

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/2023

المرجع : ...../م/م 2023

# Mémoire de Master

Présenté au

**Département** : Génie Électrique  
**Domaine** : Sciences et Technologies  
**Filière** : Electrotechnique  
**Spécialité** : Réseaux Electriques

Réalisé par :  
**ADDAR Aziz**

Thème

---

## Etude d'alimentation électrique par caténaire de la gare ferroviaire de Beni Mansour, sur le projet Beni- Mansour/Bejaia

---

Soutenu le: 26/06/2023

Devant la commission composée de :

Mrs : H. MELLAH  
I. GRICHE  
M. REZKI

MCA  
MCB  
MCA

Univ. Bouira  
Univ. Bouira  
Univ. Bouira

Président  
Rapporteur  
Examineur

## *Dédicaces*

---

Je dédie ce travail à tous les membres de ma famille en général,  
A ma petite famille en particulier, ma chère épouse et mes chers enfants  
Merina et Akram.

A mon ami Krimo qui m'a pleinement aidé en cette année.

A toute la promotion M 2 de Réseaux Electriques année 2023.

*Aziz.A*

---

## *Remerciements*

---

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon encadreur "Mr Griche I, pour sa disponibilité et encouragements tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie également tous les enseignants du département Génie Electrique de l'université de Bouira qui ont contribué à notre formation.

Mes remerciements vont aussi aux personnels (MOA, BCS) de projet ferroviaire BMR-BEJAIA

Je remercie Messieurs " H. MELLAH " et " M. REZKI " pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans ce projet de fin d'études, notamment Mr Boumechedda Med El Amine pour sa disponibilité le long de ce travail.

# Sommaire

Remerciements .....	I
Sommaire .....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Listes des Acronymes et Symboles.....	V
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 01</b>	<b>3</b>
<b>GENERALITES ET DEFINITIONS</b>	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Généralités et définitions .....	3
1.2.1. La voie ferrée.....	3
1.2.2. Un réseau ferroviaire .....	3
1.2.3. Circulation du train.....	3
1.2.4. La numérotation des installations .....	4
1.2.5. Les rails.....	4
1.2.6. L'écartement.....	4
1.2.7. Le ballast.....	4
1.2.8. Les traverses .....	5
1.2.9. Les longs rails soudés ou LRS.....	5
1.2.10. Une gare.....	5
1.2.11. Le tracé de la voie.....	5
1.2.12. Les catégories de profils .....	6
1.2.13. Le gabarit .....	7
1.3. Les installations électriques (Installations fixes - Lignes aériennes de contact pour la traction électrique).....	10
1.3.1. Système de ligne de contact.....	10
1.3.2. Système de ligne aérienne de contact .....	12
1.3.3. Conducteurs .....	14
1.3.4. Circuit de retour.....	14
1.3.5. Electricité.....	16
1.3.6. Différents états du circuit électrique [5] .....	17
1.3.7. Géométrie .....	18
1.3.8. Fondations .....	20
1.3.9. Structures .....	20
1.3.10. Appareils de prise de courant .....	21
1.4. Conclusion .....	22

<b>Chapitre 02</b>	<b>23</b>
<b>DESCRIPTION, DONNEES D'ENTREE ET NORMES APPLICABLE</b>	
2.1. Introduction .....	23
2.2. Description du projet.....	23
2.3. Références normatives .....	24
2.4. Données d'entrée.....	26
2.4.1. Description de la gare de Beni Mansour.....	26
2.4.2. Périmètre de la gare .....	26
2.4.3. Données d'entrée de la gare.....	27
2.4.4. Electrification requise.....	28
2.4.5. Solution adoptée .....	30
2.5. Conclusion .....	32
<b>Chapitre 03</b>	
<b>DIMENSIONNEMENT ET CALCULS JUSTIFICATIFS</b>	
3.1. Introduction .....	33
3.2. Dimensionnement et calculs justificatifs du système d'alimentation .....	33
3.2.1. Systèmes d'alimentation 1 x25 kV et sous stations du projet .....	33
3.2.2. Schéma d'exploitation des sous-stations électriques.....	37
3.2.3. Dimensionnement des sous-stations .....	39
3.3.1. Critères de conception .....	39
3.4.1. Conception du système de captage de courant .....	44
3.4.2. Mouvement du point de contact .....	52
3.4.3. Qualité de captage de courant.....	53
3.4.4. Conception mécanique des charges d'un fil de contact sous tension mécanique.....	53
3.4.5. Conception mécanique des câbles en matériaux non conducteurs .....	57
3.4.6. Battement maximal et des désaxements .....	58
3.4.7. Longueur de canton et les différents types de pose .....	62
3.5.1. Critères simples .....	72
3.5.2. Critères plus précis .....	73
3.6. Conclusion .....	74
<b>Chapitre 04</b>	
<b>CALCULS, RESULTATS ET DIMENSIONNEMENT DE LA CATENAIRE</b>	
4.1. Introduction .....	75
4.2. Eléments du tracé ferroviaire objet de l'étude .....	75
4.2.1. Axe Bouira-Constantine : PK SNTF 170+040 au PK 172+530.....	76
4.2.2. Axe BMR-BEJAIA : PK 0+000 au PK 0+900.....	76
4.3. Calculs des éléments justificatifs de la caténaire .....	77
4.3.1. Portées réelles .....	77
4.3.2. Pentés de raccordement des hauteurs du plan de contact .....	79

---

4.3.3. Pendulage.....	79
4.5. Conclusion .....	93
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>94</b>
<b>Annexe A.</b> Dimensionnement et calculs justificatifs du système d'alimentation	<b>95</b>
<b>Annexe B.</b> Profil en long de l'axe de tracé du PK SNTF 170+040 au PK 172+530	<b>97</b>
<b>Annexe C.</b> Profil en long de l'axe de tracé du PK 0+000 au PK 0+900	<b>102</b>
<b>Annexe D.</b> L'ensemble des portées avec les pendules et les flèches de chaque portée.	<b>104</b>

## Liste des figures

Figure 1.1. Divers repères s’adressant aux mécaniciens.....	4
Figure 1.2. Ecartement du rail.....	4
Figure 1.3. Principaux gabarits utilisés.....	8
Figure 1.4. Équipement d’un support caténaire 25 000 volts .....	11
Figure 1.5. Ligne de contact aérienne .....	12
Figure 1.6. Installation sous tension circuit à vide.....	17
Figure 1.7. Installation privée de tension .....	17
Figure 1.8. Installation sous tension.....	18
Figure 1.9. Installation sous tension circuit en charge .....	18
Figure 1.10. Deux exemples de pantographes.....	22
Figure 2.1. Synoptique de la ligne Beni Mansour/Bejaia.....	24
Figure 2.2. Ensemble de voies et d’appareils de voie de la gare ferroviaire de Beni Mansour.....	29
Figure 2.3. Ensemble des voies (principales, services) à électrifier dans la situation actuelle.....	30
Figure 2.4. Plan de situation de la ligne Beni Mansour/Bejaia. ....	31
Figure 3.1. Système monophasé 1x 25 .....	33
Figure 3.2. Mode normal ou dégradé 1.....	35
Figure 3.3. Mode normal 2 .....	36
Figure 3.4. Zones d’action des sous-stations modes « Normal » et « Dégradé 1 ».....	36
Figure 3.5. Zones d’action des sous-stations mode « Dégradé 2 » SS1 HS.....	36
Figure 3.6. Zones d’action des sous-stations mode « Dégradé 2 » SS2 HS.....	37
Figure 3.7. Zones d’action des sous-stations mode « Dégradé 2 » SS3 HS.....	37
Figure 3.8. Le second transformateur étant en réserve (sous tension à vide).....	37
Figure 3.9. Le second transformateur étant en en charge (en mode normal) .....	38
Figure 3.10. Mode dégradé 2.....	38
Figure 3.11. Distance d’isolement statique entre les parties sous tensions d’un isolateur et l’équipement mis à la terre.....	42
Figure 3.12. Détermination de la zone neutre .....	44
Figure 3.13. Une portée de caténaire .....	45
Figure 3.14.a. Raccordement des hauteurs du plan de contact.....	46
Figure 3.15. Répartition des pendules pour une portée de 49,5 m .....	48
Figure 3.16. Longueur d’un pendule <i>l</i> . ....	49
Figure 3.17. La flèche du fil de contact au niveau d’un pendule. ....	49
Figure 3.18. La flèche du fil de contact au niveau d’un pendule .....	50
Figure 3.19. Différentes charges supportées par les pendules .....	50
Figure 3.20. Réactions aux suspensions du porteur, cas sans dénivelé.....	51
Figure 3.21. Réactions aux suspensions du porteur, cas avec dénivelé .....	51
Figure 3.22. Battement maximal du Fil de contact.....	59

---

Figure 3.23. Paramètres pour la détermination de $C_t(z)$ aux alentours des collines .....	60
Figure 3.24. Pose d'un canton caténaire en pleine voie.....	64
Figure 3.25. Support simple 25 KVa .....	65
Figure 3.26. Portique souple 25 KVa pour 3 à 5 voies de services .....	66
Figure 3.27. Type de pose en alignement.....	66
Figure 3.28. Type de pose en courbe .....	67
Figure 3.29. Type de pose sous ouvrage ou passerelle.....	68
Figure 3.30. Type de pose sur appareil de voie .....	69
Figure 3.31. Type de pose en jonction.....	69
Figure 3.32. Equipement tendeur .....	71

---

**Liste des tableaux**


---

Tableau 1.1. Récapitulatif de différents gabarits limites .....	9
Tableau 2.1. Emplacements des heurtoirs.....	27
Tableau 2.2. Emplacements des TJD.....	27
Tableau 2.3. Emplacements des appareils de voie.....	28
Tableau 2.4. Voies à électrifier. ....	29
Tableau 2.5. Caractéristique de la caténaire .....	30
Tableau 3.1. Valeurs de la pente en fonction de la vitesse, type de la caténaire et la portée.....	47
Tableau 3.2. Caractéristique des pendules.....	48
Tableau 3.3. Forces de contact limites.....	53
Tableau 3.4. Tension maximale admissible par le fil de contact.....	54
Tableau 3.5. Tension maximale admissible par le fil porteur.....	55
Tableau 3.6. Caractéristiques du CdPA .....	56
Tableau 4.1. Rayon de l'axe du PK SNTF 170+040 au PK 172+530.....	76
Tableau 4.2. Pente de l'axe de tracé du PK SNTF 170+040 au PK 172+530 (cf : Annexe B).....	76
Tableau 4.3. Rayon de l'axe de tracé du PK 0+000 au PK 0+900.....	76
Tableau 4.4. Pente de l'axe de tracé du PK 0+000 au PK 0+900 (cf : Annexe C).....	76
Tableau 4.5. Portée réels de la flèche .....	77
Tableau 4.6. Portées à min et à max en fonction des rayons .....	78
Tableau 4.7. Valeurs de la flèche maximale.....	79
Tableau 4.8. Flèches $f_i$ des pendule la portée 63 m.....	80
Tableau 4.9. Flèches $f_i$ des pendule la portée 58,5 m.....	80
Tableau 4.10. Flèches $f_i$ des pendule la portée 54m.....	80
Tableau 4.11. Flèches $f_i$ des pendule la portée 49,5 m.....	81
Tableau 4.12. Flèches $f_i$ des pendule la portée 45 m.....	81
Tableau 4.13. Flèches $f_i$ des pendule la portée 40,5 m.....	81
Tableau 4.14. Flèches $f_i$ des pendule la portée 36 m.....	81
Tableau 4.15. Flèches $f_i$ des pendule la portée 31,5 m.....	82
Tableau 4.16. Flèches $f_i$ des pendule la portée 27 m.....	82
Tableau 4.17. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 63 m.....	83
Tableau 4.18. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 58,5 m.....	83
Tableau 4.19. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 54 m.....	83
Tableau 4.20. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 49,50 m .....	84
Tableau 4.21. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 45,00 m .....	84
Tableau 4.22. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 40,50 m .....	84
Tableau 4.23. Les charges $R_i$ supportées par les pendules de la portée 36 m.....	85

---

---

Tableau 4.24. Les charges $Ri$ supportées par les pendules de la portée 31,50 m .....	85
Tableau 4.25. Les charges $Ri$ supportées par les pendules de la portée 27m.....	85
Tableau 4.26. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 63 m.....	86
Tableau 4.27. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 58,5 m.....	86
Tableau 4.28. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 54 m.....	86
Tableau 4.29. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 49,5m.....	87
Tableau 4.30. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 45 m.....	87
Tableau 4.31. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 40,5 m.....	87
Tableau 4.32. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 36 m.....	87
Tableau 4.33. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 31,5 m.....	88
Tableau 4.34. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 27 m.....	88
Tableau 4.35. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 63 m .....	88
Tableau 4.36. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 58,5 m .....	89
Tableau 4.37. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 54 m .....	89
Tableau 4.38. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 49,5 m .....	89
Tableau 4.39. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 45 m .....	90
Tableau 4.40. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 40,5 m .....	90
Tableau 4.41. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 36 m .....	90
Tableau 4.42. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 31,5 m .....	90
Tableau 4.43. Les longueurs des pendules $i$ de la portée 27 m .....	91
Tableau 4.44. Résumé des différentes longueurs des pendules, des flèches de câble porteur en fonction des longueurs des portées. ....	92

---

# Listes des Acronymes et Symboles

## Acronymes

- AC : Alternatif Courant ;
- AP : Appareil de Voie ;
- APD : Etudes d'Avant-Projet Détaillé ;
- BV : Bâtiment Voyageurs ;
- C.d.T.E : Câble de terre enterré ;
- CDPA : Câble de protection Aérien ;
- CPS STG : Cahier des Prescriptions Spéciales Spécifications Techniques Générales ;
- CPS STP : Cahier des Prescriptions Spéciales Spécifications Techniques Particulières ;
- E : Encombrement ;
- EPSF : Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire ;
- H : Heurtoir ;
- Pk : Point Kilométrique ;
- R : Rayon de courbure ;
- R' : Rayon instantané ;
- R.N.V : Règlement Neige et Vent ;
- SST : Sous Station
- TJD : Traversée Jonction Double ;
- T : Tension du fil de contact ;
- V : Vitesse ;
- Vref : Vitesse de référence du vent ;

## Symboles

- $a$  : Longueur de la portée ;
- $a_{max}$  : Portée maximale ;
- $c_{max}$  : Déplacement maximale du au vent, y compris l'effet du désaxement ;
- $C_c$  : Coefficient de trainée du conducteur ;
- $C_t$  : Coefficient de topographie ;
- $C_i$  : Masse des pendules  $i$  ;
- $Cr(z)$  : Coefficient de rugosité ;

- 
- $D_M$  : *Déplacement causé par le mouvement longitudinal de la console ;*
  - $D_t$  : *Rang de température en ( $^{\circ}$ ) ;*
  - $e$  : *Elasticité (mm/N) ;*
  - $F_{Bmin}$  : *Effort de traction minimum d'un fil porteur ;*
  - $F_c$  : *Force de tension du fil de contact (kN) ;*
  - $f_i$  : *Flèche du fil de contact au niveau du pendule  $i$  ;*
  - $F_p$  : *Flèche en pointe du poteau ;*
  - $f_{pi}$  : *Fleche de câble porteur au niveau du pendule  $i$  ;*
  - $F_s$  : *Force de tension du câble de support (kN) ;*
  - $F_w$  : *Charge maximale de traction admissible ;*
  - $G_c$  : *Facteur de corrélation aux rafales ;*
  - $I_v$  : *Intensité de la turbulence ;*
  - $K_{Wer}$  : *Facteur d'usure admissible ;*
  - $K_{clamp}$  : *Facteur des raccords de l'extrémité ;*
  - $K_{eff}$  : *Précision de tension et le facteur d'efficacité ;*
  - $K_{ice}$  : *Facteur de la glace ;*
  - $K_{joint}$  : *Facteur des raccords soudés ;*
  - $K_{load}$  : *Facteur des charges supplémentaires ;*
  - $K_{radius}$  : *Rayon de courbure minimal ;*
  - $K_t$  : *Coefficient de terrain (rugosité) ;*
  - $K_{temp}$  : *Facteur de la température maximale ;*
  - $K_{wind}$  : *Facteur des charges du vent ;*
  - $K$  : *Coefficient de dilatation thermique de  $17 \times 10^{-6}$  ;*
  - $L_i$  : *Longueur d'un pendule  $i$  ;*
  - $M_L$  : *Mouvement latéral maximal de la console ;*
  - $m_{fc}$  : *Masse du fil de contact ;*
  - $m_p$  : *Masse du câble porteur ;*
  - $q_p$  : *Pic de la pression dynamique*
  - $R_c$  : *Rayon de giration de la console ;*
  - $R_i$  : *Charges supportées par le " $i$ " éme pendule ;*
  - $T_{max}$  : *Température maximale du conducteur, en  $^{\circ}C = +80^{\circ}C$  ;*
-

- $T_{mil}$  : *Température ambiante moyenne, en °C = 25°C ;*
  - $T_{min}$  : *Température ambiante minimale, en °C = -20 °C ;*
  - $V_c$  : *Vitesse de circulation ;*
  - $V_p$  : *Vitesse de propagation ;*
  - $Z_0$  : *Paramètre de rugosité du terrain ;*
  - $Z_{fd}$  : *Tension mécanique du fil de contacte a 12 kN ;*
  - $Z_{ts}$  : *Tension mécanique du câble porteur à 12 kN ;*
  - $\sigma_{min}$  : *Effort de traction minimum d'un fil de contact rainuré ;*
  - $\sigma_w$  : *Charge maximale de traction admissible ;*
  - $\emptyset$  : *Pente du versant au vent ;*
  - $\alpha$  : *Coefficient de dilatation thermique du fil de contact ( $17 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ) ;*
-

# INTRODUCTION GENERALE

---

Le rail constitue un mode de transport incontournable du moment qu'il apporte une réponse moderne et adaptée aux enjeux économiques et écologiques, permettant le déplacement de personnes et de marchandise avec une grande vitesse, capacité et meilleure sécurité.

Dans ces perspectives, un grand plan de modernisation du rail en Algérie a été déclenché, l'Agence Nationale d'Étude et de Suivi des Investissements Ferroviaires (A.N.E.S.R.I.F.) en sa qualité de maître d'ouvrage délégué, est chargée de mettre en œuvre et d'assurer le suivi et la conduite de la réalisation des programmes d'investissements ferroviaires [1].

Les pouvoirs publics ont fait le choix de lancer des plans de nouvelles réalisations, réhabilitation et de modernisation des infrastructures ferroviaires existantes, et ce dans le cadre du programme complémentaire de soutien à la relance et à la croissance économique du pays, comme option optimale aux enjeux envisagés à moyen et long terme.

Les moyens et les investissements engagés, permettront de rénover l'ensemble des voies existantes, d'en créer d'autres et de les électrifier, d'acquérir de nouveaux équipements en matériel roulant, de signalisation, télécommunication ainsi qu'en moyens d'installations électriques.

Parmi ces investissements on trouve la ligne de chemin de fer Beni-Mansour/Bejaia ; sa situation stratégique lui permet de jouer un rôle prépondérant dans la relance, le soutien et la dynamisation des activités économiques dans toute la wilaya de Bejaia, en étant un pôle régional économique avéré, le potentiel industriel et touristique concourant à la consolidation de son développement économique en particulier et à son essor à l'échelle nationale en général.

Alors le projet de doublement de la voie ferrée et rectification de tracé de la voie existante sur un linéaire de 87 km a été inscrit et lancé dont les objectifs sont :

- L'augmentation de la vitesse de circulation à 160 km/h.
- Réduction du temps de parcours des trains.
- Augmentation de la capacité de la ligne.
- Optimisation de la sécurité et de la qualité de service.

Parmi plusieurs gares ferroviaires projetées le long de ce projet stratégique, la gare mixte de Beni Mansour, considérée comme le point de départ (Pk 0+000) dudit projet, et qui joue un rôle primordial

dans le trafic ferroviaire de la rocade nord Algérienne. C'est ainsi que cette gare aie notre intérêt, dont l'objectif est son étude d'électrification, par la caténaire simple 160 km/h, sous tension de 25 000 volts, courant alternatif 50 Hz.

Pour ce faire, le présent document est réalisé suivant une décomposition de quatre chapitres :

- Le premier chapitre destiné à l'ensemble de la terminologie ferroviaire, définitions et expressions y afférentes à l'électricité, la géométrie, la structure...etc, que nous pouvons explorer le long de notre travail, et/ou qui sont relatives au dimensionnement des installations caténaire qu'on établira au long de cette étude.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la description de la gare de Beni Mansour objet de l'étude de ce mémoire, en vue de limiter le périmètre de la conception. Les référentiels applicables et les normes en vigueur feront l'objet d'un listing, et la solution envisagée de la caténaire à construire et ses caractéristiques générales, le moyen d'alimentation et le système de fourniture d'énergie seront également détaillés.
- Le dimensionnement des sous stations pour répondre à la demande de consommation de la ligne en différents régime (normal, critique) sera traité au niveau du chapitre n°03. Aussi, les constituants de la caténaire feront l'objet de calculs et les résultats devront répondre aux exigences techniques contractuelles et normatives décrétées par les organismes nationaux ou internationaux spécialisés.
- Le développement final sera l'objectif du dernier chapitre, où des plans techniques types ou détaillés seront réalisés tenant compte des paramètres exigés et des résultats obtenus.

Enfin, nous achèverons ce travail par une conclusion générale qui retrace l'ensemble de notre travail, et les perspectives envisagées toujours dans ce domaine d'électrification ferroviaire.

# Chapitre 01

## GENERALITES ET DEFINITIONS

---

### 1.1. Introduction

La filière des chemins de fers comme toute autre entité a un son propre vocabulaire, il est généralement lié à deux classifications ; infrastructure et superstructure.

D'une part l'infrastructure composée de bâtiments (gares, dépôts, ateliers...), d'ouvrages d'arts (pont, viaducs, tunnels...), de passages à niveau..., et d'autres part les systèmes nécessaires à la circulation des trains ; soit des équipements d'instruction au mécanicien (conducteur du train) appelés aussi signalisation ferroviaire et/ou installations de traction électrique (sous stations, feeder, caténaires...) indispensables au déplacement des engins.

Ce chapitre est destiné à répertorier l'ensemble de définitions, de différentes expressions et de la terminologie utilisées et ou à entrecroiser le long de ce travail.

### 1.2. Généralités et définitions

#### 1.2.1. La voie ferrée

La voie ferrée est formée de deux files de rails posés sur des traverses, du matériel de signalisation, et des installations de la traction électriques. Quant à la voie elle seule, elle est constituée de la plateforme, ballast ; traverses (bois, métallique ou béton) et du rail.

Le matériel roulant circule communément en convois, appelé trains ou rames. Les convois sont tractés par des locomotives, ou sont autotractés (on parle alors de rame automotrice).

#### 1.2.2. Un réseau ferroviaire

Un réseau ferroviaire est un ensemble de lignes de chemin de fer, de gares et d'installations techniques divers (atelier, dépôts, triages, embranchements particuliers, chantiers intermodaux...) qui permet la circulation de convois ferroviaires ou trains dans un ensemble géographique donné.

#### 1.2.3. Circulation du train

Contrairement aux véhicules, le train circule dans un sens obligatoire qu'est la gauche. Alors, les signaux à demeure sont normalement implantés à gauche de la voie à la laquelle ils s'adressent, ou au-dessus de cette voie.

### 1.2.4. La numérotation des installations

La numérotation des installations se fait par ordre impair pour le sens normal (gauche), et du côté droit de la voie pour le contre-sens pour le cas d'une voie unique ou double voies banalisées.

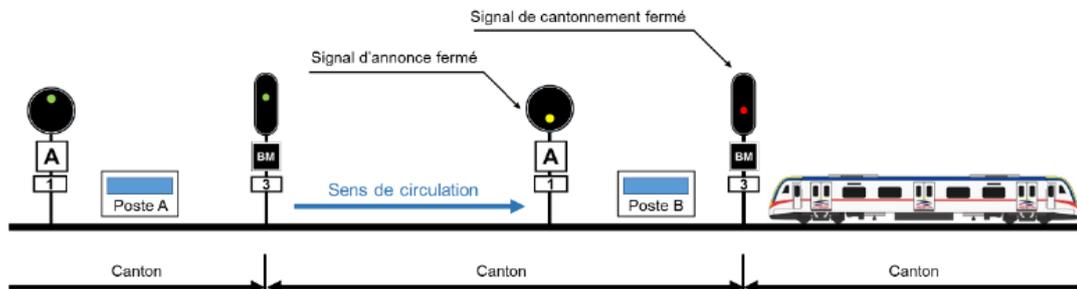


Figure 1.1. Divers repères s'adressant aux mécaniciens.

### 1.2.5. Les rails

Les rails sont de longues barres d'acier profilées, qui mises bout à bout servent à former un chemin de fer. Les rails servent à la fois de guide et de support de roulement pour les véhicules, les surfaces de contact roue -rail sont d'ordre de  $\text{cm}^2$ .

### 1.2.6. L'écartement

L'écartement est la distance mesurée entre les deux joues internes du champignon de rail, il existe différentes normes d'écartement des rails qui sont :

L'écartement standard : 1435 mm qui est le plus répandu ;

L'écartement ibérique : 1674 mm (Espagne, Portugal) ;

L'écartement russe : 1520 mm (Russie, Biélorussie, Ukraine, etc.) ;

L'écartement irlandais : 1600 mm (Irlande).

Il existe aussi des réseaux secondaires à voie métrique (1000 mm ou 1067 mm)

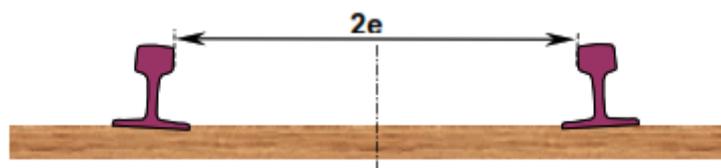


Figure 1.2. Ecartement du rail.

### 1.2.7. Le ballast

Le ballast est le lit de pierres sur lequel repose une voie de chemin de fer. Son rôle est de transmettre les efforts engendrés par le passage des trains au sol, sans que celui-ci ne se déforme par tassement. Il sert aussi à enchâsser (ajuster) les traverses afin d'assurer une résistance aux déformations longitudinales (particulièrement important pour la technique des longs rails soudés).

### **1.2.8. Les traverses**

Les traverses assurent la transmission de la charge au ballast, et le maintien de l'écartement et de l'inclinaison des rails. De bois (généralement du chêne), d'aciers (plus bruyants), ou de béton.

### **1.2.9. Les longs rails soudés ou LRS**

Les longs rails soudés ou LRS, appelés aussi « barres longues », constituent une méthode moderne de pose des voies ferrées dont l'intérêt est de supprimer la plupart des joints de rails sur des longueurs importantes, voir des kilomètres. Les barres longues sont produites en atelier par la soudure de rails élémentaires. Ces barres longues, dont la souplesse autorise le transport sur des rames de wagons plats, sont ensuite posées et soudées entre elles sur place par soudure aluminothermique.

L'effet de température engendre la dilatation du métal (contraintes de compression ou de tension) qui est contrariée dans ce système de pose, ce qui oblige d'installer des appareils de dilatation ou des joints à grands permissifs aux extrémités des rails, ce qui permettent aux rails de coulisser, tout en assurant sans hiatus la continuité du roulement [2].

### **1.2.10. Une gare**

Une gare est d'ordinaire un lieu d'arrêt des trains. Elle comprend diverses installations qui ont une double fonction :

Permettre la montée ou la descente des voyageurs, ou le chargement et le déchargement des marchandises ;

Pour certaines d'entre elles, assurer des fonctions de sécurité dans la circulation des trains.

### **1.2.11. Le tracé de la voie**

La géographie physique est à la base du tracé d'une voie ferrée. Leur construction est fonction des contraintes du relief. Les premières lignes ont suivi les vallées aux faibles pentes et au tracé sinueux, contrairement à nos jours où les engins moteurs disposent de capacités de traction bien supérieures, alors la tendance est plutôt du style " partout, de tous côtés ".

Le tracé est caractérisé par le " Profil " représentant la géométrie de la ligne suivant deux plans:

- Vertical : profil en LONG
- Horizontal : profil en PLAN (ou en travers).

### **1.2.11.1. Le Profil en long**

Le profil en long indique :

- La longueur de la ligne en Points Kilométriques (PK) et hectométriques
- L'altitude en mètres
- La déclivité qui exprimée en “ millimètres par mètre ” ou “ pour mille : ‰ ”, en étant :
  - Palier en horizontal
  - Rampe pour la montée
  - Pente pour la descente

### **1.2.11.2. Le Profil en plan**

Le profil en plan indique la trajectoire de la ligne, qui peut être en :

- Alignement : voie en ligne droite
- Courbe
- Contre-courbe : courbe en sens inverse succédant à une courbe.

Les courbes sont caractérisées par leur rayon en mètres.

## **1.2.12. Les catégories de profils**

Selon la géographie, le profil des lignes de chemin de fer se classe en trois catégories :

### **1.2.12.1. Profil de plaine**

Le tracé suit le relief peu accentué des grands espaces ; les courbes sont rares et de grand rayon, supérieur à 1000 m autorisant des vitesses élevées. Les déclivités présentent de faibles gradients, jusqu'à 5 ‰.

### **1.2.12.2. Profil accidenté**

Le tracé suit les vallées sinueuses et franchit les “ accidents ” du relief : seuils, cols, défilés. Les rayons de courbes sont faibles : entre 500 et 1000 m. Les déclivités sont prononcées supérieures à 5 ‰ pouvant atteindre les 10 à 15 ‰.

### **1.2.12.3. Profil exceptionnel de montagne**

Tous les axes ferroviaires traversant les massifs montagneux appartiennent à cette catégorie. Courbes et déclivités atteignent des valeurs exceptionnelles :

- 250 à 300 m de rayon
- Rampes de 25, 30, voire 40 ‰

Les contraintes du relief imposent fréquemment la construction d'ouvrages d'art imposants : ponts, viaducs, remblais, tranchés, tunnels.

### **1.2.13. Le gabarit**

Le gabarit définit l'enveloppe à l'intérieur de laquelle doit se situer le matériel roulant d'une part et les obstacles fixes par rapport à la voie d'autre part.

#### ***1.2.13.1. Le gabarit de matériel roulant***

Le gabarit de matériel roulant est caractérisé de deux manières :

##### **- Contour de référence cinématique**

Contour spécifique à chaque gabarit, représentant la forme d'une section transversale de l'espace et servant de base commune à l'élaboration des règles de dimensionnement de l'infrastructure d'une part et du matériel roulant d'autre part.

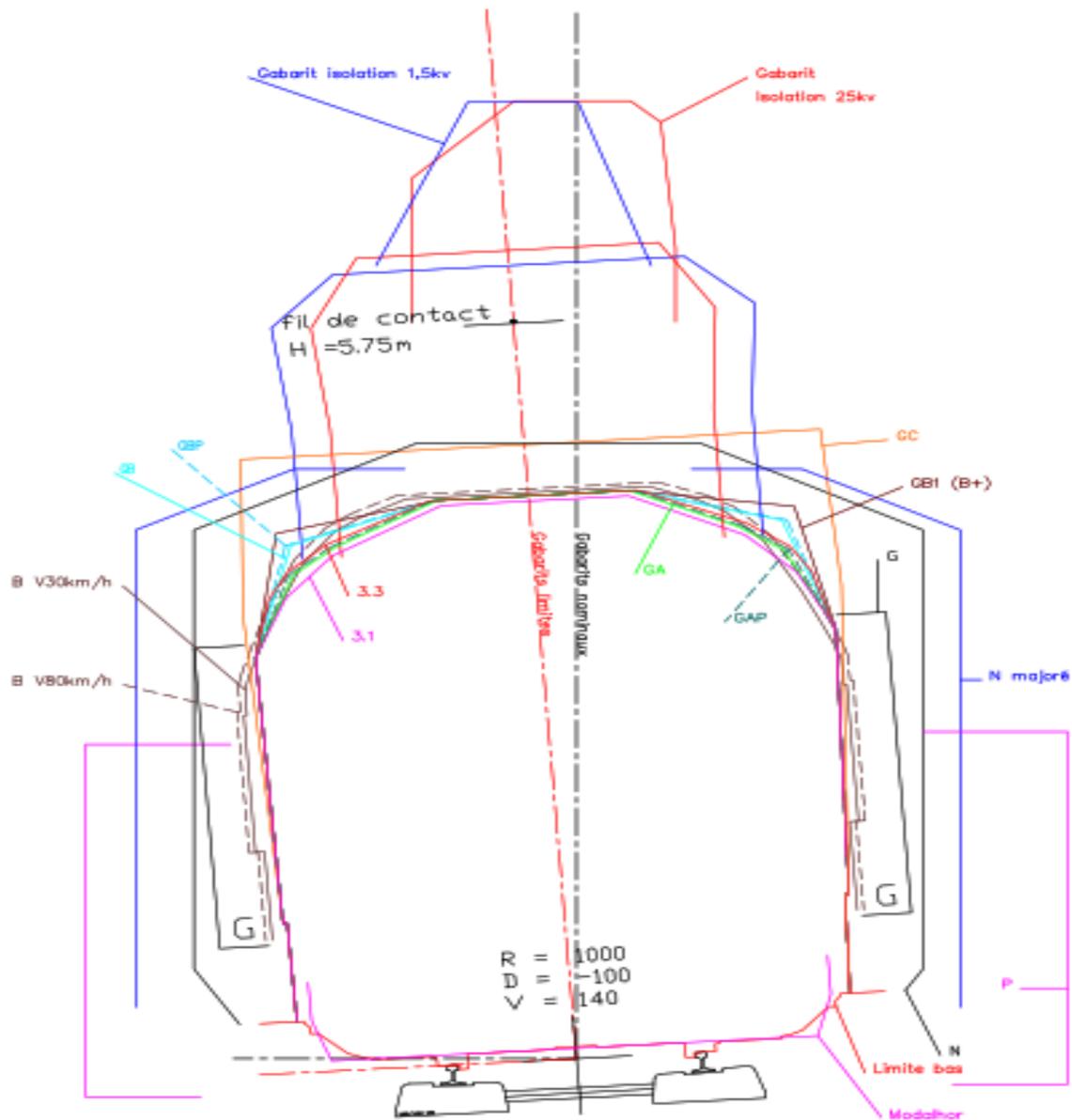
##### **- Contour de référence statique**

Contour de référence cinématique ne tenant pas compte du rebond dynamique des suspensions ni des oscillations verticales des véhicules en circulation.

#### ***1.2.13.2. Le gabarit d'obstacles***

Le gabarit d'obstacles concerne les installations fixes propres au chemin de fer et celles qui sont situées à proximité (bâtiments, etc..). Ce gabarit tient compte non seulement du matériel roulant mais aussi des transports dits " exceptionnels" acheminés par voie ferrée (gabarit " B+ " permettant le passage des transports de conteneurs ou véhicules routiers). Il intègre les distances d'isolement nécessaires aux installations de traction électrique.

L'Union Internationale des Chemins de fers (UIC) a défini un gabarit pour les voies à écartement standard (1,435m), toutefois chaque réseau ou continent dispose de son propre gabarit : gabarit américain, G européen, G russe.



**Figure 1.3. Principaux gabarits utilisés [3]**

Ces gabarits largement utilisés sont extraits du document de la SNCF appelé « Gabarits Principes Fondamentaux » Version 02 du 09/04/2013. Ci-dessous, les exigences de hauteurs et de contour des gabarits limitant.

**Tableau 1.1. Récapitulatif de différents gabarits limites [3]**

Gabarit de vérification limite	Hauteur maximale	Hauteur de La corne *	Contour de référence L x H	Construction / Chargement L x H	Observations
3.1	4,36 m	3,25 m	3,29 x 4,35 m	Gabarit international de chargement 3,15 x 4,28 m	Toutes les lignes du RFN à quelques rares exceptions près (Massif Central, ...)
GA	4,40 m	3,25 m	3,29 x 4,35 m	Notamment : - Conteneurs de $h \leq 8'6\frac{1}{2}"$ - Semi-remorques Novatrans - Conteneurs 8' 6" x 9' 6" sur wagon multi fret à plancher surbaissé	Englobe le gabarit 3.1. C'est le gabarit minimum à considérer dans les études.
FR 3.3 (ex)3.3	4,40 m	3,25 m	3,29 x 4,35 m	Véhicules à 2 niveaux,	Véhicules à 2 niveaux, Englobe le G.
G. B	4,40 m	3,25 m	3,29 x 4,35 m	Notamment : - Semi-remorques dont la hauteur des rives/plans de chargement est $\leq 3,75$ m sur wagon poche - Conteneurs 8' x 9' 6"	Englobe le G qui peut être obtenu en sous-produit.
G.B.1	4,40 m	3,25 m	3,29 x 4,35 m	Notamment : - Semi-remorques dont la hauteur des rives/plans de chargement est $\leq 3,85$ m sur wagon poche - Conteneurs 8' x 9' 6"	Englobe le G.B.
G.C	4,80 m	3,58 m	3,29 x 4,70 m	Véhicules routiers 2,50 x 4,00m sur wagon abaissé à 0,65 m $h = 4,65$ m	Englobe le G.B.1 soit tous les gabarits limites. Il a été défini dans le cadre de l'UIC pour permettre le ferroutage (route roulante)
<b>Gabarits limites particuliers</b>					
FR 3.4.1 (ex 3.4) FR 3.4.2 G2	4,48 m 4,58 m 4,73 m	3,53 m	3,29 x 4,68 m	3,15 x 4,40 m 3,15 x 4,50 m 3,15 x 4,65 m	Ces différents gabarits limites permettent la circulation en transit sur certaines lignes de l'ancien réseau Alsace Lorraine et Belfort, Mulhouse et Pontarlier les Verrières : Cf article 27 de l'IN 0162 (ex NG EF 1 C 3 n°1)
Enveloppe B				Matériels militaires ayant une largeur $> 3,15$ m	Permet l'acheminement de matériels militaires, en temps de crise.

\* Point le plus saillant d'un gabarit, il est notamment pris en compte dans le calcul de l'entraxe limite.

### **1.3. Les installations électriques (Installations fixes - Lignes aériennes de contact pour la traction électrique)**

Cette partie sera consacrée à la définition de différentes installations électriques fixes, lignes aériennes de contact et équipements auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement d'une installation de traction électrique [4].

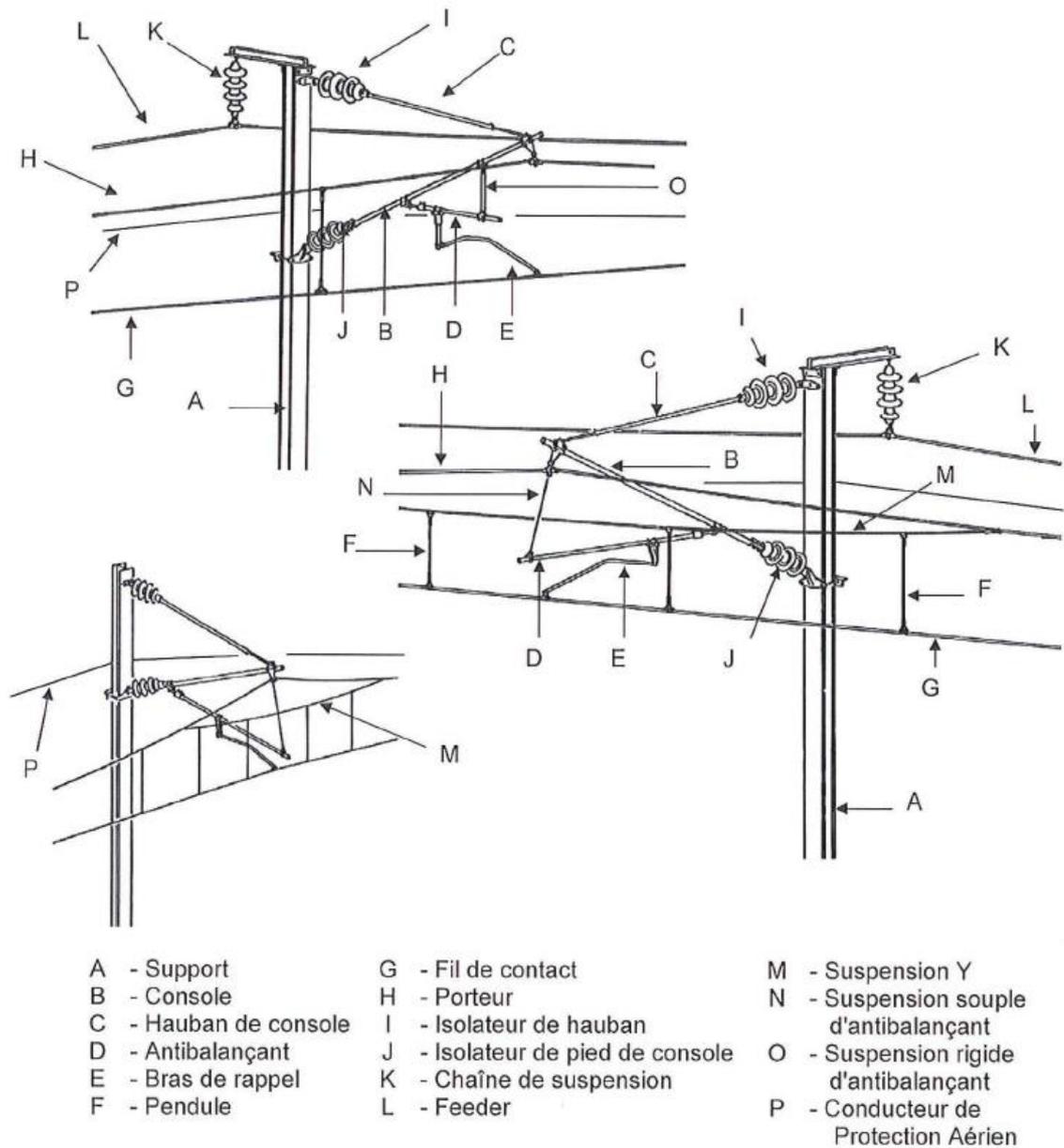
#### **1.3.1. Système de ligne de contact**

Système de ligne de contact est le réseau de support et ligne de contact alimentant en énergie électrique les véhicules au travers des équipements de captage du courant.

Le système mécanique peut comprendre :

- La ligne de contact ;
- Des structures et des fondations ;
- Des supports et tous composants soutenant ou positionnant les conducteurs ;
- Des suspensions transversales ;
- Des feeders parallèles d'alimentation, des feeders négatifs et d'autres lignes comme des câbles de terre et des conducteurs de retour de courant, y compris des transformateurs survolteurs, dans la mesure où ils sont soutenus par les structures du système de ligne de contact ;
- Les feeders transversaux d'alimentation ;
- Les sectionneurs ;
- Les dispositifs de protection contre les surtensions ;
- Des conducteurs reliés en permanence à la ligne de contact pour alimenter d'autres appareils électriques tels que l'éclairage, la signalisation, le contrôle, le chauffage ;
- Tout autre matériel nécessaire au fonctionnement de la ligne de contact.

La figure ci-après montre l'ensemble de la structure, les supports et tous les composants qui constituent le système mécanique d'un support caténaire 25 000 volts.



**Figure 1.4. Équipement d'un support caténaire 25 000 volts [5].**

La ligne électrique destinée à alimenter des unités motrices en énergie électrique, par l'intermédiaire d'organes de prise de courant. Cela comprend tous les conducteurs pour le captage du courant, les barres conductrices et rails de contact, y compris :

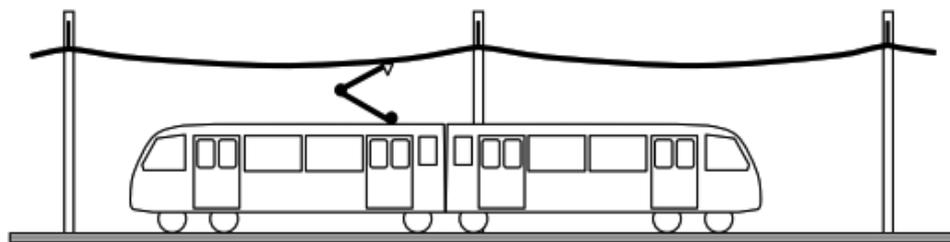
- . Les lignes de renforcement ; les raccords électriques ; les dispositifs de sectionnement ; les appareils tendeurs ;
- . Les supports qui ne sont pas isolés des conducteurs ; les isolateurs reliés aux parties sous tension ;
- . Les fils de contact ; les câbles porteurs longitudinaux ; les câbles porteurs auxiliaires ;
- . Les câbles à Y ; les pendules de ligne caténaire.

### 1.3.2. Système de ligne aérienne de contact [6]

Système de ligne de contact utilisant une ligne aérienne de contact pour alimenter des unités motrices en courant

#### 1.3.2.1. Ligne aérienne de contact

Ligne aérienne de contact destinée à alimenter des véhicules en énergie électrique par l'intermédiaire d'organes de prise de courant et constituée par des conducteurs placés au-dessus ou à côté de la limite supérieure du gabarit des véhicules.



*Figure 1.5. Ligne de contact aérienne*

La ligne aérienne de contact peut être de construction souple ou rigide.

- Ligne aérienne de contact souple : ligne aérienne de contact constituée de fils de contact souples.
- Ligne aérienne de contact rigide : ligne aérienne de contact constituée de profilés rigides

#### 1.3.2.2. Rail de contact

Rail de contact métallique est fixé sur des supports isolés destiné à s'interfacer avec un appareil de prise de courant monté sur le véhicule

#### 1.3.2.3. Caténaire inclinée (Système)

La caténaire inclinée est la ligne aérienne de contact dans laquelle le ou les fils de contact sont suspendus au porteur par des pendules inclinés, de façon que le câble porteur longitudinal et le fil de contact ne se trouvent pas sur un plan vertical en l'absence d'une charge de vent

#### 1.3.2.4. Armement

Armement est un assemblage de composants fixés à la structure de support principale qui soutient et positionne la ligne aérienne de contact.

### **1.3.2.5. Surhaussement vertical**

Le surhaussement vertical est la marge ajoutée au contour de référence pour tenir compte de déclivités de voie reliées entre elles par des courbes verticales d'un rayon donné

### **1.3.2.6. Équipement tendeur**

L'équipement tendeur est le dispositif destiné à maintenir la tension mécanique des conducteurs dans les paramètres de conception du système

### **1.3.2.7. Dispositif de sectionnement**

Le dispositif de sectionnement est un dispositif assurant la division d'une ligne aérienne de contact en sections ou circuits. Les dispositifs de sectionnement incluent les isolateurs de section et les sections neutres.

### **1.3.2.8. Isolateur de section**

L'isolateur de section est le point de sectionnement comportant des isolateurs insérés dans une suite continue de lignes de contact, et comprenant des patins ou des dispositifs analogues destinés à maintenir un contact électrique continu avec l'appareil de prise de courant

### **1.3.2.9. Section de séparation ; section neutre**

La section de séparation est la section de ligne de contact pourvue à chaque extrémité d'un point de sectionnement, de façon à éviter l'interconnexion par les appareils de prise de courant, de deux sections électriques successives pouvant présenter des différences de tension, de phase ou de fréquence.

### **1.3.2.10. Sectionneur**

Le sectionneur est un appareil de connexion qui assure, en position d'ouverture, une distance de sectionnement satisfaisant à des conditions spécifiées.

Un sectionneur peut être un appareil de coupure en charge ou à vide.

Les interrupteurs-sectionneurs et les sectionneurs de terre sont des types de sectionneurs.

### **1.3.2.11. Longueur de la portée, portée horizontale**

La portée est la distance horizontale entre les points d'accrochage du conducteur sur deux supports consécutifs

### **1.3.2.12. Anti-cheminement**

L'anti cheminement est le point central d'un canton de pose de la ligne aérienne de contact, où les conducteurs sont immobilisés pour contrôler leur déplacement dans l'axe de la voie.

### **1.3.3. Conducteurs**

#### ***1.3.3.1. Ligne parallèle d'alimentation***

La ligne parallèle d'alimentation est le conducteur aérien monté sur la même structure que la ligne aérienne de contact pour assurer des points d'alimentation successifs.

#### ***1.3.3.2. Câble porteur longitudinal***

Le câble porteur est le conducteur longitudinal supportant soit directement, soit indirectement, le ou les fils de contact.

#### ***1.3.3.3. Fil de contact***

Le fil de contact est un conducteur électrique d'une ligne aérienne de contact sur lequel appuie l'appareil de prise de courant et qui comporte deux rainures longitudinales qui permettent d'y fixer les pendules

#### ***1.3.3.4. Ligne de renforcement***

La ligne de renforcement est un conducteur aérien monté le long de la ligne aérienne de contact et directement relié à celle-ci à des intervalles fréquents

La ligne de renforcement augmente la section effective de la ligne aérienne de contact.

#### ***1.3.3.5. Ligne d'alimentation***

La ligne d'alimentation est un conducteur aérien monté parallèlement ou en parallèle avec la ligne de contact, soit pour assurer des points d'alimentation successifs, soit pour en augmenter la section utile.

#### ***1.3.3.6. Bretelle***

La bretelle est une courte longueur de conducteur(s), sans tension mécanique, destinée à assurer la liaison électrique entre au moins deux conducteurs ou autres appareils électriques.

### **1.3.4. Circuit de retour**

#### ***1.3.4.1. Circuit de retour étendu***

Le circuit de retour est une partie du circuit d'alimentation de traction qui assure le retour du courant des charges (véhicules ou autres équipements) à la source. En cas de contact entre une partie sous tension et le circuit de retour, le disjoncteur doit s'enclencher.

Les conducteurs peuvent être soit :

- Les rails de roulement ;

- Les rails de retour de courant ;
- Les conducteurs de retour ;
- Les câbles de retour ;
- Le conducteur de retour du transformateur survolteur.

#### ***1.3.4.2. Circuit de retour***

Le circuit de retour est un sous-ensemble du circuit de retour étendu, où le contact est permis en conditions de service normal et de défaut. La phase à la terre d'un réseau d'alimentation de traction en courant alternatif triphasé peut être considérée comme un circuit de retour.

#### ***1.3.4.3. Système à retour par la voie***

Système à retour par la voie est un système dans lequel les rails de roulement de la voie constituent une partie du circuit de retour du courant de traction.

#### ***1.3.4.4. Conducteur de retour***

Le fil de retour est un conducteur parallèle au système à retour par la voie, et connecté aux rails de roulement à intervalles réguliers.

#### ***1.3.4.5. Rail de retour de courant***

Rail de retour de courant est un rail de contact utilisé pour écouler le courant de retour de traction à la place des rails de roulement.

#### ***1.3.4.6. Conducteur de retour du transformateur survolteur (retour BT)***

Le Conducteur de retour du transformateur survolteur (retour BT) est un ensemble isolé de conducteurs de retour qui est nécessaire pour le fonctionnement d'un transformateur survolteur.

#### ***1.3.4.7. Câble de retour***

Le câble de retour est un conducteur branché sur les rails de roulement ou sur toute autre partie du circuit de retour et raccordé à la sous-station d'alimentation.

#### ***1.3.4.8. Courant de retour de traction***

Le courant de retour de traction est la somme des courants qui sont renvoyés à la source d'alimentation, à la sous-station ou aux véhicules équipés de systèmes de freinage par récupération. Cela peut également inclure la charge injectée par les systèmes de traction pour alimenter les systèmes de chauffage, les auxiliaires, etc.

### **1.3.5. Electricité**

#### ***1.3.5.1. Tension nominale <d'une installation>***

La tension nominale est la valeur de la tension par laquelle l'installation électrique ou une partie de l'installation électrique est désignée et identifiée. La tension de la ligne de contact peut être différente de la tension nominale dans des proportions conformes aux tolérances admises par l'EN 50163.

#### ***1.3.5.2. Section d'alimentation***

La section d'alimentation est la section électrique de l'itinéraire alimentée par des disjoncteurs individuels du circuit de voie à l'intérieur de la zone alimentée par une ou plusieurs sous-stations.

#### ***1.3.5.3. Liaison équipotentielle fonctionnelle***

La liaison équipotentielle fonctionnelle est une liaison équipotentielle réalisée à des fins fonctionnelles autres que la sécurité.

#### ***1.3.5.4. Court-circuit***

Le court-circuit est un chemin conducteur accidentel ou intentionnel entre deux ou plusieurs parties conductrices forçant les différences de potentiel électriques entre ces parties conductrices à être nulles ou proches de zéro.

#### ***1.3.5.5. Courant permanent assigné***

Le Courant permanent assigné est la capacité nominale de la ligne aérienne de contact assignée au courant de la ligne aérienne de contact rapportée aux autres paramètres opérationnels du système.

#### ***1.3.5.6. Point d'alimentation***

Le point d'alimentation est le point au niveau duquel le système d'alimentation est relié à la ligne de contact.

#### ***1.3.5.7. Sectionnement***

Le sectionnement est une fonction destinée à assurer la mise hors tension de tout ou partie d'une installation électrique en séparant l'installation électrique ou une partie de l'installation électrique, de toute source d'énergie électrique, pour des raisons de sécurité.

### 1.3.6. Différents états du circuit électrique [5]

#### 1.3.6.1. Circuit à vide

Le circuit à vide est un circuit sans débit appréciable de courant électrique.

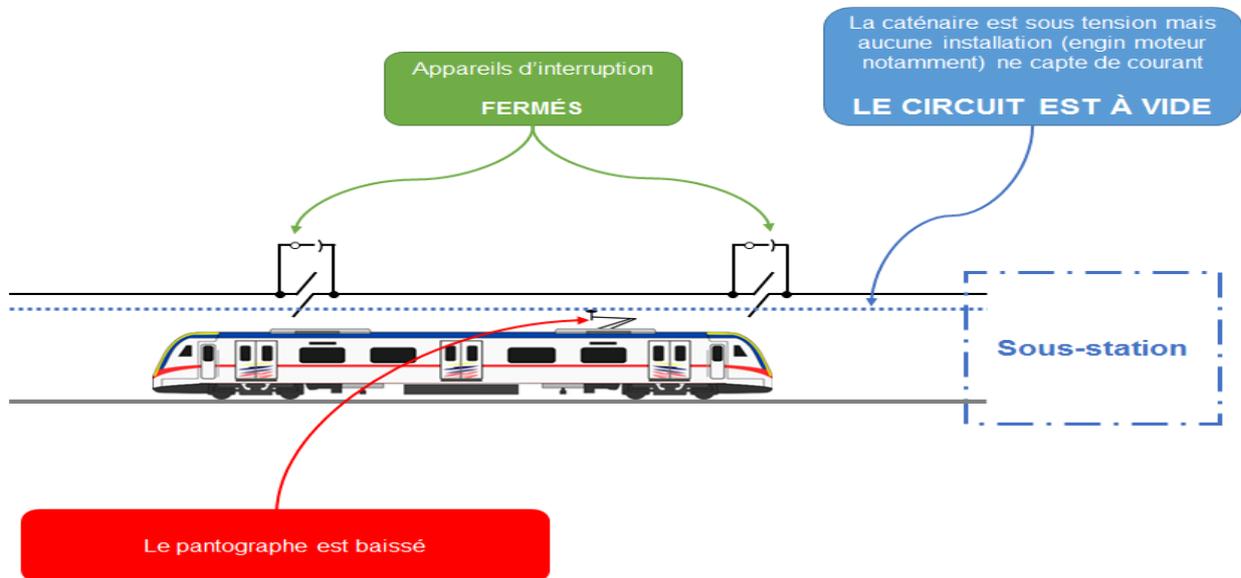


Figure 1.6. Installation sous tension circuit à vide

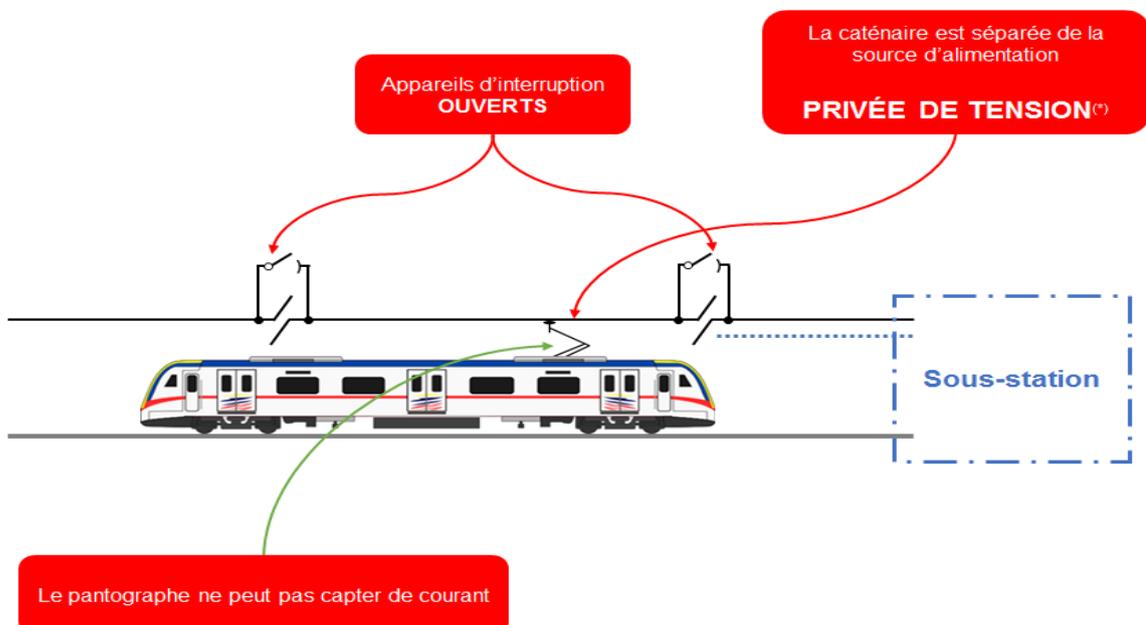


Figure 1.7. Installation privée de tension

### 1.3.6.2. Circuit en charge :

Le circuit en charge est circuit dans lequel s'opère un débit de courant électrique.

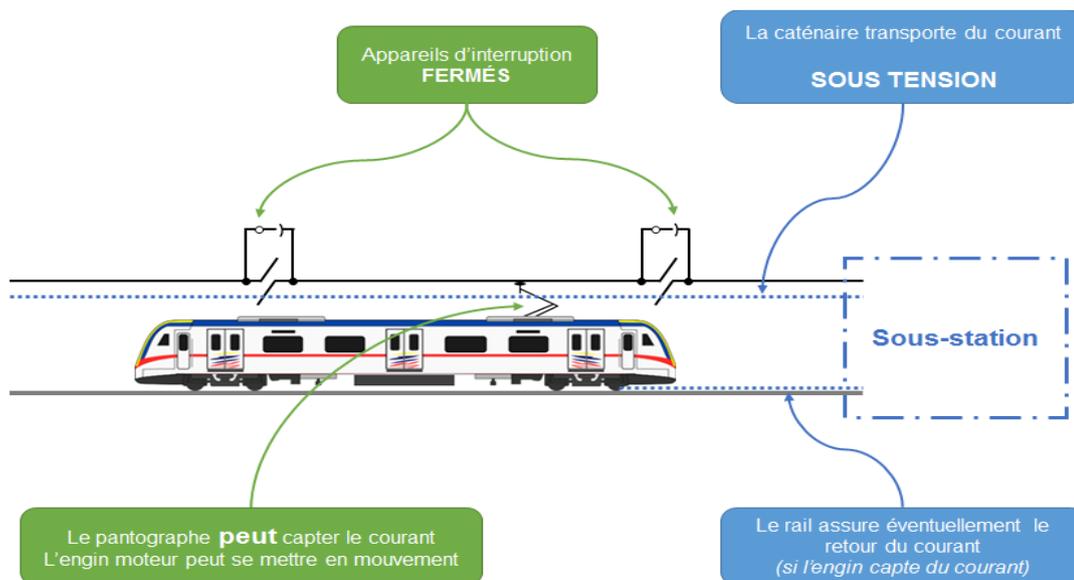


Figure 1.8. Installation sous tension

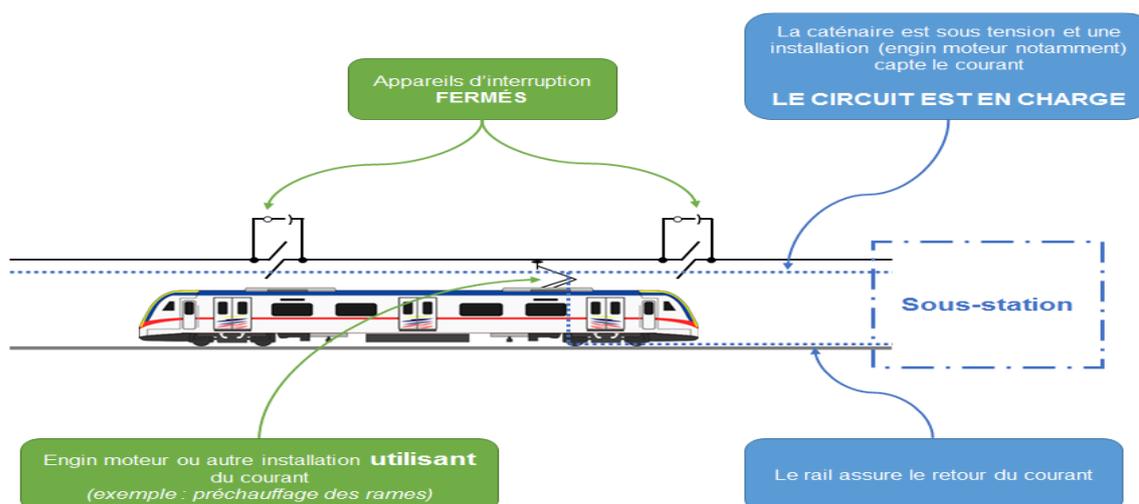


Figure 1.9. Installation sous tension circuit en charge

## 1.3.7. Géométrie

### 1.3.7.1. Canton de pose

Le canton de pose est la longueur de la ligne aérienne de contact entre deux points d'ancrage.

### 1.3.7.2. Pente <de la ligne aérienne de contact>

La pente est le rapport de la différence mesurée entre la hauteur de la ligne aérienne de contact au-dessus du plan des rails (ou la surface de la route pour les systèmes de lignes aériennes de contact des trolleybus) au droit de deux supports successifs et la longueur de la portée.

### ***1.3.7.3. Hauteur du fil de contact***

La hauteur de fil de contact est la distance entre le dessus du rail ou la surface de la route et la face inférieure du fil de contact. La hauteur du fil de contact est mesurée perpendiculairement à la voie ou à la surface de la route.

### ***1.3.7.4. Hauteur minimale du fil de contact***

La hauteur minimale de fil de contact est la valeur minimale possible de la hauteur du fil de contact dans la portée afin d'éviter, quelles que soient les conditions, un amorçage ou un contact entre un ou plusieurs fils de contact et les véhicules.

### ***1.3.7.5. Hauteur minimale théorique du fil de contact***

La hauteur minimale théorique du fil de contact est la hauteur théorique du fil de contact tenant compte des tolérances, étudiée pour respecter la hauteur minimale du fil de contact en toutes circonstances.

### ***1.3.7.6. Hauteur nominale du fil de contact***

La hauteur nominale du fil de contact est la valeur nominale de la hauteur du fil de contact au-dessus du rail au support dans des conditions normales. La hauteur nominale du fil de contact s'applique lorsqu'il n'y a aucune contrainte et correspond à la hauteur à laquelle revient le fil de contact après avoir été ajusté pour le franchissement sous/sur obstacles (passage à niveau, passage supérieur, etc.).

### ***1.3.7.7. Hauteur maximale du fil de contact***

La hauteur maximale du fil de contact est la hauteur maximale possible du fil de contact au-dessus du rail que le pantographe doit atteindre en toutes conditions.

### ***1.3.7.8. Hauteur maximale théorique du fil de contact***

La hauteur maximale théorique du fil de contact est la hauteur théorique du fil de contact tenant compte des tolérances, mouvements, etc. étudiée pour ne pas dépasser la hauteur maximale du fil de contact.

### ***1.3.7.9. Soulèvement du fil de contact***

Le soulèvement du fil de contact est le déplacement vertical ascendant du fil de contact dû à l'effort produit par le pantographe

### **1.3.8. Fondations**

#### ***1.3.8.1. Fondation en dalle***

La fondation en dalle est un type de fondation constituée de « semelles » en béton de forme rectangulaire, carrée et parfois circulaire qui supporte les charges ponctuelles localisées telles que les structures de lignes aériennes de contact. Les fondations en dalle sont généralement peu profondes et réalisées par excavation et remblai.

#### ***1.3.8.2. Fondation sur pieux <pour l'équipement d'une ligne aérienne de contact>***

La fondation sur pieux est la fondation à grand élancement réalisée sans excavation. La fondation peut être de section circulaire ou non, et est réalisée par forage, perforation et/ou martelage.

Fondation qui est suffisamment souple pour absorber à la fois la rotation et les déformations dans le pieu, qui est soumis à des charges horizontales ou à des moments de retournement.

#### ***1.3.8.3. Fondation par massif***

La fondation par massif est une fondation normalement constituée d'un seul bloc de béton dans lequel sont noyés les poteaux ou les tiges de scellement de la structure du système de ligne aérienne de contact. La superficie de la fondation assure la force résistive nécessaire pour supporter les moments de retournement exercés par le système de ligne aérienne de contact.

### **1.3.9. Structures**

#### ***1.3.9.1. Coefficient de traînée***

Le coefficient de traînée ou appelé coefficient de traînée aérodynamique coefficient de force, est un facteur utilisé pour étudier la forme d'un objet exposé au vent, la pression du vent étant multipliée par ce facteur afin de calculer l'effet du vent

#### ***1.3.9.2. Facteur partiel***

Le facteur partiel est le coefficient de sécurité partiel. Facteur utilisé pour multiplier les charges caractéristiques afin de calculer les charges théoriques du côté charge (facteur partiel de charge) de l'équation permettant de vérifier la résistance adéquate des composants ou afin de diviser la résistance caractéristique du côté matériau (facteur partiel de matériau).

Il convient de remplacer les facteurs partiels par les coefficients de sécurité appliqués dans les méthodes de conception utilisées précédemment.

Le facteur partiel d'une action prend en compte la possibilité d'écarts défavorables par rapport à la valeur caractéristique des actions, d'erreurs de modélisation et d'incertitudes dans l'évaluation des effets des actions.

Le facteur partiel d'une propriété de matériau est un facteur qui prend en compte les écarts défavorables par rapport à la valeur caractéristique des propriétés de matériaux, l'application de facteurs de conversion erronés, ainsi que les incertitudes dans les propriétés géométriques et le modèle de résistance.

#### ***1.3.9.3. Structure maillée***

La structure maillée est une structure d'interconnexions disposées selon un motif régulier et qui présente un taux de remplissage (rapport de la somme des aires projetées des éléments de la structure sur l'aire de la surface circonscrite) inférieur ou égal à 0,6.

#### ***1.3.9.4. Superstructure***

La superstructure est une extension vers le haut d'une structure existante au-dessus du niveau du sol (également appelée infrastructure). Ce terme s'applique aux différents types de structures physiques, par exemple poteaux LAC, murs de soutènement et ponts.

#### ***1.3.9.5. Structure d'ancrage d'anti cheminement***

La structure d'ancrage d'anti cheminement est la structure située au point d'anti cheminement d'un canton de pose de la ligne aérienne de contact qui assure la fonction d'un ancrage d'anti cheminement.

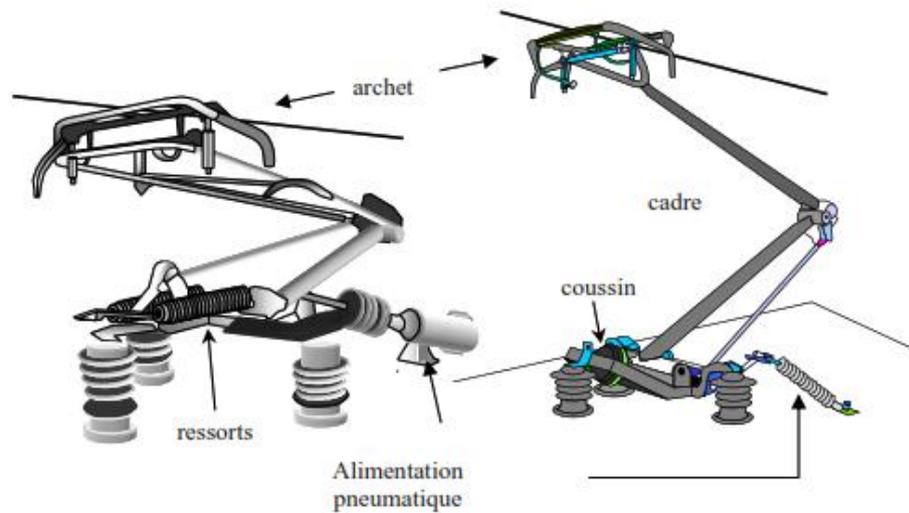
### **1.3.10. Appareils de prise de courant**

#### ***1.3.10.1. Appareil de prise de courant***

L'appareil de prise de courant est appareil porté par un véhicule et destiné à capter le courant sur le fil ou sur le rail de contact.

#### ***1.3.10.2. Pantographe***

Le pantographe est appareil de prise de courant sur le ou les fils de contact, constitué par un système articulé prévu pour permettre une translation verticale de la semelle de pantographe [7].



*Figure 1.10. Deux exemples de pantographes*

### **1.3.10.3. Gabarit des pantographes**

Le gabarit des pantographes est le contour de référence accompagné de ses règles associées permettant de vérifier que l'archet en position de captage reste à l'intérieur de l'espace qui lui est alloué.

## **1.4. Conclusion**

Dans ce présent chapitre l'ensemble de la terminologie ferroviaire, définitions et différentes expressions liées à l'électricité, la géométrie, la structure...etc, que nous pouvons explorer le long de notre travail, ou qui ont une relation avec le dimensionnement des installations qu'on établira dans notre étude, ont été passées en revue, et ont fait l'objet d'une explication ou d'un éclaircissement, tout en se référant aux différents référentiels techniques normalisés, notamment à la norme française EN 50-119 d'avril 2020 qui s'applique aux lignes aériennes de contact des réseaux ferrés lourds ou légers, des trolleybus ainsi qu'aux réseaux industriels (publics ou privés), et aussi aux nouvelles constructions de lignes aériennes de contact, et qu'à la rénovation de portions de lignes existantes.

Le prochain chapitre il sera abordé une description du travail objet de notre étude, qui est la gare de Beni Mansour, ainsi que les données d'entrées nécessaires le cas échéant. Les normes et les techniques applicables dans le cas d'une étude d'électrification par caténaire simple 160 km/h, courant alternatif (CA) monophasé 50 Hz, seront également évoquées.

# Chapitre 02

## DESCRIPTION, DONNEES D'ENTREE ET NORMES APPLICABLE

---

### 2.1. Introduction

La gare de Beni Mansour qui est une gare mixte (Voyageur- Marchandise), est située à l'Ouest de la wilaya de Bejaia et l'Est de la wilaya de Bouira, elle est considérée comme l'origine du projet de doublement de la voie ferrée de la ligne Beni-Mansour/Bejaia.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une liste non exhaustive des références normatives auxquelles devons se référer, le type d'électrification en relation avec le projet et le type de caténaire.

Une description générale de la gare en termes d'infrastructure, du périmètre de l'étude à réaliser en ce mémoire, et ce en considération des données d'entrées collectées auprès du maitre d'ouvrage délégué (ANESRIF), ou chez son assistant technique, le bureau de contrôle et suivi des travaux.

### 2.2. Description du projet

La nouvelle ligne ferroviaire entre les villes de Beni Mansour et de Bejaia conçue en double voies pour assurer un trafic mixte, tout en desservant des gares et haltes intermédiaires. Cette conception a été projetée pour maintenir le flux de voyageurs de la ligne actuelle (existante) et de servir les villes les plus importantes de la vallée de la Soummam.

Le dimensionnement effectué, en phase Avant-Projet Détaillé, dans le cadre de l'étude du plan de transport de la ligne, fait ressortir un trafic ferroviaire important ; une capacité de 1 728 voyageurs assis et 4.716 voyageurs debout par heure dans les deux sens de circulation, soit un total de 10.368 voyageurs assis et 28.296 voyageurs debout par jour d'exploitation en heure de creuse. Si on ajoute les voyageurs des derniers trains directs, la capacité totale de voyageurs en heures creuse est de 10.944 personnes assises et 29.868 debout. A rajouter à cette capacité, celle liée au transport de marchandise qui sera de 3.000 t par heure et 18.000 t par journée d'exploitation. Ce trafic permettrait de convoier 6,570 millions de tonnes de marchandises en une année.



*Figure 2.1. Synoptique de la ligne Beni Mansour/Bejaia*

### 2.3. Références normatives

L'étude devra répondre aux normes et recommandations en vigueur ou exigées. Elles se composent essentiellement, sans que cela ne soit limitatif, des normes et réglementations suivantes :

- Définition des prix, mode de mesurage, partie électrification ;
- Cahier des prescriptions spéciales spécifications techniques générales (CPS STG) ;
- Cahier des prescriptions spéciales spécifications techniques particulières (CPS STP) ;
- Mission C1. Études d'avant-projet détaillé APD, Parties II : Etude d'électrification ;
- Gabarits principes fondamentaux, Version 02 du 09/04/2013.
- Document pédagogique de l'Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire (EPSF), Les installations de traction électrique Edition 01 du 21.02.2019 ;
- UIC 505-1 OR. Matériel de transport ferroviaire. Gabarit de construction du matériel roulant ;
- UIC 600 OR. Traction électrique avec ligne de contact aérienne ;
- UIC 606-1 OR. Conséquences de l'application des gabarits cinématiques définis par les fiches UIC 505 sur la conception du système caténaire ;
- UIC 606-2 OR. Etablissement des lignes de contact 25 Kilovolts en 50 ou 60 Hz ;
- UIC 737-4 R. Dispositions pour limiter les perturbations des installations à courants faibles par la traction électrique (en particulier organes à thyristors) ;
- UIC 793 R. Modes opératoires pour le montage mécanisé des lignes aériennes de contact ;
- UIC 794 O. Interaction entre caténaire et pantographe dans le réseau européen à grande vitesse ;
- EN 50119 Applications ferroviaires, installations fixes, lignes aériennes de contact pour la traction électrique ;

- EN 50121-1 Applications Ferroviaires. Compatibilité Électromagnétique. Partie 1 : Général ;
- EN 50121-2 Applications Ferroviaires. Compatibilité Électromagnétique. Partie 2 : Émission du système ferroviaire complet au monde extérieur ;
- EN 50121-3-1 Applications Ferroviaires. Compatibilité Électromagnétique. Partie 3-1 : Matériel roulant. Train et véhicule complet ;
- EN 50121-3-2 Applications Ferroviaires. Compatibilité Électromagnétique. Partie 3-2 : Matériel roulant. Appareils ;
- EN 50121-5 Applications Ferroviaires. Compatibilité Électromagnétique. Partie 5 : Appareils et Installations fixes pour la fourniture d'énergie ;
- EN 50122-1 Applications ferroviaires, installations fixes, 1ère partie : mesures de protection relatives à la sécurité électrique et à la mise à la terre ;
- EN 50122-2 Applications ferroviaires, installations fixes, partie 2 : mesures de protection contre les effets des courants vagabond issus de la traction électrique à courant continu ;
- EN 50124-1 Applications ferroviaires, coordination de l'isolement, partie 1 : prescriptions fondamentales, distances d'isolement dans l'air et lignes de fuite ;
- EN 50124-2 Applications ferroviaires, coordination de l'isolement, surtensions et protections associées ;
- EN 50126 Applications ferroviaires - Spécifications et démonstration de la sûreté de fonctionnement, fiabilité, disponibilité, maintenance et sécurité (FDMS) ;
- EN 50149 Applications ferroviaires. Installations fixes. Cuivre et alliages de cuivre pour fil de contact rainuré ;
- CEI EN 50160 Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution ;
- EN 50163 Applications ferroviaires. Tensions d'alimentation des réseaux de traction
- EN 50206 Applications Ferroviaires. Pantographes ;
- EN 50317 Applications Ferroviaires. Systèmes de captage de courant. Demandes et validation de mesures de l'interaction dynamique entre ligne Aérienne Contact et pantographe ;
- EN 50318 Applications Ferroviaires. Système de captage de courant. Validation de la simulation de l'interaction dynamique entre Ligne Aérienne Contact et Pantographe ;
- EN 50367 Applications ferroviaires. Installations fixes. Critères techniques pour l'interaction entre pantographe et ligne aérienne de contact ;
- EN 21145 Guide aux limites de température de court-circuit des câbles électriques de tension assignée au plus égale à 0,6/1 Kv ;

- 2008/284/CE Décision de la commission du 6 mars 2008 concernant une spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système énergie du système ferroviaire transeuropéen à grand vitesse ;
- Directive 96/48/CE du Conseil, relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen de haute vitesse ;
- Correction d'erreurs de la Décision 2002/733/CE de la Commission, sur la spécification technique d'interopérabilité (ETI) relative au sous-système « Énergie » du système ferroviaire trans-européen de haute vitesse mentionnée dans le paragraphe 1 de l'article 6 de la Directive 96/48/CE ;
- IEC 38 Standard Voltages ;
- IEC 56 Medium – voltage circuit – breaker interrupting ratings – unstated short – circuit considérations ;
- IEC 129 Specification for A.C. Disconnectors (isolators) and Earthing Switches of Rated Voltage above 1 kV ;

## **2.4. Données d'entrée**

### **2.4.1. Description de la gare de Beni Mansour**

Par sa multimodalité et sa localisation, la gare de Beni Mansour est considérée comme une jonction des lignes ferroviaires de l'Est vers le Centre de la Rocade Nord ainsi que la pénétrante ferroviaire vers Bejaia, un trafic ferroviaire important émerge de parts les lignes existantes (Thénia-BBA/Bejaia-BBA/Thénia-Bejaia) en ce lieu, ce trafic sera considérablement remarquable à l'issue de la réalisation des lignes projetées qui desservent cette gare à savoir :

- Tronçon Alger-Thénia-Beni Mansour.
- Tronçon Beni Mansour Bordj Bou Arreridj.
- Tronçon Beni Mansour Bejaia.

### **2.4.2. Périmètre de la gare**

La gare de Beni-Mansour s'étend sur environ 2 325 m, l'axe du bâtiment voyageurs (BV) est considéré comme le Pk 0+000 du projet BMR-Bejaia, l'appareil de transition de la voie existante au raccordement de la ligne projetée Thénia/Bordj Bou Arreridj, de tangente 1/12, se trouve à environ 1, 330 km du côté Est, soit au Pk Sntf 172+530.

Du côté de Bouira un autre appareil 1/12 est implanté à 995 m de l'axe du bâtiment voyageurs, soit au Pk Sntf 170+205.

Quant à la voie allant vers Bejaia, un appareil de tangente 1/9 est implanté au Pk 0+750 pour assurer la transition de la double voie vers l'unique voie projetée dans le la phase actuelle du projet.

### 2.4.3. Données d'entrée de la gare

La gare se trouvait sur un palier de profil 0/00, elle est constituée d'un ensemble d'installations reprises ci-après, et ce selon le plan de voie révision D du mois de Décembre 2022 :

- 30 appareils de voie se trouvant à l'intérieur de la gare répartis comme suit :
  - 10 de type : 54 E1 300 1/9
  - 15 de type : 54 E1 190 1/7
  - 3 de type : 54 E1 500 1/12
  - 02 de type : TJD (traversée jonction double).
- 01 de type : 54 E1 300 1/9
- 02 de type : 54 E1 190 1/12
- 31 garages fronts
- 14 voies entre les principales et celles dédiées aux services, dont la longueur utile varie de 151 m jusqu'à 650 m.
- Quatre (04) quais dont la longueur du quai n°1 est de 300 m et de 225 pour les quais n°2, 3 et 4.
- Entraxe de 9,30 m entre les voies de quais, et 4,2 m pour les voies de services.

Tous les appareils de voie se trouvant à l'intérieur de la gare sont implantés selon le sens des points kilométriques, leurs emplacements sont indiqués dans les tableaux ci-dessous, et repris sur le plan de voie de la gare de Beni-Mansour [8].

**Tableau 2.1. Emplacements des heurtoirs**

Heurtoir N°	PK
H1	171+ 848
H2	0+419
H3	0+706

**Tableau 2.2. Emplacements des TJD**

N° App	Type d'Appareil	PK
TJD 1	UIC-54 TJD tg 1/9	0+273
TJD 2	UIC-54 TJD tg 1/9	0+313

**Tableau 2.3. Emplacements des appareils de voie**

N° App	Type d'Appareil	PK
1	54 E1 500 1/12 Déviation à Droite	171+ 780
2	54 E1 500 1/12 Déviation à Droite	171+ 689
3	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	171+ 682
5	54 E1 300 1/9 Déviation à Gauche	171+ 648
7	54 E1 190 1/7 Déviation à Droite	171+ 608
9	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 527
11	54 E1 300 1/9 Déviation à Gauche	171+ 520
13	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 550
15	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 579
17	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 439
19	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 408
21	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 380
23	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	171+ 348
24	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	0+100
25	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	0+079
26	54 E1 190 1/7 Déviation à Droite	0+127
28	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	0+145
30	54 E1 190 1/7 Déviation à Droite	0+152
32	54 E1 190 1/7 Déviation à Droite	0+177
34	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	0+196
35	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	0+196
36	54 E1 190 1/7 Déviation à Droite	0+205
38	54 E1 190 1/7 Déviation à Gauche	0+232
40	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	0+248
42	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	0+267
44	54 E1 300 1/9 Déviation à Gauche	0+452
46	54 E1 300 1/9 Déviation à Droite	0+477
48	54 E1 500 1/12 Déviation à Droite	0+768

#### 2.4.4. Electrification requise

L'électrification requise pour la gare découle du type d'électrification déjà arrêté pour la ligne entière, ainsi que celle liée aux lignes ferroviaires adjacentes.

D'après le dimensionnement effectué en phase avant-projet détaillé (APD), la ligne sera alimentée au moyen d'un système de fourniture d'énergie du type 1x25 kV, 50 Hz, AC, comme c'est le cas de la ligne projetée Thénia-BBA. Il serait théoriquement envisageable de faire l'électrification de toute la gare, mais dans la situation actuelle, et compte tenu de la réalisation d'une seule voie sur le projet BMR-Bejaia, notre travail sera axé uniquement aux voies principales et celles de services nécessaires au garage des trains voyageurs, ou pour l'évitement des trains fret pour permettre le passage des trains voyageurs.

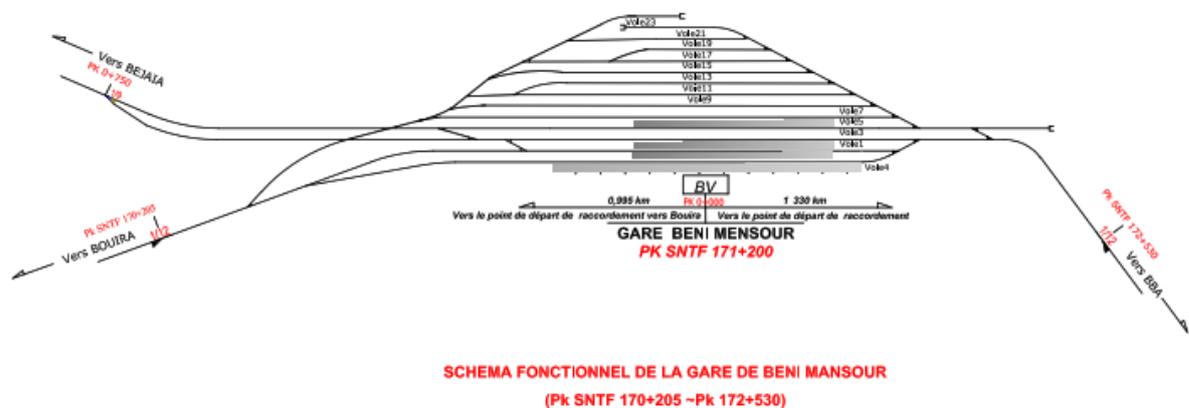
Pratiquement les voies répondant à la nécessité d'exploitation sont les 1-2-3-4 et 5 ainsi que la voie tiroir, le tableau suivant présente la longueur des voies à électrifier :

**Tableau 2.4. Voies à électrifier.**

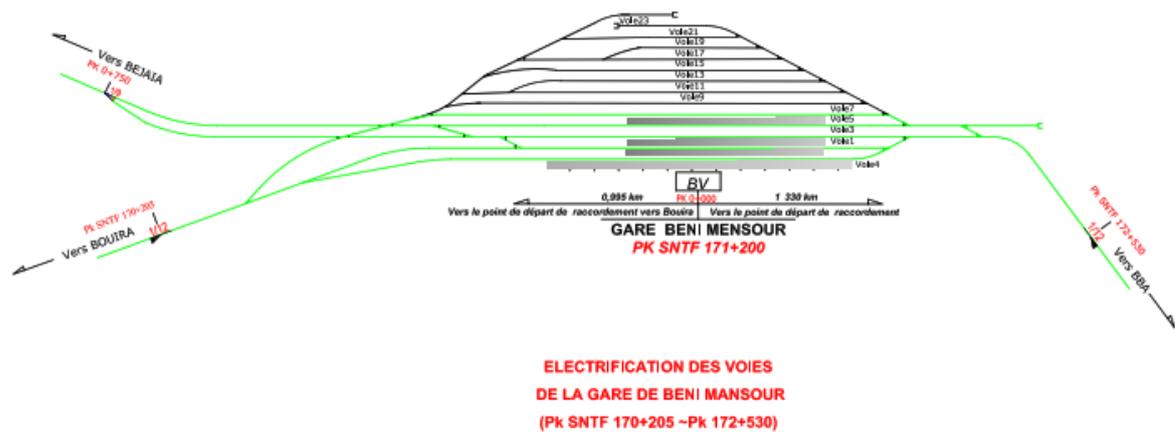
N° de Voie	Type de voie	Longueur utile (m)	Electrification (m)
Voie 1	Principale	545	2350
Voie 2	Service	407	407
Voie 3	Principale	650	1200
Voie 4	Service	480	480
Voie 5	Principale	584	1087
Voie TIROIR	Service	80	80

Ci-dessous deux schémas fonctionnels présentent :

- 1- L'ensemble de voies et d'appareils de voie de la gare de Beni Mansour,
- 2- L'ensemble des voies soient principales ou de services qui nécessitent l'électrification dans la situation actuelle, tout en allant au-delà de la gare, afin d'avoir une continuité d'exploitation



**Figure 2.2. Ensemble de voies et d'appareils de voie de la gare ferroviaire de Beni Mansour**



**Figure 2.3. Ensemble des voies (principales, services) à électrifier dans la situation actuelle**

#### 2.4.5. Solution adoptée

De manière générale, la caténaire à construire sera simple, polygonale avec bras de rappel, formée par un porteur et un fil de contact, et avec une régularisation automatique et indépendante de la tension mécanique, apte pour une vitesse de circulation jusqu'à 160 km/h. Les caractéristiques générales de la caténaire à utiliser sont détaillées dans le tableau suivant :

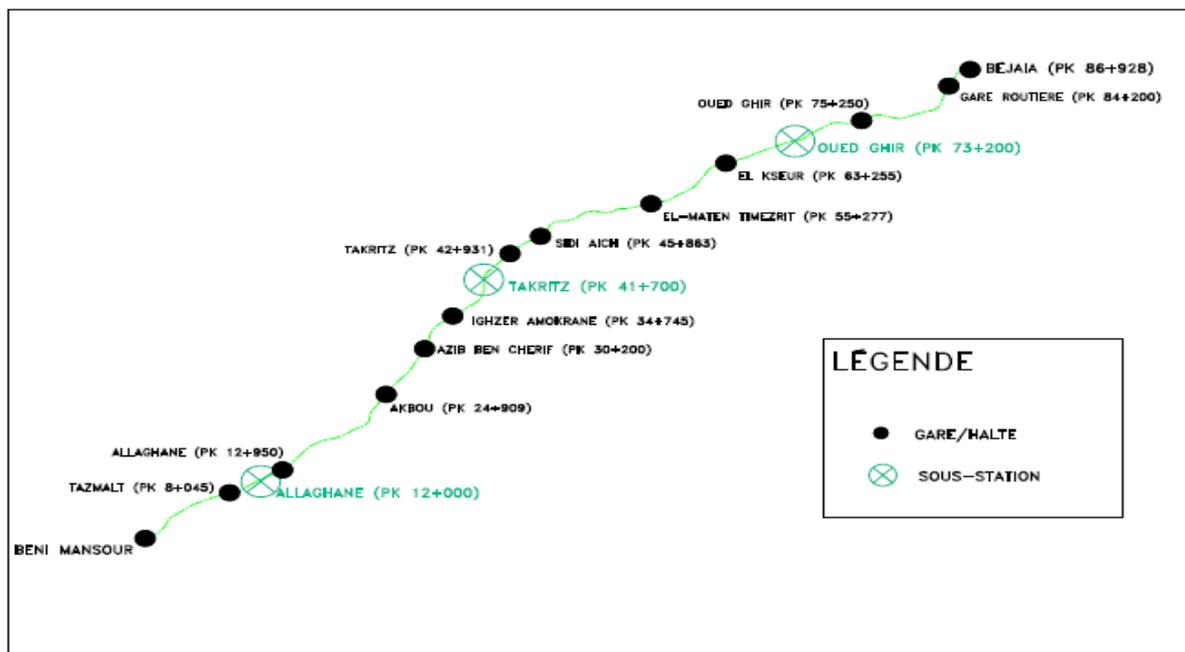
**Tableau 2.5. Caractéristique de la caténaire**

Fondations	Cylindriques
Poteaux indépendants	Profil H
Consoles	Tube d'aluminium
Fil de contact	Cu 107 mm <sup>2</sup>
Porteur	Bronze Bz II 70 mm <sup>2</sup>
Pendules	Bronze Bz II 12 mm <sup>2</sup>
Câble de retour	AISt 240 mm <sup>2</sup>
Charges de rupture de fil de contact	36.3 kN
Charge de rupture du porteur	38.64 kN
Charge de rupture du câble de retour	66.28 kN
Tension électrique	1x25 kv ca
Contrepoids	Fonte
Relation de compression	1 :3
Hauteur de caténaire voie générale	1,25 m

Hauteur de fil de contact	5.30 m
Désaxement	+/- 20 cm
Aiguilles aériennes	Tangentielles /Croisées
Portée maximum	63 m
Transition maximale entre porté	10 m
Sectionnement	3 portées (pour porter $\geq$ 50m) 4 portées (pour portée $<$ 50 m)
Longueur maximale de canton	1 400 m
Zone de séparation de phase	Zone 1 coté Bouira au-delà du PK 170+152. Zone 2 côté de Bejaia. Zone 3 coté BBA au-delà du PK 172+502.

Le dimensionnement électrique du projet BMR/Bejaia issu de la simulation électrique de la ligne effectué dans le cadre des études avant-projet détaillé, a fait ressortir le besoin de trois sous stations de traction reparties le long du tracé tel que présenté sur le synoptique de la ligne repris à la figure n°01 :

- Sous station d'Allaghane au P.K. 12+000
- Sous station d'Takirtz au P.K. 41+700
- Sous station d'Oued Ghir au P.K. 73+200.



*Figure 2.4. Plan de situation de la ligne Beni Mansour/Bejaia.*

L'alimentation de chacune des sous-stations est triphasée par des lignes aériennes à 220 kV, elle provient des sous-stations triphasées de distribution de Sonelgaz les plus proches.

## **2.5. Conclusion**

La gare de Beni Mansour est une gare importante de par sa localisation et les bifurcations qui l'engendrent. La description de ladite gare a été établie en vue de limiter le périmètre de l'étude objet de ce mémoire.

Les référentiels applicables et les normes en vigueur ont été répertoriés, et la solution de la caténaire à construire ainsi que ses caractéristiques générales au niveau de la gare ont été détaillées.

Quant à la caténaire, elle sera alimentée au moyen d'un système de fourniture d'énergie du type 1 x 25 kV, 50 Hz AC, où la sous stations de traction la plus proche à gare de Beni Mansour se trouve au PK 12+000. Les voies à électrifier ont été définies en fonction des besoins d'exploitation actuelle.

Le prochain chapitre sera consacré au dimensionnement et calculs justificatifs de caténaire, ainsi que les plans électriques types et de principes de la gare.

# Chapitre 03

## DIMENSIONNEMENT ET CALCULS JUSTIFICATIFS

### 3.1. Introduction

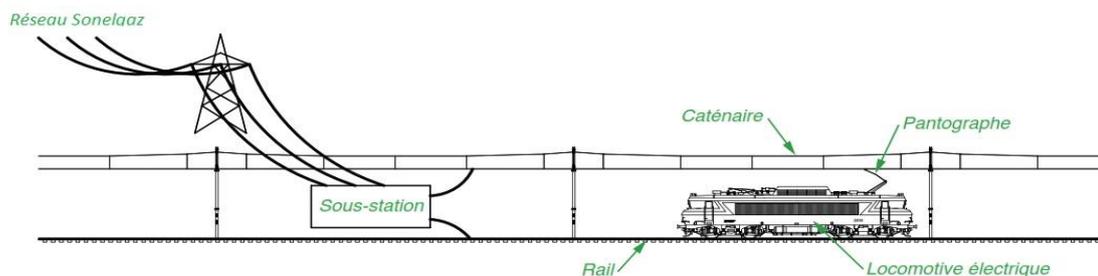
Après avoir consacré les deux premiers chapitres aux définitions et la terminologie employée dans le domaine ferroviaire, ainsi qu'au périmètre et précisions relatifs à la gare de Beni Mansour, objet de notre étude, dans le présent chapitre sera exposé les différents calculs justificatifs et dimensionnements d'une part du système d'alimentation adopté, et d'autre part de la caténaire et ses constituants.

Le choix du système d'énergie d'alimentation 1x25 Kv monophasé et l'adaptation des équipements aux besoins propres de la ligne reposent sur des calculs et une simulation faite par un logiciel spécialement dédié à ce genre d'études, dont la méthode et les résultats sont détaillés en ce travail. L'ensemble des caractéristiques et exigences portant sur les éléments constituant la caténaire sont soit à dénombrer, à calculer, et à justifier tout en tenant compte des recommandations et normes en vigueur, applicables au type de la caténaire choisie.

### 3.2. Dimensionnement et calculs justificatifs du système d'alimentation

#### 3.2.1. Systèmes d'alimentation 1 x25 kV et sous stations du projet

Dans le système 1x25 kV monophasé, la sous-station est une simple installation de transformation du niveau de tension propre du réseau triphasé d'alimentation de valeur 25 kV. Elle présente un transformateur monophasé (ou plus) dans lequel un des pôles du second est relié à la voie tandis que l'autre, possédant une tension de 25 kV par rapport à la terre, est relié aux conducteurs de contact.



**Figure 3.1. Système monophasé 1x 25 [09]**

La tension devant toujours retourner à sa source, elle rejoint le rail, lui-même raccordé à la sous station ; on parle de courant de retour de traction.

En résumé et pour faire simple, le courant entre dans la locomotive via pantographe, traverse la ligne de toiture, le disjoncteur, le transformateur, la chaîne de traction, puis repart par le bogie et les essieux.

Dans ce système, la tension fournie par la sous-station équivaut à la tension du matériel roulant, et tout le courant absorbé par le train, qui se trouve dans la section, parcourt le tronçon compris entre la sous-station et la position réelle du train.

En 25 kV, les sous-stations sont placées tous les 50 km voire tous les 20 km. Un rapprochement peut se faire entre elles, en montage ou dans le cas d'un trafic important où la puissance requise.

Afin de déterminer le besoin du projet en puissance, une démarche classique a été entreprise et qui consiste à :

- a- Déterminer la consommation par train le long de la ligne, en tenant compte de :
  - Données propres de la ligne (géométrie du tracé, vitesse et espacement, plan de circulation en période de pointe et en régime dégradé).
  - Données propres aux trains (Masse/longueur, caractéristique électrique et mécaniques, facteur de puissance).
  - Caractéristiques des sources haute tension,
  - Caractéristiques des circuits caténaux et de retour.
- b- Par usage d'un logiciel de conception et le dimensionnement d'alimentation électriques de traction, il est obtenu, par train, le profil de vitesses et de puissances consommées en chaque point de tracé de la ligne.
- c- Connaissant le plan de circulation des trains, il sera alors calculé la puissance totale des trains circulants le long du tracé, en période de pointe et en régime dégradé.
- d- Les sous-stations sont alors dimensionnées en tenant compte de la situation normale et de l'ensemble de cas critiques (mode dégradés) [10] :

➤ **Mode de fonctionnement normal**

Toutes les installations sont en mode normal de fonctionnement, les deux transformateurs de la sous-station sont en service ; tous les systèmes d'alimentation et circuits de retour de courant ainsi que les caténaux sont correctement (sans dérangement) reliés aux sous-stations.

➤ **Fonctionnement en mode dégradé de catégorie 1**

Il s'agit en général d'une défaillance d'un transformateur de traction d'une sous-station. La section concernée est alors alimentée par le deuxième transformateur de cette sous-station ou par un transformateur d'une sous-station adjacente, et ce, sans surcharge ni dépassement du

seuil admissible de déséquilibre fixé par la Sonelgaz et sans aucune restriction de l'exploitation ferroviaire.

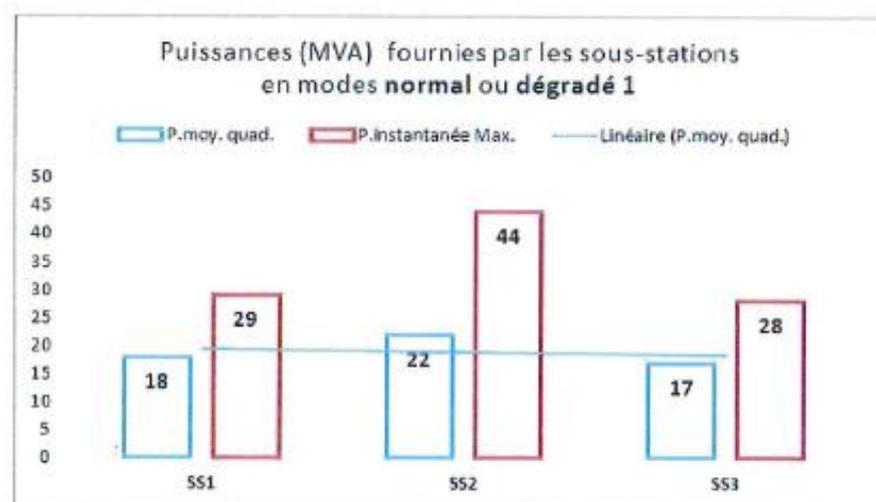
➤ **Fonctionnement en mode dégradé de catégorie 2**

C'est le cas d'une défaillance totale d'une sous-station de traction et les sections correspondantes sont alors alimentées par les deux sous-stations encadrantes ou par l'une d'elles (cas des sous-stations d'extrémité) et ce sans surcharge ni dépassement du seuil admissible de déséquilibre fixé par la Sonelgaz. L'exploitation ferroviaire doit être maintenue sans aucune restriction.

Pour le dimensionnement des sous stations, le cas plus défavorable qui est le mode dégradé 2 a été pris en compte. Les données techniques ayant servies aux calculs des besoins énergétiques de la ligne sont jointes en annexe A. Il est à signaler que la ligne étant subdivisée en trois (03) sections ou secteurs, des zones neutres ou de séparation (postes de sectionnement) ont été insérées pour séparer deux secteurs

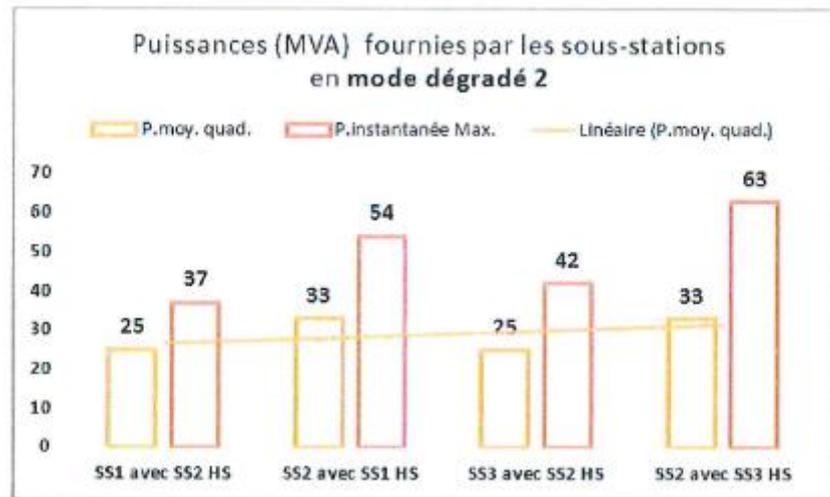
La simulation électrique pour chaque mode permet d'obtenir les puissances (et intensités) fournies par les transformateurs de chaque sous-station en chaque point, tout en vérifiant si elles sont suffisantes pour approvisionner les trains de la maille de circulation. Les transformateurs de traction doivent supporter au minimum les surcharges suivantes : 130%/120 mn, 160%/30 mn, 175%/15 mn, 200%/3,5 mn, 300%/1,5 mn. Les résultats obtenus sont repris ci-après [11] :

➤ **En mode normal ou dégradé 1**



**Figure 3.2. Mode normal ou dégradé 1**

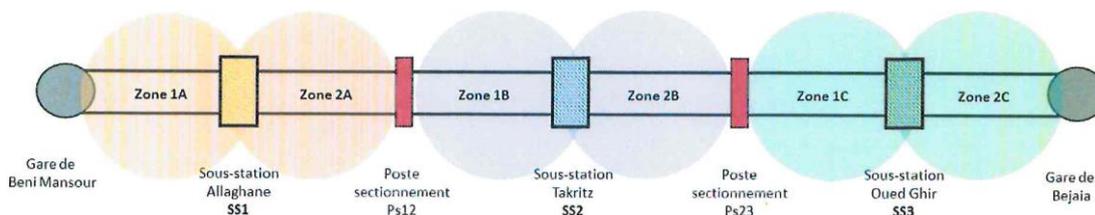
➤ **Mode dégradé 2**



**Figure 3.3. Mode normal 2**

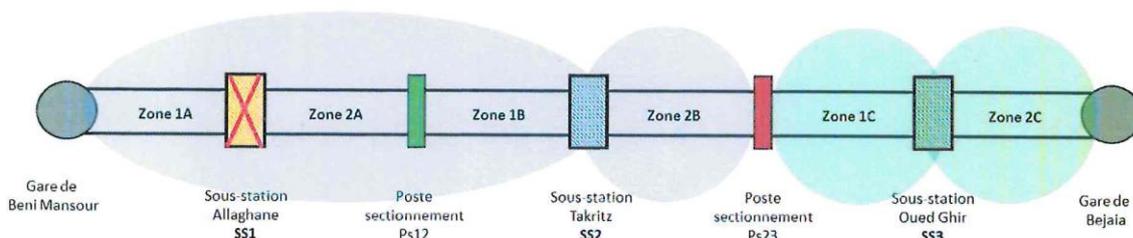
A partir de ces résultats, des calculs des profils de chutes de tension et intensités ainsi que des travées disponibles chez Sonelgaz au droit du tracé, il découle la nécessité de réaliser trois (03) sous stations électriques 220/1\*25 kV, réparties judicieusement le long de tracé de la ligne.

- **Indépendamment**, chacune des trois sections de la ligne, en mode normal et dégradé 1 :



**Figure 3.4. Zones d'action des sous-stations modes « Normal » et « Dégradé 1 »**

- **En inter-appuis**, quand une sous station est hors services, en mode « Dégradé 2 »



**Figure 3.5. Zones d'action des sous-stations mode « Dégradé 2 » SS1 HS**

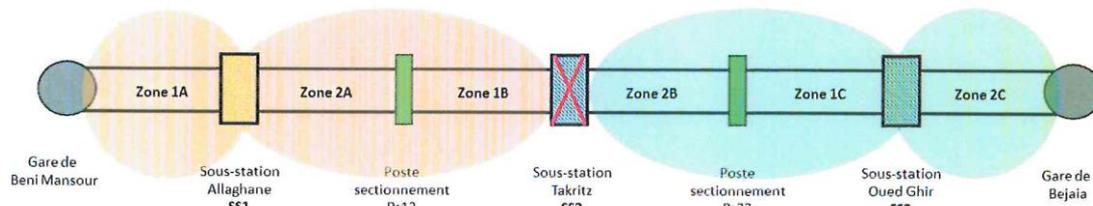


Figure 3.6. Zones d'action des sous-stations mode « Dégradé 2 » SS2 HS

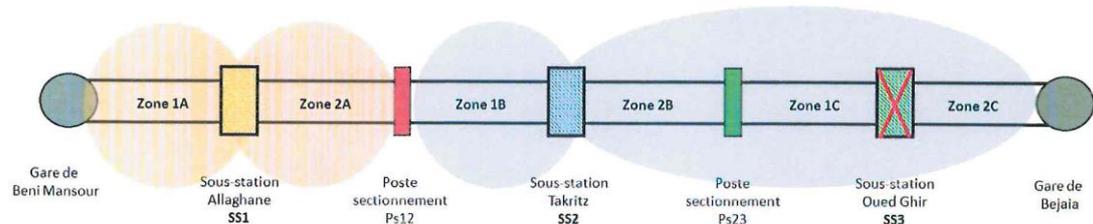


Figure 3.7. Zones d'action des sous-stations mode « Dégradé 2 » SS3 HS

### 3.2.2. Schéma d'exploitation des sous-stations électriques

Les schémas d'exploitation des sous stations électriques sont fonction du mode de fonctionnement :

#### 3.2.2.1. En mode « Normal » et « Dégradé 1 »

Le fonctionnement se fait par un seul (01) transformateur par sous-station, le second transformateur étant en réserve (selon deux modes d'exploitation possibles : sous tension à vide (Figure 3.8.) ou en charge (Figure 3.9.) en mode normal, ou se substituent totalement à celui en défaut, en mode « dégradé1 ».

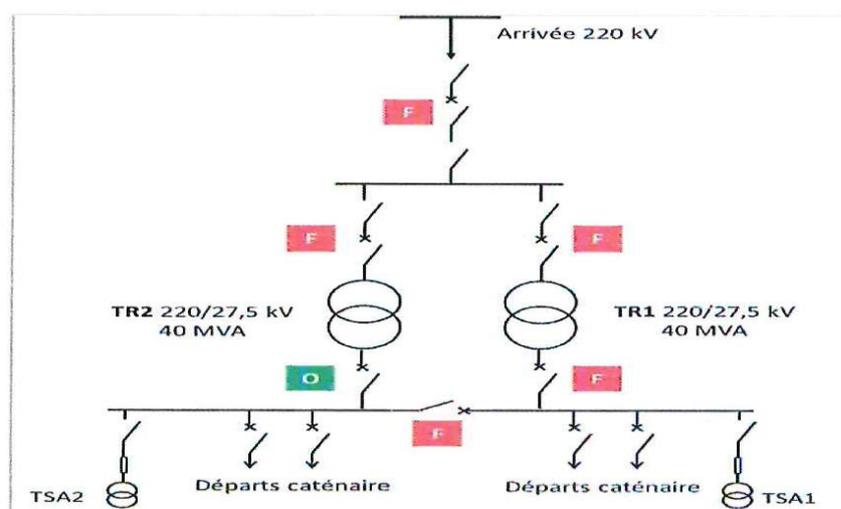


Figure 3.8. Le second transformateur étant en réserve (sous tension à vide)

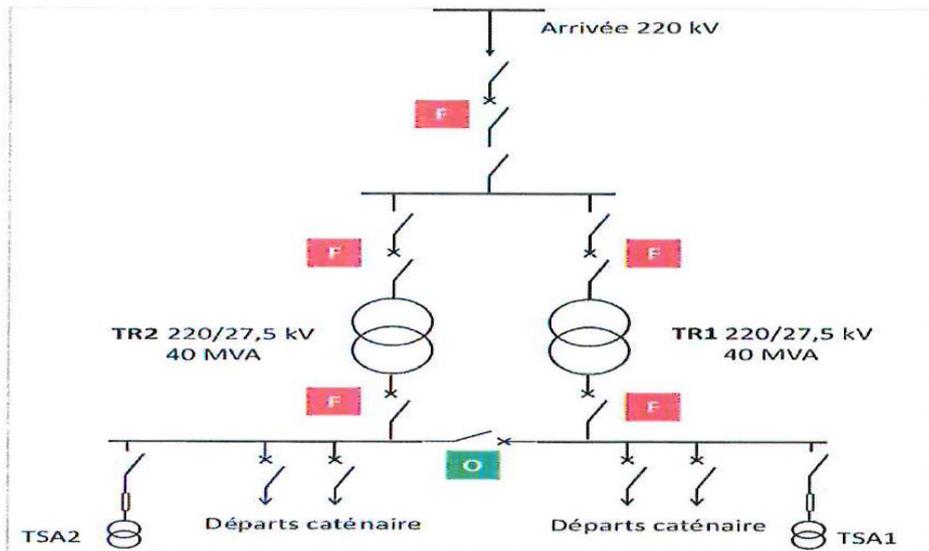


Figure 3.9. Le second transformateur étant en en charge (en mode normal)

3.2.2.2. En mode dégradé 2

Le fonctionnement avec mise en parallèle, au besoin, de 2 transformateurs par sous-station.

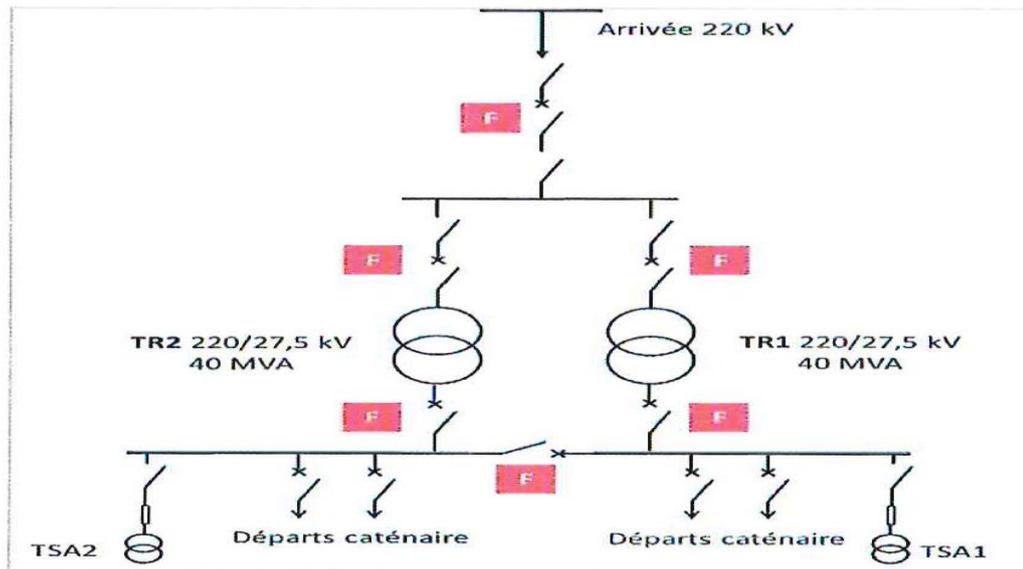


Figure 3.10. Mode dégradé 2

### 3.2.3. Dimensionnement des sous-stations

Les résultats des simulations impliquent des puissances installées, par sous stations, comme suit :

- Sous station Allaghen (SST1) : 2\*30 MVA
- Sous Stations Takritz (SST2) : 2\*40 MVA
- Sous station Oued Ghir (SSt3) : 2\*30 MVA

**Donc une puissance totale installée de 200 MVA**

Ce dimensionnement tient compte du cycle journalier de charge des transformateurs de chaque sous-station, correspondant aux différents modes de fonctionnement, de la classe des transformateurs à choisir (selon la norme EN 50529) ainsi que des conditions site (Température et altitude).

### 3.3. Dimensionnement et calculs justificatifs de caténaire ainsi que les caractéristiques électriques des conducteurs

Le dimensionnement et calculs justificatifs de la caténaire ainsi que les caractéristiques électriques des conducteurs doivent être conformes aux exigences techniques en vigueur, et particulièrement la norme EN50119. Les caractéristiques générales de la caténaire à construire sont illustrées déjà dans le tableau n°05 du chapitre précédent.

#### 3.3.1. Critères de conception

##### 3.3.1.1. Critères climatiques [10]

La caténaire à concevoir doit prendre en considération les conditions climatiques et les plages de température ci-après :

- Température
  - Température Min : - 20°C
  - Minimale à l'intérieur : + 5°C
  - Température Max : + 55°C
  - Maximale à l'ombre : + 40° C
  - Maximale à l'intérieur : + 35° C
- Température max des conducteurs : +80°C
- Plage régularisation de la caténaire : Min. -20°C / Max. +80°C
- Radiation solaire : 1120 W / m<sup>2</sup>

- Selon Règlement Neige et Vent "R.N.V." D.T.R. C 2-4.7 2013, la région de Beni-Mansour est classée dans la Zone I avec une vitesse de référence de 27 m/s.
- Pollution atmosphérique : Pollution normale sur l'ensemble de la ligne
- Humidité de l'air
  - Maximale : 100 %
  - Minimale : 20%
  - Moyenne annuelle : 60%
- Givre : 2 cm et dissymétrique 2/ 0

### **3.3.1.2. Critères généraux**

Les critères généraux à suivre pour la conception de la caténaire sont les suivants :

- La caténaire remplira les critères établis pour une vitesse maximale de 160 km/h à savoir:
  - Critères statiques.
  - Critères dynamiques.
  - Critères de qualité de captation de courant.
- La section du câble porteur sera fonction de :
  - L'intensité de courant maximale admissible, d'une usure d'environ 20% du fil de contact.
  - L'aptitude au façonnage et la facilité de mise en œuvre (par exemple pose du fil de contact) des conducteurs.
- La longueur minimale est de 0,200 m, et la longueur maximale dépend de la hauteur maximale de la caténaire qui ne doit en cas dépasser le 1,25 m.
- Les longueurs de portée sont à dimensionner en rapport avec la déviation latérale admissible due au vent. Le déplacement latéral du fil de contact ne doit pas dépasser la moitié de la largeur du pantographe, quel que soit l'endroit situé entre deux poteaux.
- Les tensions mécaniques des câbles de caténaire régularisées, doivent être conçues de manière à demeurer indépendantes l'une de l'autre et constantes sur une plage de température variant de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+55^{\circ}\text{C}$ .
- Les longueurs de sections de caténaire régularisées ou tirs (distance entre point d'ancrage et appareil tendeur) doivent être aussi longues que possible, et ce, pour des raisons économiques, avec cependant une prise en compte des contraintes techniques.

- La longueur demi-tir maximale doit être ancrée de manière fixe d'un côté et réglable de l'autre à travers les appareils tendeurs.
- Deux demi-tirs doivent si possible être combinés afin de constituer un tir. Au milieu de ce tir, la caténaire doit être ancrée. Aux deux autres extrémités, des équipements tendeurs sont à installer. C'est le système d'anti-cheminement.

### **3.3.1.3. Critères géométriques**

- Type de caténaire : Polygonal (câble porteur au-dessus du fil de contact) régularisée sans Y
  - Encombrement : A ciel ouvert 1,25 m
- Sectionnements en ciel ouvert de 1,25 à 2,00 m
- Hauteur du fil de contact : 5.30 m
- Flèche intentionnelle du fil de contact :  $f(m) = a(m) / 2000$ , avec a : Portée
- Pente de raccordement maximum : 2 mm/m pour 160 km/h (+10%)
- Différence maximum de pente entre 2 portées successives : 01 mm/m pour 160 km/h (+10%)
- Différence maximale de longueur de portées adjacentes : 09 m
- Implantation (distance face intérieure du poteau – axe de voie) : Nominal : 3,25 m
- Appareil Tendeur :
  - Défini en fonction de la longueur du tir.
  - Rapport 1/5 ou 1/3
  - Système antichute
  - Poulie et contrepoids

### **3.3.1.4. Critères électriques**

#### **a. Tensions**

Les caractéristiques électriques de la caténaire devront garantir son fonctionnement dans un rang de tensions électriques déterminées par la norme EN 50163 et la fiche UIC 600-OR, pour l'alimentation en 1x 25 kV courant alternatif monophasé de fréquence 50 Hz :

- Tension non permanente la plus élevée (5 minutes) : 29.000 V ( $U_{max2}$ )
- Tension permanente la plus élevée : 27.500 V ( $U_{max1}$ )
- Tension nominale : 25.000 V ( $U_n$ )
- Tension permanente la plus basse : 19.000V ( $U_{min1}$ )
- Tension non permanente la plus basse (10 minutes) : 17.500 V ( $U_{min2}$ )

### ***b. Distance d'isolement***

La distance d'isolement électrique de la caténaire devra répondre aux normes EN 50119.

Les distances dans l'air entre le sol (mise à la terre) et les parties en tension de la ligne aérienne de contact seront :

- 270 mm statique
- 150 mm dynamique

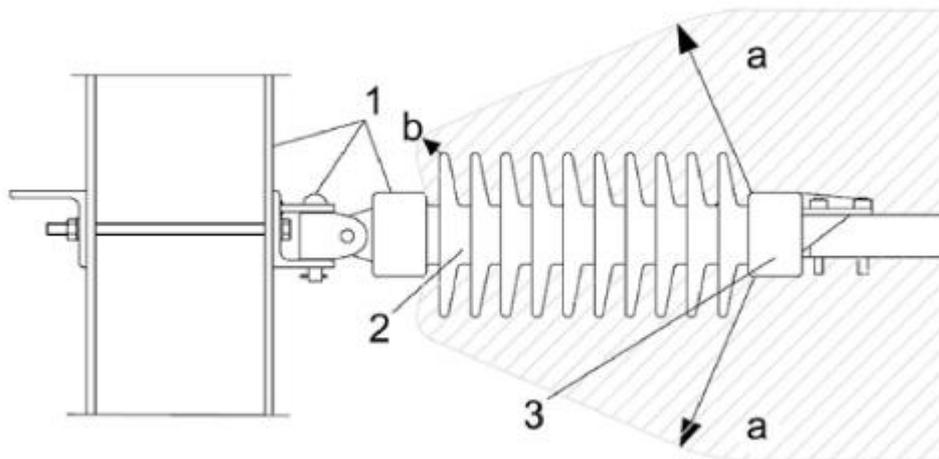
Les distances d'isolement entre les parties en tension contiguës des lignes de contact de différentes sections électriques, dont les tensions et phases sont différentes sont :

- 400 mm statique
- 230 mm dynamique

Les distances d'isolement pour le cas d'une zone à pollution normale sont :

- 320 mm statique
- 220 mm dynamique

Etant dans des sections électriques alimentées d'une ligne dont les tensions et les phases sont identiques, les valeurs applicables pour les distances d'isolement sont celles citées en premier paragraphe.



***Figure 3.11. Distance d'isolement statique entre les parties sous tensions d'un isolateur et l'équipement mis à la terre [04].***

#### **Légende :**

- 1) Equipement mise à la terre
- 2) Ailettes d'isolement
- 3) Equipement sous tension
  - a- Valeur de distance d'isolement statique (ECs)
  - b- 10 mm

### **3.3.1.5. Critères dynamique :**

La conception de la caténaire doit satisfaire aux critères dynamiques suivants :

- Vitesse de propagation des ondes :  $V_{min} = 110$  m/s
- Facteur Doppler :  $> 0,28$
- Le coefficient de réflexion doit être peu élevé :  $< 0,6$
- Le facteur d'amplification doit être le plus réduit possible :  $< 2.1$

### **3.3.1.6. Section de séparation de phases (zone neutre)**

En comparaison du système monophasé 1 x 25 Kv AC à celui de 1 500 V CC, ce dernier nécessite des sous stations tous les 10 Km ainsi que le doublement des fils et câbles constituant la caténaire. La raison est simple, de la formule de puissance  $P = \text{Tension} \times \text{Courant}$  ( $P = U \times I$ ), plus la tension  $U$  est haute, plus le courant  $I$  sera très bas.

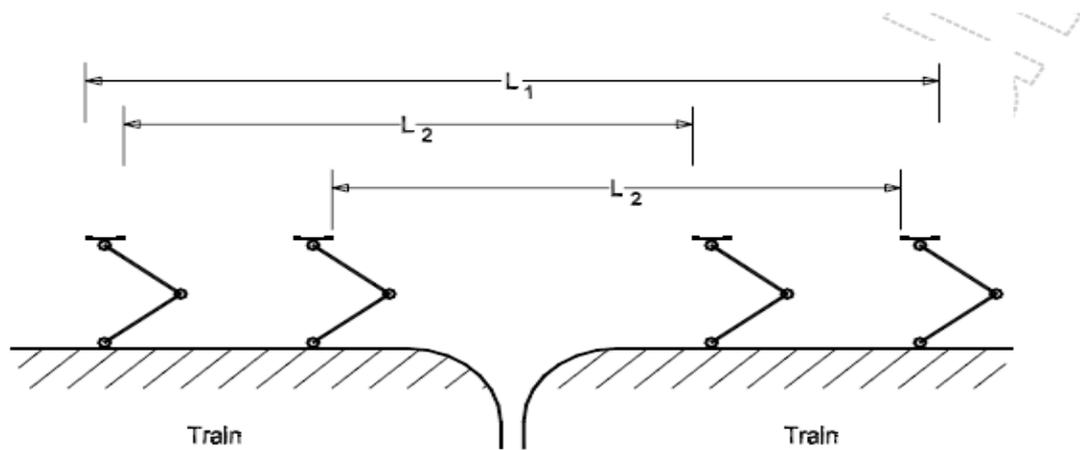
Si le courant alternatif a l'avantage de nécessiter moins de point d'alimentation, il est obligatoire d'en organiser la découpe en « secteur » et « sous-secteur ». En effet, le courant alternatif ne peut être en phase ; à coup sûr, entre différentes sous stations. La solution a été de créer des sections de séparations de phases. Le principe consiste à avoir une continuité mécanique mais non électrique [09].

En plus des avantages cités précédemment, son implantation doit répondre aux critères suivants :

- Implantée à proximité des gares dans le but de réduire le coût de la télécommande et de l'alimentation des interrupteurs, si toutefois les trains peuvent franchir ces zones sur l'aire, après un arrêt en gare.
- Est prévue avec des sectionneurs télécommandés afin qu'en cas d'incident les trains puissent être sortis des dites zones.
- Ne doit pas être implantée dans les zones de déclivités, de voies à faibles rayons, et avant les principaux signaux.

Sa longueur dépend de la distance entre pantographes extrêmes des rames en service pour éviter de ponter les deux caténaires sous tension, et la capacité du train à la franchir sans traction, cette distance ne peut excéder les longueurs déterminées par la norme EN 50 367 :

- $L' = L1 < 400$  m
- $L'' = L2 > 143$  m
- $L''' = L2 > 80$  m



**Figure 3.12. Détermination de la zone neutre [13].**

Dans la présente étude, la longueur de la zone neutre considérée est inférieure à 402 m, elle varie en fonction de la géométrie de tracé.

### 3.4. Dimensionnement et calculs des éléments justificatifs de la caténaire

#### 3.4.1. Conception du système de captage de courant

##### 3.4.1.1. Portée maximale théorique

Une double vérification de la portée maximale de la caténaire sera effectuée. D'une part, le critère de la longueur minimale et, d'autre part, les critères de déplacement maximal du fil de contact au centre de la portée.

De cette manière, le calcul de la portée maximale de la longueur minimale du pendule consiste à vérifier la déformation verticale du câble porteur afin de vérifier la longueur minimale du pendule établie à 0,200 m comme critère de conception.

Par conséquent, la longueur de portée correspondante est vérifiée pour la hauteur nominale du système (1,25 m) et ladite longueur minimale du pendule (0,200 m). De cette façon, nous avons les valeurs suivantes :

- Poids des câbles ( $m_{fc} + m_p$ ) = 0,98 + 0,84 = 1,82 kg / m
- Tension en câble porteur = 1200 N
- Encombrement = 1,250 m
- Pendule minimal = 0,200 m

Par calcul, la portée maximale théorique  $a_{max}$  associée

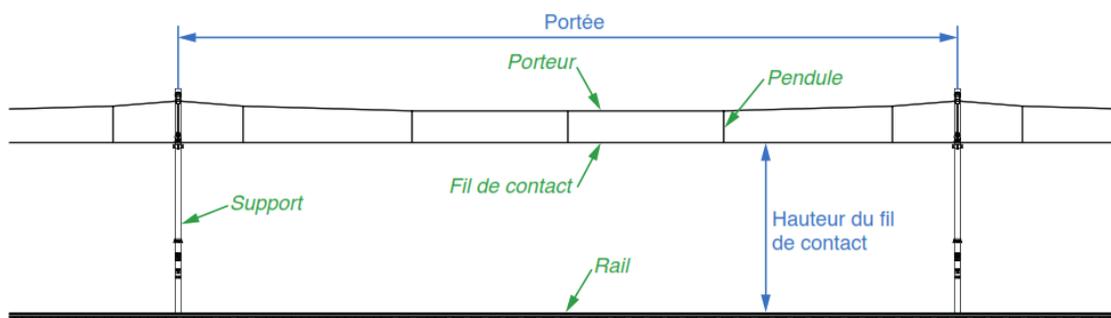
$$a_{max} = \sqrt{8 * \frac{(T * f_m)}{m_{fc} + m_p}} = \sqrt{8 * \frac{(1200 * (1,25 - 0,2))}{1,82}} = 74,42 \text{ m}$$

Il existe donc une limite théorique maximale pour les caractéristiques considérées d'une portée de 74,42 m. Cette valeur doit également être comparée avec le deuxième critère indiqué ci-dessus relatif au déplacement maximal du fil de contact au centre de la portée (le calcul doit toujours être inférieur à 400 mm).

### 3.4.1.2. Portée maximale réelle

Les portées sont normalement multiples de 4,50 m, leurs longueurs varient entre 27 m et 63 m, la portée maximale établie en ligne droite à ciel ouvert est de 63 m, la différence entre deux portées consécutives ne doit jamais être supérieure à 9 m (à l'exception des sections de séparation), sa longueur s'établit en fonction de :

- Déplacement maximal du fil de contact du au vent,
- Longueur minimale de la pendule : 0,20 m,
- Hauteur maximale de la caténaire à installer (1,25 m),
- Obstacles (Signal haut, portique, passerelle, zones d'appareils de voie, ...)



**Figure 3.13. Une portée de caténaire [09]**

La flèche au milieu de la portée est donnée par  $f = \frac{p * a^2}{8 * T}$ .

Une flèche intentionnelle est donnée au fil de contact en milieu de portée et est égale à :  $f = a/2000$

### 3.4.1.3. Portée en courbe

La flèche  $f$  de voie en courbe est inversement proportionnelle au rayon de courbure. Ainsi, en considérant une portée constante, plus le rayon de la courbe est petit plus la flèche de voie est importante. En conséquence, pour rester dans les limites admissibles de la flèche, la portée à adopter dépendra étroitement de la valeur du rayon  $R$ .

L'expression de la flèche au milieu de la portée en courbe en fonction de portée et de rayon de courbure est  $= \frac{a^2}{8 \cdot R}$ .

#### 3.4.1.4. Cas du raccordement parabolique

Le passage d'un alignement à une courbe, se fait généralement par l'intermédiaire d'un raccordement parabolique. En chacun de ses points, le raccordement parabolique peut être assimilé à une courbe de rayon  $R'$  donné par la formule :  $R' = \frac{R \cdot L}{X}$ , avec :

- $R'$  = Rayon instantané
- $R$  = Rayon de la courbe qui suit le raccordement
- $L$  = Longueur du raccordement
- $X$  = Position du point considéré par rapport au début du raccordement.

En plus de la vitesse de la ligne qui devrait être prise en considération dans la conception, les caractéristiques de performance de la ligne aérienne de contact, lors de l'interaction pantographe/ligne aérienne de contact, doivent être évaluées dans des conditions statiques et dynamique, alors le calcul doit être réalisé en deux sens : par hauteur minimale du fil de contact en raison de la hauteur de la caténaire et par déplacement en raison du vent.

#### 3.4.1.5. Pentes de raccordement des hauteurs du plan de contact [14]

Lorsqu'entre deux points A et B, la hauteur du fil en contact par rapport au plan de roulement varie, on définit une pente du fil de contact :  $p = \frac{HB - HA}{AB}$

Cette pente, qui est fonction de la vitesse limite dans la zone intéressée et du type de caténaire ne doit pas dépasser 10 mm/m. Au point de changement de pente, la variation de pente entre 2 portées consécutives ne doit pas dépasser la moitié de la valeur de la pente maximale autorisée.

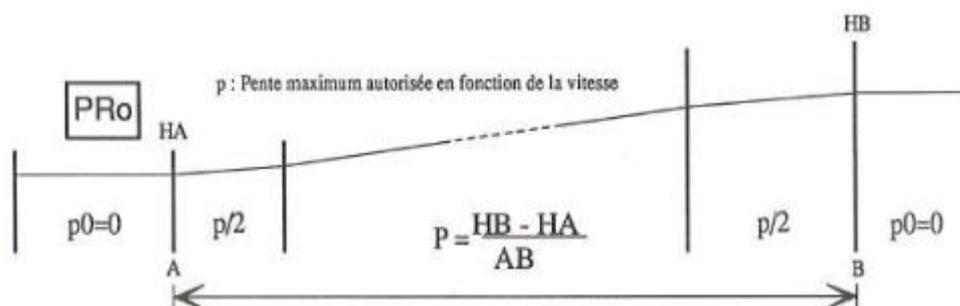
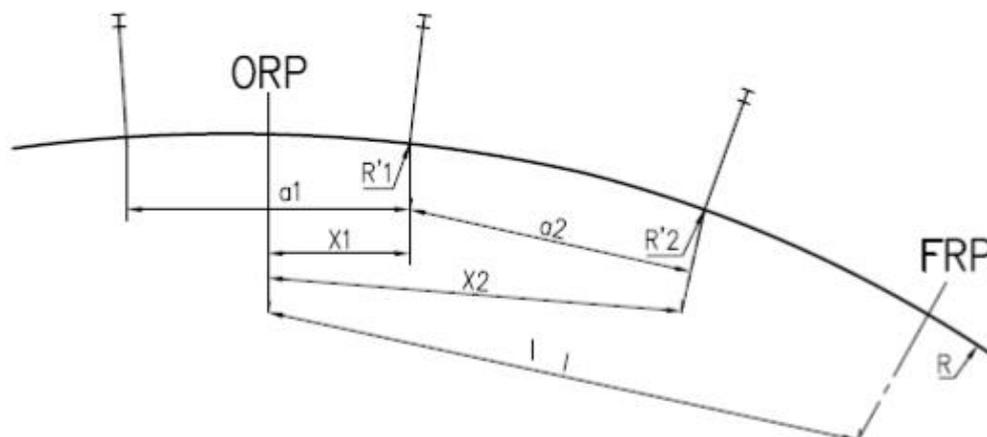


Figure 3.14.a. Raccordement des hauteurs du plan de contact.



**Figure 3.14.b. Rayon instantané dans un raccordement parabolique.**

Entre deux points singuliers consécutifs imposant une même hauteur de fil de contact, cette hauteur peut être :

- Soit maintenue constante ;
- Soit amenée à une valeur intermédiaire ;
- Soit encore ramenée à la hauteur en pleine voie.

Ci-après les valeurs de pente pour une ligne 25000 V :

**Tableau 3.1. Valeurs de la pente en fonction de la vitesse, type de la caténaire et la portée.**

Vitesse (km/h) ou type de caténaire	Pente maximale de raccordement mm/m	Différence maximale de pente entre 2 portées successives mm/m
<b><math>V &gt; 160</math></b>	2	1
<b><math>120 &lt; V &lt; 160</math></b>	3	1,5
<b><math>120 &lt; V &lt; 160</math> et LCSR</b>	5	2
<b><math>V &lt; 100</math> et caténaire non régularisé</b>	6	3
<b>LCSR</b>	10	5

**NB :** Sur les lignes à grandes vitesses, la hauteur du fil de contact à la construction, mesurée au droit des supports est constante. Ainsi, la notion de pente de raccordement est sans objet dans ce cas. Pour les portées de part et d'autre d'un axe ou d'un demi-axe de sectionnement ou d'équipement tendeur, la pente éventuelle doit être constante.

### 3.4.1.6. Pendule [14]

Le fil de contact est suspendu au porteur par l'intermédiaire de pendules. La longueur des pendules est définie lors de l'étude de conception (0,20 – 2,00 m). Pour une portée donnée, elle est fonction :

- Du porteur et du fil de contact ;
- Des tensions mécaniques du porteur et du fil de contact ;
- De l'encombrement aux suspensions ;
- De la répartition des pendules dans la portée ;
- De la flèche initiale du plan de contact.

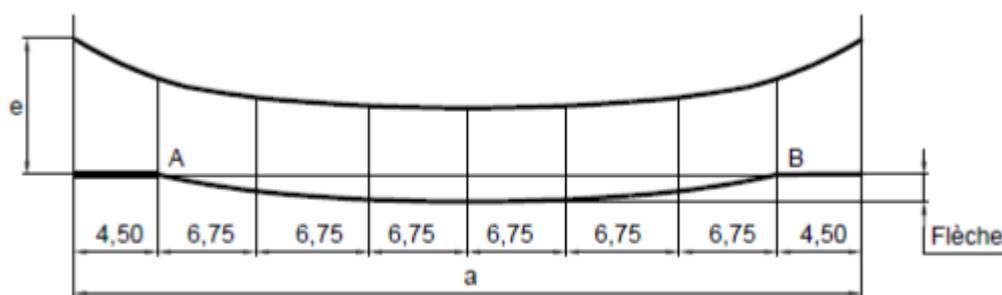
### 3.4.1.7. Caractéristique des pendules

Les pendules doivent être en câble de cuivre ou de bronze, flexible ou extra flexible ; il est recommandé qu'ils soient avec boucle, si possible réglables, et avec utilisation de la même griffe pour porteur et fil de contact.

**Tableau 3.2. Caractéristique des pendules.**

Type de câble	DIN 48201-25-BzII en bronze
Section	12 mm <sup>2</sup>
Composition	49 fils torsadés
Masse nominale (kg/km)	110
Charge de rupture (N)	728

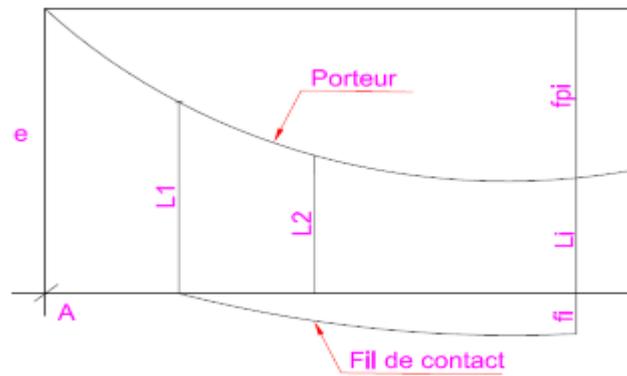
La répartition des pendules pour une portée de 49,5 m est donnée par la figure suivante :



**Figure 3.15. Répartition des pendules pour une portée de 49,5 m**

En effet, la longueur d'un pendule  $i$  donné est calculée suivant la formule ci-après :

$$L_i = e - f_{pi} + f_i$$



**Figure 3.16. Longueur d'un pendulei.**

Avec :

$e$  : L'encombrement

$f_{pi}$  : La flèche du porteur au niveau du pendule  $i$

$f_i$  : La flèche du fil de contact au niveau du pendule  $i$

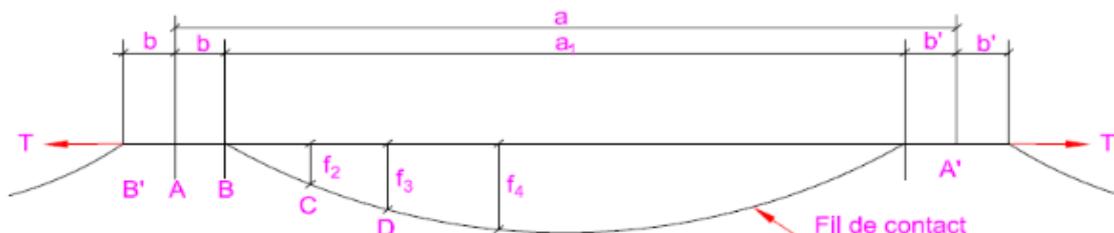
En effet, la longueur des pendules est calculée pour que le fil de contact ait une flèche initiale, en milieu de portée, égale au 1/2000ème de la longueur de la portée "a", par rapport à une droite tangente au fil de contact au droit des pendules A et B (Figure n°15) et pour obtenir la valeur désirée de l'encombrement "e" de la caténaire au droit du support.

Les distances entre axes des conducteurs sont calculées avec une précision du mm et les longueurs des pendules sont arrondies au cm.

La longueur théorique des pendules est la distance entre l'axe du porteur et l'axe du fil de contact. La longueur réelle tient compte de la longueur théorique et de l'encombrement des pièces de fixation du pendule sur le porteur et sur le fil de contact. Cette distance est déterminée avec les tensions dans les conducteurs à la température de référence du projet.

#### **a. Calcul de la flèche du fil de contact au niveau d'un pendule**

On considère que la flèche du fil de contact commence effectivement au premier pendule et non au support :



**Figure 3.17. La flèche du fil de contact au niveau d'un pendule.**

On définit alors la distance  $a_1 = a - b - b'$

La formule générale utilisée pour le calcul de la flèche du fil de contact au niveau d'un pendule est la

suivante :  $f_x = \frac{p}{2 \cdot T} * x * (a - x)$

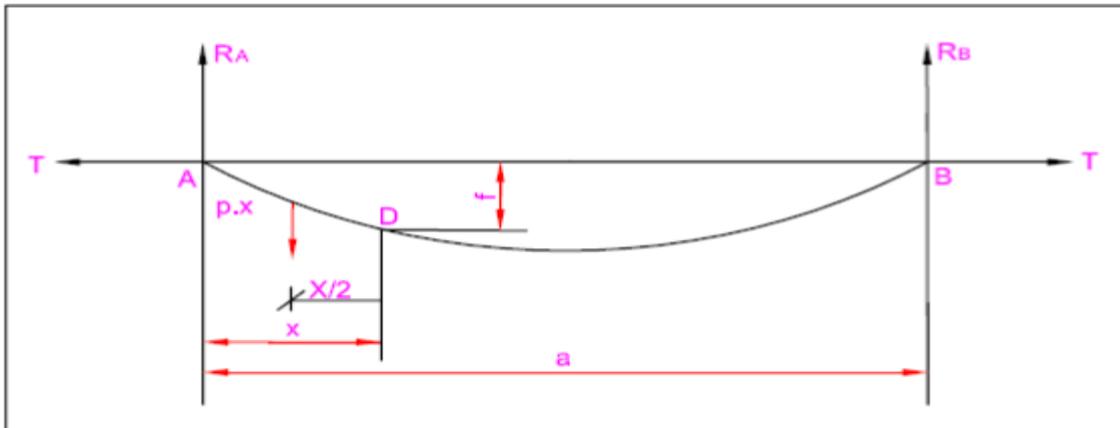


Figure 3.18. La flèche du fil de contact au niveau d'un pendule

La flèche au droit d'un pendule  $i$  est :  $f_x = \frac{p}{2 \cdot T} * \sum_{k=1}^{i-1} d_k * (a_1 - \sum_{k=1}^{i-1} d_k)$

Avec  $d_k$  est la distance horizontale entre le pendule  $k$  et le pendule  $k + 1$

$p$  : Le poids linéique du fil de contact

$T$  : La tension du fil de contact

Sachant que la flèche en milieu de portée est égale à :  $f_m = \frac{a^2 p}{8T}$

On obtient la formule suivante pour le calcul de la flèche du fil de contact au droit d'un pendule :

$$f_i = \frac{4 \cdot f_m}{a_1^2} * (\sum_{k=1}^{i-1} d_k) * (a_1 - \sum_{k=1}^{i-1} d_k) \text{ avec } f_1 = 0$$

**b. Calcul de la flèche du porteur au droit des pendules**

On considère que les pendules transmettent des efforts ponctuels sur le fil de contact.

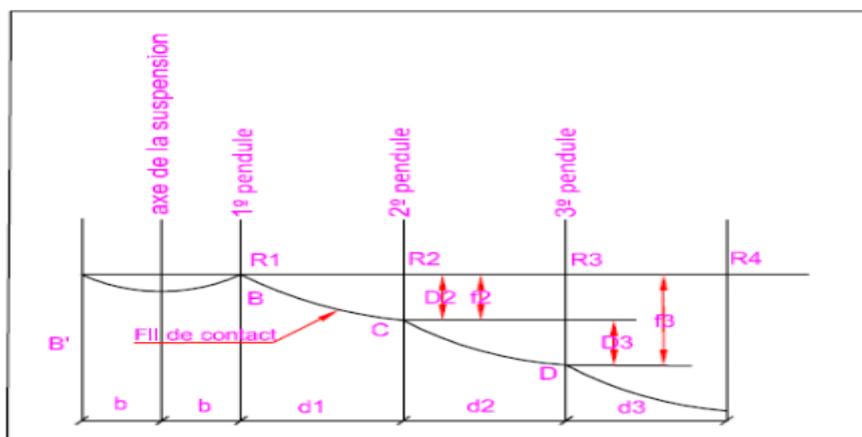


Figure 3.19. Différentes charges supportées par les pendules

Le calcul des charges supportées par le “i” éme pendule est donné par l’expression suivante :

$$R_i = \frac{p * (d_{i-1} + d_i)}{2} - \frac{TD_i}{d_{i-1}} + \frac{TD_{i+1}}{d_i}$$

Le calcul des réactions aux suspensions du porteur, dont la réaction RA est produite par l’action de toutes les charges R1, R2...Rn+1, les poids des pendules (C1, C2, ... Cn) et le poids du porteur q, comme illustré dans la figure suivante :

- Cas sans dénivelé

$$R_A = \frac{1}{a} \left[ \sum_{i=1}^n (R_i + C_i) * (b' + \sum_{k=i}^n d_k) + (R_{n+1} + C_{n+1}) * b' \right] + \frac{qa}{2}$$

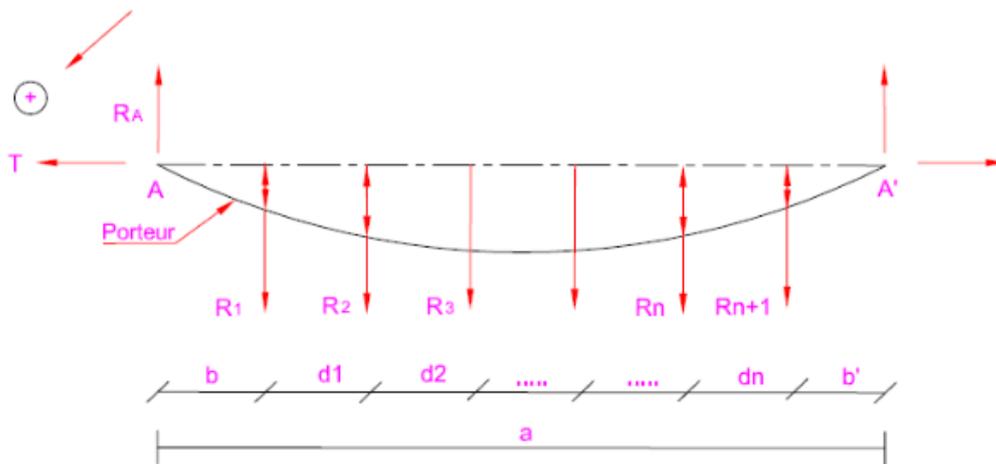


Figure 3.20. Réactions aux suspensions du porteur, cas sans dénivelé

- Cas avec dénivelé

$$R_A = \frac{1}{a} \left[ \sum_{i=1}^n (R_i + C_i) * (b' + \sum_{k=i}^n d_k) + (R_{n+1} + C_{n+1}) * b' \right] + \frac{qa}{2} - \frac{TD}{a}$$

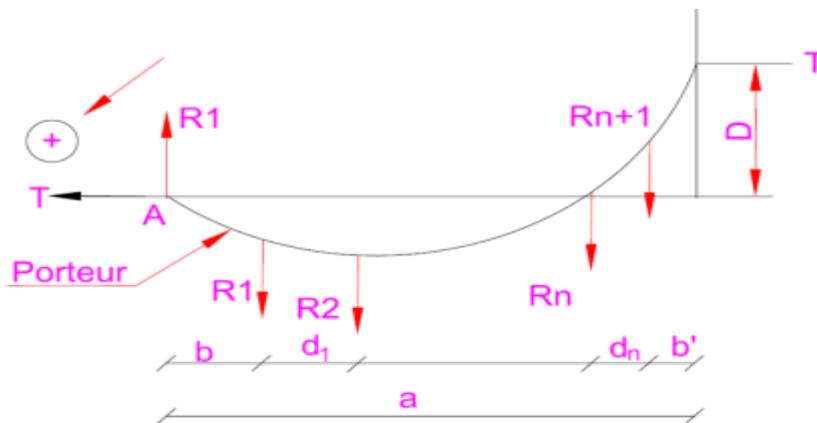


Figure 3.21. Réactions aux suspensions du porteur, cas avec dénivelé

### c. Flèche du porteur au droit de chaque pendule

La formule donnant la flèche du porteur au niveau du pendule  $i$  est la suivante :

$$f_{pi} = \frac{1}{T} \left[ R_A * \left( b + \sum_{k=1}^{i-1} d_k \right) - \sum_{k=1}^{i-1} \left( (R_j + C_j) * \sum_{j=k}^{i-1} d_j \right) - \left( \frac{q}{2} \right) * \left( b + \sum_{k=1}^{i-1} d_k \right)^2 \right]$$

Exemple : la flèche au niveau du 3<sup>ème</sup> pendule se calcule par la formule suivante :

$$f_{p3} = \frac{1}{T} \left[ R_A * (b + d_1 + d_2) - (R_1 + C_1) * (d_1 + d_2) - (R_2 + C_2) * d_2 - \frac{q}{2} * (b + d_1 + d_2)^2 \right]$$

## 3.4.2. Mouvement du point de contact

### 3.4.2.1. Elasticité en milieu de portée

L'élasticité est l'élévation par unité de force exprimée en mm/N et mesurée sur le fil de contact.

$$e = \frac{a}{K.(F_c * F_s)}$$

Où :

- $a$  : est la portée
- $F_c$  : Force de tension du fil de contact (kN)
- $F_s$  : Force de tension du câble de support (kN)
- $K$  : Coefficient empirique =  $0.4 * 10^{-6}$
- $e$  : Elasticité (mm/N)

### 3.4.2.2. Mouvement vertical (flèche maximale)

L'expression qui représente la courbe du porteur est la suivante :  $f_m = \frac{(\frac{a}{2})^2 p}{2T}$

$f_m$  = flèche de caténaire (déplacement vertical de la caténaire)

$a$  = distance entre poteaux

$p$  = poids

$T$  = tension du câble.

Pour la portée maximale de 63 m :  $f_m = \frac{63^2 * 1.57}{8 * 1200} = 0.649 \text{ m}$

Si la pendule minimale est de 0,200 mm, la hauteur minimale de la caténaire doit être au minimum de :  $de : 0,20 + 0,649 = 0,849 \text{ m}$ , qui est inférieure à celle arrêtée dans les critères de conception (1.25 m), donc l'exigence de la hauteur minimale est satisfaite.

### 3.4.3. Qualité de captage de courant

#### 3.4.3.1. Force de contact

Le système de la ligne aérienne de contact doit être conçu pour supporter les forces de contact maximales admises entre le pantographe et le fil de contact, les effets aérodynamiques survenant à la vitesse maximale autorisée doivent être pris en compte.

Les valeurs des forces de contact varient en fonction des combinaisons de pantographe et de systèmes de ligne aérienne de contact, néanmoins, ces valeurs ne doivent pas dépasser les forces de contact maximale indiquées dans le tableau ci-après.

Les valeurs instantanées des forces de contact sont généralement inférieure à la valeur de la force moyenne ( $F_m$ ) augmentée de trois écarts types ( $3\sigma$ ).

**Tableau 3.3. Forces de contact limites**

Systèmes	Vitesse km/h	Forces de contact limites	
		Maximale N	Minimale (Statique) N
CA	$\leq 200$	300	$> 0$
	$200 < v \leq 320$	350	$> 0$

#### 3.4.3.2. Pertes de contact

Un captage de courant haute qualité s'effectue par un contact mécanique continu entre pantographe et le fil de contact. Si ce contact est interrompu, il peut se produire un amorçage qui augmente l'usure du matériau de contact.

### 3.4.4. Conception mécanique des charges d'un fil de contact sous tension mécanique

Les tensions mécaniques des câbles conformément à la norme EN 50119 sont à calculer.

#### 3.4.4.1. Fil de contact

La contrainte de traction maximale admissible en service  $\sigma_w$  d'un fil de contact, est déterminée à l'aide de l'expression :

$$\sigma_w = \sigma_{min} * n * K_{temp} * K_{Wer} * K_{wind} * K_{ice} * K_{eff} * K_{clamp} * K_{joint} \quad (N/m^2)$$

$\sigma_w$ : La charge maximale de traction admissible

$n$ : Le facteur de la sécurité

$\sigma_{min}$ : L'effort de traction minimum d'un fil de contact rainuré

$K_{temp}$ : Le facteur de la température maximale

$K_{Wer}$ : Le facteur d'usure admissible  $K_{Wer} = 1 - x$ ,  $x$  est le pourcentage de l'usure de fil de contact,  
 $x = 20\%$

$K_{loed} = K_{wind} * K_{ice}$ : Le facteur des charges du vent et de la glace

$K_{eff}$ : La précision de tension et le facteur d'efficacité

$K_{clamp}$ : Le facteur des raccords de l'extrémité

$K_{joint}$ : Le facteur des raccords soudés

L'effort d'extension du fil de contact à calculer ne doit en aucun cas dépasser 65 % de son effort de traction minimal.

Le fil de contact purement en Cu-HCP d'une section de  $107 \text{ mm}^2$  comme mentionné dans le chapitre II, a été adopté pour la solution caténaire, son effort de traction minimum est de  $36,30 \text{ kN/m}^2$ . Le tableau ci-après récapitule les différents facteurs tels qu'ils ressorts du chapitre 5.3 de la norme EN 50119.

**Tableau 3.4. Tension maximale admissible par le fil de contact**

Paramètre	Description	Valeur
$\sigma_{min}(\text{kN/m}^2)$	L'effort de traction minimum d'un fil de contact rainuré.	36,30
$n$	Le facteur de la sécurité	0,65
$K_{temp}$	Le facteur de la température maximale	01
$K_{Wer}$	Le facteur d'usure admissible $K_{Wer} = 1 - x$ , $x$ est le pourcentage de l'usure de fil de contact, $x = 20\%$	0,80
$K_{wind}$	Le facteur des charges du vent	0,95
$K_{ice}$	Le facteur de la glace	0,95
$K_{eff}$	La précision de tension et le facteur d'efficacité	0,95
$K_{clamp}$	Facteur des Raccords de l'extrémité	01
$K_{joint}$	Le facteur des raccords soudés	0,95
$\sigma_w(\text{kN/m}^2)$	La charge maximale de traction admissible	15,37

Après calcul, l'effort de la charge maximale de traction admissible est de **15,37 kN/m<sup>2</sup>**, ceci représente **42,34%** de l'effort de traction minimal du fil de contact, d'où l'exigence citée plus haut est satisfaite, par conséquent la tension mécanique proposée pour le fil de contact est valide du point de vue de la résistance mécanique.

### 3.4.4.2. Câble porteur

L'utilisation de câbles en matériaux non conducteurs peut être limitée à leur charge de service calculée. Les sollicitations en cisaillement, le rayon de courbure, les dispositifs d'ancrage et l'allongement doivent faire l'objet d'une attention particulière.

La charge de traction maximale admissible en service du câble porteur doit être déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$F_w = F_{Bmin} * n * K_{temp} * K_{wind} * K_{ice} * K_{clamp} * K_{load} \quad (N)$$

L'effort d'extension du fil porteur ne doit en aucun cas dépasser 65 % de son effort de traction minimal.

Le fil porteur adopté est en Bronze Bz II de section 95 mm<sup>2</sup>, possédant une charge de traction minimale de 43,70 KN, le tableau ci-après récapitule les différents facteurs tels qu'ils ressorts du chapitre 5.4 de la norme EN 50119.

**Tableau 3.5. Tension maximale admissible par le fil porteur**

Paramètre	Description	Valeur
$F_{Bmin}(kN)$	L'effort de traction minimum d'un fil porteur	43,70
$n$	Le facteur de la sécurité	0,65
$K_{temp}$	Le facteur de la température maximale	01
$K_{wind}$	Le facteur des charges du vent	0,95
$K_{ice}$	Le facteur de la glace	0,95
$K_{eff}$	La précision de tension et le facteur d'efficacité	1
$K_{clamp}$	Facteur des Raccords de l'extrémité	01
$K_{load}$	Le facteur des charges supplémentaires	0,80
$F_w(kN)$	La charge maximale de traction admissible	20,50

L'effort de la charge maximale de traction admissible est de **20,50kN**, ceci représente **46,54%** de l'effort de traction minimal du fil porteur, l'exigence ci-dessus est établie, par conséquent la tension mécanique proposée pour le fil porteur est valide du point de vue de la résistance mécanique.

Le câble porteur doit être protégé au droit des passerelles au niveau de la gare, ainsi que dans les zones neutres avec isolateurs de section, les pendules doivent être isolées également.

### 3.4.4.3. Câbles de protection Aérien (CdPA)

Les supports, points de suspension ou structures métalliques supportant la caténaire, doivent, en application de la norme NF EN 50122-1, être connectés au circuit de protection électrique. Un maillage, de toutes les structures métalliques constituant de l'installation, permet d'obtenir une équipotentialité de l'ensemble ainsi qu'une impédance structure/sol. D'une manière générale, toutes les structures métalliques comportent un réseau de masse. Ce réseau de masse est constitué d'un fil rond nu, de section adaptée à l'écoulement du courant de défaut, en cuivre ou en aluminium. Ce réseau relie entre elles les ferrures d'équipement, et le réseau de masse est raccordé au C.d.P.A.

Le dispositif de protection comprend au moins :

- Un conducteur longitudinal de protection aérien (C.d.P.A.) électriquement continu et non isolé.
- Un câble de terre enterré (C.d.T.E.) électriquement continu.

#### a. Câble de protection Aérien CDPA

Le conducteur de Protection Aérien CDPA servant à la protection des structures (éventuellement associé à un câble de terre enterré), Le câble de retour de traction et de protection aérien sera un conducteur d'aluminium -acier de de 93,3 mm<sup>2</sup> défini par la norme NF EN 50182. Le CDPA doit être électriquement continu le long de toute l'installation ferroviaire. Un CDPA est requis pour chaque voie, et est fixé sur les poteaux de la caténaire.

Les éléments de voie associés au rôle du conducteur de retour et de terre CDPA sont :

- Les poteaux
- Les éléments métalliques sur les poteaux
- Elément métallique situé sur le viaduc ou ponts
- Actionnements, interrupteurs et sectionneurs de caténaire.
- Les transformateurs de puissance installés sur les poteaux de caténaire

Les caractéristiques du CdPA sont données dans le tableau ci-après.

**Tableau 3.6. Caractéristiques du CdPA [14]**

Matière	Al. Acier
Diamètre	12,50 mm
Masse linéique du câble	0,445 kg/m
Tension mécanique de rupture	49,5 kN
Résistivité	2,8187 $\mu\Omega\text{cm}$
Tension mécanique à +15°C.	4 kN

### ***b. Câble de terre enterre (CDTE)***

Un conducteur électrique, non-isolé, et déroulé en continu en tranchée d'un côté de la voie est mis en œuvre comme équipotentiel terre. En zone de sol naturel, Un câble de 35mm<sup>2</sup>, en cuivre, est enterré et électriquement connecté, tous les 50 m, au collecteur de terre installé dans les caniveaux à câbles. Des conducteurs isolés ou non en fonction de leur emplacement assurent la liaison du C.d.P.A. au C.d.T.E. et aux rails, des éléments constitutants suivants :

- Les supports ;
- Les appareils d'interruption ;
- Les mécanismes de manœuvre ;
- Les clôtures ;
- Les structures métalliques ;
- Les ferrures des ouvrages d'art ;
- Les transformateurs ;
- Les éclateurs à cornes ;
- L'écran du câble isolé.

Les connexions vers la mise au rail ou le C.d.T.E. s'effectuent par l'intermédiaire d'un bornier [16]

### **3.4.5. Conception mécanique des câbles en matériaux non conducteurs**

L'utilisation des câbles en matériaux non conducteurs peut être limitée à leur charge de service calculée. Les sollicitations en cisaillement, le rayon de courbure, les dispositifs d'ancrage et l'allongement doivent faire l'objet d'une attention particulière.

La charge admissible à la traction d'un câble doit être pondérée par un facteur individuel propre à chaque charge exercée sur le conducteur. La charge de traction maximale admissible en service doit être inférieure à 45% de la charge minimale du câble, elle est déterminée par l'équation ci-dessous :

$$F_w = F_{Bmin} * n * K_{wind} * K_{ice} * K_{clamp} * K_{load} * K_{radius} \quad (N)$$

$F_{Bmin}$  (kN)      *L'effort de traction minimum d'un fil non conducteur*

$n$                       *Le facteur de la sécurité*

$K_{wind}$                 *Le facteur des charges du vent*

$K_{ice}$                     *Le facteur de la glace*

$K_{clamp}$                *Facteur des Raccords de l'extrémité*

$K_{load}$                 *Le facteur des charges supplémentaires*

$K_{radius}$               *Rayon de courbure minimal*

$F_w$  (kN)              *La charge maximale de traction admissible*

### 3.4.6. Battement maximal et des désaxements

Nous effectuons une double vérification de débattement de la portée maximale de la caténaire, d'une part, il sera vérifié le critère de la longueur minimale, d'autre part, les critères de déplacement maximal du fil de contact au centre de la portée.

#### 3.4.6.1. Critère de déplacement de fil maximal

Le déplacement maximal du fil de contact par rapport à l'axe du pantographe est obtenu de l'expression suivante :  $W = c_{max} + F_p + D_M$

Avec :

- $c_{max}$  = déplacement maximale du au vent, y compris l'effet du désaxement.
- $F_p$  = Flèche en pointe du poteau.
- $D_M$  = Déplacement causé par le mouvement longitudinal de la console.

#### 3.4.6.2. Déformation maximale du poteau due au vent

On considère que la déformation maximale du poteau sous l'action du vent est de 0,020 m (2 cm) comme, c'est-à-dire, on tiendra compte dans le calcul de chaque poteau par sa fonction, que la déformation additionnelle due à l'action du vent sera de 2 cm en pointe maximum.

#### 3.4.6.3. Déplacement causé par le mouvement longitudinal de la console

Le déplacement latéral du fil de contact causé par ses variations longitudinales est déterminé par la longueur RC du rayon de giration de la console, selon la formule :  $D_M = R_C - \sqrt{(R_C^2 - M_L^2)}$

Avec :

$R_C$  = Rayon de giration de la console (m) = 3 m

Nf = 700 – 63 = 637 m (la console plus éloignée du point fixe est à 63 m de l'ancrage, en étant 1.400 m la longueur du canton maximal).

Dt = rang de température considéré (°) : 80-(-20) = 100°

K = coefficient de dilatation thermique de  $17 \times 10^{-6}$

$M_L$  =  $17 \times 10^{-6} * nf * Dt/2$  = Mouvement latéral maximal de la console (m) = 0,541 m

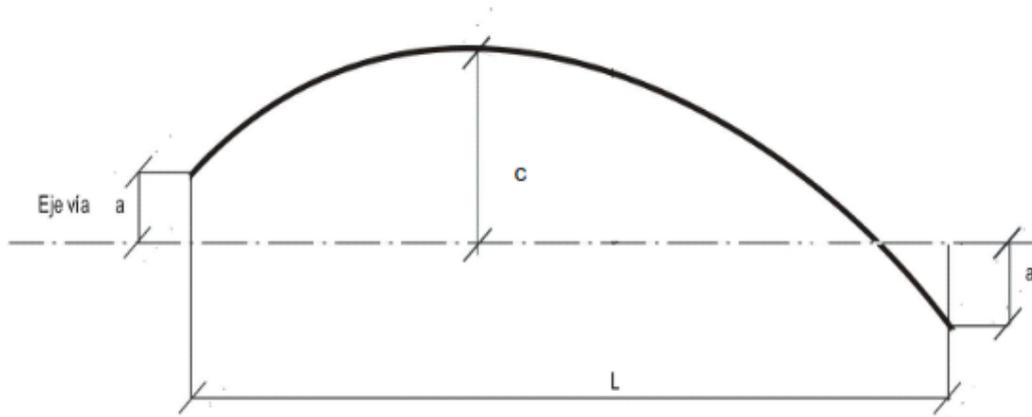
On obtient :

$$D_M = 3 - \sqrt{(3^2 - 0.541^2)} = 0.050 \text{ (m)}$$

Et par conséquent le déplacement maximal du fil de contact étant donné le mouvement de la console est  $D_{Mhc} = 0,025 \text{ m} = 2,5 \text{ cm}$ .

Alors les expressions de déplacement maximal du fil de contact en fonction du vent, tenant compte de l'effet du désaxement, sont :

**a. Battement maximal**



**Figure 3.22. Battement maximal du Fil de contact [17]**

$$c_{max} = \frac{L^2 * Q_{wc}}{8 * R * T} + \frac{8 * a^2 * R * T}{4 * L^2 * V} \quad (m)$$

Avec :

$c_{max}$  Battement maximal perpendiculaire à la voie

$a$  = désaxement précédent ou postérieur,

$T$  = est la tension mécanique du fil de contact  $T = 12\text{KN}$ ,

$L$  = longueur de la portée.

$V$  = Vitesse de référence de vent

$R$  = Rayon de courbure

$Q_{wc}$  = Force de vent par unité de longueur  $[N. m]$

La longueur de portée maximale dans ce cas est donnée par :

$$L_{max} = \sqrt{\frac{8 * R * T * (c + a)}{(Q_{wc} * R) + T}}$$

**b. Calcul de la vitesse du vent**

Considérant le règlement Algérien de Neige et Vent (RNV 2013), la commune de Beni Mansour appartenant à la willaya de Bejaia est classée dans la zone climatique du vent N°I, et la caténaire à construire dans la gare ferroviaire de ladite commune, pourra être considérée comme une construction dans une zone urbanisée correspondante à une catégorie de terrain N°II.

La vitesse moyenne  $V_m$ , qui est une moyenne des vitesses du vent dans un intervalle de 10 mn, est calculée par la formule suivante  $Vm(z) = Cr(z) \times Ct(z) \times Vref$ .

$Cr(z)$  est le coefficient de rugosité qui traduit l'influence de la rugosité et de la hauteur sur la vitesse moyenne du vent. Il est défini par :

$$Cr(z) = K_t \times \ln(Z/Z_0) \quad \text{Pour } z_{min} < z \leq 200 \text{ m}$$

Suivant le tableau 2.4 du RNV2013, les valeurs des paramètres suscités sont comme suit :

- $K_t = 0,19$  Le coefficient de terrain (rugosité)
- $Z_0 = 0,05 \text{ m}$  Le paramètre de rugosité du terrain
- $Z_{min} = 2 \text{ m}$
- $Z = 10 \text{ m}$  Les équipements caténaire n'excédant pas cette hauteur, alors cette valeur est prise en compte le calcul

Par calcul, on obtient :  $Cr(z) = 1,00668 \cong 1,007$  équivalent à la valeur exigée par Rnv 2013 dans son tableau 2.5.

$Ct(z)$  est le coefficient de topographie qui prend en compte l'accroissement de la vitesse du vent lorsque celui-ci souffle sur des obstacles tels que les collines, les dénivellations isolées, etc, sa formule de calcul est la suivante :

$$\begin{cases} C_t(z)=1 & \text{pour } \phi < 0,05 \\ C_t(z)=1+S_{\max} * \left(1 - \frac{X}{K_{\text{red}} * L}\right) * e^{-\alpha(z/L)} & \text{pour } \phi \geq 0,05 \end{cases}$$

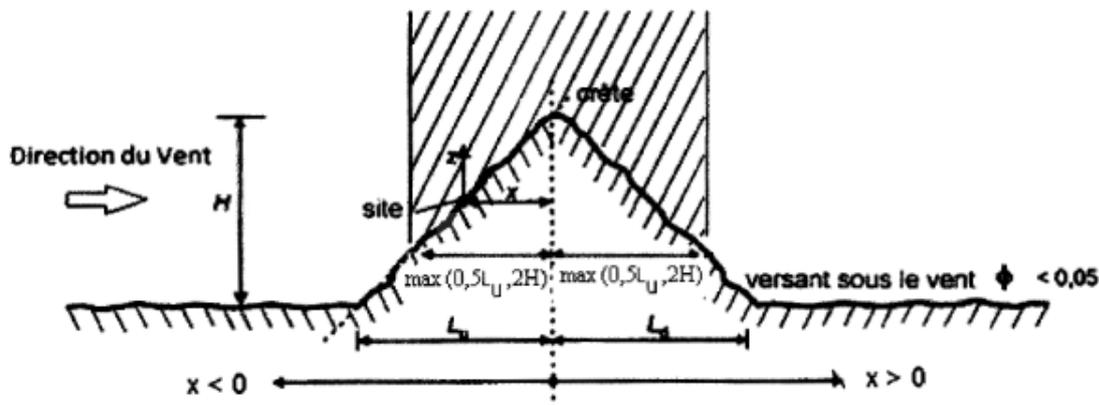


Figure 3.23. Paramètres pour la détermination de  $C_t(z)$  aux alentours des collines [18].

Où :

- $Z$  est la hauteur à laquelle nous voulons calculer la pression du vent, mais mesurée à partir du niveau du sol.
- La caténaire est à environ 4 m du bord de la plate-forme ;  $x = 4 \text{ m}$ .
- $\phi$  est la pente du versant au vent :  $\phi = H/L_u$ .
  - $H$  (en m) est la hauteur du versant

- $L$  (en m) est une longueur caractérisant le versant au vent et prenant la valeur  $L = \max(0,5Lu ; 2H)$

- Considérant la pente du remblai est de 1,5 à 1, c'est-à-dire  $Lu = 1,5 * H$ .

$L$  est la valeur la plus élevée de (  $0,5 * Lu$  et  $2 * H$ ) donc le max ( $0,75 H ; 2 * H$ ) est  $2 H$  et

$$\frac{H}{L} = \frac{H}{2H} = 0,5.$$

- Considérant une valeur de  $H = 5 m$ , donc  $L = 10 m$  d'où  $x/L = 0,4$  et  $z/L = 1$ , de sorte que les valeurs à multiplier feront partie du tableau 2.7 Rnv 2013.

Dans notre cas on aura deux situations :

- Au niveau de la gare la pente est  $\phi=0,00 < 0,05$  donc  $C_t(z)=1$
- Hors gare ou la pente  $\phi \geq 0,05$  :  $C_t(z) = 1 + 0,67 * 0,22 * 0,050 = 1,0073$

$V_{ref}$  est la vitesse de référence du vent qui est la vitesse moyenne sur dix minutes mesurées dans les conditions conventionnelles avec une probabilité annuelle de dépassement égale à 0,02 (ce qui correspond à une période de retour de 50 ans). [10]

Etant donné que la commune de Beni Mansour fait partie de la wilaya de Bejaia, laquelle est classée dans la **Zone I** avec une vitesse de référence de 25 m/s, Ce qui donne une valeur du vent résultante qu'est de :  $V_m = 1,007 * 1,0073 * 25 = 25,35 m/s = 91,92 km/h$

Par conséquent, la vitesse du vent à considérer pour le calcul structurel dans la présente étude est de **25,35 m/s**.

### c. Forces du vent sur le conducteur (fil de contact)

La pression du vent sur les conducteurs produit des efforts perpendiculaires à l'axe de la ligne, A partir de deux portées contigües, la force du vent sur un support doit être déterminée par :

$$Q_{WC} = q_p(z) * d * G_c * C_c * \left(\frac{L1 + L2}{2}\right) (\cos^2 \phi) \quad [N]$$

Où :

$q_p(z)$  est le Pic de la pression dynamique ;

$G_c$  est le facteur (corrélation aux rafales) de réponse structurelle pour les conducteurs qui prend en compte la réponse des conducteurs mobiles à la charge du vent. Il convient de déterminer le facteur GC selon l'expérience acquise au niveau national,  $G_c = 0,75$  serait largement accepté ;

$d$  est le diamètre du conducteur pour la ligne aérienne de contact souple (FOCL) et la profondeur de section pour la ligne aérienne de contact rigide (ROCL) (m)

$C_c$  est le coefficient de traînée du conducteur, une valeur de 1 est recommandée ; d'autres valeurs

peuvent être spécifiées par le client

$L1; L2$  sont les longueurs des deux portées contigües (m)

$\emptyset$  est l'angle d'incidence de la direction critique du vent par rapport à la normale au conducteur, on admet généralement  $\emptyset = 0^\circ$

Lorsque les conducteurs jumelées fonctionnent en parallèle, une réduction de la charge du vent peut être appliquée sur le conducteur frappée indirectement par le vent, comme étant égale à 80% à celle du conducteur frappé directement, si leur entre axe est inférieur à 5 fois le diamètre.

$$q_p(z) = q_{ref} * C_e(z_e) \quad [N/m^2], \quad \text{avec } q_{ref} = 375 \text{ N/m}^2$$

Et  $C_e(z) = C_t^2(z) * C_r^2(z) * [1 + 7I_v(z)]$

$C_r$  Coefficient de rugosité = 1,138

$C_t$  Coefficient de topographie, déjà calculé = 1,0073

$I_v$  : est l'intensité de la turbulence

$$I_v(z) = \frac{1}{C_t(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{pour } z > z_{min}$$

- $Z_0 = 0,05 \text{ m}$  Le paramètre de rugosité du terrain
- $Z = 10 \text{ m}$  Les équipements caténaire n'excédant pas cette hauteur, alors cette valeur est prise en compte le calcul

D'où  $I_v(z) = 0,187$

D'où  $C_e(z) = 1,0073^2 * 1,138^2 * [1 + 7 * 0,187] = 3,02$

**D'où  $q_p(z) = 3,02 * 375 = 440,9 \text{ N/m}^2$**

On considère une ligne droite  $L1 = L2 = 63 \text{ m}$  ;  $\text{Cos}^2 0 = 1$  ;  $C_c = 1$

Avec  $d = 11,7 \text{ mm}$  et  $G_c = 0,75$

$$Q_{WC} = q_p * d * G_c * C_c * \left(\frac{L_1 + L_2}{2}\right) * \text{Cos}^2 \emptyset = 440,9 * 11,7 * 10^{-3} * 1 * 0,75 * 63 * 1 = 243,75 \text{ N}$$

### 3.4.7. Longueur de canton et les différents types de pose

Le calcul de canton maximum est basé sur deux critères, d'une part le mouvement nécessaire de la course de l'équipement tendeur et d'autre part les sections conductrices du système. Ci-dessus, les deux critères sont expliqués.

#### 3.4.7.1. Déplacement des contrepoids

La dilatation maximale des fils de contact d'un demi-bloc de compensation mécanique à partir de la température moyenne sera de :  $D_1 = 0,5 * L \alpha (T_{\text{maximum}} - T_{\text{milieu}})$ .

La contraction maximale des fils de contact d'un demi-bloc de compensation mécanique à partir de la température moyenne sera de :  $D_2 = 0,5 * L * \alpha * (T_{milieu} - T_{min})$  avec :

$L$  = Longueur du canton de compensation mécanique, en m.

$\alpha$  = Coefficient de dilatation thermique du fil de contact ( $17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) [17]

Dans notre cas :

$T_{min}$  = Température ambiante minimale, en  $^\circ\text{C} = -20$   $^\circ\text{C}$ .

$T_{max}$  = Température maximale du conducteur, en  $^\circ\text{C} = +80$   $^\circ\text{C}$ .

$T_{mil}$  = Température ambiante moyenne, en  $^\circ\text{C} = 25$   $^\circ\text{C}$ . D'où

$$D_1 = 0,5 * L * \alpha * (T_{maximum} - T_{milieu}) = 0,5 * 1400 * 17 * 10^{-6} * (80 - 25) = 11,9 * 10^{-3} * 55 = 0,654 \text{ m}$$

$$D_2 = 0,5 * L * \alpha * (T_{milieu} - T_{min}) = 0,5 * 1400 * 17 * 10^{-6} * (25 - (-20)) = 0,535 \text{ m}$$

Dans le cas où le rapport entre les diamètres des poulies de l'équipement de compensation mécanique est de 1:5, l'équipement de contrepoids parcourra cinq fois la somme de la dilatation maximale et de la contraction maximale des conducteurs :  $5 * (D_1 + D_2)$  donc  $h = 5 * (0,654 + 0,535) = 5,945 \text{ m}$

Cette valeur doit être inférieure à la longueur du tube guide  $H$  m sur lequel se déplacent les contrepoids. Pourtant:  $5 * (D_1 + D_2) < Hm$ .

A partir de cette équation, la longueur maximale du canton de compensation mécanique ( $L$ ) sera déterminée pour les températures extrêmes de la zone.

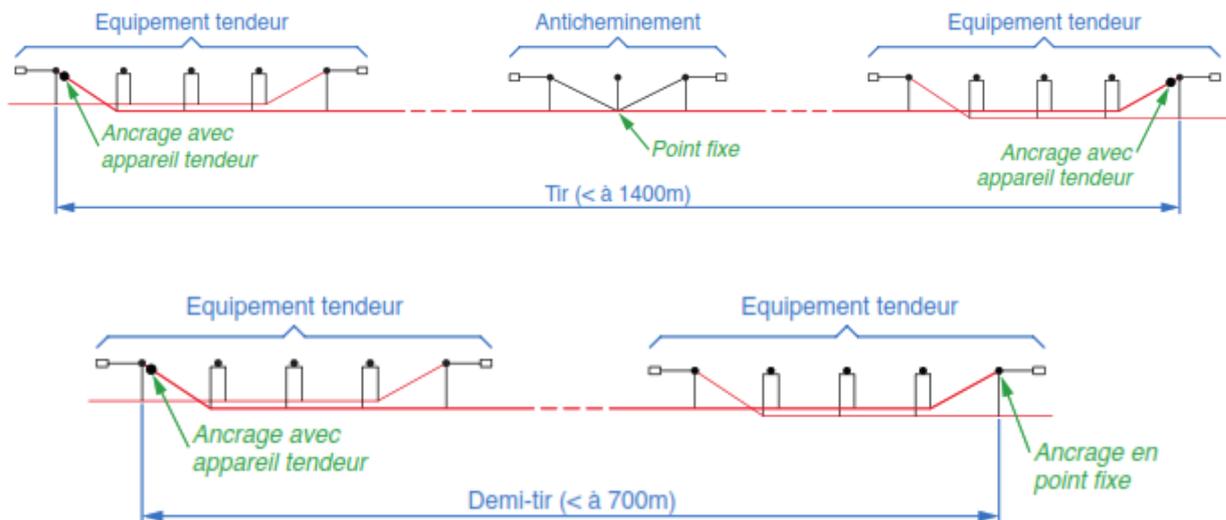
Pour les températures extrêmes de fil de contact de  $-20^\circ + 80^\circ$   $L = D_2 / 0,5 * \alpha * (T_{maximum} - T_{min})$

$$L = 0,535 / (0,5 * 17 * 10^{-6} * (80 - (-20))) = 629 \text{ m.}$$

D'où la longueur de canton est égale à  $2 * 629 \text{ m} = 1258 \text{ m}$ , qui serait compatible avec la course de déplacement des contrepoids qui est de  $5,945 \text{ m}$ .

**NB :** Dans le cas d'utilisation de poulies avec un rapport 1:3, les formules devront être modifiées dans ce sens.

Lorsque l'on a à faire à un canton caténaire de 700 à 1400 m, la section comprend un appareil de tension à chaque extrémité et un dispositif d'anti-cheminement disposé en milieu de canton (poteau dont la console est rendue fixe par ancrage aux deux poteaux encadrants). La figure n°23 montre le principe de pose d'un canton caténaire en pleine voie.



**Figure 3.24. Pose d'un canton caténaire en pleine voie [09].**

A noter que pour des cantons de caténaire plus courts (inférieurs à 700 m, pour franchissement d'appareils de voie par exemple), l'un des tendeurs d'extrémité peut être remplacé par un ancrage fixe au poteau. Il n'y a alors pas d'anticheminement.

Evidemment, le schéma de la figure n° 24 ne peut pas être appliqué tel quel. En effet, la caténaire doit être posée de manière à assurer la continuité électrique et la continuité du contact pantographe / caténaire (voir le point IV- 7. 3.). Les cantons de caténaire se succèdent donc en ayant un certain recouvrement entre eux. Sur la partie commune, le pantographe frotte en même temps sur le fil de contact des deux cantons contigus. Cependant, afin limiter les risques d'arrachements, il n'est pas souhaitable « d'évacuer » ou de « faire arriver » le fil de contact d'extrémité au même niveau que le contact pantographe / caténaire. Le fil est donc d'abord relevé au-dessus du plan de contact avant de pouvoir sortir du (ou entrer au) voisinage de l'axe de la voie.

Une connexion électrique souple permet d'assurer la continuité électrique de l'ensemble.

**NB :** Le même principe s'applique sur le cas du canton réel calculé précédemment.

### 3.4.7.2. Poteaux et portiques

#### a. Poteaux

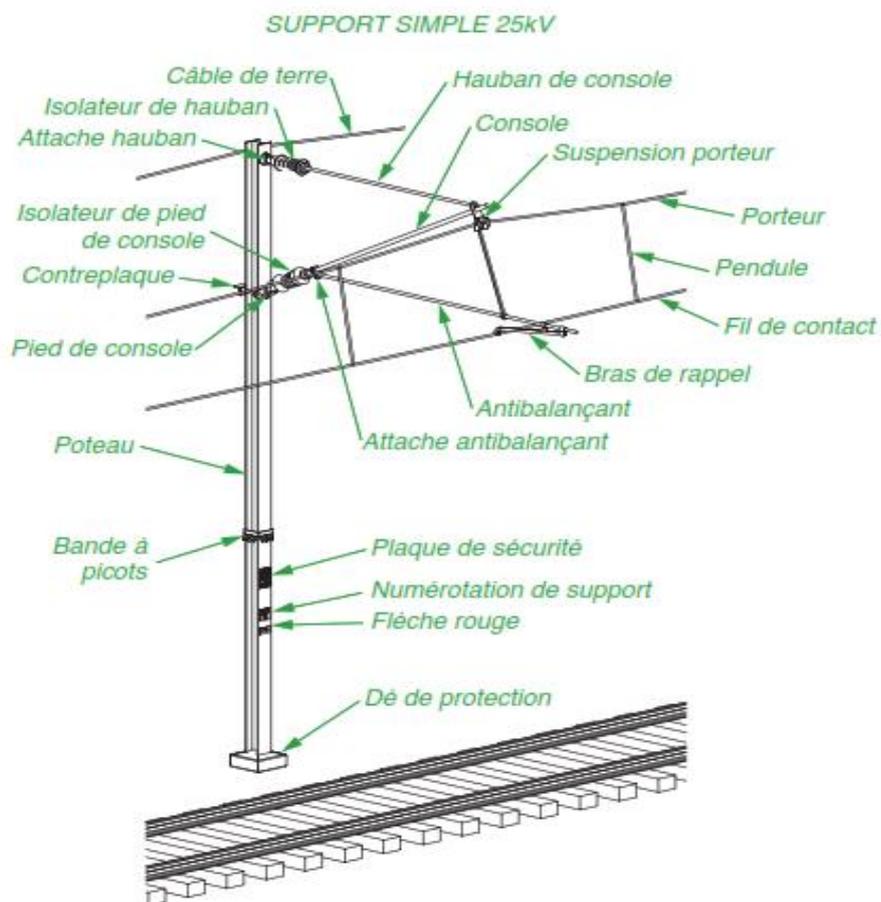
Les poteaux doivent assurer le soutien structurel des éléments de suspension de la caténaire, dans l'orientation de la voie ferrée. Les poteaux de la voie ferrée principale doivent être autoporteurs et en mesure de supporter le poids et les tensions exercés par les consoles ou portiques, la caténaire, et le conducteur de retour aérien.

Les poteaux prévus pour supporter les équipements de caténaires sont des poteaux métalliques type HE. Ils seront composés d'acier galvanisé à chaud S275-JR (EN-100525).

La longueur des poteaux sera déterminée en fonction de leurs emplacements et fonctions. Néanmoins une moyenne de 8 mètres de hauteur sera suffisante.

### *b. Portiques*

Dans la gare, les portiques rigides seront utilisés dont la couverture peut aller jusqu'à cinq voies. De cette manière on maintiendra l'indépendance mécanique des caténaires de chaque voie, et l'on réduira au maximum le nombre de poteaux à installer dans les quais, afin d'éliminer les obstacles de passage des voyageurs sur le quai.



**Figure 3.25. Support simple 25 KV<sub>a</sub> [09]**

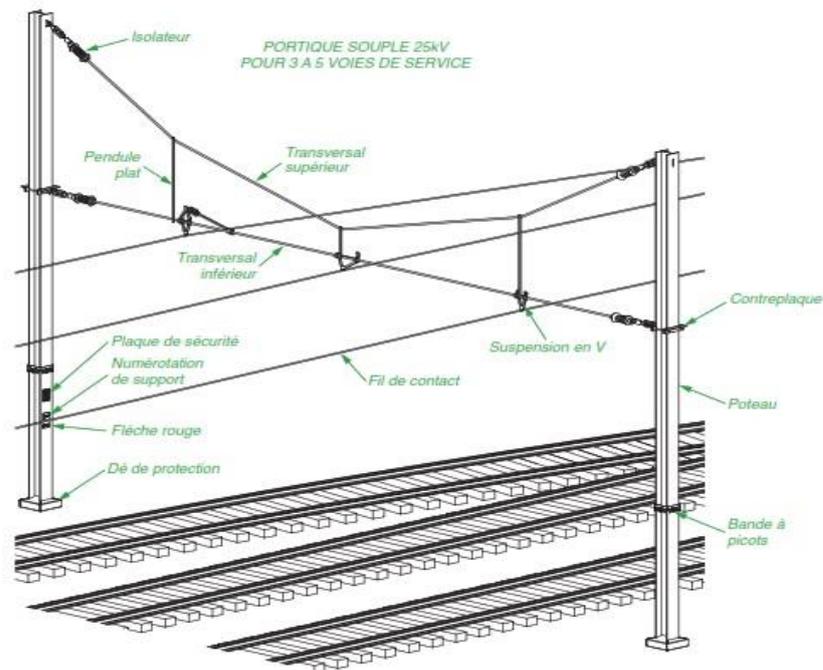
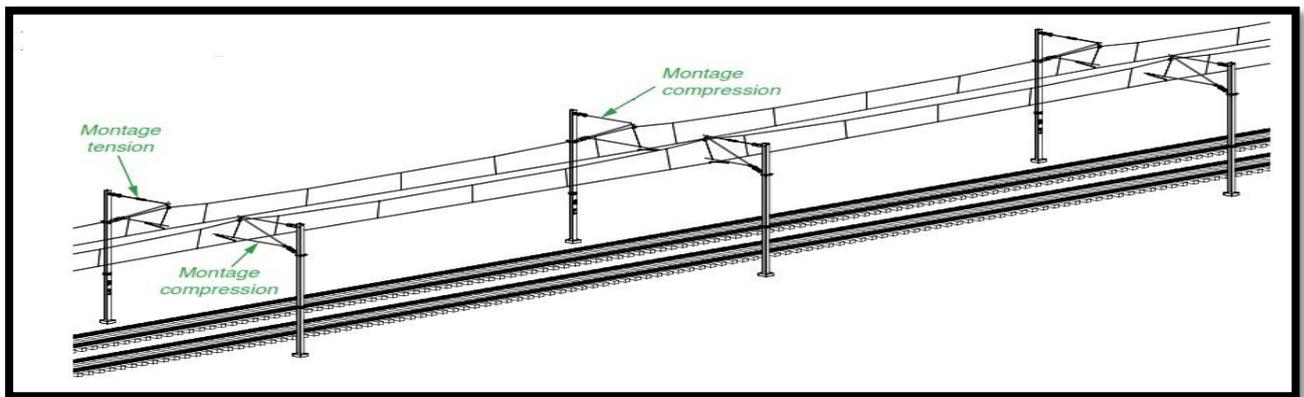


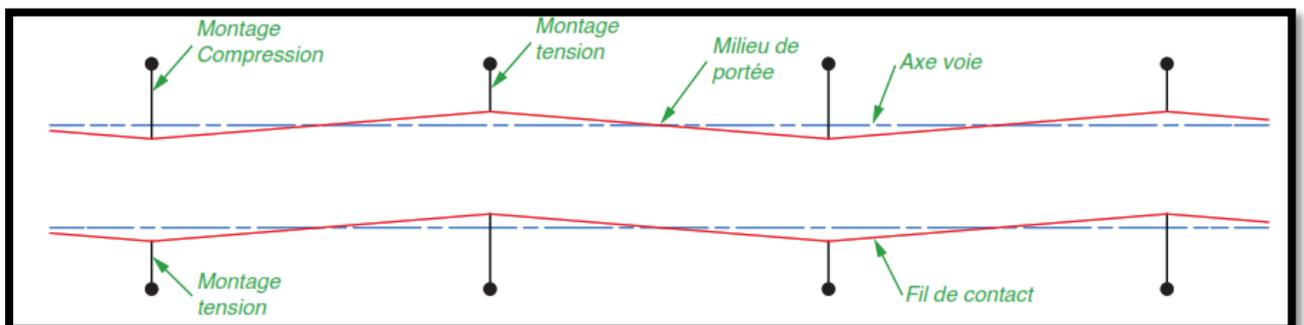
Figure 3.26. Portique souple 25 KVa pour 3 à 5 voies de services [09]

3.4.7.3. Différents types de pose

a. Pose en alignement



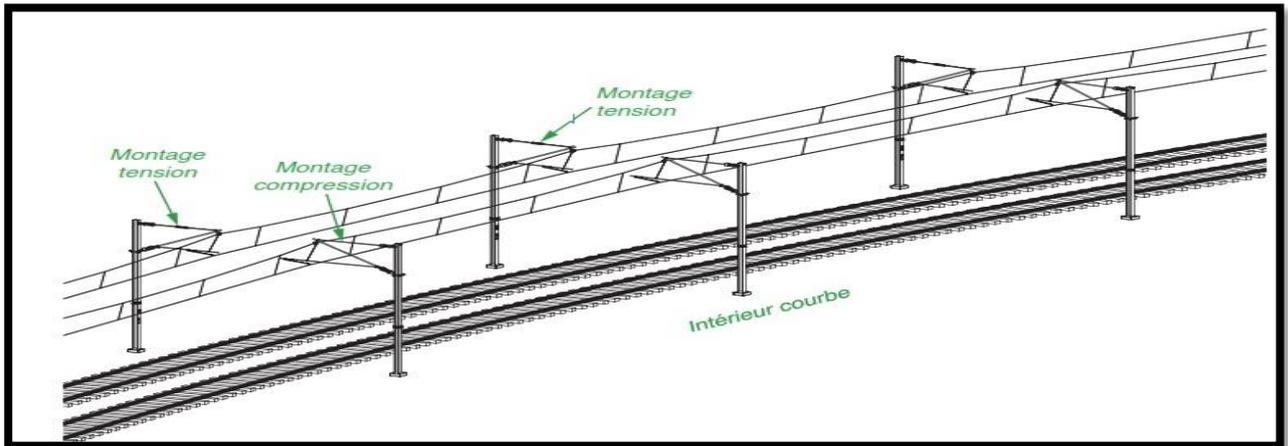
(a). Pose en alignement [09]



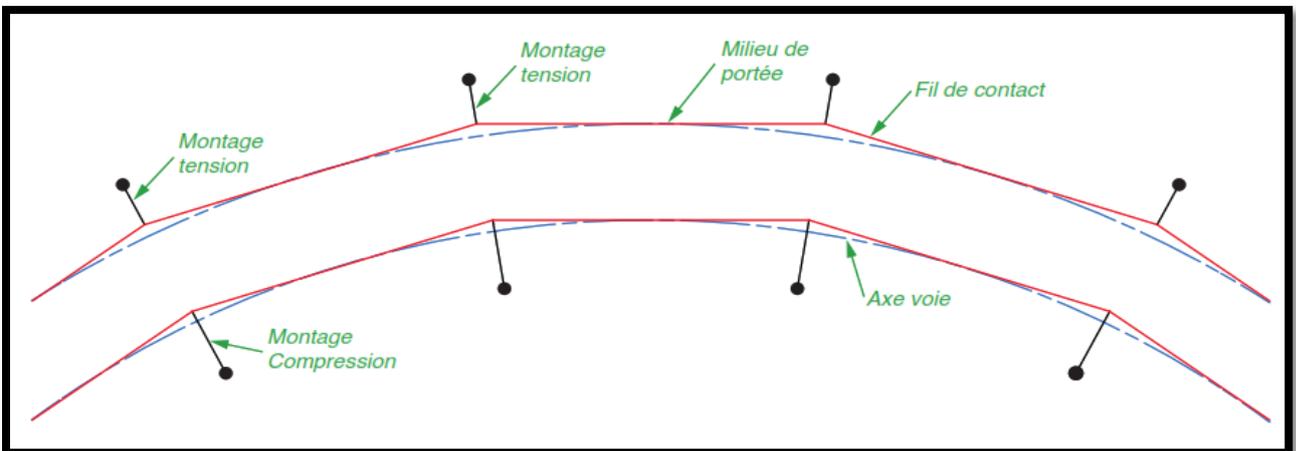
(b). Profile en long de pose [09]

Figure 3.27. Type de pose en alignement

*b. En courbe*



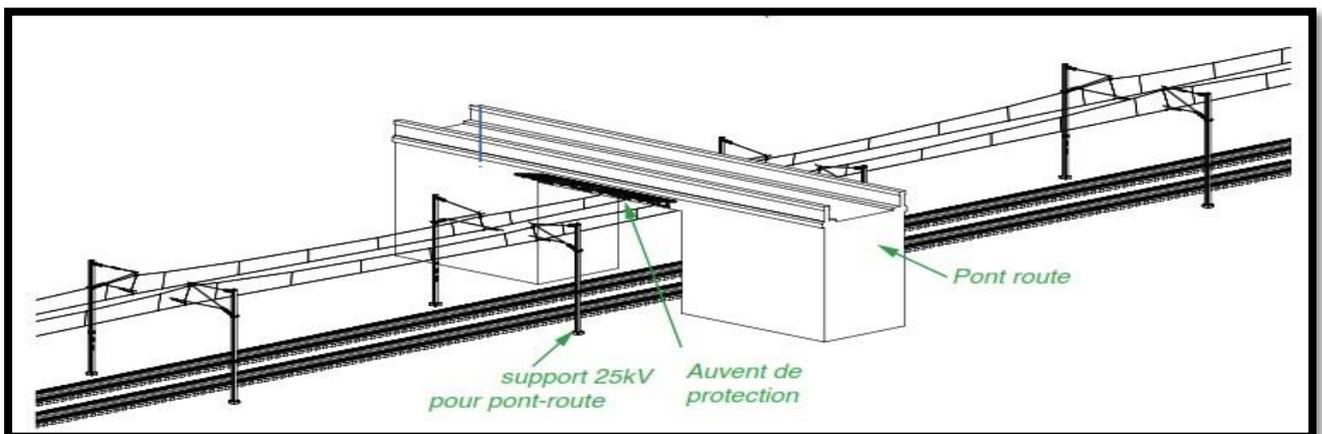
**(a). Pose en courbe [09]**



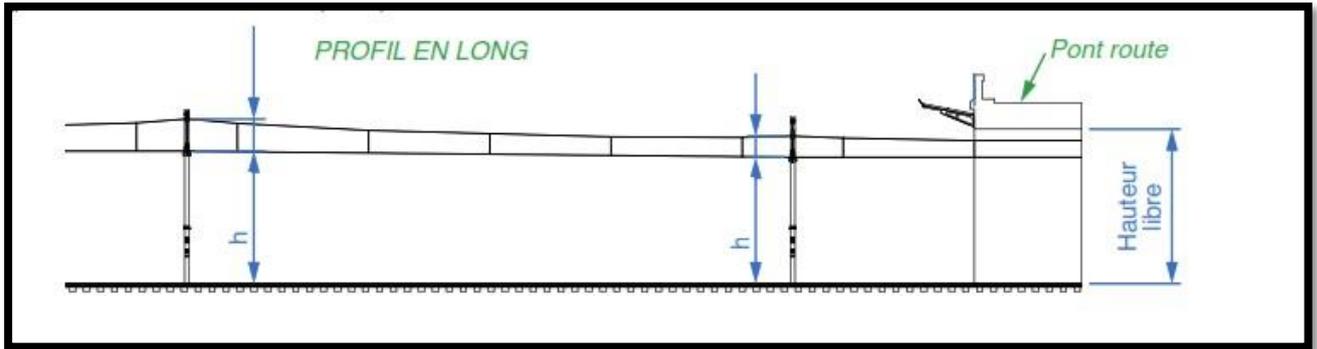
**(b). Profile en long de pose en courbe [09]**

**Figure 3.28. Type de pose en courbe**

*c. Pose sous ouvrage ou passerelle*



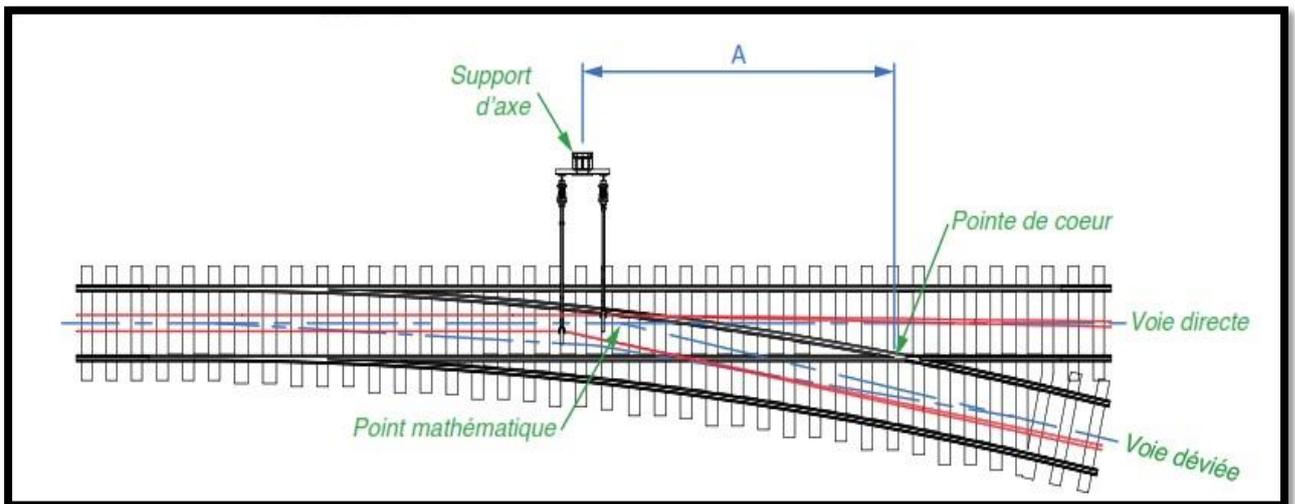
**(a). Poses-en sous ouvrage ou passerelle [09]**



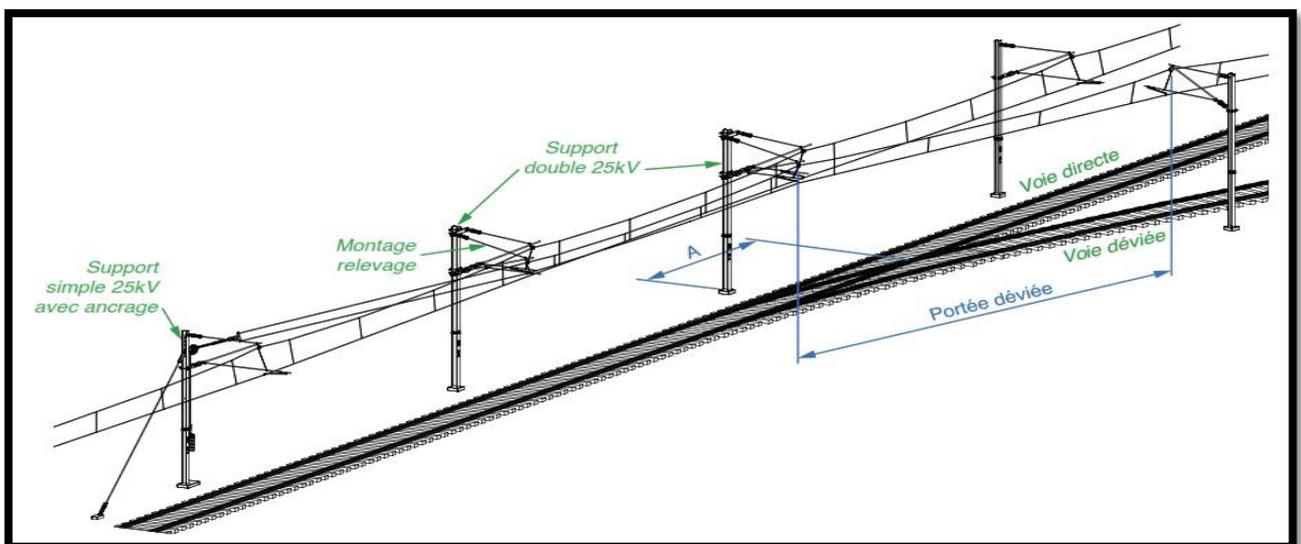
**(b) Profile en long de pose sous ouvrage ou passerelle [09]**

**Figure 3.29. Type de pose sous ouvrage ou passerelle**

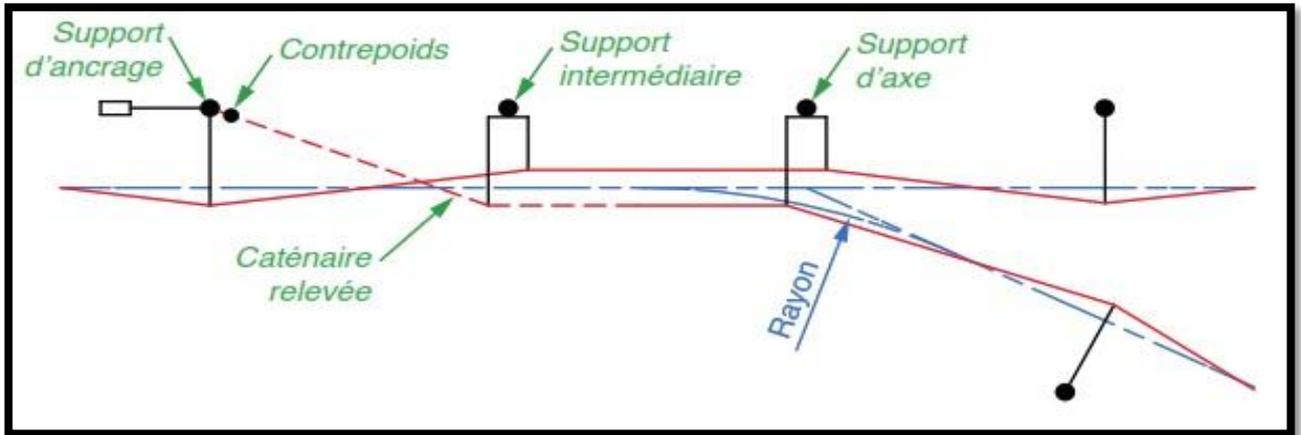
**d. Pose sur appareil de voie**



**(a). Pose sur appareil de voie [09]**



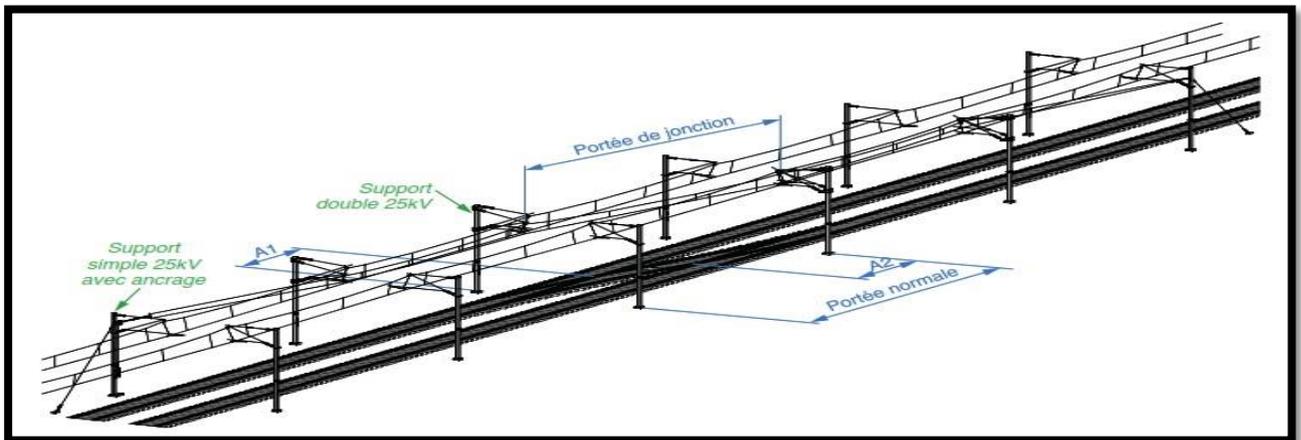
**(b). Pose sur appareil de voie [09]**



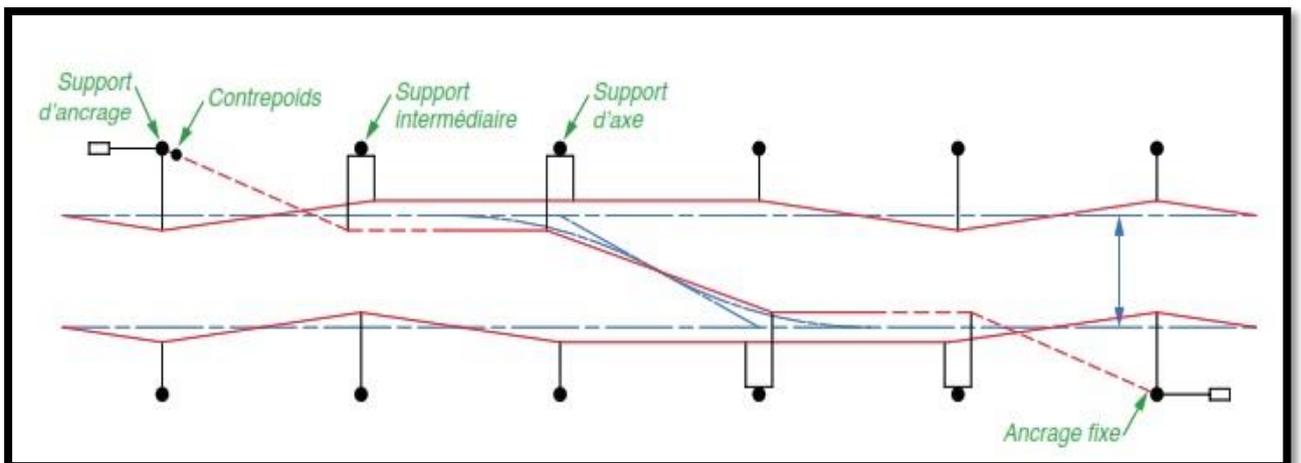
(c). Profile en long sur appareil de voie [09]

Figure 3.30. Type de pose sur appareil de voie

e. Portée en jonction



a). Pose en jonction [09]



(b). Profile en long En jonction [09]

Figure 3.31. Type de pose en jonction

### 3.4.7.4. Equipement tendeur

Le but de l'équipement tendeur est de permettre l'échange de fils entre deux tirs, les équipements tendeurs sont réalisés en 4 ou 5 portées, en fonction du rayon de courbure de la voie et de la pression du vent.

Les deux fils de contact des deux caténaires sont désaxés par rapport à l'axe du pantographe, afin qu'il y ait toujours au moins un fil rainuré en contact avec l'archet du pantographe dans la zone d'échange des deux caténaires.

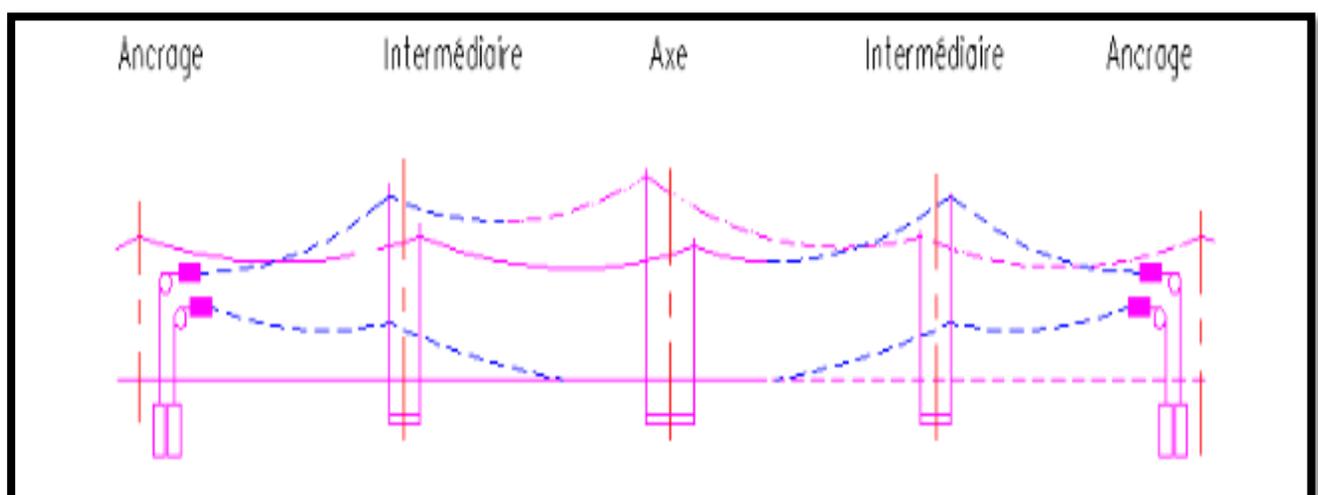
Le support central, appelé « Axe », situé au milieu de l'équipement tendeur pour les équipements tendeurs en 4 portées (figure n°3.24) est remplacé par deux supports SEMI-AXES, dans les équipements tendeurs en 5 portées (figure n°3.25).

Chaque demi-zone commune est suivie d'une zone de relèvement vertical du fil de contact. Le support qui permet ce relèvement égal à 0,50m est appelé INTERMEDIAIRE.

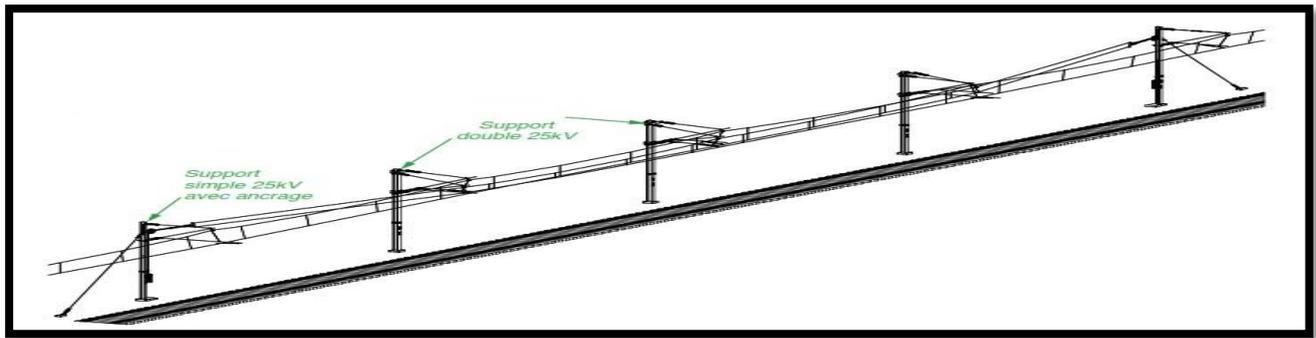
Dans un équipement tendeur dit NORMAL, la caténaire située à gauche dans le sens normal de circulation va directement à l'ancrage sans croisement. Dans le cas contraire, l'équipement tendeur est dit INVERSE. C'est le pas du désaxement qui détermine si l'équipement tendeur est normal ou inversé.

Lors du croisement des deux plans caténaires, la répartition des pendules est afin d'éviter tout contact entre le fil allant s'ancrer et un des pendules de la caténaire en prise.

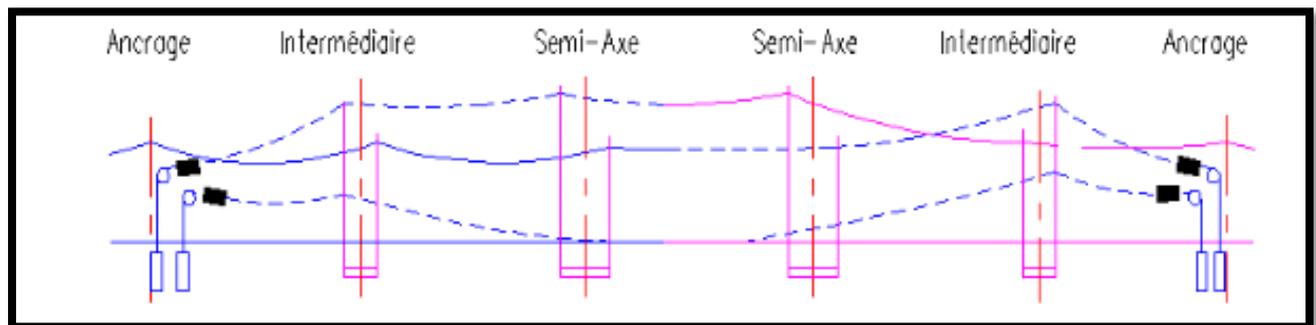
Les désaxements, les encombrements et les portées maximales admissibles sont définis en fonction des rayons de courbes, des vitesses de vent et du site.



(a). Equipement tendeur en 4 portées [09]



**(b). Equipement tendeur en 4 portées [09]**



**(c). Equipement tendeur en 5 portées [09]**

**Figure 3.32. Equipement tendeur**

### 3.4.7.5. Détermination des sections conductrices du système

Lorsque la température ambiante maximale est supérieure à 45 °C, la section conductrice du système doit être déterminée de manière à ce que la température maximale dans les conducteurs ne dépasse pas 80 °C, en tenant compte du rayonnement de l'énergie solaire, l'effet Joule et l'énergie dissipée par convection. Il convient d'étudier la détermination de la section conductrice du système dans ces cas au moyen de programmes de simulation du comportement électrique dans la section considérée.

### 3.5. Comportement dynamique de la caténaire

Toute caténaire représente, avec le pantographe, un système élastique oscillant avec peu d'amortissement. Le pantographe provoque des oscillations mécaniques dans la caténaire, lesquelles, en arrivant aux composants de cette dernière, situés par-devant du pantographe, provoquent aussi son oscillation ce qui influe considérablement sur les forces entre le pantographe et le fil de contact. Plus la vitesse est grande plus ces effets acquièrent de l'importance et plus les variations de la force de contact sont grandes. Une force de contact trop petite ou inexistante provoque des arcs électriques entre le fil et platine de contact, et une force trop élevée accélère l'usure du fil et de la platine de contact.

Les critères pour l'évaluation dynamique peuvent se classer dans deux grands groupes décrits ci-dessous.

### 3.5.1. Critères simples

Ce sont des critères très simplistes basés sur l'expérience et qui donnent des valeurs initiales pour réaliser un pré dimensionnement :

- Vitesse de propagation d'ondes.
- Facteur Doppler.
- Coefficient de réflexion.
- Facteur d'amplification de l'onde réfléchie.

#### 3.5.1.1. Vitesse de propagation d'ondes

C'est la vitesse à laquelle une excitation mécanique se propage longitudinalement dans la caténaire,

elle est donnée par la formule :  $V_p = \sqrt{\frac{Fc+Fs}{m_{fc}+m_p}}$  [18]

Où :

$Fc$  est la tension mécanique du fil de contact, en N ;  $Fc = 12$  kN.

$m_{fc}$  est la masse spécifique du fil de contact, en kg/m ;  $m_{fc} = 0,951$  kg/m.

$Fs$  est la tension mécanique du porteur, en N ;  $Fs = 12$  kN.

$m_p$  est la masse spécifique du porteur, en kg/m ;  $m_p = 0,605$  kg/m.

$$\text{Alors } V_p = \sqrt{\frac{12 \cdot 1000 + 12 \cdot 1000}{0,951 + 0,605}} = 486 \text{ Km/h}$$

La vitesse de propagation ( $V_p$ ) doit être le plus élevée possible par rapport à la vitesse de circulation ( $V_c$ ).

- Si  $V_p = V_c$  il existe une perte continue de contact entre le pantographe et la caténaire,
- Si  $V_p < V_c$  il existe une usure excessive des fils de contact,
- Si  $V_c < 0,7 V_p$  il existe un bon contact entre le pantographe et la caténaire,
- Si  $V_c > 0,7 V_p$  il existe des oscillations qui s'auto amplifient.

Selon la norme EN 50119, pour un bon contact pantographe-caténaire, la vitesse de circulation  $V_c$  ne devra pas dépasser les 70 % de la vitesse de propagation de l'onde  $V_p$ .

Dans notre cas 70% de  $V_p = 70\% \cdot 486 = 340$  Km/h, et la vitesse de circulation est de 160 Km/h, d'où l'exigence pour le bon contact pantographe-caténaire est satisfaite.

### 3.5.1.2. Facteur Doppler

C'est la relation entre la vitesse de propagation des ondes et la vitesse du train. Pour des vitesses allant jusqu'à 200 km / h, le facteur Doppler devrait être supérieur à 0,28 selon UIC 799-1OR. [16]

La formule est  $\alpha = \frac{V_c - V_b}{V_c + V_b}$ , Ou  $V_c$  dans ce cas : 486 Km/h et  $V_b = 160$  Km/h, (Vitesse de la ligne).

Par conséquent, le facteur doppler est :  $\alpha = \frac{326}{646} = 0,50$  ; Donc sa valeur est beaucoup plus élevée que la valeur requise par la norme, même pour une vitesse supérieure.

### 3.5.1.3. Coefficient de réflexion

Le facteur de réflexion est le paramètre permettant de mesurer la réaction mécanique, de l'onde il est

défini comme suit :  $r = \frac{\sqrt{Z_{ts} + m_{ts}}}{\sqrt{Z_{ts} * m_{ts} + \sqrt{Z_{fd} * m_{fd}}}}$  [18]

Où :

- $m_{ts}$  = masse spécifique du câble porteur a 0.84 kg/m
- $m_{fd}$  = masse spécifique du fil de contacte a 0.98 kg/m
- $Z_{ts}$  = Tension mécanique du câble porteur a 12 kN
- $Z_{fd}$  = Tension mécanique du fil de contacte a 12 kN

Ce qui donne comme valeur le facteur de réflexion égale à  $r = 0,50$  qui est inférieur à 0,60 exigé par la norme UIC 799-1OR.

### 3.5.1.4. Facteur d'amplification de l'onde réfléchie

Paramètre caractérisant l'influence de l'onde mécanique réfléchie sur le comportement vibratoire dynamique de la caténaire [18].

$x = \frac{r}{\alpha} = \frac{0,50}{0,50} = 1 < 2,1$  exigé par la norme UIC 799-1OR.

## 3.5.2. Critères plus précis

Ils sont fondamentalement basés sur la simulation numérique de l'interaction pantographe-caténaire et sur la prise de mesures.

### 3.6. Conclusion

Comme mentionné dans le chapitre précédent, la ligne d'arrivée du gestionnaire d'énergie pour l'alimentation des installations électriques haute tension du projet de la ligne ferroviaire Beni Mansour//Bejaia est 220 Kv, néanmoins la caténaire requiert une alimentation d'ordre 25 Kv en courant alternatif 50 Hz. Ceci implique des sous stations de transformation d'énergie de tension 220Kv à 25 Kv.

L'étude menée sur le tracé de la ligne ferroviaire, par un logiciel dédié, en introduisant les différentes caractéristiques de conception de la ligne, du matériel roulant et des facteurs extérieurs, a abouti à la nécessité d'implanter trois (03) sous stations de transformation électrique et de production du besoin de la caténaire.

Les calculs effectués ont permis de dimensionner ces dites sous stations par des transformateur dont la puissance (30 MVA et 40 MVA) répond favorablement à la demande de consommation de la ligne, tant en régime normal qu'en régime le plus critique (perte d'une sous station).

# Chapitre 04

## CALCULS, RESULTATS ET DIMENSIONNEMENT DE LA CATENAIRE

---

### 4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, les calculs distincts accomplis sur les constituants de la caténaire ont permis d'avoir des résultats nets qui remplissent les exigences techniques contractuelles et normatives décrétées par les organismes nationaux ou internationaux spécialisés dans les chemins de fers.

En fonction des hypothèses et critères de conception arrêtés dans les chapitres précédents, on procède aux calculs finaux pour déduire les dimensionnements réels des constituants de la caténaire. Aussi, en fonction du tracé ferroviaire élaboré aux alentours de la gare de Beni-Mansour, selon le périmètre d'étude défini dans le chapitre n°02, nous a permis de compléter les données d'entrées par les rayons de courbure et le profil en long suivant chaque tronçon d'étude. La finalité de ce chapitre est l'établissement de toutes les informations qui nous permettraient le passage à la phase exécution des travaux et de vérification effective sur terrains.

### 4.2. Eléments du tracé ferroviaire objet de l'étude

Un tracé ferroviaire a été élaboré sur deux axes dont les caractéristiques planimétriques et altimétriques de la plateforme ont été déterminées. Ces caractéristiques serviront au dimensionnement et aux calculs nécessaires pour déterminer l'ensemble des éléments de la caténaire. Les deux axes de tracé sont comme suit :

- 1- Un premier axe allant sur la voie existante de Bouira vers Bordj Bou Arreridj, du Pk SNTF 170+040 au Pk 172+530, en passant par la gare de Beni Mansour projetée dans le cadre du projet Bei Mansour/Bejaia.
- 2- Un deuxième axe de tracé prenant comme origine des points kilométriques, le Pk 0+000 centre du bâtiment voyageur (BV) de la gare de Beni Mansour projetée, tout en allant vers Bejaia sur 0+983 m.

#### 4.2.1. Axe Bouira-Constantine : PK SNTF 170+040 au PK 172+530

Les caractéristiques planimétriques et altimétriques de la plateforme de chaque axe sont reprises ci-après :

**Tableau 4.1. Rayon de l'axe du PK SNTF 170+040 au PK 172+530**

Pk Début	Pk Fin	Longueur	Géométrie	Valeur
170+040	170+234	194	Droite	R> 1500
170+234	170+494	260	Rayon	494
170+494	170+692	198	Droite	R> 1500
170+692	170+955	263	Rayon	431
170+955	171+894	939	Droite	R> 1500
171+894	172+105	211	Rayon	596
172+105	172+442	337	Rayon	569
172+442	172+530	88	Droite	R> 1500

**Tableau 4.2. Pente de l'axe de tracé du PK SNTF 170+040 au PK 172+530 (cf: Annexe B)**

Pk Début	Pk Fin	Longueur	Pente
169+530	170+147	617	-1,25%
170+147	170+822	675	0,50‰
170+822	171+553	731	0,00%
171+553	171+917	364	1,62%
171+917	172+537	620	1,46%
172+537	172+980	443	1,80%

#### 4.2.2. Axe BMR-BEJAIA : PK 0+000 au PK 0+900

**Tableau 4.3. Rayon de l'axe de tracé du PK 0+000 au PK 0+900**

Pk Début	Pk Fin	Longueur	Géométrie	Valeur
0+000	0+450	450	Droite	R> 1500
0+450	0+650	200	Rayon	322
0+650	0+900	250	Droite	R> 1500

**Tableau 4.4. Pente de l'axe de tracé du PK 0+000 au PK 0+900 (cf: Annexe C)**

Pk Début	Pk Fin	Longueur	Pente
0+000	0+351	351	0‰
0+351	0+983	632	1,5‰

### 4.3. Calculs des éléments justificatifs de la caténaire

#### 4.3.1. Portées réelles

##### 4.3.1.1. En pleine droite

La portée maximale établie en ligne droite est de 63 m, néanmoins cette longueur peut être réduite dans des endroits particuliers aux alentours des chapeaux de gendarmes, des aiguilles, des signaux ou d'obstacles. Les intervalles entre pendules ne doivent pas dépasser les 6,75 m de longueur.

##### 4.3.1.2. En courbe

Pour rester dans les limites admissibles de la flèche au milieu de la portée,  $f_m = \frac{a^2}{8 \cdot R}$  doit être inférieur à 0.649 m. Les différentes longueurs des portées utiles en fonction des rayons de courbure des deux axes de tracés cités ci-dessus, en prenant en considération la condition de la flèche ci-avant, sont calculées et reprises dans les tableaux suivants :

**Tableau 4.5. Portée réels de la flèche**

<b>Portée a= 58,5</b>		
<b>a</b>	<b>R</b>	<b><math>f = \frac{(a^2)}{8 \cdot R}</math></b>
58,5	596	0,72
58,5	569	0,75
58,5	494	0,87
58,5	431	0,99
58,5	322	1,33

<b>Portée a= 54</b>		
<b>a</b>	<b>R</b>	<b><math>f = \frac{(a^2)}{8 \cdot R}</math></b>
54	596	0,61
54	569	0,64
54	494	0,74
54	431	0,85
54	322	1,13

<b>Portée a= 49,5</b>		
<b>a</b>	<b>R</b>	<b><math>f = \frac{(a^2)}{8 \cdot R}</math></b>
49,5	596	0,51
49,5	569	0,54
49,5	494	0,62
49,5	431	0,71
49,5	322	0,95

<b>Portée a= 45</b>		
<b>a</b>	<b>R</b>	<b><math>f = \frac{(a^2)}{8 \cdot R}</math></b>
45	596	0,42
45	569	0,44
45	494	0,51
45	431	0,59
45	322	0,79

<b>Portée a= 40,5</b>		
<b>a</b>	<b>R</b>	<b><math>f = \frac{(a^2)}{8 \cdot R}</math></b>
40,5	596	0,34
40,5	569	0,36
40,5	494	0,42
40,5	431	0,48
40,5	322	0,64

<b>Portée a= 36</b>		
<b>a</b>	<b>R</b>	<b><math>f = \frac{(a^2)}{8 \cdot R}</math></b>
36	596	0,27
36	569	0,28
36	494	0,33
36	431	0,38
36	322	0,50

<i>Portée a= 31,5</i>		
<i>a</i>	<i>R</i>	$f= (a^2)/8*R$
31,5	596	0,21
31,5	569	0,22
31,5	494	0,25
31,5	431	0,29
31,5	322	0,39

<i>Portée a= 27</i>		
<i>a</i>	<i>R</i>	$f= (a^2)/8*R$
27	596	0,15
27	569	0,16
27	494	0,18
27	431	0,21
27	322	0,28

Les calculs effectués selon chaque portée et en fonction des rayons ont permis d'avoir les résultats ci-dessus. Seules les valeurs des flèches inférieures à 0.649 m sont admises d'où les portées possibles sont les suivantes :

- Pour a= 58,5 m, la valeur des flèches obtenues pour chaque rayon est supérieure à 0.649 m donc la portée n'est pas prise en considération dans la conception.
- Pour a= 54 m, la valeur des flèches obtenues pour les rayons 494, 431 et 322 est supérieure à 0.649 m donc la portée pour ces rayons n'est pas prise en considération dans la conception.
- Pour a= 49,5 m, la valeur des flèches obtenues pour les rayons 431 et 322 est supérieure à 0.649 m donc la portée 49,5 m pour ces deux rayons n'est pas prise en considération dans la conception.
- Pour a= 45 m, la valeur de la flèche obtenue pour le rayon 322 est supérieure à 0.649 m donc la portée 42,75 m pour ce rayon n'est pas prise en considération dans la conception.
- Pour a= 36 m, la valeur des flèches obtenues pour chaque rayon est inférieure à 0.649 m donc la portée est prise en considération dans la conception.
- Pour a= 31,5 m, la valeur des flèches obtenues pour chaque rayon est inférieure à 0.649 m donc la portée est prise en considération dans la conception.
- Pour a=27 m, la valeur des flèches obtenues pour chaque rayon est inférieure à 0.649 m donc la portée est prise en considération dans la conception.

Le tableau suivant reprend les conclusions de l'analyse des résultats obtenus

**Tableau 4.6. Portées à min et à max en fonction des rayons**

<i>R (m)</i>	<i>a min (m)</i>	<i>f min</i>	<i>a max (m)</i>	<i>f max</i>
596	27	0,15	54	0,61
569	27	0,16	49,5	0,54
494	27	0,18	49,5	0,62
431	27	0,21	45	0,59
322	27	0,28	40,5	0,64

### 4.3.2. Pentes de raccordement des hauteurs du plan de contact

Le cas de notre étude, la ligne est conçue pour une vitesse maximale peut atteindre ou dépasser de 10% les 160 Km/h, donc la hauteur du fil de contact mesurée au droit des supports est constante. Ainsi, la notion de pente de raccordement est sans objet dans ce cas. Pour les portées de part et d'autre d'un axe ou d'un demi-axe de sectionnement ou d'équipement tendeur, la pente éventuelle doit être constante.

### 4.3.3. Pendulage

La longueur d'un pendule  $i$  donné est calculée suivant la formule  $L_i = e - f_{pi} + f_i$ ,

Où

- $e$  est l'encombrement de la caténaire avec  $= 1,25 \text{ m}$ .
- $f_{pi}$  : La flèche du porteur au niveau du pendule  $i$
- $f_i$  : La flèche du fil de contact au niveau du pendule  $i$

#### 4.3.3.1. Calcul de la flèche du fil de contact au niveau d'un pendule

La formule générale de calcul de la flèche du fil de contact au niveau d'un pendule quelconque est la suivante :  $f_x = \frac{p}{2 \cdot T} * x * (a - x)$

##### a. Calcul de la flèche max pour une droite en fonction des différentes portées

La formule générale de calcul de la flèche maximale au milieu de la portée est  $f_m = \frac{a^2 p}{8T}$

**Tableau 4.7. Valeurs de la flèche maximale**

$A \text{ (m)}$	$P \text{ (Kg)}$	$T \text{ (N)}$	$f(m) = (p \cdot a^2) / 8 \cdot T$
63	0,98	1200	0,41
58,5	0,98	1200	0,35
54	0,98	1200	0,30
49,5	0,98	1200	0,25
45	0,98	1200	0,21
40,5	0,98	1200	0,17
36	0,98	1200	0,13
31,5	0,98	1200	0,10
27	0,98	1200	0,07

**b. Calcul des flèches du fil de contact au niveau de chaque pendule en fonction des différentes portées**

**Tableau 4.8. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 63 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T$ (N)	$x$ (m)	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)	
63	9	1	0,98	1200	6,75	0,00	4,5 & 6,75	
		2	0,98		13,5	0,13		
		3	0,98		20,25	0,22	18 & 24,75	24,75 & 31,5
		4	0,98		27	0,28		
		5	0,98		33,75	0,30	31,5 & 38,25	38,25 & 45
		6	0,98		40,5	0,28		
		7	0,98		47,25	0,22	45 & 51,75	51,75 & 58,5
		8	0,98		54	0,13		
		9	0,98		58,5	0,00		

**Tableau 4.9. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 58,5 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T$ (N)	$x$ (m)	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)	
58,5	9	1	0,98	1200	6,75	0,00	4,5 & 6,75	
		2	0,98		13,5	0,12		
		3	0,98		20,25	0,20	18 & 24,75	24,75 & 29,25
		4	0,98		24,75	0,24		
		5	0,98		29,25	0,25	29,25 & 33,75	33,75 & 40,5
		6	0,98		36	0,24		
		7	0,98		42,75	0,20	40,5 & 47,25	47,25 & 54
		8	0,98		49,5	0,12		
		9	0,98		54	0,00		

**Tableau 4.10. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 54m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T$ (N)	$x$ (m)	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)	
54	8	1	0,98	1200	6,75	0,00	4,5 & 6,75	
		2	0,98		13,5	0,10		
		3	0,98		20,25	0,17	18 & 24,75	24,75 & 29,25
		4	0,98		24,75	0,20		
		5	0,98		31,5	0,20	29,25 & 36	36 & 42,75
		6	0,98		38,25	0,17		
		7	0,98		45	0,10	42,75 & 49,5	
		8	0,98		49,5	0,00		

**Tableau 4.11. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 49,5 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T(N)$	$x(m)$	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)
49,5	7	1200	1	0,98	6,75	0,00	4,5 & 6,75
			2	0,98	13,5	0,09	
			3	0,98	20,25	0,15	18 & 24,75
			4	0,98	27	0,17	
			5	0,98	33,75	0,15	
			6	0,98	40,5	0,09	
			7	0,98	45	0,00	31,5 & 38,25

**Tableau 4.12. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 45 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T(N)$	$x(m)$	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)
45	7	1200	1	0,98	6,75	0,00	4,5 & 6,75
			2	0,98	13,5	0,08	
			3	0,98	18	0,12	18 & 22,5
			4	0,98	22,5	0,13	
			5	0,98	29,25	0,12	
			6	0,98	36	0,08	
			7	0,98	40,5	0,00	27 & 33,75

**Tableau 4.13. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 40,5 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T(N)$	$x(m)$	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)
40,5	6	1200	1	0,98	6,75	0,00	4,5 & 6,75
			2	0,98	13,5	0,07	
			3	0,98	18	0,10	18 & 22,5
			4	0,98	24,75	0,10	
			5	0,98	31,5	0,07	
			6	0,98	36	0,00	

**Tableau 4.14. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 36 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T(N)$	$x(m)$	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)
36	5	1200	1	0,98	6,75	0,00	4,5 & 6,75
			2	0,98	13,5	0,06	
			3	0,98	20,25	0,07	18 & 24,75
			4	0,98	27	0,06	
			5	0,98	31,5	0,00	

**Tableau 4.15. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 31,5 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T(N)$	$x(m)$	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)	
31,5	5	1	0,98	1200	6,75	0,00	4,5 & 6,75	
		2	0,98		11,25	0,04		11,25 & 15,75
		3	0,98		15,75	0,05	15,75 & 20,25	
		4	0,98		22,5	0,04		
		5	0,98		27	0,00		

**Tableau 4.16. Flèches  $f_i$  des pendule la portée 27 m**

$a(m)$	Nbre de flèche $N$	$N$	$p$ (kg)	$T(N)$	$x(m)$	$f_i$ (m)	Intervalle d'appuis de la pendule (flèche)	
27	4	1	0,98	1200	6,75	0,00	4,5 & 6,75	
		2	0,98		11,25	0,03		11,25 & 15,75
		3	0,98		18	0,03	15,75 & 22,5	
		4	0,98		22,5	0,00		

**4.3.3.2. Calcul de la flèche du porteur au droit des pendules**

La formule donnant la flèche du porteur au niveau du pendule  $i$  est la suivante :

$$f_{pi} = \frac{1}{T} \left[ \sum_{i=1}^n R_A * (b + \sum_{k=i}^n d_k) - \sum_{k=i}^n ((R_j + C_j)) * \sum_{j=k}^{i=1} d_j) - \left(\frac{qa}{2}\right) * \left(b + \sum_{k=i}^n d_k\right)^2 \right]$$

Avec  $R_i$  les charges supportées par le “ $i$ ” éme pendule, qui sont données par l’expression suivante :

$$R_i = \frac{p * (d_i + d_{i+1})}{2} - \frac{TD_i}{d_{i-1}} + \frac{TD_{i+1}}{d_i}$$

Les réactions aux suspensions du porteur, dont la réaction  $R_A$  est donnée par la formule suivante :

$$R_A = \frac{1}{a} [\sum_{i=1}^n (R_i + C_i) * (b' + \sum_{k=i}^n d_k) + (R_{n+1} + C_{n+1}) * b'] + \frac{qa}{2}$$

L’opération sert à déterminer pour chaque portée, la flèche du porteur au droit des pendules en calculant les charges supportées par chaque pendule ainsi que les réactions aux suspensions du porteur.

**a. Calcul des charges  $R_i$  supportées par le “ $i$ ” éme pendule**

Le calcul des différents paramètres et leur application par la formule de charges  $R_i$  suivantes

$$R_i = \frac{p*(d_i+d_{i+1})}{2} - \frac{TD_i}{d_{i-1}} + \frac{TD_{i+1}}{d_i}$$

en fonction des longueurs entre les pendules de chaque flèche, et ce e, fonction des portées équivalentes. Les résultats obtenus pour chaque portée sont repris dans les tableaux suivants :

**Tableau 4.17. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 63 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+i}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
63	9	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,13	4,73	0,00	23,15	27,88	49,14
		2	0,84	6,75	6,75	6,75		0,13	0,22	5,67	23,15	39,69	22,21	
		3	0,84	6,75	6,75	6,75		0,22	0,28	5,67	39,69	49,61	15,59	
		4	0,84	6,75	6,75	6,75		0,28	0,30	5,67	49,61	52,92	8,98	
		5	0,84	6,75	6,75	6,75		0,30	0,28	5,67	52,92	49,61	2,36	
		6	0,84	6,75	6,75	6,75		0,28	0,22	5,67	49,61	39,69	-4,25	
		7	0,84	6,75	6,75	6,75		0,22	0,13	5,67	39,69	23,15	-10,87	
		8	0,84	6,75	6,75	4,50		0,13	0,00	5,67	23,15	0,00	-17,48	
		9	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.18. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 58,5 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+i}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
58,50	9	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,12	4,73	0,00	20,95	25,67	45,36
		2	0,84	6,75	6,75	6,75		0,12	0,20	5,67	20,95	35,28	20,00	
		3	0,84	6,75	6,75	4,50		0,20	0,24	5,67	35,28	43,00	13,39	
		4	0,84	6,75	4,50	4,50		0,24	0,25	4,73	43,00	66,70	28,43	
		5	0,84	4,50	4,50	6,75		0,25	0,24	3,78	66,70	64,50	1,57	
		6	0,84	4,50	6,75	6,75		0,24	0,20	4,73	64,50	35,28	-24,49	
		7	0,84	6,75	6,75	6,75		0,20	0,12	5,67	35,28	20,95	-8,66	
		8	0,84	6,75	6,75	4,50		0,12	0,00	5,67	20,95	0,00	-15,28	
		9	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.19. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 54 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+i}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
54	8	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,11	4,73	0,00	18,74	23,47	41,58
		2	0,84	6,75	6,75	6,75		0,11	0,17	5,67	18,74	30,87	17,80	
		3	0,84	6,75	6,75	4,50		0,17	0,20	5,67	30,87	36,38	11,18	
		4	0,84	6,75	4,50	6,75		0,20	0,20	4,73	36,38	54,57	22,92	
		5	0,84	4,50	6,75	6,75		0,20	0,17	4,73	54,57	30,87	-18,98	
		6	0,84	6,75	6,75	6,75		0,17	0,11	5,67	30,87	18,74	-6,46	
		7	0,84	6,75	6,75	4,50		0,11	0,00	5,67	18,74	0,00	-13,07	
		8	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.20. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 49,50 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+1}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
49,50	7	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,09	4,73	0,00	16,54	21,26	37,80
		2	0,84	6,75	6,75	6,75		0,09	0,15	5,67	16,54	26,46	15,59	
		3	0,84	6,75	6,75	6,75		0,15	0,17	5,67	26,46	29,77	8,98	
		4	0,84	6,75	6,75	6,75		0,17	0,15	5,67	29,77	26,46	2,36	
		5	0,84	6,75	6,75	6,75		0,15	0,09	5,67	26,46	16,54	-4,25	
		6	0,84	6,75	6,75	4,50		0,09	0,00	5,67	16,54	0,00	-10,87	
		7	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.21. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 45,00 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+1}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
45	7	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,08	4,73	0,00	14,33	19,06	34,02
		2	0,84	6,75	6,75	4,50		0,08	0,12	5,67	14,33	22,05	13,39	
		3	0,84	6,75	4,50	4,50		0,12	0,13	4,73	22,05	35,28	17,96	
		4	0,84	4,50	4,50	6,75		0,13	0,12	3,78	35,28	33,08	1,58	
		5	0,84	4,50	6,75	6,75		0,12	0,08	4,73	33,08	14,33	-14,02	
		6	0,84	6,75	6,75	4,50		0,08	0,00	5,67	14,33	0,00	-8,66	
		7	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.22. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 40,50 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+1}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
40,50	6	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,07	4,73	0,00	12,13	16,85	30,24
		2	0,84	6,75	6,75	4,50		0,07	0,10	5,67	12,13	17,64	11,18	
		3	0,84	6,75	4,50	6,75		0,10	0,10	4,73	17,64	26,46	13,55	
		4	0,84	4,50	6,75	6,75		0,10	0,07	4,73	26,46	12,13	-9,61	
		5	0,84	6,75	6,75	4,50		0,07	0,00	5,67	12,13	0,00	-6,46	
		6	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.23. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 36 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+1}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
36,00	5	1	0,84	4,50	6,75	6,75	1200	0,00	0,06	4,73	0,00	9,92	14,65	26,46
		2	0,84	6,75	6,75	6,75		0,06	0,07	5,67	9,92	13,23	8,98	
		3	0,84	6,75	6,75	6,75		0,07	0,06	5,67	13,23	9,92	2,36	
		4	0,84	6,75	6,75	4,50		0,06	0,00	5,67	9,92	0,00	-4,25	
		5	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.24. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 31,50 m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+1}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
31,50	5	1	0,84	4,50	6,75	4,50	1200	0,00	0,04	4,73	0,00	7,72	12,44	22,68
		2	0,84	6,75	4,50	4,50		0,04	0,05	4,73	7,72	13,78	10,79	
		3	0,84	4,50	4,50	6,75		0,05	0,04	3,78	13,78	11,58	1,58	
		4	0,84	4,50	6,75	4,50		0,04	0,00	4,73	11,58	0,00	-6,85	
		4	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**Tableau 4.25. Les charges  $R_i$  supportées par les pendules de la portée 27m**

$a(m)$	Nbre d'appuis	$N$	$p$ (Kg)	$d_{i-1}$ (m)	$d_i$ (m)	$d_{i+1}$ (m)	$T$ (N)	$D_i$ (m)	$D_{i+1}$ (m)	$p^*(d_{i-1}+d_i)/2$	$(TD_i)/d_{i-1}$	$(TD_{i+1})/d_i$	$R_i$ (N)	RA (N)
27	4	1	0,84	4,50	6,75	4,50	1200	0,00	0,03	4,73	0,00	5,51	10,24	18,90
		2	0,84	6,75	4,50	6,75		0,03	0,03	4,73	5,51	8,27	7,48	
		3	0,84	4,50	6,75	4,50		0,03	0,00	4,73	8,27	0,00	-3,54	
		4	0,84	6,75	4,50	0,00		0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	4,73	

**b. Les flèches du porteur au niveau de chaque pendule  $i$  de chaque portée**

Les flèches du porteur au niveau de chaque pendule  $i$  de chaque portée sont données dans les tableaux ci-après :

**Tableau 4.26. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 63 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
63	9	1	27,88	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	49,14	0,1456	0,28
		2	22,21	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,75
		3	15,59	0,242	4,5	20,25	20,25	0,242	0,00083		0,1456	1,08
		4	8,98	0,352	4,5	27	27	0,352	0,00083		0,1456	1,28
		5	2,36	0,462	4,5	33,75	33,75	0,462	0,00083		0,1456	1,35
		6	- 4,25	0,572	4,5	40,5	40,5	0,572	0,00083		0,1456	1,28
		7	- 10,87	0,682	4,5	47,25	47,25	0,682	0,00083		0,1456	1,08
		8	- 17,48	0,792	4,5	54	54	0,792	0,00083		0,1456	0,75
		9	4,73	0,902	4,5	58,5	58,5	0,902	0,00083		0,1456	0,28

**Tableau 4.27. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 58,5 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
58,5	9	1	25,67	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	45,36	0,1456	0,30
		2	20,00	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,77
		3	13,39	0,242	4,5	20,25	20,25	0,242	0,00083		0,1456	1,09
		4	28,43	0,352	4,5	24,75	24,75	0,352	0,00083		0,1456	1,27
		5	1,57	0,462	4,5	29,25	29,25	0,462	0,00083		0,1456	1,30
		6	-24,49	0,572	4,5	36	36	0,572	0,00083		0,1456	1,27
		7	-8,66	0,682	4,5	42,75	42,75	0,682	0,00083		0,1456	1,09
		8	-15,28	0,792	4,5	49,5	49,5	0,792	0,00083		0,1456	0,77
		9	4,73	0,902	4,5	54	54	0,902	0,00083		0,1456	0,30

**Tableau 4.28. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 54 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
54	8	1	23,47	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	41,58	0,1456	0,32
		2	17,80	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,81
		3	11,18	0,242	4,5	20,25	20,25	0,242	0,00083		0,1456	1,11
		4	22,92	0,352	4,5	24,75	24,75	0,352	0,00083		0,1456	1,25
		5	- 18,98	0,462	4,5	31,5	31,5	0,462	0,00083		0,1456	1,20
		6	- 6,46	0,572	4,5	38,25	38,25	0,572	0,00083		0,1456	1,11
		7	- 13,07	0,682	4,5	45	45	0,682	0,00083		0,1456	0,81
		8	4,73	0,792	4,5	49,5	49,5	0,792	0,00083		0,1456	0,32

**Tableau 4.29. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 49,5m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
49,5	7	1	21,26	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	37,80	0,1456	0,35
		2	15,59	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,83
		3	8,98	0,242	4,5	20,25	20,25	0,242	0,00083		0,1456	1,12
		4	2,36	0,352	4,5	27	27	0,352	0,00083		0,1456	1,22
		5	- 4,25	0,462	4,5	33,75	33,75	0,462	0,00083		0,1456	1,12
		6	- 10,87	0,572	4,5	40,5	40,5	0,572	0,00083		0,1456	0,83
		7	4,73	0,682	4,5	45	45	0,682	0,00083		0,1456	0,35

**Tableau 4.30. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 45 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
45	7	1	19,06	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	34,02	0,1456	0,38
		2	13,39	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,87
		3	17,96	0,242	4,5	18	18	0,242	0,00083		0,1456	1,13
		4	1,58	0,352	4,5	22,5	22,5	0,352	0,00083		0,1456	1,18
		5	- 14,02	0,462	4,5	29,25	29,25	0,462	0,00083		0,1456	1,13
		6	- 8,66	0,572	4,5	36	36	0,572	0,00083		0,1456	0,87
		7	4,73	0,682	4,5	40,5	40,5	0,682	0,00083		0,1456	0,38

**Tableau 4.31. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 40,5 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
40,5	6	1	16,85	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	30,24	0,1456	0,42
		2	11,18	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,92
		3	13,55	0,242	4,5	18	18	0,242	0,00083		0,1456	1,15
		4	- 9,61	0,352	4,5	24,75	24,75	0,352	0,00083		0,1456	1,15
		5	- 6,46	0,462	4,5	31,5	31,5	0,462	0,00083		0,1456	0,92
		6	4,73	0,572	4,5	36	36	0,572	0,00083		0,1456	0,42

**Tableau 4.32. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 36 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$1/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
36	5	1	14,65	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	26,46	0,1456	0,47
		2	8,98	0,132	4,5	13,5	13,5	0,132	0,00083		0,1456	0,99
		3	2,36	0,242	4,5	20,25	20,25	0,242	0,00083		0,1456	1,15
		4	- 4,25	0,352	4,5	27	27	0,352	0,00083		0,1456	0,99
		5	4,73	0,462	4,5	31,5	31,5	0,462	0,00083		0,1456	0,47

**Tableau 4.33. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 31,5 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$l/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
31,5	5	1	12,44	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	22,68	0,1456	0,85
		2	10,79	0,132	4,5	11,25	11,25	0,132	0,00083		0,1456	0,99
		3	1,58	0,242	4,5	15,75	15,75	0,242	0,00083		0,1456	1,10
		4	- 6,85	0,352	4,5	22,5	22,5	0,352	0,00083		0,1456	0,99
		5	4,73	0,462	4,5	27	27	0,462	0,00083		0,1456	0,85

**Tableau 4.34. Les flèches du porteur pour chaque pendule de la portée 27 m**

$a(m)$	Nbre charge	$N$	$R_i$	$C_i$	$b$	$dk$	$dj$	$C_j$	$l/T$	$RA$	$q/2$	$f_{pi}$
27	5	1	10,24	0,022	4,5	6,75	6,75	0,022	0,00083	18,90	0,1456	0,95
		2	7,48	0,132	4,5	11,25	11,25	0,132	0,00083		0,1456	1,08
		3	- 3,54	0,242	4,5	18	18	0,242	0,00083		0,1456	1,08
		4	4,73	0,352	4,5	22,5	22,5	0,352	0,00083		0,1456	0,95

**c. La longueur de chaque pendule  $i$  de chaque portée  $a$** 

Le calcul réalisé en appliquant la formule de longueur  $L_i = e - f_{pi} + f_i$  nous a permis d'avoir les résultats suivants :

**Tableau 4.35. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 63 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$L_i(m)$	
63	9	1	1,25	0,00		0,28		0,97	
		2							
		3		0,22	1,08	0,39			
		4					0,28	1,28	0,25
		5		0,30	1,35	0,20			
		6					0,28	1,28	0,25
		7		0,22	1,08	0,39			
		8					0,13	0,75	0,63
		9		0,00		0,28			
		10							

**Tableau 4.36. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 58,5 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
58,5	9	1,25	1	0,00	/	0,30	/	0,95	/
			2						
			3	0,20	1,09	0,36			
			4				0,24	1,27	0,22
			5	0,25	1,30	0,20			
			6				0,24	1,27	0,22
			7	0,20	1,09	0,36			
			8				0,12	0,77	0,60
			9	0,00	/	0,30			
			10						

**Tableau 4.37. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 54 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
54	8	1,25	1	0,00	/	0,32	/	0,93	/
			2						
			3	0,17	1,11	0,31			
			4				0,20	1,25	0,20
			5	0,20	1,20	0,25			
			6				0,17	1,11	0,31
			7	0,11	0,81	0,55			
			8				0,00	/	0,32
			9						

**Tableau 4.38. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 49,5 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
49,5	7	1,25	1	0,00	/	0,35	/	0,90	/
			2						
			3	0,15	1,12	0,28			
			4				0,17	1,22	0,20
			5	0,15	1,12	0,28			
			6				0,09	0,83	0,51
			7	0,00	/	0,35			
			8						

**Tableau 4.39. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 45 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
45	7	1,25	1	0,00	/	0,38	/	0,87	/
			2		0,08		0,87		0,46
			3	0,12	0,13	1,13	1,18	0,24	0,20
			4						
			5	0,12	0,08	1,13	0,87	0,24	0,46
			6						
			7	0,00	/	0,38	/	0,87	/
			8						

**Tableau 4.40. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 40,5 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
40,5	6	1,25	1	0,00	/	0,42	/	0,83	/
			2		0,07		0,92		0,40
			3	0,10	0,10	1,15	1,15	0,20	0,20
			4						
			5	0,07	0,00	0,92	0,40	0,40	0,83
			6						
			7	/	/	0,42	/	/	

**Tableau 4.41. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 36 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
36	5	1,25	1	0,00	/	0,47	/	0,78	/
			2		0,06		0,99		0,32
			3	0,07	0,06	1,15	0,99	0,17	0,32
			4						
			5	0,00	/	0,47	/	0,78	/
			6						

**Tableau 4.42. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 31,5 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
31,5	5	1,25	1	0,00	/	0,85	/	0,40	/
			2		0,04		0,99		0,30
			3	0,05	0,04	1,10	0,99	0,20	0,30
			4						
			5	0,00	/	0,85	/	0,40	/
			6						

**Tableau 4.43. Les longueurs des pendules  $i$  de la portée 27 m**

$a(m)$	Nbre de pendules	$N$	$e(m)$	$f_i(m)$		$f_{pi}(m)$		$Li(m)$	
27	5	1,25		0,00		0,95		0,30	
					0,03		1,08		0,20
				0,03		1,08		0,20	
					0,00		0,95		0,30

#### 4.4. Résumé des différents calculs effectués

Le tableau 4.44 ci-dessous représente un résumé des différentes longueurs des pendules et des flèches de câble porteur aux droits des pendules en fonction des longueurs des portées.

L'ensemble des neuf (09) portées en fonction de leurs pendules et flèches respectifs est représenté en annexe D.

**Tableau 4.44. Résumé des différentes longueurs des pendules, des flèches de câble porteur en fonction des longueurs des portées.**

		Numéro des pendules									
Repere de pendulage		2		4		6		8		10	
		1	3	5	7	9	11				
N 1 (63,00 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	4,5
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,28	0,75	1,08	1,28	1,35	1,28	1,08	0,75	0,28
		Li	0,97	0,63	0,39	0,25	0,20	0,25	0,39	0,63	0,97
N 2 (58,50 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	6,75	4,5	4,5	6,75	6,75	6,75	4,5
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,30	0,77	1,09	1,27	1,30	1,27	1,09	0,77	0,30
		Li	0,95	0,60	0,36	0,22	0,20	0,22	0,36	0,60	0,95
N 3 (54,00 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	6,75	4,5	6,75	6,75	6,75	4,5	
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,32	0,81	1,11	1,25	1,20	1,11	0,81	0,32	
		Li	0,93	0,55	0,31	0,20	0,25	0,31	0,55	0,93	
N 4 (49,50 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	6,75	4,5		
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,35	0,83	1,12	1,22	1,12	0,83	0,35		
		Li	0,90	0,51	0,28	0,20	0,28	0,51	0,90		
N 5 (45,00 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	4,5	4,5	6,75	6,75	4,5		
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,38	0,87	1,13	1,18	1,13	0,87	0,38		
		Li	0,87	0,46	0,24	0,20	0,24	0,46	0,87		
N 6 (40,50 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	4,5	6,75	6,75	4,5			
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,42	0,92	1,15	1,15	0,92	0,42			
		Li	0,83	0,40	0,20	0,20	0,40	0,83			
N 7 (36,00 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	6,75	6,75	6,75	4,5				
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,47	0,99	1,15	0,99	0,47				
		Li	0,78	0,32	0,17	0,32	0,78				
N 8 (31,50 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	4,5	4,5	6,75	4,5				
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,85	0,99	1,10	0,99	0,85				
		Li	0,40	0,30	0,20	0,30	0,40				
N 9 (27,00 m)	Distance entre pendule (m)	4,5	6,75	4,5	6,75	4,5					
	Longueur des pendules (m)	fpi	0,95	1,08	1,08	0,95					
		Li	0,30	0,20	0,20	0,30					

## 4.5. Conclusion

Après avoir élaboré un tracé ferroviaire en respectant le périmètre de notre étude arrêté auparavant dans le chapitre 02, des caractéristiques planimétriques et altimétriques de la plateforme ont été déduites, elles nous ont servis aux calculs des portées nécessaires à la conception et ce en fonction des conditions et des critères déjà prédéfinis.

Les pendules reliant le câble porteur et le fil de contact ont été recensés et les charges influant sur chaque point de connexion ont été déterminées, ainsi les longueurs des flèches de fil de contact et celles du câble porteur de chaque portée ont été dimensionnées de façon à avoir un fil de contact plus au moins droit, ce qui permet d'éviter son usure rapide.

L'ensemble des conditions exigées notamment dans le chapitre 03, sont satisfaites et les résultats obtenus repris sur les nombreux tableaux de ce chapitre, permettent d'en exécuter sur terrain et de vérifier leur faisabilité par l'emplacement des constituants de la caténaire.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

La caténaire qui est une structure quasi périodique, d'un assemblage de câbles, conducteurs et isolés, fortement précontraints, acheminant le courant électrique jusqu'aux trains, par le biais du pantographe. L'alimentation en énergie électrique de la caténaire pour permettre la circulation des trains électriques, nécessite des puissances élevées et des transformateurs de tension de la très haute tension à la haute tension d'ordre de 25 000 Volt, du réseau du gestionnaire d'électricité Sonelgaz au réseau local de gestion de système d'alimentation des trains.

Bien que les composants qui constituent cette caténaire soient simples (câbles, poulies, etc.), le dimensionnement de chacun requiert des calculs relativement complexes afin d'avoir une géométrie très précise. Par ailleurs, les procédures de réglage au moment de montage d'une caténaire sont les conséquences d'une expérience avérée.

Le pantographe qui est un système articulé non-linéaire possédant sa propre dynamique rend la conception des constituants de la caténaire au droit de contact d'une grande difficulté avec notamment un glissant unilatéral, de plus, la vitesse de déplacement du train engendre des caractéristiques et des réglages (tension mécanique) détaillés pour atteindre une géométrie précise en trois dimensions.

Dans ce document sont présentées les différentes étapes qui ont permis d'aboutir à une conception fiable de la caténaire, en partant des exigences techniques et contractuelles et d'une géométrie imposée en certains points du fil de contact et suivant jusqu'aux résultats finaux des longueurs des portées, des pendules ...etc. L'unilatéralité des pendules, est également prise en compte et intégrée dans ce travail, les flèches au droit de chaque point de connexion « fil de contact - câble porteur » ont fait l'objet de calcul et leurs valeurs ont été déterminées et même vérifiées à l'aide de logiciel Autocad.

Enfin, des plans techniques détaillés de chaque portée ont été réalisés tenant compte de l'ensemble des calculs effectués et des résultats obtenus.

Dans le cadre de nos perspectives et de nos ambitions, l'achèvement de la conception entreprise dans ce travail, par l'élaboration et la mise en place d'un plan de piquetage de la caténaire selon le périmètre arrêté et son exécution sur terrain, reste la meilleure manière de vérification et de consolidation des conclusions de ce mémoire.

## Annexe A. Dimensionnement et calculs justificatifs du système d'alimentation

### 1. Ligne ferroviaire

Longueur de tronçon BMR-Bejaia : 88 km

Nombre de voies : 2 (+ quelques faisceaux et voies de remisage et de services)

Nombre de ligne ferroviaire à électrifier : 194 Km

Tension de ligne : 25 Kv CA

### 2. Matériel roulant considéré

Caractéristiques	Trains voyageurs	Train marchandises
Tension d'alimentation	25 KV AC-50 Hz	25 KV AC-50 Hz
Efforts max au démarrage	400 KN	300 KN
Charge remorquée	930) 1860 places/ UNIT2	1500 t
Vitesse maximale	160 Km/h	100Km/h
Puissance max	5200 Kw	450 kW
Puissance services auxiliaires	5200 KW (2x2600 Kw)	5600 Kw
Rendement mécanique	85%	85%
Cos $\varphi$	0.98	0.98

### 3. Gares et aires de halte

Le bilan énergétique des 9 gares et les 4 haltes, prévues, n'est pas intégré dans le calcul des besoins en énergie électrique de la ligne.

L'alimentation en électricité, et éventuellement gaz, de ces infrastructures se fera directement ) partir des réseaux locaux de l'opérateur de Distribution.

### 4. Système de signalisation et de télécommunication

Le bilan énergétique des systèmes de signalisation et de télécommunication n'est pas intégré dans le calcul des besoins en énergie électrique de la ligne.

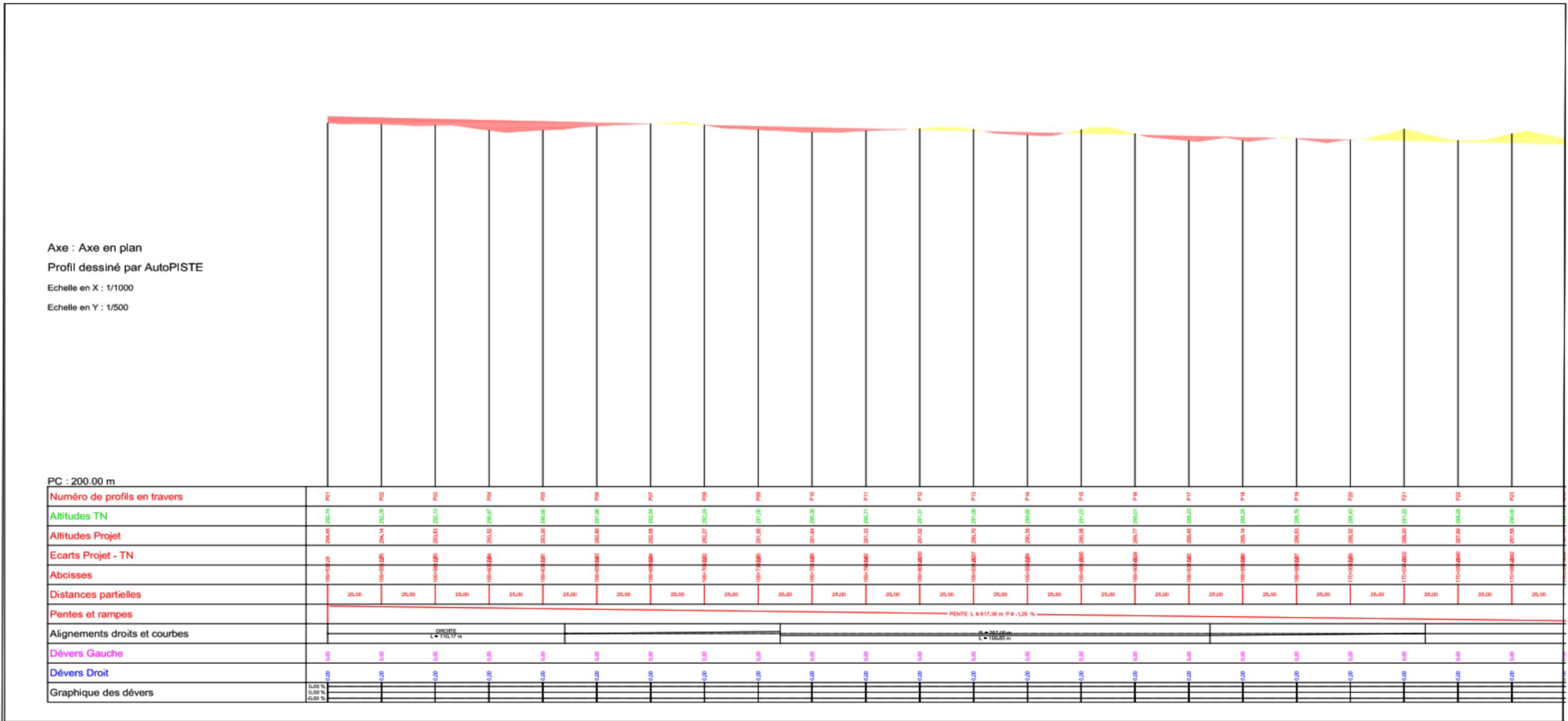
L'alimentation en électricité de ces systèmes se fera directement via des réseaux locaux de l'opérateur de Distribution, et seront secourus par des ASI (Alimentation sans interruption) et des groupes électrogènes (GE) adaptés.

5. **Plan de circulation (trafic) considéré**

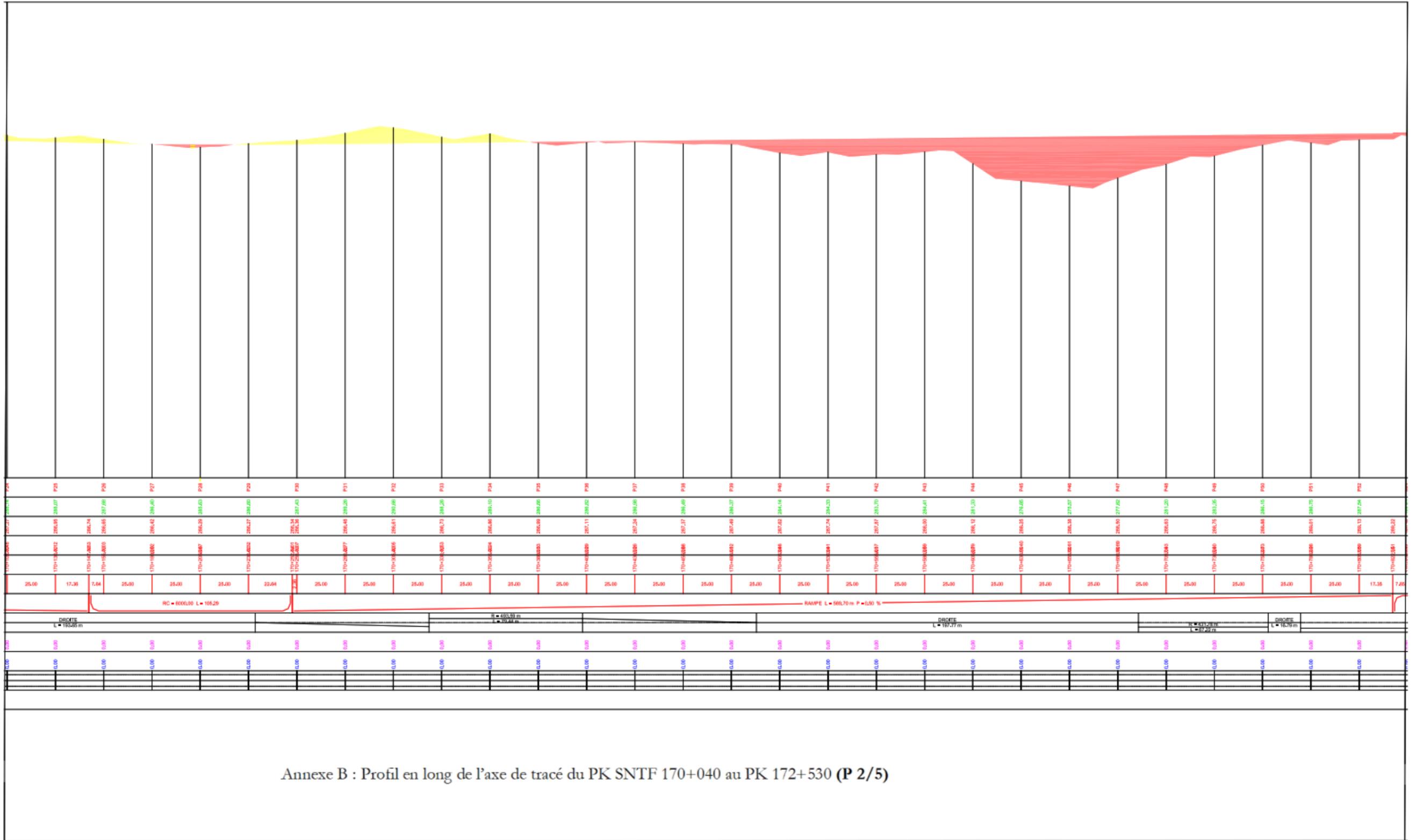
6. **Scénario retenu**

- **En heure de pointe :** 5 trains voyageurs + Un trains marchandise/heure/sens de voie **Soit :** un train chaque dix (10) minutes, par sens de voie.
- **Arrets :** Voyageurs 2 minutes,            Marchandise : 1 minute.

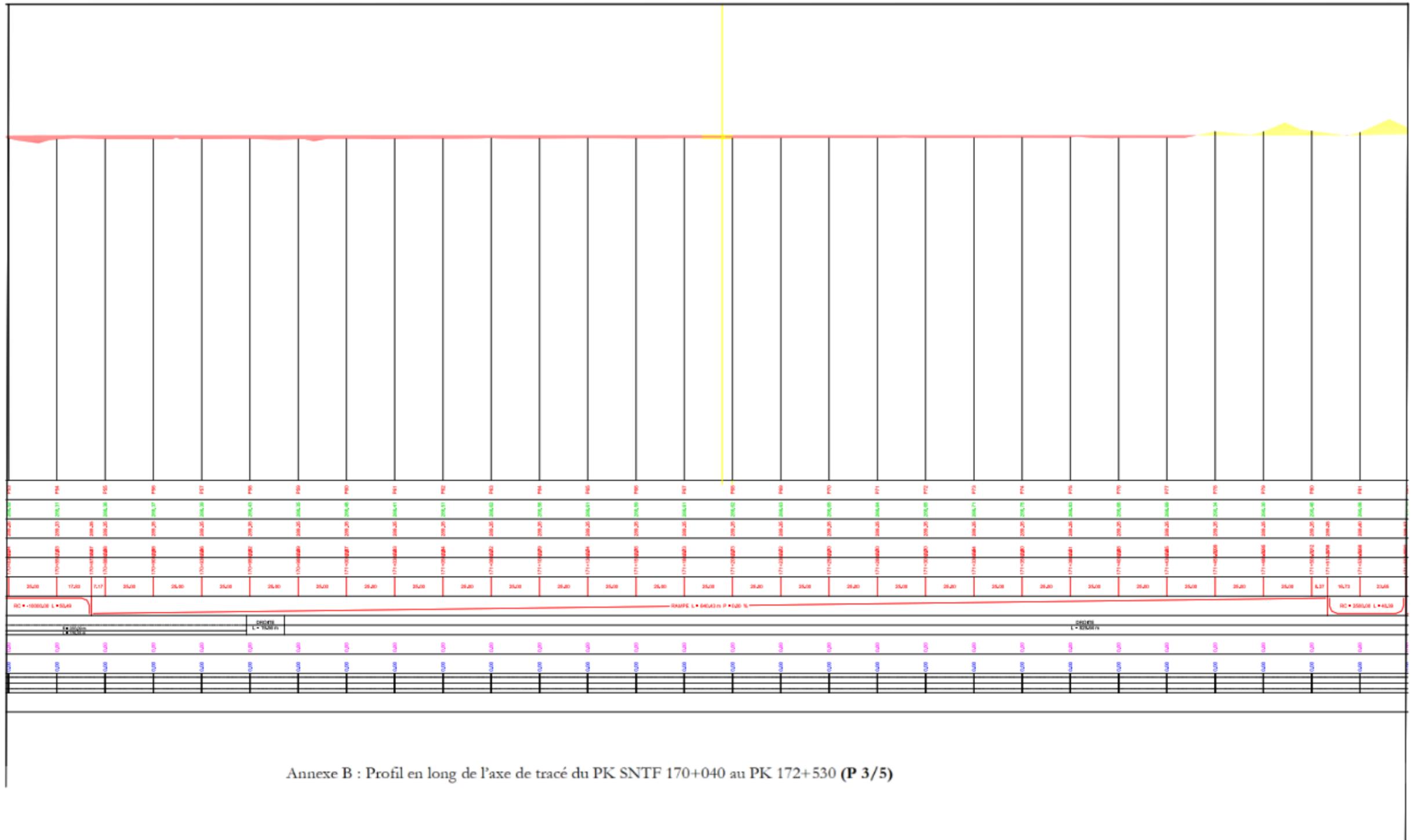
Annexe B. Profil en long de l'axe de tracé du PK SNTF 170+040 au PK 172+530

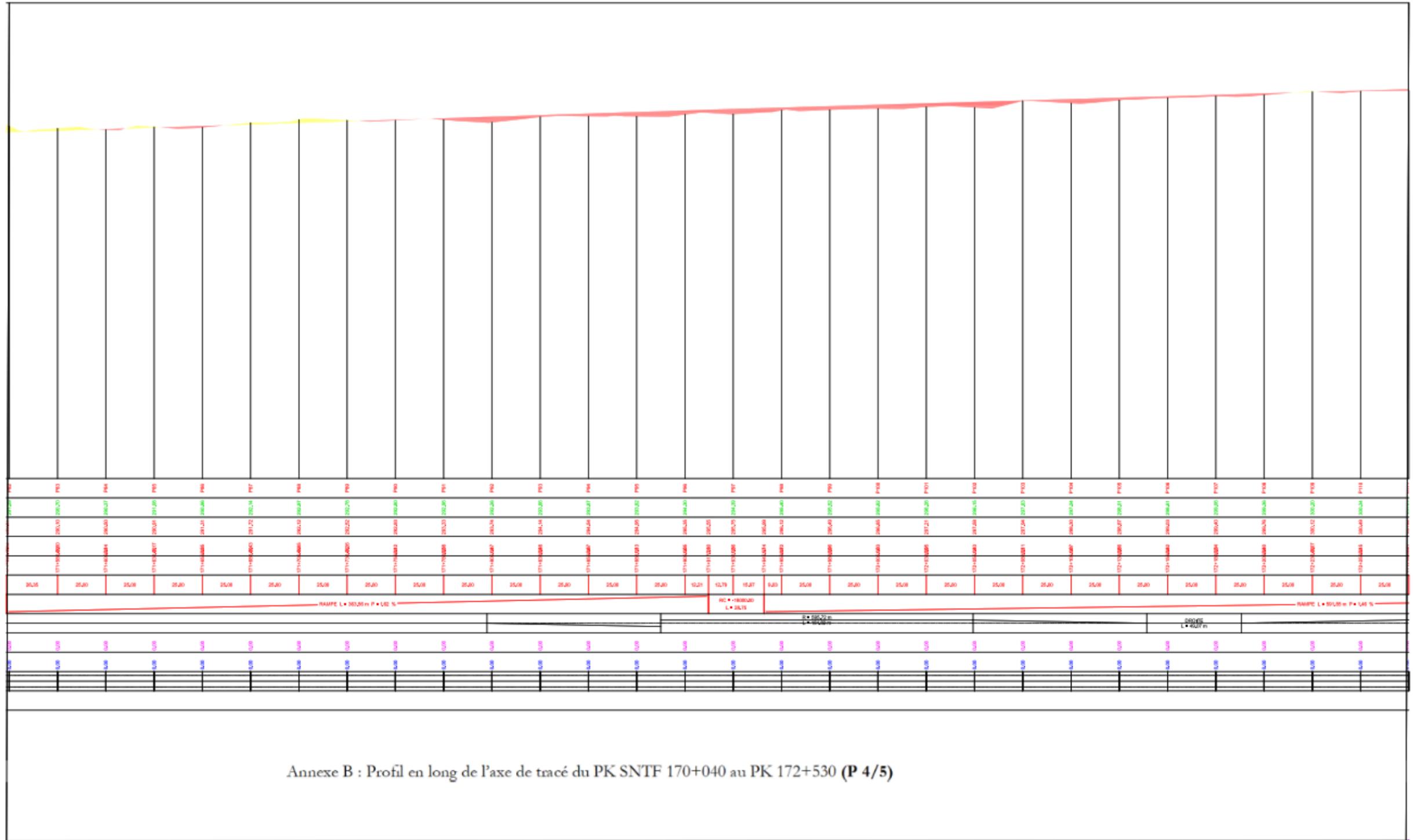


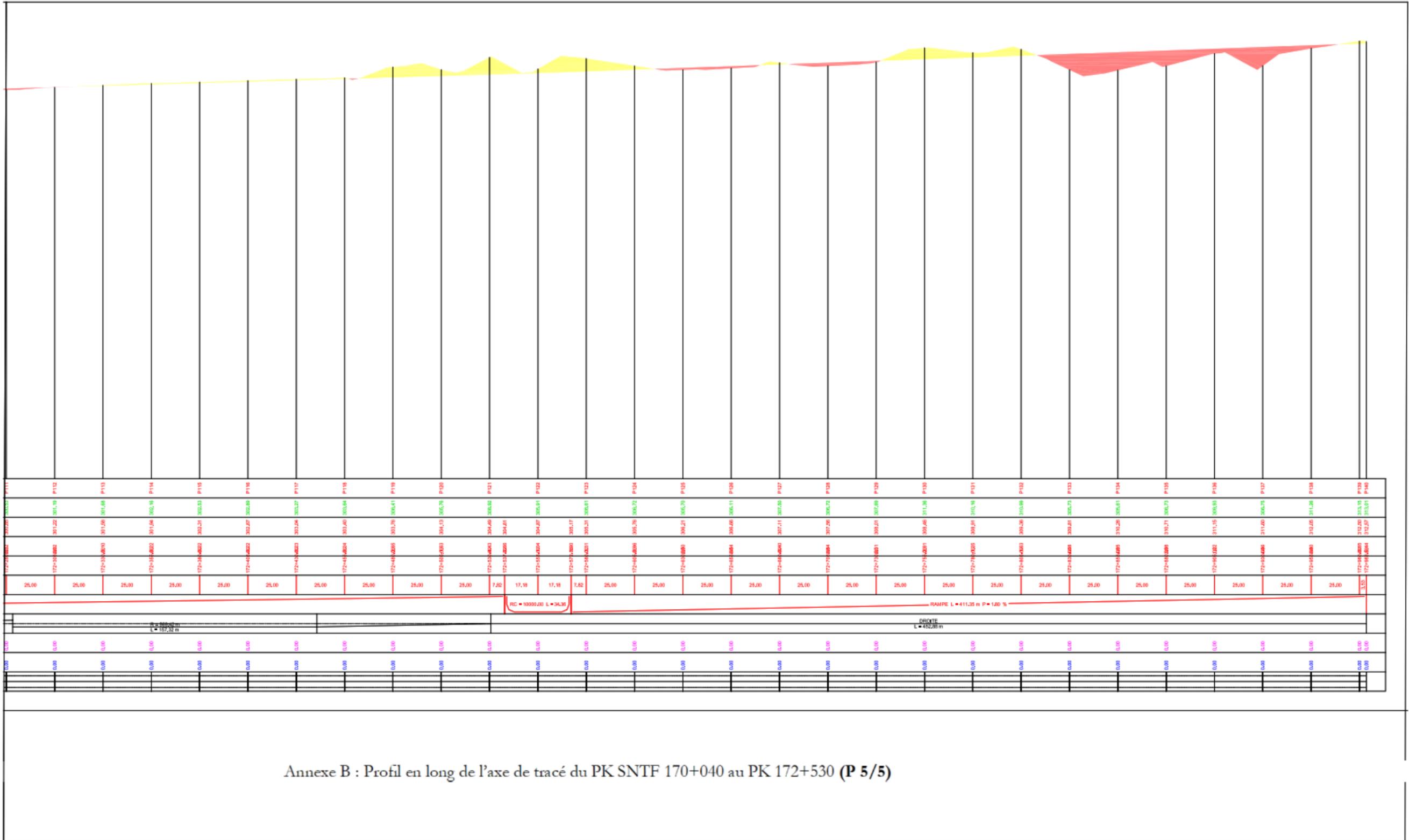
Annexe B : Profil en long de l'axe de tracé du PK SNTF 170+040 au PK 172+530 (P 1/5)



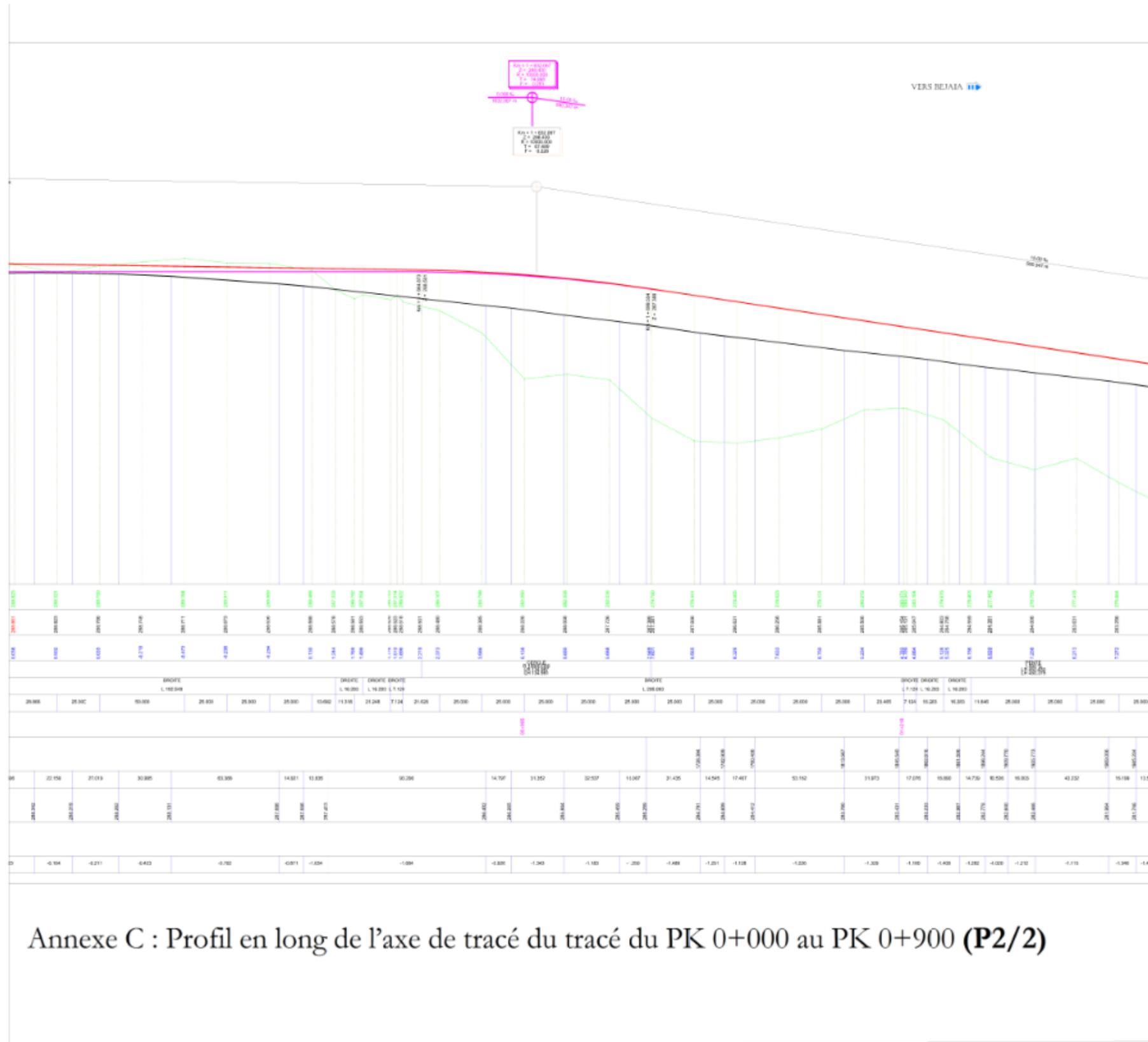
Annexe B : Profil en long de l'axe de tracé du PK SNTF 170+040 au PK 172+530 (P 2/5)



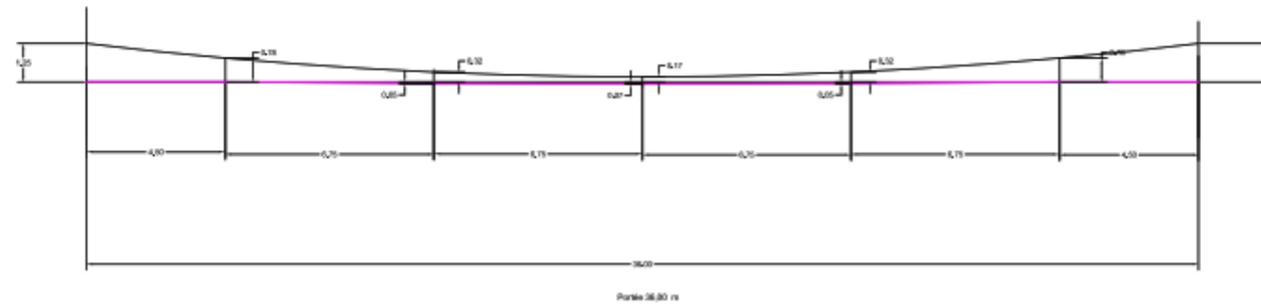
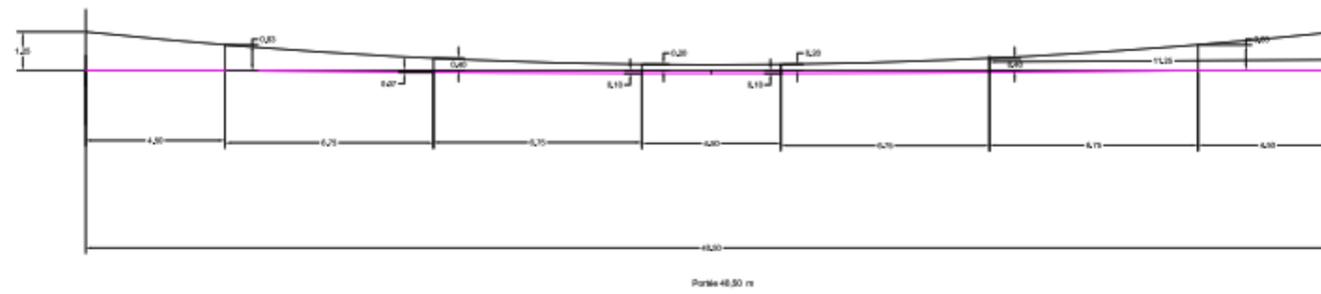
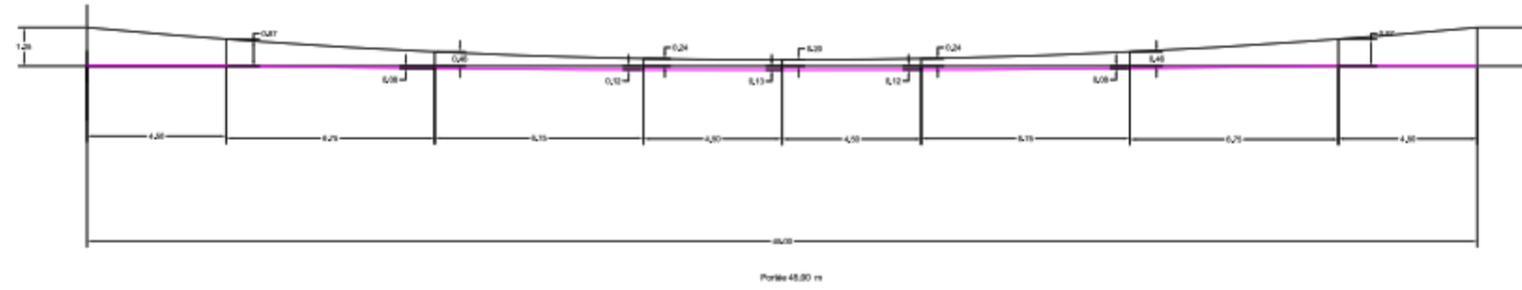




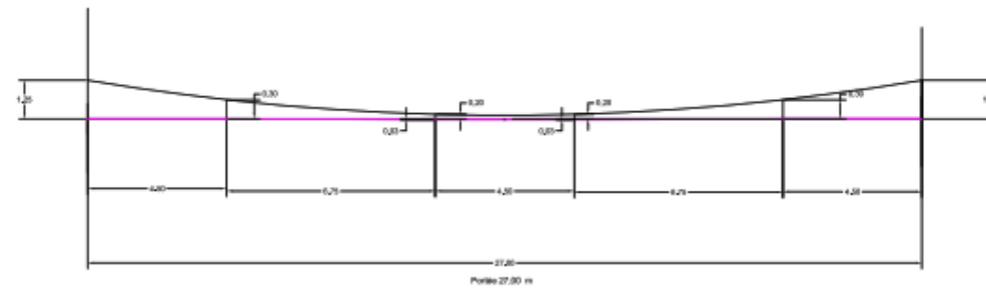
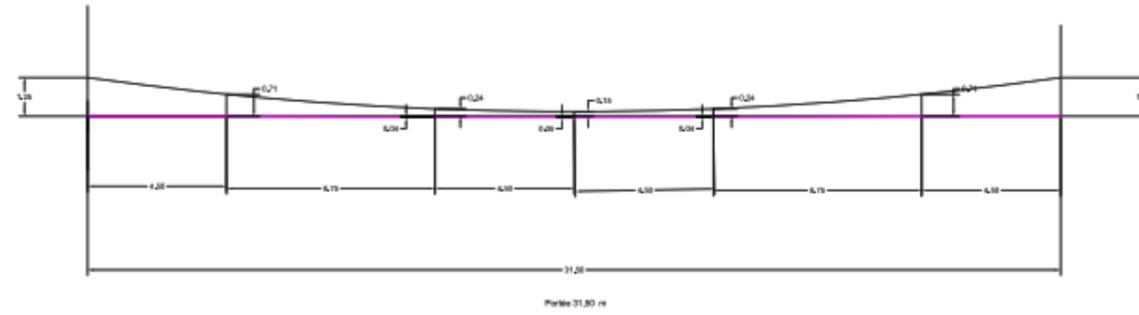








Annexe D : L'ensemble des portées avec les pendules et les flèches de chaque portée (P2/3).



Annexe D : L'ensemble des portées avec les pendules et les flèches de chaque portée (P3/3).

---

## Références Bibliographiques

---

- [1] Décret exécutif n° 05-256 “Création de l’agence nationale d’études et de suivi de la réalisation des investissements ferroviaires”, 20 juillet 2005.
  - [2] “Cours de l’infrastructure ferroviaire”, école Hassania des travaux publics, l’office national des chemins de fers du Maroc (ONCF), année universitaire 2012- 2013.
  - [3] “Gabarits principes fondamentaux”, SNCF, version 02 du 09 avril 2013.
  - [4] NF EN 50119, “Applications ferroviaires - Installations fixes - Lignes aériennes de contact pour la traction électrique”, Indice de classement : F 42-119 -ICS : 29.180, novembre 2020.
  - [5] Document pédagogique de l’établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) : “Les installations de traction électrique”, Edition 01, 21 février 2019.
  - [6] Jean-Pierre Massat, “Modélisation du comportement dynamique du couple pantographe-caténaire. Application à la détection de défauts dans la caténaire”, Thèse de doctorat école centrale de Lyon (France) -spécialité : mécanique, 25 octobre 2007.
  - [7] Olivier VO VAN, “Introduction of variability into pantograph-catenary dynamic simulations”, Thèse de doctorat l’école nationale supérieure d’arts et métiers- spécialité " mécanique" (France), 6 juillet 2016.
  - [8] “Tracé plan de voie gare de Béni Mansour : Pk 0+000”, indice D, révision décembre 2022.
  - [9] “Notice générale n° 12 la caténaire”, SARL Decapod, version 1.0 du 25 octobre 2020.
  - [10] “Cahier des prescriptions spéciales – spécifications techniques particulières CPS – STP”, ERF, Décembre 2007.
  - [11] Fiche visa N°PBB FV N°201, “Validation des besoins en énergie électrique de la ligne ferroviaire Beni Mansour-Bejaia phase exécution”, discipline énergie, version 1.2, 18 novembre 2020.
  - [12] “Référentiel technique SNTF chapitre 11 – caténaire” version 2, 22 Décembre 2005
  - [13] EN 50367; “Railway applications - current collection systems - technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line” CENELEC, avril 2009.
  - [14] Idrissi Belkasm F et al, “Construction de la ligne LGV KENITRA/TANGER, tout savoir sur la caténaire 25kv pour ligne grande vitesse”, COLAS RAIL – COLAS RAIL (MAROC), 08 février 2019.
  - [15] Projet N°08-031, “Étude de préfaisabilité d’alimentation par caténaire pour le projet du train de l’Est”, CANARIL, Aout 2008.
  - [16] “Mémoire descriptif - type caténaire ; CA-160 ET CA-220”, Direction générale du développement des infrastructures adif, janvier 2008
  - [17] Centre national d’études et de recherches intégrées du bâtiment “Document technique et règlementé référencé N C2-47, règlement de neige et de vent”, version 2013
  - [18] Norme UIC 799-1OR caractéristiques des caténaires alimentées en courant continu pour les lignes parcourues à des vitesses supérieures à 160 km/h et jusqu’à 250 km/h ; 1ère édition, Janvier 2001.
-

## ملخص

تعتمد كهرية السكك الحديدية بشكل عام على جودة التقاط التيار الكهربائي الناتج عن تفاعل سلك التلامس مع pantograph ، ولا يزال هذا أحد الأولويات التكنولوجية الرئيسية في هذا المجال اليوم. وهو متناسب نسبياً مع التباين في سرعة القطار، مما قد يسبب اضطرابات في إدارة حركة المرور. لذلك يتطلب التصميم المستقبلي لـ Iihgne التلامسية إتقاناً من خلال دراسة متعمقة لكل من الظواهر الميكانيكية للمكونات ولنمذجة هندسة عزم دوران سلك الاتصال pantograph. بالإضافة إلى ذلك، يتطلب التقاط التيار عالي السرعة سلكاً تلامسياً يسهم محدد بين نقطتي تعليق متتاليتين (امتداد) (وستؤدي المخالفات إلى توقف جمع الطاقة الكهربائية مما يؤدي إلى تدهور ملحوظ في المواد) شريط البلي والأسلاك اللاصقة. (على النقيض من طاقة DC ، يتم استخدام 50 هرتز أحادي المرحلة AC بجهد اسمي 25 KVa على نطاق واسع على شبكات السكك الحديدية العالمية. من الأسهل تنفيذه، ويتطلب محطات فرعية كهربائية على بعد 50-70 كم فقط ويفصل بينها أجزاء من فصل الطور غير المرتبط) المنطقة المحايدة. أو أكثر في حالة  $2 \times 25000$  فولت) فقدان الطاقة الكهربائية أقل من تلك التي تعمل بالتيار المستمر (وهذه أبسط) لا داعي لتقويم أو تنعيم التيار. ينتج عن هذا تكلفة/كيلومتر أقل بكثير من 1500 فولت.فولت.

الكلمات المفتاحية: كهرية السكك الحديدية -سلك التلامس -

## Résumé

L'électrification ferroviaire repose généralement sur la qualité de captage du courant électrique issu de l'interaction pantographe-caténaire, ceci reste l'une des majeures priorités technologiques du domaine aujourd'hui. Elle est relativement proportionnelle à la variation de la vitesse des trains, qui par conséquent peut engendrer des perturbations dans la gestion des circulations. La conception future de la caténaire nécessite donc une maîtrise par l'étude approfondie tant pour les phénomènes mécaniques des composants que pour la modélisation de la géométrie du couple pantographe-fil de contact. De plus, le captage du courant aux vitesses élevées nécessite un fil de contact présentant une flèche spécifique entre deux points de suspension consécutifs (portée). Des irrégularités se traduiraient par des discontinuités dans le captage de l'énergie électrique entraînant une dégradation prononcée du matériel (bande d'usure et fil de contact). Contrairement à l'alimentation par courant continu, le courant alternatif monophasé 50 Hz, d'une tension nominale de 25 KVa est largement utilisé sur les réseaux ferrés mondial. Elle est plus simple à mettre en œuvre, ne nécessite des sous-stations électriques espacées que de 50 à 70 km et séparées par des sections de séparation de phases non alimentées (zone neutres), voire plus dans le cas de  $2 \times 25\ 000$  V (les pertes d'énergie électrique étant inférieures à celles de caténaires alimentées sous courant continu) et celles-ci sont plus simples (pas besoin de redresser le courant ni de le lisser). Il s'ensuit un coût/kilométrique largement inférieur à celui de la caténaire 1 500 V.

**Mots clés :** Electrification ferroviaire, la caténaire, Pantographe, fil de contact.

## Abstract

Rail electrification is generally based on the quality of electrical current capture resulting from the pantograph-contact wire interaction, this remains one of the major technological priorities in the field today. It is relatively proportional to the variation in train speed, which can therefore cause disturbances in traffic management. The future design of the contact Iihgne therefore requires a mastery by in-depth study both for the mechanical phenomena of the components and for the modeling of the geometry of the pantograph-contact wire torque. In addition, high velocity current capture requires a contact wire with a specific arrow between two consecutive suspension points (span). Irregularities would result in discontinuities in the collection of electrical energy leading to a marked deterioration of the material (wear strip and contact wire). In contrast to DC power, the 50 Hz single-phase AC with a nominal voltage of 25 KVa is widely used on global rail networks. It is simpler to implement, requires electrical substations only 50-70 km apart and separated by sections of unbonded phase separation (neutral zone), or more in the case of  $2 \times 25,000$  V (losses of electrical energy being lower than those of DC-powered catenaries) and these are simpler (no need to straighten or smooth the current). This results in a much lower cost/kilometre than the 1,500 V catenary.

**Keywords:** Rail electrification, Catenaries , The pantograph , Contact wire.