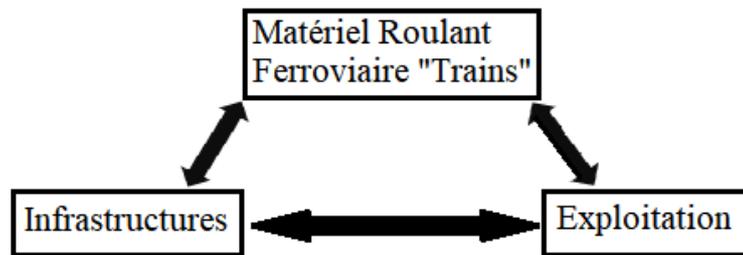


## Le matériel roulant

Le matériel ferroviaire est l'élément clé du système ferroviaire. Dans le langage commun, le matériel roulant ferroviaire est généralement désigné par le terme de « train », qui correspond à un (des) « engin(s) moteur(s) remorquant ou non un ou plusieurs véhicules ». Cette définition renvoie à un assemblage (ou non) de véhicules, ou convoi ferroviaire, conçus pour se déplacer sur une infrastructure spécifique : la voie ferrée. Ce matériel est donc guidé sur l'intégralité de son parcours, ce guidage pouvant s'effectuer au moyen d'un monorail ou de deux rails ou plus.

Le matériel roulant est, avec l'infrastructure et les procédures d'exploitation, une composante du système de transport ferroviaire, qu'il soit urbain (tramway, métro) ou interurbain (train).

Le matériel roulant ferroviaire est composé de l'ensemble des véhicules, moteurs ou remorqués, conçus pour se déplacer sur une voie ferrée.



Dans le vocabulaire employé par les professionnels, l'unité de base du matériel ferroviaire est la caisse. Une caisse peut faire partie du matériel moteur et du matériel remorqué.

- Le matériel moteur a pour fonction de tracter ou de pousser un convoi ferroviaire. Il peut donc être une locomotive ou une caisse motorisée.

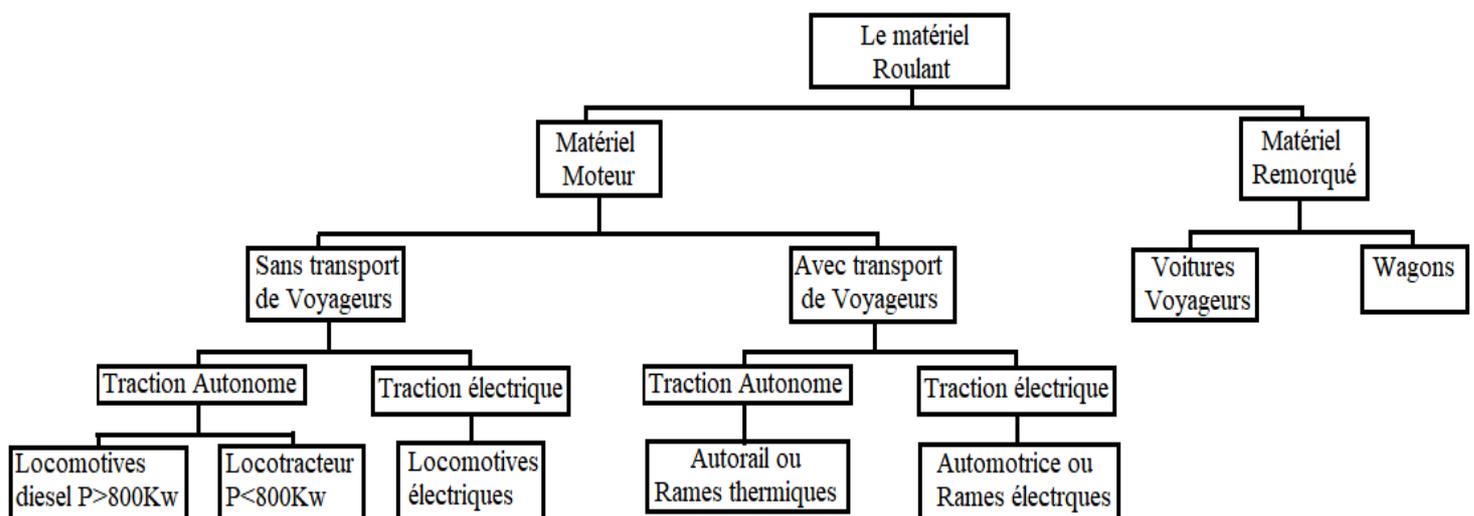
- Le matériel remorqué est la partie du matériel roulant qui ne fournit pas l'énergie motrice du train. On parle de voitures s'il s'agit du transport de voyageurs et de wagons pour le fret.

- Lorsque le matériel roulant remplit ces deux fonctions en même temps, c'est-à-dire qu'il fournit l'énergie motrice et qu'il transporte les voyageurs, on parle d'automoteur, d'automotrice ou bien encore d'autorail. Il n'existe pas à ce jour de définition réglementaire de ces termes.

La pratique d'usage conduit à identifier une différence entre ces mots selon l'énergie de propulsion. Ainsi, on parle d'automotrice lorsque l'énergie de traction est l'électricité et d'automoteur ou d'autorail en cas de recours à l'énergie thermique. Et dans le cadre d'une alimentation bi-courant, c'est le terme de rame automotrice bicourant qui apparaît être employée.

Il convient de distinguer les deux groupes qui constituent le matériel roulant :

- le matériel roulant motorisé : locomotives, automotrices, autorails et ensembles indéformables;
- le matériel roulant tracté : les voitures à voyageurs et les wagons de marchandises et de services.



## **Matériel roulant motorisé**

Le matériel roulant motorisé est, à l'inverse des wagons de marchandises et des voitures voyageurs, un matériel pouvant se déplacer grâce à une motorisation embarquée, comme n'importe quel véhicule routier. L'énergie nécessaire à la motorisation ferroviaire fût à l'origine le charbon, combustible du XIXème siècle qui précéda le pétrole et l'électricité au XXème siècle. De nos jours, l'énergie nécessaire au matériel roulant motorisé est soit, de l'électricité captée par une ligne aérienne, soit de l'énergie fossile dans un réservoir embarqué. Depuis peu, du matériel roulant bi-mode arrive sur le marché, pouvant rouler à la fois sur des voies électrifiées et terminer leur voyage sur des lignes non-électrifiées. Des matériels roulants munis de batteries commencent à apparaître aussi.

Le matériel roulant motorisé est ainsi divisé en quatre sous-groupes techniques :

- les locomotives électriques recevant son énergie de l'extérieur sous forme de courant électrique (moteurs alimentés soit par électricité (caténaire)).

- les Automotrice / autorail (Locomotive thermique) : Locomotive dont la source d'énergie est interne (diesel). (moteurs alimentés par un groupe diesel interne).

Qui constituent les engins de traction sans voyageurs dont la chaîne de traction occupe toute la caisse de l'engin, et :

- les automotrices (électriques)

- les autorails (diesel)

Qui constituent les éléments automoteurs qui embarquent des voyageurs et dont la motorisation se situe sous la caisse.

Le matériel roulant à grande vitesse ainsi que les rames pendulaires appartiennent au groupe des automotrices. La tendance actuelle en exploitation ferroviaire du XXIème siècle est d'utiliser en trafic voyageurs des automotrices et des autorails, tandis que la locomotive tractant des wagons reste le schéma type du train de marchandises.

- Locotracteur : Véhicule utilisé principalement pour la manœuvre des wagons et la formation des convois.

- Élément automoteur électrique : Ensemble (plusieurs caisses) réversible recevant son énergie de l'extérieur sous forme de courant électrique aménagé pour le transport de voyageurs.

- Élément automoteur thermique : Ensemble (plusieurs caisses) réversible dont la source d'énergie est interne (diesel) aménagé pour le transport de voyageurs.

- Élément automoteur bi mode : Ensemble (plusieurs caisses) réversible pouvant utiliser, soit une énergie extérieure sous forme de courant électrique, soit une source d'énergie interne (diesel) aménagé pour le transport de voyageurs.

De même, la différence entre autorail et automoteur de même énergie de traction (diesel) n'est pas toujours simple à percevoir et dépend des acteurs considérés.

Certaines compagnies réservent le terme « autorail » aux éléments thermiques à une seule caisse mais, pour d'autres acteurs, les autorails peuvent comporter plusieurs caisses. Par exemple l'Autorail à grande capacité « AGC » peut comporter trois ou quatre caisses.

Dans la culture ferroviaire, on évoque également la notion de rame ferroviaire. Par rame, on désigne l'attelage formé par des véhicules ferroviaires. Une rame peut donc être formée d'une locomotive et de voiture(s) ou d'une ou plusieurs caisses à motorisation intégrée.

- Lorsque plusieurs rames sont couplées entre elles, les spécialistes du ferroviaire parlent d'unités multiples « UM ».

- On utilise aussi la notion de « rame réversible » si à chaque extrémité du train existe de cabines de conduite permettant d'éviter les manœuvres de changement de la locomotive.

La majorité du réseau est constituée de lignes mixtes, qui accueillent à la fois du trafic voyageur et du trafic fret. Cependant, certaines lignes sont réservées au trafic voyageurs (lignes à grande vitesse, lignes du réseau express régional, certaines lignes régionales), d'autres sont dédiées au fret (lignes desservant des sites industriels).

## **Le matériel roulant**

Le matériel roulant ferroviaire comprend :

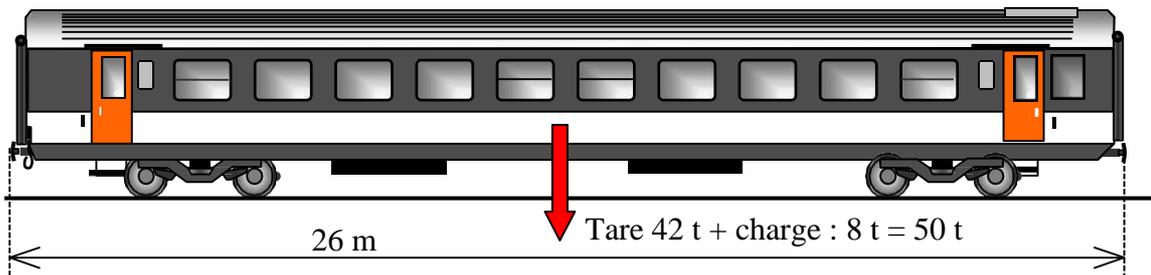
- \* le matériel **remorqué** destiné aux Clients : passagers ou fret
- \* le matériel **moteur** assurant la traction du matériel remorqué.

### Le matériel remorqué pour les passagers

Le type de transport des passagers est déterminant pour caractériser ce que l'on appelle généralement une " VOITURE ".

En matière de relations sur longue distance les impératifs de confort nécessitent des équipements nombreux et complexes:

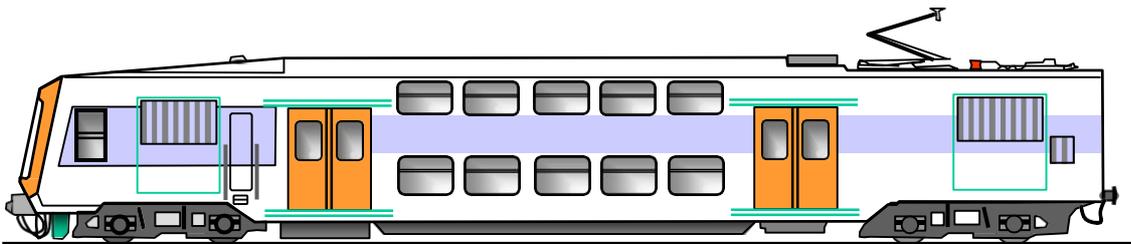
- espacement des places assises
- aménagement en cabine ou couchettes pour trains de nuit
- équipement de climatisation
- sonorisation; signalétique
- toilettes



Le cas des relations à grande vitesse a donné lieu à une solution originale en Europe, grâce au système de la rame articulée à composition fixe; chacune des voitures appelée " remorque " repose sur un bogie commun.

Le transport des passagers en lignes urbaines ou suburbaines a de toutes autres contraintes:

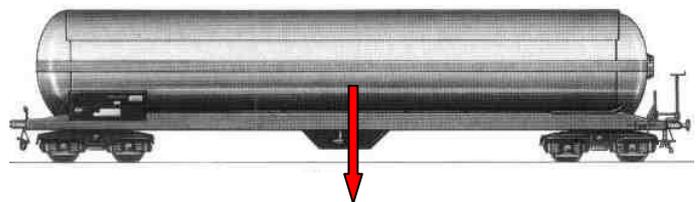
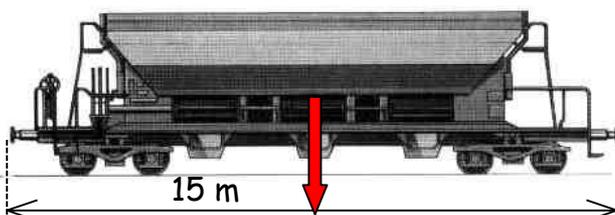
- Entrées et sorties facilitant les montées et descentes en station
- Ventilation; aération
- Places debout; 2 niveaux; etc.



### Le matériel remorqué pour le fret

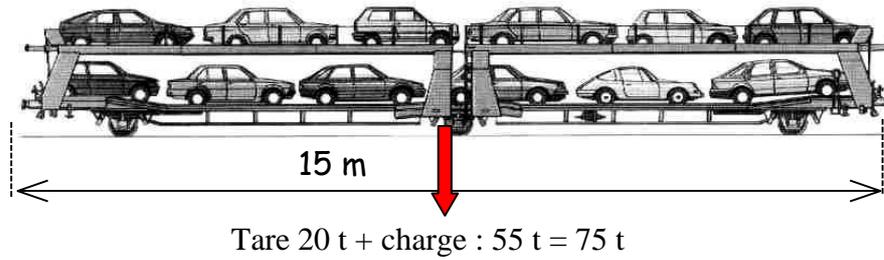
Le " wagon de marchandises " d'autrefois a pratiquement disparu du trafic européen. la spécialisation du transport de fret conduit a concevoir un véhicule adapté à chaque usage :

- Transport de produits en vrac : céréales, combustibles solides, liquides ou gazeux : wagon-trémie, wagon-citerne

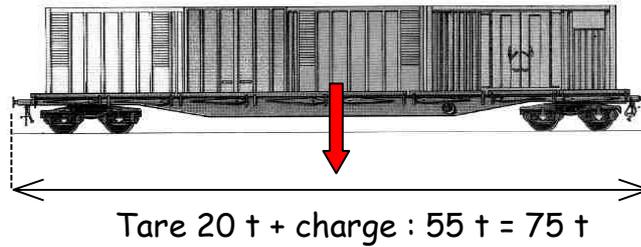


Tare 20 t + charge : 55 t = 75 t

- Transport de véhicules: porte-autos; porte -camions



- Transport combiné



### Le matériel moteur

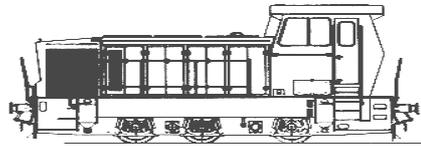
Le classement se fait selon que l'engin moteur transporte ou non des passagers. S'il est dédié à la traction il s'agit d'une locomotive – ou locotracteur en faible puissance. S'il est conçu pour le transport des passagers se sont les automotrice – emu - et automoteur – dmu - suivant le mode de traction.

#### Engins moteurs sans transport de passager

**Locomotive**



**Locotracteur shunting locomotive**



**Faible puissance**

#### Engins moteurs transportant des passagers

**Automotrice Electric Multiple unit – EMU**

Véhicule moteur à traction électrique comportant des compartiments passagers



#### Automoteur Diesel Multiple unit – DMU

Véhicule moteur à traction autonome comportant des compartiments passagers (caisse unique ou multi caisses)



## Les différents modes de traction

Deux modes de traction se répartissent les engins moteurs suivant le type d'énergie utilisé :

- Si elle est embarquée à bord sous forme de combustible, c'est la traction **Autonome**  
Si elle mise à disposition tout le long de la ligne, c'est la traction

- **Electrique**

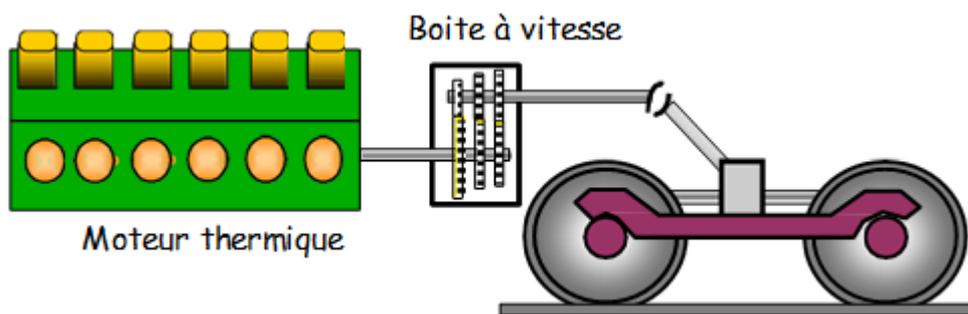
### La traction autonome

La fonction motrice est assurée par un moteur thermique transformant l'énergie fossile d'un combustible en énergie mécanique. Le combustible doit être embarqué et régulièrement approvisionné. Le chemin de fer s'est développé grâce à la traction autonome pendant plus d'un siècle : le combustible était le charbon, ou le fuel, vaporisant l'eau également transportée à bord de la locomotive, ou d'un tender attelé. L'énergie de la vapeur animait un ou plusieurs moteurs à piston - bielle - manivelle entraînant les roues motrices.

Les progrès des moteurs thermiques, du MOTEUR DIESEL suralimenté en particulier, ont permis l'extension de la " grande traction ". La traction autonome se décline en plusieurs catégories selon le type de " transmission " du couple moteur aux essieux :

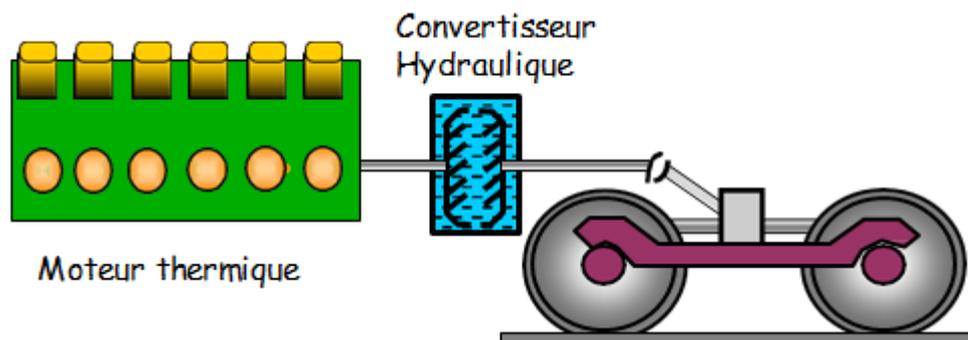
#### Transmission mécanique

Ce fut la première utilisée, à l'instar de l'automobile. Le moteur entraîne, par l'intermédiaire d'un embrayage, une boîte vitesse à plusieurs rapports d'engrenages. Cette technologie n'est pratiquement plus utilisée compte tenu des puissances importantes mises en œuvre.



#### Transmission hydraulique

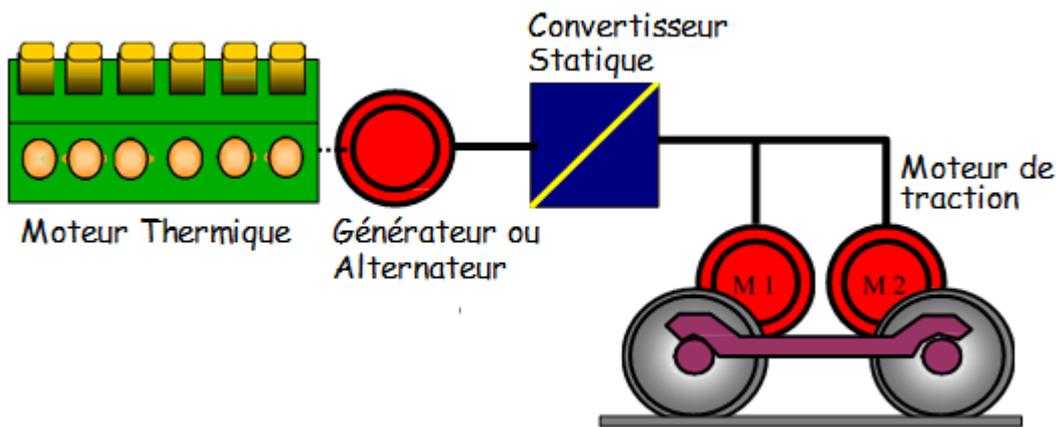
L'intermédiaire est un coupleur hydraulique dont on fait varier la pression d'huile entre un plateau à aubes primaire et le plateau de sortie. Très simple et économique en termes de maintenance, elle est beaucoup utilisée par les réseaux germaniques



#### Transmission électrique

L'ensemble forme un groupe électrogène : le moteur thermique entraîne un générateur électrique – génératrice ou alternateur – alimentant des moteurs de traction avec si nécessaire un ou des convertisseurs intermédiaires – redresseur, onduleur.

Très utilisée aux Etats-Unis et en Europe – France en particulier – elle a la souplesse de la traction électrique et permet des puissances élevées.



## La Traction électrique

L'énergie motrice est mise à disposition des engins de traction par un réseau de distribution réparti le long de la ligne, à partir du réseau général d'électricité.

La première application de l'électricité au service des chemins de fer date de 1879 avec le train de l'exposition de Berlin inventé par SIEMENS. Depuis, le développement de la traction électrique ferroviaire a suivi de très près celui de l'électrotechnique et de l'électronique de puissance. Les différents aspects – infrastructures d'alimentation, chaînes de traction sont étudiés dans les chapitres suivants.

### Comparatifs des modes de traction

Il est intéressant de distinguer les choix qui ont présidés aux deux modes de traction exposés précédemment. L'histoire ferroviaire nous enseigne que seule la traction autonome a permis le développement grâce à l'énergie de la vapeur. L'électricité a vu le jour dans le domaine des transports urbains - petites distances, petites puissances - mais surtout grâce à l'énergie électrique dont on disposait en environnement « industriel » quasi urbain.

La traction électrique nécessite une infrastructure lourde :

- Interfaces entre réseau générale de distribution d'électricité et lignes de chemin de fer
- réseau de distribution réparti
- appareillages de contrôle - commande et de protection complexes

Ce sont, en conséquence les réseaux des pays industrialisés qui ont en premier, bénéficié de la traction électrique. Le critère actuel est davantage la densité d'industrialisation et de production d'énergie électrique telle qu'elle permet les connexions multiples au réseau général d'alimentation. Citons par exemple, les chemins de fer de Suisse qui sont entièrement électrifiés ; à l'inverse les réseaux américains sont pratiquement tous en traction autonome à l'exception de la côte Est des Etats-Unis.

Le tableau ci-après et l'annexe 1 donnent, pour chaque continent et tous les pays, la répartition et les distances des lignes à traction autonome et des lignes électrifiées. La traction autonome est largement prédominante avec 80 % des lignes non électrifiées.

Ce réseau ferroviaire est généralement composé de deux catégories : le réseau à grande vitesse et le réseau dit « classique ».

- Le réseau de Lignes à Grandes Vitesses (LGV) : Sur ces lignes ne pouvant accueillir que du matériel adapté à la grande vitesse (la vitesse maximale autorisée varie entre 270 km/h et 320 km/h).

- Le réseau de Lignes classiques, la vitesse « standard » est de 160 km/h, et peut atteindre 200 km/h (voire 220 km/h pour les trains à grande vitesse) sur certains tronçons. Le réseau classique présente des profils très diversifiés (nombre de voies, électrification ou non), ce qui a une incidence sur le matériel pouvant y circuler et sur les conditions d'exploitation. Ce réseau est composé majoritairement de lignes électrifiées et à double voie.

L'infrastructure et les systèmes d'exploitation conditionnent le choix des types de matériel pouvant remplir les missions de transport de voyageurs. Les dessertes que doivent assurer les trains interviennent également dans le profil des matériels.

### Matériel tracté (véhicules remorqués)

Ce matériel a toujours besoin d'un engin de traction pour se mouvoir. Les wagons de marchandises sont apparus avant les voitures voyageurs. Au fur et à mesure des progrès de l'infrastructure, la charge des trains s'est fortement alourdie et les wagons eux-mêmes ont augmenté de volume. A l'origine posées sur deux ou trois essieux indépendants, les voitures voyageuses et les wagons furent progressivement dotés de bogies. Brevetés en 1812, les bogies prirent un essor considérable aux Etats-Unis dès les années 1830, mais n'apparurent en Europe que vers 1874. Les wagons et les voitures ont alors acquis des longueurs honorables. A partir des années 20 à 30, la plupart des voitures voyageurs sont dotées de bogies, et les dernières voitures à essieux disparaissent définitivement avec la seconde guerre mondiale.

Le matériel tracté non-motorisé (véhicules remorqués) constitue la majeure partie du parc des entreprises ferroviaires ils sont de deux types :

Voiture qui sont des véhicules remorqués destinés au transport de voyageurs.

Les wagons qui sont des véhicules remorqués destinés au transport de marchandises.

Les principaux constituants d'un véhicule sont les suivants :

La caisse : La caisse est un ensemble structurel comprenant les composants qui supportent les charges et efforts relatifs à ceux de l'exploitation commerciale.

L'essieu : désigne l'ensemble solidaire constitué de l'axe et des roues.

Le bogie : situé sous un véhicule ferroviaire, est un élément structurel sur lequel sont fixés les essieux (ou directement les roues pour certains véhicules). Il est mobile par rapport au châssis du véhicule afin de faciliter l'inscription du véhicule dans les courbes.

Le système de freinage : Le système de freinage doit permettre de moduler la vitesse du train en service normal (ralentissements, arrêts, etc.) ainsi qu'en cas d'urgence. Il doit également permettre d'immobiliser le véhicule en stationnement.

Le système de captage : Le système de captage est principalement constitué par le pantographe situé en toiture afin d'alimenter le véhicule en énergie électrique depuis la caténaire.

La chaîne de traction : La chaîne de traction est le dispositif qui permet d'alimenter l'ensemble des systèmes d'un véhicule qui nécessitent de l'énergie électrique (moteur, climatisation, freins, ordinateur de bord, etc.) à partir d'une source d'énergie externe (caténaire) ou interne (génératrice diesel).

Les portes : Les portes sont un système d'accès, muni d'un dispositif de fermeture automatique, permettant la montée et la descente des voyageurs.

La signalisation embarquée : C'est un système de signalisation installé à bord d'un véhicule moteur qui permet de donner les informations au conducteur directement en cabine pour les lignes parcourues à une vitesse supérieure à 220 km/h.

De nos jours, les fiches UIC fixent la charge maximale admise sur infrastructure UIC à 22,5 tonnes par essieu. Cela conduit à optimiser la longueur des véhicules en fonction de leur charge utile. Les voitures voyageurs, légères, ont une longueur standard de 26,40m qui garantit leur inscription dans toutes les courbes et sur tous les aiguillages d'Europe, bien qu'il y ait eu en Allemagne des voitures de 27,50m. Les wagons de fret, eux, ont une longueur dépendant de leur charge utile. Ainsi, les wagons à minerais ont une longueur faible vu le lourd tonnage embarqué, alors que les wagons porte-conteneurs ont une longueur supérieure vu le moindre poids des unités intermodales.

Les voitures voyageurs semblent avoir perdu leur monopole de jadis en étant supplantées depuis les années 90 par des rames indéformables à grande vitesse - TGV, ICE,... - mais aussi par la forte progression des automotrices sur les trafics locaux, régionaux et interurbains de parfois 200 à 300km.

## **La caisse**

### **Fonctions à assurer**

Les fonctions principales assurées sont :

- transmettre les efforts de traction et de freinage aux véhicules remorqués
- contenir l'ensemble des organes exceptés les organes de roulement
- permettre la conduite du train
- recevoir les passagers dans le cas d'une automotrice ou d'un automoteur

Les fonctions de contraintes résultent de l'utilisation et de l'environnement ferroviaire :

- inscription dans le gabarit

- respect de la charge par essieu
- maintenance économique
- cycle de vie approprié en termes de durée et de recyclage
- tolérance aux agressions externes : chocs, pollutions

A l'origine du ferroviaire, les premiers véhicules étaient basés sur les architectures de carrosse avec un châssis métallique riveté et une superstructure en bois. Ils consistaient en des véhicules isolés reliés entre eux par des attelages de traction et des tampons de chocs et étaient attelés à un engin moteur pour former un train. Puis, pour prendre en compte la sécurité des occupants, mise en cause à la suite d'accidents, des voitures de lignes basées sur la même conception ont été reprises peu à peu pour renforcer la superstructure en bois par adjonction d'un tôleage métallique.

Les véhicules ont ensuite évolué vers une structure tubulaire, construite entièrement en acier et/ou en acier inox soudée par points, puis soudée de manière continue. En effet, Il était devenu évident que la juxtaposition d'un châssis robuste et d'une caisse n'offrait pas la sécurité optimale en cas de choc.

Après accident, le châssis ne présentait que peu de dommages, alors que la caisse « voyageurs » était complètement détruite. De plus, lors des collisions ou des déraillements de structures rivetées, on constatait l'arrachement des tôles et leur refoulement après striction au droit des lignes de rivets (avec éclatement de la caisse et télescopage), à la manière d'une étoffe qu'on fait céder sur ses coutures.

Les soudures continues ont ainsi apporté un caractère plus sécuritaire de part des points d'ancrage pratiquement invulnérables aux bords des tôles qu'ils relient soit entre elles, soit aux membrures principales de châssis et de caisse.

A la suite de ces accidents historiques, les bureaux d'études étaient totalement polarisés sur le problème si préoccupant de la Sécurité. Ils n'entrevoyaient pas encore les pleines possibilités d'allègement offertes par l'optimisation des conceptions de véhicules en acier et ensuite par l'utilisation d'aciers ou d'alliages d'aluminium performants.

Ce n'est donc qu'à partir des années 80 que des véhicules à un ou deux niveaux ont été conçus en structures tubulaires faites de profils aluminium de types simple ou double peau, extrudés, soudés. . . ou avec des aciers à haute limite d'élasticité.

A l'avenir, il faudra continuer à alléger. Développer des solutions multi-matériaux alliant par exemple l'acier, l'aluminium et les matériaux composites

	Largeur des piédroits	Hauteur maximale	Possibilité de chargement	Largeur	Hauteur
				Du chargement	
	Du gabarit			Du chargement	
A	3.15 m	4.32 m	Grands conteneurs courants sur wagons portes conteneurs (hauteur de plancher 1.18 m) Semi-remorque spécialisées sur wagon poche	2.44 m 2.50 m	2.61 m 3.67 m
B	3.15 m	4.32 m	« High Cubes » Caisses mobiles sur wagon porte	2.50 m	2.90 m
			conteneur normal Semi-remorques sur wagon à poche base (0.28 m)	2.50 m	3.80 m
C	3.15 m	4.65 m	Tous types de grands conteneurs et caisses mobiles. Semi-remorques et camions au gabarit routier (sur wagon plat subaissé).	2.60 m	4.00m

Le gabarit A est dégagé depuis 1972 sur la presque totalité des lignes.

Le Gabarit B a les mêmes dimensions en largeur et hauteur que le gabarit A mais il est plus généreux sur les pans coupés supérieurs il est ou va être dégagé sur les grandes artères.

Le Gabarit C la même hauteur que le gabarit B des réseaux noter en Allemagne et sur certains réseaux Europe Centrale ainsi en Suède entraxe entre voies principales voisines est de 400 contre 357 et 367 en France) ce qui permet la circulation de matériels et de chargements plus larges.

## Transmission des efforts : la structure

L'engin moteur comme le matériel remorqué sont intégrés dans une rame : il participe à la transmission des efforts de traction et de freinage. D'autre part le contenant qui représente la caisse doit être capable de supporter les charges de tous les organes. La structure supporte ces deux catégories d'effort.

### Dimensionnement

Il prend en compte quatre types de contraintes :

1- Efforts **statiques** résultant :

- de la charge portante – efforts verticaux dus aux organes ou / et passagers –
- de la charge remorquée - effort longitudinal appliqué au niveau des extrémités.
- des opérations de levage, relevage ou réanraillement

2- Efforts **dynamiques** résultant des accélérations normales ou accidentelles, verticales ou longitudinales.

3- Efforts répétés engendrant une **fatigue** dus :

- au roulement sur voie
- au cycle de chargement et déchargement dans le cas de matériel transportant des passagers
- au passage en tunnel et aux croisements entre deux trains

4- Efforts résultant de **chocs accidentels** : résistance au « crash » Les critères de dimensionnement se situent par rapport à :

a- la **limite élastique** du matériau : le facteur de sécurité S1 est tel que :

$$\frac{\text{Limite élastique}}{\text{Contrainte calculée}} \geq S1 = 1.15$$

b- la **limite de rupture** : il est nécessaire de prévoir une marge de sécurité entre la charge maximale de conception et la charge de rupture. C'est le critère S2 tel que :

$$\frac{\text{Limite de rupture}}{\text{Contrainte calculée}} \geq S2 = 1.5$$

L'ensemble de la structure prend en compte les interfaces de liaison où se situent ces contraintes, en termes de :

- liaison caisse – bogie
- fixation des équipements lourds
- zones avant et arrière

### Matériaux des structures

En fonction de l'exploitation projetée du véhicule et des contraintes à satisfaire, le matériau est l'argument majeur du dimensionnement de la structure. On en distingue quatre catégories :

- acier
- aluminium
- composites
- multi matériaux

La structure **acier** est la plus ancienne. Elle se présente sous forme de profilés – pliés ou étirés – soudés entre eux. La nature de l'acier va de l'acier classique à l'acier inoxydable, exigeant un procédé de soudage particulier, et aux aciers à Haute Limite Élastique « HLE » permettant de diminuer les épaisseurs mises en œuvre. Les nuances d'acier sont fonctions du type de sollicitations : acier plus résistant pour les extrémités ou les traverses pivot, soumises directement aux efforts de traction et de freinage et aux efforts verticaux.

La structure **aluminium** présente l'avantage de masse plus faible que l'acier : 2,7 kg/dm<sup>3</sup> contre 7,8 kg/dm<sup>3</sup>. Par contre sa moindre résistance impose des épaisseurs plus importantes ou des inerties plus

élevées par l'emploi de profilés « multitubulaires ». L'ensemble d'une structure en aluminium se rapproche d'une coque homogène, lui conférant une grande stabilité. La mise en œuvre des soudures est relativement complexe.

La structure **composite** fait, à l'heure actuelle, une timide apparition dans le domaine ferroviaire : coût élevé, longévité à prouver. L'avenir et leur développement sont liés à trois atouts majeurs :

- l'extrême variété des mises en œuvre possible : anneaux « sandwichs » pressés, enroulement filamenteux, moulage au contact, injection, etc. .
- gain de masse considérable autorisé
- réunion de plusieurs besoins simultanés : résistance, isolation acoustique et thermique, teinte « dans la masse »

La structure **multi matériaux** fait appel aux matériaux ci-dessus, utilisés en fonction des sollicitations. L'assemblage nécessite d'autres procédés tels que le rivetage, boulonnage ou collage. On la rencontre surtout en structure légère tels que les tramways.

Le choix du matériau composant la structure répond à quatre critères :

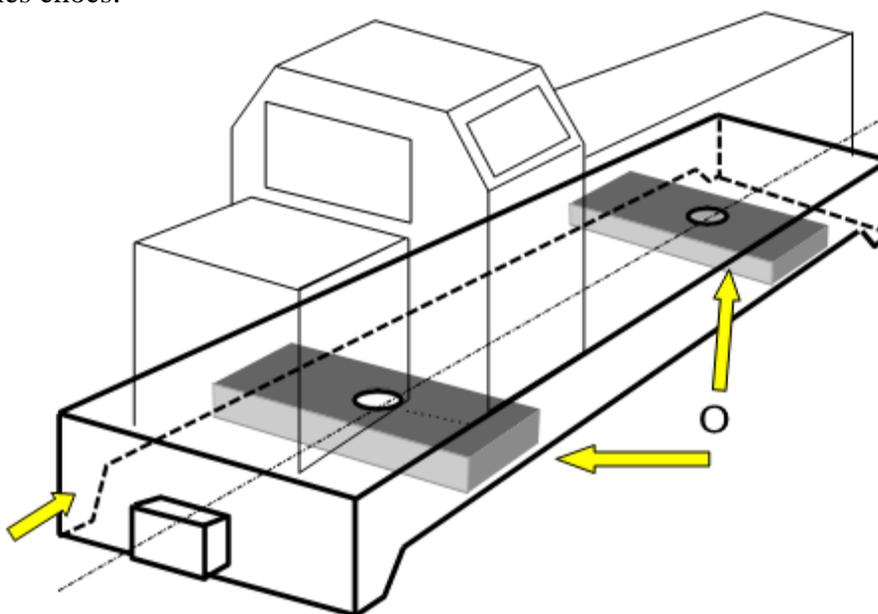
- techniques : caractéristiques mécaniques : limites d'élasticité et de rupture, module d'Young, densité, température de fusion
- sécurité : aptitude à l'absorption d'énergie, tenue à la fatigue, résistance au feu, résistance à la corrosion
- industrielles : effet de série, mise en œuvre (découpage, pliage, cintrage, emboutissage, etc...), assemblage (soudage, rivetage, boulonnage, collage, etc), traitement de surface, intégration des systèmes de fixation, maintenabilité.
- économiques : coûts d'achat (fluctuation des cours de matières premières), coût de main-d'œuvre, frais fixes d'industrialisation (outillage, formation, etc...), consommation d'énergie, coût de maintenance

### Différents types de structures

Pour les engins lourds deux types de structures sont mises en œuvre : **Caisse à CHÂSSIS PORTANT**

Seul le châssis participe aux efforts de traction et de freinage. Les équipements fixés au châssis sont protégés par des capots rapportés.

Le châssis est constitué de deux longerons entretoisés. Des entretoises maîtresses appelées traverses - pivots O constituent l'interface avec les bogies. Les extrémités de châssis reçoivent chacune une traverse de tête O équipée des organes d'attelage et éventuellement des dispositifs de protection contre les chocs.



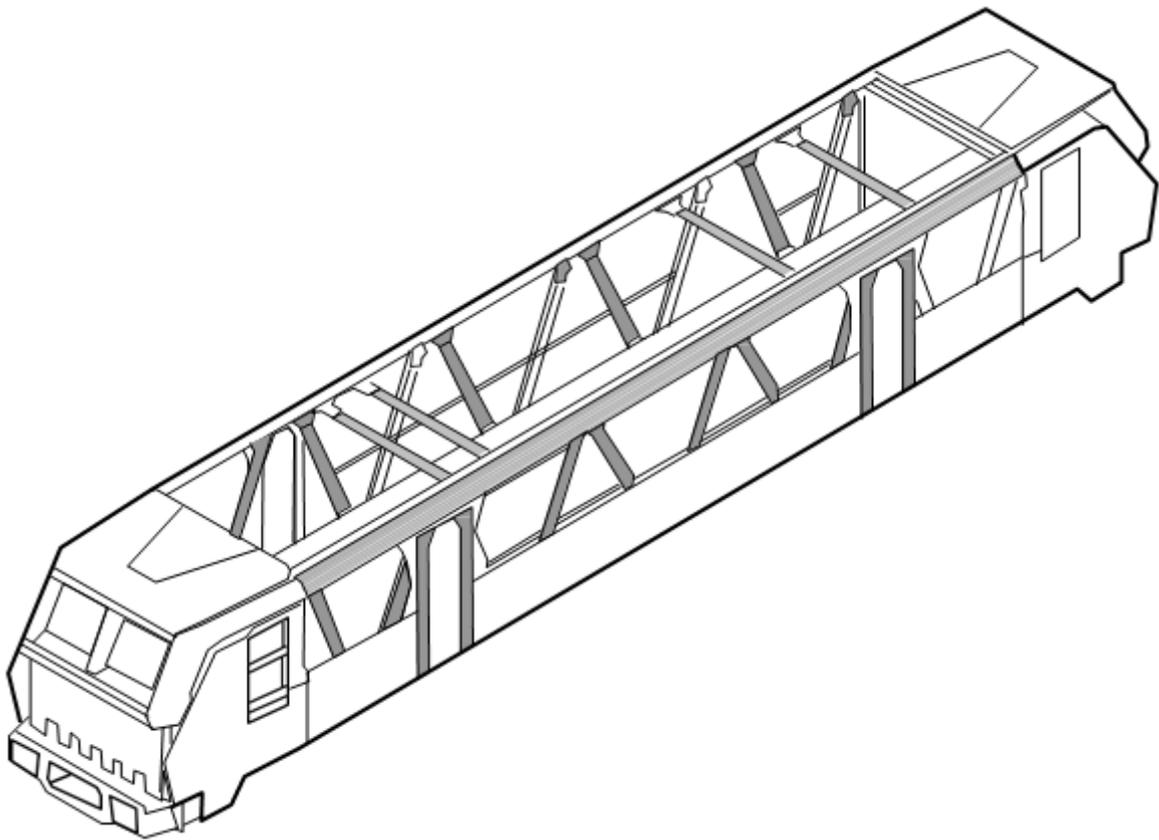
### **Caisse AUTOPORTANTE**

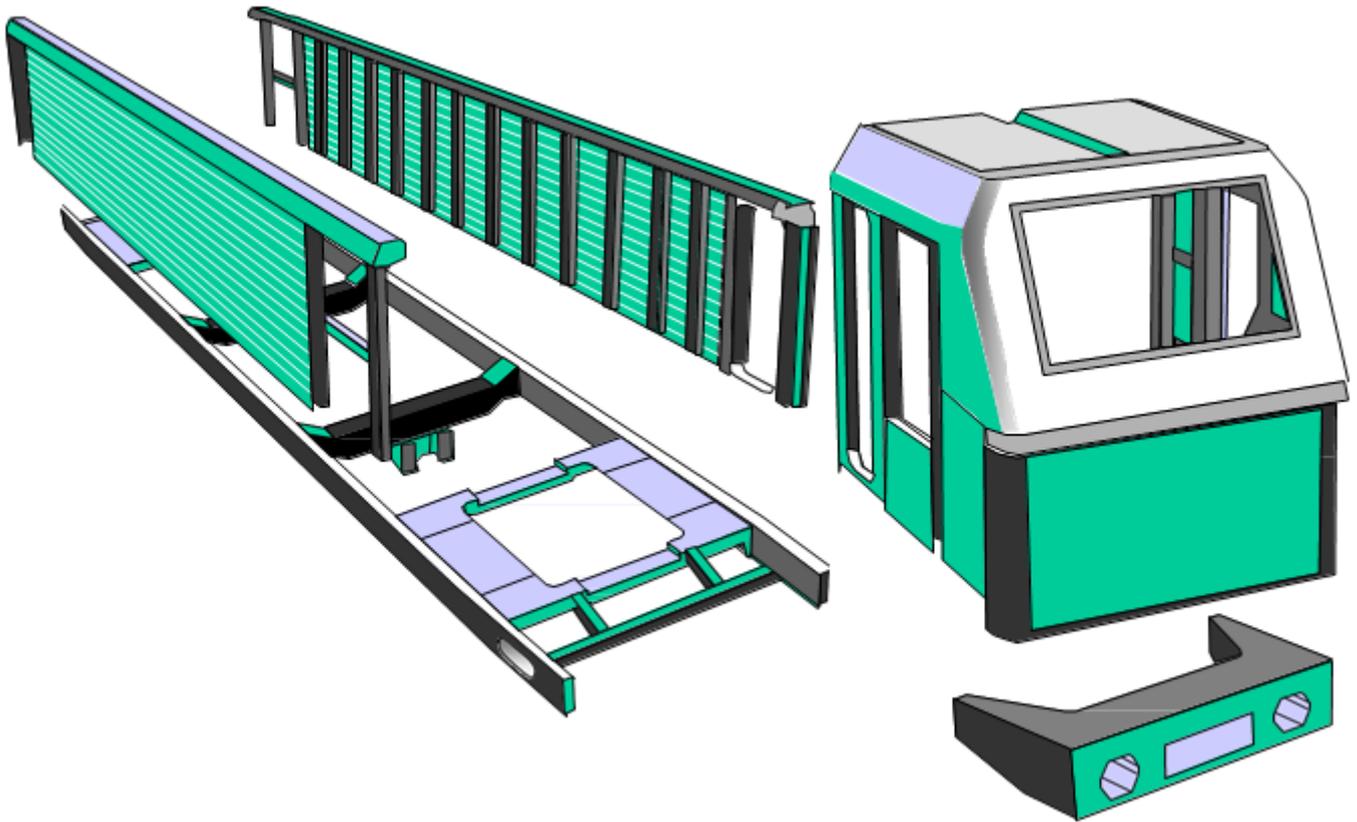
Châssis et superstructure constituent un ensemble dont tous les éléments participent à la résistance et aux transmissions d'efforts. Ses principales parties sont :

- le châssis est constitué de deux longerons et deux traverses de tête recevant les organes d'attelage et éventuellement de protection
- les traverses - pivot, interfaces avec les bogie
- des entretoises assurant la rigidité de l'ensemble.
- les faces latérales dont la structure est :
  - soit en « treillis », constituées de profilés en "oméga" fermés
  - soit « pleines », la structure se nomme «à faces travaillantes »,soit “ travaillante ” : il s’agit alors d’une tôle soudées sur des montants verticaux, rapportées au châssis par soudure.
- les extrémités dont la nature dépend de la fonction « conduite ». Si l’extrémité doit comporter un espace nécessaire à l’Agent de conduite ce sera un caisson rapporté au châssis.

Si tel n'est pas le cas, l'extrémité sera un tôle simple ou permettant un intercirculation avec le véhicule adjacent. La cabine peut être soudée sur le châssis ou rapportée par boulonnage, voire même suspendue par plots élastiques.

Caisse triangulée



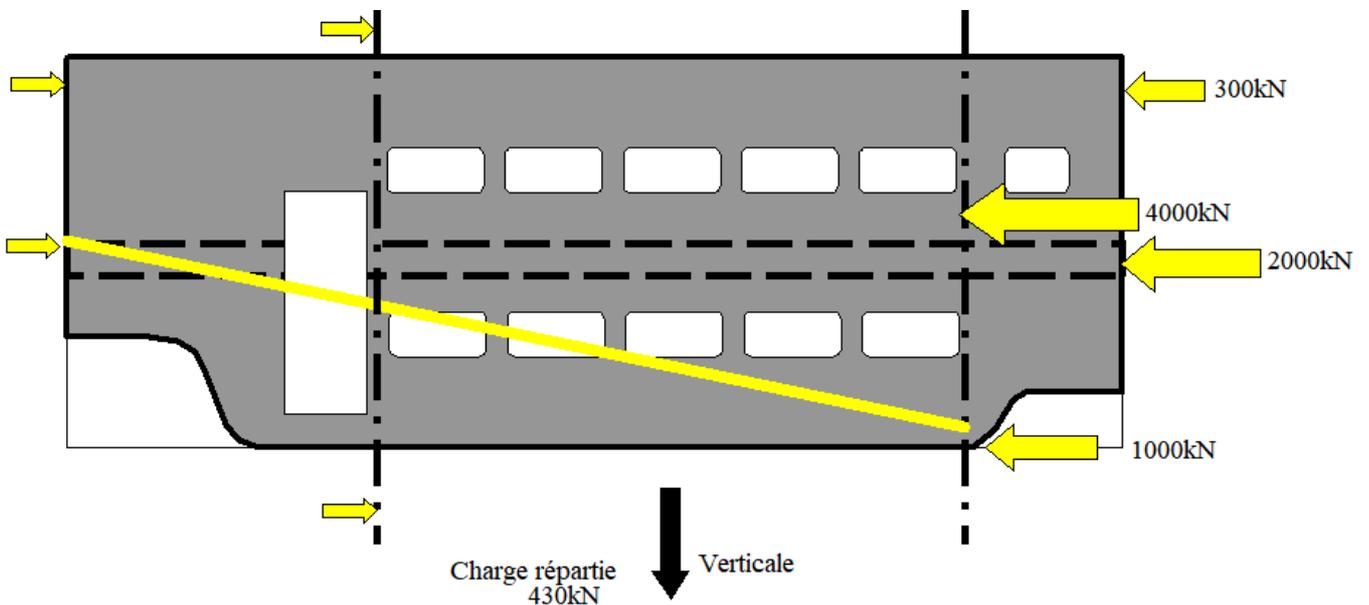


### *Validation de la structure*

Elle a pour objet :

- de vérifier la résistance de la structure soumise au charges maximum et l'absence de déformation permanente
- de déterminer la résistance de la structure en cas de charge de service
- de déterminer le comportement dynamique :
  - soit sur maquettes de sous-ensembles avec, ou sans, essais destructifs;
  - soit sur caisse terminée par essai de compression sur banc.

### *Exemple d'efforts d'épreuve*



## Choc et traction

Les traverses d'extrémité du châssis sont équipées entre autres, des organes dits de « choc et traction » qui assurent les fonctions d'attelage et d'accostage entre deux véhicules adjacents. Deux types sont en service actuellement : manuel et automatique

### Attelage manuel

Les opérations sont effectuées par un opérateur entre les deux véhicules à atteler. Cette disposition est en vigueur depuis l'origine du chemin de fer : elle équipe encore la quasi-totalité des réseaux européens présentant des risques d'accidents évidents.



### Attelage automatique

Chaque extrémité du véhicule est équipé d'un dispositif d'attelage tel que les deux réalisent ensemble la liaison de traction - compression. Un tel attelage peut être soit :

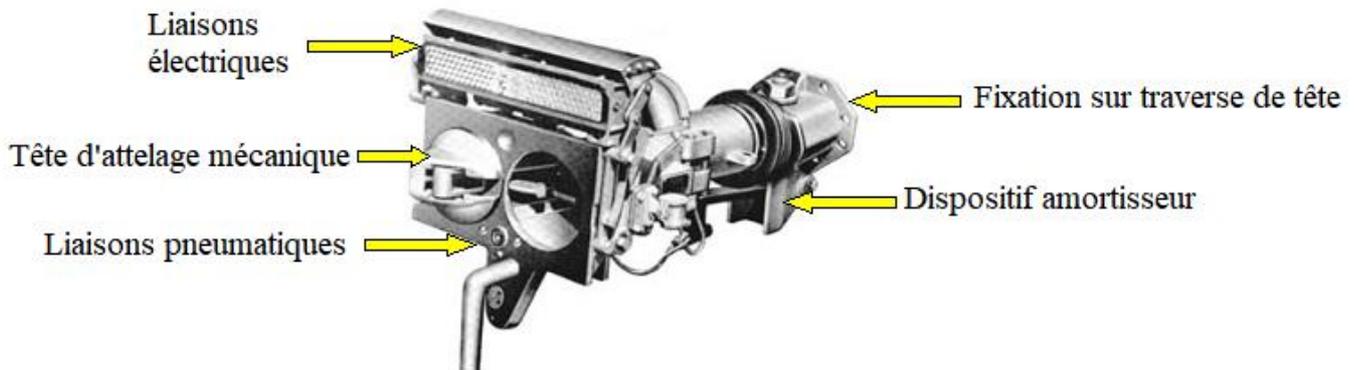
- à fonction de liaison mécanique seule
- multifonctions : mécanique, électrique, pneumatique ; il est alors dit « intégral »

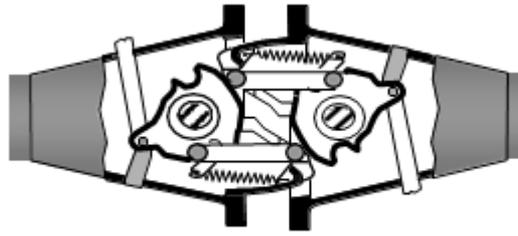
La plupart des réseaux dans le monde sont équipés d'attelages automatiques.



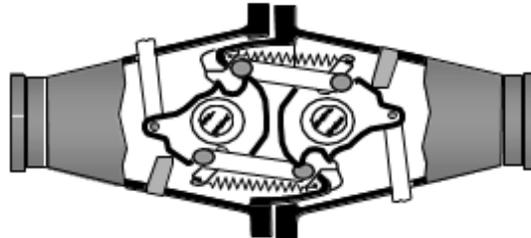
Notons qu'il se répand en Europe à la faveur des rames automotrices et des rames à grande vitesse ; ces engins, en effet, constituent des parcs homogènes, travaillant « entre eux », sans contact avec le reste, très nombreux, des voitures et wagons.

Un exemple d'attelage intégral est donné ci-dessous :

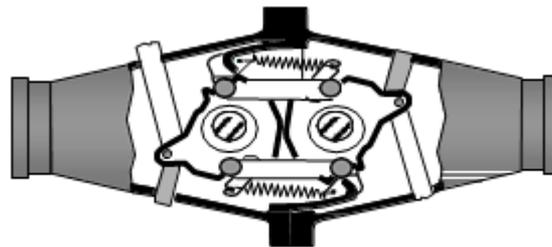




Présentation - alignement des têtes



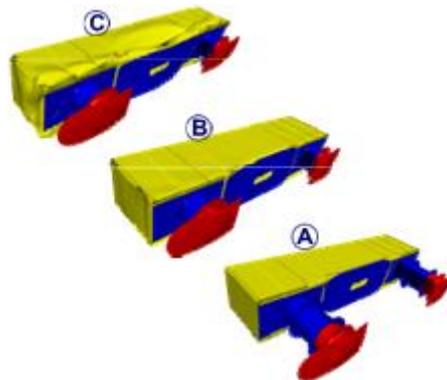
Armement

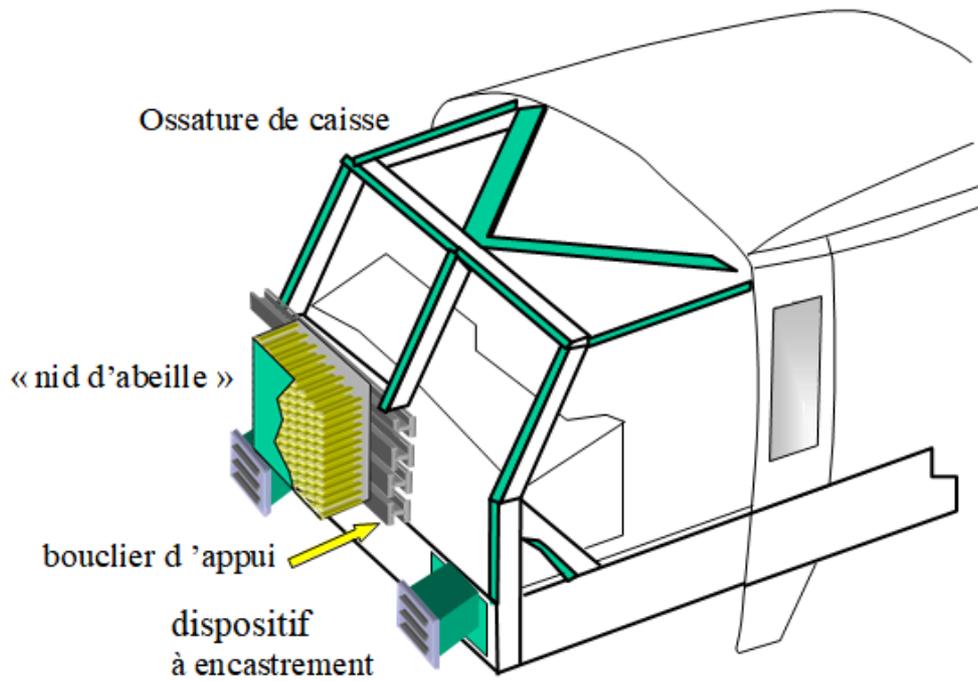


Attelage

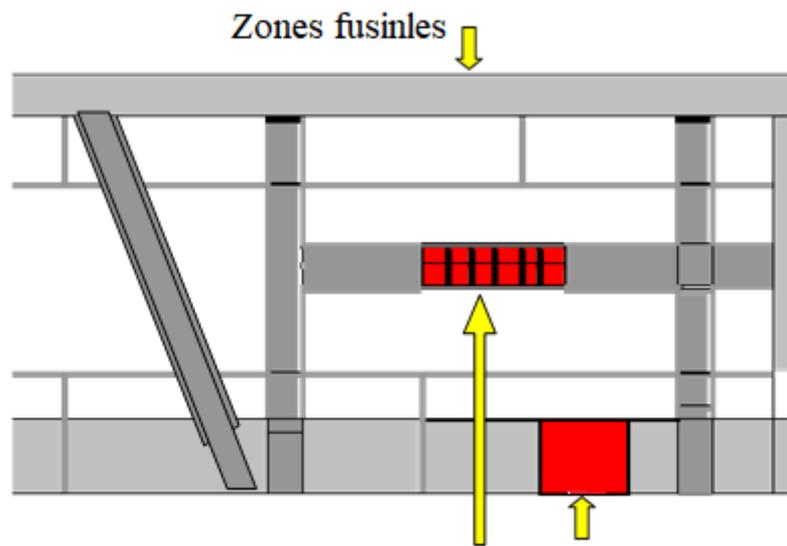
### Chocs accidentels

Le calcul de la résistance de caisse prend en compte les cas de chocs accidentels avec notamment, les véhicules routiers. Si ceux-ci sont de faibles dimensions et de faible masse telle qu'une automobile, les organes de choc fixés sur la traverse de tête peuvent suffire à absorber l'énergie. Cette traverse peut être complétée par une traverse – et des tampons fusibles amovibles.



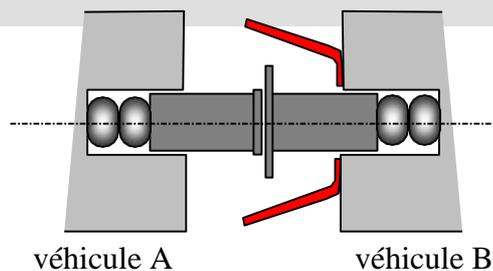


Certains engins comportent une structure de cabine de conduite avec caisson d'absorption d'énergie. Il peut être complété par une zone de structure capable d'absorber aussi une partie de l'énergie résultant de la collision.



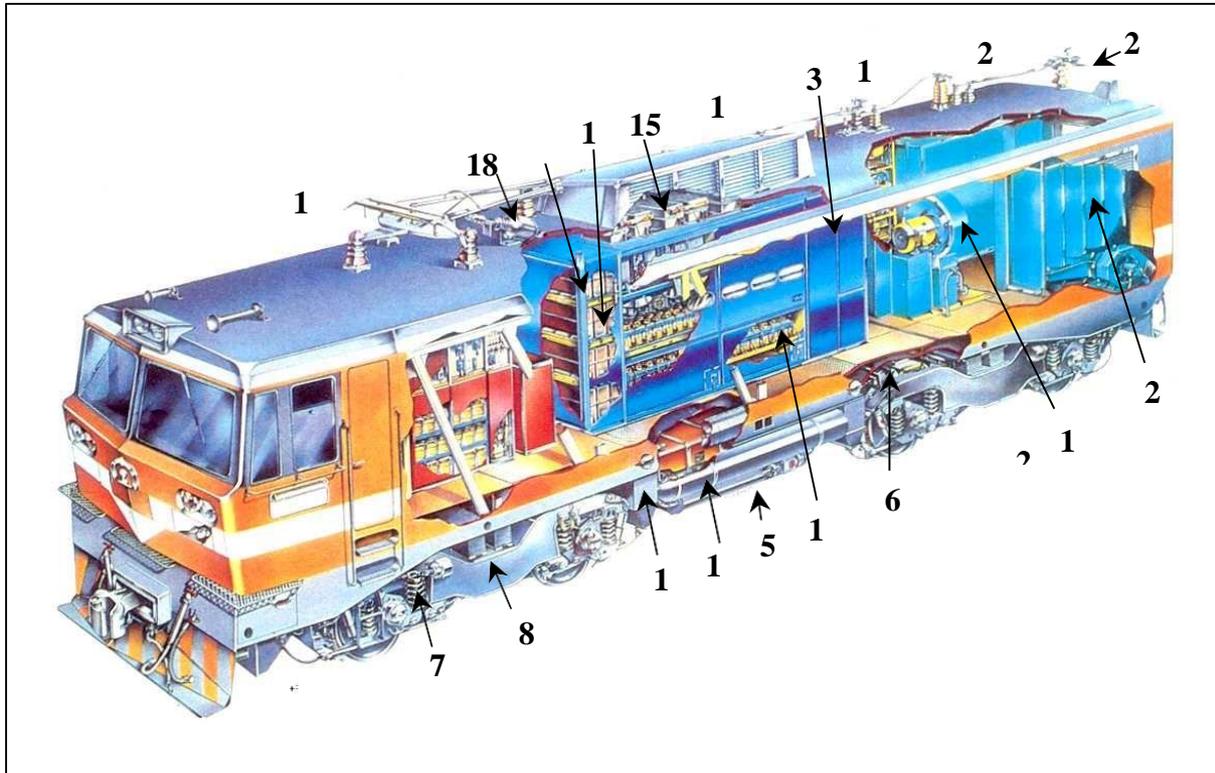
### Modules d'absorption d'énergie par déformation

Par ailleurs en cas de collision il se peut que deux véhicules adjacents dévient de leur trajectoire et se chevauchent. Un tel scénario est générateur de risques très importants pour les passagers. Les extrémités sont alors équipées d'un dispositif antichevauchement.



## INSTALLATION des FONCTIONS

L'installation en caisse constitue une fonction en elle-même destinée à attribuer un espace à chacune des fonctions composant l'engin moteur, compte tenu de toutes les contraintes à satisfaire. L'installation concerne essentiellement les organes. Elle est complexe du fait des antinomies des contraintes entre elles. La figure ci-dessous en donne un exemple de réalisation.



1	Cabine de conduite	12	Ventilateur de moteurs de traction
2	Bogie	13	Batterie
3	Bloc électrique centrale	14	Semi-conducteurs de puissance
4	Bloc auxiliaire – batterie	15	Résistances de freinage
5	Transformateur principal	16	Lanterneau de sortie d'air
6	Moteur de traction	17	Pantographe
7	Suspension primaire	18	Servo -moteur pneumatique de commande
8	Suspension secondaire	19	Disjoncteur monophasé
10	Sablière	20	Ligne de toiture
11	Réservoir d'air principal	21	Liaison haute tension
		22	Groupe de filtration d'air

Le rôle premier de l'installation est de répartir l'espace. Il est commode de distinguer deux catégories : les fonctions réparties et les fonctions spécifiques.

### Fonctions réparties

Elles comprennent celles qui permettent l'exercice des fonctions spécifiques tels que :

- **câblage**
- **Tuyauterie**
- **évacuation des pertes**

### Câblage

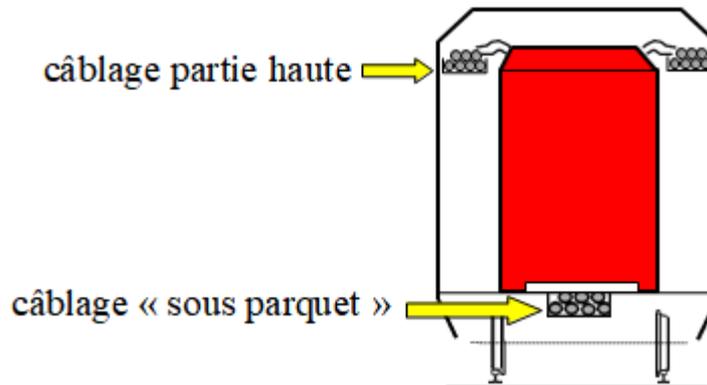
Les sous-ensembles reliés électriquement nécessitent des raccordements par câbles isolés.

On distingue deux catégories de câblage :

- **câblage de puissance** comprenant toutes les liaisons du schéma de puissance et des auxiliaires généralement à forte section de conducteur (cuivre ou autre)
- **câblage de commande et contrôle** à basse tension reliant tous les appareils . Il peut être complété par un multiplexage par câble ou fibre optique.

Les contraintes majeures du câblage sont :

- la séparation des torons de puissance de ceux du contrôle - commande pour éviter les influences électromagnétiques des premiers sur les seconds. (compatibilité électromagnétique - CEM)
- la disposition des câbles de puissance assurant la dissipation correcte des échauffements.



La disposition prévoit généralement le câblage basse tension en partie haute de la caisse, le câblage de puissance en partie basse.

Deux types de raccordements entre sous-ensembles sont utilisés :

- fixe par cosses boulonnées
- amovible par coupleurs

L'industrialisation actuelle du câblage consiste à réaliser un pré câblage sur table ou "mannequin", monté ensuite en caisse; Cette méthode permet un gain important de temps et de contrôle - qualité.

Différents types de câbles sont utilisés en fonction de la tension d'isolement à satisfaire et des contraintes telles que: résistance aux agents extérieurs (huile synthétique, fuel) et normes anti-feu.

### Tuyauterie

Les organes utilisant un fluide sont reliés par tuyaux. Les principaux fluides utilisés sur un engin moteur sont :

- **air comprimé** nécessaire aux équipements pneumatiques et le frein
- **air extérieur** pour l'élimination des pertes concentrées dans des échangeurs (air - air, air - eau, air - huile)
- **eau** pour le refroidissement des appareils électriques de puissance et du moteur thermique
- **combustible** du moteur thermique
- **huile** pour les appareils électriques de puissance et le moteur thermique

Le dimensionnement des tuyauteries ou gaines doit optimiser les pertes de charges. Les facilités de montage et de maintenance nécessitent un agencement des cheminements. Enfin la qualité de la réalisation doit garantir la propreté interne pour éviter des dysfonctionnements, notamment des fonctions de freinage.

### Evacuation des pertes

Les sous-ensembles participant à l'alimentation – ou génération - au traitement et la transformation de l'énergie engendrent des pertes à évacuer. Le fluide « absorbeur » de cette énergie est finalement l'air extérieur. Le dimensionnement de cette fonction impose un **bilan thermique**.

Sa réalisation doit intégrer les contraintes suivantes :

- l'apport d'air extérieur introduit des particules polluantes dans l'engin de traction
- le volume d'air en transit se fait à une certaine vitesse génératrice de bruit
- l'air évacué peut atteindre des températures dangereuses pour l'environnement. Ainsi le refroidissement d'un rhéostat de freinage évacue-t-il l'air à plus de 500°C

Inventaire des pertes

Les organes dissipateurs sont, dans la plupart des cas :

<i>Organe</i>	<i>Refroidissement</i>	
	<i>Fluide</i>	<i>type</i>
Transformateur principal	huile	circulation forcée radiateurs air - huile
Conversion énergie de traction et énergie auxiliaire	air	ventilation naturelle
	huile	circulation forcée
	eau	circulation forcée radiateurs
	flugène	enceinte étanche + ventilation forcée
Moteur Diesel	eau	circulation forcée radiateurs air - eau
Turbine	air	ventilation forcée
Moteur de traction	air	ventilation naturelle ou ventilation forcée
Caisse	air	ventilation naturelle ou ventilation forcée

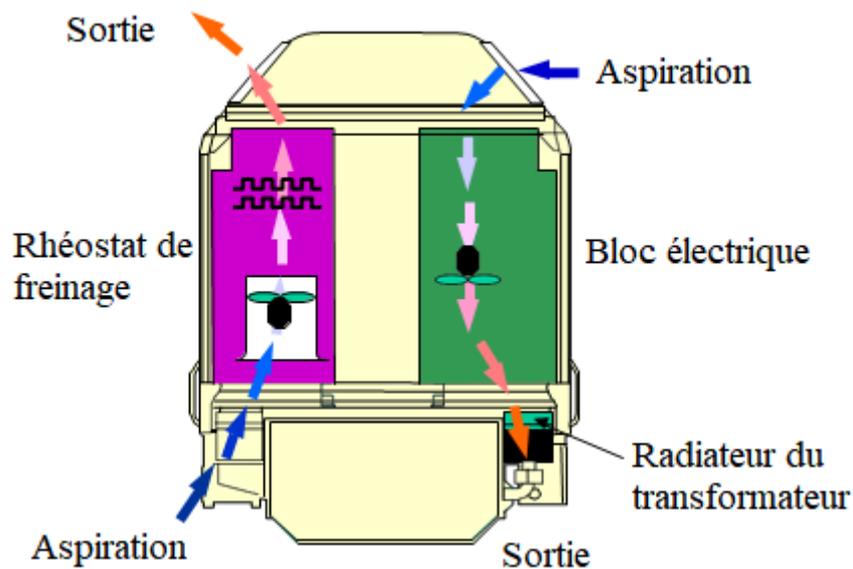
Les moyens de transmettre les pertes à l'air extérieur sont de deux sortes :

- ventilation naturelle grâce au mouvement de l'engin
- ventilation forcée par ventilateur à entraînement mécanique, électrique ou hydraulique

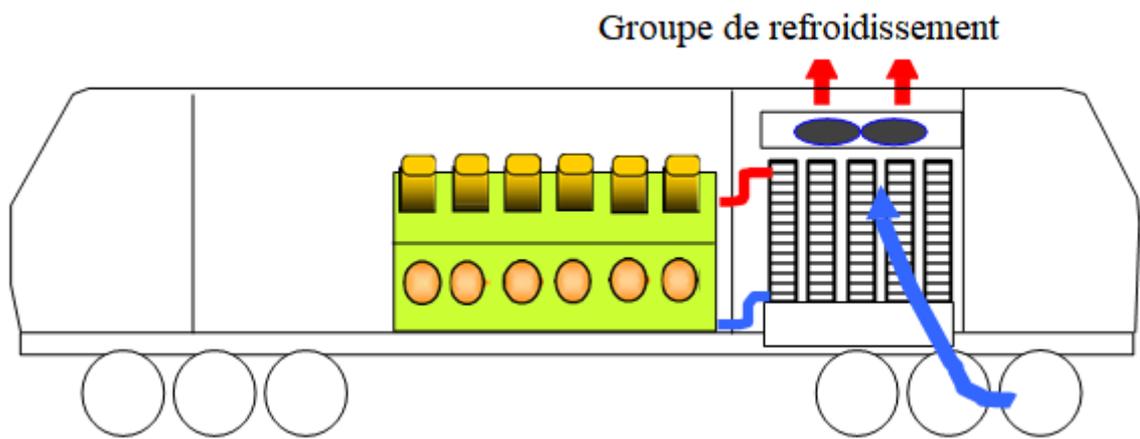
L'ensemble fait l'objet du schéma de ventilation indiquant :

- cheminements
- sens de circulation des flux
- débits, vitesses d'air
- pertes de charges
- températures d'entrée et de sortie

La disposition des entrées et sorties d'air tient compte des zones les moins favorables aux pollutions ambiantes : poussières de ballast et neige poudreuse. Par contre l'extraction d'air chaud, provenant du refroidissement des résistances de freinage notamment, ne peut s'effectuer à « hauteur de quai » pour des raisons évidentes de sécurité.



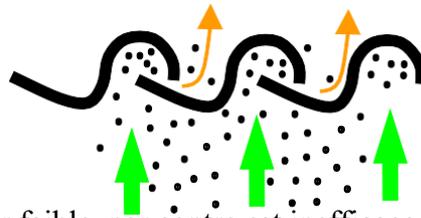
Le cas de la traction thermique nécessite une conception particulière en rapport avec le refroidissement du moteur. Pour les fortes puissances il s'effectue dans un compartiment spécialisé appelé compartiment " **radiateurs** ", ventilé par un groupe entraîné soit mécaniquement par le moteur Diesel, soit électriquement par moteurs électriques auxiliaires.



Quel que soit le besoin, l'air importé doit être débarrassé de ses impuretés par une **filtration** appropriée. Elle tient compte de l'environnement : climat, nature des terrains traversés, environnement urbain, etc. Citons par exemple le cas du milieu désertique, type saharien : l'air nécessaire est admis dans une " **centrale de filtration** " à deux étages : centrifugation puis filtration par mailles.



Le système à « persiennes » a été très utilisé en France dans les années 1970. Chaque élément est constitué par un profil en double parabole :



Il permet des vitesses d'air faible, par contre est inefficace pour les pollutions fines .

#### La protection contre la corrosion et l'eau

La **résistance à la corrosion** est une caractéristique fondamentale du matériel ferroviaire, compte tenu de sa durée de vie: 25 à 35 ans. Les dispositions constructives assurent une protection efficace grâce à deux techniques :

- la protection des « corps creux » effectuée avant fermeture définitive
- la peinture, nécessitant une préparation soignée des éléments métalliques, d'une part, et la préparation des surfaces avant couche de finition d'autre part

L'**étanchéité** d'un engin de traction doit être assurée au niveau de toutes les solutions de continuité, non seulement en toiture mais également au niveau des orifices et surfaces d'aspiration d'air.

#### **Fonctions spécifiques**

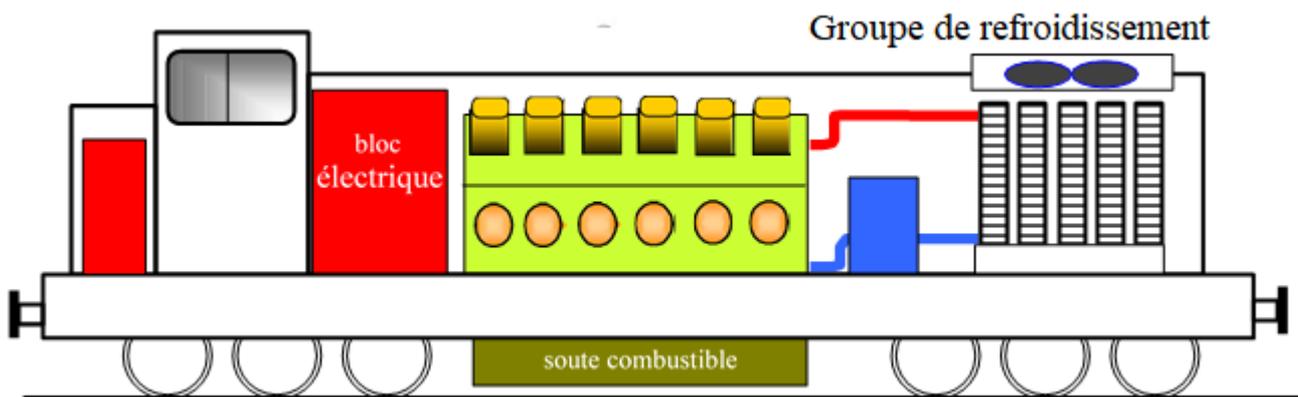
Les fonctions – train se répartissent par grandes masses et volumes pour élaborer un diagramme. La distinction entre engins moteurs sans passager ou avec passagers est bien sûr fondamentale.

#### Diagramme

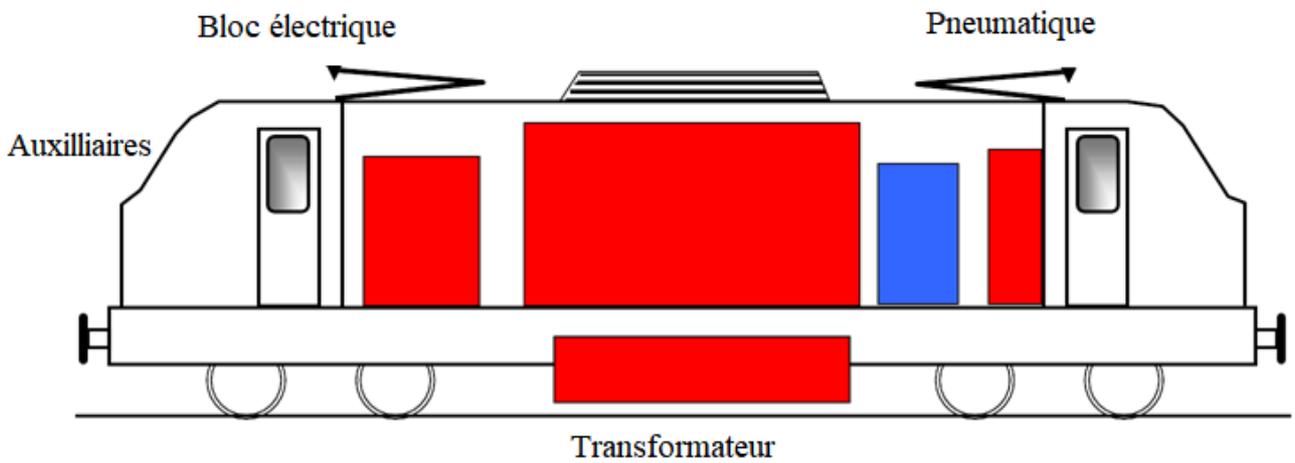
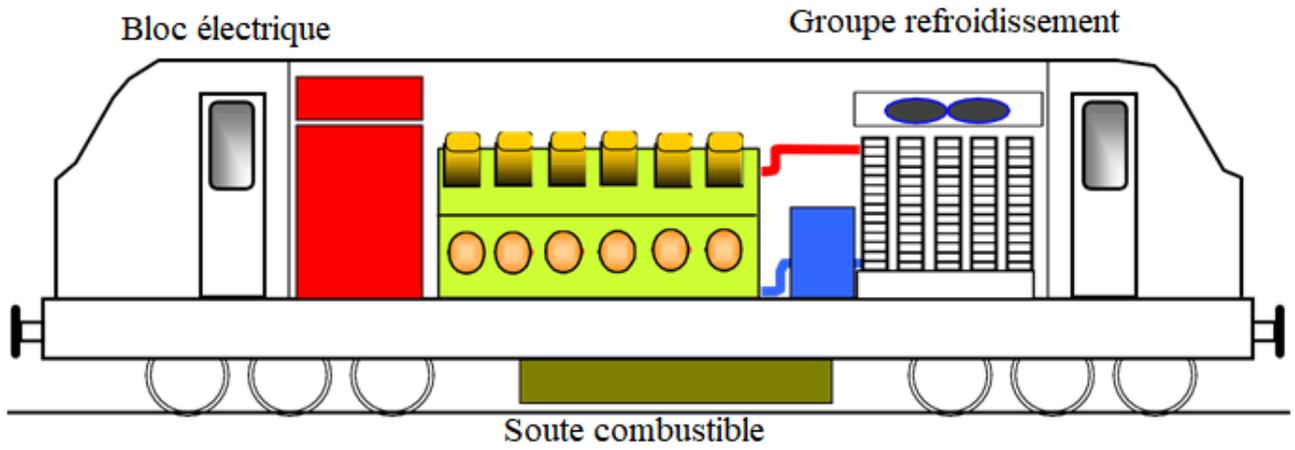
Les masses ou encombrements les plus importants sont :

- en traction électrique : le transformateur, les blocs électriques, l'espace de conduite
- en traction thermique : le groupe électrogène, le groupe de refroidissement, le bloc électrique, éventuellement, et l'espace de conduite.
- en automotrice ou automoteur: le compartiment passagers en plus

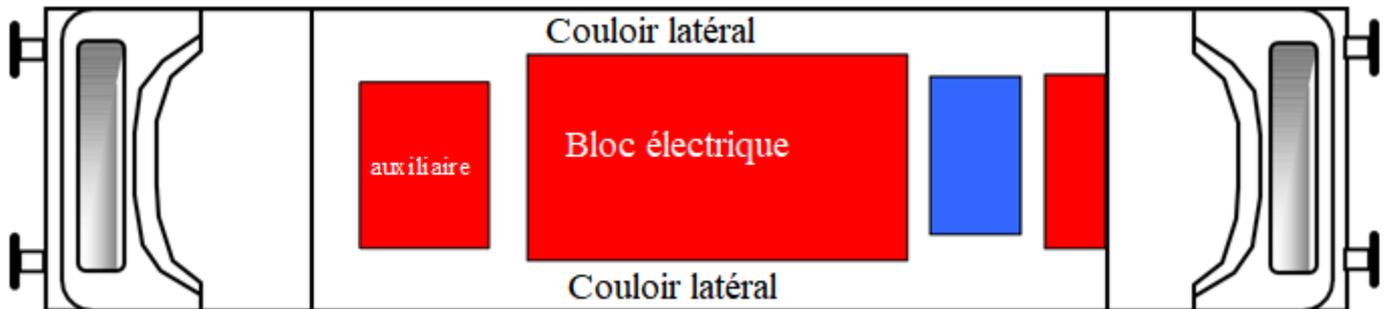
Les dispositions les plus courantes sont les suivantes :



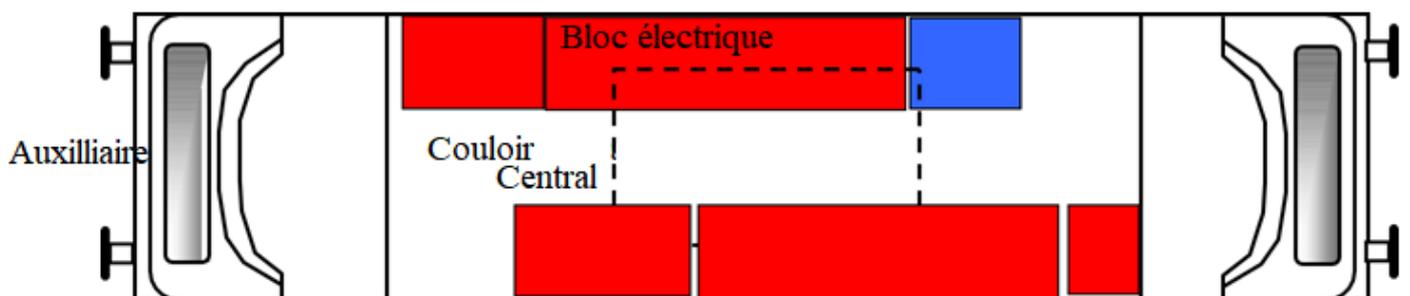
MONOCABINE



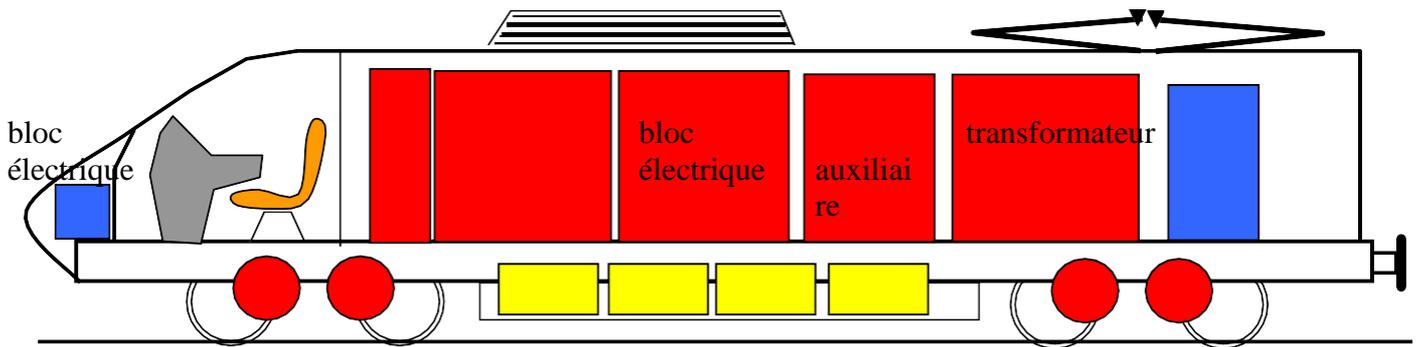
**BICABINE à couloirs latéraux**



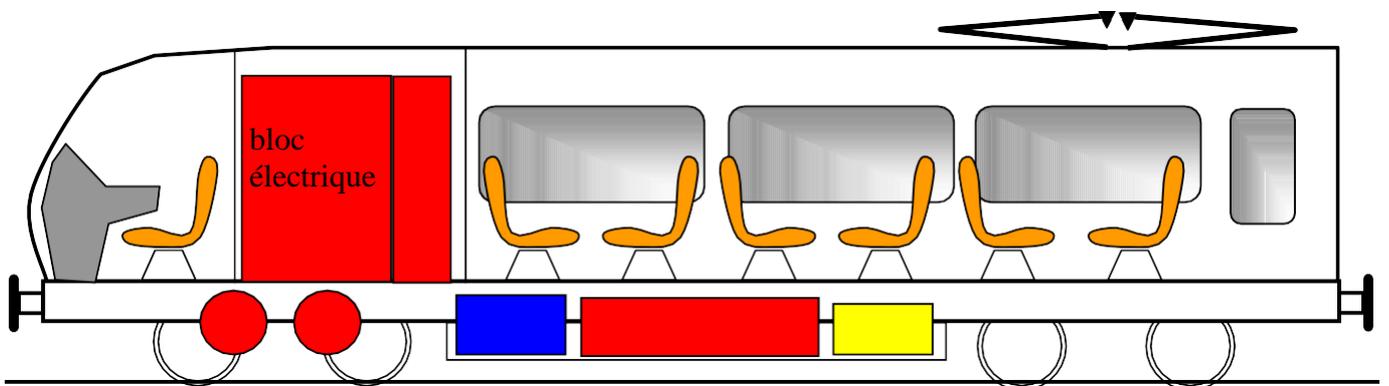
**BICABINE à couloir central**



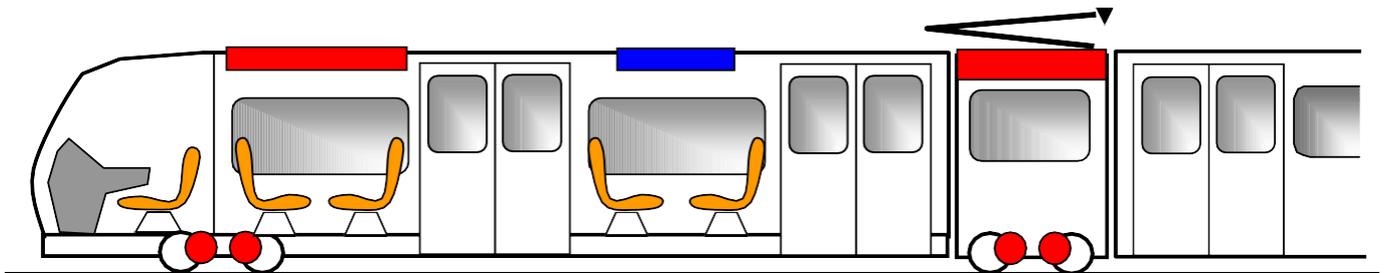
### MOTRICE Cabine unique



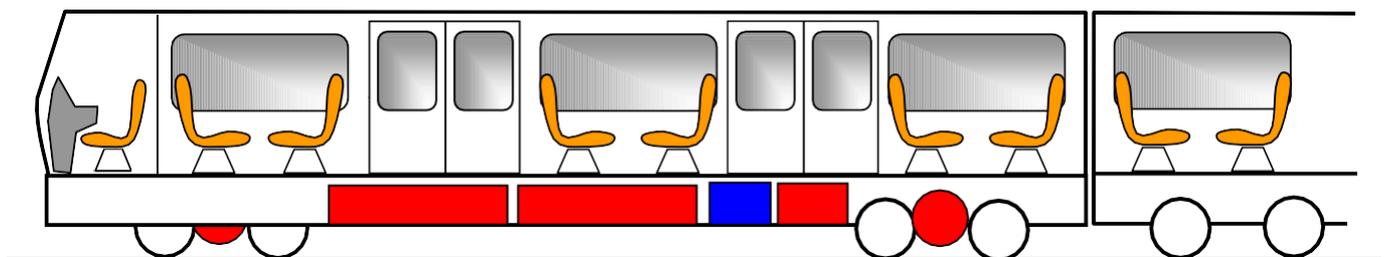
### AUTOMOTRICE



### TRAMWAY



### METRO



## Conduite

La fonction « conduite » revêt toujours une importance fondamentale, bien que les tâches allouées à l'Homme aient considérablement évoluées.

L'analyse de la fonction demande un inventaire rigoureux des domaines qu'elle recouvre:

- tâches relatives au fonctionnement du train
- tâches de résolution de situation dégradées (information et conduite à tenir)
- tâches d'observation et de surveillance (voie, signalisation)
- environnement de l'Agent de conduite (ergonomie, confort)
- sécurité et facilité des accès à l'engin

Il y a une forte imbrication des solutions constructives propres à satisfaire le meilleur exercice de la conduite d'un train. L'ensemble est installé dans un espace appelé « cabine de conduite » comportant un pupitre sur lequel sont montés tous les dispositifs utilisés par l'agent de conduite. La cabine doit bénéficier d'une visibilité conforme à une morphologie type. L'ambiance est maintenant climatisée; le niveau de bruit acceptable est atteint grâce à des dispositions insonorisantes.

Un exemple de disposition de cabine et de pupitre de conduite est donné ci-dessous.



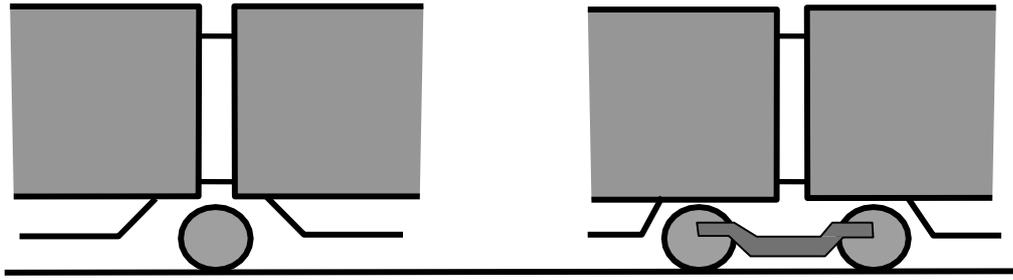
## **La rame articulée**

Son principe consiste à placer l'organe de roulement - essieu ou bogie - en commun sous deux caisses adjacentes. L'idée est ancienne puisqu'elle a été développée par Ettore BUGATTI sur l'un de ses autorails à grande vitesse, célèbre en 1930. Des recherches sont entreprises systématiquement sur la technologie du bogie commun avec caisses articulées.

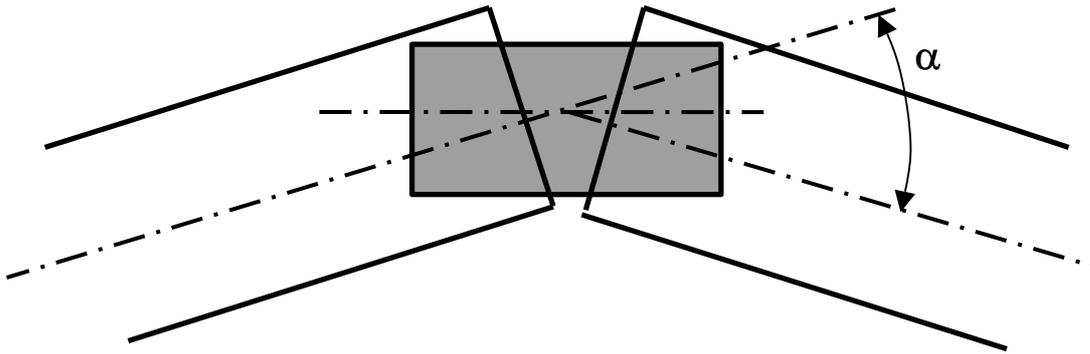
### **Le Principe**

Le véhicule ferroviaire classique est composé d'une caisse sur deux essieux ou deux bogies. En plaçant un essieu ou un bogie commun à deux caisses les paramètres suivants se trouvent considérablement améliorés :

- réduction de moitié du nombre de bogies, permettant de réduire la masse et les perturbations aérodynamiques
- la liaison entre véhicules et bogie commun assure une grande stabilité de roulement
- diminution de la césure entre véhicules donc amélioration de l'aérodynamisme
- éloignement des organes de roulement - sources de bruits et d'inconfort - des salles occupées par les passagers.
- abaissement du plancher des véhicules permettant de :
  - réduire leur hauteur ou de ménager deux niveaux de salles
  - faciliter l'accès
- intercirculation entre véhicules étanche et confortable



En courbe le bogie prend la direction de la bissectrice de l'angle des deux véhicules:

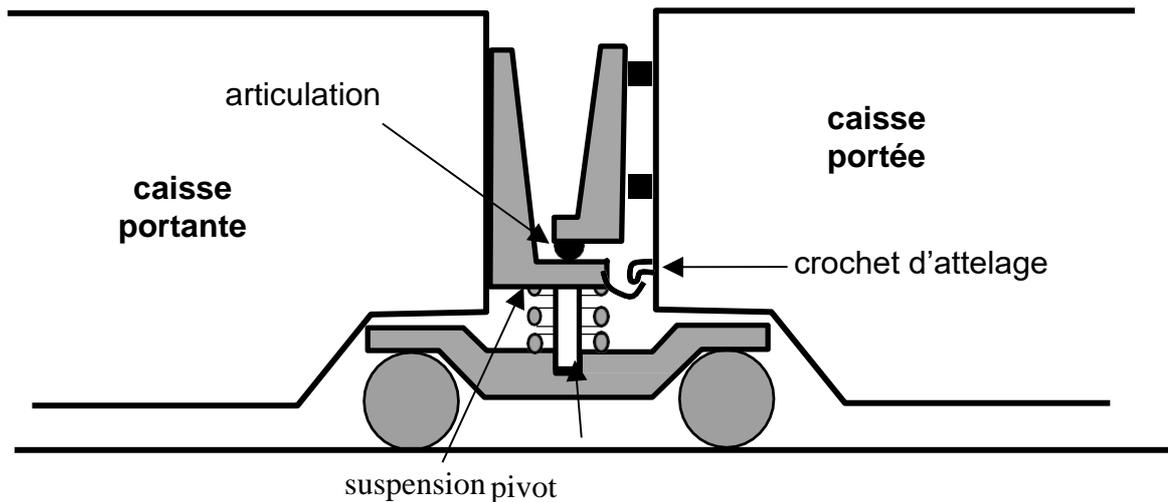


### L'articulation sur bogie

Elle assure trois fonctions :

- **articulation des caisses entre elles** dans les trois plans
- **articulation du bogie et la transmission des efforts**
- **support de la charge** et sa suspension

Pour réaliser ces fonctions une caisse est dite “ **portante** ”; elle reçoit la caisse adjacente dite « **portée** ». La caisse portante repose sur le bogie.



L'**articulation des caisses** entre elles est réalisée par une “ **rotule** ” permettant le mouvement relatif dans tous les plans.

L'**articulation du bogie** sous la caisse portante est réalisée par un **pivot** solidaire de la caisse portante.

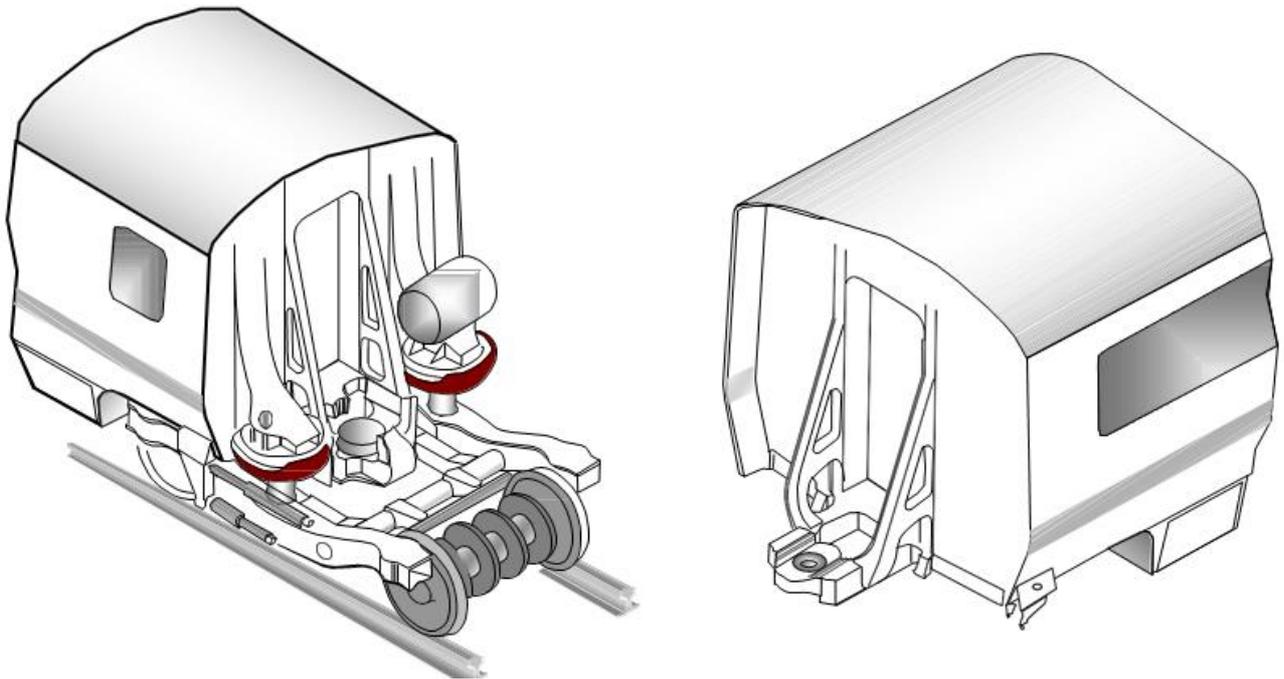
Le **support** et la **suspension** sont réalisés soit par un système à ressort soit par une suspension pneumatique.

L'**intercirculation** entre caisse est assurée par un anneau réalisé en deux parties :

- fixe solidaire de la caisse portante recevant la rotule, la suspension, le pivot et l'équipement

d'intercirculation;

- mobile, lié élastiquement à la caisse portée et comprenant la rotule.



### La remorque - clé

Si l'on considère une rame constituée d'un nombre de remorques tel qu'il y ait symétrie dans l'axe du train, il est nécessaire que l'une des remorques soit "portée" à ses deux extrémités: c'est la "remorque - clé" reliant les deux demi- rames ensemble :



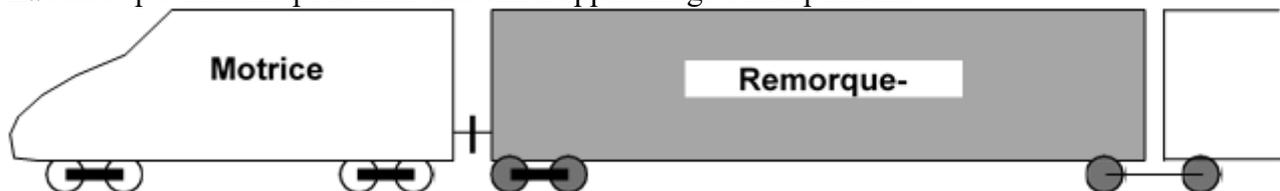
### La remorque extrême

Remorque -clé

Elle est intermédiaire entre la motrice et les remorques. Si l'on choisit la configuration de motrices indépendantes et dételables, la remorque extrême sera « mixte » c'est-à-dire à la fois sur un bogie indépendant et sur un bogie commun à la remorque suivante.

D'autre part, suivant la puissance à installer, le bogie indépendant est porteur ou moteur.

La remorque extrême peut alors contenir l'appareillage correspondant.



les essais concernent l'homologation et la qualification des sous-systèmes ferroviaires. Ces essais sont classés par sous-système :

- Matériel Roulant
  - Infrastructure
  - Équipements ferroviaires
- objectifs
- Déterminer les caractéristiques de dynamique ferroviaire en fonction de la voie d'un matériel roulant neuf, modifié

ou dont les conditions d'exploitation évoluent – pour tous les types de véhicules (jusqu'à 25t/essieu) et à toutes les vitesses (jusqu'à 574,8 km/h)

- Mettre au point et investiguer en matière de dynamique ferroviaire sur tous les réseaux européens
- Optimiser les essais en ligne par simulation numérique en dynamique ferroviaire

#### **Gabarit ferroviaire :**

Véhicules fermés :

Le gabarit statique est l'enveloppe à l'arrêt des dimensions hors tout des véhicules. (*ex : une voiture mesurant 2,50 m de largeur, 10 m de longueur et 3,50 m de hauteur*)

Le gabarit dynamique est défini comme étant l'enveloppe formée par le passage du gabarit statique du train sur la voie, tenant compte de l'effet des courbes et du dévers ou des déformations éventuelles de son profil. Toute interférence d'objet avec cette enveloppe engage directement le gabarit du train.

La lame d'air est définie comme l'espace de sécurité qui doit subsister, en tout point de la ligne, entre le gabarit dynamique et un éventuel obstacle fixe. Elle est fixée à 0,10 m.

Le gabarit dynamique augmenté de la lame d'air peut également être désigné par l'expression de gabarit limite d'obstacle (GLO). Le passage du GLO doit être assuré en tous points de la voie.

Véhicules ouverts ou disposant d'ouvertures :

Pour ces véhicules, on détermine un volume dénommé « gabarit libre » qui s'obtient en ajoutant au GLO une distance de sécurité complémentaire liée à la faculté pour les personnes transportées de projeter une partie de leur corps à l'extérieur.

La distance de sécurité est fixée à 0,50 m .

Toutefois, des valeurs inférieures peuvent être envisagées si des dispositions spécifiques *au plan de l'exploitation* sont mises en œuvre ou s'il est démontré une absence de risques pour les personnes transportées.

Dans le cas de voies ferrées jumelées à d'autres voies, il convient de se reporter au guide technique correspondant publié par le STRMTG.

Application pratique du principe de gabarit ferroviaire :

Une distance au bord intérieur du rail dite de gabarit ferroviaire sera définie par chaque exploitant en prenant en compte le matériel roulant le plus pénalisant appelé à circuler sur son réseau, de façon à couvrir le GLO ou le gabarit libre.

Cette distance de gabarit ferroviaire sera appliquée pour le dégagement du gabarit de la voie avec les éléments justificatifs.

#### **Écartement :**

Les tolérances par rapport à l'écartement nominal sont :

Type de voie	Ecartement nominal	Tolérance maximale	Tolérance minimale
Voie normale	1435 mm	+37 mm	Non fixée
Voie métrique	1000mm	+30mm	Non fixée
Voie submétrique	<1000mm	+25mm*	Non fixée

\* Cette tolérance doit être mise en relation avec la largeur de la table de roulement du matériel utilisé.

On veillera particulièrement à appliquer une valeur de sur-écartement dans les courbes prononcées en fonction des cotes de calage du matériel roulant.

#### **Traverses, attaches, selles :**

Traverses :

Une traverse doit assurer au moins un appui sous chaque file de rail.

Une traverse est considérée comme « bonne » si :

- elle est entièrement en contact avec le sol sous les rails ;
- elle dispose d'une attache efficace de part et d'autre du rail ;
- son état de conservation est sain : absence de pourrissement, de fracture ou d'éclatement pour les traverses bois.

Attaches :

Une attache est considérée comme efficace si :

- en rail Vignole, un tire-fond au moins assure un serrage efficace en prenant appui sur le patin extérieur du rail

;

- en rail double champignon, le coin est posé et assure un calage efficace du rail, et si le coussinet est fixé sur la traverse sans trace de déplacement latéral ;

Selles :

La pose sur selles n'est pas obligatoire. Elle apporte cependant une meilleure tenue de la voie dans les courbes prononcées.

Le **gabarit ferroviaire** désigne le contour transversal d'un véhicule ferroviaire. Ce contour, qui fait l'objet d'une normalisation précise, doit s'inscrire dans le **gabarit des obstacles**, qui est le contour qui doit être maintenu libre dans les installations ferroviaires. Le chemin de fer étant un mode guidé, les véhicules ne peuvent pas dévier de leur voie pour éviter tout obstacle imprévu, d'où l'importance de la notion de gabarit. L'harmonisation des gabarits est nécessaire pour permettre l'interopérabilité des réseaux ferroviaires.

Le terme de gabarit désigne aussi un profil métallique qui reproduit la partie haute du gabarit de chargement et qui permet de contrôler directement le respect des cotes imposées par un chargement réalisé sur un wagon avant d'autoriser son expédition.

### **Types de gabarits**

En ce qui concerne les véhicules, l'encombrement s'apprécie à l'arrêt (gabarit statique), mais aussi en mouvement (gabarit cinématique) car, en fonction de la longueur du véhicule (voiture ou wagon) et de l'entraxe des essieux ou des bogies, le gabarit des obstacles peut être engagé en largeur dans les courbes, soit au milieu vers l'intérieur de la courbe, soit aux extrémités vers l'extérieur. Il faut tenir compte aussi, en hauteur du jeu des suspensions en mouvement.

En ce qui concerne la voie dite « à écartement normal » (1435 mm), le premier gabarit international fut adopté en 1914 par la convention de Berne. Il est connu sous le nom de gabarit passe-partout international (PPI). Sa largeur est de 3,150 m, sa hauteur de 4,280 m au-dessus de la surface du rail. Tout véhicule ferroviaire respectant le gabarit PPI est apte à circuler sur toutes les voies normales européennes, à l'exception des voies britanniques. Par la suite, l'Union internationale des chemins de fer a codifié à plusieurs reprises le concept de gabarit et a défini les quatre gabarits actuellement en vigueur au niveau international.

- le gabarit international (PPI), qui est le plus petit commun dénominateur ;
- le gabarit GA ; c'est le gabarit de base du réseau ferré français ;
- le gabarit GB ; gabarit disponible sur certaines lignes ;
- le gabarit GC ; ce dernier est conseillé pour les nouvelles lignes grande vitesse en Europe.

En outre, un gabarit GB1 a été défini pour permettre le transport de certains conteneurs de grandes dimensions.

Ces gabarits ont tous la même largeur, 3 150 mm, ils ne diffèrent que dans les parties hautes, 4,320 m pour les GA et GB, 4,70 m pour le GC. La différence entre les gabarits GA, GB et GB1 se trouve au niveau de la « corne », c'est-à-dire au raccordement de la rive (limite verticale) et du ciel (limite horizontale haute). Élargir cette corne permet de passer des conteneurs ou des caisses de camions plus larges ou plus hauts

En Europe, tous les pays de l'union des chemins de fer d'Europe centrale, les réseaux nordiques et l'Allemagne, ont un gabarit assez généreux qui préfigurait le GC, alors que les réseaux du sud, confrontés à un relief plus montagneux ont adopté à l'origine des gabarits plus restreints. La Grande-Bretagne constitue un cas particulier car elle a conservé un gabarit réduit tant en hauteur qu'en largeur. La largeur est notamment réduite au niveau des quais, ce qui explique le profil particulier aux rames Eurostar, plus étroites en bas de caisse.

Certains réseaux ont choisi un gabarit encore plus généreux. Aux États-Unis ou au Canada, par exemple, les chemins de fer ont été construits dans des zones vierges sans expropriations, mais avec une demande forte en matériaux volumineux et pas ou peu d'autres moyens de transport. Ainsi, a-t-on choisi un gabarit qui permet actuellement d'avoir des wagons *double-stack* qui portent deux containers posés l'un sur l'autre, ou des voitures à double étage spacieuses.

### **Gabarit des réseaux fermés**



Le gabarit des navettes Eurotunnel, en comparaison avec celui de la locomotive, s'explique dans le cas d'un matériel dédié.

Les réseaux fermés, comme les métros, ont souvent adopté un gabarit différent et généralement plus réduit. Le métro de Paris a une largeur de 2,40 m, car il fut décidé à l'origine d'en faire un chemin de fer local, interdisant l'accès des trains des compagnies de chemins de fer.

Lorsqu'un véhicule ou un chargement dépasse les limites d'encombrement du gabarit, il peut dans certains cas être admis au transport, après une étude spécifique qui peut prescrire certaines conditions : itinéraire particulier, interdiction de trains croiseurs, etc. Il circule alors sous le régime d'un transport exceptionnel.

Dans certains réseaux fermés, le gabarit peut au contraire être plus grand. C'est le cas des navettes Eurotunnel. Le tunnel a été construit dès le départ pour permettre le passage de navettes surdimensionnées pour le ferroutage de camions et autocars.

La masse à l'essieu à vide en ordre de marche doit figurer parmi les caractéristiques du matériel roulant pour chacun des véhicules. Lorsque les masses du matériel ne sont pas connues précisément, elles sont calculées en fonction des masses de matériels existants comparables, majorées de 15%.

### **Portes :**

#### **Cas général :**

En règle générale les trains circulent portes fermées par l'exploitant. Cependant, en cas d'évacuation, les portes doivent pouvoir être déverrouillées par les voyageurs.

Toutefois par forte chaleur, les portes extérieures des voitures ou autorails, donnant directement sur la voie, peuvent être maintenues ouvertes pendant la marche du train dans les conditions suivantes :

- chaque accès doit être doté d'une barrière rigide dont la largeur doit au moins couvrir la largeur d'ouverture de la porte, de sorte que cette barrière prenne appui contre les montants de la porte ;
- la hauteur de la barrière doit être d'au moins 1,00 m ;
- le barreaudage doit être adapté à la retenue d'une personne, tout particulièrement d'un enfant en bas âge. Tout barreaudage horizontal pouvant faire office d'échelle est proscrit ;
- les fixations de la barrière sont bilatérales et composées d'un dispositif empêchant le soulèvement ou l'ouverture directs des barrières ;
- un affichage fixe à chaque barrière rappelle l'interdiction de les manipuler avant l'arrêt complet du train.

Ces dispositions particulières ne peuvent être appliquées aux voitures dotées de compartiments à ouverture individuelle donnant directement sur la voie.

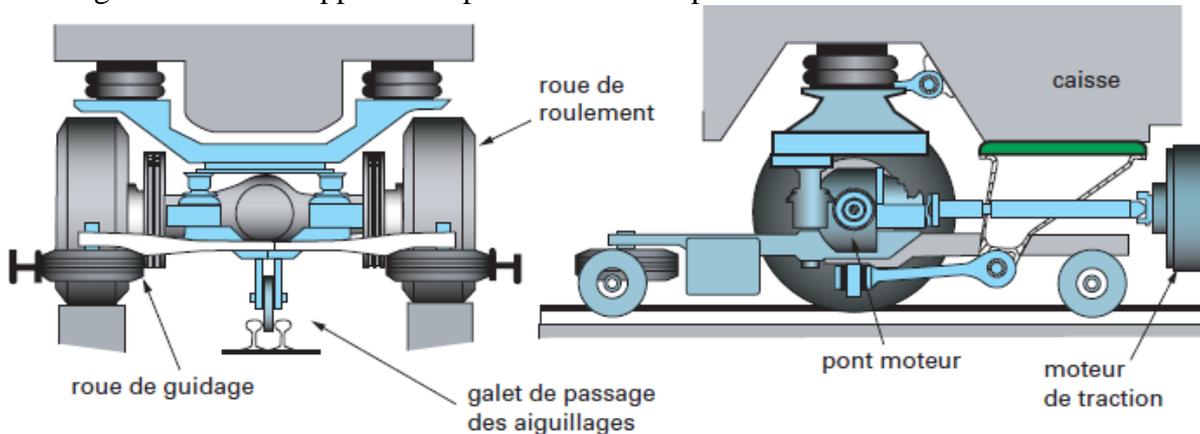
#### **Dispositions relatives aux baladeuses :**

Les baladeuses sont équipées de dispositifs de fermeture. Ceux-ci peuvent être constitués de chaînes ou chainettes métalliques ou de cordes non extensibles. Leur hauteur à la flèche maximum doit être comprise entre 0,70 m et 0,85 m. Leur ouverture ne doit pas pouvoir s'effectuer directement par un geste d'appui ou de levier simple. Une attention particulière doit être portée à la solidité de leur point de fixation.

La présence de dispositifs de fermeture des baladeuses n'est pas nécessaire lorsque :

- ces véhicules sont équipés d'un dispositif de maintien individuel des personnes en position assise ;
- ou les conditions suivantes sont réunies :
  - position assise des passagers ;
  - trajet d'une durée inférieure à 30 mn ;

- vitesse n'excédant pas 15 km/h ;
- exposition limitée de la ligne (absence de tunnel ; pas de route à circulation rapide ou fréquente, jumelée à la voie ; pas de fortes déclivités de la voie ou du relief).
- surveillance visuelle continue des passagers par le personnel d'exploitation
- consigne de sécurité rappelées au public avant le départ.



### Charge à l'essieu

Dans le domaine du transport, la **charge à l'essieu**, ou charge par essieu, est la charge maximale qui peut être admise sur chaque essieu du véhicule en fonction des caractéristiques de l'infrastructure de transport. Cette charge dépend du poids total du véhicule, du nombre d'essieux et de la disposition de ceux-ci sur la longueur du véhicule. Cette notion est importante pour la maintenance des réseaux de transport terrestres, tant rouliers que ferroviaires, et fait généralement l'objet de réglementation.

Prescriptions réglementaires en France concernant la charge à l'essieu sur les routes

Essieux isolés

L'essieu le plus chargé d'un véhicule ou d'un élément de véhicule ne doit pas supporter une charge supérieure à **13 tonnes**. Cette valeur est essentielle puisque l'essieu jumelé de 13 t (130 kN) est l'essieu de référence pour la méthode française de dimensionnement des chaussées<sup>1</sup>.

Essieux groupés

Sur les véhicules ou éléments de véhicules comportant plus de deux essieux, la charge de l'essieu le plus chargé appartenant à un groupe d'essieux ne doit pas, en fonction de la distance séparant deux essieux consécutifs de ce groupe, dépasser les valeurs suivantes<sup>2</sup> :

**Distance entre deux essieux consécutifs**

(e)

**Charge de l'essieu le plus chargé**

$e < 0,90$  m

7,350 tonnes

$0,90 \text{ m} \leq e < 1,35$

7,350 tonnes majorées de 0,35 tonne par tranche de 5 centimètres de la distance entre les deux essieux diminuée de 0,90 mètre ;

$1,35 \text{ m} \leq e < 1,80$

10,5 tonnes.

Toutefois, la charge maximale de l'essieu moteur appartenant à un groupe de deux essieux d'un véhicule à moteur peut être portée à 11,5 tonnes, à condition que la charge totale du groupe ne dépasse pas, en fonction de la distance séparant les deux essieux, les valeurs suivantes<sup>2</sup> :

**Distance entre deux essieux consécutifs**

(e)

**Charge maximale de l'essieu moteur**

$e < 0,90$  m

13,15 tonnes

$0,90 \text{ m} \leq e < 1,0$  m

13,15 tonnes majorées de 0,65 tonne par tranche de 5 centimètres de la distance entre les deux essieux diminuée de 0,90 mètre;

La plus grande des deux valeurs suivantes :  
 - 13,15 tonnes majorées de 0,65 tonne par tranche de 5 centimètres de la distance entre les deux essieux diminuée de 0,90 mètre ;  
 - 16 tonnes ;

$1,0 \text{ m} \leq e < 1,35$

$1,35 \text{ m} \leq e < 1,80$

19 tonnes ;

Prescriptions réglementaires en Europe sur la charge à l'essieu routière

Prescriptions par pays

Les prescriptions relatives au poids des essieux en Europe étaient en 2005 les suivantes<sup>3</sup> (des données plus récentes sont disponibles grâce à l'ITF ici:[1])<sup>4</sup>

Pays	Poids par essieu porteur	Poids par essieu moteur	Camion à 2 essieux	Camion à 3 essieux	Camion à 4 essieux	Camion à 5 essieux et +	Ensemble articulé de 5 essieux et +
Allemagne	10	11,5	18	26	36	40	40
Espagne	10	11,5	18	26	36	40	40
France	13	13	19	26	32	32	40/44/45
Suisse	10	11,5	18	25	34	40	40
Turquie	10	11,5	18	25	36	40	40

La mise en place du marché unique a donné une acuité particulière au problème de la variabilité des réglementations entre pays, en même temps qu'elle a apporté une base institutionnelle pour cette harmonisation. Après de nombreuses années de tentatives infructueuses, ce nouveau contexte a enfin permis une avancée significative relative aux véhicules de plus de 3,5 t de masse maximale en charge.

Elle prescrit aux états membres de ne pas interdire la circulation sur leur territoire de véhicules respectant les seuils ci-après.

La charge maximale par essieu dépend si celui-ci est moteur ou porteur :

- **essieu non moteur simple : 10 t,**
- **essieu moteur : 11,5 t.**

Il en résulte que s'il n'y a qu'un « essieu français », l'essieu de 13 t, on peut parler de deux « essieux européens », l'un relatif aux essieux moteurs, de 11,5 t, l'autre relatif aux essieux non moteurs, de 10 t ;

La masse totale d'un essieu tandem de remorque ou semi-remorque est la suivante (e étant l'écartement entre essieux):

Distance entre deux essieux consécutifs (d)	masse totale
$e < 1 \text{ m}$	11 tonnes
$1 \text{ m} \leq e < 1,30 \text{ m}$	16 tonnes ;
$1,3 \text{ m} \leq e < 1,80 \text{ m}$	18 tonnes.
$1,8 \text{ m} \leq e$	20 tonnes.

Les amendements ultérieurs de la directive de 1984 n'ont pas modifié les seuils ci-dessus.

Impact de la charge à l'essieu sur la chaussée

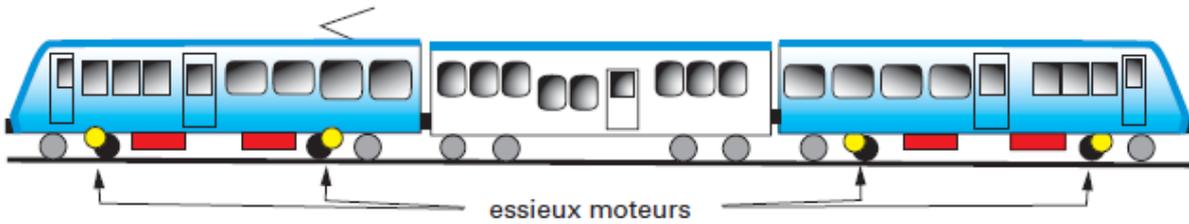
L'incidence de ces charges sur la pérennité de l'infrastructure ferroviaire, et notamment sur les ponts-rails, dépend non seulement de la charge par essieu, mais également de l'espacement entre les différents essieux et de la vitesse des circulations. A contrario, les charges les plus faibles autorisent des vitesses plus élevées comme pour les automoteurs thermiques ou électriques qui ne dépassent pas les 17t de charge à l'essieu ; il est alors fait usage de tableaux de type "C" (en forme de col)seuls ou groupés pour signaler cette particularité sur le terrain.



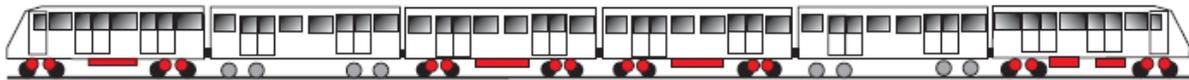
Traction concentrée



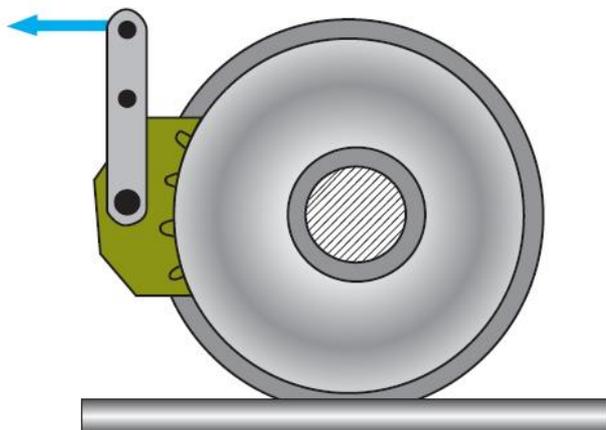
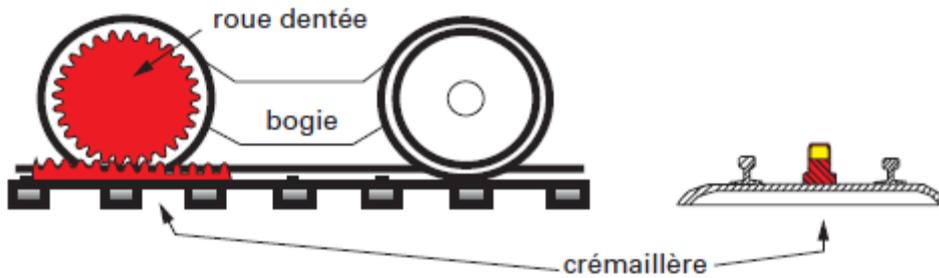
Traction semi-répartie : locomotives en unités multiples



Automotrice à traction semi-répartie



Rame de métro à traction semi-répartie : 4 motrices + 2 remorques



## DIMENSIONNEMENT DE L'ENGIN MOTEUR

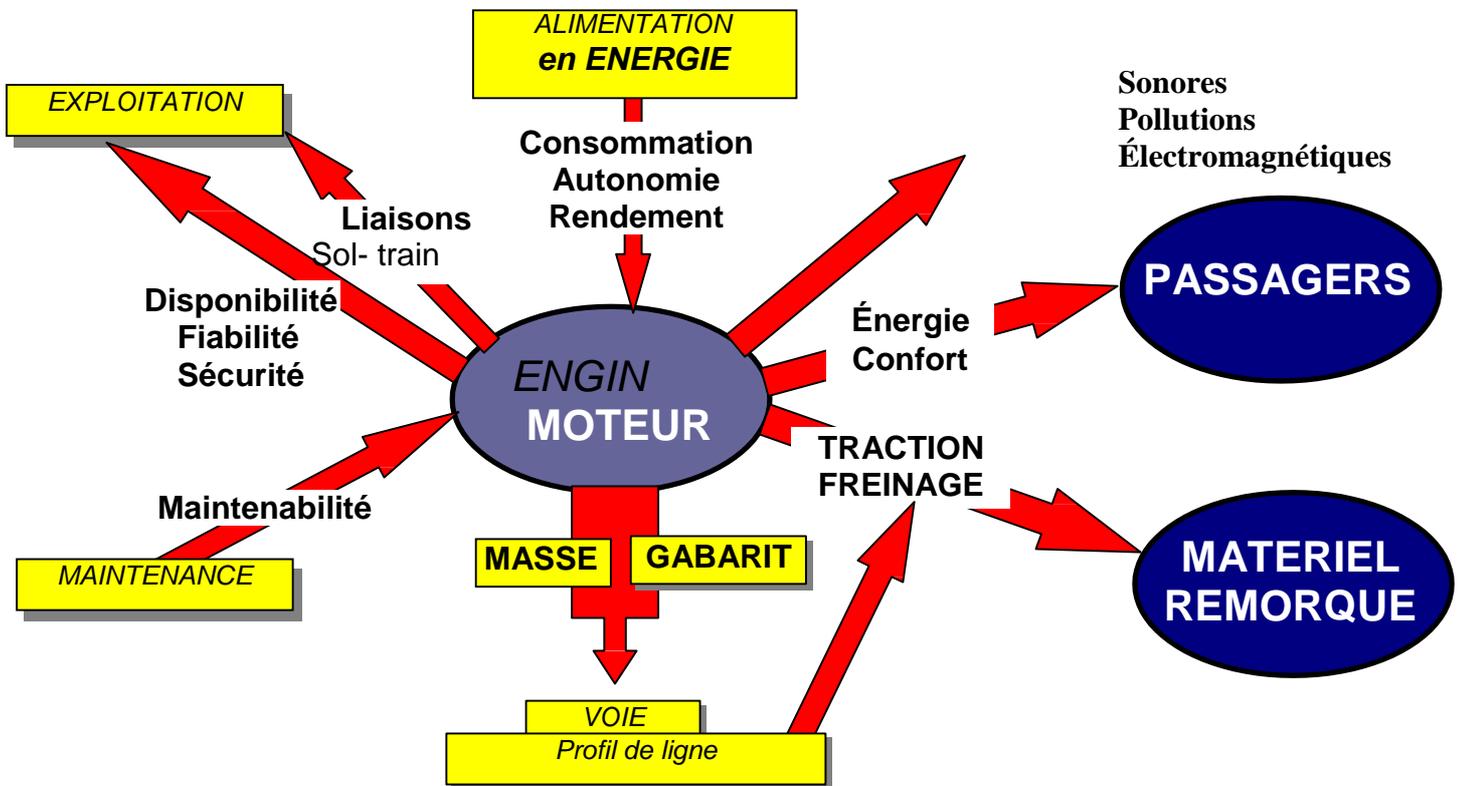
Un engin moteur est conçu pour satisfaire le cahier des charges répondant aux exigences d'un programme de traction. Celui-ci définit :

- Une charge remorquée
- Un parcours
- Un horaire

Le cahier des charges définit les contraintes opérationnelles dans lesquelles doit évoluer l'engin :

- Caractéristiques de la voie et des infrastructures : gabarit, masses
- Profil de ligne : profil en long, profil en plan : rampes, pentes, courbes
- Alimentation en énergie dans le cas de la traction électrique
- Autonomie en combustible dans le cas de la traction autonome
- Consommation d'énergie : rendement
- Interfaces avec le matériel remorqué : attelage, énergie, communications
- Interfaces environnementales : nuisances sonores
- Interférences électromagnétiques, pollution

- Exigences de confort pour le personnel utilisateur : conduite
- Exigences de fiabilité, disponibilité de service et de sécurité
- Contraintes de maintenance
- Compétitivité économique



## Le programme de traction

L'éventail de la demande de transport des Clients est très étendu :

- **Passagers :**
  - Liaisons à grandes distances et grande vitesse : trains légers, arrêts peu fréquents
  - Liaisons inter villes : moyennes distances, quelques arrêts
  - Liaisons régionales : faibles distances, arrêts fréquents
  - Transports suburbains et de grandes banlieue : charges élevées, arrêts fréquents
  - Transports urbains : grande cadence, arrêts très fréquents (métro, tramway)
- **Fret :**
  - Convois lourds sur grandes distances sans arrêt
  - Trains "centre à centre"
  - Dessertes locales
  - Convois spéciaux de type "miniers" de très fort tonnage

Chacun de ces programmes est caractérisé par deux paramètres :

- la **charge remorquée**
- la **vitesse commerciale**

La réponse apportée par l'engin moteur s'exprime par deux caractéristiques fondamentales :

- l' **effort** dont il est capable pour remorquer la charge
- la **vitesse maximale** à laquelle il doit circuler

Pour les satisfaire il faut installer une puissance et des organes capables de la développer.

L'ensemble doit s'inscrire dans les contraintes de **masse** et de **gabarit**.

Dimensionner l'engin de traction consiste à déterminer les 5 paramètres fondamentaux :

- Effort
- Vitesse
- Puissance
- Masse
- Volume

Ils permettent de déterminer ensuite les paramètres des principaux constituants.

### 1- L'effort de traction

L'engin doit être capable d'exercer un effort donné par la relation fondamentale de la dynamique :

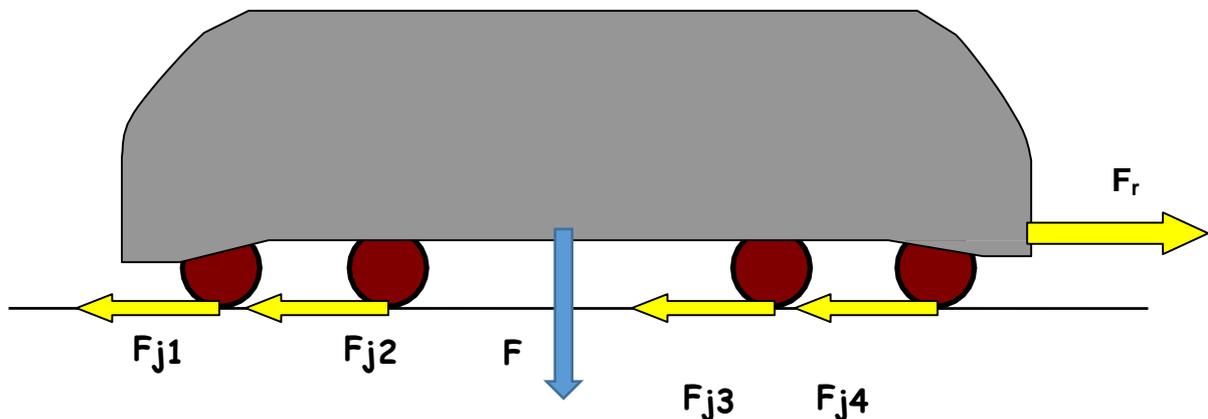
$$\Sigma \mathbf{F} = \Sigma \mathbf{M} \times \gamma$$

La somme des efforts qui s'exercent est composée :

- des efforts résistants engendrés par les véhicules, y compris l'engin moteur
- de l'effort permettant l'accélération du train

L'effort résultant, appelé "**effort à la jante**" s'applique aux contacts roues -rails de tous les essieux moteurs. Il a pour expression :

$$-F_r = -\Sigma F_r + F_v = F_{j1} + F_{j2} + F + F_{j3} + F_{j4}$$



L'application des efforts résistants se fait :

- à l'attelage pour
- toutes les résistances provenant du matériel remorqué
- à l'avant du premier véhicule pour tous les efforts provenant de l'environnement (résistance de l'air)
- sur l'engin moteur pour toutes résistances qui lui sont propres.

L'effort de traction est limité par :

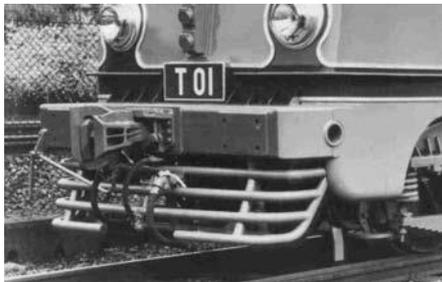
- la résistance des attelages et de tous les organes mécaniques participant à la traction : transmissions, structure de caisse, etc.
- l'adhérence utilisable aux contacts roues -rails

On caractérise l'engin moteur par l'effort maximal au démarrage, exprimé en kN.

### Limite de résistance des attelages

En Europe, l'attelage manuel à vis est calculé pour :

- limite élastique de 43 t (427 kN)
- limite de rupture de 100 tonnes (981 kN). Les attelages centraux automatiques disposent :
- limite élastique de 150 t (1471 kN)
- limite de rupture de 350 t (3433 kN)



### *Adhérence utilisable en traction*

Le coefficient d'adhérence est le rapport :

**F** : l'effort tangentiel à la jante

**Q** : la charge de la roue

$$\mu = \frac{F}{Q}$$

Les valeurs pratiques d'adhérence en exploitation varient suivant l'état du rail :

- Conditions climatiques (humidité, pollution par les résidus végétaux)
- Environnement (pollution grasse, zones industrielles)

Les constructeurs de matériel moteur fournissent un coefficient d'adhérence pour les conditions normales du rail : propre et sec, qu'il convient de préciser. On considère généralement le coefficient d'adhérence maximal utilisable au démarrage du train, phase la plus difficile à réaliser. En pratique, compte tenu des moyens actuels de contrôle de l'effort moteur, notamment en conditions dégradées (nous en étudierons les modalités dans le chapitre " Chaîne de traction "), on admet des coefficients compris entre **0,35** et **0,40**.

Un essieu chargé, par exemple à 22,5 t, peut exercer un effort à la jante compris entre :

$$0,35 \times 22,5 \times 9,81 = \mathbf{77,25 \text{ kN}} < \mathbf{F_J} < 0,40 \times 22,5 \times 9,81 = \mathbf{88,3 \text{ kN}}$$

Etant donné l'effort maximal à exercer on en déduit le **nombre d'essieux** que devra comporter l'engin moteur. Pour une locomotive à 4 essieux moteurs l'effort à la jante sera :

$$\mathbf{309 \text{ kN}} < \mathbf{F_J} < \mathbf{353 \text{ kN}}$$

## Les efforts résistants

Les efforts à vaincre pour la mise en mouvement du train proviennent :

- de la **résistance à l'avancement des véhicules**, moteur et remorqués
- du **profil de la voie**
- de l'**inertie du train** à vaincre
- 

## Résistance à l'avancement : expression générale

Elle est de la forme :  $R = A + B.V + C.V^2$

**A** : représente la **résistance massique**, indépendante de la vitesse.

Elle intègre :

- les frottements des paliers d'essieux
- la résistance au roulement roue - rail due aux pertes par déformation élastique des métaux en contact
- les frottements des organes de transmission de l'engin moteur (engrenages, paliers)
- la résistance due aux organes auxiliaires entraînés par les essieux (génératrices auxiliaires des voitures ou des wagons frigorifiques)

**B** rassemble toutes les résistances autre que celles exprimées par **A** et  $CV^2$  et notamment celles qui résultent du contact périodique entre boudins et rails. Il est donc fonction de tous les paramètres de stabilité des véhicules.

**C** est le **coefficient aérodynamique** caractérisant la pénétration dans l'air. Il est fonction de :

**S** : surface du **maître -couple**

**K<sub>1</sub>** : paramètre de forme (avant et arrière)

**K<sub>2</sub>**: paramètre d'état de surface " mouillée "

$\psi$  : périmètre transversale partiel de rail à rail

**L** : longueur de la rame

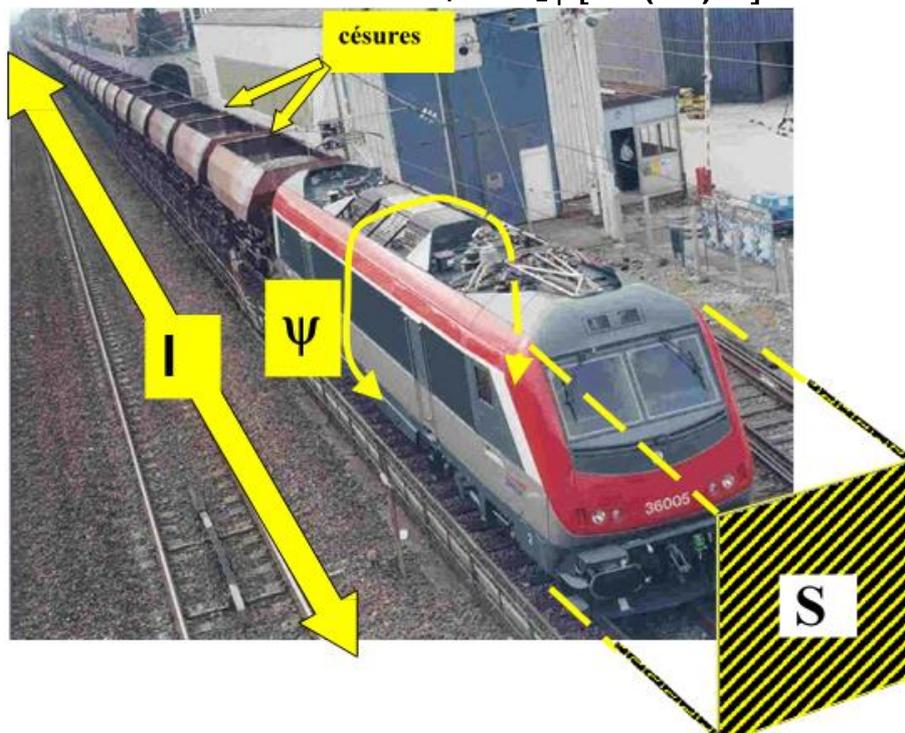
$\Delta l$  : longueur fictive équivalente à une césure entre éléments

**n** : nombre d'éléments automoteurs

**N<sub>p</sub>** : nombre de pantographes en service

Seule l'expérimentation permet de vérifier les principaux paramètres. L'expression du coefficient aérodynamique est:

$$C = K_1 S + K_2 \psi [ l + (n-1)\Delta l ] + 21.10^{-4} N_p$$



### Résistance à l'avancement du matériel moteur

Un grand nombre d'expressions ont été élaborées par les réseaux et les constructeurs au cours du développement des différents types de matériel. Nous mentionnerons les plus utilisées actuellement.

L'expression la plus courante est :

$$R_L = 65 \times 10^{-4} \cdot L + 0,13 \cdot n + 10^{-4} \cdot L \cdot V + 3 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 \text{ en kN}$$

**L** : masse de l'engin moteur (en tonnes)

**N** : nombre d'essieux

**V** : vitesse (en km/h)

### Résistance à l'avancement du matériel remorqué

Selon le type de matériel, les expressions les plus courantes sont :

	type	Résistance à l'avancement (kN)
<b>Matériel PASSAGER</b>	37 t < Tare < 42 t	$R_v = \frac{m}{100} \left( 1.5 + \frac{V^2}{4500} \right)$
	Tare > 42 t	$R_v = \frac{m}{100} \left( 1.25 + \frac{V^2}{6300} \right)$ $R_v = \frac{m}{100} \left( 0.87 + 0.008 \cdot V + \frac{V^2}{5750} \right)$
<b>Matériel FRET</b>	rame wagons " tout venant "	$R_f = \frac{m}{100} (1.2 + 0.00899V + 0.00044V^2)$
	rame wagons transport combiné	$R_f = \frac{m}{100} (1.2 + 0.01V + 0.00035V^2)$
	rame porte-autos	$R_f = \frac{m}{100} (1.2 + 0.01V + 0.00056V^2)$

Le réseau utilisateur propose fréquemment ses propres formules résultant de ses mesures.

### Résistance à l'avancement d'une automotrice

Comme il est indiqué précédemment, une automotrice est composée d'un ou plusieurs véhicules moteurs attelés en permanence à une ou plusieurs remorques. La résistance globale à prendre en compte résulte de l'expérience et à pour expression :

$$R_A = \left( 1,3 \sqrt{\frac{10}{Q}} + 0,01 \cdot V \right) P + C \cdot V^2$$

avec :

$$C = 35 \cdot 10^4 \left( S + \psi \cdot \frac{l + 10 \cdot c_1 + 4c_2}{100} \right) + 2 \cdot 10^3 \cdot N_p$$

**Q** : charge par essieu en tonnes

**V** : vitesse (km/h)

**P** : masse totale de la rame (t)

**S** : surface du maître -couple (m<sup>2</sup>)

**ψ** : périmètre transversal partiel de rail à rail (m)

**l** : longueur totale de la rame (m)

**c<sub>1</sub>** : nombre de césures

### Résistance à l'avancement du matériel à grande vitesse

Les résultats indiqués ci-dessus sont valables pour les vitesses inférieures à 200 km/h. Au-delà le terme  $CV^2$  devient prépondérant :

60 % à 200 km/h  
> 85 % à 250 km/h

Les essais à grande vitesse ont permis de mettre au point la formule suivante :

$$R_{GV} = \left( 1,2 \sqrt{\frac{10}{Q}} + 0,01 \cdot V \right) P + C \cdot V^2$$

avec :

$$C = 19 \cdot 10^{-4} \cdot S + 25 \cdot 10^{-4} \cdot \psi \cdot \frac{l-45}{100}$$

A titre d'exemple la résistance à l'avancement des rames TGV (10 véhicules, 407 t) est égale à :

$$R_{PSE} = 3,90 + 4,07 \cdot 10^{-2} V + 6,32 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 \quad (kN)$$

D'autres facteurs influencent la résistance à l'avancement :

le **vent latéral** a tendance à provoquer la permanence du contact boudin-rail ; on l'assimile à une résistance correspondant à un accroissement de vitesse de 5 km/h jusqu'à 200 km/h et 8 km/h au-delà.

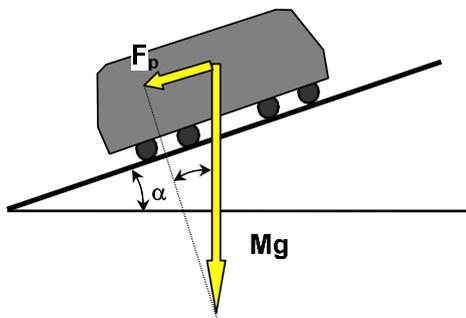
la **circulation en tunnel** ; les Chemins de fer Fédéraux Suisses (CFF) ont mené de nombreuses expérimentations en souterrains de grande longueur (St Gothard, Simplon) et ont montré un accroissement de résistance à l'avancement de 20 à 40%

### **Résistance due au profil de la voie**

La voie exerce une double résistance :

- suivant le profil en long : influence des rampes
- suivant le profil en Plan : influence des courbes

#### • Influence des rampes



Un convoi de masse  $M$  sur un plan incliné (rampe ou pente) faisant un angle  $\alpha$  avec le plan horizontal, est

soumis à un effort  $F_p$  tel que:  $F_p = M g \sin \alpha$

L'angle s'exprime par sa tangente, en **mm** par **m**, (**‰**) sinus et tangente étant très proches.

On assimile la valeur de la rampe à la résistance massique qu'elle engendre :

$$R_r = i \text{ (‰) en kg/t} = i \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \quad \text{en kN/t}$$

exemple : en rampe de 10 ‰ la résistance engendrée est de :  $10 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 0,098 \text{ kN/t}$

#### • Influence des courbes ou profil corrigé

Bien que de très faible coefficient de frottement, le contact roue - rail intervient pour tous les véhicules. En alignement le contact boudin - rail est accidentel, il peut devenir permanent en courbe malgré la bi-conicité des roues, notamment dans le cas des faibles rayons de courbure des voies de lignes de montagne ou voies de service.

L'ensemble des paramètres intervenant en courbe est assimilé à une résistance à l'avancement

supplémentaire due au profil. Le terme correcteur est de la forme:

$$i' = i + \frac{K}{\rho}$$

$\rho$  : rayon de la courbe en mètres.

Les essais en courbe sur voies de caractéristiques différentes donnent :

$$500 < k < 1200$$

La valeur la plus couramment adoptée est :  $k = 800$

exemple : Un profil en rampe de 10 ‰ comprenant une succession de courbes de 300 m de rayon a un profil corrigé de :

$$i' = i + \frac{K}{\rho} = 10 + \frac{800}{300} = 10 + 2.67 = 12.67\text{‰}$$

### Résistance due à l'inertie : effort accélérateur

La mise en vitesse du train obéit à la loi fondamentale de la dynamique :

$$F = \Sigma M \cdot \gamma$$

La somme des masses en mouvement comprend:

- les **masses en translation**: masse totale de tous les véhicules - moteur et remorqués
- l'**inertie équivalente en translation des masses en rotation** comprenant :
  - essieux et accouplements
  - roues dentées de transmission
  - disques de frein
  - rotors de moteurs de traction
- Son expression devient :

$$F = \Sigma M \cdot \gamma = \left[ M + \left( \frac{I_e}{R^2} + I_m \frac{\rho^2}{R^2} \right) \right] \gamma = C_m M_m + C_r M_r \gamma$$

exemple : train composé de :

- locomotive  $M_m = 114 \text{ t}$   $C_m = 1,09$
- rame  $M_r = 10 \times 59 \text{ t} = 590 \text{ t}$   $C_r = 1,04$
- accélération :  $0,01 \text{ m/s}^2$

$$F = [(1,14 \times 1,09 \times 0,981) + (5,90 \times 1,04 \times 0,981)] 10^3 \cdot 0,01 = 72,38 \text{ kN}$$

Les accélérations pratiquées en traction ferroviaire dépendent du type de trafic. Les valeurs courantes à retenir sont :

Transport	Accélération $\gamma$ (m/s <sup>2</sup> )
Fret	0,02 à 0,03
Passager	0,05 à 0,08
Urbain	0,5 à 1

On tient compte d'une accélération résiduelle permettant, au voisinage de la vitesse maximale d'être en mesure de l'atteindre en un temps fini.

Des valeurs d'accélération plus faible ( $0,01 \text{ m/s}^2$ ) sont pratiquées dans les cas difficiles de démarrage en rampe de trains lourds en situation dégradée.

### **Cas particulier de la résistance au démarrage : le "décollage"**

La phase de démarrage d'un train est un cas spécifique qui tient compte de la mise en mouvement des organes en rotation au cours de laquelle le film d'huile entre pièces en contact n'est pas formé complètement. Ce phénomène de "décollage" est accentué en période de basses températures. Une résistance à l'avancement supplémentaire est prise en compte, notamment en rampe du fait de la tension

mécanique existante entre attelage de chaque véhicule. Les valeurs couramment utilisées sont :

Type de train	Rampe	Résistance supplémentaire (kN)
Passagers	$i < 17\text{‰}$	$R_d = (m/100) (i \cdot 0,981 + 6,8)$
	$i > 17\text{‰}$	$R_d = (m/100) (1,25 \cdot i \cdot 0,981 + 2,75)$
Fret	$i < 7\text{‰}$	$R_d = (m/100) (i \cdot 0,981 + 4,5)$
	$i > 7\text{‰}$	$R_d = (m/100) (1,25 \cdot i \cdot 0,981 + 2,75)$

### La vitesse

La vitesse moyenne permet de réaliser l'horaire; elle tient compte :

- de l'accélération, en traction et en freinage
- de la vitesse maximale de la ligne.

La vitesse caractérise les organes en rotation et en particulier le **moteur de traction** et la **transmission du couple moteur aux essieux**. Elle conditionne également les caractéristiques mécaniques des matériels moteur et remorqués en termes de tenue sur voie et notamment des mouvements parasites qu'elle génère.

Tenant compte enfin des paramètres de la résistance à l'avancement, la vitesse intervient par son carré; elle influence directement l'énergie mise en jeu ; c'est donc un paramètre économique.

Les vitesses habituellement pratiquées en transport ferroviaire sont :

- 60 à 80 km/h en transport urbain
- 100 à 120 en transport suburbain
- 140 à 160 en inter villes
- 200 à 220 en liaisons grandes lignes
- 300 en grande vitesse
- 100 à 140 pour le fret

L'expression " vitesse commerciale " est souvent employée; elle caractérise la vitesse normalement pratiquée sur une ligne donnée. La vitesse maximale dont est capable un matériel roulant peut-être supérieure.

### Puissance de traction

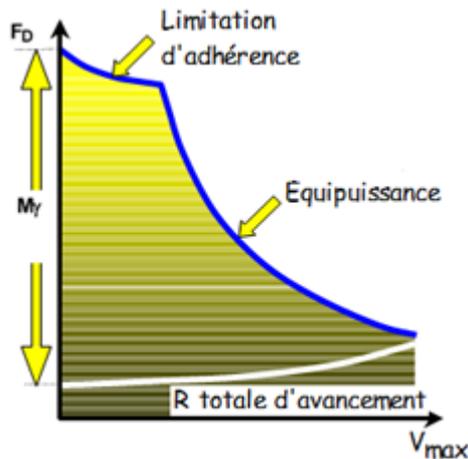
C'est le produit de l'effort par la vitesse :  $P = F \cdot V$

Connaissant l'effort à la jante à obtenir à une vitesse donnée, on obtient la **puissance à la jante** à installer.

### Caractéristique Effort-Vitesse

Dans le plan effort -vitesse, on trace :

- la (ou les) courbes de résistance à l'avancement : engin moteur + rame remorquée
- la caractéristique effort –vitesse de l'engin moteur



Celle-ci comprend deux zones :

zone de **limitation d'effort** :

Son ordonnée à l'origine indique l'**effort maximale au démarrage** : **FD**.

Il tient compte de l'adhérence maximale utilisable à vitesse nulle, telle que définie précédemment.

Lorsque la vitesse augmente, l'effort diminue parce que l'adhérence utilisable diminue avec la vitesse.

Cette décroissance est généralement fixée par l'expression empirique :

$$\mu = \mu_0 \frac{8 + 0.1}{8 + 0.2.V}$$

$\mu$  : adhérence à vitesse  $V$

$\mu_0$  : adhérence au démarrage

Zone d'**équipuissance** : La fonction  $F = f(V)$  est une hyperbole équilatère d'équation :

$$F = \frac{P}{V}$$

Aussi appelée hyperbole d'équipuissance. Elle caractérise tous les points de fonctionnement à puissance constante, correspondant à un effort et à une vitesse donnés.

### Régimes de marche

Le parcours d'un train est fonction du programme de traction défini précédemment. On distingue trois régimes de marche dimensionnant en termes de puissance et de composants de la chaîne de traction :

- **régime de démarrage** : la puissance mise en jeu est nulle à  $V=0$  ; l'effort est le plus élevé.

Pour un train de fret parcourant une longue distance avec peu d'arrêts ce régime est peu fréquent ; par contre il peut durer un temps important s'il s'effectue en rampe. Un train de banlieue dont les stations à desservir sont rapprochées effectue des démarrages très fréquents avec des efforts importants du fait des fortes accélérations.

- **régime continu** : on appelle ainsi la marche à puissance telle que tous les organes de la transmission soit à leur température d'équilibre qu'ils peuvent supporter un temps infini.

De ce qui précède, ce sont les parcours à longue distance qui utilisent ce régime.

- **régime de surcharge** : il est possible pour certains organes de la transmission de délivrer une puissance supérieure à leur régime continu en restant dans des limites d'échauffement acceptables.

Autrefois appelé " régime uni horaire ", ce régime peut être défini pour un temps donné différent de l'heure.

### Puissance absorbée, puissance auxiliaire, rendement

L'énergie absorbée par un engin moteur est plus importante que celle utilisée à la jante pour la traction. La répartition est double :

- à chaque étape de sa transformation ou de son traitement, l'énergie subit des pertes sous forme de

calories à évacuer. Cette opération nécessite la mise en œuvre d'organes de refroidissement et de ventilation

- l'engin assure, outre sa fonction principale de traction, des fonctions annexes indispensables à la mission dans son ensemble :

- énergie de freinage
- climatisation de l'espace de conduite
- énergie pour la rame remorquée
- communication avec le sol

Evacuation des pertes et fonctions annexes nécessitent un réseau particulier de bord fournissant la **puissance auxiliaire**.

Le **rendement** de l'engin de traction est le rapport entre :

$$\eta = \frac{\text{Puissance Jante}}{\text{Puissance absorbée} + \text{Pertes}}$$

Le rendement tient compte de la part consommée pour l'évacuation des pertes et non de la totalité de la puissance auxiliaire.

Par contre, en termes de rendement global au niveau du train il faut considérer le rendement de la traction comme le rapport :

$$\eta = \frac{\text{Puissance d'attelage}}{\text{Puissance absorbée} + \text{Puissance auxiliaire totale}}$$

### **Masse et gabarit**

Les contraintes de l'infrastructure ferroviaire : voies, ouvrages d'art, imposent au matériel roulant et en particulier à l'engin moteur, deux limites :

- **masse**
- **gabarit**

#### **La masse**

Elle est définie en terme de **masse par essieu**. En Europe elle varie entre 17 t et 22,5 t. Les lignes à grande vitesse en France sont limitées à 17 t. Aux Etats-Unis et pour certains autres réseaux elle atteint 32 t.

D'autres critères complètent cette imposition, notamment l'équilibrage des masses sur chaque essieu et entre masse par file de rail. Les tolérances sur ces valeurs sont fixées par une norme UIC.

Les conditions d'exercice de l'effort de traction étudiée ci-dessus conduisent à déterminer aisément le nombre d'essieux pour respecter l'exigence de masse : au démarrage  $F_D$  est l'effort à la jante nécessaire,  $\mu_0$  l'adhérence utilisable, la masse adhérente est :

$$L = \frac{F_D}{\mu_0}$$

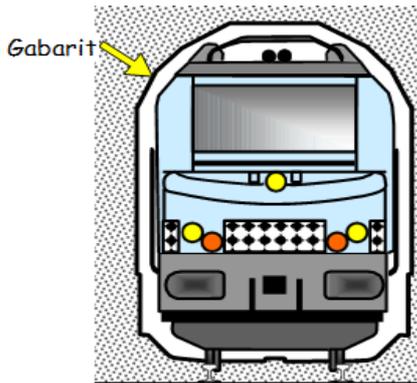
Q étant la charge par essieu imposée, le nombre d'essieux nécessaires est :

$$n = \frac{L}{Q}$$

La disposition des essieux est fonction de l'inscription en voie; elle sera étudiée au chapitre "Bogie".

### **Le gabarit**

Il impose une géométrie et un volume à l'engin moteur : largeur, longueur, hauteur, entraxe des bogies de roulement.



### Exercice d'application

#### Dimensionnement et caractéristiques d'une locomotive

Nous nous proposons d'étudier une locomotive dédiée au trafic fret en vue d'assurer le programme de traction suivant :

- trains : 1200 tonnes de wagons de transport combiné
- vitesse maximale : 120 km/h
- rampe maximale : 10 ‰
- courbe R min. : 350 m
- charge par essieu : 22 tonnes

#### I - Détermination de l'effort maximal au démarrage

L'effort maximale au démarrage - à vitesse nulle - s'exerce dans les conditions les plus difficiles en rampe de 10 ‰ et courbe de 300 m. La résistance à l'avancement du train RT est :

$$R_T = R_W + R_L + R_r$$

Résistance à l'avancement de la rame remorquée à  $V=0$  :

$$R_W = \frac{1200}{100} (1,2 + 0,01 \cdot V + 0,000171 \cdot V^2) = 12,12 = 14,4 \text{ kN}$$

Résistance à l'avancement de la locomotive à  $V=0$  :

$$R_L = 65 \cdot 10^{-4} \cdot L + 0,13n + 10^{-4} \cdot L \cdot V + 3 \cdot 10^{-4} V^2 \quad (\text{en kN})$$

Ne connaissant pas la masse de la locomotive L, on prendra comme hypothèse une locomotive à 4 essieux ayant une masse totale de :  $22 \times 4 = 88$  tonnes :

$$R_L = 65 \cdot 10^{-4} \cdot 88 + 0,13 \cdot 4 = 1,09 \text{ kN}$$

L'influence de la courbe minimum de 300 m s'exprime par le profil corrigé avec  $k = 800$  :

$$i' = i + \frac{K}{\rho} = 10 + \frac{800}{350} = 12,38$$

La résistance au démarrage due à la rampe corrigée est :

$$R_r = i' \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot (1200 + 88) = 12,28 \cdot 0,00981 \cdot 1288 = 162,7 \text{ kN}$$

La résistance à l'avancement totale au démarrage est :

$$R_T = R_W + R_L + R_r = 14,4 + 1,09 + 162,7 = 178,19 \approx 178 \text{ kN}$$

L'effort nécessaire pour exercer une accélération minimale en rampe tient du coefficient majorateur dû aux masses tournantes que l'on prend égal à :

- 9 % pour la locomotive
- 4 % pour la rame

$$F_\gamma = m \cdot \gamma = [(1200 \times 1,04) + (88 \times 1,09)] \cdot \gamma$$

$$(F \text{ en kN, } m \text{ en tonnes, } \gamma \text{ en m/s}^2)$$

L'accélération minimale à prendre en compte doit être de l'ordre de  $0,02 \text{ m/s}^2$ , soit :

$$F_\gamma = 1344 \times 0,02 = 26,88 \text{ kN} \approx 27 \text{ kN}$$

L'effort maximal au démarrage à exercer en rampe est de :

$$F_R = R_T + F_\gamma = 178 + 27 = 205 \text{ kN}$$

L'adhérence sollicitée au démarrage est :

$$\mu_0 = \frac{F_D}{L} = \frac{205}{88 \times 9,81} = 0,24$$

Qui représente une faible sollicitation de l'adhérence par rapport à ce qui est couramment pratiqué avec des coefficients compris entre 0,35 et 0,40.

Le calcul ci-dessus ne tient pas compte de l'éventualité d'un "démarrage" du train difficile qui peut se produire dans certaines circonstances de température basse ou de stationnement prolongé du matériel remorqué. Dans ce cas on considère l'expression de la résistance en profil corrigé de :

$$R_D = \frac{m}{100} (1,25 \cdot i \cdot 0,981 + 2,75) = \frac{1288}{100} (1,25 \cdot 12,28 \cdot 0,981 + 2,75) = 229,4 \text{ kN}$$

L'effort maximal au démarrage devient :

$$F_D = R_D + F_\gamma = 230 + 27 = 247 \text{ kN}$$

Il est prudent de choisir un effort au démarrage  $F_D$  de 300 kN permettant de couvrir tous les cas difficiles de démarrage avec une marge de sécurité. L'adhérence sollicitée est alors de :

$$\mu_0 = \frac{F_D}{L} = \frac{300}{88 \times 9,81} = 0,35$$

## 2) Tracé de la caractéristique F(V) en limitation d'adhérence

C'est l'équation :  $F = F_0 \frac{8+0,1.V}{8+0,2.V}$  avec  $F_0=300$  kN

correspondant à :  $\mu = \mu_0 \frac{8+0,1.V}{8+0,2.V}$  avec  $\mu_0=0,35$

## 3) Tracé de la caractéristique F(V) en équi-puissance

L'équipuissance se déduit du calcul de la puissance à  $V_{max}$ . dans les conditions les plus courantes, c'est-à-dire en palier :

$$P = F.V = \Sigma R.V = (R_L + R_w).V$$

A 120 km/h les résistances à l'avancement sont :

$$R_L = 65 \cdot 10^{-4} \cdot 88 + 0,13 \cdot 4 + 10^{-4} \cdot 88 \cdot 120 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 120^2 = 6,47 \text{ kN} \cong 6,5 \text{ kN}$$

$$R_w = \frac{1200}{100} (1,2 + 0,01.V + 0,000171.V^2) = 15,12 = 58,35 \text{ kN}$$

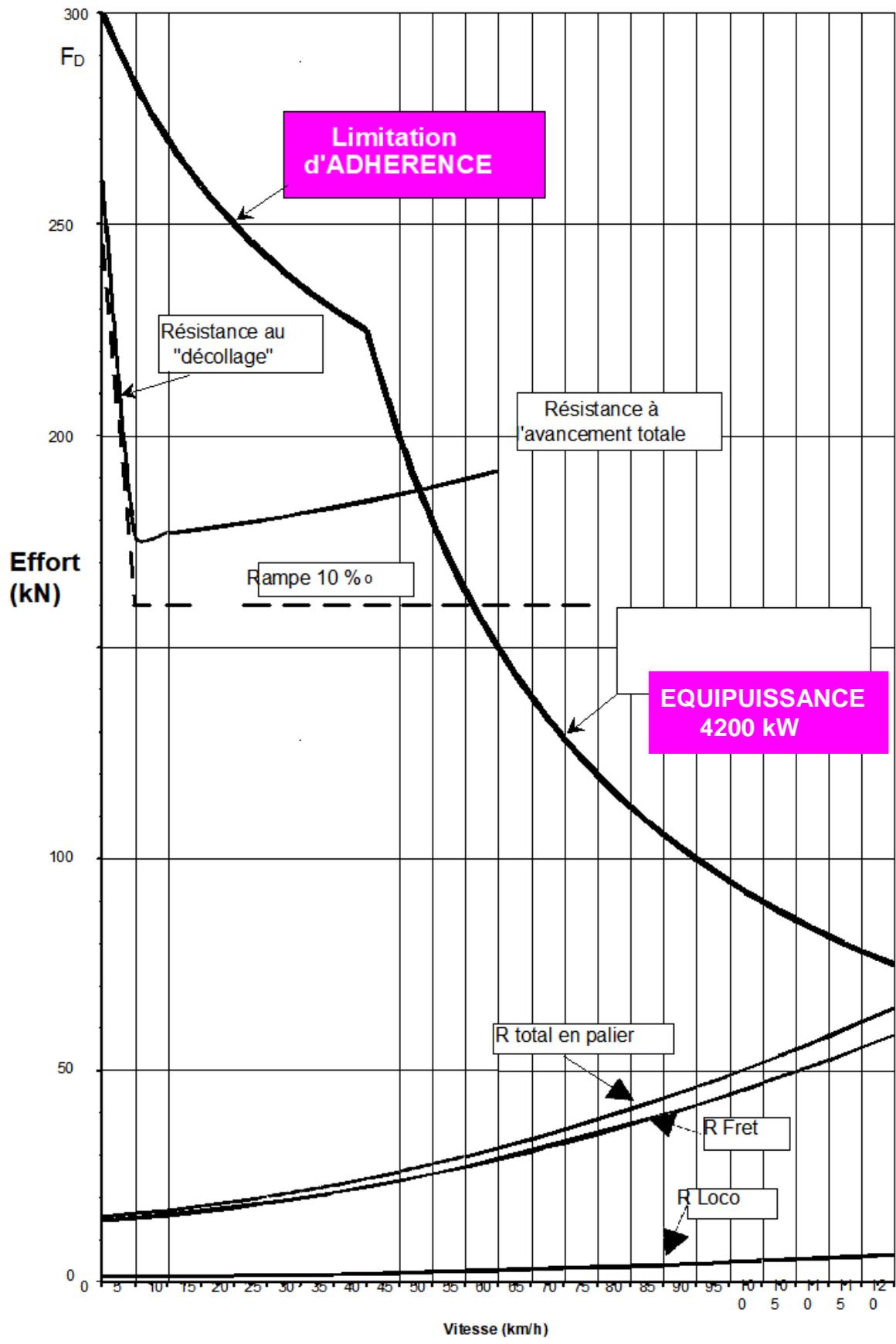
$$P = (6,5 + 58,35) \frac{120}{3,6} = 2160 \text{ kW} \quad (\text{sans réserve d'accélération})$$

Pour ménager une réserve d'accélération de  $0,001 \text{ m/s}^2$  environ à 120 km/h il faut une puissance supplémentaire de :

$$P_\gamma = F.V = m.\gamma.V = 1288 \cdot 0,008 \cdot \frac{120}{3,6} = 340 \text{ kW}$$

soit une puissance à la jante totale de :

$$P = 2160 + 340 = 2500 \text{ kW}$$



Effort en freinage

S'il y a égalité des valeurs absolues d'accélération en freinage et en traction, toutes les considérations précédentes s'inversent : les efforts résistants en traction participent au freinage; il suffit de doter l'engin moteur d'un système fournissant l'effort de retenue complémentaire pour réaliser la décroissance de vitesse jusqu'à l'arrêt.

La réalité présente un impératif de sécurité tel que les valeurs d'accélération négative sont beaucoup plus importantes qu'en traction pour obtenir des distances d'arrêt les plus courts possibles. Ainsi l'énergie mise en jeu pour un train de 1400 tonnes à 120 km/h est :

$$E = \frac{1}{2} MV^2 = \frac{1}{2} (1400 \cdot 10^3 \cdot (120 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{3600})^2 = 7,8 \cdot 10^8 J$$

Si l'arrêt s'effectue en 60 s qui correspond à une décélération de 0,75 m/s<sup>2</sup> la puissance de freinage devra être de :

$$P = \frac{E}{t} = \frac{7,8 \cdot 10^8}{60} \cong 13000 kN$$

soit plus de quatre fois la puissance en traction. Il s'agit d'une double impossibilité :

- l'installation d'une telle puissance, donc la dissipation d'une telle énergie, est incompatible avec les impératifs de masse et de gabarit
- les efforts au niveau des contacts roues-rails dépassent les limites d'adhérence ; pour une locomotive à 4 essieux, en effet, l'effort à la jante à 120 km/h, serait de :

$$F = \frac{P}{V} = \frac{13000}{120} \cdot 3,6 \cong 390 kN$$

Sollicitant une adhérence de :

$$\mu_{120} = \frac{F_D}{L} = \frac{390}{90 \cdot 9,81} = 0,44$$

alors que l'adhérence à cette vitesse ne peut être sollicitée de plus de 10 % ; l'effort maximale de retenue ne peut donc être supérieur à :

$$F = \mu \cdot Q = 0,10 \cdot 90 \cdot 9,81 = 88,3 kN$$

soit une puissance de freinage de :

$$P = F \cdot V = 88,3 \cdot \frac{120}{3,6} = 2943 kW$$

La différence fondamentale entre un véhicule isolé et une rame tractée se situe au niveau de la puissance de freinage à mettre en œuvre. Il est indispensable de rendre " actif " tous les véhicules composant un train. Ce fut le cas dès les premiers temps du chemin de fer lorsque les wagons, munis de " vigie " abritaient un agent nommé " serre-frein " qui, au coup de sifflet de la locomotive, actionnait les freins de son wagon. Le procédé s'est quelque peu automatisé depuis.

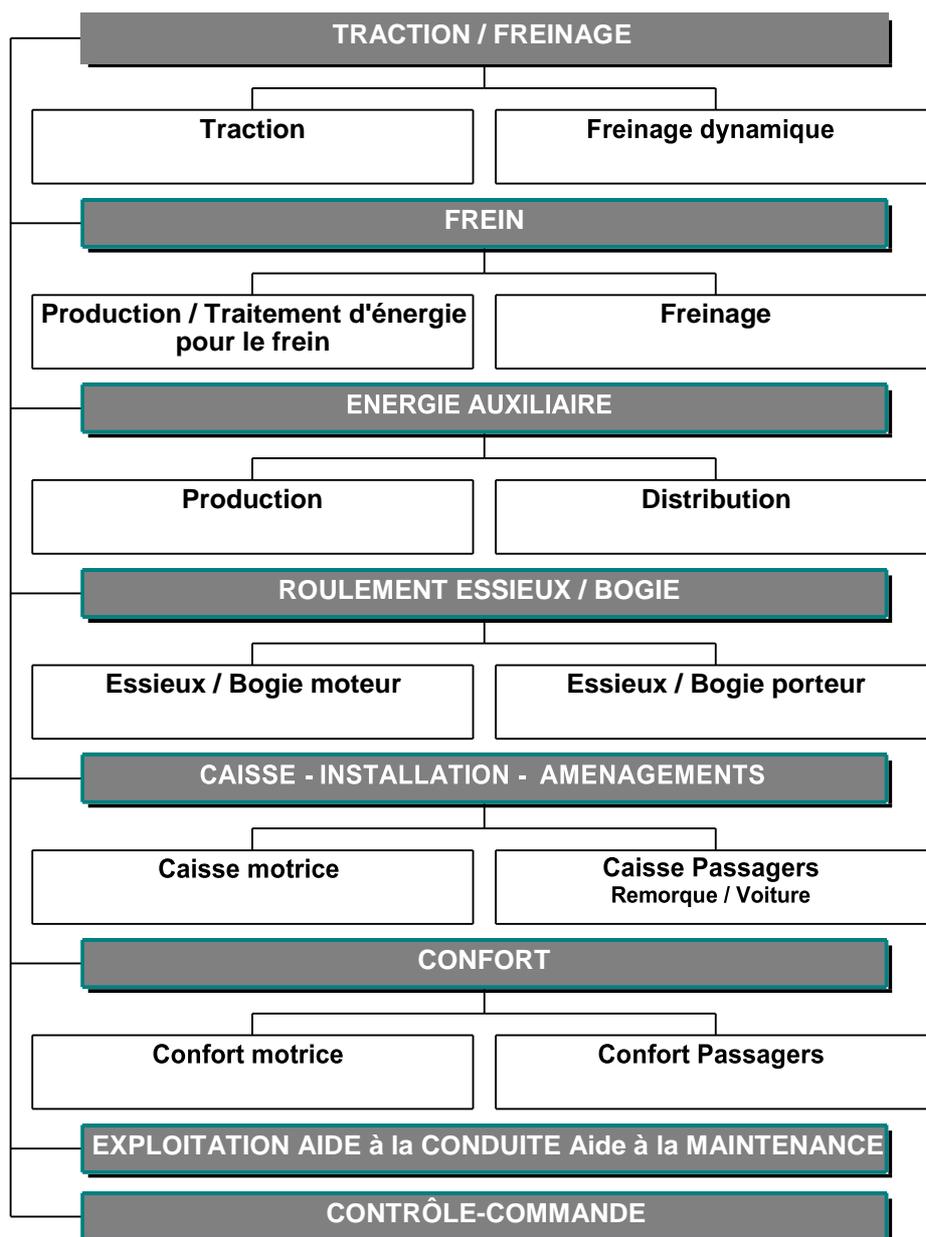
La puissance de freinage installée dans l'engin moteur est utilisée pour les besoins de son seul ralentissement. Par contre les moyens mis en œuvre pour réaliser ce freinage diffèrent de ceux du matériel remorqué dès lors qu'il est possible d'utiliser la réversibilité de l'organe moteur pour dissiper de l'énergie. C'est le cas du moteur électrique fonctionnant en générateur et capable d'exercer un couple résistant. Nous l'étudierons dans le cadre de la chaîne de traction.

### Architecture de l'engin moteur

La conception d'un engin moteur répond d'une part aux fonctions principales permettant de satisfaire un cahier des charges et d'autre part aux fonctions de contraintes résultant de son environnement opérationnel. Le cahier des charges du Client les précise en termes :

- de performances capables d'assurer un programme de traction
- de caractéristiques environnementales
- d'objectifs économiques liés à l'utilisation du produit pendant sa durée de vie.

La réponse du concepteur se traduit par une arborescente de grandes fonctions



### **Fonction TRACTION - FREINAGE**

La nature de l'alimentation en énergie - autonome ou traction électrique - détermine la chaîne de traction à utiliser. Dans le cas où l'organe moteur est réversible, la spécification du freinage dynamique est précisée.

### **Fonction FREIN**

Elle concerne l'ensemble des dispositions capables d'assurer le maintien de la vitesse, le ralentissement et l'arrêt. Lui sont associées deux sous - fonctions : la production d'énergie nécessaire pour assurer le freinage, qu'il soit pneumatique ou hydraulique, le freinage proprement dit.

### **Fonction ENERGIE AUXILIAIRE**

Le fonctionnement de l'engin moteur impose des contraintes :

- de rendement, donc de pertes à évacuer,
- de prestations auxiliaires telles que : confort nécessaire aux passagers ou à l'agent de conduite, alimentation des circuits basse tension, batterie, etc. ..

Un certains nombres d'organes consommateurs d'énergie assurent ces fonctions « auxiliaires » tels que ventilateurs, pompes de circulation de fluide, compresseur, batterie d'accumulateurs, électricité basse tension, climatiseurs. Un générateur d'énergie auxiliaire associé à un réseau de distribution et de répartition doit être spécifié.

### **Fonction ROULEMENT – ESSIEUX / BOGIE**

Elle est à la base de l'engin moteur : par elle s'exerce les efforts de traction et de freinage. Simultanément elle est l'interface avec la voie. Le roulement concerne aussi la partie « portée » de l'engin lorsqu'elle existe.

### **Fonction CAISSE - AMENAGEMENTS**

Le contenant par excellence est la caisse. Sa structure participe aux efforts de traction et de freinage. La disposition de tous les organes constitue les aménagements. Elle peut, dans le cas d'automotrice, contenir les passagers.

### **Fonction EXPLOITATION - AIDE à la CONDUITE et à la MAINTENANCE**

Elle rassemble toutes les dispositions permettant d'exploiter l'engin de traction : conduite, interfaces homme - machine (IHM), liaisons sol - train, signalisation, équipements de sécurité, maintenance : curative et préventive

### **Fonction CONTRÔLE - COMMANDE**

L'ensemble des informations ou des actions nécessaires aux fonctions précitées constitue le contrôle - commande répondant à une architecture fonctionnelle. Cette fonction, assurée il y a peu, par une infrastructure électromécanique (à relais) est très rapidement supplantée par une informatique embarquée.

Pour chacune de ces fonctions on analysera :

- les caractéristiques permettant de satisfaire les performances
- les contraintes d'interface et d'environnement à satisfaire
- les contraintes en termes de coût de cycle de vie - LCC " Life Cycle Cost "

Nous débutons cette étude par les fonctions mécaniques : ROULEMENT - ESSIEUX et CAISSE - AMENAGEMENTS. En effet l'engin de traction assure une fonction dynamique quel que soit le système de propulsion et l'énergie mis en œuvre ; l'ensemble des fonctions imposent Des contraintes sur la partie mécanique de l'engin, d'où le grand nombre d'interfaces intervenantes.

Nous poursuivrons par l'étude de la chaîne de traction et ses principaux composants : moteur de traction, convertisseurs, production d'énergie auxiliaire et contrôle - commande.

Le freinage sera étudié en termes de principes fondamentaux.

L'exploitation fera l'objet d'un chapitre spécial donnant les bases essentielles de l'exploitation ferroviaire .

- L'infrastructure support de systèmes ferroviaires légers comprend une part importante d'emprises ferroviaires en surface et éventuellement d'une partie d'infrastructure de tramway urbain.

- L'exploitation du système peut alors comprendre un ou plusieurs modes d'exploitation successifs selon l'infrastructure sollicitée (exploitation ferroviaire basée sur la signalisation sur réseau ferré national, exploitation de type tramway avec conduite à vue sur réseau urbain).

- Et plusieurs types de matériels roulants peuvent assurer le service. Le tramway urbain qui a vocation à circuler sur voirie urbaine peut assurer un service sur voie ferroviaire dédiée hors voirie mais ne pourra cependant pas emprunter les voies du réseau ferré national. Il en est de même pour les tramways « rapides » conçus pour pouvoir circuler à des vitesses de 100km/h.

Par ailleurs, certains automoteurs dits « trains légers » peuvent assurer des dessertes périurbaines à partir du réseau ferré national, de par leurs caractéristiques d'accélération et de freinage plus proches de celles du tramway sans pour autant pouvoir circuler sur voirie ou en mixité avec des matériels de type tramway urbain ou rapide.

- Seuls les matériels « tram-trains » peuvent emprunter la voirie et le réseau ferré national, en mixité ou non avec d'autres matériels sur chaque réseau.

La construction d'un matériel ferroviaire rassemble différentes étapes allant de la conception du matériel à sa mise en service en passant par la fabrication des pièces élémentaires, leur assemblage, et les essais. Mais ces grands groupes ne réalisent pas l'intégralité de ces étapes. Très souvent, ils prennent en charge les phases de conception, d'assemblage et d'essais et externalisent la fabrication des pièces.

L'organisation globale de la construction des matériels par les constructeurs repose donc sur un travail avec un grand nombre d'équipementiers, de fournisseurs et de sous-traitants. Ces entreprises peu connues du fait de leur taille tiennent donc un rôle central dans l'industrie ferroviaire.

En effet, la conception et la construction d'un train demandent de faire appel à environ 300 fournisseurs.

Les achats à ces fournisseurs représentent 65 à 70% du prix du train. Les activités des équipementiers ferroviaires sont diversifiées mais peuvent être regroupées en quatre grands domaines d'intervention :

- l'aménagement intérieur des trains (design intérieur, sièges, portes, éléments de confort, équipement d'information des passagers, ...) ;
- les bogies et attelages (incluant le freinage) ;
- l'énergie et l'électronique ;
- l'assistance au client et les services (solutions logistiques, gestion de stock, maintenance).

Les sous-traitants interviennent quant à eux sur des domaines très spécialisés tels que la mécanique, la forge, l'électricité, voire sur une pièce spécifique.

### **La conception des matériels ferroviaires**

Le matériel roulant ferroviaire doit être considéré dans le cadre d'une approche systémique car il est une composante du système ferroviaire en interface très étroite avec l'infrastructure d'une part, et les conditions d'exploitation d'autre part. Cela a donc une incidence forte sur la conception des matériels.

Sont précisées ci-après les exigences qui s'imposent en phase de conception, au travers des quatre thématiques majeures que sont la sécurité, l'accessibilité, l'interopérabilité et les exigences environnementales et énergétiques.

### **La sécurité des matériels ferroviaires**

Les exigences réglementaires relatives à la sécurité auxquelles doivent répondre les matériels ferroviaires circulant sur le réseau ferré national résultent de l'application de différents textes européens et nationaux, en particulier :

- la directive européenne sur la sécurité des chemins de fer ;
- le décret relatif à la sécurité et l'interopérabilité du système ferroviaire ;
- l'arrêté relatif aux exigences applicables aux matériels roulants ;
- et les spécifications techniques d'interopérabilité (STI) européennes. Si les deux premiers textes sus-visés sont relatifs au système de sécurité global (dispositions communes, rôle de l'Établissement Public de Sécurité Ferroviaire, ...),

Ainsi, les principales exigences sécuritaires applicables au matériel ferroviaire portent sur :

- la compatibilité du matériel avec les autres composantes du système ferroviaire (l'infrastructure, le système d'alimentation électrique, les circuits de voie, les détecteurs de passage, les télécommunications, les passages à niveau ...) ;
- les équipements de sécurité embarqués (notamment le signal d'alarme) et le système de freinage ;
- la résistance du matériel (capacité à encaisser les chocs, étanchéité aux ondes de pression, effet de souffle) ;
- la sécurité incendie (choix des composants, système de détection et d'avertissement, équipements de lutte contre le feu) et électrique ;
- et la gestion des situations extrêmes et de détresse (localisation et fonctionnement des portes d'accès, éclairage de secours, désincarcération).

### **L'accessibilité des matériels**

« l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées » impose la mise en accessibilité de l'ensemble des services de transports collectifs. Cette obligation s'inscrit dans la continuité des lois d'orientation en faveur des personnes handicapées, la première qui prenait en considération les personnes à mobilité réduite (PMR).

Elle en élargit cependant le champ d'application en imposant :

- la prise en compte de tous les types de handicap qu'il soit physique, visuel, auditif, mental, cognitif ou psychique ;

- la prise en compte de toutes les personnes gênées dans leurs déplacements, de manière temporaire ou permanente, ce qui inclut les personnes âgées, les enfants, les femmes enceintes, les voyageurs avec bagages lourds ou volumineux, les personnes non francophones, ... ;

- et la prise en compte de la notion de « chaîne de déplacement » induisant la nécessité de traiter l'ensemble d'un déplacement, de son origine à sa destination et donc d'agir sur les leviers transport, voirie mais également dispositifs d'urbanisme.

L'accessibilité au système ferroviaire est complexe puisqu'elle doit être mesurée dans une approche systémique en tenant compte de l'ensemble des sous-composantes empruntées par l'utilisateur pour accéder au service proposé. Elle nécessite donc de traiter l'accessibilité à la gare comme bâtiment ouvert aux voyageurs pour atteindre les différents services (accueil, information, achat de titres, accès aux trains), mais également l'accessibilité aux quais et au matériel roulant. Compte-tenu de la gouvernance actuelle du système ferroviaire, elle met en jeu plusieurs acteurs (région, exploitant, RFF).

La définition d'un matériel accessible « relatif à l'accessibilité du matériel roulant affecté aux services de transport public terrestre de voyageurs ». Elle s'applique donc aux matériels ferroviaires.

Ainsi, la personne en situation de mobilité réduite doit pouvoir, avec la plus grande autonomie possible monter dans la rame et en descendre, s'installer à bord, bénéficier des services offerts à bord (sauf impossibilité technique) et se localiser, s'orienter et s'informer. L'atteinte de ces exigences amène à étudier la mise en place de dispositifs spécifiques sur les matériels en circulation comme :

- des équipements permettant d'accéder à la rame depuis le quai (plancher bas, rampe, élévateur, palette comble-lacune, ...) que ces équipements soient situés à quai ou à bord du train ;

- la présence d'au moins une porte par rame d'une largeur plus grande pour permettre le passage d'un fauteuil roulant ;

- la présence, à l'intérieur des rames, de places identifiées et réservées aux fauteuils roulants et aux PMR ;

- l'accès aux boutons et leviers d'ouverture des portes, des dispositifs d'alarme, des toilettes par des personnes en fauteuil roulant ou jeunes enfants ;

- la diffusion des informations sous forme sonore et visuelle.

Par ailleurs, les matériels ferroviaires neufs doivent également répondre aux exigences de la spécification technique d'interopérabilité relative aux personnes à mobilité réduite dans le système ferroviaire transeuropéen conventionnel et à grande vitesse. La « STI PMR » a été imposée par l'Union Européenne, dans le cadre de sa politique de mise en place d'un réseau ferroviaire transeuropéen. Elle rassemble l'ensemble des exigences s'appliquant à l'infrastructure, au matériel roulant et à l'interface entre les deux.

Les matériels ferroviaires neufs doivent donc intégrer les dispositions suivantes :

- une part de 10% de places prioritairement allouées aux PMR ;

- un nombre d'emplacements réservés aux Utilisateurs de Fauteuil roulant « UFR » allant de deux à quatre selon la longueur du train ;

- les caractéristiques définies dans cette STI pour des toilettes « accessibles à tous » ;

- la mise en place d'équipements embarqués destinés à l'information de l'utilisateur tels que des avertissements sonores, des panneaux de signalétique ;

- un aménagement spécifique des couloirs de circulation à l'intérieur du train avec une absence de marche pour les fauteuils, des rampes limitées, ... ;

- le respect strict des hauteurs de quai et de plancher ;

- le traitement de l'interface quai-matériel roulant intégrant les outils d'aide à l'embarquement ou au débarquement (plancher bas, rampe, palette comble-lacune, élévateur, ...).



Mais l'affectation de matériels anciens à certains services ou des contraintes techniques, comme par exemple l'impossibilité de réaliser des travaux d'accessibilité de gare en raison de l'environnement du bâtiment ou de la conservation du patrimoine, peuvent constituer un obstacle à la mise en accessibilité autonome pour les PMR.

Les dispositions législatives de 2005 ont intégré ces cas particuliers en proposant la mise en place de mesures de « substitution ». La mesure la plus souvent rencontrée repose sur l'existence d'une assistance humaine assurée par du personnel au sol ou à bord.

### **L'interopérabilité**

Dans un contexte de construction d'un réseau ferroviaire européen soutenu par l'Union Européenne, devant à terme pouvoir accueillir la libéralisation des marchés de services ferroviaires, la question de l'interopérabilité des trains est donc d'autant plus forte que ceux-ci assurent des liaisons transfrontalières.

Par interopérabilité, on entend l'aptitude du matériel roulant à circuler sur des réseaux ferroviaires de caractéristiques différentes. Pour répondre à l'interopérabilité d'un matériel roulant, il faut prendre en compte les interfaces entre celui-ci et les deux autres éléments du système ferroviaire : l'infrastructure et l'exploitation.

Les principales interfaces techniques entre le matériel roulant et l'infrastructure concernent :

- le contact roue-rail ;
- l'écartement des rails ;
- le gabarit du matériel ;
- la géométrie des voies ;
- les systèmes de freinage ;
- la composition des trains et les performances de freinage ;
- les efforts à la voie ;
- l'alimentation électrique ;
- le fonctionnement des circuits de voie (qui sont les circuits électriques permettant de détecter la présence d'un train sur une voie) ;
- la signalisation et les télécommunications ;
- les systèmes de sécurité ;
- les emmarchements (dispositifs permettant l'accès au matériel roulant depuis le quai). Lorsqu'on change de pays (voire de région), chacun de ces items peut varier.

Ainsi, si on prend l'exemple d'un train effectuant des trajets Paris-Amsterdam et Paris-Cologne, ce train sera confronté à quatre types d'alimentation électrique et sept systèmes de sécurité.

Les interfaces liées à l'exploitation conditionnent la possibilité du matériel roulant de circuler sur un réseau selon les conditions d'exploitation de celui-ci.

Elles concernent :

- les performances du matériel (accélération, vitesse) ;
- l'adhérence ;
- la possibilité d'assembler deux rames, l'une remorquant l'autre, en situation de secours ;
- la sécurité et l'évacuation des voyageurs ;
- le relevage des trains ;
- les signaux d'extrémité et les avertisseurs.

Par exemple, le train à grande vitesse allemand, l'ICE, s'il veut circuler sur une ligne à grande vitesse française doit pouvoir être couplé à une rame TGV afin d'être remorqué en cas de panne.

La seule gestion de ces interfaces ne suffit pas à rendre interopérables les matériels. En effet, il faut également prendre en compte les exigences sécuritaires des matériels. Or celles-ci diffèrent selon les pays, comme par exemple la sécurité incendie, la sécurité électrique ou les exigences environnementales (bruit, pollution, ...).

Les obstacles à l'interopérabilité peuvent donc être nombreux et constituer un frein à l'exploitation d'un réseau ferroviaire européen. L'Union Européenne s'est attachée à mettre en place une harmonisation au travers du deuxième « paquet ferroviaire »<sup>1</sup> traitant de l'interopérabilité.

Deux directives<sup>1</sup> et des spécifications techniques d'interopérabilité (STI) ont été élaborées afin de parvenir à résoudre les difficultés d'interopérabilité. Les différentes STI sont relatives à chaque élément du système ferroviaire (STI matériel roulant, STI énergie, STI maintenance, ...) et ont pour but d'harmoniser les spécifications.

On peut notamment citer l'exemple de la mise en place de l'ERTMS (European Rail Traffic Management System) qui vise à uniformiser la signalisation ferroviaire en Europe

Cependant, parvenir à une harmonisation européenne totale apparaît irréaliste au regard des investissements très importants qui devraient être réalisés. A titre d'exemple, l'uniformisation du système d'alimentation électrique en Europe demanderait plusieurs dizaines d'années et milliards d'euros, pour une amélioration qui serait imperceptible pour l'utilisateur. Toutefois, les progrès techniques récents desserrent les contraintes liées aux électrifications en permettant la mise sur le marché de matériels roulants moteurs bi voire multi courants et bi-modes bi-courants.

#### **- Les exigences environnementales et énergétiques**

Les exigences environnementales et énergétiques s'appliquent au matériel roulant ferroviaire circulant sur le réseau ferré national.

Les normes et spécifications techniques applicables aux matériels ferroviaires concernent les domaines :

- des bruits et vibrations, émis à l'arrêt et en circulation ;
- de la compatibilité électromagnétique<sup>1</sup> ;
- des émissions polluantes, et en particulier les limites relatives aux émissions des moteurs thermiques ;
- des matériaux et produits interdits ou soumis à restrictions pour la fabrication, comme par exemple l'amiante.

Comme pour l'interopérabilité des matériels, dans un objectif d'harmoniser les réglementations, l'Union Européenne a fixé des exigences en matière de bruit, d'émissions polluantes et d'énergie.

En ce qui concerne l'énergie, les STI précisent les dispositions techniques à adopter pour satisfaire aux « exigences essentielles ». Que ce soit pour le système conventionnel ou le système à grande vitesse, de nombreux paramètres entrent en ligne de compte.

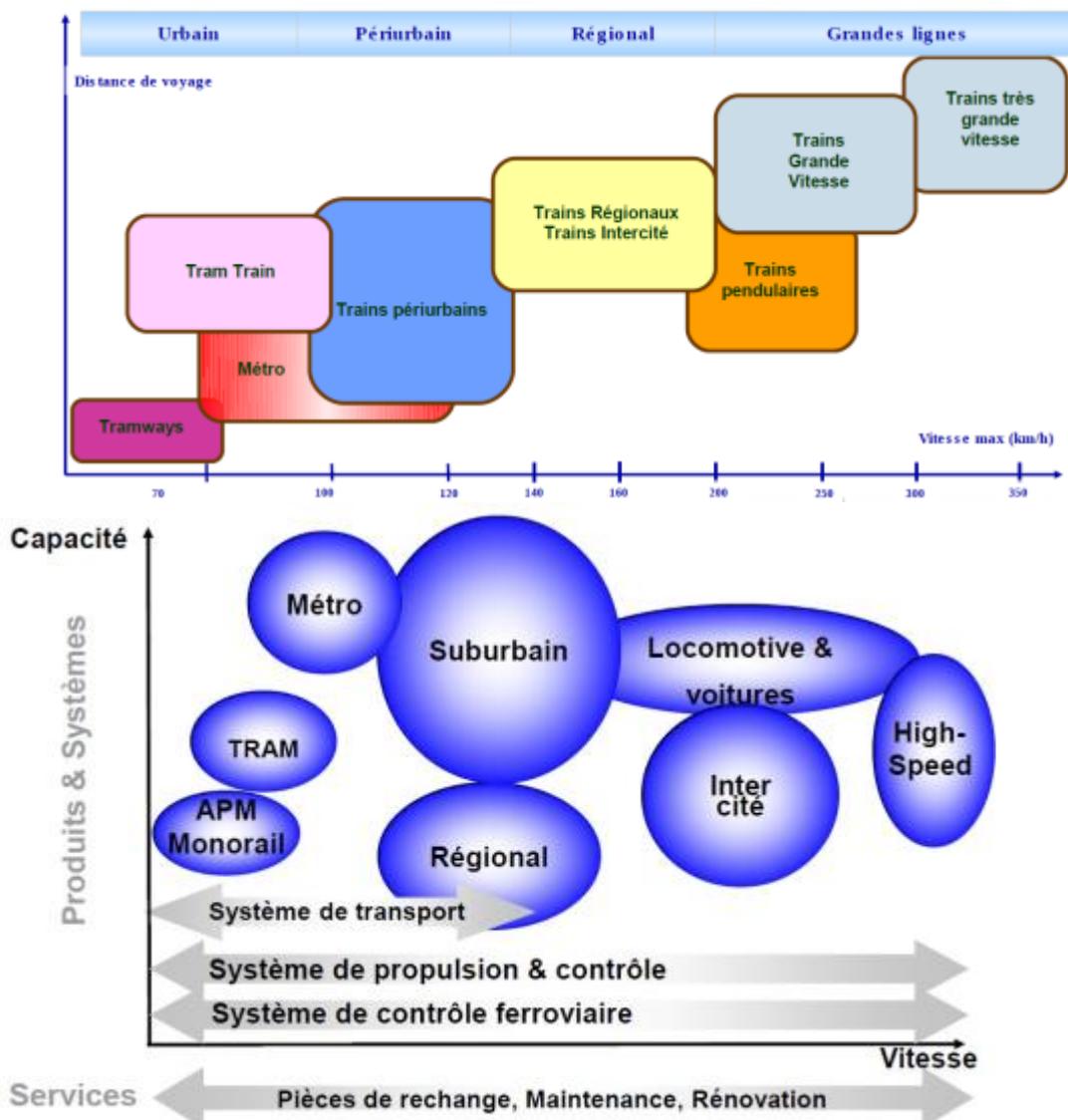
#### **La segmentation du marché des trains de voyageurs**

Un matériel roulant est affecté à une desserte. Pour que le service proposé aux usagers soit efficace, il faut donc que les caractéristiques techniques et fonctionnelles du matériel soient adaptées au type de desserte assuré.

Sur le réseau ferré national, le type de desserte est défini à partir de plusieurs paramètres. Le premier d'entre eux concerne l'échelle géographique de la liaison. Quatre natures peuvent être distinguées : l'échelle internationale, nationale (ou interrégionale), régionale et périurbaine. Le type de mission est également un facteur déterminant dans le choix du matériel puisque selon que l'on privilégie des dessertes omnibus ou au contraire des dessertes directes ou semi-directes, le matériel adéquat ne sera pas le même. Par ailleurs, la forme de la desserte, entre une desserte linéaire ou une desserte « en Y » aura une influence sur la composition des trains, et notamment la faisabilité de couplage de rames.

Le profil de la desserte se définit également à partir du temps de transport que l'on veut garantir et du nombre de voyageurs attendus qui influenceront sur le type de matériel. Enfin, les contraintes de l'infrastructure telle que la longueur des quais, la forme des gares (traversantes ou en cul-de-sac), sont également des critères de choix des matériels (couplage des rames, réversibilité

des rames). La segmentation du marché qui en découle conduit à l'existence d'une gamme diversifiée de trains.



La confrontation des différents paramètres de définition du type de desserte avec les caractéristiques du matériel ferroviaire conduit à l'existence d'une palette étendue de matériels ferroviaires assurant les différentes dessertes de voyageurs sur le territoire national, notamment par :

- l'aménagement intérieur (services proposés, taux de places assises) ;
- la vitesse ;
- la capacité d'accélération ;
- la capacité ;
- la longueur ;
- la possibilité de coupler des unités ;
- et la réversibilité.

### Les principales performances techniques des trains

Nous proposons ici de mettre en avant les principales caractéristiques variant selon le type de desserte à assurer et selon l'infrastructure empruntée. *La vitesse* du train doit être compatible avec la vitesse maximale qui peut être pratiquée sur la voie ferroviaire empruntée. Selon les matériels actuellement sur le marché, il est possible de distinguer trois classes de vitesse de référence correspondant globalement aux vitesses maximales annoncées par les constructeurs :

- 100 km/h pour les tram-trains et les trains périurbains ;
- 160 km/h à 200km/h pour les trains régionaux et trains nationaux sur voie classique;
- et 300 à 320 km/h pour les trains à grande vitesse.

**La capacité d'accélération et de freinage** est une caractéristique très influente pour les matériels assurant des missions avec arrêts rapprochés. Elle contribue en effet à proposer un temps de parcours intéressant.

L'utilisation d'un matériel ayant de bonnes capacités d'accélération et de freinage est donc particulièrement pertinente pour assurer des liaisons omnibus sur des distances relativement courtes. A l'inverse, pour les matériels assurant des liaisons directes ou avec de longues interstations, la capacité d'accélération et de freinage est moins importante que la vitesse maximale pouvant être atteinte.

	Train léger	Trains régionaux			TàGV
	Citadis Dualis	AGC	Régiolis	Régio 2N	TGV Atlantique
Performance	De 0 à 40 km/h en 12 secondes	De 0 à 50 km/h en 17 secondes	De 0 à 50 km/h en 15 secondes	De 0 à 50 km/h en 17 secondes	De 0 à 300 km/h en 6 minutes 30 secondes
Accélération (en m/s <sup>2</sup> )	1,09	0,81	0,94	Entre 0,5 et 0,8 selon la longueur du matériel	0,21

*Exemples de performances d'accélération de trains de voyageurs*

*Note : les performances indiquées concernent des modèles à traction électrique. Les performances sont inférieures en cas de traction thermique.*

**Les dimensions** du matériel ferroviaire (longueur, largeur et hauteur) doivent être compatibles avec celles de l'infrastructure qu'il va emprunter sur son itinéraire, et notamment avec celles des quais (longueur et hauteur).

La longueur d'un train est très variable selon la mission qu'il remplit, et même pour une même mission. Il dépend du nombre de caisses et d'unités assemblées. Le train régional baptisé « A-TER » mono-caisse mesure ainsi 29 mètres, le train régional à deux niveaux mesure de 55 mètres à 140 mètres alors que deux unités de TGV Atlantique couplées représentent plus de 475 mètres. Par contre un matériel assurant des services de systèmes ferroviaires légers (trains-trains ou non) fait aujourd'hui de 37m (cas de l'Avanto) à 52m (Citadis Dualis) dans le cas d'une exploitation en unité simple.

**La masse et la charge à l'essieu** d'un train sont dépendantes des caractéristiques du réseau. Il faut en effet que la ligne ferroviaire empruntée puisse supporter le poids global du train. Ces deux données influent sur plusieurs paramètres :

- sur la vitesse et la consommation énergétique. Ainsi, à vitesse égale, un train plus lourd a besoin de plus d'énergie pour circuler ;
- sur la capacité puisque la charge à l'essieu prend en compte le poids du matériel mais aussi le nombre des passagers ;
- sur le coût de maintenance (par exemple, l'usure des freins, des roues et de l'infrastructure est plus rapide lorsque la charge à l'essieu est plus importante).

L'évolution de la réglementation qui impose de nouveaux équipements aux matériels ferroviaires et l'utilisation de modèles plus capacitaires (à deux niveaux notamment) entraînent l'augmentation de la charge à l'essieu des trains. Il apparaît de plus en plus difficile de concilier les contraintes des réseaux avec les performances attendues. Aussi les développements actuels des constructeurs portent sur l'allègement des matériels qui permet :

- pour une charge à l'essieu identique, d'augmenter la capacité en passagers ;
- et pour une capacité identique, de diminuer les besoins énergétiques, les émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts de maintenance (usure moindre des freins, des roues et de l'infrastructure).

### **La modularité au cœur de la conception des trains de voyageurs**

Le marché actuel du train ferroviaire de voyageurs repose sur une large gamme de matériels :

des matériels à un ou deux niveaux, des rames composées d'une à cinq caisses, des trains résultant de couplage de plusieurs rames, à traction électrique, thermique ou bimode voire bi-courant pour certains. Ce constat souligne une diversification des matériels en réponse aux besoins exprimés, ce qui a fait évoluer le marché du train d'un marché standardisé à celui d'un marché se rapprochant du « sur-mesure ». Cette personnalisation de plus en plus présente est la conséquence de l'introduction de la modularité des trains.

Mais qu'entend-on par modularité ? Ce terme unique faisant référence à une évolutivité du matériel traduit dans les faits plusieurs types de modularité envisageables des matériels selon différents angles d'approche.

Le premier, la modularité des diagrammes<sup>2</sup>, exprime tout particulièrement l'enjeu de pouvoir répondre aux besoins de volume de passagers à transporter (longueur du train et nombre de places offertes). On parle également d'architectures différenciées.

La deuxième transposition de la modularité concerne le panel de choix des options d'aménagement proposés à l'intérieur des trains. Cette évolution sensible des aménagements intérieurs des trains peut être perçue comme la résultante de trois enjeux majeurs pour les autorités organisatrices de transport et exploitants ferroviaires. Le premier enjeu est bien sûr lié à l'exploitation des services dans de bonnes conditions pour l'utilisateur. Cela sous-entend de pouvoir répondre au volume de passagers à transporter selon un objectif de densité de voyageurs par véhicule. Il pose donc la question de la répartition entre places assises et places debout selon la fonction du service. C'est l'idée de la modularité des diagrammes. Mais l'autorité organisatrice doit par ailleurs mettre en œuvre l'accessibilité de ses services à toutes les personnes y compris les personnes à mobilité réduite, conformément aux exigences législatives.

Cette obligation s'imposant au matériel, l'aménagement des espaces intérieurs des trains nécessite d'être revu, en particulier sous l'angle de leur dimensionnement : traitement différencié des zones d'entrée, couloirs de circulation, plancher bas, informations visuelles et sonores.

Enfin, le troisième enjeu ayant son incidence sur le changement dans la conception intérieure d'un train est lié à l'image que l'on veut donner au matériel, dans le sens où la volonté est de le rendre « attirant » afin de pouvoir capter les usagers, notamment en report modal depuis la voiture. Ainsi, le design et les services proposés à bord prennent une place de plus en plus importante dans la personnalisation des trains.

Enfin, la modularité se traduit également par une modularité énergétique : bi-courant voire tri ou quadricourant pour les trains internationaux, bi-mode. Ces trois composantes de la modularité actuelle sont déclinées dans la suite de cette partie.

### ***La modularité capacitaire***

Quel que soit le type de matériel considéré, la capacité d'un train de voyageurs est très variable, de 50 places assises pour un autorail train léger à plus de 1 000 places assises pour une composition jumelée de trains à grande vitesse, voire plus de 1500 pour un train type Corail de 20 voitures. Elle dépend en effet de la capacité unitaire d'une caisse, de celle d'une rame et de la composition du train (nombre de voitures, nombre de rames). C'est la notion de modularité des diagrammes de train qui se traduit par une double modularité combinable :

- une modularité par le nombre de caisses ou de voitures et par un nombre de sièges par voiture ;
- une modularité par la longueur et la largeur du train.

Avec le gabarit de la plupart des voies du réseau ferré français, il est en effet possible de faire varier la largeur des caisses qui permet en outre de jouer sur la modularité des aménagements intérieurs, et en particulier sur les modalités techniques d'implantation des sièges (travée en « 3+2 » possible pour une largeur supérieure à 2,80 m contre travée en « 2+2 »). C'est alors un gain de capacité qui peut être estimée à près de 25% de places assises supplémentaires. Mais la contrepartie est alors une limitation de la longueur de la caisse. Ce qui peut impliquer alors, à longueur de train équivalente, un nombre de caisses supérieur.

### **Les trains à grande vitesse**

Sur le marché de la grande vitesse, les trains de largeur constante proposent des capacités pouvant varier très fortement selon leur longueur et la capacité unitaire d'une voiture. Une rame de train à grande vitesse est généralement composée de deux motrices qui encadrent huit ou dix voitures articulées selon les modèles de rames. Pour une composition en unité simple 1, la capacité diffère fortement entre une rame classique et une rame à deux niveaux puisque cette dernière, pour une même longueur, offre une capacité supérieure de 50% à celle des rames classiques. On passe d'une capacité moyenne de 350 places pour une rame classique à 516 places pour une rame à deux niveaux.

Par ailleurs, le couplage en unités multiples permet d'accroître la capacité. Deux rames peuvent être ainsi couplées atteignant alors la longueur maximale de 400 m (ou 475m pour le TGV Atlantique). Les nouvelles rames TGV Euroduplex qui font leur entrée dans le paysage ferroviaire français peuvent ainsi transporter en unité multiple un maximum de 1 020 passagers (2\*510).

## **Le design**

Le **design** tant intérieur qu'extérieur représente un poids de plus en plus important dans la conception du matériel, tout comme pour la rénovation de celle-ci. Il peut ainsi être en partie choisi par l'autorité organisatrice (livrée « neutre » ou propre à une région, couleur des sièges, des sols, des plafonds). Cette question du design est également très présente sur les trains légers. Ainsi la livrée des matériels affectés au service de tram-train de Mulhouse est la traduction de la volonté des acteurs locaux de veiller à la cohérence entre la livrée du réseau urbain et celle des trains régionaux, toutes deux conçus par deux *designers* différents. Elle repose ainsi sur un mixage des couleurs des deux réseaux.

### **La fluidité des circulations**

Afin d'améliorer la fluidité des circulations, les constructeurs cherchent à augmenter l'espace intérieur destiné aux voyageurs. Les équipements techniques sont de plus en plus placés en toiture, permettant ainsi de libérer de l'espace au sol pour les usagers. Ce gain de place permet d'élargir les couloirs et les intercirculations (espaces de passage entre les voitures), et de modifier la hauteur du plancher permettant un accès de plain-pied (pas de marches).

Ces planchers bas, ainsi que les portes d'accès de largeur importante (1 300mm et 1 600mm), voire l'absence de marches à l'intérieur des rames permettant une meilleure circulation dans les rames, se généralisent dans le matériel périurbain et régional afin de répondre aux exigences d'accessibilité.

### **Le confort**

Attente fortement exprimée par les régions, la prise en compte du confort par les constructeurs se traduit pour l'utilisateur par différentes dispositions d'aménagement et d'équipements :

- sièges à large assise avec accoudoirs, se rapprochant du confort « grandes lignes » ;
- élargissement des couloirs de circulation ;
- généralisation de l'équipement en climatisation des trains ;
- travail sur la luminosité avec le recours à des couleurs claires, l'augmentation de la taille des éléments vitrés ;
- équipements permettant de réduire le bruit et les vibrations : dans les nouveaux trains régionaux, Alstom a retenu de placer les bogies moteurs aux extrémités des rames et Bombardier a choisi d'éloigner les voyageurs des sources de bruit dont les portes d'accès. Ce principe de modularité dans l'aménagement intérieur est également présent pour les matériels légers.

Quelques rames ont été conçues afin d'apporter confort et accessibilité avec des voitures aménagées avec de larges portes d'accès facilitant la montée, disposant de plancher bas. Les services à bord Les équipements et services proposés aux usagers à bord ont tendance à être de plus en plus nombreux. Le train n'a plus seulement une fonction de transport, mais remplit d'autres rôles : espace de loisir ou de travail (possibilité d'utiliser internet, présence de tables et de prises de courant), maillon d'une chaîne de déplacements favorisant l'intermodalité (présence de porte-vélos dans les trains régionaux, de porte bagages, espaces PMR), lieu équipé de toilettes.

La pertinence de la mise en place d'équipements et de services à bord dépend de plusieurs paramètres:

- le type de desserte, la longueur du trajet : en effet certains services proposés à bord des trains grandes lignes ne se retrouvent pas dans les trains régionaux (exemples : restauration, service d'accompagnement) ;
- la catégorie d'usagers et le motif de déplacement dominants (un usager seul se rendant au travail n'a pas les mêmes besoins qu'une famille se rendant en vacances) ;
- les particularités territoriales.

Cette diversité conduit les constructeurs à proposer un certain nombre d'équipements et de services en option, multipliant ainsi les variantes possibles d'un même modèle.

### **L'information de l'utilisateur**

Les matériels roulants les plus récents présentent des améliorations dans le domaine de l'information aux voyageurs, notamment en la rendant dynamique et en augmentant le nombre de supports.

Aux informations « basiques » (destination du train par exemple) peuvent ainsi s'ajouter :

- des informations dynamiques sur le trajet effectué : état du trafic en temps réel, heure d'arrivée prévisible ;
- des informations utiles à l'arrivée : météo, correspondances avec les autres modes ;
- d'autres informations (touristiques par exemple), voire des publicités.

La diffusion de ces informations peut se faire par afficheurs (intérieurs et extérieurs) mais aussi à l'aide d'écrans et d'annonces sonores (pour les personnes malvoyantes). La modularité énergétique Le réseau ferré national français est principalement constitué, du point de vue de l'alimentation en énergie, de trois types de voies qui ont une incidence sur le choix du matériel ferroviaire :

- des voies non électrifiées ;
- des voies électrifiées en 1,5kV (1.500 V) continu ;
- des voies électrifiées en 25kV (25.000 V) 50Hz.

La modularité énergétique répond également à un enjeu d'interopérabilité avec les réseaux des pays voisins. Il existe ainsi des modèles tri-courants voire quadri-courants.

### ***La place de l'innovation dans les matériels ferroviaires***

Au-delà des innovations sur la modularité capacitaire et énergétique, d'autres innovations technologiques portent sur les domaines suivants :

- le respect des exigences réglementaires par la mise en place d'équipements ou d'aménagements permettant l'accessibilité, par une conception globale du matériel répondant au respect des normes environnementales, de bruit, etc. ;
- la maintenabilité du matériel en veillant à procurer de par leur agencement un meilleur accès aux équipements, en développant de nouveaux outils informatiques de maintenance, etc. ;
- l'amélioration des performances (vitesse, accélération, freinage, gestion de l'énergie) ;
- et le confort (aménagement intérieur, équipements, ambiance, système d'information).

La suite de cette partie traite de deux aspects relevant de l'innovation : le principe de l'écoconception des matériels et les réductions de la consommation énergétique et des nuisances.

### **L'écoconception**

Les démarches de conception des matériels ferroviaires intègrent aujourd'hui l'enjeu de maîtrise et de réduction de l'impact des produits utilisés sur l'environnement pour l'ensemble de la durée de vie du matériel, c'est-à-dire de sa fabrication à son recyclage en fin de vie.

Certains matériaux tels que l'aluminium, l'acier ou le cuivre sont ainsi privilégiés car leur recyclage est plus facile. Les huiles désormais utilisées dans les trains sont biodégradables. Pour aller plus loin, les constructeurs mènent actuellement des recherches pour utiliser des biomatériaux issus de ressources renouvelables.

Au-delà de cette écoconception, les débats lors des assises du ferroviaire de 2011 ont mis en avant l'intérêt de structurer la filière ferroviaire de déconstruction des matériels roulants afin de procéder au démantèlement de ceux-ci dans un cadre de développement durable.

### ***Pour une réduction des consommations énergétiques et des nuisances***

Le transport ferroviaire est généralement considéré comme un mode de transport terrestre de bonne efficacité énergétique et environnementale, en particulier en matière d'émissions de gaz à effet de serre.

Cela n'empêche pas de chercher à faire mieux pour la réduction des consommations (électrique ou thermique), la réduction des gaz à effet de serre et la diminution des nuisances sonores.

Ainsi, depuis plusieurs années, les constructeurs ont notamment travaillé à l'allègement des matériels par un recours à des matériaux composites, à l'efficacité des systèmes de traction par le biais

de la récupération de l'énergie de freinage, à la conception et emplacement des bogies ou bien encore à l'architecture articulée des rames.

Par ailleurs, les réflexions actuelles ou à venir portent sur :

- l'amélioration de l'aérodynamisme des trains (ensemble motrice et voitures) ;
- l'utilisation de moteurs à aimant permanent ;
- l'amélioration de la gestion des équipements auxiliaires (chauffage, climatisation, ventilation) ;
- la diminution de la consommation des rames en stationnement ;
- la mise en place de systèmes d'aide à l'éco-conduite.

Les derniers modèles de trains régionaux sont ainsi annoncés comme étant 10 à 15% moins gourmands en énergie que leurs prédécesseurs.

Les réflexions sur cette réduction de la consommation énergétique se poursuivent notamment sur le champ du développement de nouveaux modes de propulsion comme par exemple la motorisation hybride, c'est-à-dire combinant l'utilisation d'un moteur thermique et d'une batterie pour fournir l'énergie.

Le bruit des trains est très souvent considéré comme une nuisance environnementale importante pour les riverains des infrastructures ferroviaires et peut être un obstacle important pour le développement des trafics. Les émissions sonores d'un train ne sont pas dues uniquement au matériel mais au sous-système matériel/infrastructure dans la mesure où une courbure de la voie plus ou moins marquée nécessite un freinage en approche, où le contact entre roues et rails est primordial, et donc influencé par l'état de la voie, etc...

Un guide méthodologique préconise des valeurs de référence de niveau d'émissions sonores des principaux trains de voyageurs en circulation à cette date. Ces valeurs résultent d'une campagne de mesure de bruit de ces trains dans des conditions d'exploitations commerciales classiques, à une vitesse d'exploitation courante pour chaque matériel et sur des voies habituellement parcourues par chaque train ce qui permet de fournir une valeur très proche de la réalité des conditions d'exploitation.

Les données d'émissions sonores des trains à grande vitesse, quel que soit le modèle considéré, sont proches de 92 dB(A) pour une vitesse de 300 km/h. Pour des trains régionaux, le niveau avoisine les 80 dB(A) pour leur vitesse maximale. Les valeurs plus élevées des TGV s'expliquent par la prépondérance du bruit aérodynamique à très grande vitesse.

Les nouveaux sont annoncés moins bruyants grâce à un positionnement des bogies moteurs aux extrémités du train (diminution du bruit intérieur) et par l'utilisation de semelles et de disques de frein composites. Pour autant, la quantification de ce facteur de réduction n'est pas aujourd'hui connue.

#### **- La qualité de service**

La notion de « qualité de service » apparaît toujours au cœur des préoccupations de chaque autorité organisatrice compétente. Elle est toujours employée dans une approche systémique intégrant les différentes composantes de ce système. Cette partie vise à apporter des éclairages sur la transposition de la qualité de service à l'élément « matériel roulant » à partir des deux types de services : services grandes lignes sur voie classique et services régionaux.

La qualité de service dans les trains à grande vitesse repose sur des engagements « qualité » que se fixe la société d'exploitation par rapport à la marque « TGV » en matière d'accueil des usagers, d'information, de services à bord (restauration, nursery, prises électriques, wifi,...) mais également en matière de propreté avec la mise en place d'une démarche qualité pour le nettoyage des trains en gare. *Les attentes de qualité de service pour les trains d'équilibre du territoire.*

La convention d'exploitation des lignes d'équilibre du territoire mise au point entre l'Etat et la Société d'exploitation a traduit la volonté de garantir aux usagers de ces trains d'intérêt national une qualité d'un service ferroviaire prédéfini, objectif ciblé comme « la raison d'être du service public ferroviaire ». Elle constitue le « référentiel qualité » pour l'exploitant en termes des objectifs de qualité de service à atteindre avec un principe d'intéressement de type bonus/malus.

Trois domaines ont été ainsi contractualisés pour l'appréciation de la qualité de service, dont la ponctualité des circulations et deux autres relatifs au matériel : le confort à bord des trains, incluant également la propreté et les services proposés à bord, et la qualité de l'information délivrée aux usagers à bord des trains, que ce soit en situation normale comme en situation perturbée de trafic. Ces deux

domaines sont assortis d'un bonus-malus selon un objectif global couvrant l'ensemble du périmètre de conventionnement des Trains d'Equilibre du Territoire.

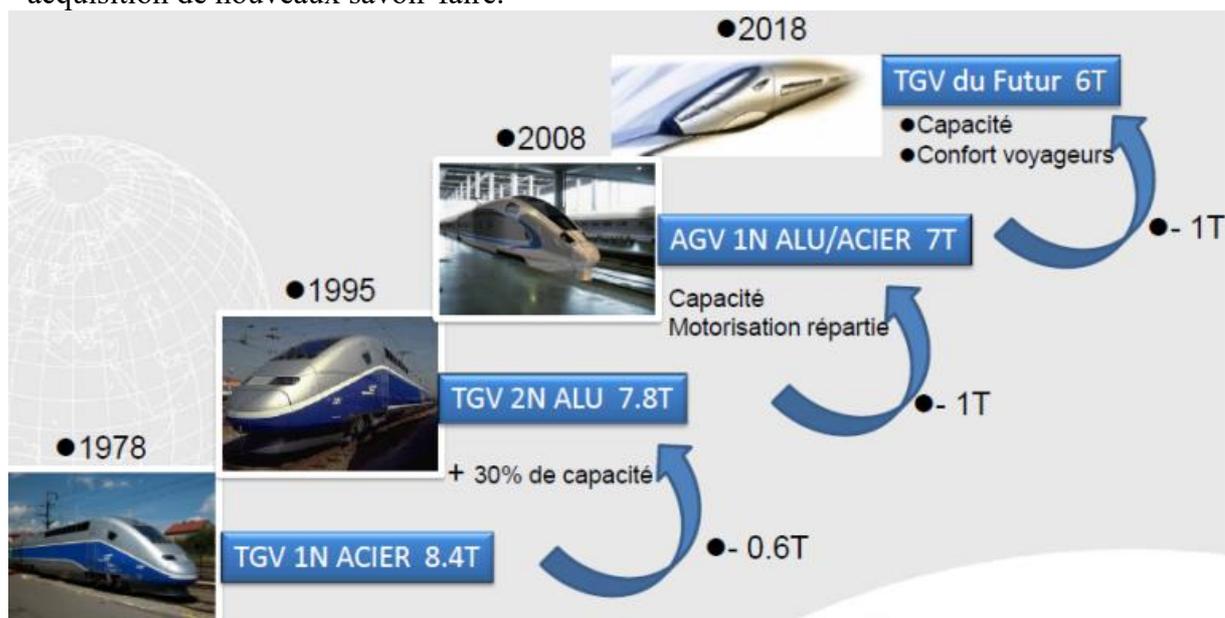
La contractualisation de la qualité de service des trains régionaux. L'amélioration de la qualité de service des transports régionaux est un objectif majeur pour les régions qu'elles traduisent au travers des conventions d'exploitation des services régionaux signées avec la SNCF par des objectifs à atteindre. On peut rencontrer ainsi des lignes ferroviaires ayant été certifiées « NF service » par l'Association Française pour l'Amélioration et le management de la Qualité (AFAQ) Tout comme pour les autres types de services ferroviaires (TET en particulier), ces objectifs relèvent de différents domaines tels que la réalisation de l'offre prévue, la ponctualité des trains, la qualité des services des gares ou de l'information aux voyageurs mais également la qualité de service à bord des trains :

confort, propreté, accueil / prise en charge, services à bord (information, équipements embarqués,...).

Un dispositif d'intéressement, complémentaire à la contribution financière prévue est également mis en place par une majorité de régions sur la base d'un principe de bonus/malus en fonction de l'atteinte des objectifs de qualité de service. Ces derniers sont mesurés à partir de valeurs de seuils prédéfinies sur le niveau de qualité de service voulue et à partir de résultats d'enquêtes auprès des usagers sur leur perception (enquêtes d'opinion ou baromètres de satisfaction).

L'utilisation des matériaux composites dans la construction ferroviaire vise un triple objectif:

- l'allègement (économies d'énergie, réduction de la masse par essieu, intégration d'équipements et/ou accroissement de la charge utile)
- réduction des coûts d'acquisition, d'exploitation et de recyclage du matériel roulant
- acquisition de nouveaux savoir-faire.



Dans le secteur ferroviaire, les contraintes du composite sont liées à l'acoustique et à la compression selon le segment concerné.

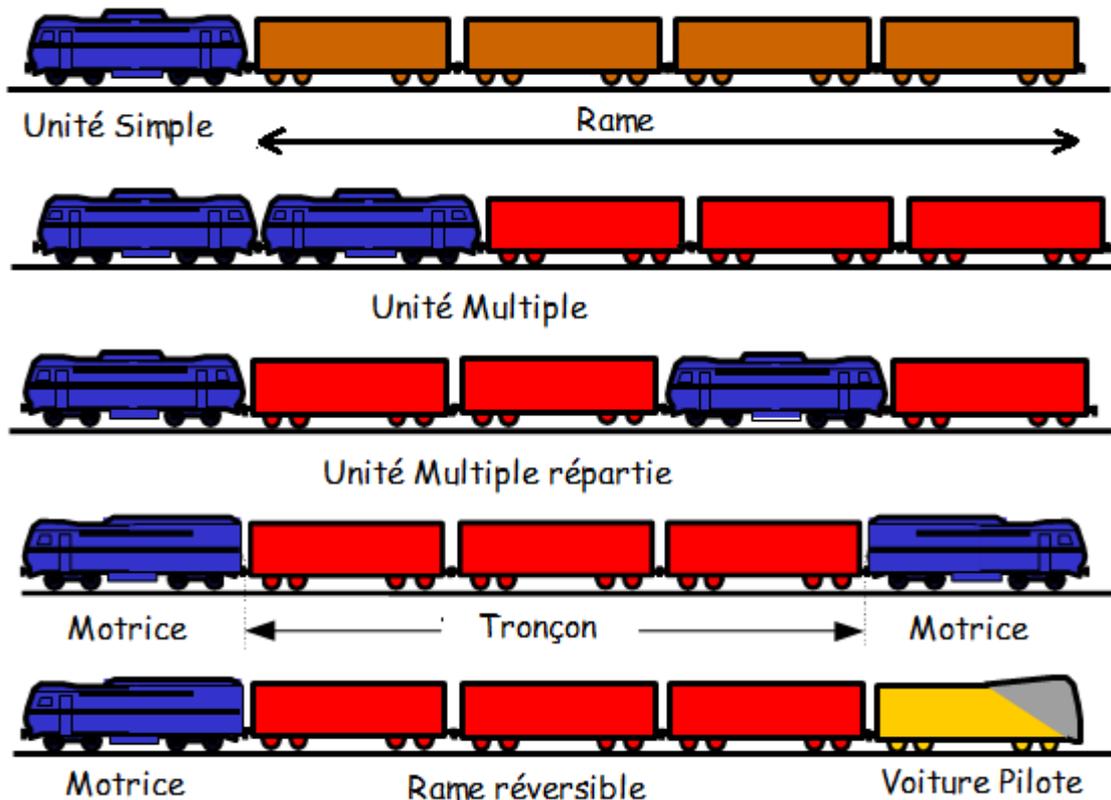
### Une question de terminologie

Le vocabulaire ferroviaire résulte de l'histoire et il circule encore des termes variés tel que motrice, rame, remorque, autorail, micheline !

Clarifions :

- un autorail trouve son origine dans les premiers temps de la traction à moteur à essence : une auto sur des rails ! Ce nom est remplacé par automoteur
- La micheline a eu son heure de gloire grâce à **Michelin** qui développa des autorails sur pneumatique ; il ne doit bien entendu plus être utilisé !
- Le nom **Rame** désigne un train quelle que soit sa nature : passagers, fret, métro, tramway
- La **Rame** peut être **Réversible** si sa conduite est assurée dans les deux sens de circulation

- **Remorque** désigne une voiture de voyageurs intégrée dans une rame à composition fixe, genre rame à grande vitesse articulée type TGV
  - L'engin moteur est en "**unité simple**" s'il est unique pour remorquer la rame
  - en "**unité multiple**" si deux ou plus d'engins sont associés. "Unité multiple répartie" si les engins sont répartis dans le train; c'est le cas des rames TGV dans lequel il y a une motrice à chaque extrémité.
  - **Motorisation répartie** : les moteurs sont répartis tout le long de la rame
  - **Double traction** : l'expression désigne deux engins conduits chacun par un agent. Cette configuration est plutôt rare actuellement compte tenu des possibilités de télécommande.
  - **Pousse** : un engin moteur est adjoint en queue de train pour franchir un profil à forte rampe; la pousse peut être attelée ou non attelée.
- **Haut le pied** : engin moteur circulant seul



### ROULEMENT - BOGIE

L'exercice de l'effort de traction s'effectue au niveau du contact roue - rail. Il est limité par deux paramètres :

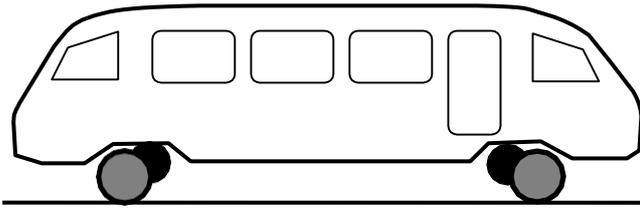
- la limite d'adhérence utilisable au niveau de ce contact
- la charge par essieu admissible

Ces deux paramètres déterminent le nombre d'essieux permettant de satisfaire les performances.

Les essieux doivent s'inscrire dans la géométrie de la voie, notamment en courbe, dans des conditions satisfaisantes en termes :

- d'usure des organes en présence - roues et rails -
- de conséquence du roulement, notamment de bruit acoustique résultant des contacts parasites

L'engin le plus simple est composé de deux essieux : un seul ou les deux étant moteur.



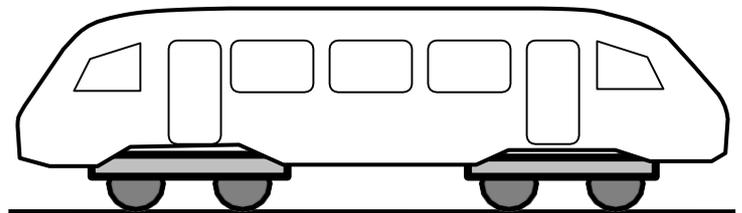
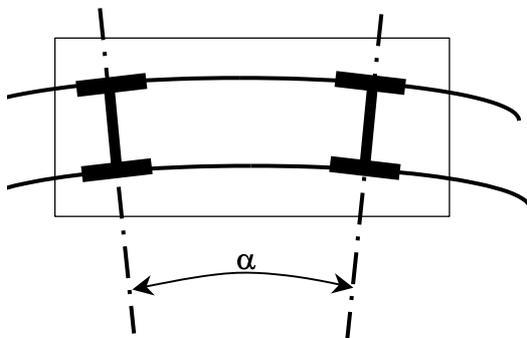
Dans la plupart des cas une telle disposition autorise des performances modestes ; en effet pour une charge par essieu maximum de 22,5 t, soit une masse totale de 45 t, l'effort à la jante maximale qu'il est possible d'exercer, compte -tenu d'une adhérence de 35 %, est de :

$$F = \mu \cdot Q = 0,35 \times 22,5 \times 0,981 = 77,2 \text{ kN}$$

Par ailleurs l'entraxe des deux essieux - appelé « empattement » - fixés rigidement sous la caisse est défavorable à une bonne inscription en courbe de faible rayon.

Deux méthodes permettent de résoudre ces deux contraintes :

- ✓ rendre les essieux orientables pour faciliter leur inscription dans la voie
- ✓ réduire leur entraxe en les disposant sous un châssis commun appelé « bogie »



### Fonctions du bogie

Les organes de roulement du matériel moteur sont, le plus souvent regroupés pour constituer le BOGIE. Il assure les fonctions principales suivantes :

- le **roulement** sur la voie
- le **support** de la charge de l'engin moteur
- la **transmission** des efforts de traction et de freinage

Faisant partie intégrante de l'engin, il doit respecter les contraintes de l'ensemble :

- masse, charge par essieu
- gabarit, notamment au niveau de la voie
- satisfaire les performances en termes d'effort et de vitesse
- s'inscrire dans les objectifs de coût de cycle de vie (LCC)

En contact permanent avec la voie, le bogie doit être le moins agressif possible à son égard, notamment en courbe. Réciproquement il doit supporter les contraintes résultant du tracé - courbes, appareils de voie - des défauts de voie sans risques engageant la sécurité, le confort, le bruit, etc.. .

### Disposition générale

L'architecture d'ensemble d'un bogie comprend les sous-ensembles principaux suivant :

- un châssis reliant et reposant sur les essieux
- les organes de roulement comprenant les roues
- la transmission du couple du moteur aux roues
- la suspension entre châssis et essieux, appelée « primaire »
- la suspension entre caisse et châssis de bogie, appelée « secondaire »
- la liaison d'entraînement entre caisse et bogie

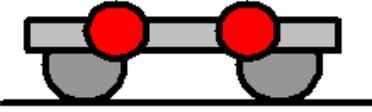
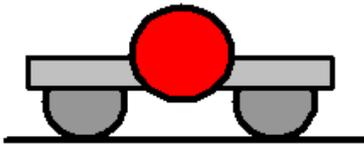
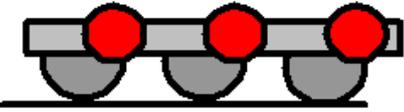
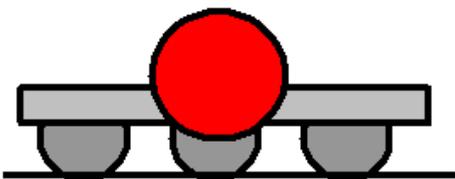
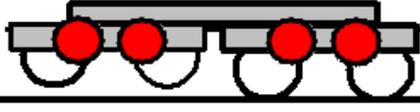
- les organes de freinage
- les accessoires divers, tels que dispositifs de sablage, de graissage des boudins ou des rails, les capteurs (signalisation, vitesse, etc..)

L'étude du bogie de matériel remorqué est similaire à l'absence de transmission motrice près.

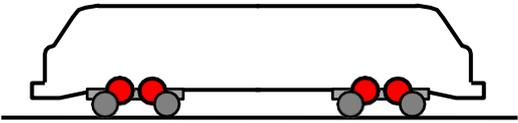
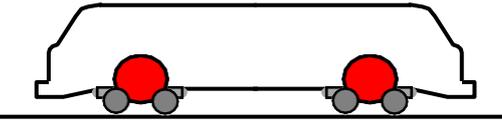
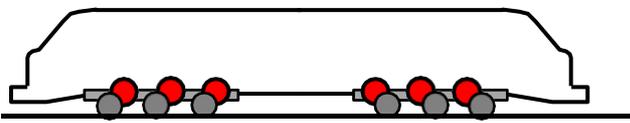
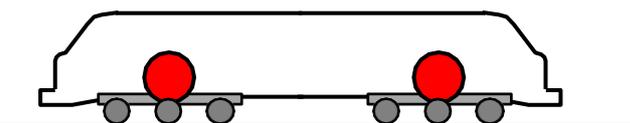
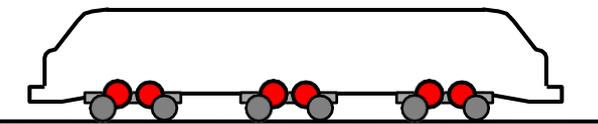
Les différents types de bogies sont classés en fonction du nombre d'essieux et de la disposition du moteur (quelle que soit sa nature) par rapport aux essieux :

- un moteur entraîne un essieu : c'est la solution « multi moteurs »
- un seul moteur entraîne tous les essieux: c'est la solution « monomoteur »

Le tableau ci-après résume ces principaux types :

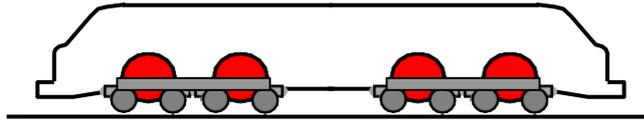
Type	Un moteur par essieu	Monomoteur
2 essieux	$B_0$ 	$B$ 
3 essieux	$C_0$ 	$C$ 
4 essieux	$B_0B_0$ 	$BB$ 

L'architecture de l'engin moteur est fonction du nombre de bogies et de leur disposition sous caisse :

2 bogies $B_0$ <b><math>B_0B_0</math></b>	
2 bogies $B$ <b><math>BB</math></b>	
2 bogies $C_0$ <b><math>CoCo</math></b>	
2 bogies $C$ <b><math>CC</math></b>	
3 bogies $B_0$ <b><math>BoBoBo</math> ou <math>3Bo</math></b>	

2 x 2 bogies B

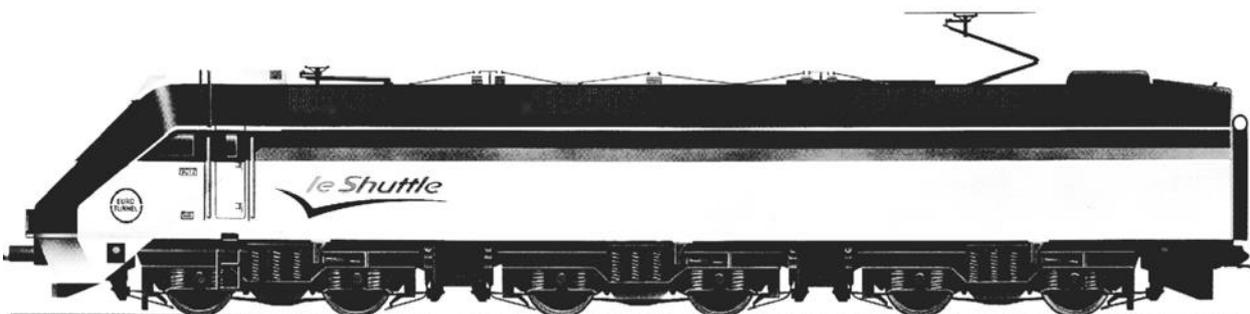
4B



L'architecture de l'engin moteur et le choix du type de bogie est fonction des critères fondamentaux examinés dans le chapitre « Dimensionnement » :

- effort maximal et adhérence maximale utilisable
- vitesse
- masse par essieu
- caractéristiques de voie
- coût

La voie est déterminante en termes de rayon de courbes. Comme nous l'étudierons l'inscription du bogie dans les courbes s'accommode difficilement de l'architecture « C ». S'il est cependant nécessaire de disposer de 6 essieux la solution BBB s'impose.



Locomotive BoBoBo « Le Shuttle » Eurotunnel

La disposition BB + BB (ou 4B) est rarissime ; on l'a rencontré dans quelques cas de réseaux africains et actuellement en Russie.

L'engin BoBo ou BB est, de loin, le plus répandu pour les réseaux européens.

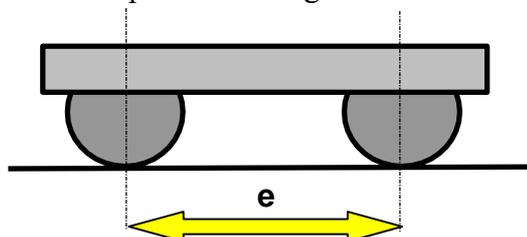
Le continent américain utilise la configuration CoCo quasi exclusivement.



### Inscription en courbe

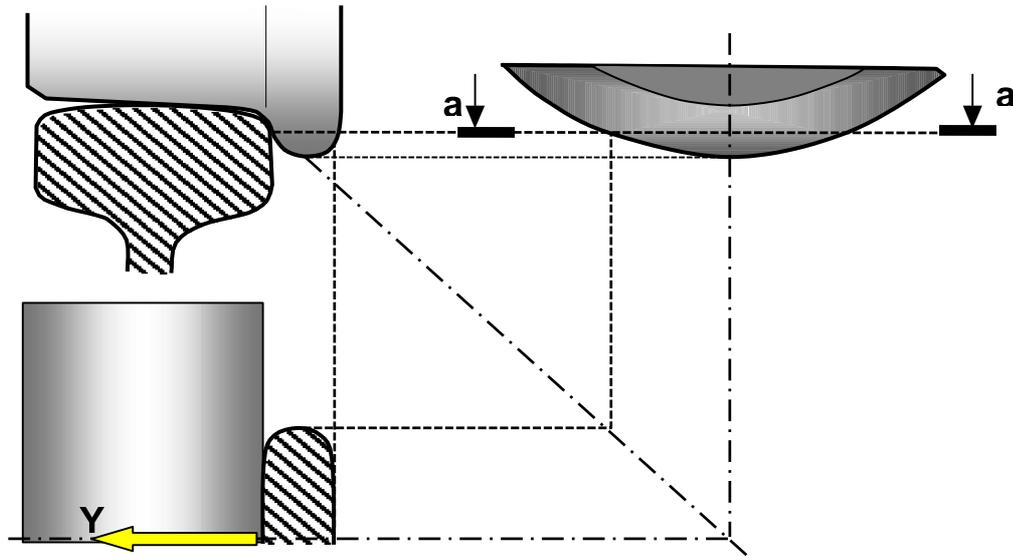
La fonction « ROULEMENT » est assurée par les essieux positionnés par le châssis de bogie. La distance « e » entre essieux extrêmes est appelée « **Empattement** » :

Se pose le problème de l'inscription d'un bogie en courbe dès lors que l'empattement n'est pas



négligeable par rapport au rayon de courbure. Que se passe-t-il en effet entre le boudin de la roue -

en sailli - et le flanc du champignon de rail ? L'épure montre un contact tel qu'il y a frottement entre les deux surfaces courbes :



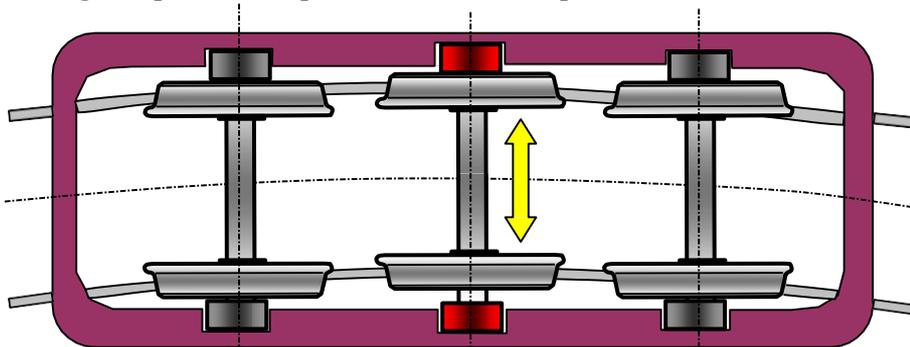
$\frac{1}{2}$  Coupe a - a

Ce contact concerne essentiellement la roue avant extérieure. La méthode d'Heumann permet de calculer l'effort transversal Y dit de « ripage ». Celui crée un couple de renversement du rail, équilibré par le dispositif d'attache rail - traverse. En fonction de la charge verticale sur l'essieu, la condition de non - renversement du rail est définie par le rapport :

$$\frac{Y}{Q} \leq 1,2$$

Ce critère étant respecté le frottement entraîne cependant une usure du boudin et du champignon de rail. On atténue ces effets par un graissage judicieux, soit du boudin des roues soit des flancs intérieurs des champignons de rails.

Le cas d'un bogie C présente le problème de l'inscription de l'essieu médian dans la courbe:



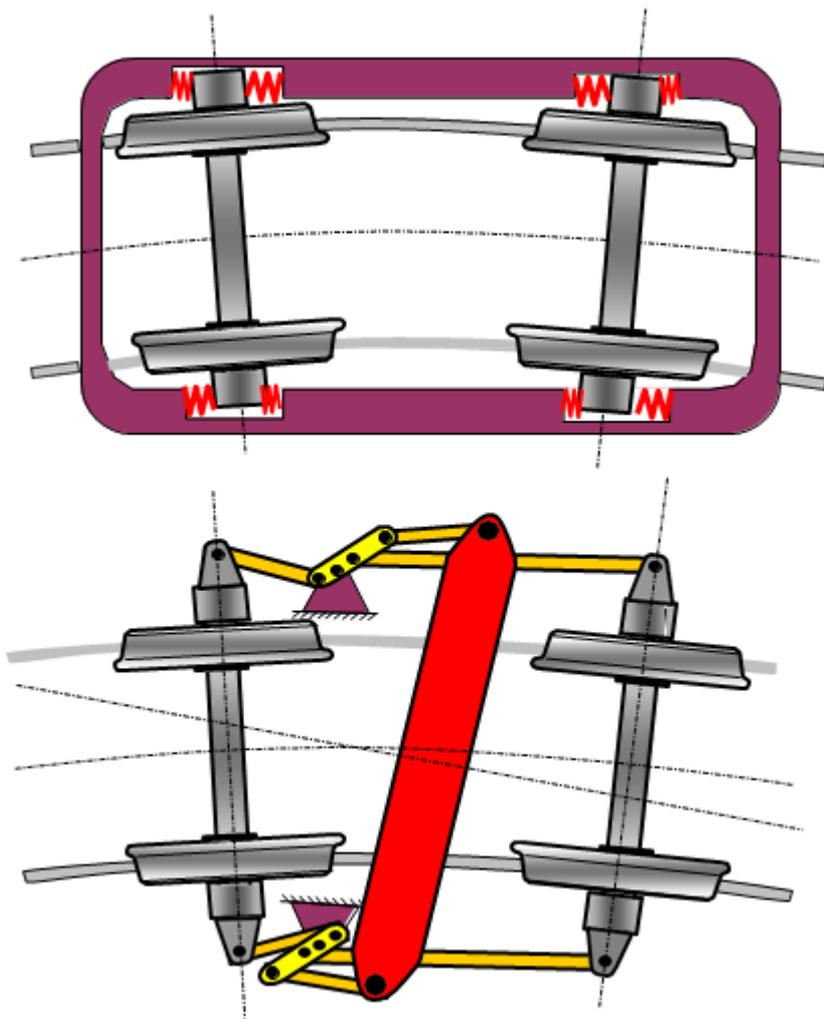
elle serait impossible sans un degré de liberté transversale. En contre partie ce jeu engendre une possibilité d'instabilité en alignement.

**L'essieu orientable : une solution au problème de l'inscription en courbe**

L'angle d'attaque étant la cause du frottement boudin - rail, il faut le réduire, voire l'annuler, en donnant aux essieux la possibilité de s'orienter par rapport à l'axe du châssis de bogie.

Ce degré de liberté angulaire peut être réalisé de deux manières :

- soit **passive** : c'est l'action du rail qui impose le déplacement angulaire de chaque essieu grâce à une faible rigidité longitudinale,  $K_x$ , de la liaison essieu - châssis :



- soit **active** : les essieux extrêmes du bogie ont leur déplacement angulaire couplés mécaniquement.

### Le graissage du boudin

La solution la plus courante adoptée pour minimiser l'usure du boudin de roue résultant de l'inscription en courbe est de le lubrifier régulièrement par un dispositif « graisseur » :



### **Stabilité sur voie - Tenue du bogie en alignement**

Le mouvement d'un essieu isolé en alignement a été étudié au chapitre du contact roue -

rail. Le fait de lier plusieurs essieux ne neutralise pas le phénomène du lacet : la trajectoire de chaque essieu se compose pour donner un mouvement de « lacet » au bogie.

L'expérience montre qu'à partir d'une certaine vitesse, appelée « vitesse critique » apparaît une oscillation transversale entretenue dont la fréquence est généralement comprise entre 3,5 Hz et 6 Hz. Au-delà de ce seuil de vitesse des efforts de ripage de la voie apparaissent, pouvant même entraîner le déraillement. Le critère de Prudhomme définit l'effort transversale qui donne la limite de ripage d'une voie de standard européen:

$$S = 1 + \frac{2Q_0}{3}$$

S : effort transversal ; Q<sub>0</sub> : charge par essieu (tonnes)

Les facteurs permettant de relever la vitesse critique sont :

- faible masse du bogie en premier lieu
- empattement grand
- rigidité des liaisons élastiques essieu - bogie la plus élevée possible.
- faible conicité des roues

Il y a une parfaite dualité entre les critères de stabilité en alignement et d'inscription en courbe. Le choix résulte d'un compromis tenant essentiellement compte des voies. Il est probable qu'un engin dédié à la grande vitesse parcourra des lignes à forte proportion en alignement et exceptionnellement à faibles rayons de courbe, l'empattement de ses bogies pourra être important. Pour un trafic destiné à des lignes au profil difficile, à vitesse peu élevée on privilégiera un empattement court.

## TRANSMISSION DES EFFORTS

Pour transmettre son couple au moyen d'une chaîne cinématique simple, le moteur de traction doit être disposé au plus près des essieux. Il est donc naturel de l'intégrer au bogie. Les premiers tramways disposaient de moteur électrique dont le rotor était l'essieu - axe lui-même, solution appelée « gearless » qui réapparaît d'ailleurs. Les contraintes imposées par le moteur de traction sont importantes :

- organe lourd : la masse de fer du circuit magnétique est prépondérante. Ordre de grandeur : 2600 kg pour 1000 kW en asynchrone; soit 2 kW/kg.
- organe complexe et fragile : il ne peut subir des efforts dynamiques importants tels que vibrations, accélérations verticales ou axiales.

Comme il a été indiqué précédemment, la masse du bogie est l'un des facteurs essentiels de la tenue sur voie. Expérimentalement, les efforts transversaux sont d'autant plus faibles que la

valeur du rapport :  $\frac{4m\rho^2}{a^2}$  est faible.

$\rho$  : rayon de giration     $m$  : masse totale du bogie     $a$  : empattement

Le rayon de giration est minimisé soit en diminuant la masse, soit en la concentrant le plus près possible au centre du bogie. Les - ou le - moteur(s) de traction étant l'un des arguments principaux de la masse, deux solutions s'offrent au concepteur :

- moteurs sur bogie au plus près du centre
- moteur hors bogie - sous caisse

### Moteur sur bogie

La position du moteur par rapport à l'essieu est conditionnée par la recherche de la chaîne cinématique la plus simple et la moins lourde possible. L'inventaire des masses du bogie fait apparaître une distinction essentielle entre masses dites « non suspendues » et « suspendues ».

### Masses non suspendues

Elles qui sont en contact direct avec le rail, soumises directement aux accélérations verticales et transversales. Réciproquement la voie subie les surcharges dynamiques dues à ces accélérations entraînant sa dégradation progressive au passage de chaque essieu. Il y a donc un impératif commun entre infrastructure et matériel visant à réduire la part des masses non suspendues, et ce d'autant plus que la vitesse est élevée.

L'essieu et ses boîtes sont les seules à être obligatoirement non suspendues.

Le type de transmission est déterminant dans le bilan des autres masses de ce type. Les critères de choix

### **Matériel roulant**

Chaque engin de traction est décrit par ses données techniques telles que :

- la motorisation,
- le poids,
- la longueur, etc.

Une banque de données appelée « Dépôt » gère les locomoteurs.

A chaque train circulant pendant une simulation sont attribués un ou plusieurs engins d'un dépôt, ainsi que les voitures ou wagons à remorquer. Les convois ainsi définis, également disponibles dans une banque de données du même type (par exemple une locomotive Re 460, 13 voitures unifiées IV et une voiture pilote pour les trains « InterCity » suisses), peuvent ensuite être utilisés à volonté et pour différents types de circulations.

### **Données de la voie ferrée**

La voie ferrée est représentée sous la forme d'un graphe mathématique – un ensemble de nœuds et d'arêtes. Sa topologie peut être saisie et gérée graphiquement à l'aide d'un éditeur de plan de voies. Les différents éléments du graphe peuvent ensuite être dotés d'attributs. Les arêtes possèdent, par exemple, une longueur, une déclivité et des vitesses de circulation admissibles selon les différents types de trains. Outre les nœuds et les arêtes, d'autres éléments de l'infrastructure sont créés et gérés à l'aide de l'éditeur de plan de voies. La figure 2 montre un extrait d'un plan de voies d'une gare simple.

### Le P.V: c'est le poids à vide du véhicule.

Le poids à vide d'un véhicule se mesure sans son chargement et sans le poids du conducteur , il comprend donc :

- les réservoirs pleins,
- les roues de secours,
- l'outillage de bord,
- et autres équipements ...

On trouve le P.V d'un véhicule sur la carte grise, le certificat de conformité du véhicule ou la plaque de tare, en fonction du nombre d'essieux

**Le P.T.A.C** : c'est le poids total autorisé en charge

A chaque véhicules (camion, remorque, semi-remorque) correspond un PTAC. Le PTAC autrement appelé aussi **PMA (Poids Maximum Autorisé)**, **MCV(masse charge maximale du véhicule)**, **MMA(Masse maximum autorisé)** c'est le poids maximum que ces véhicules ne doivent pas dépasser chargement compris .

On trouve le PTAC d'un véhicule sur la carte grise , le certificat de conformité du véhicule ou la plaque de tare, il est défini par la D.R.I.R.E en fonction du nombre d'essieux

**Le P.T.R.A** : c'est le poids total roulant autorisé aussi nommé M.C.E

**Le poids ou charge réelle** : Il s'agit du poids donné lors d'une pesée, par la balance

**La M.C.E** : la masse de l'ensemble chargé plus précisément la masse en charge de l'ensemble

**La C.U**: c'est le calcul du poids du chargement appelé charge utile, pour la calculer il suffit de soustraire le poids à vide du véhicule du poids total autorisé en charge comme ceci :

$$\underline{C.U = P.T.A.C - P.V}$$

Un essieu par définition est toujours porteur, il peut être soit directeur soit moteur ou alors les deux. Son rôle en est souvent directeur lorsqu'il est situé à l'avant du véhicule ou moteur à l'arrière.

**Rappel** : Le P.T.A.C est le poids total autorisé à charge (PMA) fixé par la DRIRE(Direction régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement)

Pour 4 essieux et + le P.T.A.C max = 32 tonnes

Pour 2 essieux le P.T.A.C. max = 19 tonnes

Si un essieu est proche d'un autre essieu alors il s'agit d'un **groupe d'essieu** celui-ci est dit moteur lorsqu'il sert à tracter tout simplement à la force d'un moteur.

Si un essieu est à une distance de minimum 1,80 mètre d'un autre essieu alors on dit que celui-ci est isolé ou seul

L'essieu non moteur est un essieu qui n'est pas tracter à la force de son moteur on en trouve par exemple sur les semis remorques.

**L'essieu isolé** : La charge maximale est de 13 tonnes pour ce type d'essieu

**L'essieu moteur** : La charge maximale est de 11,5 tonnes pour ce type d'essieu mais varie en fonction de la distance en mètres entre deux essieux.

**Pour une distance** :

- Inférieur à 0,90 m -> 13,15 tonnes
- De 1 m à moins de 1,35 m -> 13,15 t. + 0,65 t par tranche, de 5 cm au-delà de 0,90 m
- De 1 m à moins de 1,35 m -> la plus grande des deux valeurs suivantes :
  - soit : 13,15 tonnes + 0,65 tonnes par tranche de 5 cm au-delà de 0,90 m,
  - soit : 16 tonnes
- De 1,35 m à moins de 1,80 m -> 19 tonnes

**Arrimer , équilibrer son chargement d'une manière optimale** est capital , tant pour éviter tout risque de déséquilibre , de dégradation du véhicule , pour être en règle et ne pas risquer de commettre une infraction ayant des conséquences directes sur votre permis mais aussi sur votre portefeuille !

Car **les risques d'un chargement défectueux** entraînerait inévitablement des dangers pour votre conduite mettant en périls votre vie et celle des autres usagers de la route.

**La surcharge modifie votre conduite** par l'augmentation des distances de freinages et le risque est le renversement du chargement et véhicule sur la chaussée.

## Qu'appelle-t-on "Surcharge" ?

La surcharge correspond à un excès de poids autorisé .Ce surplus de poids ne doit pas dépasser :

- Le **P.T.A.C** (poids total autorisé en chargement) , autrement appelé aussi **M.C.V.** (Masse charge du véhicule)
- Le **P.T.R.A**(Poids total roulant autorisé) ou la **M.C.E** (masse charge de l'ensemble)
- Les charges autorisées par essieux (13 tonnes pour un essieu isolé et 11,5 tonnes pour un essieu moteur)

## Les risques ?

Se faire prendre en surcharge en plus de coûter très cher et ainsi ruiner votre journée de travail car la **surcharge est formellement interdite !**

## En cas de surcharge de plus de 5% du P.T.A.C

Il s'agit d'une infraction de 4 ème classe , le risque de pénalité sera d'un retrait compris entre 3 et 6 points et l'amende minorée sera de 90 € , forfaitaire 135€ et maxi 750€

## En cas de surcharge de plus de 20% du P.T.A.C et /ou de récidive

Il s'agit d'une infraction de 5 ème classe , le risque de pénalité sera d'un retrait de permis et l'amende minorée sera de 1500 € , ou maxi 3000€

Il convient donc de respecter le poids réel afin d'éviter de commettre une infraction.

**\*\*Note :** Lors d'un accident les assurances peuvent refuser de vous couvrir ce qui entraîne une limitation de leur garanties.

Arrimer , équilibrer son chargement d'une manière optimale est capital , tant pour éviter tout risque de déséquilibre , de dégradation du véhicule , pour être en règle et ne pas risquer de commettre une infraction ayant des conséquences directes sur votre permis mais aussi sur votre portefeuille ! Car les risques d'un chargement défectueux



1 - **Empattement** : Il s'agit de la distance entre l'axe de l'essieu avant et l'axe de l'essieu arrière du véhicule on n'y trouve généralement une barre anti-encastrement .

2 - **Porte-à-Faux arrière** : Situé a l'arrière du véhicule , il s'agit de la distance entre l'axe de l'essieu arrière et l'extrémité arrière du véhicule .

3 - **Porte-à-Faux avant** : Situé a l'avant du véhicule , il s'agit de la distance entre l'axe de l'essieu avant et l'extrémité avant du véhicule

4 - **Voie** : Il s'agit de la distance de l'écart entres les roues d'un même essieu .

5 - **Hauteur** : la particularité de la hauteur d'un véhicule réside dans le fait que celui-ci dans la législation française n'est pas limité , cependant il convient tout de même d'adapter cette dimension à la taille des ponts .

6 - **Largeur** : La largeur d'un véhicule, chargement compris, ne doit pas dépasser 2,55 mètres , cependant il existe une exception lorsque la remorque est de type réfrigéré alors celle-ci peut atteindre au maximum 2,60 mètres.

**\*\*Notes : Quelques éléments peuvent dépasser les 2,55 mètres**

- **Retroviseur** => + 20 cm maximum
- **Catadiopre latéraux** => + 5 cm maximum
- **Feux d'encombrement** => + 5 cm maximum

**Les longueurs maximales des véhicules :**

- Non attelés : ne peut excéder 12 mètres
- Articulés : ne peut excéder 16,5 mètres
- Trains routiers et trains doubles : ne peut excéder 18,75 mètres

Ceci dit il existe des exception pour les semi-remorque , les ensembles de véhicules porte-voitures , les matériels du btp ,travaux publics , les camions remorques , ou camion remorquant deux remorques à essieux centraux (type forains ) dans ces cas particuliers les dimensions varient et sont soumises à d'autres limites de dimensions

**CALCUL DE LA CHARGE UTILE**

Comment calculer la charge utile d'un véhicule ?

Cela peut sembler banal voire simpliste, je me suis aperçu que beaucoup de stagiaires ignoraient la façon de calculer.

Alors dois-je rappeler que la surcharge est **INTERDITE** et donc, de ce fait, sanctionnée.

Que la responsabilité incombe au conducteur si cela est dû à un mauvais calcul de la charge utile.

Nous sommes libres d'accrocher derrière un tracteur routier ou un porteur remorqueur n'importe quelle semi-remorque ou remorque. De fait le calcul n'est pas si évident que cela.

<b>DÉFINITIONS</b>	
<b>PTAC</b>	<b>Poids Total Autorisé en Charge</b> Poids maxi d'un véhicule <u>isolé</u>
<b>PV</b>	<b>Poids à Vide</b>
<b>PTRA</b>	<b>Poids Total Roulant Autorisé</b> Sur les tracteurs routiers et les porteurs-remorqueurs. C'est le poids maxi de l'ensemble
<b>CU</b>	<b>Charge Utile</b>
<b>PMA</b>	<b>Poids Maximum Autorisé</b> Cette donnée n'est mentionnée nulle part. Pour un camion isolé elle est égale à son PTAC; quant aux autres véhicules il faut la calculer.

<b>Poids maxi des véhicules</b>		
<b>Porteur</b>		
	<b>2 essieux</b>	<b>19T</b>
	<b>3 essieux</b>	<b>26T</b>
	<b>4 essieux et +</b>	<b>32T</b>

TRR + S/REM		
TRR + SREM	2 essieux + 1 essieu	32T
	3 essieux + 1 essieu	35T
	2 essieux + 2 essieux	38T
	5 essieux et +	40T
le transport combiné c'est : le rail / route et les voies navigables/route	5 essieux et + en transport combiné	44T
Aujourd'hui presque tous les maxi-code sont réceptionnés à 44T, au cas où un transport combiné serait à réaliser.	Autre raison : au cas où la réglementation changerait.	
Camion remorque		
	2 essieux + 2 essieux	38T
	5 essieux et +	40T
Train double		
	5 essieux et +	40T

### Les tracteurs routiers + semis remorques

#### Les formules

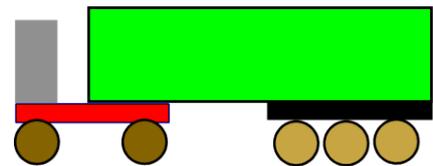
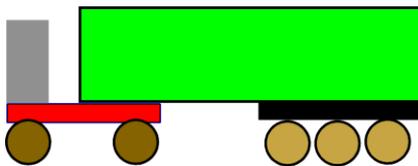
##### A LE PMA

Le PMA est le + petit résultat des calculs suivants :

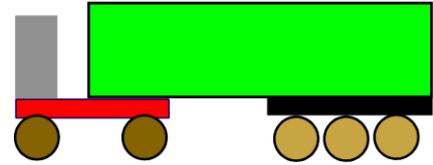
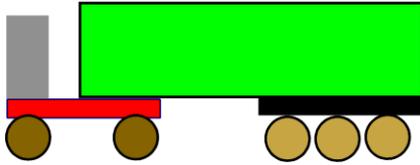
- a- PTRA du TRR
- b- PV (TRR) + PTAC (S/REM)
- c- Code de la Route (voir poids maxi des véhicules)

##### B LA CU

$$CU = PMA - PV (s)$$

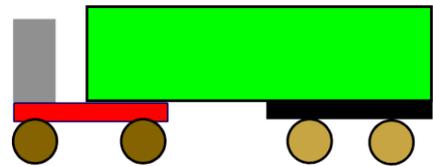
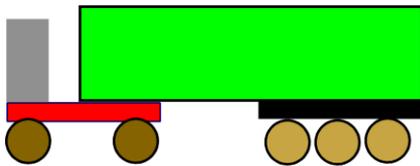


TRR		S/REM		TRR		S/REM	
PV	6T	PV	7,5T	PV	7,5T	PV	7T
PTRA	44T	PTAC	34T	PTRA	44T	PTAC	32T
Application de la formule : a- 44T ; b- 6+34=40T ; c- 40T Le PMA est le + petit ; soit 40T La CU 40 -(6+7,5) = 26,5T				Application de la formule : a- 44T ; b- 7,5+32=39,5T ; c- 40T Le PMA est le + petit ; soit 39,5T La CU 39,5 -(7,5+7) = 25T Ici c'est l'addition du PV du TRR et du PTAC de la S/REM			



TRR		S/REM		TRR		S/REM	
PV	6T	PV	7T	PV	7,5T	PV	7,5T
PTRA	38T	PTAC	34T	PTRA	44T	PTAC	34

<p>Application de la formule :</p> <p>a- 38T ; b- 6+34=40T ; c- 40T</p> <p>Le PMA est le + petit ; soit 38T</p> <p>La CU 38 -(6+7) = 25T</p> <p>Ici c'est le PTRA</p>	<p>Application de la formule :</p> <p>a- 44T ; b- 7,5+34=41,5T ; c- 40T</p> <p>Le PMA est le + petit ; soit 40T</p> <p>La CU 40 -(7,5+7,5) = 25T</p> <p>Ici c'est le code de la route 5 essieux = 40T</p>
---	---



TRR		S/REM		TRR		S/REM	
PV	T	PV	T	PV	8T	PV	7,5T
PTRA	T	PTAC	T	PTRA	40T	PTAC	32T

<p><b>Libre pour une de vos suggestions</b></p>	<p>Application de la formule :</p> <p>a- 44T ; b- 8+32=40T ; c- 38T</p> <p>Le PMA est le + petit ; soit 38T</p> <p>La CU 38 -(8+7,5) = 22,5T</p> <p>Ici c'est le code de la route 4 essieux = 38T</p>
---	---

## LES CAMIONS REMORQUES

### Les formules

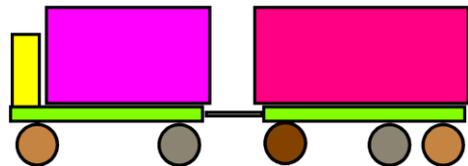
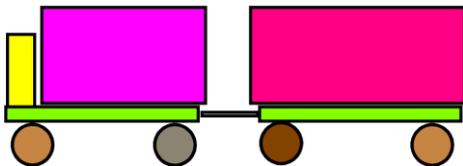
#### A LE PMA

Le PMA est le + petit résultat des calculs suivants :

- a- PTRA du CAMION
- b- PTAC (CAM) + PTAC (REM)

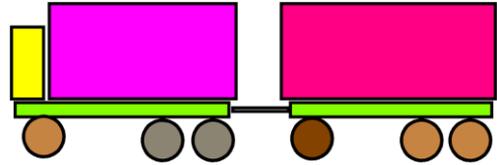
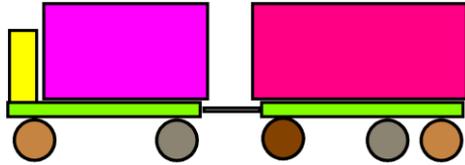
#### B LA CU

CU = PMA - PV (s)



CAM		REM		CAM		REM	
PV	10T	PV	5T	PV	9T	PV	9T
PTAC	19T	PTAC	19T	PTAC	19T	PTAC	26T
PTRA	26T			PTRA	40T		

<p>a- PTRA du CAMION 26T  b- PTAC (CAM) + PTAC (REM) 38T  PMA = 26T  Ce camion est conçu pour un PTRA de 26T  <math>CU = 26 - (10+5) = 11T</math>  Ici nous recherchons avant tout le volume</p>	<p>a- PTRA du CAMION 40T  b- PTAC (CAM) + PTAC (REM) 45T  PMA = 40T  <math>CU = 40 - (9+9) = 22T</math></p>
--	---



<p>CAM  PV 9T  PTAC 15T  PTRA 38T</p>	<p>REM  PV 5T  PTAC 20T</p>	<p>CAM  PV 11T  PTAC 26T  PTRA 40T</p>	<p>REM  PV 5T  PTAC 26T</p>
---	-------------------------------------	--	-------------------------------------

<p>a- PTRA du CAMION 38T  b- PTAC (CAM) + PTAC (REM) 35T  PMA = 35T  <math>CU = 35 - (9+5) = 21T</math></p>	<p>a- PTRA du CAMION 40T  b- PTAC (CAM) + PTAC (REM) 52T  PMA = 40T  Ce camion est conçu pour un PTRA de 40T il n'est pas équipé pour 52T  <math>CU = 40 - (11+5) = 24T</math></p>
---	--

## LES TRAINS DOUBLES

Les formules

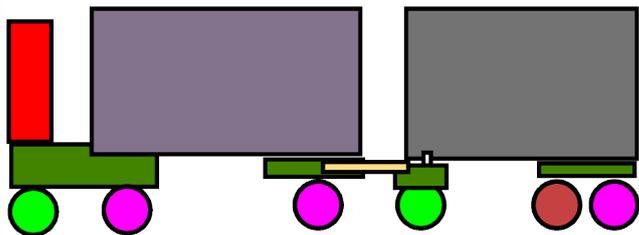
### A LE PMA

Le PMA est le + petit résultat des calculs suivants :

- a- PTRA du TRR
- b-  $PV(TRR) + PTAC(S/REM) + PV(DOLLY) + PTAC(S/REM)$

### B LA CU

$CU = PMA - PV(s)$  Tous les Poids à vide même le dolly



TRR	S/REM	DOLLY	S/REM
PV : 6T	PV : 4T	PV : 1T	PV : 4T
PTRA 40T	PTAC 15T	-----	PTAC 25T

<p>a- 40T  b- <math>47T = 6 + 15 + 1 + 25</math>  PMA 40T  <math>CU = 40 - (6+4+1+4) = 25T</math></p>	<p>Ne pas oublier de compter le dolly dans les calculs !!!</p>
---	--

Les temps à respecter :

- La conduite continue
- La conduite journalière
- La conduite hebdomadaire
- La conduite par quinzaine

**La conduite continue :**

Il s'agit du temps maximum pendant lequel il est possible de conduire sans une pause minimum obligatoire.

**QUESTION:**

**Combien de temps peut-on rouler sans prendre une pause avant d'être en infraction ?**

Réponse : **4h30**

**QUESTION:**

**Quel doit être la durée de cette pause après 4h30 de conduite ?**

Réponse : **45 minutes**

Evidemment vous n'êtes pas dans l'obligation d'attendre d'avoir effectué **4h30 de conduite continue** pour prendre votre première pause car vous avez aussi la possibilité de fractionner les pauses en 2 temps cependant dans un ordre bien précis:

- **La première pause** doit être au minimum de **15 minutes**
- **La seconde pause** doit être au minimum de **30 minutes**

**La conduite journalière :**

Il s'agit de la durée du temps de conduite maximum qu'il est possible de conduire dans une journée de travail.

Cette journée débute à partir du moment où l'on met sa carte ou son disque dans le chronotachygraphe sur travail ou mise à disposition et jusqu'au moment où l'on se met en repos journalier ou hebdomadaire.

*\*\* Notez cependant qu'une journée de travail varie en fonction de l'amplitude et du temps de service qui diffèrent selon que l'on travaille de jour ou de nuit.*

**QUESTION:**

**Quel est la durée de conduite maximale journalière autorisée ?**

Réponse : **9h ou 10h** (mais pas plus de 2 fois dans la même semaine)

**La conduite hebdomadaire :**

Il s'agit de la durée totale de conduite autorisée sur une période d'une semaine en prenant en compte la possibilité de conduire 2 fois 10h au plus et 4 fois 9h.

*\*\* Notez la semaine commence le Lundi à 0h00 et se termine le Dimanche à 24h00*

**QUESTION:**

**Quel est la durée de conduite hebdomadaire maximale possible ?**

Réponse : **56h**

*\*\* Notez cependant que la durée de travail hebdomadaire autorisée est de 60h mais qu'il est cependant important de ne prendre en compte l'interdiction du dépassement des 48h par semaine sur 4 mois.*

**La conduite par quinzaine :**

Il s'agit de la durée de conduite maximale autorisée sur une période de 15 jours soit 2 semaines consécutives.

**QUESTION:**

**Quel est la durée de conduite maximale possible sur 2 semaines ?**

Réponse : **90h**

Par exemple :

Si j'ai conduit 4 x 9h et 2 x 10h soit 56 h la première semaine il ne sera pas alors possible de

conduire plus de  $90h - 56h = 34h$  la semaine suivante que l'on peut répartir ainsi  $2 \times 10h + 2 \times 7h = 34h$  et ainsi de suite le temps de conduite varie selon le temps de conduite effectués la première semaine .

Quand il n'y a que 2 essieux (genre voiture), la démarche est simple.

La somme des moments étant nulle :

$$F_a.L_a + F_b.L_b = \text{Somme des masses} \cdot L_i$$

$F_a$ : poids sur essieu avant

$F_b$ : poids sur essieu arrière

$L_i$ : distance par rapport au point de référence.

En prenant l'essieu avant comme point de référence :

$$F_b.L_b = \text{Somme des masses} \cdot L_i \quad (L_i = \text{distance avec l'essieu avant})$$

$$F_b = \text{Somme des masses} \cdot L_i / L_b$$

$$F_a = \text{Somme des masses} - F_b$$

1° Véhicules autres que les véhicules de transport en commun de personnes de faible capacité :

Pour ces véhicules, le nombre total de places  $N$  doit être inférieur ou égal au nombre  $N_1$  suivant :

$$a) N_1 = P_t - (P_v + M) / P$$

où :

$P_t$  est le poids total autorisé en charge du véhicule ;

$P_v$  est le poids à vide en ordre de marche du véhicule, augmenté de 70 kg pour le poids du conducteur ;

$M$  est le poids des marchandises transportables.

Ce poids doit être au moins égal à la somme des poids  $B + B_X$  définis à l'article 4 ;

$P$  est le poids forfaitaire, attribué à chaque personne transportée et à ses bagages à main ; pour les autobus,  $P = 65$  kg, pour les autocars,  $P = 70$  kg.

Tous ces poids sont exprimés en kilogrammes.

Par ailleurs, il doit être prévu un nombre  $A$  de places assises conformes aux prescriptions de l'article 32, au moins égal au nombre de mètres carrés de surface  $S_0$  arrondi à l'unité la plus proche.

En outre, pour ces mêmes véhicules, le nombre total de places  $N$  doit être inférieur ou égal aux quatre nombres suivants :

$$b) N_2 = A + S_1 (m^2) / s$$

où  $s$ , place nécessaire par passager debout, sera prise égale à 0,125 m<sup>2</sup> pour les autobus et à 0,15 m<sup>2</sup> pour les autocars pouvant transporter des passagers debout.

c) N<sub>3</sub>, nombre déterminé par la condition que, toutes les places assises étant supposées occupées, le poids des éventuels passagers debout étant supposé uniformément réparti sur la surface S<sub>1</sub>, les soutes à bagages et, le cas échéant, la surface du toit équipée pour le transport de bagages étant affectés en leurs centres de gravité des poids forfaitaires minimaux B et BX définis à l'article 4, la charge sous chaque essieu ne dépasse pas celle qui a été autorisée lors de la réception du véhicule ou du châssis correspondant, et que son poids total n'excède pas son poids total autorisé en charge.

d) N<sub>4</sub> = A + m, étant ainsi défini ;

Chaque passager debout doit disposer de mains courantes, barres ou poignées, en nombre suffisant pour s'y maintenir durant la circulation du véhicule. Le nombre m de ces aménagements représente la somme du nombre de poignées ou des dispositifs équivalents tels que définis à l'article 35, chaque barre verticale et chaque mètre de barre horizontale équivalent à cinq poignées.

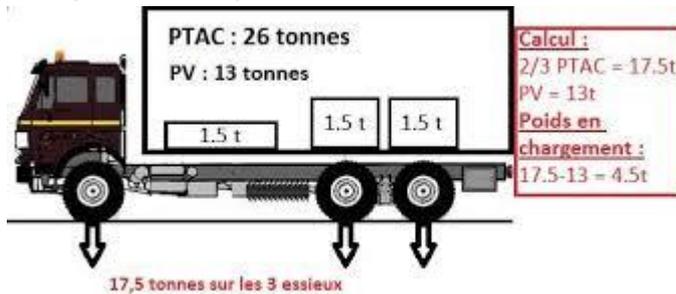
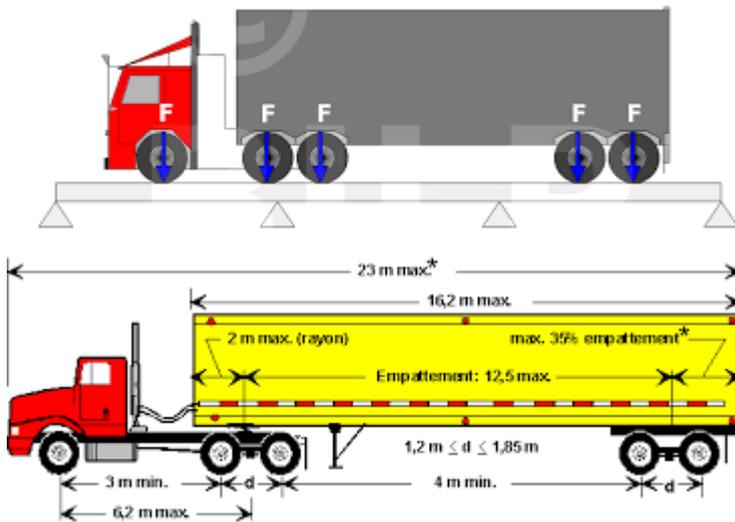
e) Dans le cas des autocars ;

$$N_5 = 3/2 A$$

2° Véhicules de transport en commun de personnes de faible capacité :

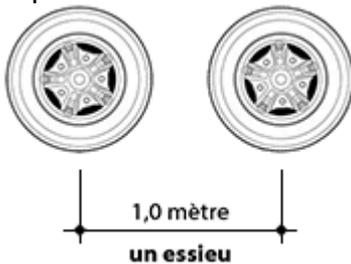
Le nombre total de places de ces véhicules doit être inférieur ou égal aux nombres N<sub>1</sub> et N<sub>3</sub> définis ci-dessus.

Par ailleurs, les autobus de faible capacité peuvent comporter un nombre de places debout déterminé comme prévu au paragraphe 1° ci-dessus et tel que le nombre total de places soit inférieur ou égal aux nombres N<sub>2</sub> et N<sub>4</sub> définis ci-dessus.

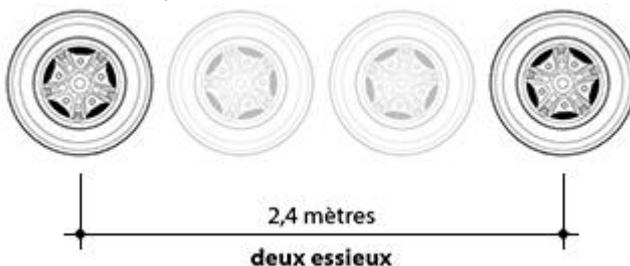


### Pour un camion et une remorque à roues simples

Si la remorque a 2 essieux ou plus, vous devez compter un seul essieu quand la distance qui sépare le centre des essieux qui se trouvent aux extrémités est de moins de 1 m.



Si la remorque a 3 essieux, vous devez compter seulement 2 essieux quand la distance qui sépare le centre des essieux qui se trouvent aux extrémités a un minimum de 1 m et qu'elle est inférieure à 2,4 m.



VÉHICULES POUR LESQUELS ON NE COMPTE PAS LES ESSIEUX

- Une remorque ou une semi-remorque dont l'espace de chargement a une longueur de moins de 4 m
- Une **remorque**[Cliquer pour ouvrir la boîte d'information supplémentaire](#) qui transporte exclusivement un véhicule routier autorisé à circuler sur un chemin public (comme une roulotte de chantier), à l'exception d'un véhicule remisé, mis au rancart ou immatriculé avec une plaque V
- Un fardier qui transporte des **véhicules-outils**[Cliquer pour ouvrir la boîte d'information supplémentaire](#) immatriculés avec une plaque F ou qui transporte un **tracteur de ferme**[Cliquer pour ouvrir la boîte d'information supplémentaire](#) ayant une plaque C
- Une remorque-outil (comme un compresseur, une déchiqueteuse ou une remorque de chantier) qui ne sert qu'à transporter l'équipement, l'outillage ou l'ameublement dont elle est équipée
- Une remorque utilisée à des fins personnelles par un particulier
- Une roulotte de camping ou une tente-roulotte

Contrairement à une idée répandue, ce n'est pas l'apparition de la locomotive qui fût à l'origine du chemin de fer. Les premiers wagons sont apparus bien avant 1825, alors que certaines mines au XVIIIème siècle - et peut être même avant - possédaient des chemins dotés de deux caniveaux en bois, puis en fonte, pour faire rouler des wagonnets à l'origine poussés par l'homme, puis tirés par des chevaux. Cependant, un cheval tirant des wagonnets ne fait pas un train. Il va falloir attendre 1825 pour obtenir le premier vrai train tracté au monde, sur la ligne anglaise de Stockton à Darlington