

Visa du chef de département des  
Sciences et de la Technologie  
Signature:.....  
Date :.....

# ÉTUDE D'UNE INSTALLATION ÉNERGÉTIQUE D'UNE LOCOMOTIVE DE 2500KW DE PUISSANCE

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de master académique en «Installations Energétiques»

Encadreur: ZEBBAR Djallel,  
Professeur  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par : KERRACHE Zakaria  
Signature: .....  
Date: .....

Membres du jury

BENLAFKI Abdelkrim	MCB	(Président)
BENLEKKAM Mohamed	MAA	(Examineur)
ZEBBAR Djallel	Pr	(Encadreur)

## **DEDICACE**

*Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai achevé ce modeste travail que je dédie :*

*à mes très chers parents,*

*à mes frères,*

*à tous mes amis*

*et enfin à mes collègues de la promotion de génie mécanique.*

## REMERCIEMENTS

*Je remercie en premier lieu Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur ZEBBAR Djallel professeur au centre universitaire de Tissemsilt, pour avoir dirigé ce mémoire, pour son suivi permanent, ses lectures attentives, ses conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de ce travail.*

*Aux membres de jury mes plus vifs remerciements d'avoir accepté examiner mon travail.*

*Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à mes enseignants de centre universitaire de Tissemsilt.*

*En fin, je tiens à remercier tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail*

Sommaire	
DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS .....	3
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux .....	9
Introduction générale.....	12
<b>Chapitre 1 Introductio au génie ferroviaire .....</b>	<b>13</b>
Introduction au génie ferroviaire .....	13
Introduction .....	14
1.1 Origines et développement du chemin de fer .....	14
1.2 Le système ferroviaire .....	16
1.2.1 Le matériel roulant .....	16
1.3 Les types de wagon .....	17
1.4 Le matériel roulant moteur .....	18
1.4.1 Classification selon la source d'énergie .....	18
a) Fonctionnement du moteur électrique de la traction électrique .....	18
b) Présentation du fonctionnement du moteur à courant continu.....	19
c) Les éléments d'un moteur électrique.....	19
d) Présentation du fonctionnement du moteur à courant alternatif .....	21
a) Transmission mécanique .....	24
b) Transmission hydraulique .....	25
c) Transmission électrique.....	26
1.4.2 Classification selon le type d'utilisation .....	27
1.5 Classification selon la disposition des essieux .....	27
1.6 Les systèmes de notation des locomotives .....	28
1.6.1 Système de notation Whyte .....	28
1.6.2 Le système de notation de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) .....	29
1.6.3 Système AAR .....	31
Conclusion.....	32
Chapitre 2 L'analyse morphologique et choix de type d'istallation énergétique.....	33
Introduction .....	34
2.1 Aperçu sur l'analyse morphologique .....	34
2.1.1 Phase 1 : la construction de l'espace morphologique .....	36
2.1.2 Phase 2: la réduction de l'espace morphologique .....	36
2.2 Construction de la matrice morphologique .....	37

2.2.1	Le choix du type de traction .....	38
2.2.2	La locomotive à traction électrique .....	40
a)	Les avantages de la locomotive électrique .....	40
b)	Les inconvénients de la locomotive électrique .....	41
2.2.3	La locomotive diesel .....	41
a)	Les avantages de la locomotive diesel sont .....	42
b)	Les inconvénients de la locomotive diesel .....	42
2.2.4	Le rendement et les pertes .....	42
2.3	Aperçu sur le freinage .....	43
2.3.1	Freinage utilisant l'adhérence .....	43
2.3.2	Freinage indépendant de l'adhérence .....	44
2.4	Mise en œuvre du freinage électrique .....	46
2.4.1	Freinage électropneumatique .....	46
2.5	Schéma de l'installation énergétique retenue .....	47
Conclusion .....		48
Chapitre 3 Dimensionnement de l'installation énergétique de la locomotive de 2500kW .....		49
Introduction .....		50
3.1	Aperçu sur les résistances au mouvement du train .....	50
3.1.1	Résistance due aux frottements .....	50
3.1.2	Résistances au roulement : observée dans le contact roue-rail .....	50
3.1.3	Résistance due à l'action des ondulations .....	51
3.1.4	Résistance due au gradient (rampe) .....	51
3.1.5	Résistance due à la courbure de la voie .....	52
3.2	Adhérence roue/rail utilisable en traction .....	53
3.3	L'effort de traction d'une locomotive .....	54
3.3.1	Limite de résistance des attelages .....	55
3.4	Calcul des différentes résistances au roulement .....	55
3.4.1	Les efforts résistants .....	55
3.4.2	Résistance à l'avancement du matériel moteur .....	56
3.4.3	Résistance à l'avancement du matériel remorqué .....	56
3.4.4	Résistance due au profil de la voie : .....	57
3.4.5	Résistance due à l'inertie .....	58
3.5	Résultats et discussions .....	58
Conclusion .....		61
Conclusion générale .....		62
Bibliographie .....		64
Résumé .....		66



## Liste des figures

Fig. 1 – Représentation du système roue-rail.....	16
Fig. 2– Composition d’un wagon .....	17
Fig. 3 – Locomotive à traction électrique.....	19
Fig. 4– Courant électrique de moteur .....	19
Fig. 5– Structure d'un stator vu en coupe transversale .....	20
Fig. 6 – Représentation de l’induit .....	20
Fig. 7– Représentation du collecteur .....	20
Fig. 8–Représentation des charbons .....	21
Fig. 9– Les actions des pôles magnétiques .....	21
Fig. 10– Représentation demi-tour de genre un courant alternatif .....	22
Fig. 11– Constitution d’un moteur électrique à courant continu .....	22
Fig. 12– Schéma de principe d’une locomotive à traction autonome .....	23
Fig. 13– Salle des machines d’une locomotive diesel-électrique .....	24
Fig. 14– Schéma de principe d’une Transmission mécanique .....	24
Fig. 15– Schéma de principe d’un convertisseur hydraulique .....	25
Fig. 16– Schéma de principe d’une transmission hydraulique .....	25
Fig. 17– Composition d'un convertisseur de couple hydraulique .....	26
Fig. 18– Schéma de principe d’une transmission électrique .....	26
Fig. 19– Schéma de principe d’un bogie .....	28
Fig. 20– Notation des essieux selon le système whyte.....	29
Fig. 21–Principales disposition des essieux moteurs .....	31
Fig. 22– Principe de l’analyse morphologique (La matrice morphologique) .....	35
Fig. 23 – Activités formant la phase de définition d’architecture organique .....	35
Fig. 24– Moteur de traction semi-suspendu .....	39
Fig. 25– Moteurs entièrement suspendus sur bogie à roues indépendantes .....	40
Fig. 26– Alimentation des auxiliaires .....	41
Fig. 27 – Synoptique des pertes de deux chaînes de traction : a) électrique b) diesel-électrique ...	43
Fig. 28–Courbe d’adhérence utilisable en traction et en freinage .....	43
Fig. 29– Principe du freinage rhéostatique .....	44
Fig. 30–Caractéristiques effort-vitesse en freinage électrique .....	45
Fig. 31–Freinage par courants de Foucault. Principe et disposition sur bogie .....	46
Fig. 32–Schéma de principe du frein électropneumatique .....	47
Fig. 33 – Schéma de l’installation énergétique retenue.....	47
Fig. 34 Résistance due au gradient.....	51
Fig. 35 Résistance due à la courbure .....	52

Fig. 36– Effort de traction ou de freinage, réaction du rail et force verticale .....	53
Fig. 37– Le coefficient adhérence .....	54
Fig. 38– l'effort permettant l'accélération du train .....	54
Fig. 39– Les légendes pour le calcul du coefficient aérodynamique .....	56
Fig. 40– Représentation de l'effort exercé par le poids.....	57
Fig. 41– Construction de la courbe caractéristique de la locomotive de configuration BoBo.....	60
Fig. 42– Construction de la courbe caractéristique de la locomotive de configuration CoCo.....	60



## Liste des tableaux

Tableau 1– Explications de la disposition des essieux selon le système de l’UIC .....	30
Tableau 2 – Principe de notation des locomotives .....	31
Tableau 3– Matrice morphologique .....	38
Tableau 4 : Formules pour le calcul de résistance à l’avancement du matériel roulant .....	56
Tableau 5 : Résistance supplémentaire au « décollage » d’un train .....	58
Tableau 6 – Récapitulatif des résultats .....	61

## Nomenclature

### Les abréviations

DC	
Hz	Fréquence en Hertz
UIC	Union Internationale des chemins de fer
AAR	Association of Americans Railroads
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
SNCB	Société Nationale des Chemins de fer Belges
EMD	Electro-Motive Diesel
TGV	Train à Grande Vitesse
RL	Résistance à l'avancement du matériel moteur
kW	kilowatt
Km/h	Kilomètre sur l'horloge

### Symboles

f	Fréquence (Hz)
T	La période (s)
R <sub>1</sub>	Résistance de Frottement (kN)
W	Le poids du train (t)
V	Vitesse du train (km / h)
R <sub>2</sub>	Résistance due à l'action des vagues (kN)
N	Pression normale N sur le rail
R <sub>4</sub>	Résistance due au gradient ascendant (kN)
F	Force de frottement glissante (kN)
G	Jauge de voie
r	Rayon moyen de la courbe (m)
C	Constante
R	Effort tangentiel à la jante la charge de la roue (kN)
Q	La charge de la roue (t)
μ	Adhérence roue
S	La surface du maître-couple ( $m^2$ )
K <sub>1</sub>	Paramètre de forme (avant et arrière)
K <sub>2</sub>	Paramètre d'état de surface " mouillée "
Ψ	Périmètre transversale partiel de rail à rail
l	Longueur de la rame (m)
Δl	Longueur fictive équivalente à une césure entre éléments
n	Nombre d'éléments automoteurs
N <sub>p</sub>	Nombre de pantographes en service.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

L'industrie ferroviaire n'est pas restée à l'écart de la prouesse scientifique et technologique que connaît un bon nombre de domaines. Au contraire, les technologies ferroviaires sont à l'avant-garde. Le transport ferroviaire est un mode prédominant dans beaucoup de pays. En Algérie, il commence à se faire une place doucement grâce aux efforts consentis ces dix dernières années par l'Etat algérienne. Il joue un rôle important dans le transport des marchandises comme les carburants, les céréales, les produits industriels finis et semi-fini, les minerais et bien d'autres. L'instauration d'une industrie ferroviaire ou une industrie de traction ferroviaire devra être une priorité en Algérie. De ce fait, d'avantage d'efforts devront être consentis par la communauté scientifique algérienne.

Dans ce contexte, le présent travail qui se veut modeste vient combler et consolider les aspirations susmentionnées. Il est consacré à l'étude et au dimensionnement d'une installation énergétique d'une locomotive de 2500 kW de puissance.

Le mémoire est composé d'une introduction générale, trois chapitres et d'une conclusion générale. Dans le premier chapitre sont exposés d'une façon claire et concise l'origine des chemins de fer, leur développement et leur importance. Cette première partie a été suivie par un aperçu sur le système ferroviaire, sa classification et sa notation un peu partout dans le monde.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse morphologique de l'installation énergétique de la locomotive objet du présent mémoire. Un exposé détaillé sur le contenu de cette méthode est suivi par la construction de l'espace morphologique et l'établissement du schéma de l'installation énergétique de la locomotive étudiée.

Au chapitre suivant, un exposé détaillé est présenté sur le calcul de l'effort de traction, des vitesses maximales et du tracé de la courbe d'équipuissance pour deux configurations d'essieux moteurs.

Enfin, les conclusions et les recommandations les plus importantes sont rapportées dans le dernier volet du mémoire dédié à la conclusion générale.

## **Chapitre 1**

# **Introduction au génie ferroviaire**

## Introduction

Dans ce premier chapitre sont exposés d'une façon claire et concise l'origine des chemins de fer, leur développement et leur importance. Suivi par un aperçu sur le système ferroviaire, sa classification et sa notation un peu partout dans le monde.

### 1.1 Origines et développement du chemin de fer

L'idée de l'utilisation de chemin guidé remonte à plus de 2000 ans. Les anciennes civilisations avaient réalisées que les chariots sur roues roulent mieux sur des rainures gravées sur les blocs de pierres et nécessitent moins d'entretien. Dans des mines surmontant aux époques grecque et romaine, il s'y avérait que des animaux tractaient des charges sur des rainures gravées sur des blocs de pierre.

Les chemins de fer ont commencé à réapparaître en Europe après le Moyen Age. La plus ancienne trace de rails connue remonte à 1350. Il s'agit d'un vitrail dans le monastère de Fribourg im Breisgau datant d'environ 1350.

En 1515, le cardinal Matthäus Lang avait rapporté une description du Reisszug, un funiculaire au château de Hohensalzburg en Autriche. On pense qu'il remonte à 1495 ou 1504. La ligne a été exploitée par l'énergie humaine ou animale renfermait des rails en bois et une corde de transport en chanvre. Cette ligne existe encore, bien que restaurée, et c'est probablement le chemin de fer le plus ancien encore exploitable.

Il est évident que le chemin de fer est un système de transport guidé dont l'existence précède largement l'invention de la vapeur. Selon Chappas [1] les diligences ou wagonnets miniers, sur voies en bois puis en fer, étaient tractés par des chevaux ou poussés par l'homme. La lente maturité du chemin de fer a été précédée par les stations chronologiques suivantes et rapportées par Chappas dans [1], Tzanakakis dans [2] et Chandra dans [3] :

Le premier véritable chemin de fer est supposé être le funiculaire fabriqué à Broseley au Shropshire bien avant 1605. Il était exploité par James Clifford pour le transport de charbon de ses mines jusqu'à la rivière Severn pour être chargé sur des barges et transportés vers les villes riveraines. Il est supposé que sa construction a probablement précédé la voie Wollaton Wagon, terminée en 1604 et considérée jusqu'alors comme la première installation britannique.

1738 a vu apparaître la protection des rails en bois contre l'usure prématurée par la pose de plaques en fonte ou en acier forgé par les charbonniers anglais de Whitehaven. La couverture des rails en bois par du métal avait permis de réduire l'usure de ces derniers. Cette innovation avait évolué par la suite pour devenir des rails de fer permettant l'utilisation de roues menues de boudin de guidage.

Le mise en place des voitures à cheval sur des rails a permis de déplacer deux fois plus de personnes, et de même la naissance des chemins de fer de rue.

Jusqu'à 1765, avènement de la toute première machine à vapeur inventé et réalisé par James WATT. Cependant, le premier modèle de locomotive à vapeur opérationnel a été conçu et construit par John Fitch aux États-Unis qu'en 1794. Cet événement a été suivi par la construction en 1804 par Richard Trevithick de la première locomotive au monde. Elle avait une masse de 15 tonnes et pouvait remorquer un train de 10 wagons chargés de 10 tonnes de fer avec 70 hommes sur 15 km entre les forges de Clamorganshite et Abercynon au Pays de Galles.

L'électricité toute récente part à la conquête du rail en 1879 grâce au petit train électrique de SIEMENS et HALSKE présenté à l'exposition industrielle de Berlin, suivi dès 1881, par la mise en service du premier tramway électrique dans la même ville.

En janvier 1888, la ville de Richmond en Virginie était devenue une plateforme d'essais avérée pour les chemins de fer électriques et ce grâce à la première ligne de tramway électrifiée construite par Frank Sprague.

La réponse de l'électricité un peu partout dans le monde à partir de 1890, avait permis de construire de vastes réseaux de chemins de fer souterrains dans plusieurs métropoles comme Londres, New York et Moscou. Une fois, la propulsion électrique est devenue pratique, la plupart des chemins de fer ont été électrifiés. Ceux-ci sont connus à nos jours sous les différentes appellations comme «tramways», «trams» et «Straßenbahn». On les retrouve un peu partout dans le monde y compris en Algérie.

1904-1905 : premiers essais en Suisse d'une locomotive alimentée sous tension 15 kV et fréquence 16,7 Hz sur la ligne Seebach-Wettingen, par BEHN-ESCHENBOURG et HUBERSTOCKAR, Directeur des Ateliers de Construction d'OERLIKON. L'apparition du moteur à combustion interne en traction date de 1912, grâce à la Société suisse SULZER. Première locomotive de 1200 ch équipée grâce à l'invention, 16 ans plus tôt, de l'allemand Rudolph DIESEL.

Les locomotives diesel-électriques peuvent être décrites comme des locomotives électriques avec un générateur intégré entraîné par un moteur diesel. Les premières locomotives diesel étaient des machines à faible puissance de type diesel-mécanique utilisées dans les chantiers. Les locomotives diesel et électriques sont plus propres, plus efficaces et nécessitent moins d'entretien que les locomotives à vapeur. Ils ont également besoin de compétences moins spécialisées pour leur exploitation.

Les locomotives diesel sont devenues importantes après la Seconde Guerre mondiale. Au cours des années 1970, le diesel et l'énergie électrique avaient remplacé la puissance de la vapeur sur la plupart des chemins de fer du monde.

L'année 1964 a vu l'émergence d'une nouvelle ère suite à l'inauguration de la première ligne Tokyo - Osaka. Il s'agit de la première ligne ferroviaire de transport à grande vitesse, fonctionnant à des vitesses supérieures à 300 km / h. La construction de plusieurs de ces lignes a entraîné la baisse spectaculaire des vols à courte distance et du trafic automobile entre les villes liées, comme le corridor Boston-New York-Washington, DC, Londres-Paris-Bruxelles, Madrid-Barcelone, Moscou-Saint Petersburg et autant d'autres.

En outre, avec la menace constante du réchauffement climatique et des pénuries d'énergie, le train à grande vitesse est censé tenir la clé de l'avenir des transports dans de nombreux pays développés dans le monde.

## 1.2 Le système ferroviaire

À la base du système ferroviaire est la technologie de roulement et de guidage roue – rail représenté sur la Fig.1 rapportée dans [1].

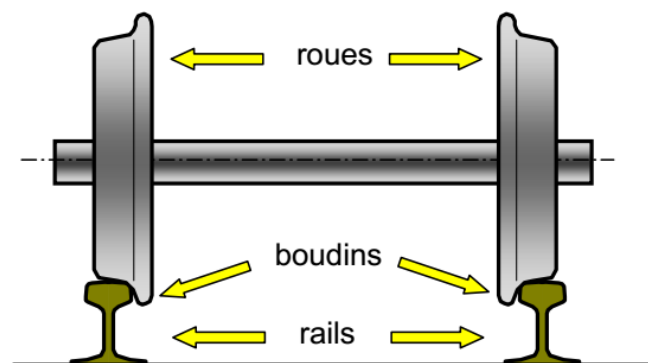


Fig. 1 – Représentation du système roue-rail. [1]

Comme tout système, il se décline en plusieurs composantes[1 et 3]:

### 1.2.1 Le matériel roulant

composé de l'ensemble des véhicules, moteurs ou remorqués, conçus pour se déplacer sur une voie ferrée. Le matériel remorqué est utilisé pour le transport des Clients (Passagers et Fret). Le matériel moteur nécessaire à la traction des charges remorquées et peut être sur roue "wheeled" comme il peut l'être avec lévitation magnétique.

Le matériel remorqué fait référence, le plus souvent aux "véhicules" ou "cars" aux Etats Unis et wagons dans le reste du monde. Les wagons sont utilisés pour le transport des différentes marchandises [3] . Leurs désigne varie en fonction du type de marchandise transportée, de la composition du train et de la voie ferrée empruntée. Il comprend les composants suivants :

- structure;
- Le châssis;



- Les bogies. Un châssis à deux ou parfois trois essieux portant l'extrémité d'un véhicule ferroviaire et relié au châssis principal par une articulation à pivot;
- Les essieux ;
- Les éléments de suspension);
- Les accouplements; mécanisme d'attelage;
- Les freins.

Ces composants sont représentés sur la Fig2. Le matériel roulant motorisé peut aussi utiliser la lévitation magnétique.

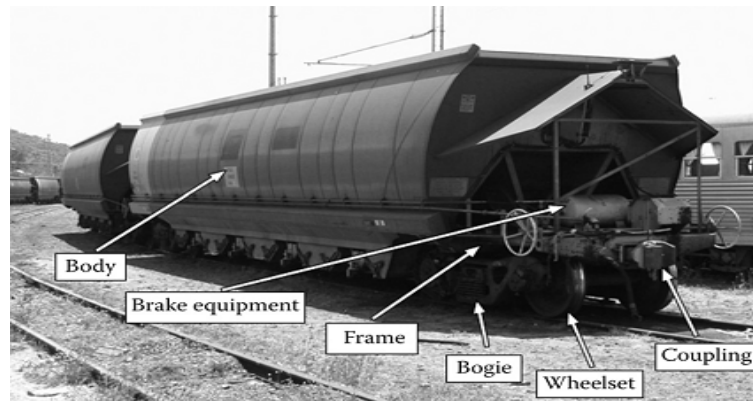


Fig. 2– Composition d'un wagon [3]

#### **Une infrastructure ferroviaire constituée par :**

- la plate-forme : terrain sur lequel elle est construite,
- les voies ferrées sur lesquelles circule le matériel roulant,
- les ouvrages d'art pour le franchissement des obstacles naturels : ponts, viaducs, tunnels, tranchées, remblais, déblais
- et enfin les terminaux et gares permettant l'accès et le transit des Clients.

### **1.3 Les types de wagon**

Les wagons peuvent être classés suivant la marchandise qu'ils sont destinés à transporter. Dans ce contexte, on en distingue deux catégories de wagon : wagons de passager et d'autres pour le fret.

Les wagons de fret ou de marchandises comprennent une grande variété de types de wagons et de modèles qui sont généralement nommés d'après la cargaison ou les marchandises qu'ils sont conçus pour transporter. Les wagons de marchandises comprennent des wagons lourds qui transportent du matériel en vrac et des wagons de marchandises «mixtes» qui peuvent transporter une variété de marchandises à commencer par les matériaux de construction jusqu'au liquide [3].

## 1.4 Le matériel roulant moteur

La force de traction dans un matériel roulant sur roues est destinée à remorquer la rame ou le train au moyen d'une locomotive. Ceci est possible grâce aux frottements roue-rail.

Dans le matériel roulant utilisant la lévitation magnétique, l'effort de traction est créé par la force de propulsion magnétique

Le matériel roulant moteur peut être classé selon les deux approches suivantes:

### 1.4.1 Classification selon la source d'énergie

Dans ce cas on en distingue deux groupes de matériel roulant : autonome et non autonome.

#### 1.4.1.1 Le matériel roulant moteur non autonome

Le matériel roulant est généralement alimenté avec de l'énergie provenant d'une source se trouvant à l'extérieur du véhicule propulsé. Les locomotives électriques et les trains électriques sont un bon exemple de matériel roulant non autonome.

Dans ce type de matériel roulant il est possible de mettre en œuvre des puissances relativement élevées. Son effet sur l'environnement est relativement bas avec une utilisation plus efficace de l'énergie et la récupération de l'énergie du freinage.

##### 1.4.1.1.1 Description de 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.

**a) Fonctionnement du moteur électrique de la traction électrique.** Des roues en acier, qui tournent grâce à un moteur électrique permettent au train d'avancer sur des rails qui sont également en acier. Son alimentation se fait à l'aide de pantographes qui frottent contre les lignes électriques aériennes (nommées caténaires) situées au-dessus de la locomotive. Un train moderne est constitué d'une caisse principale reposant sur des bogies moteurs dont les essieux sont reliés aux moteurs électriques par une transmission élastique, ce qui permet un jeu des ressorts de suspension (Fig3). Le châssis est suspendu, comme les moteurs qui y sont accrochés. Un bogie est un chariot possédant deux ou trois essieux ayant les roues orientées par les rails et sur lequel est articulé un châssis. Le courant fait un circuit, il circule dans la caténaire puis dans le pantographe pour passer de la sous-station à la locomotive. Le courant est capté par l'intermédiaire du pantographe, fixé sur la toiture du train. La caténaire est alimentée par la sous-station équipée pour la traction à courant continu de transformateurs et de redresseurs et pour la traction à courant alternatif, de transformateurs uniquement [5]

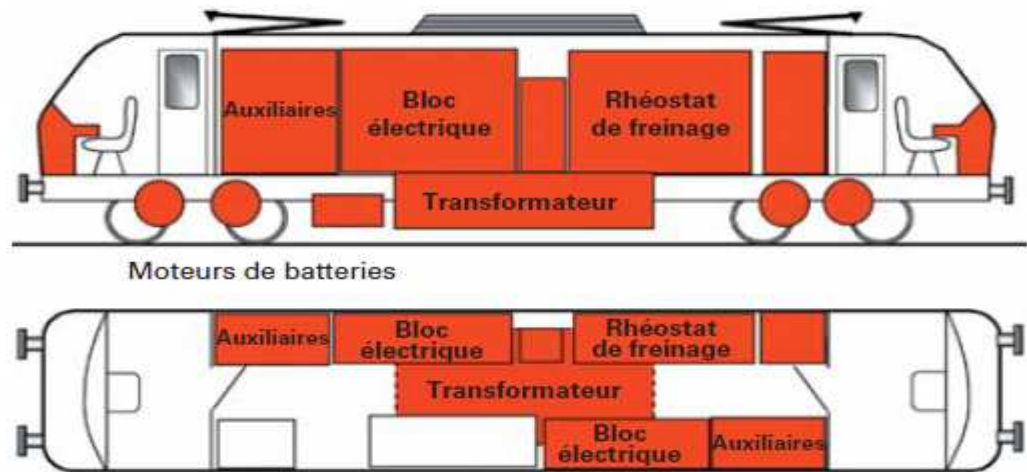


Fig. 3 – Locomotive à traction électrique [4]

Un moteur électrique est un assemblage permettant de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.

Pour que les trains fonctionnent, ils peuvent bénéficier soit d'un moteur à courant continu soit d'un moteur à courant alternatif.

#### b) Présentation du fonctionnement du moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est souvent utilisé en automatisme. Son alimentation se fait à l'aide d'une tension continue (Fig4).

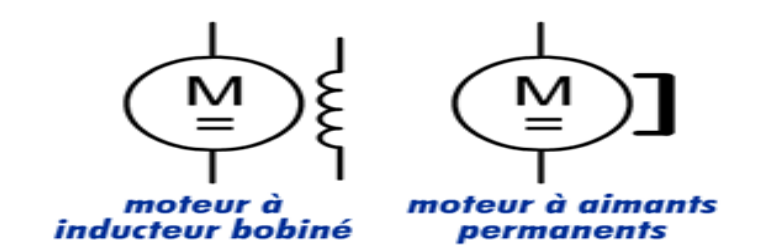


Fig. 4– Courant électrique de moteur[5]

#### c) Les éléments d'un moteur électrique

Un moteur électrique à courant continu est composé de plusieurs éléments :

- **Un inducteur** nommé aussi stator qui est un élément fixe du moteur. Il est constitué d'aimants permanents ou de fil de cuivre embobiné autour d'une partie fixe du stator. Il est situé autour du rotor et crée un champ magnétique qui le parcourt, on le nomme statorique. Il existe deux façons de générer ce champ : par inducteur ou grâce à des aimants permanents.

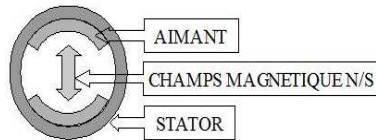


Fig. 5– Structure d'un stator vu en coupe transversale[5]

-Un **induit** nommé aussi rotor qui a l'inverse du stator est un élément mobile étant donné qu'il tourne dans celui-ci. Un rotor cylindrique est constitué d'un électro-aimant et de tôles isolées les unes des autres, dotées d'encoches dans lesquelles sont disposés des conducteurs. Plusieurs bobines ayant un fil enveloppé d'une couche isolante ainsi que des connecteurs composent un rotor. Le rotor est rattaché à l'axe central du moteur. Lorsque les connecteurs sont traversés par du courant ils génèrent un champ magnétique dit rotorique. Une vue en coupe d'un moteur électrique est présentée sur la Fig6.

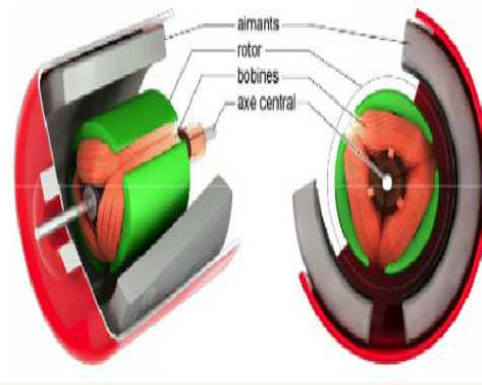


Fig. 6 – Représentation de l'induit [5]

-Un **collecteur** qui est accroché de façon stable à l'induit, les charbons sont en contact avec lui.

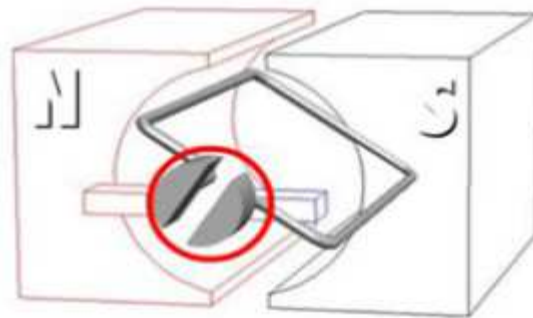


Fig. 7– Représentation du collecteur[5]

-**Des charbons** : sont aussi appelés balais, ils frottent le collecteur permettant ainsi l'alimentation de l'induit.(Fig8)

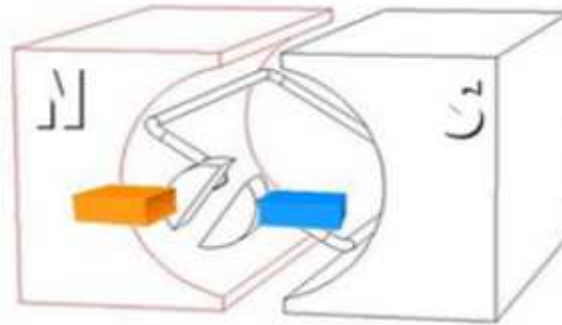


Fig. 8–Représentation des charbons[5 ]

#### d) Présentation du fonctionnement du moteur à courant alternatif

Le courant électrique alternatif est contradictoire par rapport au courant continu. Ce sont les électrons qui changent le chemin. « Si le sens du courant change à intervalles réguliers, on parle de courant alternatif périodique ou sinusoïdale. On mesure cette fréquence en hertz (Hz). Les hertz représentent le nombre d'allers-retours que réalise le courant électrique durant une seconde ». Dans le courant alternatif, les électrons se déplacent de façon alternative du pôle négatif au pôle positif et vice versa. Ce mouvement est permis grâce au cycle d'un alternateur. Les électrons ne se déplacent que de quelques millièmes de millimètre. On sait que deux aimants se repoussent si les mêmes pôles sont en contact (c'est-à-dire Nord/Nord ou Sud/Sud). Par contre deux aimants s'attirent si les pôles différents sont en contact (Nord/Sud ou Sud/Nord) (Fig9)

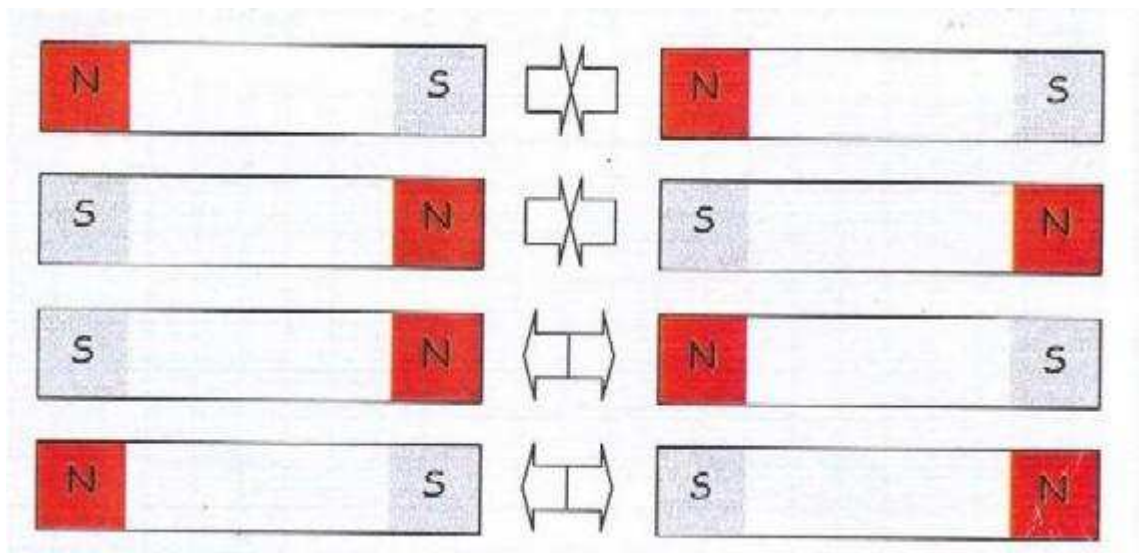


Fig. 9– Les actions des pôles magnétiques[5]

L'aimant qui est en action et qui tourne crée un champ magnétique. La rotation de l'alternateur crée ce courant. Ce dernier peut-être assimilé à une bobine de fil conducteur qui tourne dans un champ magnétique. Dans cette bobine, le cycle provoque un courant alternatif : les électrons bougent (ils vont de droite à gauche et inversement). La fréquence change par rapport à la vitesse de la rotation de la bobine (par exemple, « une bobine tournant à 50 tours par seconde

génère un courant alternatif de 50 hertz (Hz) »). Ce courant est utilisé pour réduire les pertes d'électricité.

« La vitesse mécanique du rotor est liée à la fréquence des courants au stator ».

Pour calculer la fréquence, il faut utiliser la formule  $f=1/T$ , où  $f$  est la fréquence en Hertz (Hz) et  $T$  est la période en seconde (s).

Ce courant autorise le changement de sens de l'électricité dans l'induit pour chaque demi-tour (Fig10). C'est donc pour cela que le rotor continue à tourner dans le même sens que le début. C'est le même cas dans un moteur à courant continu. Le changement du courant se fait aussi bien dans l'induit que dans l'inducteur.

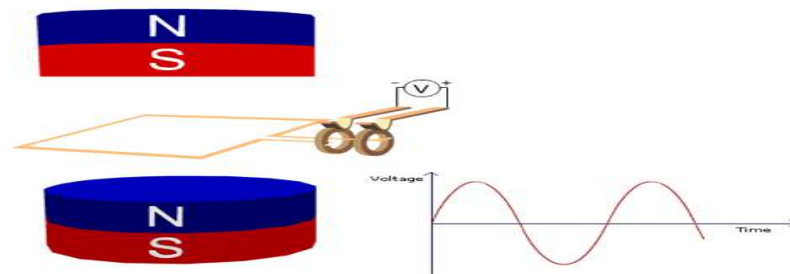


Fig. 10–Représentation demi-tour de génère un courant alternatif[5]

Un moteur à courant alternatif est composé des mêmes objets qui constituent un moteur à courant continu. IL reçoit le courant grâce à un transformateur commutateur. Celui-ci autorise le changement de la tension. L'électricité doit être transmutée à l'aide d'un courant donné par un réseau public par l'intermédiaire de moteurs-générateurs ou soit par des inverseurs statiques qui sont situés dans la sous-station.

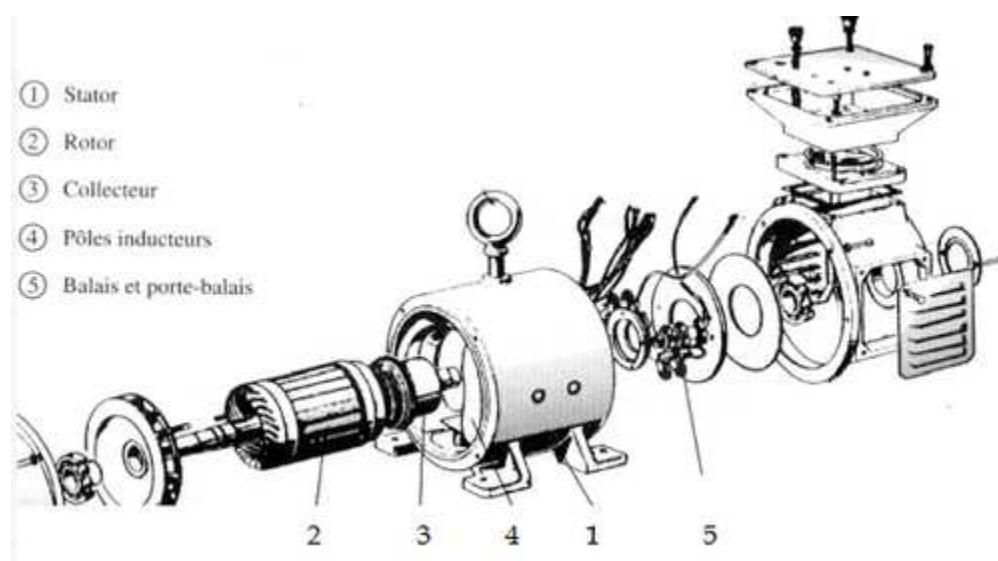


Fig. 11– Constitution d'un moteur électrique à courant continu [5]

### 1.4.1.2 Le matériel roulant moteur autonome

Le matériel roulant autonome reçoit l'énergie requise pour son déplacement à partir d'une station électrique embarquée. Les locomotives à vapeur, diesel et à turbine à gaz en font partis de cette catégorie.

Le matériel roulant autonome a également ses propres avantages, notamment des coûts beaucoup plus faibles de construction et de maintenance des infrastructures de transport (absence d'un réseau de sous-stations d'alimentation électrique, etc.). Il offre également la possibilité de travailler dans des conditions et des situations extrêmes (défaillance des stations et sous-stations d'alimentation électrique, perte de contact dans les réseaux de câbles dans le cas de mauvaises conditions météorologiques (givrage, ouragans, etc.).

À l'heure actuelle, certains travaux de conception sont en cours de développement de matériel roulant avec des sources d'énergie combinées, ce qui devrait permettre au véhicule ferroviaire de fonctionner en mode autonome et non autonome.

La traction autonome associée à la transmission électrique comprend un moteur thermique, un alternateur, des moteurs électriques de traction. Elle était prédominante jusqu'à ces dernières années. Elle se voit concurrencée par la transmission hydraulique – convertisseur et coupleur hydraulique.

#### 1.4.1.2.1 Description d'une locomotive à traction autonome

Dans la locomotive représentée sur la (Fig12) l'espace du compartiment des machines est occupé en grande partie par le groupe électrogène et son groupe de refroidissement et par la soute à combustible qui occupe la partie centrale sous le châssis. Il reste donc un volume réduit pour les équipements électriques comprenant les convertisseurs et leur commande. Le rhéostat de freinage est, quant à lui, intégré sur la toiture de la locomotive. Ces contraintes ne permettent pas d'installer une puissance bien supérieure à la moitié de celle d'un engin à traction électrique.

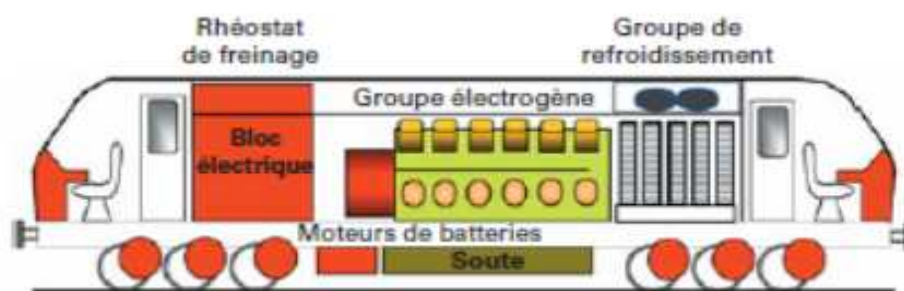


Fig. 12– Schéma de principe d'une locomotive à traction autonome [4]

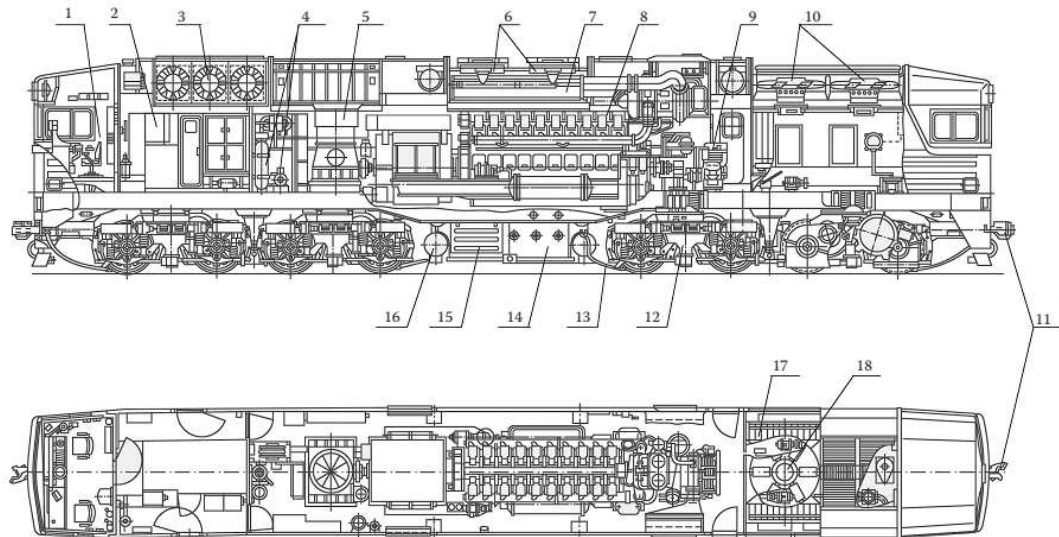


Fig. 13– Salle des machines d’une locomotive diesel-électrique [6]

Légendes de la Fig13:1— Cabine du conducteur; 2— chambre haute tension; 3— ventilateurs de moteur et résistances de freinage électrodynamiques, résistances d'affaiblissement de champ de moteur de traction, démarreur de compresseur et résistances d'excitation de secours de générateur de traction; 4— compresseur de démarrage d'air et cylindres; 5— ventilateur centralisé du système d'air; 6, 10— ventilateur- motorisé; 7— refroidisseur d'air suralimenté; 8— moteur diesel; 9— compresseur de frein; 11— coupleur; 12— bogie; 13— piège à sable (dessableur); 14— réservoir d'essence; 15— compartiment de la batterie; 16— réservoir principal; 17— sections de refroidissement; 18— pompe à eau.

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:

#### a) Transmission mécanique

Une transmission purement mécanique, avec une boîte de vitesse (automatique ou couplée à un embrayage) sont reliés par cardans aux essieux moteurs. Cette solution, identique à celle utilisée chez les véhicules routiers, ne peut être utilisée que pour des puissances de moins de 500 ch. (locotracteurs et autorails); lors du passage des rapports de vitesse, des à coups peuvent voir lieu. Depuis les années 70 ce système n’est plus installé sur le matériel ferroviaire neuf.

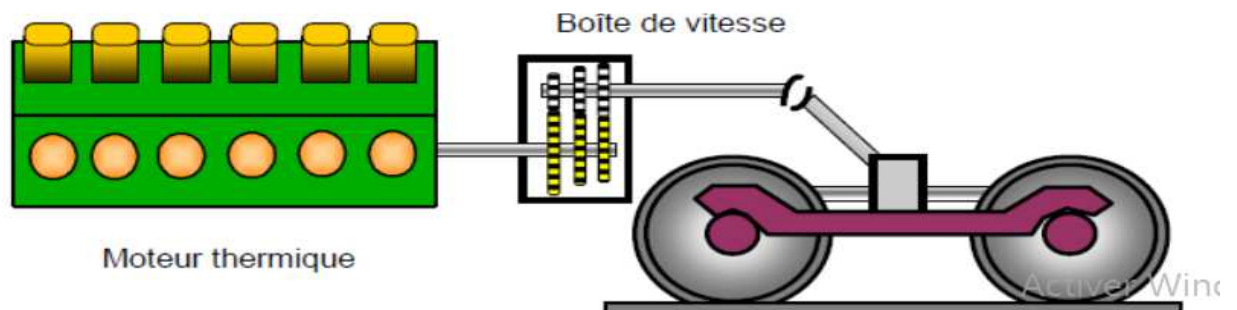


Fig. 14– Schéma de principe d’une Transmission mécanique [1]



## b) Transmission hydraulique

Les transmissions hydrauliques sont de deux types :

### - Convertisseur de couple hydraulique

Le coupleur est composé de deux disques à ailettes frontales P et T en opposition qui forment le circuit pompe-turbine (Fig15). Pendant le démarrage, le disque moteur P accélère l'huile spéciale vers le disque mené T solidaire de la machine à entraîner. L'huile accélérée par la pompe P acquiert ainsi de l'énergie cinétique pour entraîner d'une manière progressive la turbine T. Le couple moteur est transmis progressivement à la machine à entraîner en quelques secondes. Il demeure cependant un léger glissement fonctionnel entre le moteur et la machine à entraîner.

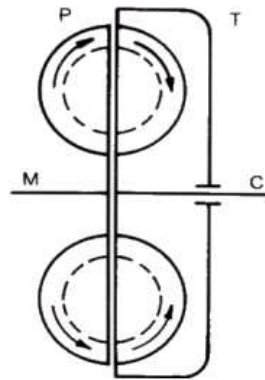


Fig. 15– Schéma de principe d'un convertisseur hydraulique

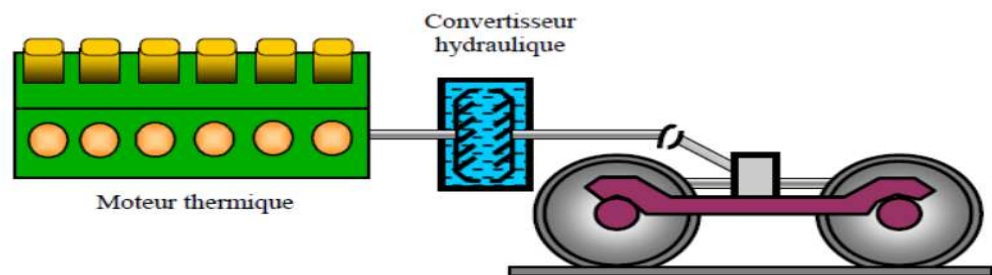


Fig. 16– Schéma de principe d'une transmission hydraulique [1]



Fig. 17– Composition d'un convertisseur de couple hydraulique [7]

### - Transmission hydrostatique

Une transmission hydrostatique est une transmission qui utilise un fluide sous pression pour transmettre la puissance du moteur thermique ou électrique aux essieux. L'énergie mécanique du moteur est convertie en énergie hydraulique par une pompe, un moteur hydraulique relié à la pompe, reconvertie cette énergie en énergie mécanique pour entraîner les roues motrices. La transmission hydrostatique remplit à la fois les fonctions d'embrayage et de boîte de vitesses. La transmission finale se trouve, de ce fait, simplifiée car les organes de la transmission hydrostatique peuvent procurer une infinité de vitesse d'avancement ainsi que des gammes variées de couple et de marches arrière.

### c) 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.

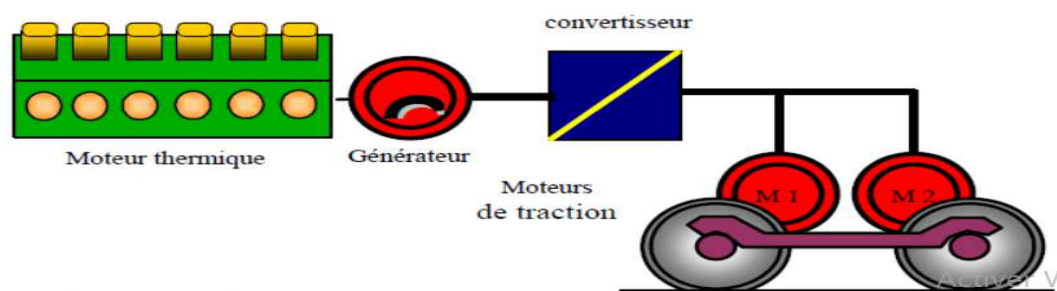


Fig. 18– Schéma de principe d'une transmission électrique[1]

### **1.4.2 Classification selon le type d'utilisation**

Le matériel roulant ferroviaire peut être utilisé pour le transport de fret ou de passagers (ou les deux ensembles), pour les opérations de manœuvre et pour des tâches spéciales.

Le matériel roulant ferroviaire de fret se compose de locomotives avec des efforts de traction élevés. Ces locomotives peuvent être utilisées individuellement ou en groupes (contrôle parallèle) et peuvent être positionnées dans les différents emplacements de la rame ou du train (contrôle distribué).

Les locomotives de manœuvre sont destinées pour les travaux dans des stations liées à la formation (assemblage) de trains pour l'expédition ou leur désassemblage à l'arrivée. Généralement, ils ne possèdent pas les grandes puissances des locomotives de ligne principale et en disposent de charges par essieu relativement basses.

Le matériel roulant ferroviaire spécial est destiné pour effectuer des tâches spéciales autres que le transport de marchandises et de passagers. Il est utilisé pour la maintenance, pour l'usage militaire ou pour la lutte contre les incendies et le secours, etc.

Le matériel roulant ferroviaire autotracteur est un ouvrage technique et technologique très complexe. Il intègre de nombreuses réalisations et innovations scientifiques et technologiques modernes. Le développement de telles machines complexes n'est pas possible sans les compétences et le savoir faire dans le domaine de la conception et de la modélisation applicables dans ce domaine.

Contrairement à d'autres types de véhicules de transport, le matériel roulant doit satisfaire un grand nombre d'exigences spécifiques pour son fonctionnement sur les chemins de fer. En outre, les exigences supplémentaires pour les différents chemins de fer peuvent varier considérablement les unes des autres.

### **1.5 Classification selon la disposition des essieux**

La classification des locomotives se fait aussi selon la disposition de leurs essieux. Pour la description synthétique du nombre et de la disposition des essieux (avec le cas échéant la distinction entre essieux porteurs et essieux moteurs d'une locomotive), diverses conventions ont été adoptées. On désigne ainsi une locomotive en donnant successivement, de l'avant vers l'arrière, les nombres d'essieux groupés par bogie, bissel ou sous-châssis en distinguant les essieux porteurs et les essieux moteurs.



Fig. 19– Schéma de principe d'un bogie [8]

Le bogie est un chariot à deux ou trois essieux, dont les roues sont guidées par les rails et sur lequel s'articule le châssis d'une locomotive ou d'un wagon. Il est composé de :

- **Châssis de bogie**

Ossature du bogie qui supporte les essieux, la suspension, les freins et les moteurs de traction.

- **Boîte d'essieu**

Pièce assurant la liaison entre le châssis et l'essieu.

- **Essieu**

Pièce transversale, située sous un véhicule, passant dans le moyeu des roues sur lesquelles elle s'appuie.

- **Ressort de suspension**

Pièce qui amortit les vibrations causées par le roulement des roues sur les rails.

## 1.6 Les systèmes de notation des locomotives

### 1.6.1 Système de notation Whyte

La notation de Whyte pour la classification des locomotives à vapeur par arrangement de roue a été conçue par Frederick Methvan Whyte, [9] et est entrée en vigueur au début du XXe siècle suite à un éditorial de décembre 1900 dans l'American Engineer and Railroad Journal. La notation compte le nombre de roues avant, puis le nombre de roues motrices et enfin le nombre de roues arrière, les groupes de nombres étant séparés par des tirets. D'autres systèmes de classification, comme la classification UIC et les systèmes français, turc et suisse pour les locomotives à vapeur, comptent les essieux plutôt que les roues. Dans la notation, une locomotive à deux essieux avant (quatre roues) à l'avant, trois essieux moteurs (six roues) et un essieu arrière (deux roues) sont classés 4-6-2.

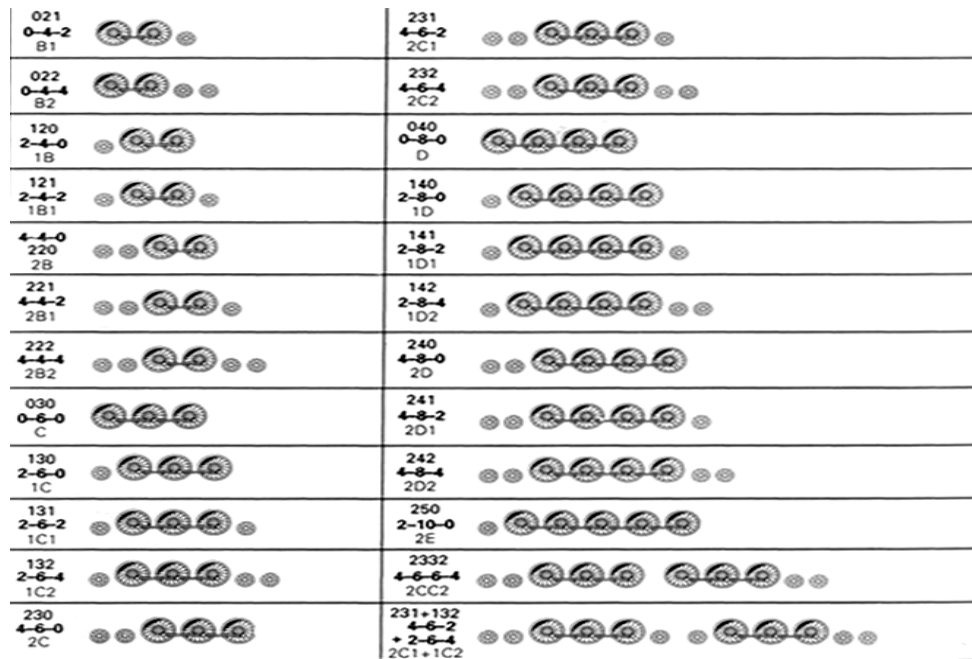


Fig. 20– Notation des essieux selon lesystème whyte[9]

### 1.6.2 Le système de notation de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC)

L'Union internationale des chemins de fer (UIC) est une association internationale représentant au niveau mondial les entreprises ayant une activité dans le domaine du chemin de fer.

La classification de l'UIC des arrangements d'essieux de locomotive, également connue sous le nom de classification allemande [10], décrit l'agencement des roues des locomotives, des unités multiples et des tramways. Elle est énoncée dans la brochure 650 relative à la « désignation standard de la disposition des essieux sur les locomotives et les ensembles à unités multiples » de l'UIC [9] et est utilisé dans une grande partie du monde y compris dans le Royaume-Uni.

Les États-Unis utilisent l'aménagement simplifié des roues AAR pour les locomotives modernes. Il s'agit d'un système plus polyvalent que la notation Whyte, faisant moins d'hypothèses sur la disposition des locomotives et le comptage des essieux au lieu des roues. Certaines locomotives sont impossibles à classer en utilisant la notation Whyte, mais la classification UIC le fait facilement. Il est également beaucoup plus adapté aux locomotives diesel et électriques.

L'Union internationale des chemins de fer (UIC) est une association internationale représentant au niveau mondial les entreprises ayant une activité dans le domaine du chemin de fer.

**Tableau 1**– Explications de la disposition des essieux selon le système de l’UIC[10]

DISPOSITION DES ESSIEUX D’AVANT EN ARRIERE	MODE DE TARACTION	SURNOM MONDIAL DONNE AU TYPE	NOTATION FRANCAISE RUSSE , D’EUROPE MERIDIONALE	NOTATION BRITANNIQUE ET AMERICAINE	NOTATION ALLEMANDE D’EUROPE CENTRALE
○ -PARTEURS ● - MOTEURS					
●●	Vapeur		020	040	B
●●●	Vapeur		030	060	C
○●●●	Vapeur	Mogul	130	260	1C
○●●●○	Vapeur	Mikado	141	282	1D1
○●●●	Vapeur	American	220	440	2B0
○●●●○	Vapeur	Atlantic	221	442	2B1
○●●●●	Vapeur	Ten Whell	230	460	2C0
○●●●●○	Vapeur	Pacific	231	462	2C1
○●●●●○	Vapeur	Baltic ou Hudson	232	464	2C2
○●●●●○	Vapeur	Mountain	241	482	2D1
○●●●●○+○●●●○	Vapeur	Garratt	231+132	462+264	2C1+1C2
○●●●●○+○●●●○	Vapeur	Garratt	241+142	482+284	2D1+1D2
●● - ●●	Electricité		BB	BB	BB
●●● - ●●●	Electricité		CC	CC	CC
○●●●●○	Electricité		2D2	2D2	2D2
●● - ●●	Diesel		BB	BB	BB
●●● - ●●●	Diesel		CC	CC	CC
○●○ - ○●○	Diesel		A1A-A1A	A1A-A1A	A1A-A1A

### 1.6.2.1 Principe de notation dans le système de l’UIC

Dans ce système A désigne un essieu moteur unique, B désigne un bogie à deux essieux moteurs, C un bogie à trois essieux moteurs, etc, les essieux porteurs étant désignés par un chiffre. C'est ce principe, application directe de la classification UIC, qui est appliqué par la SNCF (Société nationale des chemins de fer français) et la SNCB (La Société nationale des chemins de fer belges). Pour la Suisse il faut rappeler que la classification des locomotives à vapeur se maintient également pour les locomotives électriques et à carburant aussi.

Dans ce qui suit une interprétation de quelques exemples de notations dont quelques principes sont représentés dans le Tab.11 et sur la Fig.18 :

#### ➤ Les B'B' et Bo'Bo'

B'B' : deux bogies monomoteurs. Les moteurs sont nécessairement de taille réduite ; pour des moteurs à courant continu, cela implique une puissance moyenne (ex : BB 8500 / BB 16500 / BB 17000 / BB 20200 et BB 25500 de la SNCF ou les machines EMD type F en Amérique du Nord). Seuls les moteurs asynchrones permettent des puissances élevées (exemple BB 36000 / BB 36300 et BB 27000, BB 27300, BB 37000 de la SNCF).

Bo'Bo' : deux bogies à deux essieux moteurs. Le concept a été développé par la SNCF dans les années 1950 pour accroître la puissance des locomotives tout en diminuant la masse. Les prototypes BB 9003-9004 ont donné naissance aux BB 9200, puis BB 9300, BB 9400, BB 16000, BB 25100 / BB 25150 / BB 25200, puis aux « nez cassés » BB 7200, BB 15000, BB 22200 et enfin BB 26000.

### ➤ Les C'C' et Co'Co'

C'C' : deux bogies à trois essieux, 1 moteur par bogie. Exemples : CC 6500 / CC 21000, CC 40100, CC 72000 / CC 72100.

Co'Co' : six essieux indépendants répartis en deux bogies (6 moteurs). Exemples : CC 1100, CC 7100, CC 14000 / CC 14100, CC 92000, CC 20001 / CC 25000. Les locomotives CC et CoCo sont particulièrement adaptées à la traction de trains lourds de marchandises grâce à l'adhérence que leur procurent les essieux supplémentaires.

**Tableau 2 – Principe de notation des locomotives**

Nombre d'essieu par bogie	Nombre de moteurs* / désignation	Désignation du cas monomoteur**
2	2 - Bo	B
3	3 - Co	C
4	4 - BoBo	BB

\* un moteur par essieu  
\*\*Un moteur par bogie

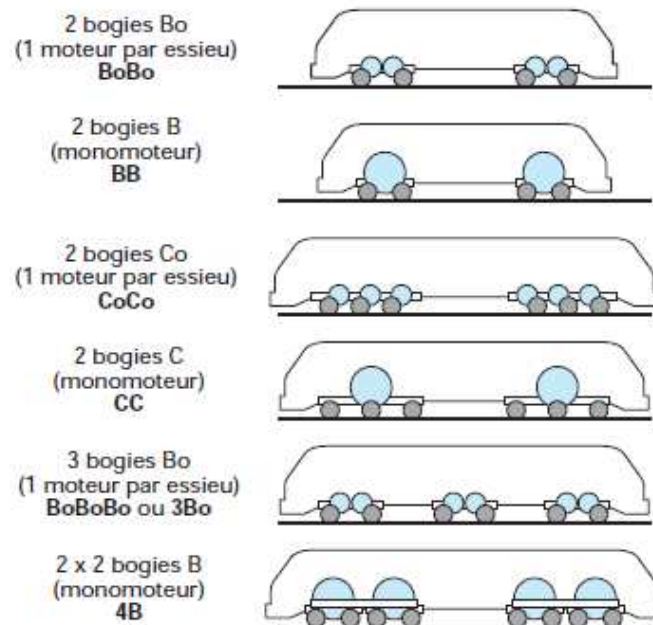


Fig. 21–Principales disposition des essieux moteurs [11]

### 1.6.3 Système AAR

Le système de notation de l'AAR (Association of Americans Railroads) est en fait une simplification de la classification de l'UIC et est largement utilisée en Amérique du Nord pour décrire les locomotives diesel et électriques. Il n'est pas utilisé pour les locomotives à vapeur qui utilisent plutôt la notation Whyte.

Le système AAR compte des essieux au lieu des roues. Les lettres se réfèrent aux essieux motorisés, et les nombres aux essieux non alimentés (ou roulants). "A" se réfère à un essieu motorisé, "B" à deux essieux motorisés d'une rangée, "C" à trois essieux motorisés d'une rangée, et

"D" à quatre essieux motorisés d'une rangée. "1" se réfère à un essieu de roulement, et "2" à deux essieux de roulement d'une rangée. Un tiret ("-") sépare les bogies. Un signe plus ("+") fait référence à l'articulation.

L'Association des chemins de fer américains AAR est un regroupement des principales compagnies ferroviaires d'Amérique du nord (Canada, États-Unis, Mexique). Il s'agit d'une certaine manière de l'équivalent nord-américain de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) européenne.

## **Conclusion**

Ce premier chapitre a permis d'une façon brève d'exposer l'origine des chemins de fer, leur développement et leur importance. Cette première partie a été suivie par un aperçu sur le système ferroviaire, sa classification et sa notation un peu partout dans le monde.

Il en ressort que la locomotive diesel-électrique, malgré la propagation de la locomotive électrique procure au réseau ferroviaire une grande flexibilité avec une très bonne manœuvrabilité. Néanmoins, ce type de configuration cède devant le 'tout électrique' en termes de puissance maximale.



# Chapitre 2

L'analyse morphologique et choix du type  
d'installation énergétique

## Introduction

Ce deuxième chapitre est consacré à l'analyse morphologique de l'installation énergétique de la locomotive objet du présent mémoire. Un exposé détaillé sur le contenu de cette méthode est suivi par la construction de l'espace morphologique. Ce dernier est réduit, en un nombre fini de combinaisons d'installations énergétiques en adoptant à chaque étape des arguments techniques

### 2.1 Aperçu sur l'analyse morphologique [12]

L'analyse morphologique est une technique relativement ancienne, elle a été formalisée par le chercheur américain F. Zwicky à la fin de la seconde guerre mondiale. La méthode a été développée initialement dans le but de l'étude des problèmes complexes et multidimensionnels. Pendant les deux dernières décennies, l'analyse morphologique a été appliquée par des chercheurs aux Etats-Unis et en Europe, essentiellement, dans le domaine des études prospectives et la construction de scénarios stratégiques. Actuellement, la méthode éprouve, de plus en plus, d'une renaissance grâce au développement de quelques outils et supports pour la mise en œuvre.

La « morphologie » est une notion clé dans l'analyse morphologique. La morphologie est « l'étude de la configuration et de la structure des formes externes des êtres vivants et de leurs organes ». Cette définition montre bien le principe de la méthode c'est à dire celui de l'étude de l'arrangement des parties (des organes) d'un objet et comment celles-ci se conforment pour réaliser une totalité ou une configuration. L'objet en question peut être un objet physique (une anatomie, une organisation, un produit,...) ou aussi un objet mental (concepts, idées, ...) et c'est justement l'apport de Zwicky dans ce domaine. En effet, Zwicky a remarqué que le concept de l'analyse morphologique était plutôt réservé pour l'étude des interdépendances structurelles des objets physiques. Il proposait donc l'idée d'étendre l'application de cette méthode pour des applications portant sur des objets mentaux et abstraits tels que les concepts, les idées, les phénomènes. Il développait donc un cadre méthodologique plus large pour l'analyse morphologique.

Les domaines d'application de l'analyse morphologique sont multiples : la construction de scénarios exploratoires et tous les domaines d'innovation et de recherche d'idées nouvelles. Bien que surtout utilisée en prévision technologique, cette méthode se prête de plus en plus fréquemment à la construction de scénarios. Les dimensions (composantes) démographique, économique, technique ou sociale pouvant être caractérisées par un certain nombre d'états possibles (hypothèses ou configurations), un scénario ne sera alors rien d'autre qu'un cheminement, une combinaison associant une configuration de chaque composante. Ce principe est illustré par la figure suivante.

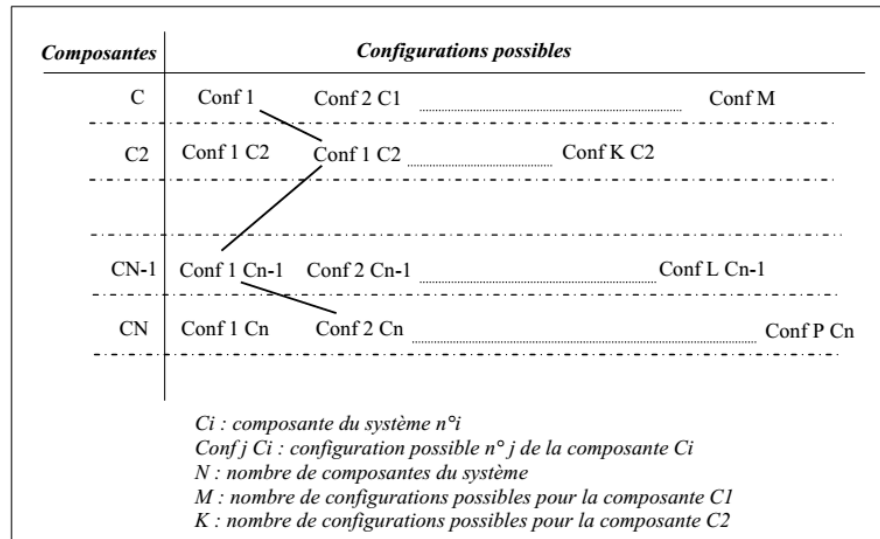


Fig. 22– Principe de l’analyse morphologique (La matrice morphologique) [12]

Dans cette matrice morphologique, le nombre de combinaisons croît très vite. C’est la principale limite de la méthode et c’est sans doute la raison qui en a limité la diffusion.

L’idée de combinatoire, est largement supportée par l’analyse morphologique qui permet d’étudier l’arrangement des parties d’un objet à créer et comment celles-ci se conforment pour réaliser une totalité ou une configuration. C’est typiquement le cas de la définition organique de système qui a pour objectif de créer une solution qui supporte l’architecture fonctionnelle du système. Dans cette phase du processus de conception, nous nous identifions trois activités principales (Fig23) :

- 1) la recherche des principes et des concepts de solution permettant de réaliser les fonctionnalités exprimées par la définition fonctionnelle du système,
- 2) la construction des architectures organiques par combinaison des principes déjà recensés au niveau de l’activité précédente,
- 3) un nombre réduit d’architectures est retenu. Ces architectures dites candidates doivent être dimensionnées et optimisées.

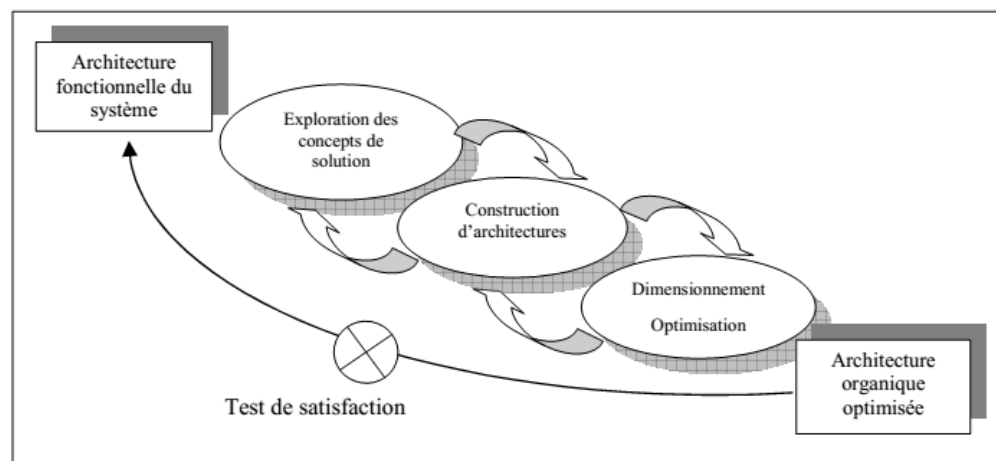


Fig. 23 – Activités formant la phase de définition d’architecture organique [12]

L'activité centrale dans cette phase est celle de la construction d'architectures et donc c'est de la qualité de la méthode utilisée à ce niveau que dépend la pertinence des solutions architecturales obtenues. A ce niveau, la méthode de l'analyse morphologique représente un intérêt pour les concepteurs. Elle constitue une méthode de génération de solutions architecturales par la combinaison de concepts de solutions pour chacune des fonctionnalités du système. Elle présente aussi un soutien aux processus cognitifs des concepteurs à ce niveau de développement des solutions en permettant une exploration systématique des champs du possible en matière d'architectures organiques potentiellement satisfaisantes.

L'analyse morphologique vise à explorer de manière systématique et exhaustive l'expression technique possible des fonctions. La mise en œuvre de l'analyse morphologique est guidée selon le mode de pensée créatif selon lequel deux phases sont distinguées :

### **2.1.1 Phase 1 : la construction de l'espace morphologique**

Il s'agit dans cette première étape de décomposer le système ou la fonction étudiée en sous-systèmes ou composantes. Dans cette décomposition du système, le choix des composantes est délicat et nécessite une réflexion approfondie réalisée par exemple à partir des résultats de l'analyse structurelle.

Il convient tout d'abord d'avoir des composantes aussi indépendantes que possible. Elles doivent par ailleurs rendre compte de la totalité du système à concevoir. Mais trop de composantes rendront vite impossible l'analyse du système, a contrario trop peu l'appauvriront sûrement, d'où la nécessité de trouver un compromis.

Chaque composante peut naturellement prendre plusieurs configurations. Un scénario donné sera caractérisé par le choix d'une configuration spécifique sur chacune des composantes. Il y aura ainsi autant de scénarios possibles que de combinaisons de configurations. L'ensemble de ces combinaisons représente le champ des possibles, encore appelé espace morphologique. L'espace morphologique croît très vite, ce qui est relativement courant en prospective exploratoire. Le risque d'être noyé par un grand nombre de combinaisons possibles est bien réel.

### **2.1.2 Phase 2: la réduction de l'espace morphologique**

Certaines combinaisons, voire même certaines familles de combinaisons sont irréalisables (incompatibilités entre configurations, contraintes, interactions nuisibles à la performance globale, etc.). La deuxième phase du travail consiste donc à réduire l'espace morphologique initial en un sous-espace utile, par l'introduction de contraintes d'exclusion, de critères de sélection (économiques, techniques..) à partir duquel que des combinaisons pertinentes pourront être examinées.

Dans ce sens d'idée, l'analyse morphologique est considérée comme une méthode stimulante de la créativité en permettant un balayage systématique du champ des possibles et en évitant quelques obstacles de la créativité tel que l'arrêt prématuré sur la première solution qui apparaît triviale par recherche d'une apparente sécurité du connu et de l'évident. Cette stimulation de la créativité passe, inévitablement, par une exploration systématique de l'ensemble des concepts de solutions qui alimente la phase de construction de l'espace morphologique.

Pour résumer, nous mentionnerons trois principaux facteurs de créativité favorisés par l'usage de l'analyse morphologique, à savoir la productivité, la flexibilité et l'originalité. Le premier facteur concerne la capacité à générer un grand nombre de concepts de solutions pour chacune des fonctions du système. La flexibilité est la capacité d'explorer des solutions ou des scénarios différents par combinaisons, associations et glissements successifs. L'originalité est le résultat des deux premiers facteurs.

En guise de conclusion on note que la problématique de définition de l'architecture organique d'un système est à la croisée de plusieurs domaines : technologique, économique, domaine des savoirs et des connaissances du concepteur,... Dans cette phase de conception, une démarche structurante et d'aide pour le concepteur est nécessaire. En effet, des analyses conduites dans nombreux domaines montrent que les concepteurs ont une propension systématique et naturelle à se projeter, plus ou moins directement, sur l'espace de la solution physique du problème. De ce fait, le concepteur opère en mêlant, en même temps, différents niveaux hiérarchiques du processus de conception (fonctionnel, organique, physique détaillé). Ceci met en évidence la nécessité de méthodologies pertinentes et structurantes de l'activité de conception et qui permettent de guider le travail du concepteur vers plus de créativité et d'efficacité.

L'analyse morphologique est une méthode qui, permet de supporter une partie de la dialectique décomposition/composition du processus de définition d'architecture organique d'un système. Elle permet, en plus de cela, de structurer le modèle de pensée cognitif du concepteur en le poussant à suivre un enchaînement d'étapes pour la résolution d'un problème de conception innovante. Il y a fort à parier que la méthode continuera à connaître un intérêt dans les années à venir, tout particulièrement pour la construction de scénarios globaux où elle permet de balayer de façon relativement exhaustive le champ des scénarios possibles.

## 2.2 Construction de la matrice morphologique

On pourra toujours proposer les éléments suivants de la matrice morphologique (Tab.3):

**Le type de moteur** : dans cette catégorie on en distingue : moteur à vapeur, diesel, turbine à gaz, ...etc

**Le type de la transmission de puissance** : mécanique, électrique, hydraulique,...etc. Le premier type se divise en transmission mécanique direct ou avec réduction (c'est-à-dire via un réducteur).

Pour le seul moteur diesel, on en distingue des moteurs : lent, à moyenne vitesse, semi rapide et rapide.

Pour la transmission électrique, on en ressort à courant continu et à courant alternatif. À partir de cette dernière on en ressort sans régulation et avec régulation de fréquence.

Ainsi, chaque composante de la matrice se verra diviser en plusieurs autres composantes ou configurations. En faisant combiner les configurations les unes aux autres, on en obtient autant de scénarios possibles d'installations énergétiques. Le nombre totale des dites combinaison formera l'espace morphologique attendu.

**Tableau 3–** Matrice morphologique

Type de moteur	Type de transmission de puissance	
Moteur à vapeur	Mécanique	Directe (Gearless) Avec réduction
	Électrique	Courant continu Courant alternatif
	Hydraulique	Accouplement hydrostatique Moteur hydraulique
Diesel	Lent	
	Moyenne vitesse	
	Semi rapide	
	rapide	
Turbine à gaz	Avec combustion à pression constante	
	Avec combustion à volume constant	

En principe de deux à cinq variantes d'installation énergétiques devront être retenues. L'analyse de chaque configuration et la comparaison des avantages et des inconvénients des unes aux autres permettra de retenir le schéma de l'installation énergétique la plus performante pour la locomotive.

Pour pouvoir réduire le nombre important de variantes, il serait important d'apporter à chaque étape les arguments techniques et économiques en faveur de telle ou telle composante ou à l'inverse les arguments qui s'opposent au choix de la composante considérée.

En ce qui suit seront exposés des exemples de discussion de quelques arguments.

## 2.2.1 Le choix du type de traction

### 2.2.1.1 Moteur de traction [4]

Comme il a été déjà indiqué, le type de moteur de traction presque universellement utilisé quelle que soit la puissance est le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Son principe est largement exposé par ailleurs [D 3 480] [D 3 485] [D 3 490] [D 5 502]. Nous donnons quelques aspects sur son installation et son refroidissement[4].

### 2.2.1.1.1 Installation

La fonction de base de l'installation est la transmission du couple à l'essieu. Deux dispositions sont pratiquées :

- la transmission directe, ou gearless ;

- la transmission par réducteur à engrenages. Les contraintes à satisfaire, en plus de la transmission de l'effort, sont la stabilité de roulement du bogie et une faible agressivité sur la voie ; pour cela, la masse du moteur et sa fixation dans le bogie sont des données. Le moteur est en effet, par construction, un organe lourd et, du fait de la vitesse de circulation, les accélérations verticales engendrées par les défauts de voie provoquent une dégradation de la table de roulement des rails, voir même une fatigue importante des composants du moteur (roulements, bobinages, etc.).

➤ **Transmission directe (gearless) :** le rotor du moteur est directement calé sur l'axe de l'essieu et le stator est fixé rigidement sur l'ensemble de roulement pour conserver un entrefer constant. Cette disposition a été couramment utilisée sur les premiers engins moteurs électriques, comme les tramways circulant à faible vitesse. Quelques recherches sont en cours pour développer à nouveau cette technologie. Son utilisation s'étend aux moteurs-roues des trolleybus. L'inconvénient majeur de la transmission directe est l'accroissement de la masse « non suspendue » sur l'essieu, la rendant particulièrement agressive pour la voie.

➤ **Transmission par réducteur à engrenages :** le couple au niveau de l'arbre du moteur est adapté à celui qui est développé au niveau de la roue grâce à un train d'engrenages dont le rapport du nombre de dents donne le rapport de réduction. Ce type de transmission se décline en plusieurs variantes selon que l'on souhaite réduire plus ou moins l'influence de la masse non suspendue constituée par le moteur de traction et son réducteur. L'un des dispositifs est représenté sur la fig.24 :

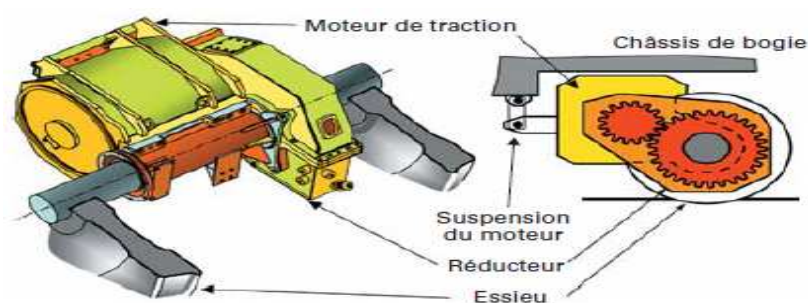


Fig. 24– Moteur de traction semi-suspendu[4]

Le moteur et son réducteur sont fixés rigidement par rapport à l'essieu grâce à un palier à roulements ; l'autre extrémité du moteur est fixée élastiquement sur le châssis de bogie. Seule la moitié de la masse motrice + réductrice est non suspendue. Pour les vitesses élevées (> 160 km/h), le moteur et le réducteur sont entièrement suspendus sur le châssis de bogie, voire même fixés sous le châssis de l'engin (cas des motrices TGV). La transmission exige un accouplement élastique entre l'arbre du moteur et l'essieu pour absorber les débattements entre essieu et bogie ou caisse.

La disposition adoptée pour certains tramways tient compte de la contrainte du « plancher bas ». Le bogie est alors équipé de roues indépendantes et non plus d'essieux, de sorte que les moteurs entraînent les roues unilatéralement, comme le montre la figure 25.

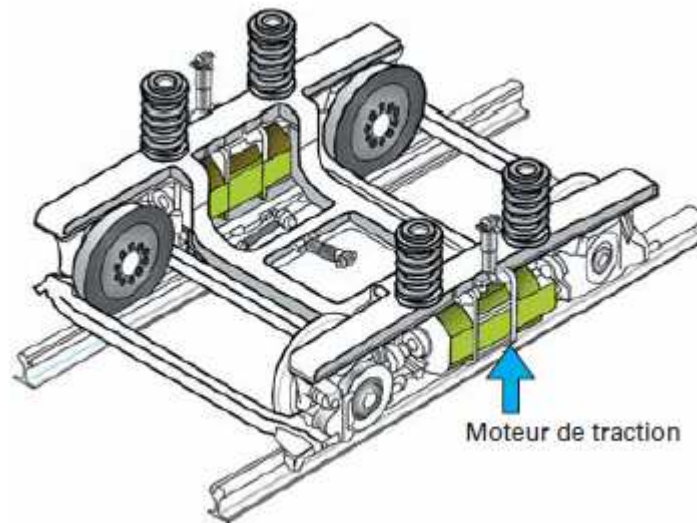


Fig. 25– Moteurs entièrement suspendus sur bogie à roues indépendantes [4]

## 2.2.2 La locomotive à traction électrique

Les locomotives électriques, comme leur nom l'indique, fonctionnent avec l'électricité, donc avec un moteur électrique. Contrairement au charbon et au bois, utilisés pour les trains à vapeur, elle ne rejette pas de dioxyde de carbone dans la nature : elle est considérée comme une énergie propre. De plus, elle n'a pas forcément besoin d'être stockée, l'alimentation se faisant par une ligne de contact aérienne (appelée caténaire). Néanmoins, plusieurs trains (par exemple les métros) ont un troisième rail pour s'approvisionner en électricité ou possèdent un système de stockage d'électricité intégrée.

### 2.2.2.1 Avantages et inconvénients de la locomotive électrique:

#### a) Les avantages de la locomotive électrique

Une locomotive électrique possède plusieurs avantages qui résident principalement dans sa puissance massique et dans l'économie de son utilisation. Son poids et son coût d'entretien et de vente sont bien moins importants que ceux d'une locomotive Diesel (environ deux fois moins). Elle est aussi plus légère que la locomotive à vapeur. De plus, son impact sur l'environnement est moindre, elle ne produit aucune fumée et elle fait une économie de combustible par rapport à la machine à vapeur (lors de ses arrêts, sa consommation est égale à 0). Et dès que la circulation est forte, son coût d'installation est moins important par rapport à l'économie qu'elle permet de réaliser. En outre, elle ne produit quasiment pas de nuisance sonore et sa vitesse ainsi que sa maniabilité sont avantageuses par rapport aux locomotives à vapeur et diesel. Par ailleurs, l'énergie employée par la locomotive électrique provient de l'extérieur, car l'électricité émane d'une



centrale, est captée après avoir été adaptée dans une sous-station et, à l'aide du pantographe qui frotte sur les caténaires, arrive à la locomotive. La traction électrique a des performances et des disponibilités meilleures et le taux d'accident est moins important que les locomotives à vapeur. La consommation SNCF représente 1 % de la consommation française d'énergie (par rapport au train à vapeur : 50 % d'énergie, 60 % en personnel, 70 à 80 % en entretien et 70 % en équipement de distribution pour les 25 KV).

## b) Les inconvénients de la locomotive électrique

Même si ce type de train a beaucoup d'avantages, il a aussi des inconvénients, heureusement peu nombreux. Pour amener à ces tractions, il a fallu faire des aménagements sur le territoire pour leur mise en circulation et cela a coûté très cher. Mais c'est encore le cas car il faut toujours remettre les voies ferrées en bon état. Il a fallu installer aussi des sous-stations. Comme ces trains sont dépendant de ces sous-stations, lors d'un accident ferroviaire, celles-ci sont immobilisées pendant un certain moment. C'est un inconvénient assez important au niveau stratégique car tout un réseau pourrait être interdit aux passages de trains durant ce moment (du fait que le courant est coupé). Mais peut être qu'au fur et à mesure du temps, ces inconvénients s'atténueront et nous trouverons des solutions.

### 2.2.3 La locomotive diesel

La traction Diesel est maintenant utilisée dans la quasi-totalité des pays du globe. Elle ne nécessite pratiquement pas d'installations fixes spécifiques et elle est d'un emploi très pratique. Cependant, les locomotives Diesel ont des performances relativement limitées et leur entretien est onéreux. Dans une locomotive de ce type, une transmission est indispensable pour relier le moteur Diesel (qui ne peut tourner que dans un seul sens et ne fournit un couple utilisable que dans une plage étroite de vitesse de rotation) : la transmission électrique est utilisée le plus souvent. Un alternateur entraîné directement par le moteur Diesel alimente en courant continu – par l'intermédiaire d'un redresseur statique – les moteurs de traction accouplés aux essieux.

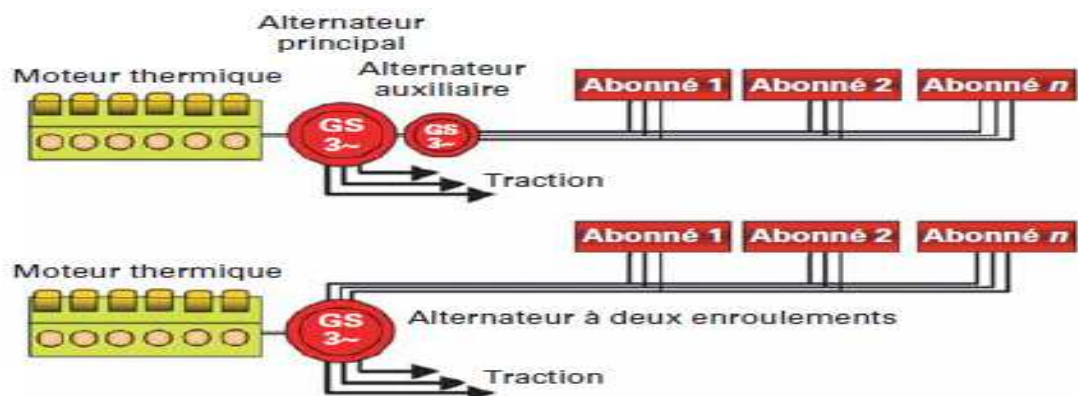


Fig. 26– Alimentation des auxiliaires [4]

### 2.2.3.1 Avantages et inconvénients de la locomotive diesel

#### a) Les avantages de la locomotive diesel sont

Les locomotives diesel sont plus efficaces que les locomotives à vapeur. Cela ne nécessite pas d'approvisionnement suffisant en eau et en charbon à titre régulier comme locomotive à vapeur.

Dans le cas du train à double tête, il ne nécessite pas beaucoup de temps pour fonctionner car il ne nécessite pas d'arrosage et de charbon comme la locomotive à vapeur. Il peut être mis en service immédiatement.

La locomotive diesel a une disponibilité opérationnelle comparativement supérieure à celle de la locomotive à vapeur. Elle a aussi un faible coût initial car aucune électrification sur le terrain n'est pas nécessaire. De plus aucune interférence avec aucune ligne de télécommunication. Enfin, la commande de vitesse de la locomotive diesel est simple, effectuée par commande de champ par générateur.

#### b) Les inconvénients de la locomotive diesel

- Le moto-ressource ou la durée de vie de la locomotive diesel est faible.
- La conception complexe du moteur, donc, la maintenance est élevée.
- Le moteur diesel n'a pas de couple de démarrage élevé.

### 2.2.4 Le rendement et les pertes

Les rendement et pertes de chaque configuration pourront aussi être utilisés comme arguments en faveur de telle ou telle composante ou configuration de la chaîne de traction.

Le rendement est déterminé par l'ensemble des rendements de chacun des composants. Prenons l'exemple général d'une chaîne de traction alimentée sous tension monophasée. L'inventaire des centres de pertes comprend :

- l'essieu et sa transmission ;
- les convertisseurs ;
- le transformateur (Fig27).

Pour une puissance à la jante de 1 000 kW – soit 4 000 kW pour une locomotive de 4 essieux – les pertes sont de :  $4 \times 177$  kW, soit 708 kW.

Dans le cas d'une chaîne de traction autonome à transmission électrique, s'ajoutent les pertes du moteur thermique. Le rendement est bien entendu nettement inférieur puisqu'il dépend de celui du générateur thermique (30 à 35 %).

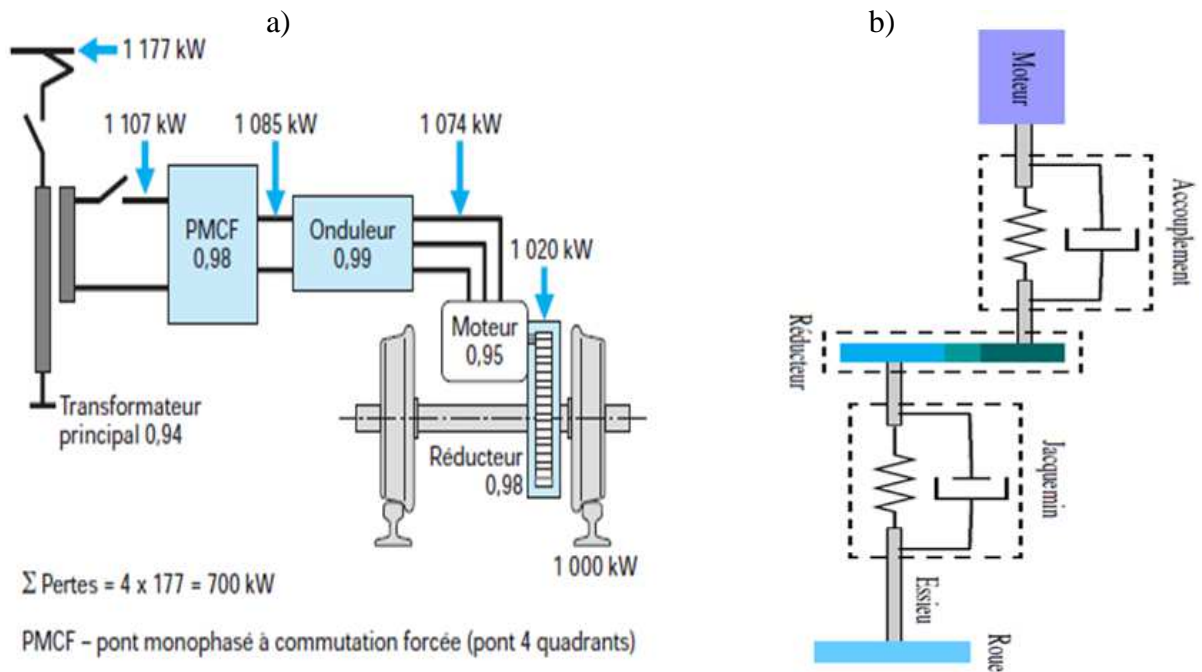


Fig. 27 – Synoptique des pertes de deux chaînes de traction : a) électrique [11] b) diesel-électrique [13]

### 2.3 Aperçu sur le freinage

Deux modes de freinage sont mis en œuvre en ferroviaire :

#### 2.3.1 Freinage utilisant l'adhérence [11]

L'effort de freinage s'exerce aux contacts roues-rails. Dans ce cas il est limité par la faible capacité de frottement qui s'accroît lorsque la vitesse croît. La plupart des réseaux admettent la limite de 10 % à 13 % d'adhérence à vitesse maximale (Fig28).

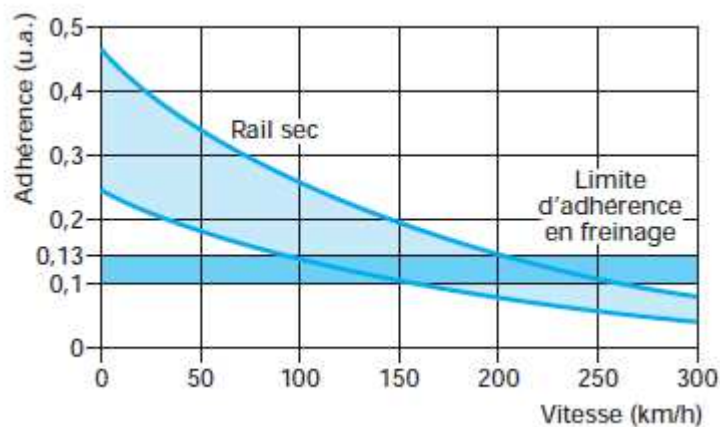


Fig. 28–Courbe d'adhérence utilisable en traction et en freinage [11]

Le couple de freinage s'exerce de plusieurs façons :

— au moyen du frottement de « sabots » sur la roue, ou de « disques » calés sur le moyeu de la roue ou sur l'axe de l'essieu. Il s'agit du freinage mécanique ;

— grâce à l'organe moteur lorsque celui-ci est réversible. C'est le cas du moteur électrique ou du convertisseur hydraulique. Il s'agit du freinage dynamique.

Les matériels actuels, très sollicités en termes de performance de freinage, complètent les dispositifs par des équipements d'antienrayage, vérifiant à tout instant le glissement de la roue et provoquant une réduction d'effort momentanée jusqu'à la reprise d'adhérence.

### 2.3.2 Freinage indépendant de l'adhérence [11]

Il fait appel à la réaction par rapport au sol par des dispositifs appropriés exerçant un effort sur les rails. Le plus utilisé est le frein à courant de Foucault. À titre exceptionnel, en urgence, le freinage électromagnétique est parfois mis en œuvre.

#### 2.3.2.1 Freinage électrique [11]

Le moteur électrique est réversible. S'il reçoit de l'énergie mécanique, il fournit de l'énergie électrique, devient générateur et développe un couple résistant. L'énergie électrique produite peut être utilisée de deux manières :

- dissipée dans une résistance : c'est le freinage rhéostatique ;
- utilisée par un autre récepteur : c'est le freinage par récupération.

#### 2.3.2.2 Freinage rhéostatique [11]

Les moteurs sont déconnectés de l'alimentation et branchés sur une, ou plusieurs résistances variables. Le réglage du couple résistant se fait par variation de la valeur de la résistance, le plus souvent grâce à un semi-conducteur contrôlé (thyristor ou IGBT) (Fig.29).

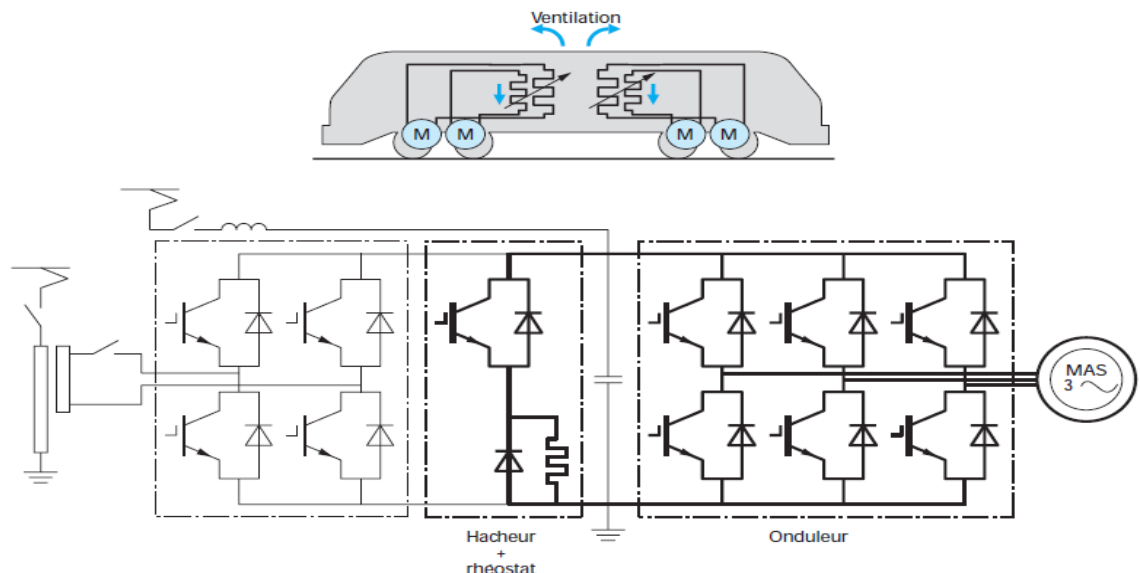


Fig. 29– Principe du freinage rhéostatique [11]

L'énergie dissipée exige une ventilation forcée importante du rhéostat de freinage. Le ou les moteurs d'entraînement du ou des ventilateurs sont alimentés soit par le réseau auxiliaire soit par un « talon » du rhéostat permettant une vitesse variable automatique de la ventilation.

La puissance de freinage est limitée par les résistances et la puissance de ventilation associée.

### 2.3.2.3 Freinage par récupération

Les moteurs restent connectés à l'alimentation qui devient « récepteur ». Le schéma est strictement le même qu'en traction; seule la régulation est adaptée aux paramètres de freinage.

Le fonctionnement est tributaire de la présence d'au moins un récepteur sur la ligne, qui peut être soit un autre engin de traction, soit un récepteur quelconque sur le réseau d'alimentation, à condition, dans ce cas, que les intermédiaires soient réversibles (sous-station).

La puissance de freinage est identique à la puissance en traction. La seule limitation est donnée par l'adhérence sollicitée. La caractéristique effort-vitesse en freinage est donnée (Fig30).

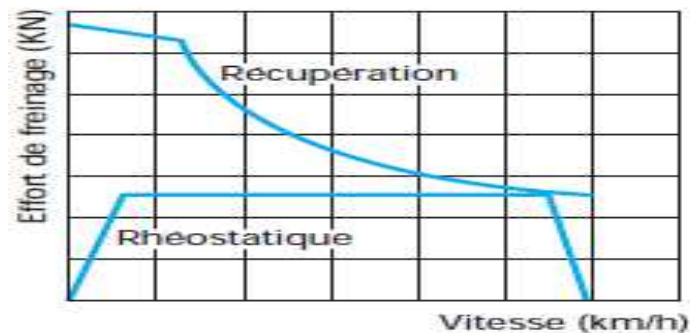


Fig. 30—Caractéristiques effort-vitesse en freinage électrique [11]

### 2.3.2.4 Freinage par courants de Foucault

La production de courants de Foucault directement dans le champignon du rail est capable de développer un important effort de retenue : de 1 000 à 1 300 daN par patin, soit une décélération d'environ 1 m/s<sup>2</sup>. Il n'entre pas en contact avec le rail : un entrefer contrôlé de 6 à 10 mm est prévu.

Il est constitué de pôles magnétiques successifs, à polarités alternées. L'énergie cinétique du convoi est transférée dans le rail sous forme de chaleur.

L'alimentation électrique se fait en utilisant les moteurs de traction travaillant en génératrices. Ce type de freinage présente l'inconvénient d'élever la température du rail et en cas de passages fréquents de convois sur la même portion de voie, les énergies thermiques s'accumulent, le rail dissipe assez mal la chaleur accumulée dans l'atmosphère et les échauffements progressifs (10 à 20C) peuvent être préjudiciables à la bonne stabilité de la voie. Il est souvent réservé aux freinages « d'urgence » lorsque la sécurité l'exige.

Son installation nécessite une technologie particulière du bogie pour contrôler avec précision l'entrefer en phase de freinage.

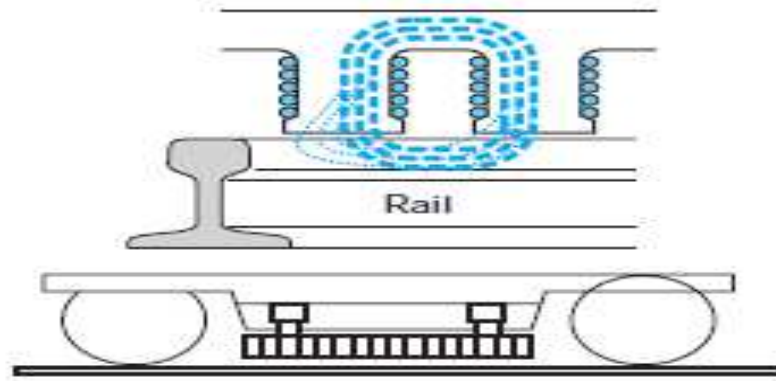


Fig. 31–Freinage par courants de Foucault. Principe et disposition sur bogie [11]

## 2.4 Mise en œuvre du freinage électrique

L'intérêt majeur du freinage électrique est d'éviter l'usure des organes mécaniques en freinage par frottement : roues et semelles, disques et garnitures. Par contre, il ne concerne que l'engin moteur et de ce fait sa puissance est insuffisante pour assurer l'arrêt du convoi sur une distance compatible avec la sécurité des circulations. Dans tous les cas, le freinage par récupération et le freinage rhéostatique sont utilisés :

En complément du freinage mécanique ;

En maintien de vitesse en pente ;

En ralentissement pour le passage d'une zone de vitesse  $V_1$  à une zone de vitesse

$$V_2 \quad (V_2 < V_1).$$

Le domaine d'emploi du freinage rhéostatique est en premier lieu la traction autonome à transmission électrique, ne disposant pas de réseau d'alimentation et d'autres récepteurs possibles.

Il est également très utilisé en traction électrique dès lors que le réseau n'est pas, ou mal adapté à la récupération d'énergie. C'est le cas des lignes équipées de sous-stations non réversibles en alimentation sous tension continue, ou lorsque le trafic n'est pas suffisamment important de sorte que la probabilité qu'il y ait un autre train « récepteur » est faible. Par contre, il est proscrit dans le cas des réseaux urbains en tunnel, compte tenu de l'échauffement de l'air ambiant qu'il provoque.

Le domaine d'emploi du freinage par récupération couvre l'ensemble des cas d'exploitation :

Grande ligne avec profil difficile (voies de montagnes) ;

Réseaux suburbains et urbains avec automotrices, métros ou tramways.

Son rendement est certes intéressant, mais il convient d'en fixer l'ordre de grandeur

### 2.4.1 Freinage électropneumatique

La mise en œuvre de l'effort de freinage par application de semelles sur les roues, ou de garnitures sur les disques calés sur les essieux, s'est faite, dès l'origine, par un dispositif entièrement pneumatique. Une conduite générale sous pression, parcourant tous les véhicules du

train, dans laquelle on réalise une fuite ou « dépression », transmet cette information à un distributeur admettant de l'air comprimé dans les cylindres d'application des semelles ou des garnitures. L'inconvénient de cette commande est le temps de propagation de la dépression – ou réalimentation pour le desserrage – dans la conduite générale, d'autant plus important que le convoi est long ( $280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). La distance d'arrêt, donc la performance du freinage, s'en trouve allongée. Dès les années 1970, on a associé la commande électrique de la dépression et de la réalimentation de la conduite générale au niveau de chaque véhicule. Le schéma de principe du freinage « électropneumatique » est donné Fig32.

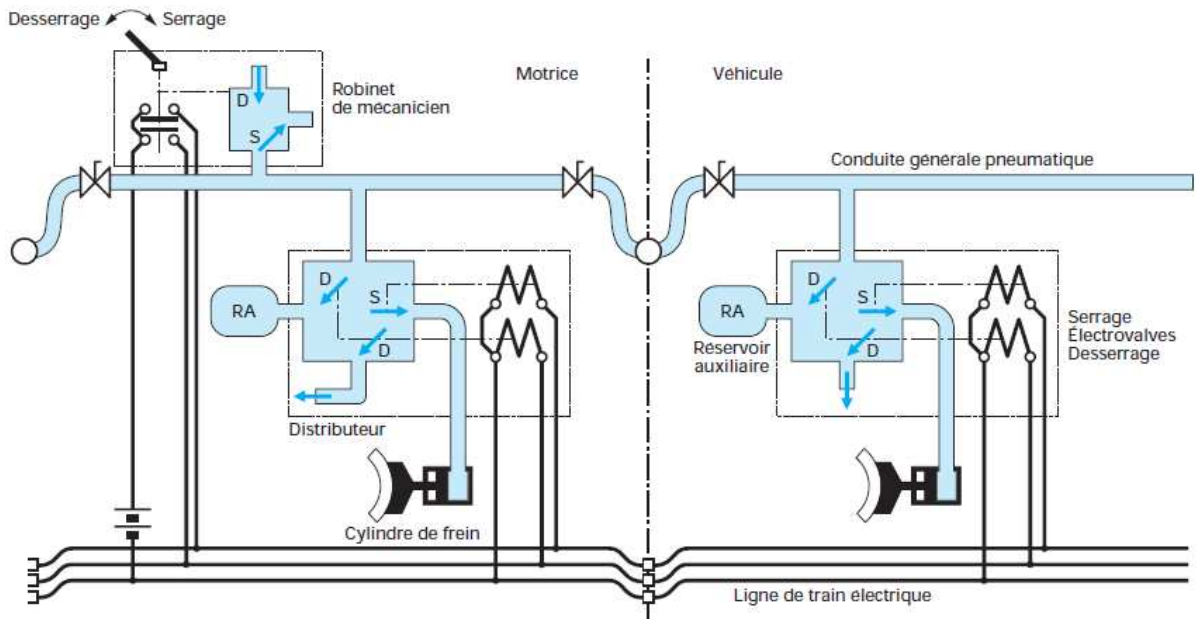


Fig. 32–Schéma de principe du frein électropneumatique [11]

## 2.5 Schéma de l'installation énergétique retenue

L'installation énergétique retenue est une installation de type diesel-électrique composée des éléments suivants (Fig33) :

- Un moteur diesel
- génératrice de courant alternatif
- Convertisseur de fréquence
- un moteur électrique par essieu
- réducteur après chaque moteur électrique

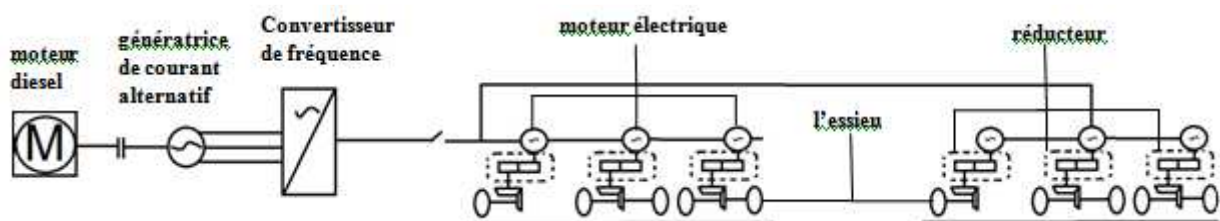


Fig. 33 – Schéma de l'installation énergétique retenue

## **Conclusion**

Il en ressort que la méthode de l'analyse morphologique adoptée dans ce chapitre pour la conception de l'installation énergétique de la locomotive vise à explorer de manière systématique et exhaustive tout l'espace des configurations possibles d'installations énergétiques. Dans ce sens d'idée, l'analyse morphologique est considérée comme une méthode stimulante de la créativité en permettant une exploration systématique de l'ensemble des concepts de solutions et évite au concepteur l'arrêt prématuré sur la première solution qui apparaît triviale par recherche d'une apparente sécurité du connu et de l'évident. La mise en œuvre de cette méthode a permis la construction de l'espace morphologique, l'exploration de toutes les solutions d'installations énergétiques possibles et en dernier le maintien de la configuration diesel électrique réputée par son autonomie meilleure par rapport à la configuration "tout électrique".



# **Chapitre 3**

**Dimensionnement de l'installation  
énergétique de la locomotive de 2500 kW**

## Introduction

Ce chapitre est consacré au calcul de résistance de la locomotive. Tout d'abord un travail d'identification de toutes les résistances au roulement est effectué, suivi par le calcul de la masse, les vitesses maximales et les tracés des courbes caractéristiques de la rame pour deux configurations de la locomotive BoBo et CoCo.

### 3.1 Aperçu sur les résistances au mouvement du train

Le calcul des différentes résistances est exposé dans plusieurs ressources littéraires, parmi lesquelles on mentionne "Traction ferroviaire du CHAPPAS Pierre [1] et Railway engineering de CHANDRA S. et Agarwal M.M.

Au cours de son déplacement sur la voie ferrée, la rame est soumise à un nombre fini d'effort résistant. Ces efforts peuvent résulter du frottement des différentes parties de la rame entre elle et avec la voie ferrée. Elles peuvent aussi surgir suite aux irrégularités du profile de la voie ou en résulter de la résistance de l'air sur les grandes vitesses. Cependant la puissance de traction de la locomotive doit être suffisante pour vaincre toutes les résistances du train à la vitesse spécifiée.

Les différentes résistances au mouvement du train sont les suivantes:

#### 3.1.1 Résistance due aux frottements :

Elle résulte du frottement interne des différentes partie de la locomotive et des wagons et des contacts roues-rails. Cette résistance est indépendante de la vitesse du train et peut être devisée en :

Résistance due au frottement dans les paliers. Elle dépend du type de palier, du lubrifiant utilisé, de la température et d'autres. Elle est de l'ordre de 0.5 à 1 kg par tonne.

Résistances internes engendrées par le mouvement des différentes parties de la locomotive et des wagons les unes par rapport aux autres.

#### 3.1.2 Résistances au roulement : observée dans le contact roue-rail

La résistance due au frottement est la résistance offerte par le frottement entre les parties internes des locomotives et des wagons ainsi qu'entre la surface métallique du rail et la roue à un train se déplaçant à une vitesse constante. Cette résistance est indépendante de la vitesse et peut être subdivisée en plusieurs parties.

- **Frottement du tourillon** Cela dépend du type de roulement, du lubrifiant utilisé, de la température et de l'état du roulement, etc. Dans le cas des roulements à rouleaux, il varie de 0,5 à 1,0 kg par tonne.
- **Résistance interne** Cette résistance est consécutive au mouvement des différentes parties de la locomotive et des wagons.

- **Résistance au roulement** Cela se produit en raison de l'interaction rail-roue en raison du mouvement des roues en acier sur un rail en acier. La résistance frictionnelle totale est donnée par la formule empirique

$$R_1 = 0.0016W$$

Avec  $R_1$  est la résistance de frottement indépendante de la vitesse et  $W$  est le poids du train en tonnes.

### 3.1.3 Résistance due à l'action des ondulations

Lorsqu'un train se déplace avec vitesse, une certaine résistance se développe en raison de l'action des vagues du train. De même, les irrégularités de voie (irrégularité de la voie ferrée), telles que les inégalités longitudinales et les différences de niveau transversal, offrent également une résistance à un train en mouvement. De telles résistances sont différentes pour des vitesses différentes. Il n'y a pas de méthode pour le calcul précis de ces résistances mais la formule suivante a été élaborée sur la base de l'expérience:

$$R_2 = 0.00008WV$$

Avec  $R_2$  est la résistance due à l'action des vagues et aux irrégularités de la voie en raison de la vitesse du train,  $W$  le poids du train en tonnes et  $V$  la vitesse du train en km / h.

### 3.1.4 Résistance due au gradient (rampe)

Lorsqu'un train se déplace sur un gradient ascendant, il nécessite un effort supplémentaire pour se déplacer contre la gravité, comme le montre la Fig34

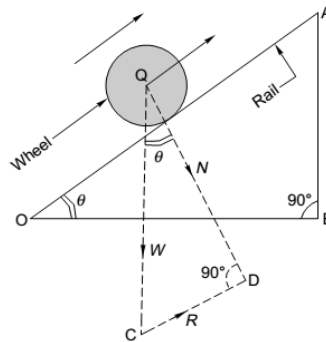


Fig. 34 Résistance due au gradient

En supposant qu'une roue de poids  $W$  se déplace sur un gradient ascendant  $OA$ , les forces suivantes agissent sur la roue.

- Poids de la roue ( $W$ ), qui agit vers le bas
- Pression normale  $N$  sur le rail, qui agit perpendiculairement à  $OA$
- Résistance due au gradient ascendant ( $R$ ), qui agit parallèlement à  $OA$

Ces trois forces se rencontrent en un point commun  $Q$  et le triangle  $QCD$  peut être pris comme un triangle de forces. Il peut également être prouvé géométriquement que les deux triangles  $QCD$  et  $AOB$  sont similaires.

De  $\Delta QCD$ ,  $R=W \sin\theta$

De  $\Delta OAB$ ,  $R=W \times AB/OA$

En pratique, les gradients sont très faibles et, par conséquent, OA est approximativement égal à OB. Donc,

$$R = W \times (AB/OB) = W \times \% \text{ ramp}/100$$

$$R_4 = W \times \% \text{ ramp}/100$$

Cela signifie que si le poids du train est de 50 t et que la pente est de 1 sur 50 (2%), la résistance due au gradient est  $R_4 = W \% \text{ ramp}/100 = 50 \times 0.02 = 1 \text{ t}$

On peut noter ici que lorsqu'un train monte une pente, un effort supplémentaire est nécessaire pour surmonter la résistance offerte par le gradient. La position est cependant inversée lorsque le train descend d'une pente et que la résistance offerte par le gradient contribue au mouvement du train ...

### 3.1.5 Résistance due à la courbure de la voie

Lorsqu'un train négocie une courbe horizontale, un effort supplémentaire est nécessaire pour surmonter la résistance offerte par la courbure de la piste. La résistance aux courbes est essentiellement due aux raisons suivantes (Fig35).

a) Le véhicule ne peut pas s'adapter à une voie incurvée en raison de son empattement rigide. C'est pourquoi le châssis prend une position tangentielle lorsque le véhicule essaie de se déplacer dans une direction longitudinale le long de la courbe, comme le montre la fig35. De ce fait, la bride de la roue extérieure de l'essieu avant frotte contre la face interne du rail extérieur, ce qui donne lieu à une résistance au mouvement du train.

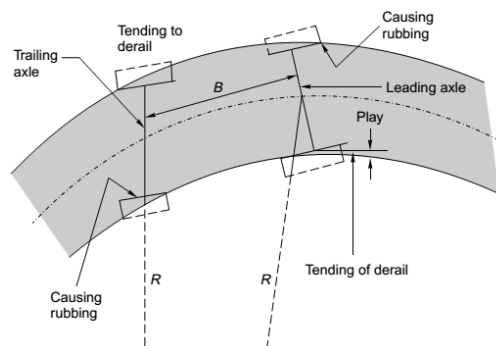


Fig. 35 Résistance due à la courbure

(b) La résistance aux courbes peut parfois être le résultat d'un glissement longitudinal, ce qui provoque le mouvement vers l'avant des roues sur une piste incurvée. La bride de roue extérieure de l'essieu traîné reste claire et a tendance à dérailler. La position se détériore davantage si la base de la roue est longue et la courbe est forte.

(c) La résistance aux courbes est causée par un glissement transversal, ce qui augmente le frottement entre les brides de la roue et les rails.

(d) Une mauvaise maintenance de la voie, en particulier un mauvais alignement, des rails usés et des niveaux inadéquats, augmentent également la résistance.

(e) Une surélévation inadéquate augmente la pression sur le rail extérieur et, de même, une surélévation excessive exerce une pression plus importante sur les rails internes, ce qui contribue

également à augmenter la résistance.

La valeur de la résistance de la courbe peut être déterminée par l'équation suivante:

Résistance aux courbes =  $C \times F \times G/r$

Où  $F$  est la force de friction glissante,  $G$  est la jauge de la piste,  $r$  est le rayon moyen de la courbe et  $C$  est la constante qui dépend de divers facteurs.

Cette équation indique que

- la résistance de la courbe augmente avec l'augmentation de la largeur de la jauge et
- la résistance est inversement proportionnelle au rayon, c'est-à-dire qu'elle augmente avec une augmentation du degré de la courbe.

Des formules empiriques ont été élaborées pour la résistance aux courbes, qui sont les suivantes:

Résistance aux courbes pour BG ( $R_5$ ) =  $0.0004WD$

Résistance aux courbes pour MG ( $R_5$ ) =  $0.0003WD$

Résistance aux courbes pour NG ( $R_5$ ) =  $0.0002WD$

Où  $W$  est le poids du train en tonnes et  $D$  le degré de la courbe. Cela signifie que pour une courbe de  $4^\circ$  sur une ligne BG, la résistance de la courbe pour un train de 250 t serait de :

$$0,0004 \times 250 \times 4 = 0,4 \text{ t.}$$

### 3.2 Adhérence roue/rail utilisable en traction [1]

Est un phénomène suffisamment complexe pour n'être pas complètement résolu à ce jour, même pour la grande vitesse. Le coefficient d'adhérence est le rapport :  $\mu = \frac{R}{Q}$

L'adhérence est donc un nombre sans dimension, positif, sans limite théorique supérieure, mais en pratique, avec la technologie actuelle, inférieur à 0,5

$R$  : l'effort tangentiel à la jante

$Q$  : la charge de la roue  $Q = P \cdot \cos(\alpha) + \Delta Q$

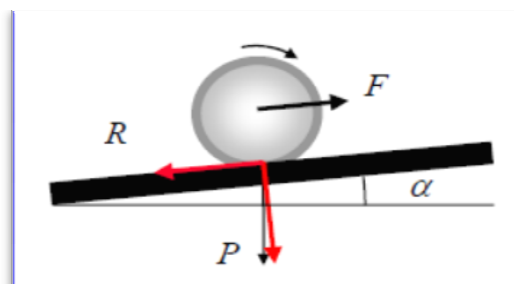


Fig. 36– Effort de traction ou de freinage, réaction du rail et force verticale[1]

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)

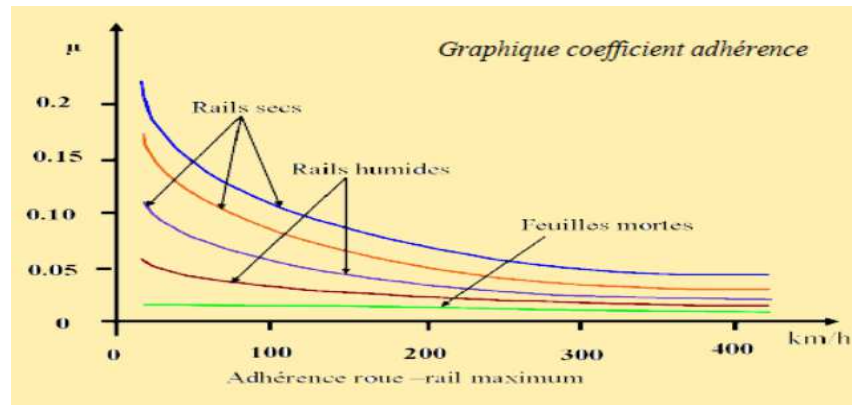


Fig. 37– Le coefficient adhérence[14]

### 3.3 L'effort de traction d'une locomotive

L'effort de traction d'une locomotive est la force que la locomotive peut générer pour transporter la charge. L'effort de traction d'une locomotive devrait être suffisant pour transporter un train à la vitesse maximale autorisée. Différentes courbes d'effort de traction sont disponibles pour différentes locomotives à différentes vitesses, ce qui permet de calculer la valeur de l'effort de traction. L'effort de traction est généralement égal ou légèrement supérieur à la capacité de traction de la locomotive. Si l'effort de traction est beaucoup plus important que ce qui est nécessaire pour transporter le train, les roues de la locomotive peuvent glisser. L'effort de traction doit être supérieur ou égal à l'effort résistant à son tour composé :

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

$$F_r = \sum F_r + F_\gamma + F_{j1} + F_{j2} + F_{j3} + F_{j4} \quad [1]$$

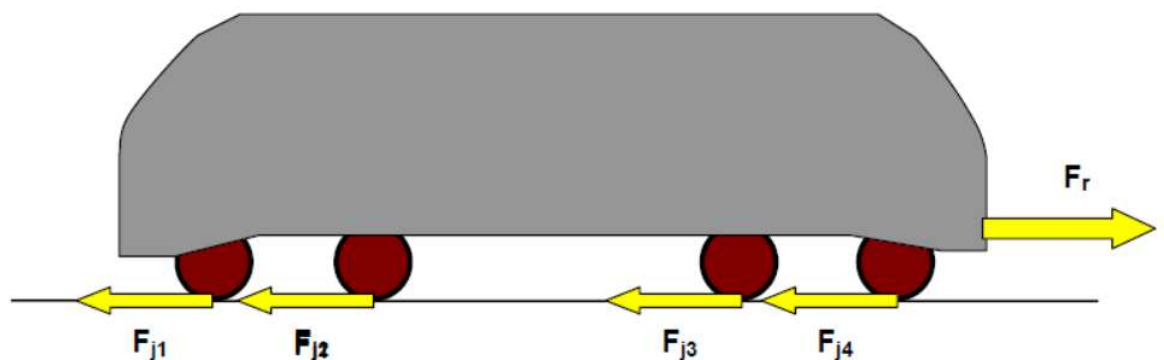


Fig. 38– l'effort permettant l'accélération du train[1]

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.

### 3.3.1 Limite de résistance des attelages[1]

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)

## 3.4 Calcul des différentes résistances au roulement

### 3.4.1 Les efforts résistants [1]

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

L'expression générale de la résistance à l'avancement rapportée dans [4] est exprimée par :

$$R = A + B.V + C.V^2$$

Où :

A-représente la résistance massique, indépendante de la vitesse.

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 ;

$K_1$  : paramètre de forme (avant et arrière) ;

$K_2$  : 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 ;

$N_p$  : nombre de pantographes en service.

Seule l'expérimentation permet de vérifier les principaux paramètres. La SNCF a mis au point une expression du coefficient aérodynamique telle que:

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

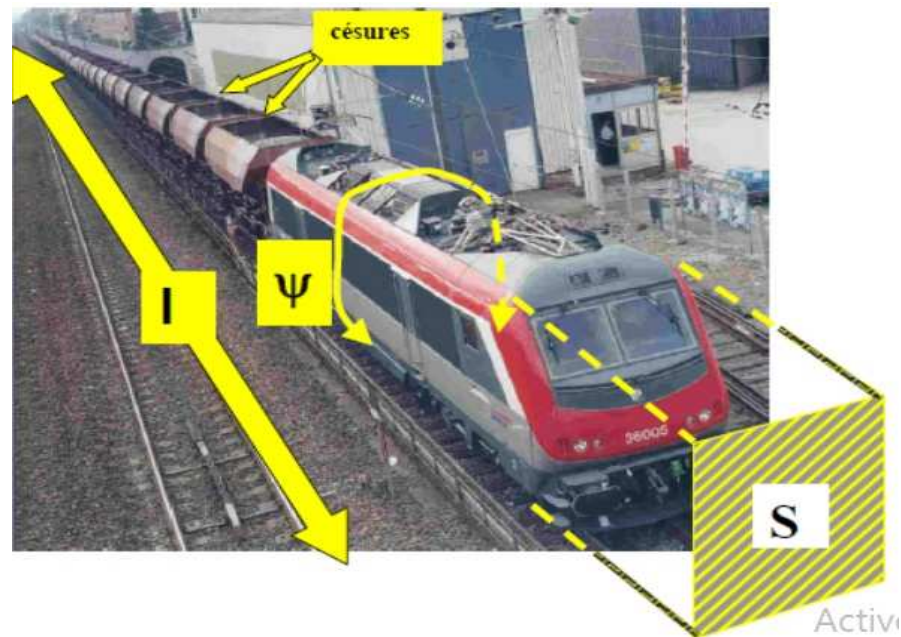


Fig. 39– Les légendes pour le calcul du coefficient aérodynamique[1]

### 3.4.2 Résistance à l'avancement du matériel moteur [1]

Un grand nombre d'expressions ont été élaborées par les réseaux et les constructeurs au cours du développement des différents types de matériel. On en mentionnera parmi-elle que les plus utilisées actuellement.

L'expression la plus courante est :

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

Où : L : masse de l'engin moteur (en tonnes), N : nombre d'essieux et V : vitesse (en km/h)

### 3.4.3 Résistance à l'avancement du matériel remorqué

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

**Tableau 4** : Formules pour le calcul de résistance à l'avancement du matériel roulant [1]

	type	Résistance à l'avancement
Matériel PASSAGER	37t < Tare < 42t	$R_v = \frac{m}{100} (1.5 + \frac{V^2}{4500})$
	Tare > 42t	$R_v = \frac{m}{100} (1.25 + \frac{V^2}{6300})$
		$R_v = \frac{m}{100} (0.870 + 0.008 * V + \frac{V^2}{5750})$
Matériel FRET	Rame wagons "tout venant"	$R_F = \frac{m}{100} (1.2 + 0.00899 * V + 0.00044 * V^2)$



Rame wagons transport combiné	$R_F = \frac{m}{100} (1.2 + 0.01 * V + 0.0035 * V^2)$
Rame porte-autos	$R_F = \frac{m}{100} (1.2 + 0.01 * V + 0.00056 * V^2)$

---

### 3.4.4 Résistance due au profil de la voie :

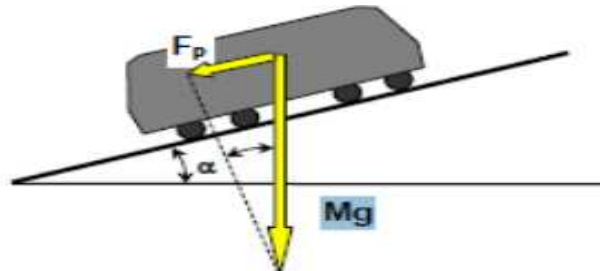


Fig. 40– Représentation de l'effort exercé par le poids[1]

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

La rampe ou la pente faisant un angle  $\alpha$  avec le plan horizontal, est soumise à un effort  $F_p$  tel

$$\text{que: } F_p = Mg * \sin \alpha$$

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 :

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

#### - 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:

$$i' = i + \frac{k}{\rho} \rho: \text{ rayon de la courbe en mètres}$$

Les essais en courbe sur voies de caractéristiques différentes donnent :

$500 < k < 1200$  La valeur la plus couramment adoptée est :  $k = 800$

### 3.4.5 Résistance due à l'inertie [1]:

#### 3.4.5.1 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 - moteurs 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 :

$$F = \Sigma M\gamma = \left[ M + \left( \frac{I_e}{R^2} \right) + I_m * \frac{\rho^2}{R^2} \right] \gamma = c * M\gamma = (c_m * M_m + c_r * M_r)\gamma [4]$$

#### 3.4.5.2 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 :

**Tableau 5 : Résistance supplémentaire au « décollage » d'un train [1]**

Type de train	Rampe	Résistance supplémentaire(kN)
Passagers	$i < 17\%$	$R_d = \frac{m}{100} (i * 0.981 + 6.8)$
	$i > 17\%$	$R_d = \frac{m}{100} (1.25i * 0.981 + 2.75)$
FRET	$i < 17\%$	$R_d = \frac{m}{100} (i * 0.981 + 4.5)$
	$i > 17\%$	$R_d = \frac{m}{100} (1.25i * 0.981 + 2.75)$

### 3.5 Résultats et discussions

Dans une première étape a été déterminé la masse de la rame (locomotive et wagons) pour deux configurations de la locomotive, à savoir : BoBo et CoCo.

La première configuration compte quatre essieux moteurs, alors que la deuxième compte six. Cependant, la charge adoptée par essieu est égale 22.5 t. L'adhérence adoptée est celle préconisée pour le cas de décollage par les différents constructeurs, elle est égale à  $\mu = 0.35$ .

Dans ce cas la masse de la rame est obtenue au point d'intersection du tracé de l'effort de traction  $F_{\text{traction}}$  avec celui de la résistance totale  $R_{\Sigma}$  (Fig39).

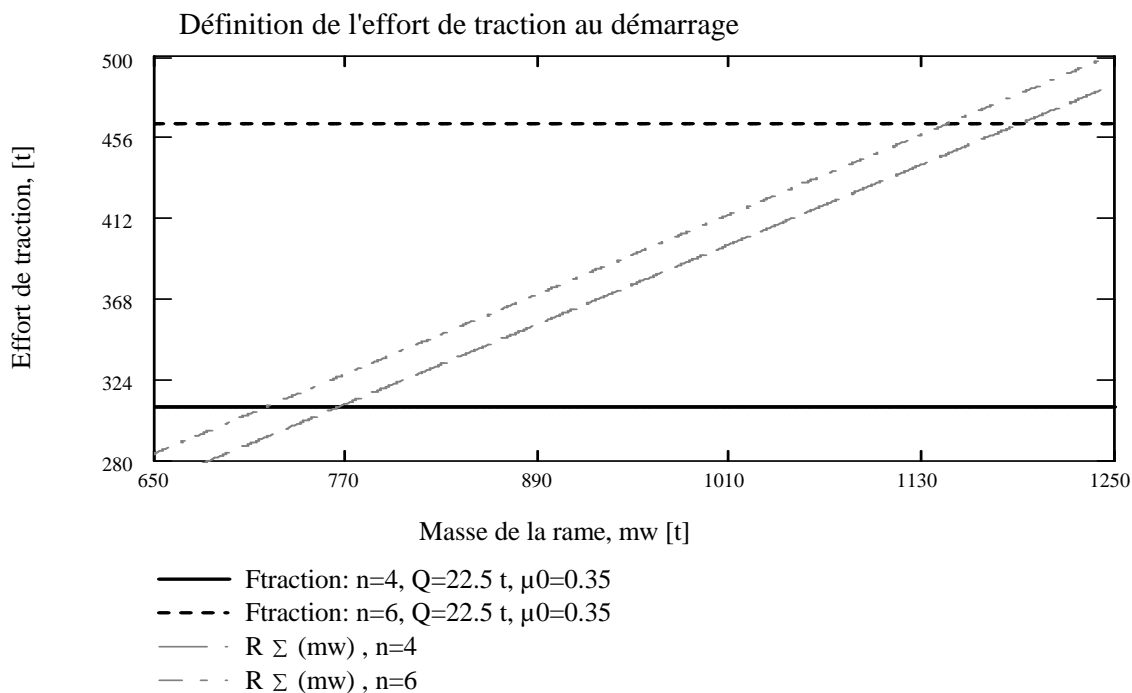


Fig. 39–Définition de la masse de la rame en fonction de l'effort de traction au démarrage

Deux valeurs de masse pour la rame ont été déterminées pour les deux configurations susmentionnées. Cette masse est égale à 767 et 1145 t pour les configurations BoBo et CoCo respectivement.

L'étape suivante consiste à déterminer la vitesse maximale pour les deux configurations. Elle est déterminée comme le point d'intersection de la puissance de traction, qui est le produit de l'effort de traction et la vitesse de la rame, et l'équipuissance ou autrement dit la puissance de consigne égale à 2500 kW (Fig40).

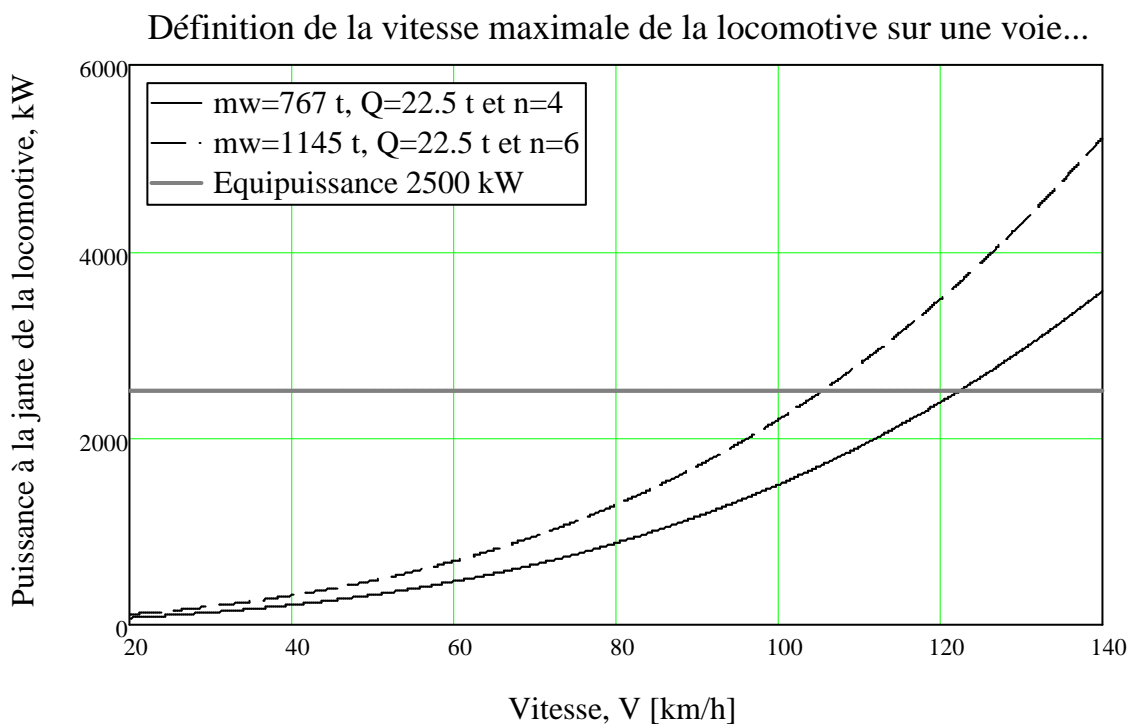


Fig. 40– Définition de la vitesse maximale de la locomotive

Les tracés des courbes caractéristiques des deux configurations de locomotive sont rapportés sur les Fig.41 et 42

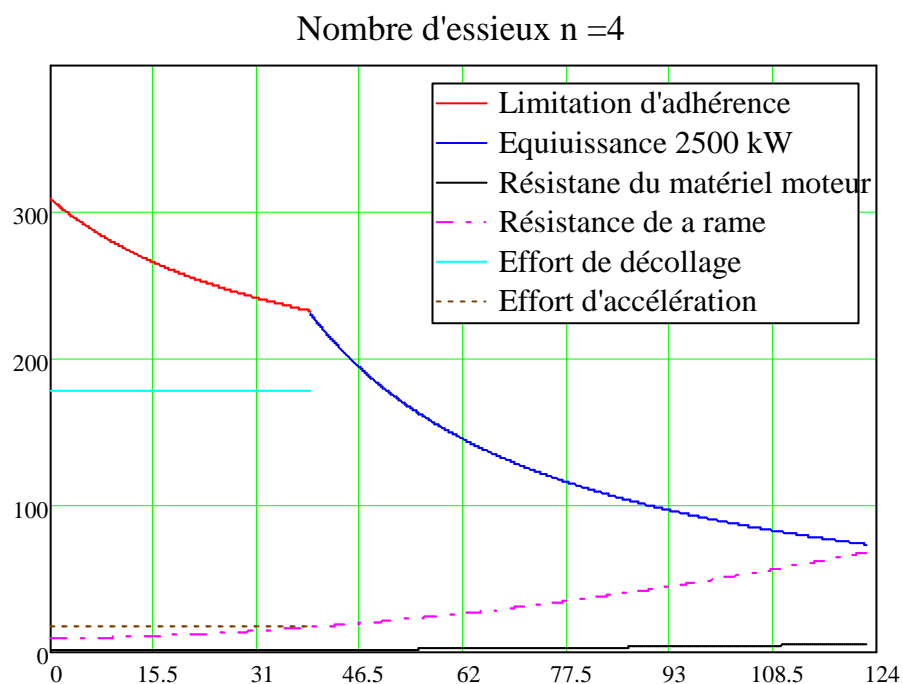


Fig. 41– Construction de la courbe caractéristique de la locomotive de configuration BoBo

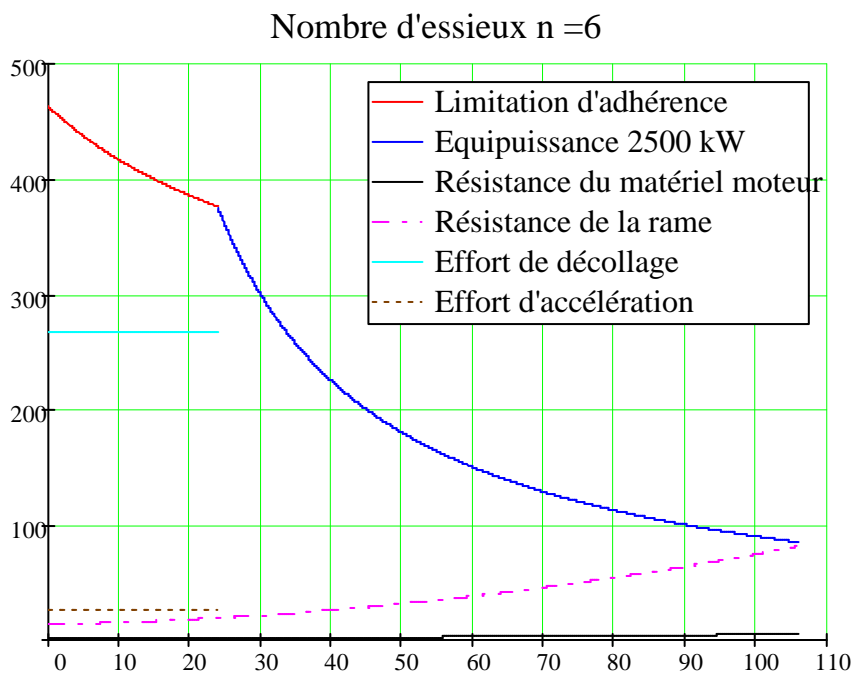


Fig. 42– Construction de la courbe caractéristique de la locomotive de configuration CoCo

En plus des courbes caractéristiques, sur les Fig.41 et 42 sont aussi tracées les courbes des efforts d'accélération et de décollage, les résistances de la rame et du matériel moteur (locomotive) et enfin les courbes d'équipuissance et de limitation d'adhérence.

**Tableau 6**– Récapitulatif des résultats

Nombre d'essieux, n	V <sub>max</sub> , km/h	Effort de traction à V <sub>max</sub> , t	Adhérence à V <sub>max</sub>	Adhérence admissible à V <sub>max</sub>	Adhérence au démarrage,	Masse de la rame, t	Effort de traction au démarrage kN
4	122.6	73.409	0.083	0.1	0.35	767	309.01
6	106.16	84.778	0.064	0.1	0.35	1145	463.04

Le récapitulatif de tous les résultats est rapporté dans le Tab.6.

## Conclusion

En conclusion on en déduit que la puissance au roue de 2500 kW permet de configurer de différents types de locomotives. Une de type BoBo pouvant remorquer une rame avec une masse de l'ordre de 767 t et pouvant atteindre une vitesse maximale de 123 km/h. L'autre est du type CoCo capable de tracter une rame plus lourde de masse égale à 1145 t mais avec une vitesse inférieure avoisinant les 106 km/h, ce qui n'est pas mal.

# **Conclusion générale**

### **Conclusion générale**

La présente étude a permis de mettre en pratique dans le processus de conception l'analyse morphologique. Cette dernière a rendu possible la construction des architectures organiques de l'installation énergétique de la locomotive. Un nombre réduit d'architectures est retenu. Ces architectures dites candidates ont été analysées et comparées en vue de retenir une seule architecture appropriée. Le choix est tombé sur une locomotive diesel électrique. Cette dernière est réputée par son autonomie meilleure par rapport à la locomotive électrique tributaire du réseau électrique et sa bonne manœuvrabilité.

Le calcul de résistance a été réalisé pour deux types de locomotives BO-BO et CO-CO de même puissance 2500 kW. La première, à quatre essieux moteurs est en mesure de remorquer une rame de masse supérieure à 767 t à la vitesse de 123 km/h, alors que la deuxième est une locomotive à six essieux moteurs en mesure de tracter une rame de plus de 1145 t à la vitesse maximale de 106 km/h.

## Bibliographie

- [1] CHAPAS (P.). La Traction Ferroviaire Documentation interne . Alstom Transport ,2001
- [2] Tzanakakis, Konstantinos. The Railway Track and Its Long Term Behaviour. A Handbook for a Railway Track of High Quality. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [3] Chandra , Satish, Agarwal, M.M. Railway engineering, oxford university press, 2007
- [4]CHAPAS(P.)et DEBRUYNE (M.). Composants de l'électrotechnique en traction ferroviaire, [D5530] ,2008
- [5] <http://iletaitunefoislestrains.e-monsite.com/pages/le-train-electrique.html>
- [6] Maskym Spiriyagin , Colin Cole , Yan Quan sun , Mitchell McClanachan , Valentyn Spiriyagin , and Tim McSweeney . Design and Simulation of Rail Vehicles , Taylor & Francis Group , 2014
- [7] LETURCQ (P.). Semi-conducteurs de puissance unipolaires et mixtes. [D 3 108], [D 3 109], Convertisseurs et machines électriques,2001, 2002
- [8]<http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/transport-et-machinerie/transport-ferroviaire/locomotive-diesel-electrique/bogie.php>
- [9] Steam Locomotive Glossary,Railway Technical Web Pages. 2007-06-28., Retrieved 2008-02-08
- [10] Dépliant UIC 650. Désignation standard de la disposition des essieux sur les locomotives et les ensembles à unités multiples. [Obligatoire]. 5e édition du 1.1.83.
- [11] CHAPAS (P.). et MICHEL(J.), petit Dimensionnement du matériel roulant ferroviaire,[D5520], 2008
- [12] Greenstein J. & Wilson A.;"Remembering Zwicky" ; Engineering and Science ;1974



# Résumé

## Résumé

Le présent travail est une démonstration de ce que doit pouvoir exécuter un spécialiste en installations énergétiques au sein d'un bureau de construction ferroviaire. L'activité de conception d'une manière générale est décrite comme ayant pour objet de définir un produit ayant une fonctionnalité particulière et se conformant à un ensemble de spécifications. Le produit en question dans le présent cas est la locomotive d'une puissance de 2500 kW. Dans une première étape une étude morphologique a été effectuée. Elle a permis de choisir à partir d'un nombre important d'installations énergétiques celle qui conviendra le plus. C'est-à-dire celle qui répond aux critères établis au préalable. La consigne sous forme de puissance aux roues a permis d'évaluer les différentes résistances à l'avancement de tout le matériel roulant. Plus encore, l'étude a permis de déterminer l'effort de traction au démarrage, détermination de la masse de la rame pour deux types de locomotive (BO-BO et CO-CO) et le tracé de la courbe caractéristique effort-vitesse en équivalence pour les deux rames avec les deux types de locomotives susmentionnées.

**Mots clés :** locomotive ; adhérence ; effort de traction ; rame.

### Abstract

This work is a demonstration of what an energy specialist should be able to do within a railway construction office. The design activity in general is described as having for object to define a product having a particular functionality and conforming to a set of specifications. The product in question in this case is the locomotive with a power of 2500 kW. In a first step, a morphological study was carried out. It has made it possible to choose from a large number of energy installations the one that will be the most suitable. That is, the one that meets the criteria established beforehand. The set point in the form of power to the wheels made it possible to evaluate the different resistance to the advancement of all the rolling stock. Moreover, the study made it possible to determine the traction effort at start-up, to determine the train mass for two types of locomotive (BO-BO and CO-CO) and to plot the force-speed characteristic curve in equip-power for the two trains with the two types of locomotives mentioned above.

**Keywords:** locomotive; adhesion; tensile force; train.

### ملخص

هذا العمل هو دليل على ما ينبغي أن يكون أخصائي الطاقة قادرا على القيام به في مكتب بناء السكك الحديدية. يوصف نشاط التصميم بشكل عام بأنه له هدف تعريف منتج له وظيفة معينة ومطابقة لمجموعة من المواصفات. المنتج في السؤال هو قاطرة مع قوة 2500kW. في خطوة أولى، أجريت دراسة مورفولوجية. وقد جعلت من الممكن أن تختار من بين عدد كبير من منشآت الطاقة أنسب واحد. وهذا يعني أنه يستوفي المعايير المحددة سلفا. إن النقطة المحددة في شكل قوة للعجلات جعلت من الممكن لتقييم مقاومة مختلفة للتقدم في جميع الأسهم المتداول. وبالإضافة إلى ذلك، حددت الدراسة الجهد الجر في بدء التشغيل، وحدد كتلة القطار لنوعين من قاطرة ( BO-BO و CO-CO ) وتأمّر منحني القوة السرعة قطارين مع نوعين من القاطرات المذكورة أعلاه.

**الكلمات المفتاحية:** قاطرة؛ العضوية؛ قوة سحب؛ القط