleur" instead, the load applied to the measuring wheelset caused the discharge of the end wheelsets and the onset of unwanted lateral forces on the same. The operation of the system was controlled by an operator imposing the attack angle, the vertical load and the H force; if the measuring wheelset began overriding the rail, the operator of the "wagon" cancelled the applied forces.

The test speed was contained in the interval between 0 and 40 km/h.

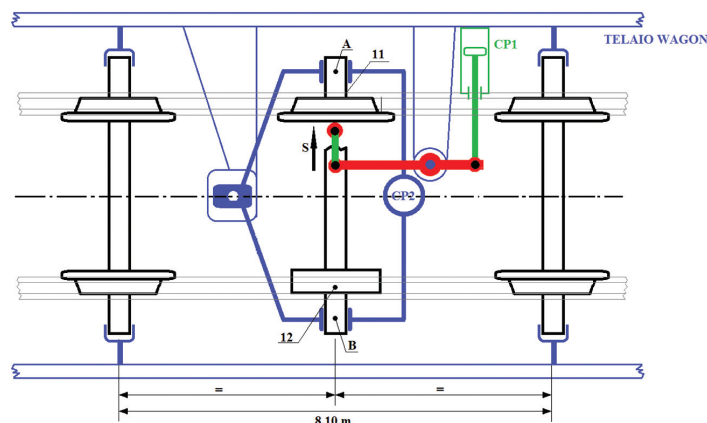


Fig. 18 - Schema di dispositivo per l'applicazione della spinta laterale L sulla sala di misura del "bissele". Il dispositivo è rappresentato in piano mentre nella realtà è tridimensionale. Diagram of device for the application of lateral thrust L on the measurement wheelset of the "bissele". The device is shown in plan and in reality is three dimensional.

#### 4.3. The first results

4.3.1. The first results were unexpected and striking because they put the problem of derailments in the background and focused the attention on the lateral deformability of the track. It was immediately noticed that the lateral forces applied to cause derailments also produced track deformations before the derailment itself could take place. It must be immediately said that the track used for testing was a lightweight one, it being armed with 46 kg/m rails and wooden sleepers.

Two papers on this subject, [76] and [74] appeared a few months away with headings not related to derailments, given that one talks about the

le. La ruota che riceve la spinta  $H$  ha un normale profilo conico con bordino, mentre la ruota opposta ha un profilo cilindrico. Questo artificio aveva lo scopo di trasferire tutta o quasi la spinta  $H$  al bordino. Per semplicità di rappresentazione lo schema di fig. 18 è piano: in realtà il leveraggio che trasmette la forza  $H$  è verticale; questa differenza tuttavia non ha alcuna influenza su quanto segue circa i risultati. A causa di una serie di inconvenienti il "wagon derailleur" fu sostituito da un dispositivo completamente diverso schematizzato in fig. 19. Si tratta di due veicoli affiancati, marcianti in rettilineo su due binari paralleli e solidali longitudinalmente. Dal veicolo sul binario 1, un sistema tele-dinamico trasmetteva alla sala di misura ubicata sul carro del binario 2, direttamente alla ruota di misura, la forza  $H$ . L'aver trasferito su un altro veicolo il sistema di azionamento permetteva di variare in un ampio intervallo il carico verticale sulla sala di misura indipendentemente dal valore della spinta laterale  $H$ . Sul "wagon derailleur" invece il carico applicato alla sala di misura provocava lo scarico delle sale di estremità e l'insorgere sulle stesse di indesiderate forze laterali. Il funzionamento del sistema era controllato da un operatore che imponeva l'angolo d'attacco, il carico verticale e la forza  $H$ ; se la sala di misura iniziava il sormonto della rotaia l'operatore del "wagon" annullava le forze applicate.

La velocità di prova era contenuta nell'intervallo fra 0 e 40 km/h.

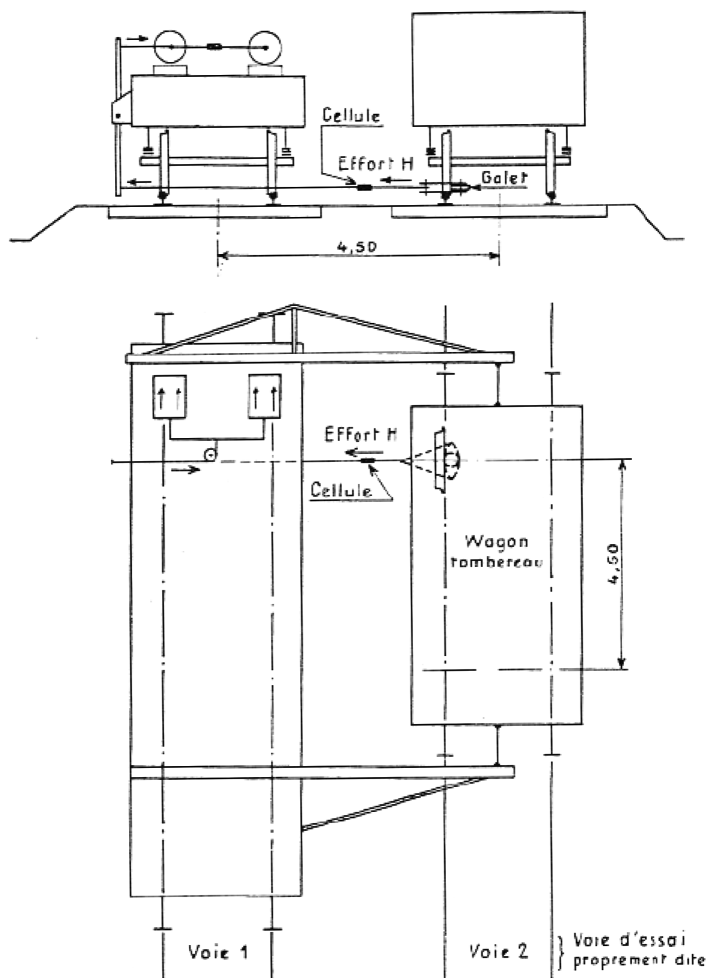


Fig. 19 – Sistema di misura a due veicoli in marcia parallela [24]. *Measuring system on two vehicles running parallel [24].*

#### 4.3. I primi risultati

4.3.1. I primi risultati furono inattesi ed eclatanti in quanto portarono a mettere in secondo piano il problema dello svio ed a concentrare l'attenzione sulla deformabilità del binario. Si era rilevato subito che le forze laterali applicate per provocare lo svio producevano anche deformazioni della via prima che lo svio stesso avesse luogo. Va detto subito che il binario usato per le prove era – ai nostri occhi – un binario leggero essendo armato con rotaie da 46 kg/m e traverse in legno.

Due articoli, [76] e [74], sull'argomento apparvero a pochi mesi di distanza con titoli non correlati allo svio, dato che uno parla dell'uso di sensori a quarzi piezoelettrici e l'altro di elasticità e resistenza laterale del binario.

use of piezoelectric quartz-sensors and the other about elasticity and lateral resistance of the track.

In the first paper MAUZIN, at the time Director of Experimentation of SNCF Rolling Stock, briefly sketched a picture of the results, immediately establishing some essential benchmarks. First, the phenomena theoretically described by CHARTET were confirmed and, in particular, it was highlighted that the limit of derailments was strongly influenced by the attack angle, by the wear conditions of wheels and rails, as well as the dry or wet conditions of the surfaces. Details of these measures were not exposed except for a diagram describing the trend of the  $H/Q$  ratio on the basis of the wheel/rail attack angle and of various line situations.

Nel primo articolo MAUZIN, allora Direttore della Sperimentazione del Materiale Rotabile SNCF, tratteggiava brevemente un quadro dei risultati stabilendo subito alcuni punti fermi fondamentali. In primo luogo si confermavano i fenomeni descritti teoricamente da CHARTET ed in particolare si metteva in evidenza che il limite di svio era fortemente influenzato dall'angolo d'attacco, dallo stato d'usura di ruote e rotaie, nonché dallo stato delle superfici, asciutte o bagnate. Particolari di queste misure non venivano esposti salvo presentare un diagramma nel quale viene descritto l'andamento del rapporto  $H/Q$  in funzione dell'angolo d'attacco ruota/rotaia e di varie situazioni della via.

In fig. 20 (fotografata) è da notare la corrispondenza fra questo diagramma sperimentale e quelli ottenuti per via teorica da CHARTET ed HEUMANN, rispettivamente a fig. 2 e fig. 12, nel primo e secondo articolo di questa serie.

MAUZIN proponeva comunque una sintesi delle esperienze sotto forma di limiti di sicurezza che scaturivano dalla constatazione che al di sotto di essi non si era mai prodotto svio o deformazione del binario. Nell'ordine tali limiti avevano l'espressione:

$$H/Q \leq 1,5 \quad [33]$$

e

$$R = a + bP \quad [34]$$

con  $R$  resistenza laterale del binario,  $a$  e  $P$  sono espressi in tonnellate,  $P$  è il carico per asse, comunque ripartito fra le due ruote,  $H$  la spinta laterale e  $Q$  il carico sulla ruota di guida. A titolo esemplificativo si indicavano i seguenti valori

$$a = 2 \text{ t}, b = 0,4.$$

È semplice calcolare che il limite definito dalla [34] è più restrittivo di quello definito dalla [33] dal che derivava l'affermazione, per la quale, il binario si slinea prima che si verifichi uno svio. MAUZIN, tuttavia, mitigava questa facile deduzione osservando che per lo svio è da temere più di  $Y$  la riduzione dinamica del carico sulla ruota  $Q$  ed inoltre che in entrambi i casi le forze eventualmente superiori ai limiti suindicati dovevano permanere ai livelli critici per diversi metri. MAUZIN nel suo articolo non analizzava l'effetto della variabilità delle caratteristiche dell'armamento, ciò che lascia intuire una suddivisione dei compiti destinata a riflettersi nella pubblicistica.

Più tardi, nella prima metà degli anni 80 il problema dello svio fu ripreso dalle ferrovie francesi mediante una

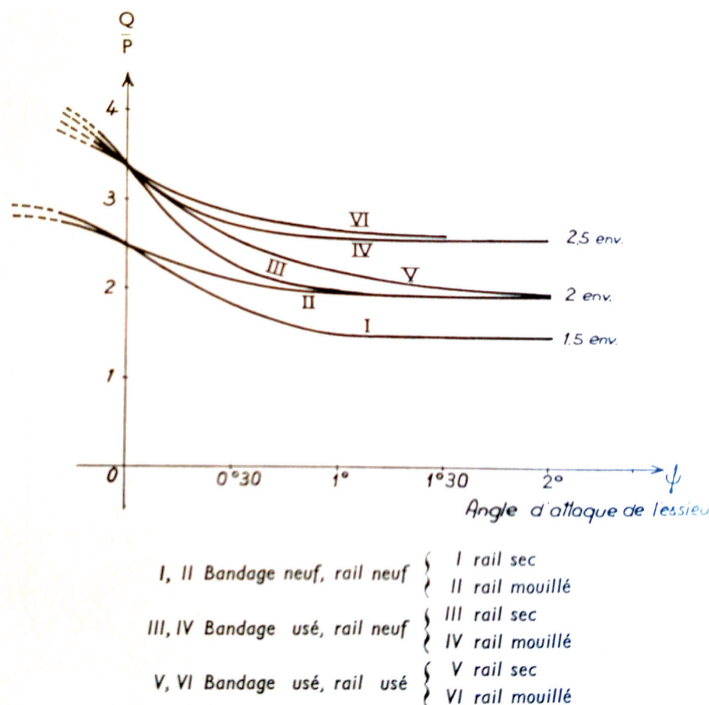


Fig. 20 – Diagramma che mette in relazione il rapporto  $H/Q$  con l'angolo di attacco ruota-rotaia e le condizioni d'attrito nonché lo stato delle rotaie. Si noti la stretta analogia con i diagrammi di CHARTET ed HEUMANN. MAUZIN, come quasi tutti gli autori, usa simboli diversi da quelli odierni, per il carico verticale e la spinta laterale. Diagram that relates the ratio  $H/Q$  with the angle of attack and wheel-rail friction conditions and the condition of the rails. Note the close analogy with the diagrams and CHARTET Heumann. MAUZIN, as almost all authors use symbols other than those of today, for the vertical load and lateral thrust. [75]

In fig. 20 (photographed) the correspondence between this experimental diagram and those obtained theoretically by CHARTET and HEUMANN should be noted, respectively fig. 2 and fig. 12, in the first and second article of this series.

MAUZIN introduced a synthesis of the experiences in form of safety limits arising from the ascertainment that below these, derailments or deformation of the track had never been produced. In the order, those limits had the expression:

$$H/Q \leq 1,5 \quad [33]$$

and

$$R = a + bP \quad [34]$$

with  $R$  lateral resistance of the track and  $P$  being expressed in tonnes.  $P$  is the load per axle, however divided between the two wheels,  $H$  the lateral thrust and  $Q$  the load on the driving wheel. By way of example, the following values were indicated

$$a = 2 \text{ t}, b = 0,4.$$

ampia ricerca sperimentale su un binario in curva di 150 m di raggio a Villeneuve St. Georges. La particolarità ed il rilievo di queste prove risiedono in alcune caratteristiche innovative introdotte:

- a) possibilità di eseguire le prove con qualsiasi tipo di veicolo;
- b) nessuna attrezzatura di misura sui veicoli e rilievo delle interazioni ruota/rotaia per via estensimetrica sulle rotaie;
- c) controventatura del binario in modo da assicurarne l'indeformabilità;
- d) controllo dell'angolo d'attacco ruota/rotaia.

In altri termini l'impiego razionale delle moderne tecnologie faceva "piazza pulita" di tutte le stranezze dei "wagons derailleurs". L'articolo da cui vengono tratte queste informazioni, [77], si incentra, a buon motivo, sulla tecnica di misura ma fornisce solo poche indicazioni sui risultati; forse è da ritenere che questi dovessero confluire nella grande ricerca internazionale ORE C 138, alla quale viene fatto un breve cenno nell'articolo stesso.

4.3.2. A pochi mesi dalla pubblicazione del lavoro di MAUZIN faceva la sua apparizione un articolo a firma SONNEVILLE e BENTOT [74], il cui titolo focalizzava l'attenzione sull'elasticità laterale della via. Il primo di questi Autori, destinato alla notorietà per i suoi futuri brevetti sulle traverse a blocco, era Direttore della Sperimentazione e Ricerca al Servizio Impianti Fissi della SNCF mentre BENTOT era un Dirigente dello stesso Servizio. Già le prime esperienze confermarono la scarsa resistenza laterale del binario usato per le prove, armato con traverse di legno e rotaie da 46 kg/m. Gli esperimenti di svio, per i quali era stato ideato il "wagon derailleur", si rivelarono praticamente impossibili, visto che nella maggior parte dei casi il fenomeno di svio era preceduto dallo slineamento del binario. Inoltre l'applicazione di carichi laterali e verticali turbava, come già accennato, quelli delle sale di estremità, ponendo severi limiti all'estensione del campo di misura. L'introduzione del sistema di misura a due veicoli su binari paralleli se toglieva alcune soggezioni eliminava al tempo stesso ogni possibilità di indagine sullo svio.

Bisogna porre in risalto la grande complessità del quadro sperimentale di fronte al quale si trovarono quegli studiosi: partiti per studiare un fenomeno si scontrarono con l'impossibilità di analizzarlo sperimentalmente e videro invece profilarsi in forma più nitida un diverso obiettivo di ricerca, quello della resistenza laterale della via, sul quale la sensibilità della SNCF si era già indirizzata fin dagli anni trenta [71-72].

I primi risultati ottenuti stabilivano un'importante pietra miliare della ricerca sulla interazione, dalla quale si diramò una quantità di linee di studio che condurranno all'odierna alta velocità. Ciò non rientra fra gli scopi di questo lavoro, focalizzato sullo svio, ma basterà comunque ricordare i fondamentali studi di PRUD'HOMME

It is easy to calculate that the limit defined by [34] is more restrictive than the one defined by [33] from which the claim derived that there is a lateral displacement of the track before derailment occurs. MAUZIN, however, moderated this simple deduction observing that for derailments, the dynamic load reduction on Q wheel load is to be feared more than Y and that in both cases the forces eventually exceeding the limits indicated above, had to remain at critical levels for several metres. MAUZIN did not analyse the effect of the variability of characteristics of the permanent way in his article, which leaves us guessing a subdivision of tasks reflected by the matters of later papers.

Later, in the first half of the 80s, the derailment problem was resumed by French railways using a large experimental research on a track in curve with 150 m radius in Villeneuve St. Georges. The particularity and the importance of these tests lie in some innovative features introduced:

- a) the possibility of performing tests with any type of vehicles;
- b) no measuring equipment on vehicles, the wheel/rail interactions derived from a strain gauge system on the rail;
- c) bracing of the track so as to ensure rigidity;
- d) control of the wheel/rail attack angle.

In other words, the rational use of modern technologies was a "clean sweep" of all the oddities of the "wagons derailleurs." The article from which this information is drawn, [77], focuses on good reason, on the measurement technique, but provides only a few indications on the results; it may perhaps be deemed that these should come together in the large ORE C 138 international research, which is briefly mentioned in the article itself.

4.3.2. A few months after the publication of MAUZIN's work, an article signed by SONNEVILLE and BENTOT [74] focused attention on the lateral elasticity of the line. The first of these Authors, destined to be renowned for his future patents on dual-block sleepers, was the Director of Experimentation and Research at the SNCF Fixed Installations Service whereas BENTOT was a Manager of the same service. The first experiences already confirmed the lack of lateral resistance of the track used for testing, armed with wooden sleepers and 46 kg/m rails. Experiments of derailments for which the "wagon" derailleur "had been conceived, proved to be practically impossible, since in most cases the derailment phenomenon was preceded by the lateral displacement of the track. The introduction of the two-vehicle measurement system on parallel tracks took away some uneasiness but at the same time eliminated any possibility of investigation on derailments.

The great complexity of the experimental framework that the researchers were faced with must be highlighted: having begun the study of a phenomenon, they encountered the inability to analyse it experimentally and instead saw a different research goal looming in a sharper form, the lateral resistance of the line, which the sensitivity of SNCF had already addressed to since the 1930s [71-72].

sulla resistenza, stabilità e comportamento dinamico della via. Per tornare all'argomento di questo lavoro bisogna porre in evidenza che SONNEVILLE e BENTOT da un lato confermano il quadro già disegnato da MAUZIN e dall'altro lo arricchiscono con una grande quantità di risultati numerici ottenuti con prove compiute su numerosi tipi di armamento.

Tali risultati rivelavano che i fenomeni studiati sotto-stavano a numerose influenze esterne non controllabili, ciò che impediva di interpretarli analiticamente. D'altro canto si imponeva a quegli studiosi la necessità di enunciare regole valide sotto il profilo della sicurezza dell'esercizio ferroviario corrente, nell'ambito del quale tutte le influenze esterne cui prima si accennava avevano spazio per manifestarsi. Pertanto potevano al più definirsi limiti prudenziali per i parametri  $Y/Q$  ed  $R$ , imponendo che al di sotto dei limiti stessi non si fossero mai osservati casi di svio o di formazione di difetti laterali nella via.

Le (33) e (34) rappresentavano solo i primi risultati di quella sperimentazione, tuttavia erano destinate a mantenere inalterata la loro struttura e validità fino ai giorni nostri, salvo adattamenti dei coefficienti numerici. Infatti esse compaiono nelle odierne normative sulla dinamica dei veicoli e della via. Alcune riflessioni si impongono sulle relazioni che intercorrono fra le suddette funzioni e la natura dei fenomeni cui sono legate.

4.3.3. Una prima annotazione si riferisce al significato dei limiti così introdotti. Il primo limite, relativo allo svio, stabilisce una barriera rispetto ad un evento traumatico e capace di evolvere in senso catastrofico. Il secondo invece definisce l'insorgere di un fenomeno elastoplastico destinato a diventare pericoloso solo dopo un certo tempo. Ancora, il primo è generalmente associato a particolari condizioni della via come curve strette, difetti laterali macroscopici, scarichi dinamici della ruota di guida; il secondo può innescarsi casualmente e progredire anche su binari in rettilineo ed in buone condizioni di manutenzione. I due fenomeni hanno quindi poco in comune salvo la sensibilità al comportamento dinamico del materiale rotabile, che nelle sue forme più aggressive può aggravare l'uno o l'altro. Non si dimentichi che una delle ragioni che avevano mosso i precursori da POCHET ad HEUMANN, era la propensione allo svio di alcuni tipi di locomotive a vapore.

Pertanto non c'è ragione di vedere svio e slineamento in naturale successione o in mutua esclusione; lo slineamento è per sua natura più frequente perché nasce da forze inferiori, mentre i veicoli con i loro moti di serpeggio generano diffusamente situazioni dinamiche favorevoli.

4.3.4. Si consideri la fig. 21, nella quale sono schematizzate tre diverse situazioni di forze trasversali agenti su una sala isolata. Ad ogni situazione corrisponde un diagramma avente in ascissa i carichi  $Q$  trasmessi alla rotaia (non rappresentati negli schemi) ed in ordinata le forze laterali  $Y$  ed  $H$ . Nei diagrammi sono tracciate due rette

The first results obtained set an important milestone for research on interaction, from which a number of lines of study that will lead to modern high speed branched off. This does not fall in the purposes of this work, focused on derailments, but it is sufficient remembering the fundamental studies on the resistance, stability and dynamic behaviour of the line by PRUD'HOMME. Returning to the topic of this work, we must highlight that SONNEVILLE and BENTOT on one hand confirm the picture already drawn by MAUZIN and on the other enrich it with a large amount of numerical results obtained from tests carried out on many types of permanent way.

These results revealed that the phenomena studied were subject to many external uncontrollable influences that prevented from interpreting them analytically. On the other hand, the researches aimed to identify valid rules in terms of safety of the current railway operation, within which all external influences mentioned before had room for appearing. Therefore, prudential limits for parameters  $Y/Q$  and  $R$  could at the most be defined, under condition that there had never been observed cases of derailments or lateral track defects formation below the limits themselves.

The formulae (33) and (34) accounted only for the first results of the experimentation, they were however doomed to keep their structure and validity unaltered up to the present day, except for adjustments to the numerical coefficients. In fact they appear in today's standards on vehicle and track dynamics. Anyway some reflections are necessary on the relationship between these functions and the phenomena to which they are linked.

4.3.3. A first remark refers to the meaning of the limits so introduced. The first limit, related to derailments, establishes a barrier against a traumatic event, capable of evolving catastrophically. The second limit defines the triggering of an elastoplastic phenomenon destined to become dangerous only after a certain time. Moreover, the former is generally associated with particular conditions of the line such as narrow curves, macroscopic lateral defects, dynamic discharges of the driving wheel and so on; the second can be triggered randomly and progress even on straight tracks and in good maintenance conditions. The two phenomena have therefore little in common except the sensitivity to the dynamic behaviour of rolling stock, which in its most aggressive forms may aggravate one or the other. One of the reasons that had moved precursors, from POCHET to HEUMANN, should not be forgotten, it was the proneness to derailments of certain types of steam locomotives.

Therefore, there is no reason to see derailments and lateral displacements in natural succession or in mutual exclusion; lateral displacement is by nature more frequent because it stems from lower forces which the vehicles generate in their side motions.

4.3.4. In fig. 21 three different transversal forces acting on an isolated wheelset are summarised. Every situation has a corresponding diagram having  $Q$  loads transmitted to the rail (not represented in the diagram) and

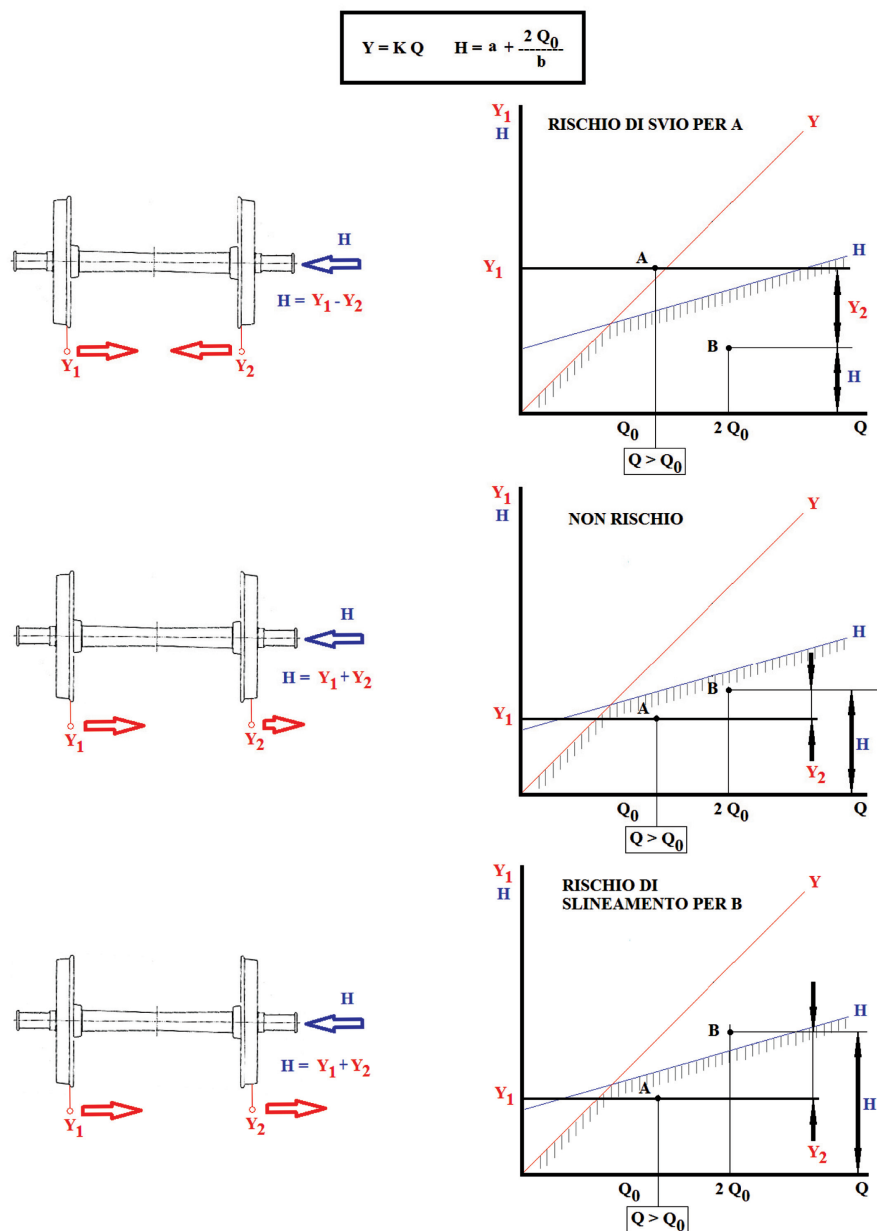


Fig. 21 – Casi di possibile svio o slineamento di una sala montata e confronto. Lo svio, in pratica, presuppone un elevato valore di  $Y_1$  ed una  $Y_2$  di verso opposto. Per lo slineamento, vale la condizione opposta. La condizione di rischio di slineamento può prodursi, ad esempio, nella sala posteriore di un carrello in curva con frenatura o trazione attiva. Si noti che le fluttuazioni dinamiche di  $Q$  agiscono sull'ascissa del punto A, alterando la condizione di rischio. Cases of possible derailment or lateral buckling of a wheelset and comparison. The derailment, in practice, requires a high value of  $Y_1$  and  $Y_2$  of an opposite direction. For the lateral buckling, that is the opposite condition. The condition of risk of lateral buckling can be produced, for example, in the back room of a cart in the curve with a braking or traction active. Note that the dynamic fluctuations of  $Q$  acting on the abscissa of point A, altering the condition of risk.

contrassegnate da Y ed H, corrispondenti ai limiti di sicurezza dei quali si discute, ad esempio quelli definiti quantitativamente dalla norma EN 14363.

Il primo caso in alto è tipico di una sala montata di guida di un carrello che marcia in curva. Supponendo di aver calcolato con uno dei vari metodi disponibili le forze in atto si voglia verificare se sussiste rischio di svio o di slineamento. Il punto A, di ascissa Q ed ordinata Y1, va confrontato con la retta Y, e poiché esso ne è al di sopra significa che il limite di sicurezza non è rispettato. Si osservi che il punto A non ha nessuna relazione con la retta H. La verifica allo slineamento, o più propriamente alla possibilità di generare difetti laterali elastoplastici, dipende invece dalla risultante

$$H=Y1 - Y2$$

e dal carico per asse 2Qo, applicato alla via. Il punto rappresentativo di questa situazione è B e poiché esso si situa largamente al di sotto della retta H, si può concludere che nell'esempio non sussistono rischi di deformazione elastoplastica della via.

Gli altri due casi si differenziano dal primo perché le due forze Y1 ed Y2 hanno lo stesso verso e quindi i loro moduli si sommano per determinare quello di H. Nel secondo caso A e B restano al disotto delle rispettive rette limiti, mentre nel terzo è verificata la sicurezza allo svio ma non quella allo slineamento. È interessante allora chiedersi come situazioni del genere possano prodursi in marcia.

Gli ultimi due schemi rappresentano proprio la situazione delle forze laterali nella sala centrale del "wagon derailleur"; è da notare che la forza H si ripartisce in misura indeterminata fra le due ruote finché c'è scorrimento. Al cessare dello scorrimento la ruota esterna equilibrerà da sola la forza H finché questa è minore della massima reazione che può offrire il bordino, oltre c'è lo svio. Il primo schema corrisponde alla sala di guida di un carrello in curva in iscrizione libera. La verifica sperimentale di siffatte situazioni dinamiche però comportava la disponibilità di tecniche di misura e di possibilità di calcolo a quei tempi impensabili.

## 5. Le esperienze giapponesi

Nella prima metà degli anni 70 le JNR condussero una grande campagna di ricerche sullo svio, utilizzando, fra l'altro, un furgone deragliatore molto simile a quello francese. Si spera di poter trattare questo tema in una apposita memoria dedicata alla scuola giapponese. Basti però segnalare fin d'ora un carattere originale di quella ricerca consistente nell'estesa osservazione preliminare dei carichi verticali delle ruote in condizioni operative normali.

## 6. Il progetto DYSAF [44]

6.1. Dopo circa mezzo secolo dalle ricerche francesi veniva avviata una ricerca basata fra l'altro sull'impiego di un deragliatore, che mirava ad esplorare un settore nel quale la

lateral Y and H forces in the y-axis. Two lines marked by Y and H are drawn in the diagrams, corresponding to the safety limits being discussed, such as for instance those quantitatively defined by the EN 14363 standard.

The first case above is typical of a driving wheelset of a bogie running in curve. Let's assume we have calculated forces in place with one of the various methods available, and want to check if there is risk of derailment or lateral displacement. Point A determined by the wheel load Q and lateral force Y1 must be compared with the straight line Y, and since it is above, this means that the safety limit is not met. It must be noted that point A has no relation with line H. The lateral displacement verification, or more properly the ability to generate side elastoplastic defects, instead depends on the resulting

$$H=Y1 - Y2$$

and on the 2Qo axle load, applied to the track. The representative point of this situation is B and because it lies largely below the H line, one can conclude that there are no danger of elastoplastic deformation in this example.

The other two cases differ from the first because the two forces Y1 and Y2 are in the same direction and their modules are therefore added to determine that of H. In the second case A and B are below their respective limit lines, while in the third the derailment safety is verified but not the lateral displacement one. It is interesting then to wonder how such situations can occur during operation.

The last two diagrams represent the situation of lateral forces in the central wheelset of the "wagon derailleur"; it should be noted that force H is shared in an indeterminate extent between the two wheels as long as they are running. Once running comes to a halt, the external wheel alone will balance force "H" until this is less than the maximum reaction that the wheel flange can offer; beyond there is derailment. The first diagram corresponds to the driving wheelset of a bogie freely running through curves. The wide experimental verification of such dynamic situations, however, implied the availability of measurement techniques and calculation tools unthinkable at that time.

## 5. Japanese experiences

In the first half of the 70s, the JNRs conducted a major research campaign on derailments, using, among others, a derailleur van very similar to the French one. Hopefully we can deal with this issue in a separate paper dedicated to the Japanese school. However, it is sufficient for now to point out an original feature of that research consisting of the extended preliminary observation of vertical loads of wheels in normal operating conditions.

## 6. The DYSAF project [44]

6.1. After almost half a century from the French research, a research based on the use of a derailleur was

sperimentazione sullo svio non aveva avuto alcuna occasione di estrinsecarsi, e cioè quello delle velocità elevate fino a 160 km/h. Il progetto europeo denominato DYSAF era affidato ad un gruppo di ricerca di tutto rispetto essendo composto da organismi internazionali come ERRI ed ERISMAN, da società ferroviarie come DB AG, SNCF, ÖBB ed NS TO, da costruttori come Siemens SGP e FIAT Ferroviaria, da università come Graz, Monaco e Bologna e da studi professionali come C+K ed ArgeCare. Il titolo completo della ricerca è "Assessment of vehicle-track interaction with specific reference to DYnamic SAFety in operating conditions". Studi e progetti hanno avuto luogo in varie sedi mentre le esperienze sono state eseguite nell'agosto 2000 al centro sperimentale di Velim. Uno degli aspetti innovativi di questa ricerca è stato lo IDMS, Integrated Dynamic Measuring System, nel quale la tecnologia della sperimentazione si integrava con i sistemi di calcolo usati, Medyna e ArgeCare.

**6.2.** Per le prove è stata utilizzata una carrozza di misura della DB. La carrozza oltre ai due usuali carrelli estremi aveva un carrello centrale a tre assi con una speciale attrezzatura per le misure relative allo svio. In particolare i due assi esterni del carrello erano inquadrati in un normale telaio e non esercitavano specifiche funzioni, mentre quello centrale poteva ruotare rispetto agli altri due in modo da assumere un angolo d'attacco rispetto alla via di  $\pm 5$  mrad. Sospensioni pneumatiche permettevano di imporre alle varie boccole i carichi verticali voluti; in aggiunta a ciò l'asse centrale poteva subire spinte laterali di svio. È da presumere, poiché non viene specificato, che il sistema di misura delle interazioni fosse quello tedesco più avanzato.

**6.3.** Il comportamento del veicolo veniva confrontato coi risultati di un programma multibody, nel quale alle masse delle ruote del carrello centrale era associata una parte significativa della massa della via. Il programma di simulazione permetteva di riprodurre contatti ruota-rotaia non ellittici e multiareolari. Fatte tutte le dovute proporzioni va rilevato che il carrello centrale in realtà assomigliava molto al vecchio "wagon deraillleur" della SNCF.

**6.4.** Le modalità di prova erano di carattere attivo nel senso che il fenomeno da studiare veniva, per quanto possibile provocato a comando mediante forze impulsive laterali della durata di 0,1 s, intervallate periodicamente di 1,25 s. I rapporti Y/Q venivano fatti variare a gradini nell'intervallo  $1 \div 1,8$ . Analoghe le varianti dell'angolo d'attacco nel campo già accennato prima. Per evitare rovinosi svii si considerava come avvenuto lo svio quando il sollevamento della ruota col bordino in contatto laterale con la rotaia raggiungeva i 7 mm, lasciando così un certo margine di sicurezza.

**6.5.** La ricca dotazione di sistemi di calcolo e di tecnologia di misura era presupposto di un ampio insieme di risultati, che sono stati sintetizzati in [44] in modo veramente efficace. Nell'esame di quanto verrà proposto nei prossimi punti c'è da tener presente che a nuove prospettive corrispondono in genere nuovi problemi, sui quali la ricerca del futuro dovrà pronunciarsi.

**6.6.** Un primo risultato di spicco deriva da un'ampia

begun that aimed at exploring an area in which experimentation on derailments had not had any opportunity to manifest itself, namely that of high speeds up to 160 km/h. The European project named DYSAF was entrusted to a group of highly respected researchers composed of international bodies like ERRI and ERISMAN, by railway companies such as DB AG, SNCF, ÖBB and NS TO, of manufacturers like Siemens SGP and FIAT Ferroviaria, by universities such as Graz, Munich and Bologna and by professional studios like C+K and ArgeCare. The full title of the research is "Assessment of vehicle-track interaction with specific reference to DYnamic SAFety in operating conditions". Studies and projects were held in many places at various venues, whereas experiences were carried out in August 2000 at the experimental centre of Velim. One of the innovative aspects of this research was the IDMS, Integrated Dynamic Measuring System, in which experimental technology integrated with the calculation systems used, Medyna and ArgeCare.

**6.2.** For testing, a DB measure car was used. The car, in addition to the usual two end bogies, had a central three-axle bogie with special equipment for measures relating to derailments. In particular, the outer two axles of the bogie were framed in a normal bogie under frame and did not perform specific functions, while the central one could rotate with respect to the other two in order to take on an attack angle of  $\pm 5$  mrad with respect to the rail. Pneumatic suspensions allowed imposing the desired vertical loads to the axle boxes; in addition the middle wheelset could bear lateral derailment thrusts. It is assumed, since it is not specified, that the measurement system of interactions was the most advanced German one.

**6.3.** The behaviour of the vehicle was compared with the results of a multi-body programme, in which the masses of the central bogie wheels were associated with a significant part of the track mass. The simulation programme allowed reproducing non-elliptic and multi-point wheel-rail contacts. Once all the due proportions were made, it should be noted that the central bogie actually looked very similar to the old SNCF "wagon deraillleur".

**6.4.** The methods for testing were of an active nature in the sense that the phenomenon to be studied was, as much as possible, caused at command by impulsive lateral forces of 0.1 s, periodically spaced out by 1.25 s. The Y/Q ratios were varied in steps in the range of  $1 \div 1.8$ . The attack angle lies in the fields mentioned before. To avoid disastrous derailments, these were considered as occurred when the lifting of the wheel with the wheel flange in side contact with the rail reached 7 mm, thus leaving a certain safety margin.

**6.5.** The rich endowment of computing systems and of measurement technology implied a large set of results that have been most effectively summarised in [44]. In examining what will be proposed in the following points, we need to bear in mind that new researches generally prospects new problems, on which future research will have the word.

**6.6.** A first prominent result derives from a wide

serie di rilievi del coefficiente d'attrito fra ruota e rotaia in varie condizioni di moto relativo. Misure effettuate col tribometro indicano per rotaie asciutte valori  $0,3 \div 0,69$ , col minimo osservato dopo una pioggia ed il massimo in un giorno di sole; inoltre la differenza fra le due rotaie varia nell'intervallo  $0,02 \div 0,24$ .

Per il bordino l'intervallo osservato è  $0,24 \div 0,62$ . Si conferma così la grande variabilità e soprattutto la conseguente grande difficoltà a gestire questo parametro, specie in un processo di simulazione. In quella ricerca per ovviare a questa difficoltà in dati processi di simulazione al posto dei valori tribometrici veniva introdotto un valore d'attrito ottenuto da misure di forze in prove che sarebbero poi state riprodotte in simulazione.

Ad esempio è noto che il rapporto  $Y/Q$  della ruota anteriore interna non a bordino approssima il coefficiente d'attrito trasversale ruota-rotaia.

**6.7.** Un'innovazione di questa campagna di esperimenti è rappresentata dalla misura del sollevamento della ruota rispetto alla rotaia, ottenuto mettendo in relazione la distanza del telaio del carrello rispetto alla rotaia con la distanza fra sala e telaio.

Questa possibilità ha consentito di osservare un fenomeno imprevisto e cioè che mentre durante l'impulso c'è un'ottima corrispondenza fra il parametro  $Y/Q$  ed il sollevamento della ruota, nell'intervallo fra due impulsi successivi è dato di osservare consistenti sollevamenti senza una corrispondente variazione di  $Y/Q$ .

Questo genere di fenomeno non ha trovato conferma nelle simulazioni, ciò che ha portato gli autori di [44] ad avanzare qualche dubbio sul fatto che il rapporto  $Y/Q$  possa essere il miglior indicatore del pericolo di svio.

**6.8.** Un altro fenomeno osservato, ma non riprodotto dalle simulazioni, è rappresentato dalla comparsa di vibrazioni verticali a varia frequenza con una minima corrispondente a quella di rotazione della sala. Ad una riduzione della rigidità della soletta sottorotaia è corrisposto l'aumento della frequenza e la riduzione dello smorzamento delle vibrazioni in questione.

Al tempo stesso i già citati autori ipotizzavano una possibile influenza da parte del sistema idromeccanico di attuazione della spinta  $H$ , senza però che il problema così posto potesse essere oggetto di approfondimenti.

Un altro risultato rimasto incompleto sta nella constatazione che il rapporto  $Y/Q$  al limite dello svio tende ad aumentare con il ridursi della durata della forza impulsiva; un'identificazione analitica di questo fenomeno non ha potuto essere posta in atto per l'inadeguata numerosità dei risultati disponibili.

**6.9.** Il risultato principale di questa ricerca è quello della buona attitudine della simulazione a riprodurre, almeno in condizioni quasi statiche, un fenomeno complesso come lo svio a velocità elevate. Restano però aperti i problemi delle vibrazioni verticali e dalla gestione statica e dinamica del coefficiente di attrito nei processi di simulazione.

range of surveys on the friction coefficient between wheel and rail in various conditions of relative motion. Measurements made with a tribometer show  $0.3 \div 0.69$  values for dry rails, with a minimum observed after rain and a maximum on a sunny day; furthermore, the difference between the two rails varies in the range  $0.02 \div 0.24$ .

For the wheel flange, the range observed is  $0.24 \div 0.62$ . Great variability is therefore confirmed together with the great difficulty in managing this parameter, particularly in a simulation process. In that research, in order to overcome this difficulty in given simulation processes, instead of tribometric values, a friction value was introduced, obtained by force measures in tests that would have later been reproduced in simulation.

For example, it is known that the  $Y/Q$  ratio of the inner non-flanged front wheel approximates the transverse wheel-rail friction coefficient.

**6.7.** An innovation of this campaign of experiments is represented by the measurement of wheel lifting compared to the rail, obtained by relating the distance of the bogie under frame with respect to the rail with the distance between wheelset and under frame.

This opportunity has allowed observing an unexpected phenomenon and that is, that while during the impulse there is a correspondence between the  $Y/Q$  parameter and the lifting of the wheel, in the interval between two following impulses significant lifting can be observed without a corresponding change in  $Y/Q$ .

This kind of phenomenon has not been confirmed in simulations and has brought the authors of [44] to advance some doubt that the  $Y/Q$  ratio might be the best indicator of derailment danger.

**6.8.** Another phenomenon observed, but not reproduced by the simulations, is the appearance of vertical gestations with various frequencies with a minimum corresponding to that of the wheelset rotation. Stiffness changes of the under-rail pad corresponds to increased frequency and damping reduction of the vibrations involved.

At the same time, the already mentioned authors suggested a possible influence of the hydro-mechanical actuator system of the  $H$  thrust, without, however, that the problem thus posed could be subject to in-depth examination.

Another result that remained incomplete lies in the fact that the  $Y/Q$  ratio on the limit of derailments tends to increase with the reduced duration of impulsive force; an analytical identification of this phenomenon could not be put in place due to the inadequate number of results available.

**6.9.** The main finding of this research is the good attitude of the simulation in reproducing a complex phenomenon such as derailments at high speeds, at least in quasi-static conditions. However, vertical vibration problems and those of static and dynamic management of the friction coefficient in simulation processes remain.

## 7. Sintesi e riflessioni sulle esperienze coi “wagon derailleurs”

7.1. Per una sintesi più completa delle esperienze europee sullo svio occorrerà aspettare l'esame dei lavori del gruppo C138, che saranno oggetto di approfondita valutazione nel corso di un prossimo lavoro sull'argomento:

## 7. Summary and reflections on experiences with “wagon derailleurs”

7.1. For a more complete summary of European experiences on derailments, we should take into account the works the C138 Group, that will be the subject of in-depth evaluation in an upcoming paper: here we can

TABELLA DI CONFRONTO - COMPARISON CHART

| Caratteristiche<br><i>Features</i>                                    | LABRIJN                                                                                                                                                        | SNCF                                                                                                                                                     | DYSAF                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Campo di prova<br><i>Test field</i>                                   | Modelli e binario normale<br><i>Models and normal track</i>                                                                                                    | Binario corrente, molti siti<br><i>Main track, many sites</i>                                                                                            | Monosito su binario normale<br><i>Single site on normal track</i>                                                                                                                                                      |
| Velocità<br><i>Speed</i>                                              | Basse<br><i>Low</i>                                                                                                                                            | Basse<br><i>Low</i>                                                                                                                                      | Elevate fino 180 km/h<br><i>High up to 180 km/h</i>                                                                                                                                                                    |
| Problemi affrontati<br><i>Problems faced</i>                          | Coefficiente attrito, conicità, usura, angolo d'attacco, forma bordini, Y/Q<br><i>Friction coefficient, taper, wear, attack angle, wheel flange shape, Y/Q</i> | Y/Q, H<br>Tipo del binario<br><i>Track type</i>                                                                                                          | Coefficiente d'attrito, Y/Q, H. Identificazione, comportamento dinamico, angolo d'attacco<br><i>Friction coefficient, Y/Q, H. Identification, dynamic behaviour, attack angle</i>                                      |
| Modello di riferimento<br><i>Reference model</i>                      | HEUMANN                                                                                                                                                        | CHARTET                                                                                                                                                  | NADAL                                                                                                                                                                                                                  |
| Epoca<br><i>Period</i>                                                | Anni '30<br><i>1930's</i>                                                                                                                                      | 1950-1970                                                                                                                                                | 2000                                                                                                                                                                                                                   |
| Veicolo di prova<br><i>Test vehicle</i>                               | Vari speciali 1:1, modelli in scala<br><i>Various, special 1:1 models, Scale models</i>                                                                        | “Wagon derailleur” a 3 assi, coppia di “wagons” in parallelo<br><i>3 axle “Wagon derailleur”, pair of “wagons” on parallel tracks</i>                    | Vettura a carrelli con “carrello derailleur” a 3 assi in posizione intermedia<br><i>Bogie vehicle with 3 axle “derailleur bogie” in intermediate position</i>                                                          |
| Calcolo computerizzato<br><i>Computerised calculation</i>             | No                                                                                                                                                             | No                                                                                                                                                       | Si                                                                                                                                                                                                                     |
| Multicorpo<br><i>Multi-body</i>                                       | No                                                                                                                                                             | No                                                                                                                                                       | Si                                                                                                                                                                                                                     |
| Tecnologia di misura<br><i>Measurement technology</i>                 | Complessa ma inadeguata<br><i>Complex but inadequate</i>                                                                                                       | Buona, molto semplice<br><i>Good, very simple</i>                                                                                                        | Efficace, versatile, complessa<br><i>Efficient, versatile, complex</i>                                                                                                                                                 |
| Risultati<br><i>Results</i>                                           | Originali, interessanti ma parziali, a causa di interruzione per causa bellica<br><i>Original, interesting but partial, due to interruption for war</i>        | Esplicativi di due diversi fenomeni. Introduzione di limiti di sicurezza<br><i>Explanatory of two different phenomena. Introduction of safety limits</i> | Evidenziazione di fenomeni dinamici imprevisti, analisi dinamica, Apertura nuove prospettive di ricerca<br><i>Highlighting of unexpected dynamic phenomena, dynamic analysis, Opening of new research perspectives</i> |
| Generalizzabilità dei risultati<br><i>Generalizability of results</i> | Modesta<br><i>Small</i>                                                                                                                                        | Ottima<br><i>Excellent</i>                                                                                                                               | Da approfondire<br><i>To deepen</i>                                                                                                                                                                                    |

qui tuttavia si può tentare un primo approccio basato sulle esperienze dei “derailleurs”. A questo scopo viene presentata di seguito una tabella con quelli che si ritengono gli elementi più salienti delle esperienze descritte.

**7.2.** Le ricerche, scaglionate lungo un arco di poco meno di settant'anni, esprimono un unico marcato interesse verso uno sviluppo sperimentale capace di superare gli impasse della ricerca teorica. Una parte non trascurabile degli sforzi compiuti è stata assorbita dall'ideazione e progettazione di soluzioni tecnologiche capaci di attuare a comando un svio mediante modelli in scala o veicoli in vera grandezza. Tutte le ricerche hanno prodotto risultati validi in vari settori, risultati che si integrano fra loro senza contraddirli.

**7.3.** Fra gli elementi di diversità il primo che colpisce l'osservatore riguarda la durata e la dimensione della ricerca, alle quali sembrano correlarsi l'ampiezza e la generalizzabilità dei risultati. Le tecnologie sono diverse e si affinano progressivamente sino ad integrarsi con procedure di calcolo automatico. Solo la campagna sperimentale francese fornisce, pur tiepidamente, elementi di conferma e supporto ad un impianto teorico di riferimento. Da questa stessa campagna emerge un indirizzo di ricerca teorico-sperimentale sulla stabilità del binario.

La prima e la terza ricerca hanno generato interessanti risultati sui parametri tribometrici, ai quali si legano anche nuovi problemi. In direzione opposta va la risoluta semplificazione del problema introdotta dai francesi con i valori limite di sicurezza, di cui già qualcosa si profilava nel lavoro di LABRIJN. Da ciò derivano da un lato l'uso generale ed immediato di un risultato di ricerca e dall'altro l'affossamento concettuale delle vecchie formule sul limite di svio, anche se esse continuano pervicacemente a circolare p. es. nelle EN: altri ricercatori tentano di rivitalizzare la formula di NADAL.

È da registrare infine che tutti hanno usato veicoli atipici, portatori a loro volta di problemi statici e dinamici, lasciando fuori i veicoli di normale impiego.

**7.4.** Le prime due ricerche sperimentali hanno coinvolto una quantità di grandi amministrazioni omogenee per tipologia, hanno avuto modo di estrinsecarsi lungo un arco temporale esteso e probabilmente non subivano gli effetti di restrizioni economiche. Con la ricerca avanzata DYSAF questo scenario cambia completamente perché i soggetti sono di natura diversa fra loro ed anche in potenziale concorrenza ed essi devono operare con vincoli temporali e budgetari prefissati.

**7.5.** A questo punto, il lavoro di ricostruzione storica ed analisi critica deve ancora andare avanti, come più volte accennato. Tuttavia non appare intempestivo iniziare ad affrontare l'argomento dello sviluppo futuro della ricerca sullo svio in termini di contenuti specifici e, come appare più consoni ai tempi, d'inserimento in contesti collaterali. In sede europea è in atto uno sforzo di investigazione sulla possibilità di sostituire la sperimentazione del nuovo materiale rotabile, giudicata dispendiosa, mediante simulazioni in grado di riprodurre tutte le situazioni operative ipotiz-

however try a first approach based on the experiences of “derailleurs”. The table below is presented for this purpose together with what are felt to be the most salient elements of the described experiences.

**7.2.** Researches, spread out over a period of about seventy years, show a single marked interest in experimental developments capable of overcoming the impasse of theoretical research. A non-negligible part of the efforts made, was absorbed by conceiving and designing technological solutions capable of implementing derailment at command, using scale models or full size vehicles. All researches have produced valid results in different areas, these integrate with each other without contradicting themselves.

**7.3.** Among the elements of diversity, the first that strikes the observer concerns the duration and size of the research, which seem to relate to the amplitude and the generalizability of results. Technologies are different and are progressively refined to integrate with automatic calculation procedures. Only the French experimental campaign provides some confirmation and support elements to a theoretical reference framework. From these research campaigns emerges a theoretical and experimental address concerning the track stability.

The first and third researches generated interesting results on tribometric parameters, to which new problems are also connected. The resolute simplification of the problem introduced by the French with the limit values of safety, goes in the opposite direction; something that already loomed in LABRIJN work. From this arises a general and immediate use of a research result and the conceptual collapse of old formulas on derailment limits. Though they consistently continue to circulate, for instance in EN, whereas other researchers attempt to revive or take as reference the NADAL formula.

Finally, it is to be recorded that everyone has used atypical vehicles, that in turn lead to static and dynamic problems, leaving out the normal use vehicles.

**7.4.** The first two experimental studies have involved a number of large homogeneous by type administrations, which acted over an extended period of time and probably did not suffer the effects of economic restrictions. With the advanced DYSAF research, this scenario changes completely, because the subjects are different in nature among themselves, also potential competitors, and must operate with time constraints and budgetary limits.

**7.5.** At this point, as repeatedly mentioned, the historical reconstruction work and critical analysis must still go ahead. However, it does not appear untimely to begin arguing about the future development of research on derailments in terms of specific content, and as appears most appropriate to the times, of introduction in broader frame contexts. Within Europe there is an on-going investigation effort on the possibility of replacing the experimentation of new rolling stock, deemed expensive, using simulations capable of reproducing all imaginable

zabili. Convergono quindi due esigenze una scientifica l'altra economica, nello ambito delle quali gli studi sullo svio hanno favorevoli opportunità d'inserimento.

Fatte tutte le riserve su quando e cosa potrà derivare dagli studi in questione, è quanto meno auspicabile che essi risolvano una serie di problemi che via via sono emersi anche in questa sede. In particolare è da attendersi che essi rendano agevole:

- l'integrazione del sistema veicolo col sistema della via, caratterizzata con i suoi parametri inerziali, elastoplastici e di difettosità;
- lo sviluppo progressivo e/o discontinuo di usure nel veicolo e nella via, ivi compresa la gestione dinamica delle impronte di interazione ruota-rotaia;
- la gestione dinamica dei parametri tribometrici;
- l'interpretazione delle masse di risultati provenienti dalla sperimentazione o dal calcolo computerizzato;
- la soddisfazione dell'esigenza generale di semplicità completezza e trasparenza;
- l'apertura a sistemi di misura per impiego operativo a bordo dei veicoli a fini di sicurezza, svio incluso, e di studio dell'evoluzione dei fenomeni di degrado.

Tutto ciò valga solo a fini esemplificativi poiché l'argomento dovrà essere ripreso.

operational situations. Therefore, two needs converge, a scientific one and one in which the derailment studies have favourable introduction opportunities.

All reserves made on when and what may derive from these studies i, it is at the very least desirable that they solve a number of problems emerged till this moment. In particular, it is to be expected that the following are made easy:

- vehicle system integration with the track system characterised with its inertial, elastoplastic and defect parameters;
- the take into account of progressive and/or discontinuous development of wears of the vehicle and of track, including the dynamic management of the wheel-rail interaction areas;
- dynamic management of tribometric parameters;
- the interpretation of results from experimentation or from computerised calculation;
- the satisfaction of a general need of simplicity, transparency and completeness;
- the opening to measuring systems for operational use on board of normal vehicles for safety purposes, and for the study of the evolution of degradation phenomena.

Everything is just to mark a reference situation about a topic that will have to be resumed.

### BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [71] BLONDEL, "La résistance de la voie aux oscillations de lacet des véhicules", Revue Générale des Chemins de Fer, dicembre 1932, pagg. 439-451.
- [72 ] BLONDEL, "Le lacet des véhicules et la stabilité latérale de la voie", Revue Générale des Chemins de Fer, settembre-ottobre 1945, pagg. 97-101.
- [73] LABRIJN, "Roue et rail", Bulletin AICCF, novembre 1950, pagg. 2243-2276 e gennaio 1951, pagg. 21-45.
- [74] SONNEVILLE, "Elasticité et résistance latérale de la voie", Bulletin AICCF, novembre 1953, pagg. 1059-1083.
- [75] MAUZIN, "Utilisation dans les Chemins de Fer français des appareils piézo-électriques pour la mesure d'efforts", Revue Générale des Chemins de Fer, gennaio 1938, pagg. 3-33.
- [76] MAUZIN, "Les appareils à quartz piézoélectrique dans l'étude de la stabilité des véhicules des Chemins de Fer et d'autres questions ferroviaires", Revue Générale des Chemins de Fer, maggio 1953, pagg. 253-273.
- [77] MOREAU, "La vérification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges", Revue Générale des Chemins de Fer, aprile 1987, pagg. 25.
- [78] STRADTMANN, GROLL, VANZENBERG, "Sicherheit gegen Entgleisung in Gleisverwindungen und Radaufstandkraftverteil. Eine moderne Versuchsanlage in Valenciennes", Sonderheft 40 Schienenfahrzeuge Tagung Graz, novembre 2011, pagg. 46-53.
- [79] KIK, MENSSEN, PIOTROWSKI, "On the impact of contact model on predicted traction forces developed by wheels of a Locomotive on curve", Vehicle System Dynamics Supplement 28, 1998, pagg. 360-389.
- [80] PARENA, KUKA, Fiat Ferroviaria, MASMOUDI KIK, "Derailment Simulation, Parametric Study", Vehicle System Dynamics, Supplement 33, 1999, pagg. 155-167.
- [81] PIOTROWSKI, KIK, "A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulation", Vehicle System Dynamics, Vol. 46, January-February 2008, pagg. 27-48.

- [82] WICKENS, "Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics", Swetz & Zeitlinger Lisse Neth., 2003.
- [83] DIANA, BRUNI, CORRADI, DI GIALLEONARDO, "Sullo svio di un veicolo ferroviario. Influenza dei vari parametri", *Ingegneria Ferroviaria*, febbraio 2012, pagg. 109-135.
- [84] HUIMIN, WILSON, "Flange climb derailment: causes and prevention", *IRJ*, marzo 2012, pagg. 47-48.

### Sommaire

#### CENTS ANS ET PLUS DE RECHERCHE SUR LE DÉRAILLEMENT. LES DÉRAILLEURS

Cet article examine les recherches expérimentales sur le déraillement réalisées en Europe au cours du siècle passé, avec l'emploi de véhicules spéciaux. Les résultats confirment de façon qualitative les théories les plus avancées de CHARTET et HEUMANN, posant en même temps d'autres problèmes liés à la déformabilité de la voie et à la complexité des phénomènes tribologique dans le déraillement. Cela impose l'adoption de limites de précaution pour H et Y/Q, reconnus aussi dans les normes en vigueur, indépendants des modèles théoriques. Une récente reprise de l'expérimentation, fondée sur l'emploi de technologies de mesure et calcul avancées, a produit des résultats éclairants et d'un côté a confirmé les problèmes déjà connus et de l'autre a mis en évidence des phénomènes dynamiques imprévus à haute vitesse.

### Zusammenfassung

#### MEHR ALS HUNDERT JAHREN VON FORSCHUNGEN ÜBER DER ENTGLEISUNG, DIE ENTGLEISUNGSWAGEN

Es werden die experimentelle Forschungen über dem Entgleisungsvorgang präsentiert, die während des letzten Jahrhundert in Europa mittels besonderen Wagen ausgeführt wurden. Die Resultaten bestätigten qualitativ die fortgeschrittenen Theorien von CHARTET und HEUMANN, aber damit neue Problemen entstanden, die der seitlichen Gleissteifigkeit und unständigen tribologischen Phänomene verbunden waren. Die Konsequenz war die Annahme von vorsichtlichen Sicherheitsgrenzen für die Kräfte Y, Q und Y/Q, die auch in der heutigen Normen eingenommen sind. Die obengenannten Grenzen sind aber deutlich von der theoretischen Formulierungen getrennt. Eine jüngste Wiederaufnahme der Experimenten konnte von neuen Mess- und Rechnungswerkzeugen Nutz machen. Davon erleuchtende Resultaten und die Bestätigung der alten Problemen gewonnen wurden, aber es wurden auch unvorgesehenen Phänomene im Hochgeschwindigkeitsbereich enthüllt.