

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par : FERHAH Adel Mohammed Reda
BENDIAF Fodil

Sujet

Etude de la tension du câble d'un téléphérique

Soutenu publiquement, le 21/06/2026, devant le jury composé de :

M.HADJOUI Abdelhamid	Pr	Université de Tlemcen	Président
M.CHORFI Sidi Mohammed	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mme.BELHADJ KACEM Fadia	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2025 / 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Au terme de ce travail, nous rendons grâce à **Allah**, le Très Miséricordieux, qui nous a accordé la santé, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire. Sa bénédiction nous a accompagnés tout au long de ce parcours.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à **Madame BELHADJ KACEM Fadia**, notre encadreur, pour son encadrement de qualité, ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien constant. Son expérience et ses orientations ont été d'une grande importance dans la réalisation de cette étude.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à **Monsieur HADJOUI Abdelhamid** pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire. Nous le remercions pour l'intérêt porté à notre travail ainsi que pour ses appréciations et recommandations.

Nos remerciements vont également à **Monsieur CHORFI Sidi Mohammed**, qui a bien voulu examiner ce travail. Nous lui sommes reconnaissants pour le temps consacré à son évaluation ainsi que pour ses remarques constructives qui contribueront à son amélioration.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement **Monsieur HADJOUI Fouad**, responsable de notre stage, pour son accueil, son accompagnement et les précieuses connaissances qu'il nous a transmises durant cette période. Sa disponibilité et son soutien ont largement contribué au bon déroulement de notre travail.

Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble de **nos enseignants** qui, tout au long de notre formation universitaire, ont partagé avec nous leur savoir, leur expérience et leur passion pour la connaissance. Leur contribution a joué un rôle essentiel dans notre développement académique et professionnel.

Enfin, nous adressons nos remerciements à **toutes les personnes** qui, directement ou indirectement, ont participé à la réalisation de ce mémoire et nous ont apporté leur aide, leurs encouragements ou leur soutien tout au long de cette expérience.

À **toutes et à tous**, nous témoignons notre profonde reconnaissance et notre sincère gratitude.

Dédicaces

Avant tout, je rends grâce à **Allah**, le Tout-Puissant, pour Sa bienveillance infinie, la clarté qu'Il a mise sur mon chemin et l'énergie qu'Il m'a insufflée pour mener ce projet à bien.

C'est avec une profonde gratitude et un immense amour que je dédie ce modeste mémoire :

À la lumière de mes yeux et la source de ma réussite, **ma très chère mère Djamila**. Aucun mot ne saurait exprimer l'étendue de ma reconnaissance pour tes sacrifices, ton amour inconditionnel et tes prières qui m'ont toujours accompagné.

À mon pilier et mon exemple de persévérance, **mon cher père Mohammed**. Merci pour ton soutien indéfectible, ton éducation et tes précieux conseils tout au long de mon parcours.

À **ma tendre tante Dalila**, qui occupe une place unique et infiniment précieuse dans mon cœur. Merci pour ton affection débordante, ta bienveillance quotidienne et ton soutien de chaque instant, qui ont été des piliers essentiels à ma réussite.

À **ma sœur Hadil**, et à **mes frères Aymen et Anes**, en témoignage de notre belle complicité et de mon amour fraternel. Que ce travail soit pour vous un motif de fierté et un exemple à suivre.

Aux **personnes très spéciales** dont la présence est une véritable grâce et un immense bienfait dans ma vie.

À l'ensemble de **ma grande famille**, pour leurs encouragements et leur présence à mes côtés.

À nos **chers disparus** qui nous ont quittés trop tôt. Bien que vous ne soyez plus là pour voir l'aboutissement de ce projet, votre souvenir reste à jamais gravé dans mon cœur et vos valeurs continuent de me guider. Que **Dieu** vous accorde Sa sainte miséricorde et vous accueille dans Son vaste paradis.

Et enfin, à **tous mes amis**, avec qui j'ai partagé les moments de doute et de joie. Merci pour votre fidélité, votre écoute et pour avoir rendu cette aventure universitaire inoubliable.

Dédicaces

À mes parents, **Chahinez** et **Mohamed**

Les artisans de ma vie et de ma réussite. Aucun mot ne saurait exprimer ma reconnaissance pour la noblesse de vos sacrifices, la douceur de votre amour et la solidité de votre confiance. En me transmettant le goût de l'effort, la persévérance et la droiture, vous avez tracé la voie de mon avenir. Ce diplôme est avant tout le vôtre.

À ma sœur, **Ghizlene**

Mon repère et mon alliée de toujours. Merci pour ton écoute, ton optimisme contagieux et pour avoir constamment cru en moi tout au long de ce projet.

Aux familles **Bendiaf** et **Belaïdi**

Pour ce lien précieux qui nous unit, votre affection chaleureuse et votre fierté qui m'ont constamment porté vers le haut.

À mes fidèles amis

Hichem Belhadj, Shahine, Abderrahmane, Ayoub et Imed. Vous avez transformé ces années d'études en une aventure humaine inoubliable. Merci pour la sincérité de notre complicité, les éclats de rire et l'entraide mutuelle qui ont rythmé ce parcours.

C'est le fruit de toutes ces années d'efforts, de partages et de soutien. Pour tout ce que vous m'avez apporté, je dédie humblement ce mémoire à chacun d'entre vous.

Résumé

Les installations de transport par câble, et en particulier les télécabines monocâbles à attaches débrayables, occupent une place stratégique dans les systèmes de transport modernes, tant dans les domaines skiables alpins que dans les espaces urbains confrontés à des défis topographiques. Leur fiabilité opérationnelle et leur sécurité reposent de manière fondamentale sur la maîtrise d'un paramètre mécanique central : la tension du câble porteur-tracteur. Ce paramètre gouverne simultanément la capacité de transmission de la puissance motrice, la résistance aux charges dynamiques, la durée de vie en fatigue du câble et la sûreté globale de l'installation.

Le présent mémoire a pour objectif d'étudier de manière approfondie la tension du câble d'une télécabine, en adoptant une démarche alliant l'analyse théorique à la caractérisation des paramètres d'influence et à l'évaluation des pratiques de maintenance associées. Le travail s'articule autour de quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre pose les fondements conceptuels de la maintenance industrielle (de la maintenance corrective à la maintenance prédictive de cinquième génération) et présente les généralités sur les systèmes de téléphériques, leur classification, leur historique et les enjeux réglementaires qui leur sont associés. Le deuxième chapitre décrit en détail l'architecture fonctionnelle et mécanique d'une télécabine : stations motrices et de retour, pylônes, galets, sabots, et analyse en profondeur les différents types de câbles (porteur, tracteur, porteur-tracteur) ainsi que la technique d'épissurage. Le troisième chapitre constitue le cœur analytique du mémoire : il développe les modèles mécaniques permettant de calculer la tension du câble en régime statique et dynamique, en tenant compte de la géométrie de la ligne, des charges distribuées et concentrées, des pertes par frottement sur les appuis, des effets thermiques et des sollicitations dynamiques induites par le vent et les oscillations des cabines. Le quatrième chapitre traite de la maintenance des télécabines en lien direct avec la tension du câble : contrôles non destructifs, épissurage, inspection des composants et stratégies de maintenance conditionnelle et prédictive.

Les résultats montrent que la tension du câble est un indicateur transversal de l'état de santé de l'installation, et que sa surveillance constitue un outil de maintenance à part entière. La maîtrise de ce paramètre est indissociable d'un programme de maintenance rigoureux, conforme aux exigences des normes mondiales.

Mots-clés : *téléphérique, télécabine, câble porteur-tracteur, tension du câble, modélisation mécanique, maintenance conditionnelle, contrôle non destructif, sûreté de fonctionnement, épissurage.*

Abstract

Cable transport systems, and in particular single-rope detachable gondola lifts, hold a strategic position in modern transportation infrastructure, serving both Alpine ski resorts and urban environments characterized by significant topographical constraints. Their operational reliability and passenger safety fundamentally depend on the precise control of a central mechanical parameter: the tension in the haul rope. This parameter simultaneously governs the capacity for power transmission, resistance to dynamic loading, the fatigue life of the rope, and the overall safety of the installation.

This Master's thesis aims to conduct an in-depth study of the cable tension in a gondola lift system, combining theoretical mechanical analysis with the characterization of influencing parameters and an assessment of associated maintenance practices. The work is organized into four complementary chapters. The first chapter establishes the conceptual foundations of industrial maintenance “from corrective maintenance to fifth-generation predictive maintenance” and presents an overview of cable transport systems, their classification, historical development, and applicable regulatory requirements. The second chapter provides a detailed description of the functional and mechanical architecture of a gondola lift, covering drive stations, return stations, pylons, guide rollers, cable guides, and the various rope types (carrying rope, haul rope, carrying-haul rope), including an in-depth analysis of the splicing technique. The third chapter forms the analytical core of the thesis: it develops the mechanical models for calculating cable tension under both static and dynamic conditions, accounting for line geometry, distributed and concentrated loads, friction losses at intermediate supports, thermal effects, and dynamic solicitations induced by wind and cabin oscillations. The fourth chapter addresses maintenance practices in direct relation to cable tension: non-destructive testing methods, splicing procedures, component inspections, and conditional and predictive maintenance strategies.

The results demonstrate that cable tension is a transversal indicator of the installation's overall health, and that its continuous monitoring constitutes a maintenance tool in its own right. Effective control of this parameter is inseparable from a rigorous maintenance program compliant with the global standard requirements.

Keywords: *ropeway, gondola lift, carrying-haul rope, cable tension, mechanical modelling, condition-based maintenance, non-destructive testing, dependability, wire rope splicing.*

ملخص

تحتل منظومات النقل بالكابل، ولا سيما التلفريك ذو الحبل الواحد وعرباته القابلة للفصل، مكانةً استراتيجية بارزة في منظومات النقل الحديثة، سواءً في المنتجعات الجبلية لرياضات الشتاء أو في البيئات الحضرية التي تواجه تحديات طبوغرافية معقدة. وتعتمد موثوقية هذه المنشآت وسلامة ركابها اعتماداً جوهرياً على ضبط معامل ميكانيكي محوري هو: توتر الحبل الحامل-السائق. إذ يتحكم هذا المعامل في أن واحد في القدرة على نقل الطاقة الحركية، ومقاومة الأحمال الديناميكية، وعمر الإجهاد التعبى للحبل، وسلامة المنشأة بوجه عام.

يهدف هذا البحث في إطار درجة الماجستير إلى دراسة معمقة لتوتر حبل التلفريك، مستعيناً بمنهج يجمع بين التحليل النظري الميكانيكي، وتحديد المعاملات المؤثرة، وتقييم ممارسات الصيانة المرتبطة بها. وينتظم العمل في أربعة فصول متكاملة: يُرسي الفصل الأول الأسس المفاهيمية للصيانة الصناعية "من الصيانة التصحيحية إلى الصيانة التنبؤية من الحبل الخامس" ويستعرض أنواع منظومات التلفريك وتصنيفها وتاريخها والاشتراطات التنظيمية المتعلقة بها. ويصف الفصل الثاني البنية الوظيفية والميكانيكية للتلفريك بالتفصيل، شاملاً محطات التشغيل والعودة، والدعائم، وبكرات التوجيه، وأنواع الحبال المختلفة، فضلاً عن تحليل دقيق لتقنية الوصل. أما الفصل الثالث "قلب البحث التحليلي" فيطوّر النماذج الميكانيكية اللازمة لحساب توتر الحبل في حالتي الاتزان الساكن والديناميكي، مراعيًا هندسة المسار، والأحمال الموزعة والمركزة وفقدان التوتر جراء الاحتكاك عند نقاط الارتكاز، والتأثيرات الحرارية، والإثارات الديناميكية الناجمة عن الرياح واهتزازات العربات. ويتناول الفصل الرابع صيانة منظومة التلفريك في ارتباط وثيق بتوتر الحبل، مغطياً أساليب الفحص غير التدميري وعمليات الوصل، وفحص المكونات، واستراتيجيات الصيانة الشرطية والتنبؤية.

تُبين النتائج أن توتر الحبل مؤشرٌ شامل لصحة المنشأة برمتها، وأن رصده المستمر يُشكل في حد ذاته أداةً صيانية قائمة. ولا تنفصل السيطرة على هذا المعامل عن برنامج صياني صارم، مستوفٍ لاشتراطات متطلبات المعايير العالمية.

الكلمات المفتاحية: تلفريك، حبل حامل-سائق، توتر الحبل، نمذجة ميكانيكية، صيانة شرطية، فحص غير تدميري، سلامة التشغيل، وصل الحبل

Table des matières

Introduction générale.....	19
Chapitre I : Maintenance industrielle et généralités sur les systèmes de transport par câble.....	21
I.1. Introduction.....	22
I.2. Introduction à la maintenance industrielle	22
I.2.1 Définition et concepts fondamentaux.....	22
I.2.2 La sûreté de fonctionnement	23
I.3. Évolution historique de la maintenance :	24
I.3.1 Maintenance 1.0 : La maintenance corrective (avant 1940).....	24
I.3.2 Maintenance 2.0 : La maintenance préventive systématique (1940-1970)	24
I.3.3 Maintenance 3.0 : La maintenance conditionnelle et prédictive (1970-2000).....	24
I.3.4 Maintenance 4.0 : La maintenance proactive et l'Industrie 4.0 (2000-2020).....	25
I.3.5 Maintenance 5.0 : La maintenance cognitive et augmentée (2020 et au-delà)	25
I.4. Classification des types de maintenance	26
I.4.1 Maintenance corrective	26
I.4.2 Maintenance préventive systématique.....	26
I.4.3 Maintenance conditionnelle et prédictive	27
I.5. Généralités sur les téléphériques.....	27
I.5.1 Définition et terminologie	27
I.5.2 Classification des transports par câble.....	30
I.5.3 Bref historique des téléphériques.....	31
I.6. Importance de la maintenance dans les téléphériques	33
I.6.1 Enjeux de sécurité	33
I.6.2 Enjeux économiques et opérationnels.....	33
I.6.3 Réglementation et normalisation.....	34
I.7. Conclusion	34
Chapitre II : Principe de fonctionnement, composants et câbles des télécabines monocâbles débrayables....	36
II.1. Introduction.....	37
II.2. Principe de fonctionnement global d'une télécabine	37
II.2.1 Architecture générale d'une ligne	37
II.2.2 Circulation du câble	38
II.2.3 Interactions mécaniques dans le système	39
II.3. La station motrice.....	40
II.3.1 Moteur principal.....	40

II.3.2 Moteur de secours	42
II.3.3 Le réducteur	44
II.3.4 La poulie motrice.....	45
II.3.5 Système de freinage	47
II.3.6 Système de tension de la station motrice.....	48
II.4. La station retour	49
II.4.1 Poulie de renvoi.....	49
II.4.2 Système de tension de la station retour	50
II.5. Pylônes et supports intermédiaires.....	54
II.5.1 Structure et conception mécanique des pylônes.....	54
II.5.2 Galets et sabots : rôle dans le guidage du câble	56
II.5.3 Transmission des charges et influence sur la tension du câble	57
II.6. Les câbles des téléphériques.....	60
II.6.1 Câble porteur.....	60
II.6.2 Câble tracteur.....	61
II.6.3 Câble porteur-tracteur	62
II.7. Épissurage du câble	63
II.7.1 Définition et caractérisation technique	63
II.7.2 Contextes de réalisation.....	64
II.7.3 Déroulement opérationnel : Étapes chronologiques	64
II.7.4 Phase de détensionnement et contrôle réglementaire	65
II.7.5 Synthèse : Enjeux et place dans le cycle de maintenance	65
II.8. Interaction mécanique globale et lien avec les calculs de tension	65
II.8.1 Répartition des efforts le long de la ligne	65
II.8.2 Lien avec les paramètres de conception.....	66
II.9. Conclusion	66
Chapitre III : Modélisation et étude de la tension du câble porteur-tracteur d'une télécabine.....	68
III.1. Introduction et contexte de l'étude	69
III.1.1 Contexte industriel et enjeux du dimensionnement	69
III.1.2 Objectifs.....	69
III.1.3 Présentation du système étudié	70
III.2. Cadre normatif et réglementaire	71
III.2.1 Corpus normatif applicable	71
III.2.2 Principes généraux de calcul (NF EN 12 930:2015).....	71
III.2.2.1 Distinction des états limites de service	71
III.2.2.2 Effets à prendre systématiquement en compte	72

III.2.3 Définition réglementaire de la sécurité à la traction	72
III.3. Modélisation mécanique du câble - Théorie de la chaînette.....	73
III.3.1 Hypothèses fondamentales et leur justification physique.....	73
III.3.2 Dérivation de l'équation différentielle du câble	73
III.3.2.1 Equilibre d'un élément infinitésimal	73
III.3.2.2 Equation différentielle de la déformée	76
III.3.3 Solution analytique : cas d'appuis à la même hauteur	77
III.3.3.1 Expression de la flèche	77
III.3.3.2 Tension en tout point du câble	78
III.3.4 Cas d'appuis à hauteurs différentes (portée inclinée)	79
III.3.5 Méthode de la chaîne discrète (approche éléments finis).....	80
III.3.5.1 Principe.....	80
III.3.5.2 Algorithme de relaxation dynamique avec amortissement cinétique	80
III.4. Calcul détaillé des efforts dans le câble	81
III.4.1 Détermination des charges mécaniques.....	81
III.4.1.1 Charge linéique due au poids propre du câble	81
III.4.1.2 Charges dues aux véhicules (cabines)	81
III.4.1.3 Charge linéique totale en exploitation pleine charge	82
III.4.2 Calcul de la tension horizontale (cas portée horizontale).....	82
III.4.3 Calcul de la tension maximale dans la portée inclinée	83
III.4.4 Flèche et sa signification physique	85
III.4.5 Charges d'appui sur les pylônes	86
III.4.5.1 Composante verticale.....	86
III.4.5.2 Composante horizontale — effort de frottement.....	86
III.5. Effets environnementaux sur la tension du câble.....	87
III.5.1 Action du vent	87
III.5.1.1 Pression dynamique réglementaire et vitesse de vent associée	87
III.5.1.2 Force aérodynamique sur le câble	88
III.5.1.3 Coefficient de réduction pour les grandes portées.....	88
III.5.1.4 Déviation latérale du câble sous l'action du vent en exploitation	89
III.5.1.5 Oscillations longitudinales des véhicules sous l'effet du vent	89
III.5.2 Action du givre.....	91
III.5.2.1 Epaisseur de la gaine de givre	91
III.5.2.2 Charge linéique due au givre.....	91
III.5.2.3 Impact du givre sur la tension horizontale.....	92
III.5.3 Actions combinées vent + givre.....	93

III.5.4 Effets thermiques	93
III.5.4.1 Mécanisme d'action de la température	93
III.5.4.2 Variation de tension due aux effets thermiques.....	94
III.5.4.3 Course du dispositif de tension due à la température	94
III.6. Vérifications règlementaires	95
III.6.1 Sécurité à la traction	95
III.6.1.1 Identification du cas de charge le plus défavorable.....	95
III.6.1.2 Choix indicatif du câble et vérification	96
III.6.1.3 Sécurité a la traction minimale hors exploitation	96
III.6.2 Sécurité a la flexion	97
III.6.2.1 Rapport d'enroulement sur les galets de pylône	97
III.6.2.2 Rapport d'enroulement sur la poulie motrice.....	97
III.6.3 Charges d'appui minimales sur les galets de pylône.....	97
III.6.4 Adhérence sur la poulie motrice	98
III.7. Synthèse et tableau récapitulatif	99
III.7.1 Analyse des cas de charge critiques	100
III.7.2 Recommandations constructives	101
III.8. Conclusion	101
Chapitre IV : Maintenance des installations de télécabines : contrôle, inspection et sécurité d'exploitation	103
IV.1. Introduction	104
IV.2. Objectifs de la maintenance des télécabines.....	104
IV.3. Maintenance de la station motrice	105
IV.3.1 Maintenance du moteur principal	105
IV.3.2 Maintenance du moteur de secours.....	106
IV.3.3 Maintenance du réducteur	106
IV.3.4 Maintenance des freins.....	107
IV.3.5 Maintenance de la poulie motrice	107
IV.4. Maintenance de la station retour	108
IV.5. Maintenance des pylônes et supports intermédiaires	109
IV.5.1 Maintenance des galets	109
IV.5.2 Maintenance des sabots	110
IV.5.3 Maintenance des balanciers	110
IV.6. Maintenance du câble porteur-tracteur	110
IV.6.1 Inspection visuelle du câble	110
IV.6.2 Contrôle dimensionnel du câble	111
IV.6.3 Lubrification du câble.....	111

IV.7. Contrôles non destructifs des câbles	112
IV.7.1 Contrôle par flux de fuite magnétique (MFL)	112
IV.7.2 Autres méthodes de contrôle non destructif.....	112
IV.7.3 Fréquence des contrôles et critères de dépose	113
IV.8. Épissurage des câbles	114
IV.8.1 Contrôle des épissures	114
IV.8.2 Impact de l'épissure sur la résistance et la tension du câble.....	114
IV.9. Relation entre maintenance et tension du câble.....	115
IV.10. Stratégies de maintenance : préventive, corrective et prédictive.....	116
IV.10.1 Maintenance préventive dans les télécabines.....	116
IV.10.2 Maintenance corrective	116
IV.10.3 Maintenance prédictive et conditionnelle.....	117
IV.11. Sûreté de fonctionnement des installations de télécabines.....	118
IV.12. Conclusion	118
Conclusion générale	120
Références.....	122

Liste des figures

FIGURE 1 RELATION ENTRE LES ATTRIBUTS DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT (SdF)	23
FIGURE 2 TYPES DE MAINTENANCE.....	26
FIGURE 3 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE FONCTIONNEMENT	27
FIGURE 4 TELEPHERIQUE BICABLE DE TYPE VA-ET-VIENT	28
FIGURE 5 TELECABINE A ATTACHES DEBRAYABLES	28
FIGURE 6 TELESIEGE DEBRAYABLE	29
FIGURE 7 TELESKI A ARCHETS	29
FIGURE 8 FUNICULAIRE	30
FIGURE 9 TRAMWAY A CABLE DE SAN FRANCISCO (CABLE CAR), 1887	31
FIGURE 10 TELEPHERIQUE DU COLLE (KOHLEARN)	31
FIGURE 11 TELEPHERIQUE DU WETTERHORN, GRINDELWALD, SUISSE	32
FIGURE 12 TELEPHERIQUE LES PELERINS - LA PARA SUR LES PENTES DE L'AIGUILLE DU MIDI, CHAMONIX, FRANCE	32
FIGURE 13 DEUXIEME TRONÇON DU TELEPHERIQUE DE L'AIGUILLE DU MIDI A CHAMONIX-MONT-BLANC, FRANCE ...	32
FIGURE 14 SCHEMA GLOBAL D'UNE INSTALLATION DE REMONTEE MECANIQUE	38
FIGURE 15 PINCE DEBRAYABLE	38
FIGURE 16 CONVOYEUR A PNEU	39
FIGURE 17 DETAIL D'UN ENTRAINEMENT PAR PNEUS D'UN VEHICULE DEBRAYE EN GARE	39
FIGURE 18 SCHEMA D'UNE STATION MOTRICE	40
FIGURE 19 MOTEUR ELECTRIQUE AVEC REDUCTEUR	41
FIGURE 20 SYSTEME DE DECOUPLAGE REDUCTEUR-POULIE MOTRICE	42
FIGURE 21 : MOTOREDUCTEUR DE SECOURS	43
FIGURE 22 COURONNE DENTEE ET PIGNONS D'ENTRAINEMENT DE SECOURS	43
FIGURE 23 MOTEUR THERMIQUE D'EVACUATION	44
FIGURE 24 SCHEMA D'UN ETAGE D'UN REDUCTEUR A TRAIN EPICYCLOÏDAL	44
FIGURE 25 VUE INTERNE D'UN ETAGE D'UN REDUCTEUR A TRAIN EPICYCLOÏDAL	45
FIGURE 26 REDUCTEUR A TRAIN EPICYCLOÏDAL	45
FIGURE 27 POULIE MOTRICE D'UNE TELECABINE	46
FIGURE 28 BANDAGE POULIE MOTRICE	46
FIGURE 29 FREIN A DISQUE	47
FIGURE 30 SYSTEME DE FREINAGE SUR POULIE MOTRICE	47
FIGURE 31 SCHEMA D'UNE STATION MOTRICE AVEC SYSTEME DE TENSION HYDRAULIQUE	48
FIGURE 32 STATION MOTRICE DE TELESIEGE AVEC SYSTEME DE TENSION	49
FIGURE 33 POULIE DE RENVOI	50
FIGURE 34 UNE PARTIE DU LORRY DE TENSION EN STATION RETOUR	51
FIGURE 35 UN CONTREPOIDS DE TENSION DU CABLE EN ACTION	51
FIGURE 36 UN VERIN HYDRAULIQUE	52
FIGURE 37 ACCOUPLEMENT DU LORRY AVEC SYSTEME DE TENSION	52
FIGURE 38 CENTRALE HYDRAULIQUE	53
FIGURE 39 AXE DYNAMOMETRIQUE	53
FIGURE 40 MONTAGE D'UN AXE DYNAMOMETRIQUE	54
FIGURE 41 UN PYLONE	55
FIGURE 42 RATTRAPE-CABLES D'UN BALANCIER DE GALETS SUR UN PYLONE SUPPORT	56
FIGURE 43 PYLONE SUPPORT (12S)	58
FIGURE 44 PYLONE COMPRESSION (12C)	58

FIGURE 45 PYLONE (4S/C)	59
FIGURE 46 CAPTEUR DE DERAILLEMENT (LA DOUBLE TIGE ROUGE)	59
FIGURE 47 CABLES A TORONS PARALLELES (LOCKED COIL)	61
FIGURE 48 CABLE A TORONS CROISES	62
FIGURE 49 COMPARAISON DES CABLES	62
FIGURE 50 REALISATION D'UNE EPISSURE DE CABLE D'UNE REMONTEE MECANIQUE	63
FIGURE 51 CONTROLEUR PAR FLUX DE FUITE MAGNETIQUE	112
FIGURE 52 CONTROLE PAR ULTRASONS	113
FIGURE 53 MAGNETOSCOPIE	113

Liste des tableaux

TABEAU 1 DONNEES DE L'INSTALLATION DE REFERENCE.	70
TABEAU 2 CORPUS NORMATIF APPLICABLE AU DIMENSIONNEMENT DES CABLES DE TELECABINES.....	71
TABEAU 3 VALEURS REGLEMENTAIRES DE SECURITE A LA TRACTION (CABLE PORTEUR-TRACTEUR).....	72
TABEAU 4 HYPOTHESES DE MODELISATION ET LEUR JUSTIFICATION PHYSIQUE.	73
TABEAU 5 PRESSIONS REGLEMENTAIRES ET VITESSES DE VENT EQUIVALENTES	87
TABEAU 6 COMBINAISONS VENT + GIVRE ET CHARGES LINEIQUES RESULTANTES.	93
TABEAU 7 TENSIONS MAXIMALES ET CHARGES DE RUPTURE MINIMALES REQUISES PAR CAS DE CHARGE.	95
TABEAU 8 TABLEAU RECAPITULATIF	100
TABEAU 9 PROGRAMME DE MAINTENANCE DE LA STATION MOTRICE	108
TABEAU 10 CRITERES DE DEPOSE DES CABLES PORTEURS-TRACTEURS	114
TABEAU 11 COMPARAISON DES STRATEGIES DE MAINTENANCE APPLIQUEES AUX TELECABINES.....	117

Index des symboles

- a** : Paramètre de la chaînette ($a = T_h / (\mu_c * g)$) [m]
- $a_{pendule}$** : Distance centre de gravité / câble [m]
- A** : Section transversale du câble [mm²]
- A_{givre}** : Section de la gaine de givre [mm²]
- A_{ref}** : Surface de référence pour le calcul de F_w [m²]
- b** : distance effort de vent / câble [m]
- β** : Coefficient de réduction pour les grandes portées
- c_f** : Coefficient de force aérodynamique (trainée)
- d** : Diamètre nominal du câble [mm]
- d_{givre}** : Diamètre effectif du câble givré [mm]
- D** : Diamètre de l'appui (poulie, sabot) mesure à l'axe du câble [mm]
- D_{lat}** : Déviation latérale du câble [m]
- e_{givre}** : Epaisseur de la gaine de glace (givre) [mm]
- E** : Module d'élasticité du câble [kN/mm²]
- F_{min}** : Charge de rupture minimale du câble [kN]
- F_w** : Force du vent résultante par unité de longueur [N/m]
- g** : Accélération de la pesanteur [9,81 m/s²]
- h** : Flèche du câble (point le plus bas par rapport à la corde) [m]
- L** : Longueur de la portée (corde) [m]
- l** : Demi-portée ($L/2$) [m]
- M_v** : Masse du véhicule vide sans attache [kg]
- P_r** : pression relative du vent [N/m²(Pa)]
- q** : Pression du vent [N/m²(Pa)]
- q_{total}** : Charge linéique totale (câble + véhicules) [N/m]
- q_v** : Pression dynamique du vent [N/m²(Pa)]
- S** : Sécurité a la traction ($S = F_{min} / T$) [-]
- T** : Tension dans le câble (valeur générale) [N]
- T_h** : Composante horizontale de la tension (constante) [N]
- T_{max}** : Tension maximale dans le câble (aux extrémités de portée) [N]
- T_v** : Composante verticale de la tension [N]

ΔT : Variation de température [degC]
 V_c : Vitesse du câble [m/s]
 V_v : Vitesse du vent naturel [m/s]
 V_r : Vitesse relative [m/s]
 α_{th} : Coefficient de dilatation thermique de l'acier [$12 \times 10^{-6}/\text{degC}$]
 β : Coefficient de réduction de vent (portées longues) [-]
 θ : Angle du câble avec l'horizontale [rad]
 ρ_{air} : Masse volumique de l'air [kg/m^3]
 ρ_{glace} : Masse volumique de la glace [kg/m^3]
 μ_c : Masse linéique du câble [kg/m]
 μ_{glace} : Charge linéique du givre [N/m]
 ψ : L'angle d'oscillation du véhicule [rad]
LCC : Life Cycle Cost
RAMS : Reliability, Availability, Maintainability, Safety
MTTF : Mean Time To Failure
MTBF : Mean Time Between Failures
MTTR : Mean Time To Repair
CBM : Condition-Based Maintenance
MFL : Magnetic Flux Leakage
BPFO : Ball Pass Frequency of Outer Race
BPFI : Ball Pass Frequency of Inner Race
BSF : Ball Spin Frequency
FTF : Fundamental Train Frequency
TMF : Tooth Mesh Frequency
ICP : signifie Inductively Coupled Plasma
FFT : Fast Fourier Transform
LMA : Local Metal Area reduction
LF : Local Fault
COFREND : Confédération Française des Essais Non Destructifs.
RMS : Root Mean Square

Introduction générale

Les transports par câble constituent l'une des solutions techniques les plus anciennes et les plus ingénieuses que l'être humain ait développées pour résoudre les contraintes imposées par le relief terrestre. Depuis les premiers câbles de mine du XVII^e siècle jusqu'aux télécabines urbaines à haute capacité des années 2020, cette famille de systèmes de transport a connu une évolution remarquable, passant d'installations artisanales rudimentaires à des ouvrages d'ingénierie à la pointe de la technologie, combinant motorisation de haute puissance, automatismes sophistiqués et instrumentation de surveillance en temps réel. Aujourd'hui, les téléphériques et télécabines assurent le transport de plusieurs millions de passagers chaque année dans le monde, dans des contextes aussi variés que les domaines skiables alpins, les zones touristiques de montagne, et désormais les agglomérations urbaines confrontées à des problèmes de congestion ou de topographie défavorable.

Au cœur de ces installations, le câble porteur-tracteur constitue l'organe technique central, dont la fonction est à la fois de supporter le poids des véhicules et de transmettre la puissance nécessaire à leur déplacement. La tension exercée dans ce câble est le paramètre mécanique fondamental qui conditionne l'ensemble du fonctionnement de l'installation : elle détermine la capacité de traction de la poulie motrice, elle régit la géométrie de la ligne et la flèche du câble entre les pylônes, elle gouverne la résistance aux efforts dynamiques induits par le vent, les charges variables et les oscillations des cabines, et elle contrôle la durée de vie en fatigue du câble par les cycles de flexion répétés aux points d'appui. Une tension insuffisante expose l'installation au risque de déjantage du câble, de contact entre cabines et obstacles, ou de glissement sur la poulie motrice. Une tension excessive accélère la fatigue des fils et réduit prématurément la durée de vie du câble. La maîtrise de ce paramètre dans une plage optimale est donc à la fois une exigence de sécurité et une condition de durabilité économique.

La problématique de la tension du câble revêt une complexité particulière dans les installations de transport par câble en raison des sollicitations multiples et variables auxquelles le câble est soumis. Les charges mécaniques (poids propre du câble, poids des cabines et des passagers, effets du vent, charges d'inertie lors des démarrages et freinages) varient constamment au cours de l'exploitation et imposent au câble un état de contrainte multiaxial complexe, résultant de la superposition d'une traction directe, de flexions répétées et de contraintes de contact aux points d'appui. Les conditions environnementales (variations de température induisant des dilatations et contractions thermiques du câble, exposition à la corrosion, accumulation de givre ou de neige) superposent à ces sollicitations mécaniques des effets supplémentaires qui modifient la tension de manière difficile à anticiper sans un modèle de calcul rigoureux. Enfin, le vieillissement du câble lui-même (allongement plastique progressif, réduction de section par usure et corrosion) fait évoluer les paramètres mécaniques de l'installation au fil du temps, imposant une surveillance continue et une adaptation régulière du système de tension.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif est de conduire une étude approfondie de la tension du câble d'une télécabine, en adoptant une démarche scientifique et technique rigoureuse. L'intérêt industriel du sujet est manifeste : la maîtrise de la tension du

câble conditionne directement la sécurité des passagers, la disponibilité de l'installation et ses coûts de maintenance. L'intérêt académique réside dans la complexité des phénomènes mécaniques mis en jeu et dans la richesse des outils analytiques mobilisables pour les modéliser et les quantifier.

La méthodologie adoptée dans ce mémoire est structurée en quatre étapes complémentaires. La première étape consiste à poser le cadre conceptuel de la maintenance industrielle et à présenter les généralités sur les systèmes de téléphériques, afin de situer la problématique de la tension dans son contexte opérationnel. La deuxième étape décrit l'architecture mécanique détaillée d'une télécabine, en identifiant les composants qui contribuent à la génération et à la distribution de la tension le long de la ligne. La troisième étape développe les modèles de calcul permettant de déterminer la tension du câble dans différentes configurations de charge et conditions d'exploitation. La quatrième étape analyse les pratiques de maintenance en relation avec la tension du câble, en intégrant les méthodes de contrôle et les stratégies de maintenance conditionnelle et prédictive.

Chapitre I :
Maintenance industrielle et
généralités sur les systèmes de
transport par câble

I.1. Introduction

Les systèmes de transport par câble, et plus particulièrement les téléphériques, constituent une infrastructure critique dans de nombreuses régions du monde, qu'il s'agisse de domaines skiables, de zones urbaines à forte déclivité ou de sites touristiques. Leur fiabilité opérationnelle repose de manière fondamentale sur la qualité et la rigueur des politiques de maintenance mises en œuvre tout au long de leur cycle de vie. En effet, la défaillance d'un composant essentiel « qu'il s'agisse d'un câble porteur, d'une poulie motrice ou d'un système de freinage » peut engendrer des conséquences catastrophiques tant sur le plan humain que matériel. [1][2]

La maintenance des téléphériques se distingue des autres domaines industriels par plusieurs caractéristiques propres à cette technologie : la nature des sollicitations mécaniques appliquées aux câbles (tension, flexion répétée, fatigue), la variabilité des conditions environnementales (vent, neige, gel, UV), la complexité des interfaces entre composants fixes et mobiles, ainsi que les exigences réglementaires strictes imposées par les autorités de certification. Ces particularités imposent une approche méthodique et multidisciplinaire de la maintenance, intégrant des compétences en mécanique des câbles, en tribologie, en électrotechnique et en systèmes de contrôle. [2][3]

Ce chapitre a pour objectif de poser les bases conceptuelles et théoriques nécessaires à la compréhension des enjeux maintenanciers dans le domaine des téléphériques. Après avoir introduit les fondements de la maintenance industrielle et retracé son évolution historique, nous présenterons une classification typologique des stratégies de maintenance, avant d'aborder les généralités sur les téléphériques et de mettre en évidence l'importance de la maintenance pour la sûreté de fonctionnement de ces systèmes.

I.2. Introduction à la maintenance industrielle

I.2.1 Définition et concepts fondamentaux

La maintenance industrielle peut être définie comme « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Cette définition met en lumière trois dimensions essentielles : la dimension technique (actes d'entretien, de réparation, de révision), la dimension administrative (gestion documentaire, planification, retour d'expérience) et la dimension managériale (organisation des équipes, allocation des ressources, politique de maintenance). [4]

La notion de « fonction requise » est centrale dans cette définition. Elle implique que toute action de maintenance s'inscrit dans un référentiel de performance défini a priori : une installation est considérée en état satisfaisant si elle est capable d'accomplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue, dans les limites de performance spécifiées. Dans le cas des téléphériques, ces fonctions incluent notamment le transport sécurisé des passagers selon un débit nominal, le maintien de la tension du câble dans une plage acceptable, et la capacité à s'arrêter en sécurité en cas de défaillance. [4][5]

Au-delà de cette définition normative, la maintenance recouvre également une dimension économique non négligeable. Le coût global de possession d'une installation (LCC) intègre le coût d'acquisition, le coût de fonctionnement et le coût de maintenance. Pour les téléphériques, dont la durée de vie peut dépasser trente à quarante ans, les coûts de maintenance représentent une fraction significative du coût total, ce qui justifie pleinement une démarche d'optimisation des stratégies maintenancières. [3][6]

1.2.2 La sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement (SdF) constitue le cadre conceptuel dans lequel s'inscrit la maintenance moderne. Elle se définit comme « l'aptitude d'un système à satisfaire aux exigences de ses utilisateurs » et se décompose en quatre attributs fondamentaux : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité (RAMS). [7]

La fiabilité désigne la probabilité qu'un système accomplisse sa fonction requise pendant une durée déterminée et dans des conditions d'utilisation données. Elle se caractérise par le MTTF pour les systèmes non réparables, ou le MTBF pour les systèmes réparables. Dans le contexte des câbles de téléphériques, la fiabilité est étroitement liée à la fatigue mécanique du câble, au nombre de cycles de flexion, et aux conditions environnementales d'exploitation. [7]

La maintenabilité, quant à elle, mesure la facilité avec laquelle un système peut être remis en état après une défaillance. Elle est caractérisée par le MTTR et dépend de la conception du système (accessibilité, modularité), des compétences des techniciens et de la disponibilité des pièces de rechange. Pour les téléphériques, la maintenabilité est un enjeu majeur car les opérations de maintenance, notamment le remplacement d'un câble, nécessitent une immobilisation prolongée de l'installation. [7]

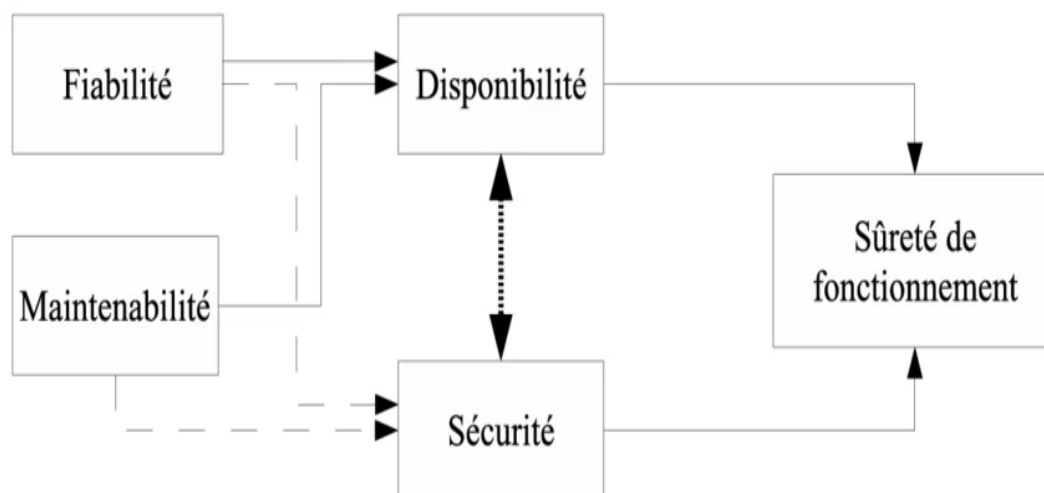


Figure 1 Relation entre les attributs de la Sûreté de Fonctionnement (SdF) [35]

I.3. Évolution historique de la maintenance :

L'évolution des concepts et pratiques de maintenance s'est opérée de manière parallèle aux révolutions industrielles successives, passant d'une approche purement curative à une démarche prédictive et désormais cognitive. Cette évolution peut être structurée en cinq générations, chacune caractérisée par des outils, des méthodes et une philosophie spécifique. [3]

I.3.1 Maintenance 1.0 : La maintenance corrective (avant 1940)

La première génération de maintenance, historiquement associée à l'ère de la mécanisation et de l'industrie naissante, se caractérise par une approche exclusivement réactive : on répare lorsque la machine tombe en panne. Dans ce paradigme, la maintenance n'est pas une discipline structurée mais une activité de dépannage empirique réalisée par des ouvriers polyvalents. L'absence de planification conduit à des immobilisations prolongées et à une utilisation peu optimale des ressources. [3][8]

Dans le domaine des téléphériques de cette époque, cette approche se traduisait par des inspections visuelles périodiques peu formalisées et des remplacements de pièces effectués uniquement après constatation de défaillances manifestes. La rupture de câble constituait alors un risque accepté faute d'outils de détection précoce, avec des conséquences parfois dramatiques sur la sécurité des passagers. [9]

I.3.2 Maintenance 2.0 : La maintenance préventive systématique (1940-1970)

La seconde révolution industrielle et l'essor de l'aviation commerciale après la Seconde Guerre mondiale ont conduit à une prise de conscience de la nécessité d'anticiper les défaillances. La maintenance préventive systématique est fondée sur le remplacement ou la révision des composants à intervalles fixes, indépendamment de leur état réel. Cette approche repose sur l'analyse statistique de la durée de vie des composants et sur l'établissement de gammes de maintenance planifiées. [3]

Pour les téléphériques, la maintenance préventive systématique s'est concrétisée par l'établissement de programmes de révision périodique incluant l'inspection des câbles selon des critères normalisés (nombre de fils rompus au pas de câblage, mesure du diamètre résiduel), le graissage des galets et des poulies, et la révision complète des moteurs à intervalles fixes définis par les constructeurs. Ces pratiques ont significativement amélioré la sécurité des installations mais ont engendré des coûts de maintenance élevés dus au remplacement prématuré de composants encore fonctionnels. [10]

I.3.3 Maintenance 3.0 : La maintenance conditionnelle et prédictive (1970-2000)

L'avènement de l'électronique et des techniques de mesure non destructives a permis l'émergence d'une nouvelle génération de maintenance fondée sur l'évaluation de l'état réel des composants. La maintenance conditionnelle (ou maintenance basée sur la condition, CBM) consiste à déclencher les interventions de maintenance sur la base de paramètres mesurés

reflétant l'état de santé du système. Elle se distingue de la maintenance prédictive par le fait que cette dernière vise à anticiper la défaillance future sur la base de modèles de dégradation. [3][11]

Dans le contexte des téléphériques, la maintenance conditionnelle a bénéficié du développement de techniques de contrôle non destructif (CND) particulièrement adaptées aux câbles : le contrôle par flux de fuite magnétique (MFL) permettant de détecter les fils rompus internes et les zones de corrosion, la mesure de la section résistante par induction magnétique, et l'analyse vibratoire pour détecter les défauts de galets. Ces techniques permettent d'établir des courbes de dégradation et de définir des seuils d'alarme et d'arrêt. [10][11]

I.3.4 Maintenance 4.0 : La maintenance proactive et l'Industrie 4.0 (2000-2020)

La quatrième génération de maintenance, intimement liée à la révolution numérique de l'Industrie 4.0, intègre les technologies de l'Internet des Objets (IoT), du Big Data et de l'informatique en nuage (cloud computing) pour créer des systèmes de maintenance intelligents et connectés. L'architecture typique d'un système de maintenance 4.0 repose sur une infrastructure de capteurs distribués (accéléromètres, capteurs de force, capteurs de température, capteurs de déplacement) connectés à des passerelles IoT, transmettant en temps réel des données vers des plateformes d'analyse avancée. [12]

Pour les téléphériques modernes, la maintenance 4.0 se concrétise par l'instrumentation permanente des composants critiques : jauges de contrainte sur les câbles pour mesurer en continu les efforts de tension, accéléromètres sur les galets pour détecter les vibrations anormales, capteurs de température sur les paliers de roulement, et systèmes de vision artificielle pour l'inspection automatique des câbles lors de leur passage devant des caméras haute résolution. Ces données alimentent des tableaux de bord opérationnels permettant aux équipes de maintenance de visualiser l'état de l'installation en temps réel.

I.3.5 Maintenance 5.0 : La maintenance cognitive et augmentée (2020 et au-delà)

La cinquième génération de maintenance, en cours d'émergence, exploite les capacités de l'intelligence artificielle (IA), de l'apprentissage automatique (machine learning) et des jumeaux numériques (digital twins) pour créer des systèmes de maintenance autonomes et auto-optimisants. Un jumeau numérique est un modèle numérique dynamique d'un actif physique, alimenté en temps réel par les données issues des capteurs, et capable de simuler le comportement futur du système en fonction de différents scénarios de sollicitation. [13]

Dans le domaine des téléphériques, la maintenance 5.0 ouvre des perspectives révolutionnaires: des modèles d'apprentissage profond (deep learning) entraînés sur des milliers d'heures de données opérationnelles permettent de prédire avec une précision remarquable la durée de vie résiduelle d'un câble en fonction de son historique de sollicitation, des conditions météorologiques cumulées et des résultats des derniers contrôles CND. Des systèmes de réalité augmentée (RA) guident les techniciens lors des opérations de maintenance complexes, superposant des instructions visuelles à la vue réelle de l'installation. [12]

I.4. Classification des types de maintenance

La norme propose une classification structurée des différents types de maintenance, organisée selon deux axes principaux : le moment d'exécution de l'intervention par rapport à la défaillance (avant ou après), et le degré de planification de l'intervention. Cette classification est illustrée par l'arborescence normative présentée. [4]

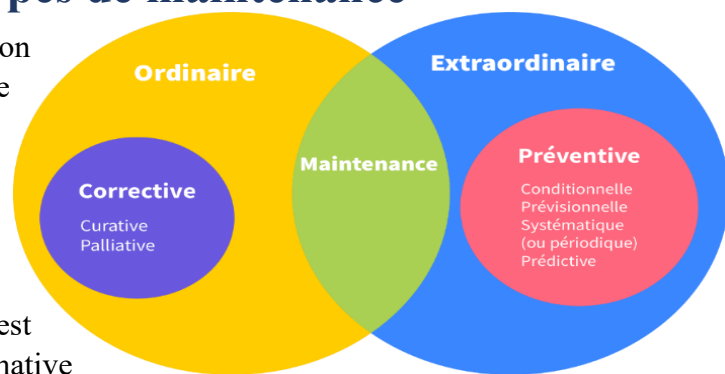


Figure 2 Types de maintenance [36]

I.4.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective désigne l'ensemble des activités effectuées après la détection d'une défaillance, dans le but de remettre le bien en état de fonctionnement. Elle se décline en deux sous-catégories selon le degré d'urgence et la durabilité de la solution apportée. La maintenance palliative, ou dépannage, consiste en une remise en état provisoire permettant de poursuivre temporairement l'exploitation dans l'attente d'une intervention définitive. La maintenance curative, quant à elle, vise le rétablissement durable de la fonction défaillante et implique généralement le remplacement ou la réparation définitive du composant défectueux. [4]

Dans le contexte des téléphériques, la maintenance corrective est soumise à des contraintes réglementaires strictes qui limitent considérablement les possibilités de maintenance palliative. En effet, toute défaillance affectant la sécurité des passagers impose l'arrêt immédiat de l'exploitation et le rétablissement de l'état nominal avant toute reprise. Des procédures d'évacuation des cabines bloquées en ligne sont prévues et régulièrement exercées, constituant une forme de maintenance palliative encadrée. [1][14]

I.4.2 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est fondée sur la réalisation d'interventions planifiées à intervalles fixes, déterminés soit par le temps d'utilisation (heures de fonctionnement), soit par le nombre de cycles (nombre de passages d'une pince, nombre de révolutions d'une poulie), soit par des critères calendaires (annuels, bi-annuels). Cette approche repose sur l'hypothèse que la probabilité de défaillance d'un composant suit une loi statistique connue et que l'on peut définir un intervalle de remplacement optimal minimisant le coût global de maintenance.

Pour les câbles de téléphériques, les intervalles de maintenance préventive systématique sont définis par les normes EN 12930 et EN 1709 ainsi que par les préconisations des constructeurs. Ils incluent notamment : le graissage externe des câbles tous les six à douze mois selon les conditions d'exploitation, la vérification visuelle et par contact des câbles à chaque saison, la révision complète des pinces de serrage des câbles débrayables toutes les 500 à 1000 heures de fonctionnement, et le remplacement des câbles selon un calendrier défini par l'inspection quinquennale. [5][10]

I.4.3 Maintenance conditionnelle et prédictive

La maintenance conditionnelle déclenche les interventions de maintenance en fonction de l'état réel du système, évalué par la surveillance de paramètres physiques significatifs appelés indicateurs d'état ou paramètres de surveillance. Cette approche nécessite la définition préalable d'un modèle de dégradation reliant l'évolution du paramètre surveillé à l'état de santé du composant, ainsi que l'établissement de seuils d'alerte et d'arrêt.

Pour les câbles de téléphériques, les paramètres de surveillance les plus couramment utilisés sont : le nombre de fils rompus par section unitaire (pas de câblage) mesuré lors des inspections CND, le diamètre résiduel du câble mesuré par pied à coulisse ou par dispositif de mesure optique, la rigidité de flexion du câble évaluée par la mesure de la force nécessaire à la déviation, et la résistance électrique du câble utilisée pour détecter les zones de corrosion interne. La maintenance prédictive étend ce concept en établissant des modèles de prévision de la dégradation future, permettant de planifier les interventions de manière optimale. [10][11]

Maintenance Conditionnelle

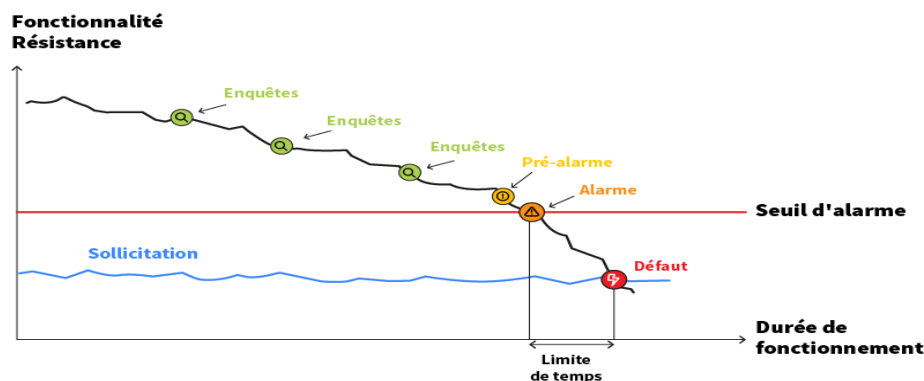


Figure 3 Représentation schématique de la maintenance conditionnelle fonctionnement [37]

I.5. Généralités sur les téléphériques

I.5.1 Définition et terminologie

Les téléphériques appartiennent à la famille des transports par câble, qui regroupent l'ensemble des installations utilisant un câble d'acier comme organe de traction ou de support pour assurer le déplacement de personnes ou de marchandises. La terminologie distingue plusieurs familles au sein de cette catégorie générale, en fonction du mode de support, du mode de traction et du nombre de câbles mis en œuvre.

Au sens strict, le terme « téléphérique » désigne une installation dans laquelle les véhicules sont suspendus à un câble aérien et se déplacent dans les deux sens, sans se croiser (mouvement de va-et-vient). Par extension, le terme est souvent employé pour désigner l'ensemble des transports par câble aérien. Au sens de la réglementation ces installations sont désignées par l'appellation générique de « remontées mécaniques » et comprennent les téléphériques (au sens strict) (Figure 4), les télécabines (Figure 5), les télésièges (Figure 6), les téléskis (Figure 7) et les funiculaires (Figure 8). [1]



Figure 4 Téléphérique bicâble de type va-et-vient [9]



Figure 5 Télécabine à attaches débrayables [9]



Figure 6 Télésiège débrayable [9]



Figure 7 Télésiège à archets [9]



Figure 8 Funiculaire [9]

I.5.2 Classification des transports par câble

La classification des transports par câble peut être réalisée selon plusieurs critères. Le critère le plus communément retenu est celui du mode de couplage entre le véhicule et le câble, qui permet de distinguer les installations à attaches fixes (ou pinces fixes) des installations à attaches débrayables (ou pinces débrayables). Dans les installations à attaches fixes, le véhicule est solidement fixé au câble tracteur et circule à la vitesse nominale du câble (généralement 2 à 6 m/s). Dans les installations à attaches débrayables, le véhicule peut être découplé du câble à l'approche des stations pour ralentir jusqu'à l'arrêt, permettant ainsi des vitesses en ligne beaucoup plus élevées (jusqu'à 10 m/s pour les télécabines modernes) tout en maintenant un confort d'embarquement satisfaisant. [1]

Un second critère de classification distingue les installations monocâbles des installations bicâbles et tricâbles, en fonction du nombre de câbles utilisés. Les monocâbles, les plus répandus, utilisent un unique câble remplissant simultanément les fonctions de portage et de traction. Les bicâbles utilisent un câble porteur fixe (câble porteur) sur lequel repose le véhicule, et un câble tracteur mobile assurant la propulsion. Les tricâbles, utilisés pour les grandes portées et les forts dénivelés, disposent de deux câbles porteurs et d'un câble tracteur. [9]

I.5.3 Bref historique des téléphériques

Les origines des transports par câble remontent au XVII^e siècle, époque à laquelle des dispositifs rudimentaires étaient utilisés dans les mines et sur les chantiers pour le transport de matériaux. L'essor du transport de voyageurs par câble débute véritablement au XIX^e siècle avec les travaux de l'ingénieur britannique Andrew Smith Hallidie, qui inaugure en 1873 à San Francisco le premier « cable car » moderne. Ce système repose sur un câble en mouvement continu, installé sous la chaussée, auquel les véhicules s'accrochent afin d'assurer leur déplacement (Figure 9). Cette innovation constitue une étape majeure dans l'histoire des transports guidés par câble. [9]



Figure 9 Tramway à câble de San Francisco (Cable Car), 1887 [42]

Au début du XX^e siècle, les progrès techniques permettent l'apparition des premiers téléphériques destinés au transport de passagers en montagne. En 1908, les installations du Colle (Kohlern), en Italie (Figure 10), et du Wetterhorn, en Suisse (Figure 11), figurent parmi les premières réalisations de ce type. Le téléphérique du Wetterhorn est généralement considéré comme le premier véritable téléphérique de montagne destiné au transport de voyageurs. En France, le premier téléphérique pour passagers est mis en service en 1924 à Chamonix-Mont-Blanc, reliant Les Pèlerins à La Para dans le cadre de la première ligne de l'Aiguille du Midi (Figure 12). Au cours des décennies suivantes, le développement des techniques de construction favorise la réalisation d'ouvrages de plus en plus performants, notamment les téléphériques de Planpraz et du Brévent à Chamonix (Figure 13). [9]



Figure 10 Téléphérique du Colle (Kohlern) [9]



Figure 11 Téléphérique du Wetterhorn, Grindelwald, Suisse [9]



Figure 12 Téléphérique Les Pèlerins - La Para sur les pentes de l'aiguille du Midi, Chamonix, France [9]



Figure 13 Deuxième tronçon du téléphérique de l'Aiguille du Midi à Chamonix-Mont-Blanc, France [9]

À partir des années 1950, l'essor des sports d'hiver stimule fortement le développement des remontées mécaniques et conduit à la généralisation des télécabines dans les stations de montagne. Les décennies 1970 et 1980 marquent une avancée technologique importante avec l'introduction des pinces débrayables, permettant d'augmenter simultanément la vitesse en ligne et le confort d'embarquement des passagers. À partir des années 2000, les systèmes tricâbles (3S) apparaissent comme une nouvelle génération d'installations, capables d'offrir de grandes capacités de transport tout en assurant une excellente stabilité au vent. Aujourd'hui, les transports par câble connaissent un regain d'intérêt dans le domaine urbain, où ils constituent une solution efficace pour franchir les obstacles topographiques et réduire les effets de la congestion routière dans les grandes agglomérations. [9]

I.6. Importance de la maintenance dans les téléphériques

I.6.1 Enjeux de sécurité

La sécurité des passagers constitue l'enjeu premier et absolu de la maintenance des téléphériques. Contrairement à de nombreux systèmes industriels où une défaillance peut être tolérée au prix d'une perte de production ou d'un inconfort temporaire, toute défaillance grave d'un téléphérique est susceptible de provoquer des accidents mortels. Cette réalité a conduit les autorités réglementaires à imposer des exigences de maintenance parmi les plus strictes qui soient dans l'industrie du transport. [1][2][14]

Les réglementations imposent notamment : une visite journalière avant la mise en exploitation, une visite hebdomadaire approfondie, une révision saisonnière complète, et une inspection quinquennale par un organisme accrédité. Ces visites couvrent l'intégralité des composants de l'installation, avec une attention particulière aux câbles, aux organes d'entraînement et aux systèmes de sécurité.

Le câble est l'élément le plus critique de l'installation de par la nature même de sa sollicitation mécanique. Soumis à des charges variables (poids des cabines, charge utile, effets du vent), à la flexion répétée lors du passage sur les poulies et les galets, et aux agressions environnementales (humidité, corrosion, usure par frottement), le câble est le siège de mécanismes de dégradation complexes dont l'évolution doit être surveillée en permanence. La tension du câble, dont l'étude fait l'objet du présent mémoire, est un paramètre fondamental de la sécurité : une tension insuffisante conduit à un risque de déraillement du câble, tandis qu'une tension excessive accélère la fatigue des fils et réduit la durée de vie de l'installation. [15][16]

I.6.2 Enjeux économiques et opérationnels

Au-delà des enjeux de sécurité, la maintenance des téléphériques représente un défi économique majeur pour les exploitants. Le coût de maintenance annuel d'une installation moderne représente généralement entre 3 et 8 % de la valeur de remplacement à neuf (soit plusieurs centaines de milliers d'euros pour une installation de taille moyenne) selon les retours d'expérience industriels et les pratiques observées chez les exploitants et constructeurs. Ces coûts comprennent les charges de main-d'œuvre des équipes de maintenance, les pièces de

rechange (dont les câbles constituent le poste le plus important), les prestations d'inspection et de contrôle, et les coûts d'immobilisation liés aux arrêts pour maintenance. [3][14]

La disponibilité de l'installation est un indicateur économique crucial pour les exploitants de stations de ski, dont le modèle économique repose sur la maximisation du chiffre d'affaires pendant une période d'exploitation souvent limitée à quelques mois par an. Une panne majeure en haute saison peut engendrer des pertes considérables, tant en recettes directes (billetterie) qu'en recettes indirectes (hébergement, restauration, commerce). La fiabilité de l'installation, directement conditionnée par la qualité de la maintenance, est donc un facteur compétitif déterminant.

I.6.3 Réglementation et normalisation

Le cadre réglementaire et normatif de la maintenance des téléphériques est extrêmement développé, reflétant l'enjeu de sécurité publique que représentent ces installations. Au niveau européen, la directive 2000/9/CE relative aux installations à câbles transportant des personnes (remplacée par le règlement (UE) 2016/424) définit les exigences essentielles de sécurité applicables à la conception et à la fabrication des remontées mécaniques. Les normes harmonisées de la série EN 13796 (câbles porteurs), EN 12930 (calculs des résistances), et EN 1709 (inspections des câbles) précisent les exigences techniques détaillées. [17][5]

En France, le STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés) constitue l'autorité technique de référence en matière de réglementation et de sécurité des remontées mécaniques. À l'inverse, des organismes tels que le SNTF (Société Nationale des Transports Ferroviaires) et l'ANACT (Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail) interviennent dans une logique complémentaire en proposant des guides de bonnes pratiques, fondés sur les retours d'expérience des exploitants et sur l'amélioration des conditions de travail. Ces recommandations, bien que non contraignantes, contribuent à renforcer la sécurité et la performance des installations. Le BEA-TT (Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre) est chargé d'enquêter sur les accidents et incidents significatifs affectant les transports terrestres, y compris les remontées mécaniques. À l'issue de ses investigations, il émet des recommandations de sécurité visant à prévenir la récurrence des événements analysés, contribuant ainsi à l'amélioration continue des pratiques de maintenance. Ces recommandations viennent en complément du cadre réglementaire défini et contrôlé par le STRMTG, lequel constitue une base exigeante que les exploitants doivent intégrer dans l'organisation de leur service de maintenance. [1][14]

I.7. Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir les fondements conceptuels et historiques nécessaires à la compréhension de la maintenance des téléphériques. Nous avons montré que la maintenance industrielle a connu une transformation profonde au cours du dernier siècle, passant d'une approche purement réactive à une démarche proactive et désormais prédictive, s'appuyant sur les technologies numériques de l'Industrie 4.0 et les méthodes de l'intelligence artificielle.

L'application de ces évolutions au domaine des téléphériques est d'autant plus justifiée que ces installations présentent des caractéristiques qui en font un terrain d'application privilégié pour les méthodes de maintenance avancée : la criticité absolue vis-à-vis de la sécurité des passagers, la complexité des mécanismes de dégradation (fatigue, corrosion, usure des câbles), la durée de vie très longue des installations, et l'impact économique direct de la disponibilité sur la rentabilité des exploitants. [3][7]

Le paramètre de tension du câble occupe une place centrale dans cet ensemble : il conditionne à la fois la sécurité de l'exploitation (risque de déraillement, résistance aux efforts dynamiques), la durée de vie de l'installation (fatigue par cycles de tension-flexion), et la qualité de service (confort des passagers, régularité de l'exploitation). Le chapitre suivant, consacré aux principes de fonctionnement des télécabines et à la description de leurs composants, permettra d'approfondir cette analyse en décrivant les mécanismes physiques qui gouvernent la tension du câble dans une installation réelle.

Chapitre II :
Principe de fonctionnement,
composants et câbles des
télécabines monocâbles
débrayables

II.1. Introduction

Les télécabines monocâbles à attaches débrayables représentent aujourd'hui la technologie la plus répandue dans les domaines skiables modernes et constituent l'une des formes les plus évoluées de transport par câble. Leur conception repose sur une ingénierie subtile permettant de concilier des contraintes apparemment contradictoires : une vitesse de circulation élevée en ligne pour un débit de passagers important, une vitesse réduite en station pour un embarquement confortable et sécurisé, et des charges variables en fonction des conditions d'exploitation. [1][9]

Le câble constitue l'épine dorsale de l'installation. Organe à la fois porteur et tracteur dans les configurations monocâbles, il est soumis à un état de sollicitation mécanique complexe résultant de la superposition d'une tension directe due au poids des cabines et à la traction nécessaire pour les faire circuler, de sollicitations de flexion induites par le passage sur les poulies et les galets de pylônes, et de contraintes dynamiques liées aux oscillations des cabines, aux variations de charge et aux effets du vent. [16][18]

Ce chapitre a pour objectif de décrire de manière exhaustive le fonctionnement et l'architecture des télécabines, depuis les stations motrices jusqu'aux pylônes, en passant par les différents types de câbles et les techniques d'assemblage utilisées. Une attention particulière sera portée aux mécanismes qui gouvernent la tension du câble, dont la maîtrise est au cœur de la problématique de ce mémoire.

II.2. Principe de fonctionnement global d'une télécabine

II.2.1 Architecture générale d'une ligne

Une installation de télécabine se compose schématiquement de deux stations terminales : la station motrice en bas (ou en haut, selon la configuration) et la station retour à l'autre extrémité, reliées par un câble formant une boucle fermée continue. Entre ces deux stations, des pylônes métalliques supportent le câble et maintiennent sa géométrie le long du tracé de la ligne, compensant l'effet de la pesanteur qui tendrait à faire descendre le câble vers le sol entre deux appuis successifs. [9]

Les cabines, accrochées au câble par des pinces débrayables, circulent en convoi régulier dans les deux sens simultanément sur un câble unique, à raison d'une cabine à l'aller pour chaque cabine au retour. La distance entre deux cabines consécutives, appelée écartement ou intervalle, est déterminée par la cadence d'embarquement souhaitée et la vitesse de la ligne. Pour une télécabine à débit élevé, l'intervalle peut être aussi court que 5 à 8 secondes, correspondant à une distance de 40 à 80 mètres entre cabines successives pour une vitesse de 8 m/s.

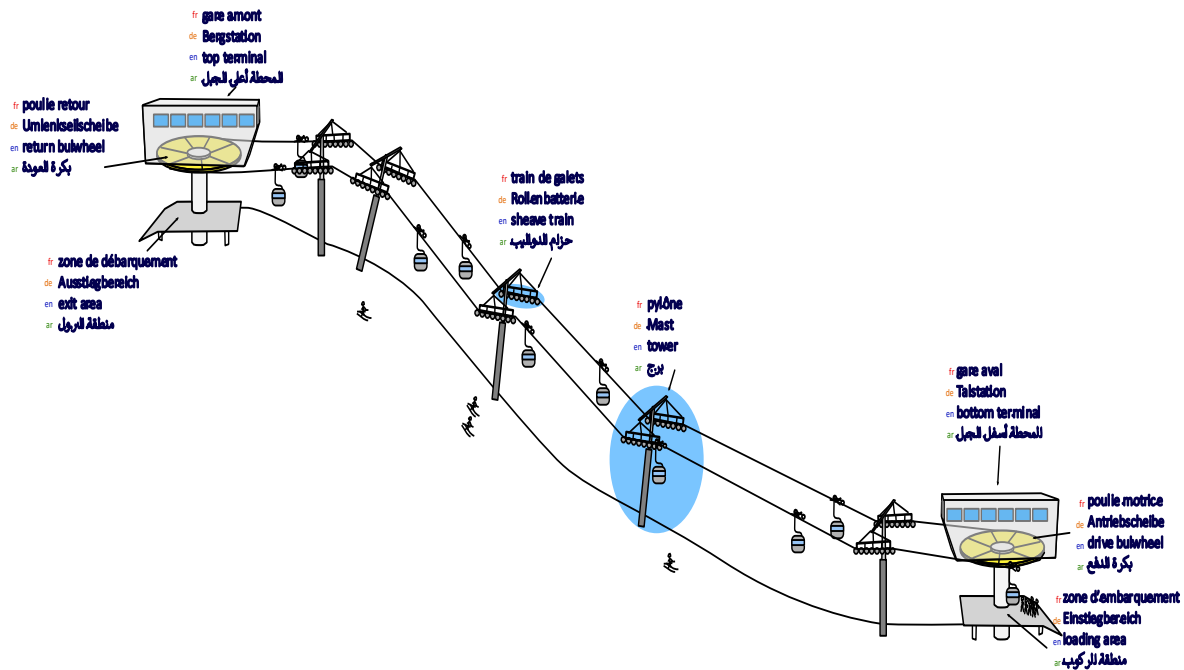


Figure 14 Schéma global d'une installation de remontée mécanique [35]

II.2.2 Circulation du câble

Le câble circule en boucle continue entre la station motrice et la station retour, entraîné par la poulie motrice. La vitesse nominale de circulation varie selon les générations d'installations : de 2,5 m/s pour les premières télécabines à attaches fixes jusqu'à 10 m/s pour les installations modernes à haut débit. Cette vitesse est maintenue constante lors de l'exploitation normale grâce à un système de régulation de vitesse asservissant le moteur électrique à une consigne de vitesse de référence, avec une tolérance généralement de ± 2 %. [1]

À l'approche des stations, les cabines sont découpées du câble (débrayage) par l'ouverture de leur pince (Figure 15). Elles poursuivent leur chemin sur une piste de décélération, entraînées par un système de convoyeur à rouleaux (Figure 16) motorisés dont la vitesse décroît progressivement jusqu'à la vitesse d'embarquement (typiquement 0,2 à 0,5 m/s). Après embarquement des passagers, la cabine est accélérée par un convoyeur de lancement jusqu'à la vitesse nominale de la ligne, puis la pince se referme sur le câble (embrayage). La transition entre la vitesse du convoyeur et la vitesse du câble doit s'effectuer de manière synchrone pour éviter tout choc lors de l'embrayage.

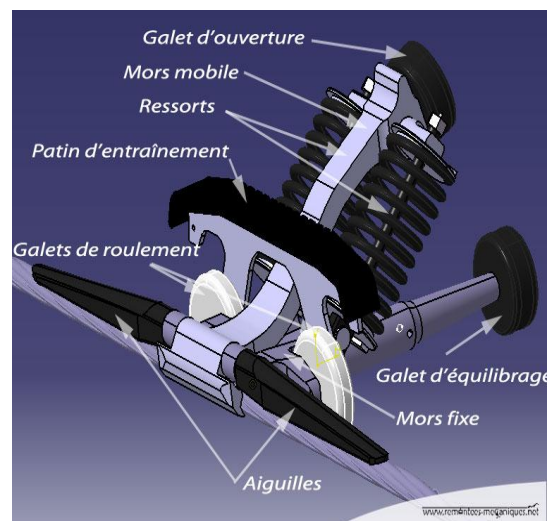


Figure 15 Pince débrayable [9]



Figure 16 Convoyeur à pneu [9]

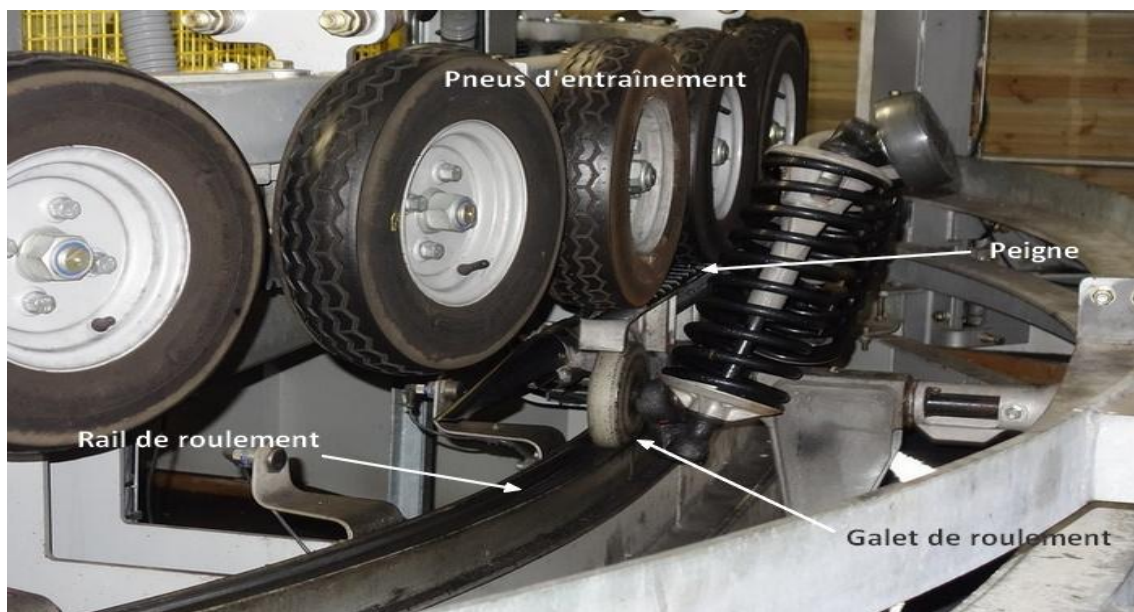


Figure 17 Détail d'un entraînement par pneus d'un véhicule débrayé en gare [9]

II.2.3 Interactions mécaniques dans le système

Le système câble-cabines constitue un ensemble mécanique couplé dont les interactions sont complexes. La tension du câble résulte de l'équilibre entre la traction exercée par la poulie motrice et les charges appliquées par le poids des cabines, des passagers et des sollicitations dynamiques. Cette tension n'est pas uniforme le long du câble : elle varie en fonction de la pente locale du terrain, du poids des cabines dans chaque tronçon, et des pertes par frottement sur les galets de pylônes. [16][18]

II.3. La station motrice

La station motrice est le cœur névralgique de l'installation. Elle abrite l'ensemble des organes de motorisation, de commande et de sécurité qui assurent la mise en mouvement et la régulation du câble. Sa conception doit répondre à des exigences contradictoires de compacité (contraintes architecturales et d'intégration paysagère), de puissance (capacité à entraîner un câble fortement chargé sur de longues distances), de fiabilité (disponibilité requise supérieure à 99 %) et de sécurité (redondance des systèmes critiques). [1]

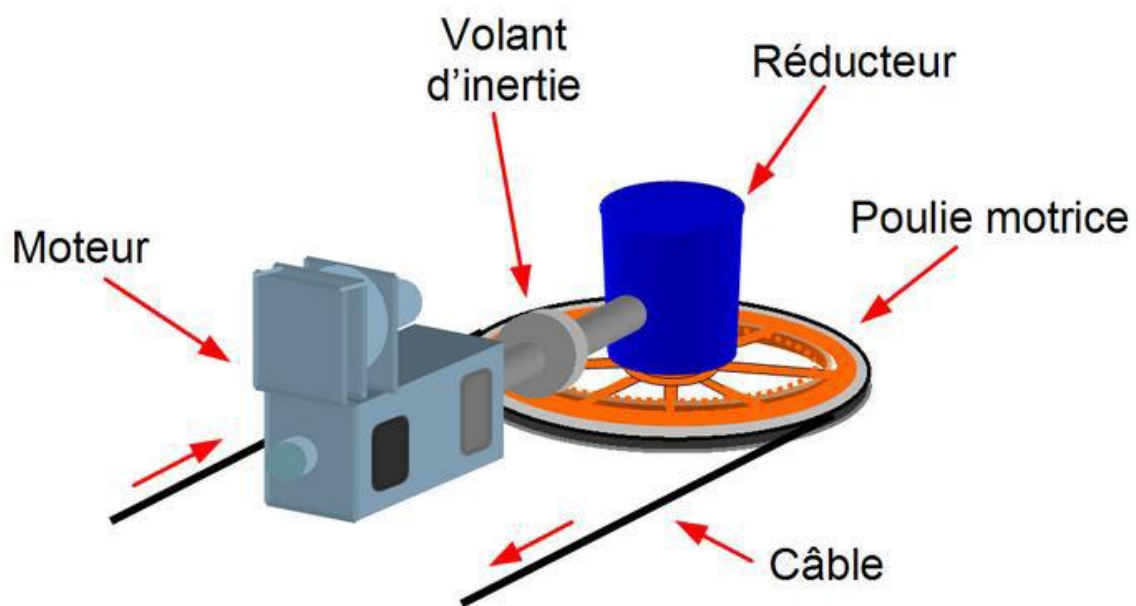


Figure 18 Schéma d'une station motrice [9]

II.3.1 Moteur principal

Dans les télécabines modernes, l'entraînement principal est généralement assuré par un moteur électrique triphasé commandé par un variateur de fréquence. Les installations les plus répandues utilisent des moteurs asynchrones à cage d'écureuil, tandis que certaines réalisations récentes emploient des moteurs synchrones à aimants permanents ou des systèmes d'entraînement direct sans réducteur. L'utilisation d'un variateur de fréquence permet un réglage précis de la vitesse du câble, ainsi qu'une gestion progressive des phases de démarrage et d'arrêt. Cette technologie contribue à réduire les sollicitations dynamiques appliquées au câble porteur-tracteur, à limiter les chocs mécaniques transmis aux organes de ligne et à améliorer le confort des passagers grâce à une accélération et une décélération plus régulières. Les fabricants de remontées mécaniques soulignent également que l'association moteur-convertisseur de fréquence constitue aujourd'hui un élément essentiel pour garantir la fiabilité et l'efficacité énergétique des installations modernes [30]

La puissance du système d'entraînement dépend principalement de la longueur de la ligne, du dénivelé, du débit de transport et de la charge des véhicules. Pour les télécabines monocâbles

débrayables, les puissances installées se situent généralement entre 200 kW et 1 000 kW, tandis que certaines installations de grande capacité ou présentant un fort dénivelé peuvent dépasser 1,5 MW. À titre d'exemple, plusieurs télécabines modernes construites par les principaux fabricants européens utilisent des entraînements compris entre 300 et 800 kW, permettant d'assurer des débits de l'ordre de 2 000 à 4 000 passagers par heure. Le dimensionnement du moteur est réalisé de manière à garantir un fonctionnement sûr dans les conditions d'exploitation les plus défavorables, notamment lors des démarrages en charge, des épisodes de givre ou des variations importantes de fréquentation et pour compenser le vieillissement des équipements. [30]

Le lien entre le moteur principal et la tension du câble est direct : la puissance transmise par le moteur se traduit en un couple sur l'arbre de la poulie motrice, lequel génère une force tangentielle sur le câble. La différence de tension entre le brin tendu (brin moteur, en amont de la poulie dans le sens du mouvement) et le brin mou (brin libre, en aval) est directement proportionnelle à cette force tangentielle et donc à la puissance motrice transmise au câble.

Sur la photo ci-dessous (Figure 19), le moteur est en bleu, il entraîne un arbre, souvent un volant d'inertie et un disque servant au système de frein. La partie rouge est le réducteur, comme son nom l'indique, il réduit la vitesse du moteur, ce qui augmente le couple (la force du moteur).



Figure 19 Moteur électrique avec réducteur [30]

II.3.2 Moteur de secours

Une télécabine débrayable est une installation de transport par câble de grande capacité. Il s'agit d'un équipement majeur, généralement de grande longueur, capable d'acheminer un nombre important de passagers dans des cabines fermées. En cas de défaillance, il est donc essentiel de pouvoir évacuer les usagers. Lorsque l'évacuation directe de la ligne n'est pas envisageable (héliportage, treuillage, etc.), des systèmes de motorisation de secours prennent le relais. Il existe plusieurs types de moteurs de secours ; commençons par les moteurs hydrauliques installés directement sur la poulie motrice. [1][14]

Moteurs hydrauliques sur la poulie motrice

Ces moteurs fonctionnent grâce à un circuit d'huile sous pression (hydraulique). Ils sont positionnés au-dessus de la poulie motrice et peuvent entraîner celle-ci au moyen d'une roue dentée. Une couronne dentée est fixée sur la poulie motrice ; en fonctionnement normal, les moteurs hydrauliques restent désengagés afin de ne pas perturber ni freiner l'installation. En cas de panne du moteur principal, les moteurs de secours viennent alors s'engrener avec cette couronne. Le moteur agit directement sur la poulie, sans passer par un réducteur. Il est toutefois nécessaire de désaccoupler le réducteur principal de la poulie lors de leur mise en service (Figure 20). [30]



Figure 20 Système de découplage réducteur-poulie motrice [9]

La partie 2 est liée au réducteur, la partie 1 liée à la poulie.

Lorsque l'alimentation électrique est disponible, des motoréducteurs de secours peuvent également être utilisés. Ils sont principalement présents sur les installations récentes ainsi que sur les télécabines à entraînement direct. En revanche, en cas de coupure du réseau électrique, il est nécessaire d'utiliser un groupe électrogène, qui fournit l'énergie requise à partir de gasoil. [30]

Voici quelques photos de ces motoréducteurs :



Figure 21 : Motoréducteur de secours [30]

Sur la (Figure 21), on distingue clairement les câbles électriques alimentant le moteur, ainsi que le système de commande qui régule la vitesse et le démarrage des moteurs de secours. À l'instar des moteurs hydrauliques, une roue dentée est montée sur l'axe du moteur, permettant d'entraîner la poulie motrice via une couronne dentée (Figure 22).

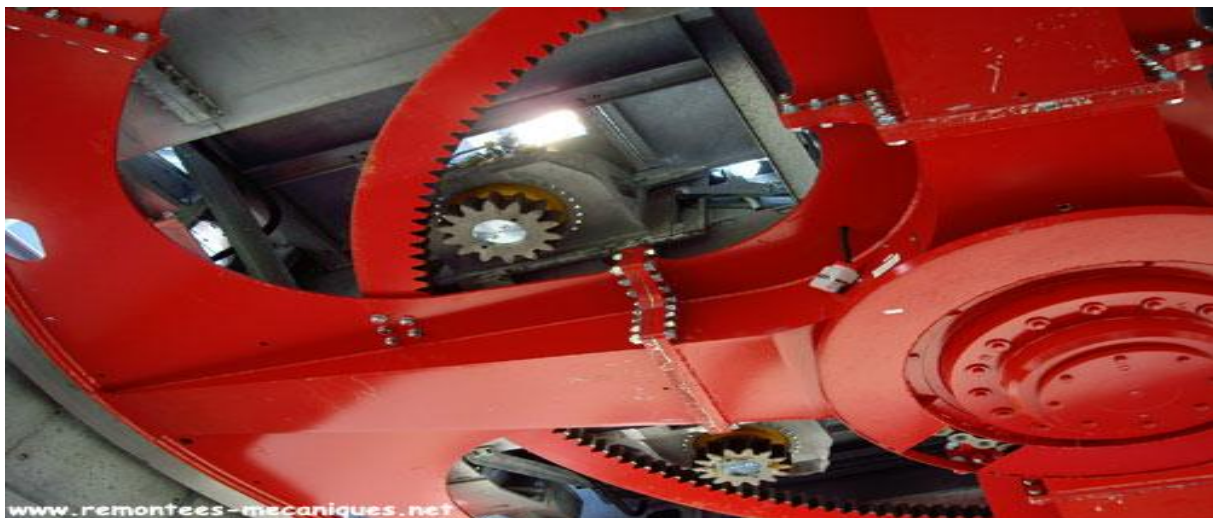


Figure 22 Couronne dentée et pignons d'entraînement de secours [9]

Moteurs thermiques

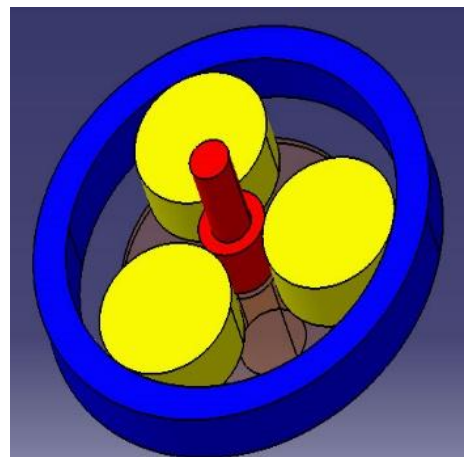
Sur la majorité des installations, un moteur thermique (Figure 23) est installé dans la gare motrice. Il permet d'assurer l'évacuation de la ligne en cas de coupure d'électricité, puisqu'il fonctionne au gasoil. À l'image d'un moteur automobile, il entraîne un arbre, généralement parallèle à l'axe de motorisation principal. Ce mouvement est ensuite transmis au réducteur via un arbre de liaison. Toutefois, ces moteurs sont nettement moins puissants que les moteurs principaux, ce qui implique une vitesse d'évacuation relativement faible. Un turbocompresseur peut être ajouté pour les installations de grande envergure. [9]



Figure 23 Moteur thermique d'évacuation [9]

II.3.3 Le réducteur

Le réducteur constitue un élément essentiel de la chaîne de transmission d'une télécabine. Il assure l'interface mécanique entre le moteur principal, dont la vitesse de rotation est généralement comprise entre 750 et 1500 tr/min selon le type de moteur utilisé, et la poulie motrice, dont la vitesse de rotation est beaucoup plus faible afin d'obtenir des vitesses de câble généralement comprises entre 5 et 7 m/s pour les télécabines débrayables. Cette adaptation est réalisée conformément au principe de conservation de la puissance mécanique, selon lequel une diminution de la vitesse de rotation s'accompagne d'une augmentation du couple transmis. [9]



Les réducteurs utilisés dans les installations de transport par câble sont généralement constitués de plusieurs étages d'engrenages, le plus souvent à dentures hélicoïdales, afin d'assurer une transmission progressive du mouvement tout en limitant les vibrations et le bruit de fonctionnement. Selon les caractéristiques de l'installation, ils peuvent être de type à arbres parallèles ou intégrer un train épicycloïdal (ou planétaire) (Figure 24). Ce dernier présente l'avantage d'offrir des rapports de réduction élevés dans un encombrement réduit tout en assurant une excellente répartition des charges entre plusieurs satellites. Un étage comprend 4 principaux éléments : Le planétaire solaire (axe avec dentures) en rouge, le porte satellite en orange transparent, les satellites (roues dentées) en jaune, le planétaire

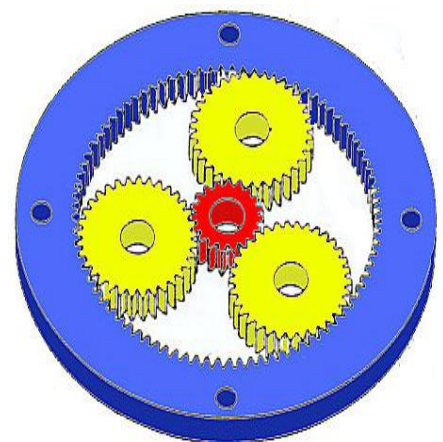


Figure 24 Schéma d'un étage d'un réducteur à train épicycloïdal [9]

couronne (*qui est une couronne dentée fixe*) en bleu. Le rapport de réduction global dépend des caractéristiques de l'installation et peut atteindre plusieurs centaines pour un, de manière à adapter la vitesse du moteur à celle de la poulie motrice. Les engrenages hélicoïdaux et les trains épicycloïdaux sont particulièrement appréciés pour leur rendement élevé, leur fonctionnement régulier et leur bonne résistance à la fatigue mécanique. Dans les installations les plus récentes, certains constructeurs proposent également des entraînements directs sans réducteur, permettant de réduire les besoins de maintenance et d'améliorer le rendement global de la chaîne cinématique. [9]

La lubrification des engrenages constitue un aspect critique pour la fiabilité du système. Elle est assurée par bain d'huile ou par circulation forcée sous pression selon la puissance et la conception du réducteur. Une surveillance régulière est nécessaire afin de détecter toute dégradation du lubrifiant, toute contamination ou toute élévation anormale de température. Une lubrification insuffisante peut entraîner une usure accélérée des dentures, une dégradation des roulements et, dans les cas les plus sévères, une défaillance du réducteur.

Du point de vue dynamique, le réducteur participe également à la qualité de transmission du couple moteur. Une usure excessive des dentures ou l'apparition d'un jeu anormal entre les engrenages peut provoquer des irrégularités dans la transmission du mouvement. Ces phénomènes peuvent générer des vibrations mécaniques susceptibles de se propager jusqu'à la poulie motrice et d'influencer le comportement dynamique du câble. Toutefois, leurs effets sont en partie amortis par l'élasticité propre du câble ainsi que par les dispositifs de tension de l'installation, tels que les contrepoids ou les systèmes hydrauliques de tension. [9]

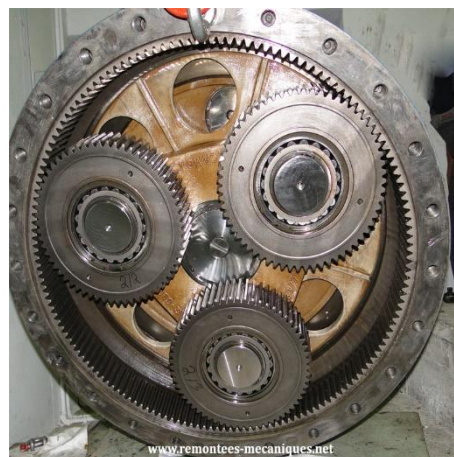


Figure 25 Vue interne d'un étage d'un réducteur à train épicycloïdal [9]

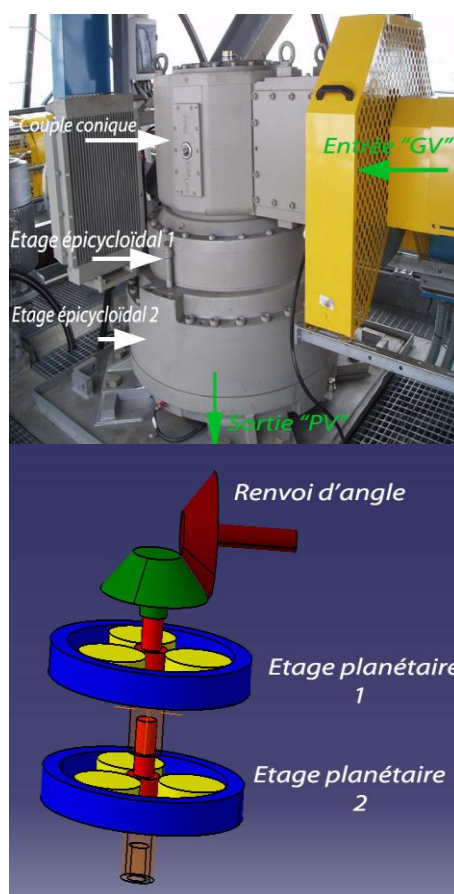


Figure 26 Réducteur à train épicycloïdal [9]

II.3.4 La poulie motrice

La poulie motrice (Figure 27) est le composant par lequel la puissance du moteur est transmise au câble. De grand diamètre (généralement 3 à 5 mètres pour les télécabines modernes), elle est revêtue d'une garniture en matériau à fort coefficient de frottement (caoutchouc synthétique, polyuréthane ou matériau composite) permettant la transmission de l'effort de traction par adhérence (Figure 28). Le câble s'enroule sur la poulie avec un angle de contact de 180° (demi-tour), ce qui maximise la longueur de contact et donc la capacité de transmission de traction. [16]

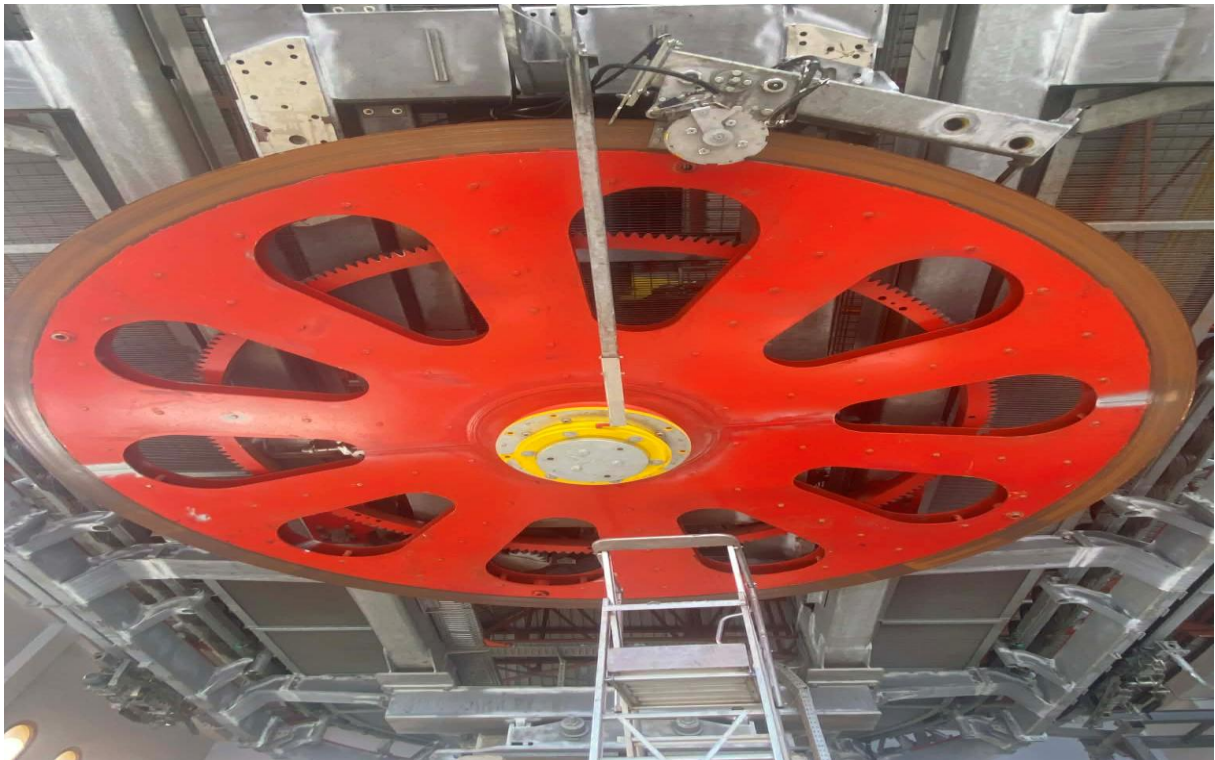


Figure 27 Poulie motrice d'une télécabine [Photo personnelle]



Figure 28 Bandage poulie motrice [9]

II.3.5 Système de freinage

Le système de freinage d'une télécabine est un système de sécurité d'une importance capitale, soumis aux exigences les plus strictes des réglementations. Il est généralement structuré en plusieurs niveaux de freinage redondants, capables d'arrêter l'installation même en cas de défaillance du système de propulsion ou de l'alimentation électrique. Les normes spécifient les performances minimales requises : décélération contrôlée permettant un arrêt confortable des passagers, couple de freinage suffisant pour maintenir l'installation à l'arrêt sur la pente maximale avec la charge nominale. [19]

Le premier niveau de freinage est le frein de service, généralement un frein à disque ou à tambour actionné hydrauliquement ou électro-hydrauliquement, agissant sur l'arbre rapide du réducteur (Figure 29). Le second niveau est le frein d'urgence (ou frein de sécurité), à déclenchement automatique (fail-safe), qui s'applique en cas de coupure de l'alimentation électrique ou de tout défaut de sécurité. Le troisième niveau est le frein de sécurité final, agissant directement sur la poulie motrice (Figure 30).

La relation entre le freinage et la tension du câble est de nature dynamique. Lors d'un arrêt, en particulier en cas de freinage d'urgence, la décélération du câble engendre des variations transitoires de la tension. Ces variations se traduisent par la propagation d'ondes mécaniques le long du câble, depuis la poulie motrice vers la poulie de renvoi. Selon les conditions d'exploitation (vitesse, masse, longueur de la ligne et système de tension), ces effets peuvent conduire à des surcharges temporaires significatives par rapport à la tension statique. La prise en compte de ces phénomènes est essentielle dans le dimensionnement, conformément aux recommandations des organismes techniques et aux normes applicables.

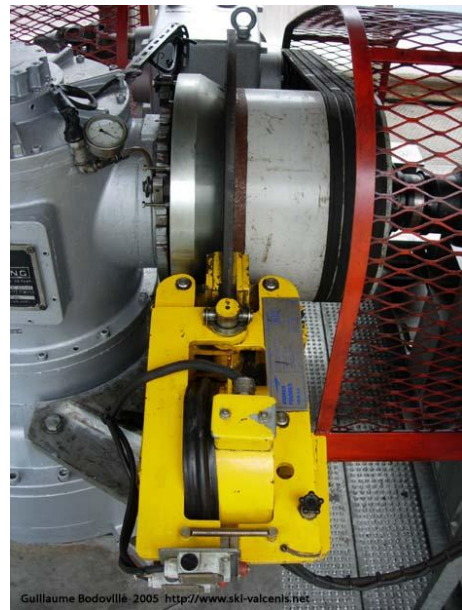


Figure 29 Frein à disque [9]



Figure 30 Système de freinage sur poulie motrice [9]

II.3.6 Système de tension de la station motrice

Le maintien d'une tension minimale dans le câble est une condition nécessaire au fonctionnement correct et sécurisé de l'installation. La tension du câble varie en fonction de la charge appliquée (nombre et répartition des cabines chargées), de la température (dilatation thermique modifiant la longueur du câble) et de l'usure (allongement progressif du câble en service). Pour compenser ces variations et maintenir la tension dans une plage acceptable, les installations sont équipées de systèmes de tension actifs ou passifs.

Le système de tension peut être implanté dans la station motrice (tension côté moteur) ou dans la station retour (tension côté renvoi), selon la configuration de l'installation. Dans les installations à tension côté moteur, la poulie motrice est montée sur un chariot coulissant dont la position est asservie à la tension mesurée dans le câble, par l'intermédiaire de vérins hydrauliques (Figure 31). Ce système permet d'ajuster en temps réel la longueur du circuit câble et donc la tension, avec une précision et une réactivité élevée.

L'alternative la plus simple, utilisée dans de nombreuses installations plus anciennes ou de moindre puissance, est le système de tension par contrepoids implanté dans la station retour. La poulie de renvoi est montée sur un chariot libre de se déplacer dans l'axe de la ligne, reposant sur un chariot dont le poids est calibré pour exercer la tension nominale sur le câble. Ce système est passif, simple et fiable, mais ne permet pas de régler dynamiquement la tension en réponse aux variations rapides de charge. [5][16]

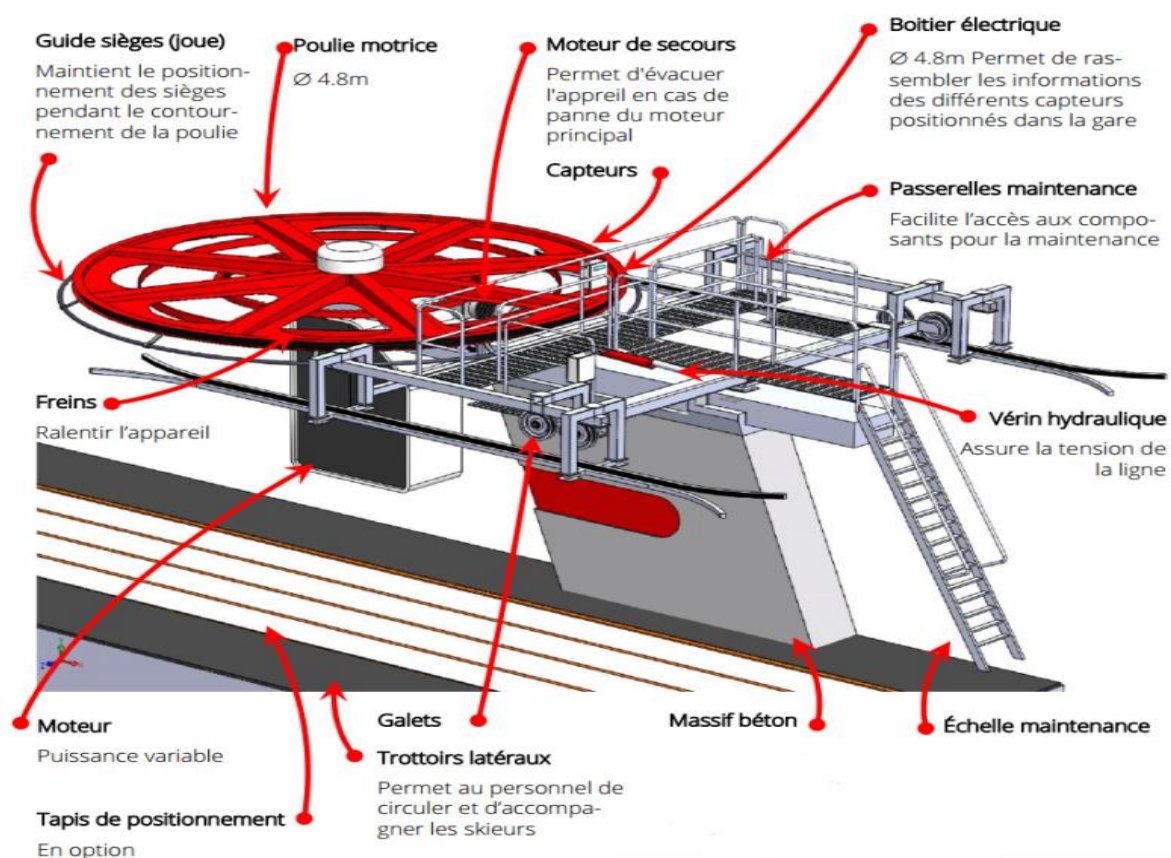


Figure 31 Schéma d'une station motrice avec système de tension hydraulique [30]



Figure 32 Station motrice de télésiège avec système de tension [30]

II.4. La station retour

II.4.1 Poulie de renvoi

La station retour abrite la poulie de renvoi, dont la fonction est de renvoyer le câble dans la direction inverse pour constituer la boucle fermée. Contrairement à la poulie motrice qui transmet un effort de traction, la poulie de renvoi est une poulie libre (folle) qui ne transmet aucun couple, elle se contente de dévier le câble de 180° . Elle tourne donc sous l'effet de la tension du câble à une vitesse angulaire déterminée par la vitesse linéaire du câble et son propre diamètre. [9]

La poulie de renvoi est généralement de diamètre comparable à celui de la poulie motrice, afin de maintenir des courbures similaires du câble et d'éviter toute dissymétrie dans les contraintes de flexion entre les deux extrémités de la ligne. Sa conception mécanique est plus simple que celle de la poulie motrice car elle ne nécessite pas de garniture de friction, mais ses paliers de roulement sont soumis à des efforts importants dus à la déflexion du câble sous tension.



Figure 33 Poulie de renvoi [Photo personnelle]

II.4.2 Système de tension de la station retour

Dans les installations où la tension du câble est assurée en station retour, la poulie de renvoi n'est pas fixée de manière rigide. Elle est montée sur un chariot mobile, appelé *lorry de tension*, dont le déplacement permet d'ajuster en permanence la longueur du câble et donc sa tension. Ce dispositif est indispensable pour compenser les variations liées à la charge, à la température ou encore aux phases transitoires de fonctionnement (démarrage, arrêt, freinage).

La poulie de renvoi joue ici un double rôle : elle assure le changement de direction du câble tout en transmettant les efforts de tension au chariot mobile. De grand diamètre, elle est conçue pour limiter la fatigue du câble et est montée sur des roulements capables de supporter des charges élevées. Sa position n'est donc pas fixe, mais évolue en fonction des besoins de tension.

Le lorry de tension (Figure 34) constitue l'élément mobile central du système. Guidé sur des rails, il supporte la poulie de renvoi et se déplace longitudinalement sous l'effet du dispositif de tension. Sa conception doit garantir à la fois robustesse, stabilité et précision de guidage, car il transmet directement les efforts au câble. Des dispositifs de sécurité (butées, anti-déraillement) sont généralement intégrés pour sécuriser son fonctionnement.



Figure 34 Une partie du lorry de tension en station retour [Photo personnelle]

Deux grandes technologies permettent de générer l'effort de tension appliqué au lorry.

La première repose sur un système à contrepoids (Figure 35). Dans ce cas, la tension est assurée par une masse suspendue reliée au chariot par un jeu de câbles et de poulies. Ce système présente l'avantage d'être simple et passif : il ne nécessite aucune alimentation énergétique et garantit une tension quasi constante. En revanche, il impose un encombrement important et offre peu de flexibilité pour ajuster la valeur de la tension.



Figure 35 Un contrepoids de tension du câble en action [31]

La seconde technologie, plus répandue dans les installations modernes, utilise des vérins hydrauliques (Figure 36). Ceux-ci exercent directement une force sur le lorry grâce à la pression d'un fluide hydraulique. La tension peut ainsi être réglée avec précision et adaptée en temps réel aux conditions d'exploitation. Cette solution permet un meilleur contrôle du comportement dynamique de l'installation, au prix d'une plus grande complexité technique.



Figure 36 Un vérin hydraulique [Photo personnelle]



Figure 37 Accouplement du lorry avec système de tension [Photo personnelle]

Le fonctionnement des vérins repose sur une centrale hydraulique (Figure 38), qui constitue la source d'énergie du système. Cette centrale regroupe les principaux organes nécessaires à la mise sous pression de l'huile (pompe, réservoir, distributeurs, soupapes de sécurité). Elle permet de contrôler la pression appliquée aux vérins, et donc la force de tension exercée sur le câble. Des dispositifs de régulation et de sécurité assurent le maintien d'une pression stable et préviennent tout dépassement des limites admissibles.



Figure 38 Centrale hydraulique [Photo personnelle]

Enfin, la mesure de la tension est généralement assurée par un axe dynamométrique (Figure 39, 40), intégré dans la chaîne d'efforts (souvent au niveau de la liaison entre le lorry et le système de tension). Équipé de capteurs de déformation, il permet de mesurer en continu la force appliquée. Ces données sont transmises au système de contrôle-commande, assurant ainsi une surveillance permanente de l'état de tension du câble et permettant de détecter toute anomalie.



Figure 39 Axe dynamométrique [Photo personnelle]

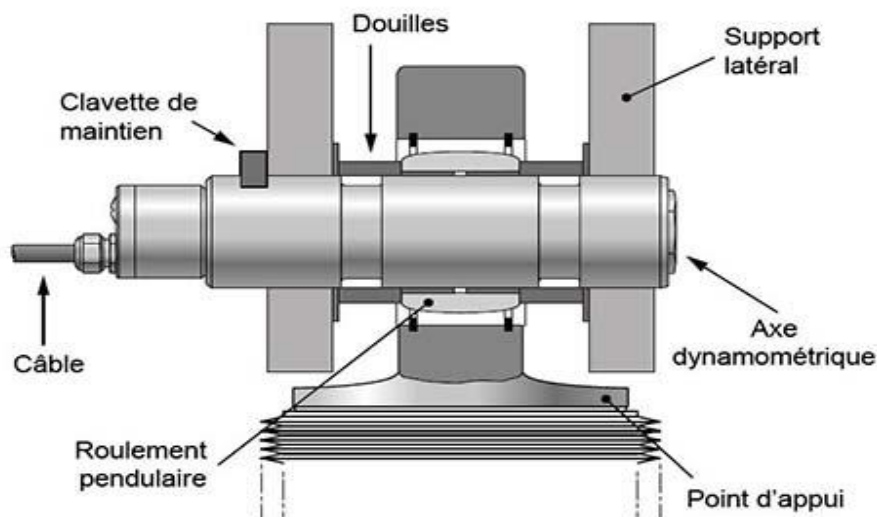


Figure 40 Montage d'un axe dynamométrique [21]

II.5. Pylônes et supports intermédiaires

II.5.1 Structure et conception mécanique des pylônes

Les pylônes constituent les supports intermédiaires du câble entre les deux stations terminales. Leur rôle est d'imposer au câble une géométrie conforme au profil de la ligne, de garantir une garde au sol suffisante sur l'ensemble du tracé, et de transmettre au sol les efforts mécaniques exercés par le câble. Ces efforts comprennent à la fois des composantes verticales, liées au poids du câble et des cabines, et des composantes horizontales associées à la tension du câble.

La conception des pylônes résulte d'un compromis entre plusieurs exigences. D'une part, ils doivent présenter une résistance mécanique suffisante pour reprendre des efforts importants et parfois variables. D'autre part, leur masse doit être maîtrisée afin de faciliter leur transport et leur montage, notamment en terrain difficile. Enfin, leur intégration paysagère constitue un critère de plus en plus important, en particulier dans les zones sensibles.

Les pylônes (Figure 41) des télécabines modernes sont généralement constitués d'un fût métallique tubulaire en acier, de section circulaire ou polygonale, ancré dans un massif en béton armé assurant la stabilité de l'ensemble. Leur hauteur peut varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres en fonction de la topographie et des contraintes de garde au sol. À leur extrémité supérieure se trouve la tête du pylône (ou potence), qui supporte les balanciers assurant le guidage du câble. [9]

Le dimensionnement des pylônes vise à optimiser la transmission des efforts en alignant autant que possible leur résultante avec l'axe du fût, afin de limiter les moments de flexion. Cela peut conduire à incliner certains pylônes en fonction du profil du terrain. La tête du pylône est spécifiquement conçue pour résister aux sollicitations combinées : tension du câble (efforts horizontaux), charges d'exploitation (efforts verticaux) et actions dynamiques telles que le vent ou les oscillations des cabines. [9]

Enfin, la mise en œuvre des pylônes requiert une grande précision. Ils sont généralement assemblés sur site à partir d'éléments préfabriqués et installés avec des moyens adaptés, parfois par hélicoptère. Leur positionnement doit être rigoureusement contrôlé afin d'assurer le bon alignement de la ligne et le fonctionnement optimal de l'installation.

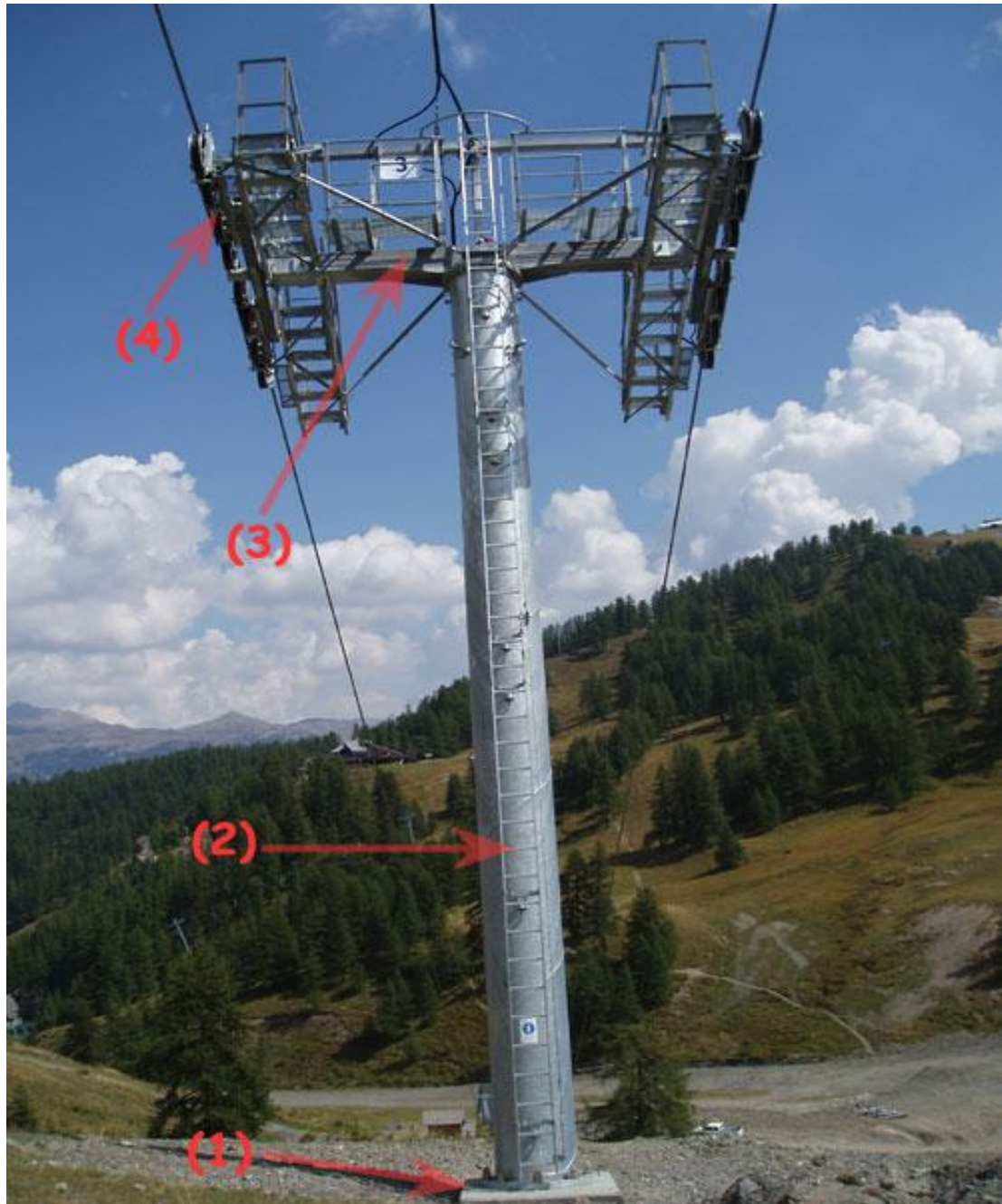


Figure 41 Un pylône [9]

-
1. Massif en béton
 2. Fût du pylône
 3. Tête du pylône (potence)
 4. Balanciers
-

II.5.2 Galets et sabots : rôle dans le guidage du câble

Les éléments assurant l'interaction directe entre le câble et le pylône sont les balanciers (Figure 42), constitués de trains de galets montés sur des axes. Ces balanciers sont généralement articulés, ce qui leur permet de s'adapter aux légères variations de direction du câble dues au vent ou aux oscillations des cabines, sans générer de contraintes excessives.

Les galets sont des organes de roulement de forme cylindrique ou légèrement bombée (profil torique), conçus pour assurer un guidage continu du câble. Leur surface est généralement revêtue d'un matériau élastomère ou en polyuréthane, offrant un compromis entre résistance à l'usure, absorption des chocs et limitation des sollicitations sur le câble. Leur disposition en modules permet d'adapter la configuration de chaque pylône aux contraintes locales du tracé. [9]

On distingue deux types principaux de galets selon leur position et leur fonction. Les galets porteurs, situés sous le câble, supportent les charges verticales dans les zones de profil convexe et contribuent à limiter son affaissement. À l'inverse, les galets presseurs, disposés au-dessus du câble, exercent un effort vers le bas dans les zones de profil concave afin de maintenir le câble en contact avec les balanciers et d'éviter tout risque de déraillement. L'alternance de ces configurations le long de la ligne permet de contrôler la géométrie du câble et d'assurer sa stabilité. [9]

En complément des galets, des dispositifs de guidage latéral appelés sabots sont installés de part et d'autre du câble. Leur rôle est de limiter les déplacements transversaux et de prévenir toute sortie du câble de son chemin de roulement. Ils constituent un élément de sécurité essentiel, car un déraillement du câble représente une défaillance critique pour l'installation. Les sabots sont dimensionnés pour résister aux efforts latéraux, notamment ceux induits par le vent et les mouvements des cabines, et font l'objet d'un suivi rigoureux lors des opérations de maintenance.

Ainsi, l'ensemble constitué par les galets et les sabots forme une interface essentielle entre le câble et la structure du pylône, garantissant à la fois le guidage, la stabilité dynamique et la sécurité de l'installation.



Figure 42 rattrape-câbles d'un balancier de galets sur un pylône support [30]

II.5.3 Transmission des charges et influence sur la tension du câble

Selon le profil de la ligne et la répartition des efforts, les pylônes remplissent différentes fonctions influençant directement le comportement mécanique du câble. Les pylônes supports (S) (Figure 43) maintiennent le câble et limitent son affaissement, tandis que les pylônes de compression (C) (Figure 44) exercent une action vers le bas afin de contrôler sa trajectoire dans les zones de rupture de pente. Certains pylônes combinent ces deux rôles (S/C) (Figure 45), permettant une adaptation fine à la géométrie du terrain. [31]

Au passage sur un pylône, le câble subit une déviation angulaire dont l'amplitude dépend du profil de la ligne et du type de pylône. Cette déviation engendre une force de réaction exercée par les galets, qui se décompose en une composante verticale (assurant le support ou le maintien du câble) et une composante horizontale modifiant localement la tension selon la direction du câble. Ainsi, chaque pylône constitue un point d'interaction mécanique influençant l'état de tension du câble.

Les efforts appliqués au câble (poids propre, charges d'exploitation et actions environnementales telles que le vent) sont transmis aux pylônes puis aux fondations. Cette transmission, combinée aux effets de déviation, influence la répartition des tensions le long de la ligne. Un défaut d'alignement ou une mauvaise conception peut entraîner des variations locales de tension, générer des vibrations et accélérer l'usure du câble.

Par ailleurs, le contact entre le câble et les galets engendre des pertes de tension dues au frottement. Ce phénomène dépend du coefficient de frottement entre les matériaux, de la force normale exercée au point de contact (elle-même liée à la tension du câble et à l'angle de déviation) ainsi que de la géométrie locale de la ligne.

Les pylônes intègrent également des dispositifs de sécurité, tels que des systèmes de détection de déraillement, des mécanismes de rattrapage du câble et des liaisons vers le système de contrôle-commande. Ces équipements permettent une surveillance continue de l'installation et participent activement à la sécurité de fonctionnement (Figure 46).

Ainsi, les pylônes ne se limitent pas à un rôle de support : ils interviennent directement dans la transmission des efforts, la répartition des tensions et le comportement dynamique du câble. Leur conception et leur alignement sont donc déterminants pour la performance globale et la sécurité de l'installation.



Figure 43 Pylône support (12S) [31]



Figure 44 Pylône compression (12C) [31]



Figure 45 Pylône (4S/C) [9]



Figure 46 Capteur de déraillement (la double tige rouge) [9]

II.6. Les câbles des téléphériques

Le câble constitue l'élément central et le plus critique d'une installation de transport par câble. Il assure simultanément plusieurs fonctions essentielles : la liaison mécanique entre les stations et les véhicules, la transmission de l'effort de traction, ainsi que le support des charges liées au poids des cabines et des passagers. En raison de son rôle déterminant dans la sécurité et le fonctionnement de l'installation, sa conception, sa fabrication et son exploitation sont encadrées par une réglementation stricte, notamment les normes **EN 12385-9** (câbles pour installations à câbles) et **EN 13796** (exigences relatives aux composants des remontées mécaniques).

Les câbles utilisés dans ce domaine sont fabriqués à partir d'aciers de haute qualité, offrant une combinaison optimale de résistance mécanique, de flexibilité et de durabilité. Ils doivent également présenter une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, compte tenu des sollicitations répétées et des conditions environnementales parfois sévères. Le secteur de fabrication de ces câbles est relativement spécialisé et dominé par un nombre limité d'industriels disposant d'un savoir-faire avancé en métallurgie et en procédés de fabrication.

Du point de vue constructif, un câble est constitué de torons eux-mêmes formés de fils métalliques enroulés selon une géométrie précise. On distingue principalement deux types de câblage selon l'orientation relative des fils et des torons. Dans un câble de type *Lang*, les fils sont torsadés dans le même sens que les torons, ce qui confère au câble une meilleure résistance à l'usure et une plus grande flexibilité. À l'inverse, dans un câble à câblage croisé, les fils sont enroulés en sens opposé à celui des torons, ce qui améliore la stabilité géométrique du câble et limite les phénomènes de rotation. [15]

Ainsi, le choix du type de câble et de sa structure résulte d'un compromis entre exigences mécaniques, conditions d'exploitation et contraintes de durabilité, et constitue un paramètre déterminant dans la performance globale de l'installation.

II.6.1 Câble porteur

Le câble porteur est un câble fixe, ancré aux deux extrémités de la ligne, dont la fonction exclusive est de supporter le poids des véhicules. Il n'est soumis qu'à des efforts statiques de traction, sans sollicitation de traction-rotation ou de flexion dynamique liée au défilement. Cette simplicité de sollicitation permet d'utiliser des câbles de haute résistance à fils parallèles ou à torons clos, optimisés pour la résistance à la tension directe et la durabilité en conditions environnementales sévères.

Les câbles porteurs sont généralement de type clos (ou locked-coil), constitués d'une âme centrale ronde entourée de plusieurs couches de fils profilés en Z ou en T (Figure 47) s'imbriquant les uns dans les autres pour former une surface externe lisse et hermétique. Cette construction assure une excellente résistance à l'infiltration d'eau et à la corrosion, une surface de contact lisse avec les galets de déplacement des véhicules (minimisant l'usure), et un module de Young élevé (raideur axiale importante). Les câbles porteurs à fils fermés présentent des diamètres typiques de 40 à 80 mm et des résistances à la rupture pouvant dépasser 10 000 kN pour les grandes installations. [15]

La tension régnant dans un câble porteur varie peu au cours de l'exploitation (les véhicules se déplaçant le long du câble sans modifier sa longueur globale), mais elle est affectée par les

variations de température (dilatation thermique) et par le fluage à long terme. Des calculs précis de la tension à vide et en charge, en tenant compte de la déflexion sous poids propre et sous charges mobiles, sont nécessaires pour le dimensionnement et la vérification réglementaire.

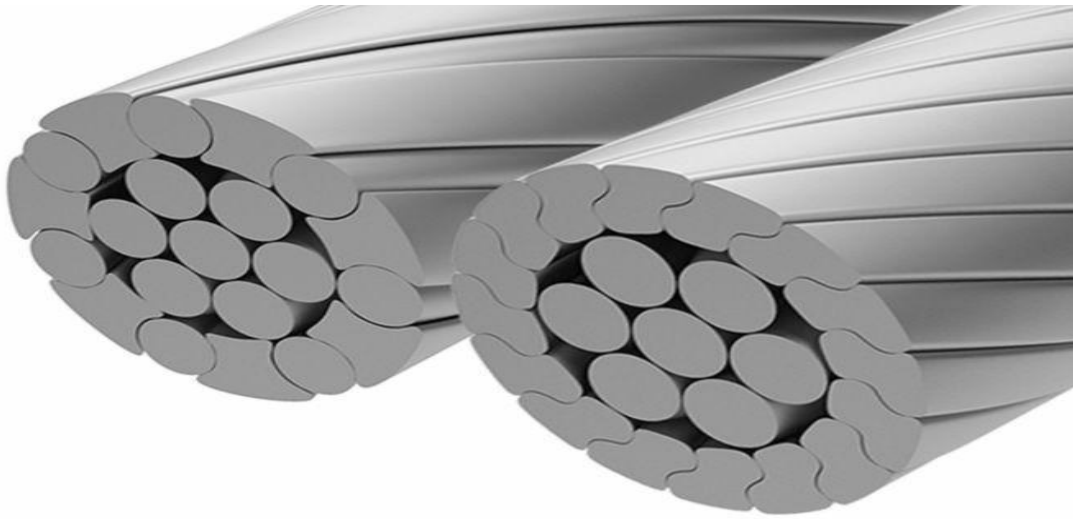


Figure 47 Câbles à torons parallèles (locked coil) [36]

II.6.2 Câble tracteur

Le câble tracteur est le câble mobile qui assure la propulsion des véhicules. En circulation continue, il est soumis à un régime de sollicitation mécanique complexe : traction directe (due aux forces motrices et aux poids des cabines chargées), flexion répétée à chaque passage sur les galets et les poulies, et torsion lors des déviations de direction. La combinaison de ces sollicitations crée un état de contrainte multiaxial conduisant à un mécanisme de fatigue de contact inter-torons (fretting fatigue) particulièrement sévère.

Les câbles tracteurs (Figure 48) sont généralement de construction à torons croisés, et sont composés d'un unique fil au centre appelé âme centrale qui peut être en plastique ou en matière textile. Cette âme en acier ou en plastique (polypropylène ou polyuréthane) qui absorbe une partie des efforts d'écrasement lors des contacts avec les galets. Elle est en général soit un assemblage de plusieurs torons, soit des âmes textiles. La matière choisie dépend des contraintes de l'appareil qui va être équipé du câble. Les câbles tracteurs sont imprégnés de lubrifiant de construction (graisse pénétrante entre les fils) et nécessitent un regraissage externe périodique pour reconstituer le film protecteur sur leur surface. [15]

Le diamètre des câbles tracteurs varie généralement de 40 à 60 mm pour les télécabines, pour une résistance à la rupture de 3 000 à 6 000 kN. La tension de service représente typiquement 15 à 25 % de la charge de rupture, conformément aux prescriptions réglementaires imposant des coefficients de sécurité minimaux. Ce rapport, appelé facteur de sécurité du câble, est vérifié lors de chaque inspection et constitue l'un des critères de décision de remplacement du câble. [15]

II.6.3 Câble porteur-tracteur

Le câble porteur-tracteur, utilisé dans les installations monocâbles (dont font partie la plupart des télécabines modernes), cumule les fonctions de portage et de traction. C'est la solution la plus économique (un seul câble au lieu de deux) mais aussi la plus exigeante sur le plan mécanique, car le câble doit présenter simultanément une bonne résistance à la traction directe (pour le portage) et une bonne flexibilité (pour les déviations sur les nombreux galets de pylônes et les poulies de station).

Les câbles porteurs-tracteurs pour télécabines sont généralement de la même nature avec les câbles tracteurs. [15]

La tension dans le câble porteur-tracteur est particulièrement critique car elle conditionne simultanément le guidage des cabines (une tension insuffisante entraîne une flèche excessive pouvant conduire au contact entre câble et sol ou obstacles), la capacité de traction, et l'état de contrainte dans les fils (une tension excessive accélère la fatigue). La détermination et la surveillance de cette tension constituent précisément l'objet des calculs développés dans le chapitre suivant.

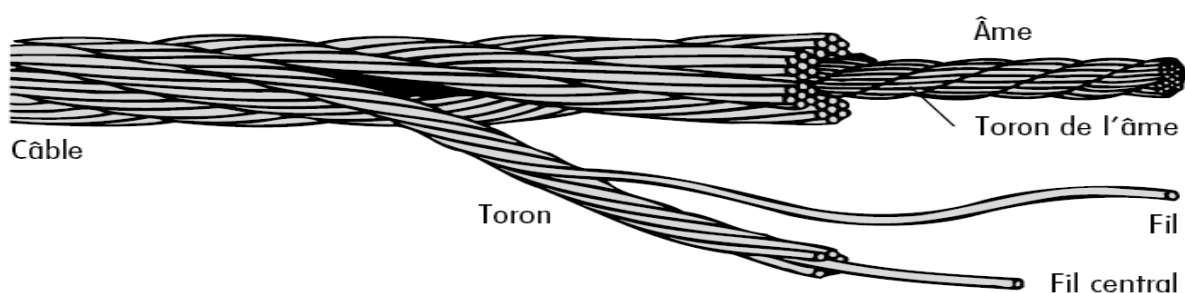


Figure 48 Câble à torons croisés [37]

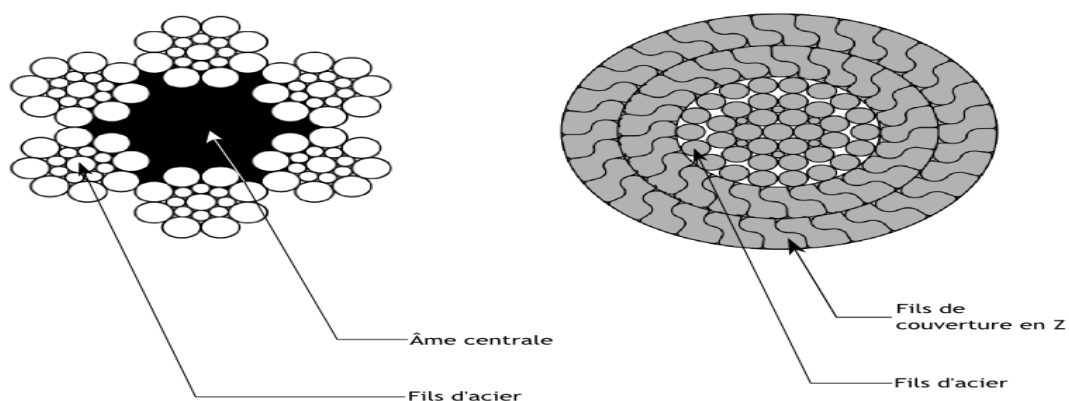


Figure 49 Comparaison des câbles [38]

II.7. Épissurage du câble

L'épissurage constitue l'une des opérations les plus critiques et les plus exigeantes du cycle de vie d'une installation de transport par câble. Qualifié par les professionnels du secteur de véritable « art technique », **l'épissurage désigne le procédé d'assemblage manuel des deux extrémités d'un même câble afin de constituer une boucle sans fin**, support de circulation des véhicules (sièges, cabines, suspentes). Cette opération, non automatisable à ce jour, ne peut être confiée qu'à des techniciens spécialisés, dénommés « épisseurs », qui en maîtrisent l'intégralité des phases (Figure 50). [20]



Figure 50 Réalisation d'une épissure de câble d'une remontée mécanique [20]

II.7.1 Définition et caractérisation technique

L'épissure (*splicing* en anglais) est définie comme l'assemblage de deux extrémités d'un même câble par entrelacement des torons qui le composent, de manière à former une boucle continue sans augmentation sensible du diamètre nominal. Le câble d'une remontée mécanique est un ouvrage mécanique composé de plusieurs *torons* « eux-mêmes constitués de fils d'acier toronnés en hélice » enroulés autour d'une âme centrale en plastique. L'épissurage exploite cette architecture pour assembler les deux extrémités par tressage toron-à-toron, sans élément de jonction mécanique externe. [20]

La réglementation impose des contraintes dimensionnelles strictes. Conformément aux prescriptions du STRMTG, **la longueur de l'épissure doit être égale ou supérieure à 1 200 fois le diamètre nominal du câble**. À titre illustratif, pour un télésiège équipé d'un câble de 46 mm de diamètre, la zone d'épissure s'étend sur une longueur de 55 mètres (Station de

Métabief, 2022). De plus, le diamètre du câble au niveau de la zone assemblée ne doit pas excéder 10 % du diamètre nominal, afin de garantir le passage des pinces et des systèmes d'attaches débrayables. [20]

II.7.2 Contextes de réalisation

L'épissure intervient dans trois situations principales :

- Mise en service d'une nouvelle installation : formation de la boucle de câble initiale lors du montage de l'appareil.
- Remplacement du câble : remplacement intégral en cours d'exploitation en raison de l'usure ou de l'atténuation magnétique détectée lors des contrôles périodiques.
- Raccourcissement du câble : correction de l'allongement dû au fluage mécanique après plusieurs saisons d'exploitation. La procédure diffère légèrement mais repose sur les mêmes principes fondamentaux.

II.7.3 Déroulement opérationnel : Étapes chronologiques

Étape 1 : Déroulage et préparation du câble

Le câble, acheminé sur le chantier sur des bobines pouvant peser plusieurs tonnes, est déroulé intégralement le long de la ligne, entre la gare amont et la gare aval. Les deux extrémités libres sont positionnées côte à côte à hauteur de la future zone d'assemblage. Les techniciens procèdent ensuite au détoronnage des torons sur une longueur équivalente à la moitié de la longueur d'épissure souhaitée, à partir de chaque extrémité.

Étape 2 : Le mariage des extrémités

Le « mariage » constitue la phase d'imbrication des deux extrémités du câble. Les torons de l'une sont substitués par les torons de l'autre, de sorte qu'il ne reste plus qu'un seul câble continu. **La continuité du diamètre à ce point est impérative** : toute variation perceptible à la vue ou au toucher constitue un défaut de réalisation susceptible de gêner le passage des pinces. Plusieurs techniques de mariage existent selon le fabricant et la constitution du câble : mariage alterné, mariage 3×3 puis alterné (cas le plus fréquent pour les câbles à 6 torons).

Étape 3 : Confection des nœuds

Il s'agit de l'étape la plus délicate. À des intervalles prédéfinis le long de l'épissure, l'épisseur retire l'âme plastique sur quelques mètres et y insère, à l'aide d'épissoirs (aiguilles spécifiques), deux torons destinés à former un « nœud ». Ces torons doivent préalablement avoir été redressés et calibrés pour avoir exactement le même diamètre que l'âme. *Le nœud croisé est la technique aujourd'hui dominante dans le transport par câble*, car il assure un meilleur verrouillage mécanique sous haute tension. La numérotation des nœuds, typiquement 1-5-3-6-2-4 pour un câble à 6 torons, garantit une distribution uniforme des efforts.

Étape 4 : Mise en tension et contrôle

Une fois la confection des nœuds achevée, le câble est progressivement remis sous tension. L'épisseur vérifie la géométrie générale de la zone d'épissure, ainsi que le respect des tolérances de diamètre (minimum et maximum). Le câble est ensuite positionné sur les galets des balanciers et la boucle est mise en mouvement.

II.7.4 Phase de détensionnement et contrôle réglementaire

Les opérations de déroulage et d'épissurage induisent des contraintes mécaniques résiduelles (manipulation, vrillage, déformations locales). Pour les absorber, **une opération de détensionnement est obligatoire** : le câble nu (sans véhicule attaché) est mis en mouvement à la vitesse nominale pendant une durée comprise entre 10 et 25 heures, selon les préconisations du fabricant et les caractéristiques de l'installation. [20]

En complément, un organisme habilité (indépendant de l'exploitant) réalise un contrôle de réception comprenant notamment une magnétographie du câble. Cet examen non destructif permet de détecter d'éventuels défauts (ruptures de fils, y compris internes) sur l'ensemble de la boucle. C'est le résultat de ce contrôle qui conditionne l'autorisation d'exploitation de l'installation en toute sécurité.

II.7.5 Synthèse : Enjeux et place dans le cycle de maintenance

L'épissurage occupe une position stratégique dans le cycle de vie d'une remontée mécanique : opération fondatrice lors de la mise en service, elle est susceptible d'intervenir à plusieurs reprises au cours de la durée d'exploitation de l'appareil. Sa réalisation conditionne directement la fiabilité mécanique du système et la sécurité des usagers.

La maîtrise de cette opération, entièrement manuelle et fortement dépendante du savoir-faire humain, justifie **la formation spécialisée des épisseurs et la normalisation rigoureuse de leur intervention**, encadrée par les fascicules techniques de la norme. Elle illustre, en ce sens, la singularité du transport par câble parmi les systèmes de transport guidés : une technologie à haute performance dont certaines étapes clés restent irréductiblement humaines.

II.8. Interaction mécanique globale et lien avec les calculs de tension

II.8.1 Répartition des efforts le long de la ligne

La distribution de la tension dans le câble d'une télécabine en service est le résultat d'un équilibre mécanique complexe impliquant l'ensemble des composants de l'installation. En régime permanent, la tension varie continûment le long du câble en fonction des charges appliquées (poids des cabines et des passagers) et des pertes par frottement sur les galets et les poulies. La tension maximale se produit généralement dans le brin montant, en aval de la poulie

motrice, là où la somme des poids des cabines chargées et des efforts de traction est la plus grande. [14]

La méthode classique de calcul de la tension repose sur la modélisation du câble comme un système flexible soumis à des charges réparties (poids propre) et concentrées (poids des cabines), conduisant à une résolution analytique de type chaînette entre appuis successifs. Cette approche permet de déterminer la tension et la flèche du câble le long de la ligne.

Dans une première approximation, le câble est considéré comme inextensible, mais l'introduction de son élasticité (module de Young) et des effets thermiques permet d'améliorer la précision du modèle au prix d'une complexité accrue.

Des méthodes numériques plus avancées, telles que la relaxation dynamique, permettent de s'affranchir des limitations analytiques en simulant le comportement global du câble jusqu'à l'équilibre, en intégrant naturellement les effets non linéaires et l'extensibilité.

II.8.2 Lien avec les paramètres de conception

La tension du câble est intimement liée aux paramètres géométriques de la ligne : une ligne à forte pente impose une tension plus élevée qu'une ligne quasi-horizontale, à charge utile identique. L'écartement entre pylônes détermine la flèche du câble entre appuis et donc la composante verticale des forces aux appuis, ce qui influence la tension par l'intermédiaire des conditions d'équilibre à chaque pylône. Le profil de la ligne (succession des pylônes de compression et de traction) définit la topologie de la chaîne d'appuis et le signe des forces de réaction. [14]

Les calculs de tension développés dans le chapitre suivant s'inscrivent dans ce cadre d'analyse mécanique globale. Ils visent à déterminer les tensions nominales en régime permanent pour différentes configurations de charge, à évaluer les tensions dynamiques lors des phases transitoires (démarrage, freinage, oscillations des cabines), et à vérifier que les tensions calculées respectent les contraintes réglementaires d'une part et les limites de résistance du câble d'autre part (facteur de sécurité minimum vis-à-vis de la charge de rupture).

II.9. Conclusion

Ce second chapitre a présenté une description détaillée des composants et du fonctionnement d'une installation de télécabine, avec un accent particulier sur les mécanismes qui gouvernent la tension du câble. Nous avons montré que la tension du câble est un paramètre transversal qui implique l'ensemble des composants de l'installation : la poulie motrice et sa condition d'adhérence, le système de tension assurant la mise en tension initiale et la compensation des variations, les pylônes qui modifient la répartition de la tension par leurs réactions et leurs frottements, et l'épissure qui constitue le point critique de la continuité du câble.

La description approfondie des différents types de câbles (porteur, tracteur et porteur-tracteur) a permis de situer les câbles de télécabines dans le contexte plus général de la mécanique des câbles, en soulignant les spécificités de sollicitation et les caractéristiques mécaniques qui conditionnent leur dimensionnement et leur surveillance. La section consacrée à l'épissurage a

détaillé une opération souvent méconnue mais pourtant critique pour la continuité de service et la sécurité de l'installation.

L'ensemble de ces éléments constitue le cadre de référence nécessaire à la compréhension et à l'interprétation des calculs de tension développés dans le chapitre suivant. Les modèles mécaniques présentés dans ce mémoire s'appuient sur les paramètres géométriques et mécaniques des composants décrits ici, et leurs résultats doivent être analysés en relation avec les exigences de maintenance et de sécurité exposées dans ces deux chapitres précédents.

Chapitre III :
Modélisation et étude de la
tension du câble porteur-tracteur
d'une télécabine

III.1. Introduction et contexte de l'étude

III.1.1 Contexte industriel et enjeux du dimensionnement

Les installations de transport par câble aérien, et plus particulièrement les télécabines monocâbles à pinces débrayables, constituent un mode de transport de masse aux performances élevées dans les environnements montagneux. Une télécabine moderne peut transporter plusieurs milliers de personnes par heure, en reliant des stations situées à des altitudes pouvant dépasser 3 000 m, avec des portées entre pylônes pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.

Dans ce contexte, le câble porteur-tracteur joue un rôle central : il supporte simultanément le poids des cabines (et de leurs occupants) et transmet la force de traction qui met en mouvement l'ensemble du convoi. Toute défaillance du câble, ou de son système de tension, peut avoir des conséquences catastrophiques pour la sécurité des usagers. C'est pourquoi la réglementation impose un cadre de calcul particulièrement rigoureux, formalisé dans la série de normes NF EN 12927 à NF EN 13107.

La tension du câble constitue le paramètre fondamental du dimensionnement. Trop faible, elle entraîne un soulèvement du câble au niveau des galets de pylône, une perte d'adhérence sur la poulie motrice et des déviations latérales excessives sous l'effet du vent, autant de phénomènes dangereux. Trop élevée, elle accélère la fatigue du câble, augmente les charges sur les structures de génie civil et peut conduire à la rupture dans les cas extrêmes. Déterminer la plage de tension admissible ainsi que les cas de charge critiques constitue donc l'objectif principal de l'ingénieur de bureau d'études spécialisé dans les installations à câbles.

III.1.2 Objectifs

Le présent chapitre vise à :

- **Modéliser mécaniquement** le câble porteur-tracteur à partir de la théorie de la chaînette, en dérivant l'équation différentielle du câble et en établissant les formules de calcul de la flèche et de la tension.
- **Quantifier les charges mécaniques** agissant sur le câble : poids propre, charges d'exploitation (véhicules et usagers), effets dynamiques au démarrage et au freinage.
- **Analyser les effets environnementaux** : action du vent (force transversale, déviation latérale, oscillations longitudinales des véhicules), action du givre (charge supplémentaire, diamètre effectif augmenté), effets thermiques (variation de la tension et de la flèche).
- **Vérifier les coefficients de sécurité réglementaires** : sécurité à la traction, sécurité à la flexion, charges d'appui minimales sur les pylônes.
- **Identifier les cas de charge critiques** et formuler des recommandations constructives pour le choix du câble et du dispositif de mise en tension.

III.1.3 Présentation du système étudié

L'installation de référence est une télécabine monocâble à pinces débrayables, dont les caractéristiques géométriques et mécaniques constituent les données d'entrée du calcul. Le tableau suivant récapitule les paramètres de l'installation.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité	Source / Justification
Longueur de la portée maximale	L	750	m	Hypothèse
Dénivelée de la portée étudiée	Δh	210	m	Hypothèse
Inclinaison moyenne de la corde	β	15,7	deg	Calcule : $\arctan(210/750)$
Flèche nominale cible (verticale)	h	35	m	Hypothèse : $h/L = 4,7 \%$
Diamètre nominal du câble P-T	d	48	mm	Hypothèse : câble clos d48
Masse linéique du câble	μ_c	8,30	kg/m	Hypothèse : catalog. fabricant
Module d'élasticité du câble	E	100	kN/mm ²	NF EN 12 930 §5.2
Section nominale du câble	A	1 288	mm ²	Calcule : $\pi/4 * 48^2 * 0,72$
Masse d'un véhicule (cabine vide)	M_v	800	kg	Hypothèse : télécabine 6 places
Capacité nominale	n_{pers}	6	pers.	Hypothèse
Masse par passager + équipement	m_{pers}	80	kg	NF EN 12 930 (sports d'hiver)
Espacement entre véhicules	e_v	80	m	Hypothèse : débit 900 pers/h
Vitesse nominale du câble	V_c	5,0	m/s	Hypothèse
Altitude du site de calcul	h_{alt}	1900	m	Hypothèse

Tableau 1 Données de l'installation de référence.

III.2. Cadre normatif et réglementaire

III.2.1 Corpus normatif applicable

La conception et le dimensionnement des câbles de télécabines en France relèvent d'un corpus normatif européen harmonisé, complété par des prescriptions nationales. Les textes fondamentaux sont :

Reference	Titre	Domaine couvert
NF EN 12 927:2019	Exigences relatives aux câbles	Propriétés, essais, charge de rupture minimale
NF EN 12 930:2015	Calculs	Calcul de ligne, tension, flèche, adhérence, puissance
NF EN 13 107:2015	Ouvrages de génie civil	Pylônes, fondations, sabots, ancrages
NF EN 1907:2017	Terminologie	Définitions normalisées câbles et installations
NF EN 12 385-1/2:2008	Câbles en acier -Sécurité	Charge de rupture minimale, construction des câbles
Guide technique STRMTG	Prescriptions nationales FR	Précisions et exigences complémentaires nationales
Eurocodes EN 1990-1999	Bases de calcul des structures	Combinaisons d'actions, coefficients partiels

Tableau 2 Corpus normatif applicable au dimensionnement des câbles de télécabines.

III.2.2 Principes généraux de calcul (NF EN 12 930:2015)

La norme NF EN 12 930:2015 stipule que les calculs de câbles doivent être menés en tenant compte des conditions dans lesquelles il est prévu d'exploiter l'installation. Plusieurs principes fondamentaux gouvernent la méthode :

III.2.2.1 Distinction des états limites de service

Trois états de fonctionnement sont distingués, chacun associé à des combinaisons de charges et des coefficients de sécurité spécifiques :

- **En exploitation** : installation en service, véhicules chargés, vent en exploitation ($q \geq 0,25 \text{ kN/m}^2$). C'est généralement le cas déterminant pour la tension maximale.
- **Cas accidentel** : déclenchement du frein de chariot, rupture d'un câble tracteur (pour les bi-câbles), ou accrochage d'un véhicule à un obstacle.
- **Hors exploitation** : installation à l'arrêt, câble nu ou avec véhicules non occupés, vent hors exploitation ($q \geq 1,20 \text{ kN/m}^2$), possibilité de givre important.

III.2.2.2 Effets à prendre systématiquement en compte

La norme impose explicitement de considérer :

- La résistance de frottement du dispositif de mise en tension ($\pm 3 \%$ de T si négligeable).
- La variation de température d'au moins $\Delta T = \pm 60 \text{ degC}$, réduit à $\pm 30 \text{ degC}$ en cas de dispositif de régulation de tension.
- Les effets du vent et du givre lors que leur influence sur T dépasse $\pm 3 \%$.
- Les effets dynamiques au démarrage (accélération minimale $0,15 \text{ m/s}^2$) et au freinage moteur (décélération minimale $0,4 \text{ m/s}^2$).
- L'allongement permanent du câble : 1,5 pour mille pour les câbles porteurs-tracteurs.

III.2.3 Définition réglementaire de la sécurité à la traction

La sécurité à la traction S est définie par la norme NF EN 1907:2017 comme le rapport entre la charge de rupture minimale F_{min} du câble (tabulée par le fabricant selon NF EN 12 385) et la force de tension calculée T dans le cas de charge considéré :

$$S = \frac{F_{min}}{T} \quad (\text{III},1)$$

La sécurité minimale S_{min} réglementaire varie selon le type de câble et l'état de fonctionnement. Le tableau ci-dessous synthèse les valeurs applicables au câble porteur-tracteur de télécabine monocâble :

Etat de fonctionnement	Cas	S_{min} réglementaire
En exploitation	Mouvement uniforme	$S_{min} \geq 4,0$
En exploitation	Epissures	$S_{max} \leq 20$ (limitation de S_{max})
Hors exploitation	Vent + givre	$S_{min} \geq 2,25$

Tableau 3 Valeurs réglementaires de sécurité à la traction (câble porteur-tracteur)

III.3. Modélisation mécanique du câble - Théorie de la chaînette

III.3.1 Hypothèses fondamentales et leur justification physique

La modélisation d'un câble de télécabine repose sur un ensemble d'hypothèses, dont la validité doit être justifiée au regard des ordres de grandeur physiques mis en jeu.

Hypothèse	Enonce	Justification physique et quantitative
H1	Rigidité en flexion nulle	Le câble est un fil parfaitement flexible. Condition vérifiée car $D/d \geq 80$ (NF EN 12 930), ce qui implique une courbure si faible que le moment fléchi reste négligeable devant la tension T .
H2	Câble inextensible en 1 ^{er} approx.	La déformation axiale $\varepsilon = T/(EA) \sim 1\,000\,000 / (100\,000 * 1288) \sim 0,008\%$ reste inférieure à 0,5 pour mille. La forme géométrique est calculée sur la longueur initiale.
H3	Charge linéique uniforme	Le poids propre du câble $q_c = \mu_c * g$ est constant et réparti uniformément. Les charges de véhicules sont introduites ensuite comme charges concentrées ou linéarisées.
H4	Régime quasi-statique	Les effets dynamiques (démarrage, freinage) sont traités par des majorations forfaitaires normatives, non par une analyse temporelle complète.
H5	Vent horizontal et transversal	L'action du vent est prise perpendiculairement au plan vertical du câble, ce qui définit le cas le plus défavorable pour la déviation latérale.

Tableau 4 Hypothèses de modélisation et leur justification physique.

III.3.2 Dérivation de l'équation différentielle du câble

III.3.2.1 Equilibre d'un élément infinitésimal

Considérons un élément infinitésimal de câble de longueur curviligne ds , située entre les abscisses x et $x + dx$. Cet élément est soumis :

- À son poids propre $dP = q_{total} * dx$ (ou q_{total} est la charge linéique par unité de longueur horizontale projetée, en N/m) ;
- À la tension $T(x)$ en son extrémité aval, dirigée selon la tangente au câble ;
- À la tension $T(x+dx)$ en son extrémité amont, dirigée selon la tangente au câble.

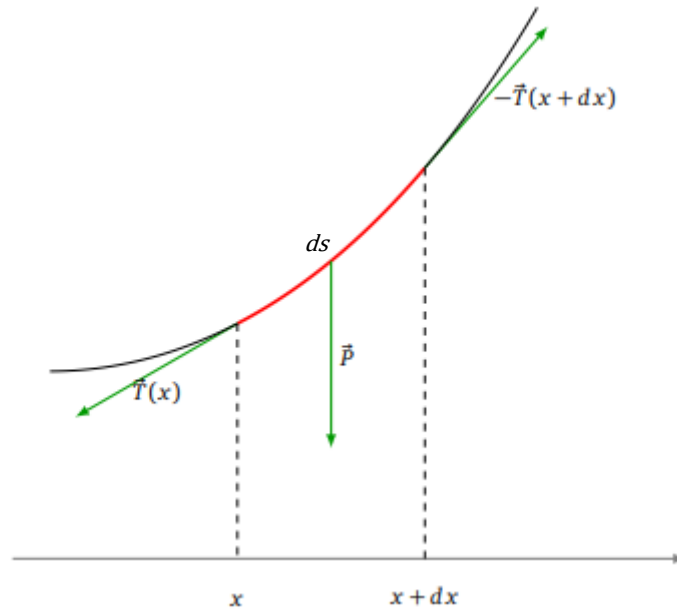


Schéma de l'équilibre statique d'un élément infinitésimal du câble

L'équilibre statique de cet élément dans les directions horizontale et verticale donne respectivement :

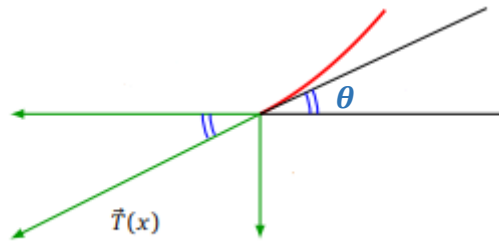


Schéma de la décomposition de la tension du câble selon les directions horizontales et verticale

$$\frac{d}{dx} [T * \cos(\theta)] = 0 \quad (\text{III},2)$$

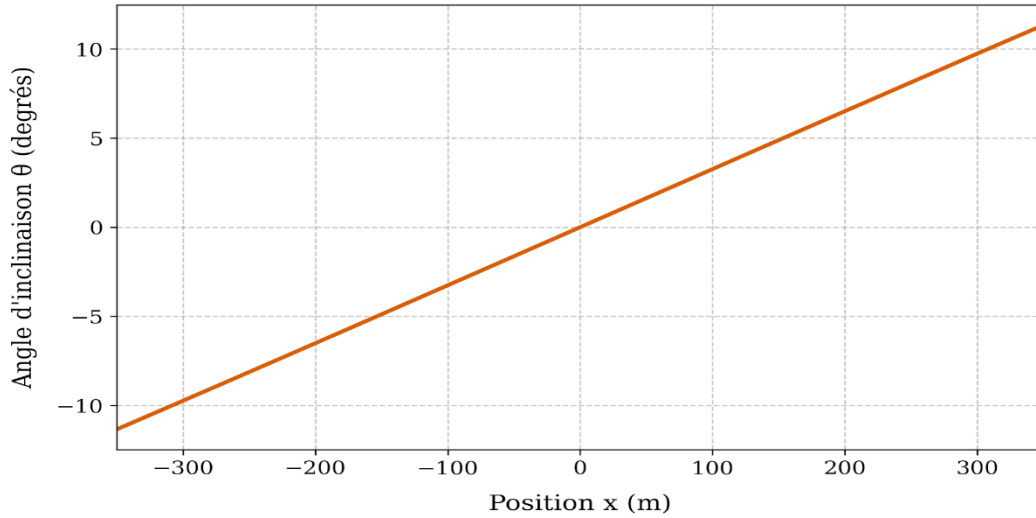
$$\frac{d}{dx} [T * \sin(\theta)] = q_{total} \quad (\text{III},3)$$

L'équation 2 exprime que la composante horizontale de la tension est constante tout le long du câble :

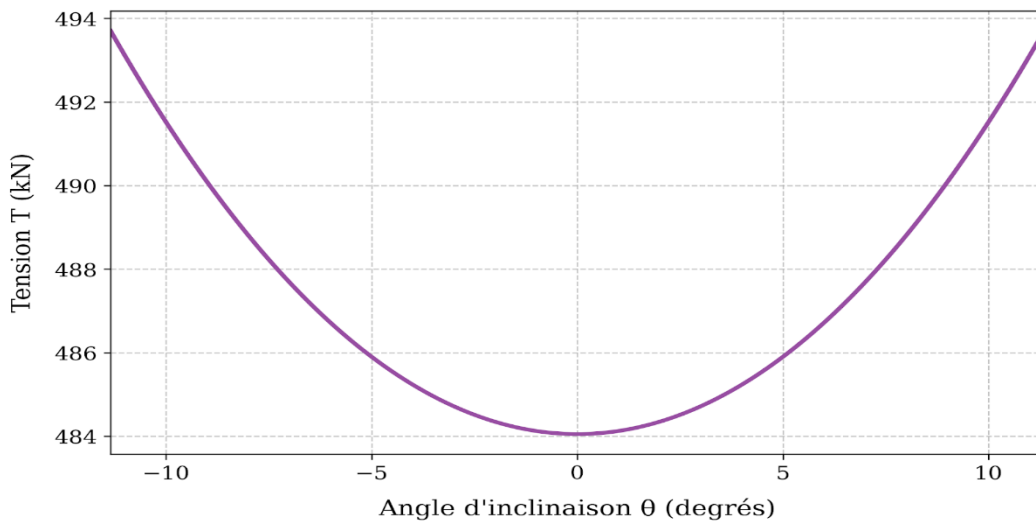
$$T * \cos(\theta) = T_h = \text{constante} \quad (\text{III},4)$$

Ce résultat fondamental (indépendant de la forme du câble) découle directement de l'absence de forces horizontales appliquées distribuées sur le câble. Il implique que la tension T est

minimale au point le plus bas du câble (là où $\theta = 0$ et $T = T_h$) et maximale aux extrémités d'appui (là où $|\theta|$ est maximal) comme montré dans les graphes suivants.



GRAPHE 1 : L'angle d'inclinaison en fonction de la position



GRAPHE 2 : La tension en fonction de l'angle de l'inclinaison

L'équation (III,3), intégrée entre θ et x , donne la composante verticale :

$$T_v(x) = T * \sin(\theta) = q_{total} * x + T_v(0) \quad (III,5)$$

Par symétrie dans le cas d'appuis à même hauteur, $T_v(0) = 0$, ce qui donne :

$$\tan(\theta(x)) = \frac{T_v(x)}{T_h} = \frac{(q_{total} * x)}{T_h} \quad (III,6)$$

III.3.2.2 Equation différentielle de la déformée

En utilisant la relation géométrique

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta) \quad (\text{III},7)$$

Et la propriété

$$ds = \frac{dx}{\cos(\theta)} = dx * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)} \quad (\text{III},8)$$

On obtient l'équation différentielle exacte du câble :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \left(\frac{q_{total}}{T_h}\right) * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)} \quad (\text{III},9)$$

Posons le paramètre de la chaînette :

$$a = \frac{T_h}{q_{total}} \quad (\text{III},10)$$

L'équation (III,9) devient :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \left(\frac{1}{a}\right) * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)} \quad (\text{III},11)$$

Cette équation non-linéaire admet la solution exacte en fonction hyperbolique cosinus, d'où le nom de chaînette (catenary en anglais) :

$$y(x) = a * \cosh\left(\frac{x}{a}\right) + c \quad (\text{III},12)$$

III.3.3 Solution analytique : cas d'appuis à la même hauteur

III.3.3.1 Expression de la flèche

En plaçant l'origine au point le plus bas du câble, la constante d'intégration s'annule ($y(0) = a$). Pour une portée de demi-longueur l (portée totale $L = 2l$), les appuis sont en ($x = \pm l$). La flèche h est la différence de hauteur entre l'appui et le point le plus bas :

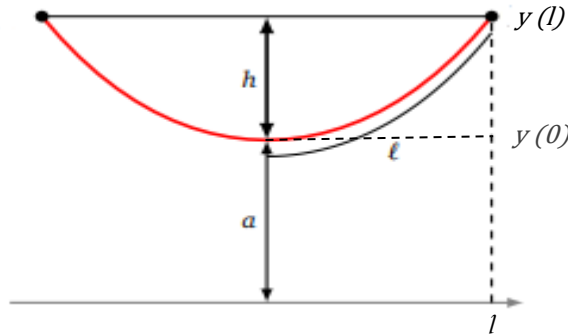


Schéma de la géométrie de la chaînette et définition de la flèche h

$$h = y(l) - y(0) = a * \cosh\left(\frac{l}{a}\right) - a = a * \left[\cosh\left(\frac{l}{a}\right) - 1 \right] \quad (\text{III},13)$$

Cette expression exacte peut être développée en série de Taylor pour $h/l \ll 1$ (approximation parabolique) :

$$\cosh\left(\frac{l}{a}\right) = 1 + \frac{\left(\frac{l}{a}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{l}{a}\right)^4}{24} + \dots \quad (\text{III},14)$$

$$h \approx \frac{l^2}{2a} \quad (\text{III},15)$$

$$\left(\text{valide pour } \frac{h}{l} < 15 \% \right)$$

L'approximation parabolique, largement utilisée en bureau d'études, conduit à la relation inverse :

$$a \approx \frac{l^2}{2h} \implies T_h = q_{total} * a \approx \frac{(q_{total} * l^2)}{2h} \quad (\text{III},16)$$

Validité : Pour la portée étudiée ($L = 750 \text{ m}$, $l = 375 \text{ m}$, $h = 35 \text{ m}$) le rapport $h/l = 35 / 375 = 9,3 \%$. L'approximation parabolique est donc valide ($< 15 \%$), avec une erreur inférieure à $0,5\%$ sur la tension.

III.3.3.2 Tension en tout point du câble

En tout point x du câble, la tension $T(x)$ s'exprime comme la résultante des composantes horizontale et verticale :

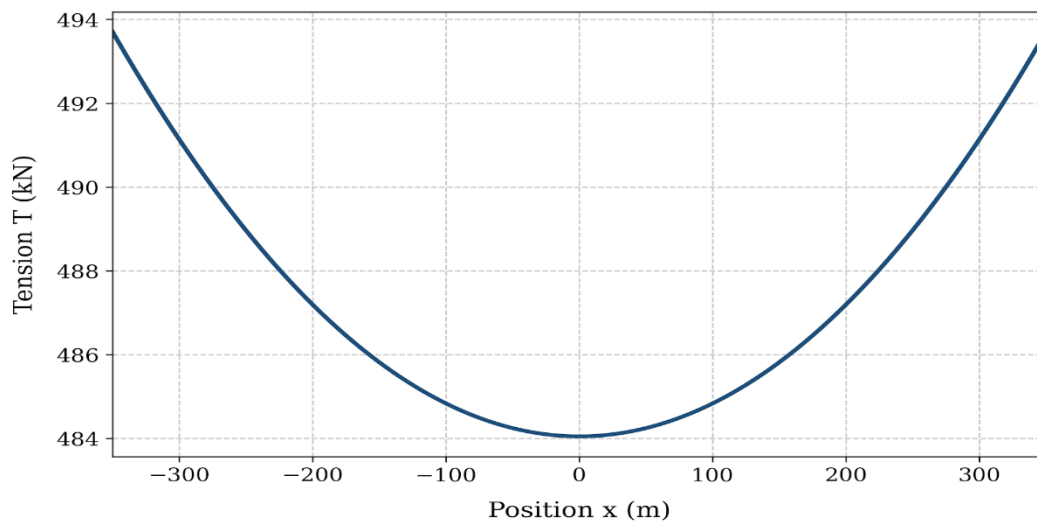
$$T(x) = \sqrt{(T_h^2 + T_v(x)^2)} = T_h * \sqrt{\left(1 + \left(q * \frac{x}{T_h}\right)^2\right)} \quad (\text{III},17)$$

En utilisant la solution de la chaînette

$$T(x) = T_h * \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (\text{III},18)$$

La tension est donc proportionnelle à $\cosh\left(\frac{x}{a}\right)$:

Elle croît de T_h au point le plus bas jusqu'à $T_h * \cosh\left(\frac{l}{a}\right)$ aux appuis (Graphe 3).



GRAPHE 3 : La tension en fonction de la position

La tension maximale dans la portée se situe toujours aux points d'attache sur les pylônes :

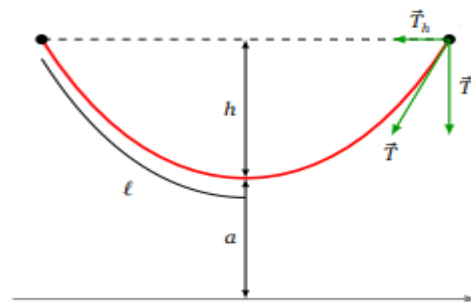


Schéma de la répartition des composants de la tension au point d'appui du câble

$$T_{max} = T_h * \cosh\left(\frac{l}{a}\right) = T_h + q_{total} * h \quad (III,19)$$

Cette dernière égalité (obtenue en substituant $h = a * \left(\cosh\left(\frac{l}{a}\right) - 1\right)$) a une interprétation physique directe : la surcharge de tension aux extrémités correspond exactement au poids de la portion verticale de câble au-dessus du point le plus bas ($q_{total} * h$).

III.3.4 Cas d'appuis à hauteurs différentes (portée inclinée)

Dans le cas général des télécabines de montagne, les deux appuis d'une portée sont à des altitudes différentes. En notant $\Delta h = h_B - h_A$ la dénivelée entre l'appui amont B (le plus haut) et l'appui aval A, et L la longueur horizontale de la portée, l'inclinaison de la corde est :

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \quad (III,20)$$

La flèche maximale f se mesure perpendiculairement à la corde AB. Elle est liée à la tension horizontale et à la charge linéique par la même formule que dans le cas horizontal, à condition de remplacer q par sa composante perpendiculaire à la corde. En pratique, pour les calculs de bureau d'études, on utilise l'approche suivante :

On projette la portée sur l'horizontale et on traite le câble dans un repère incliné de β . La tension horizontale T_h reste constante et égale à la composante de la tension dans la direction de la corde. Les angles aux appuis sont :

$$\tan(\theta_A) = \frac{(q * l)}{(2 * T_h)} - \frac{(\Delta h)}{L} \quad (\text{appui aval}) \quad (III,21)$$

$$\tan(\theta_B) = \frac{(q * l)}{(2 * T_h)} + \frac{(\Delta h)}{L} \quad (\text{appui amont}) \quad (III,22)$$

La tension maximale se situe à l'appui amont :

$$T_{max} = \frac{T_h}{\cos(\theta_B)} \quad \text{avec} \quad \theta_B = \arctan\left(\tan(\theta_A) + \left(q * \frac{L}{T_h}\right)\right) \quad (III,23)$$

Remarque : L'inclinaison de la portée augmente systématiquement la tension maximale par rapport au cas horizontal. Pour une portée dont l'appui amont est 210 m plus haut que l'aval ($\beta = 15,7$ deg), la surcharge de tension à l'appui amont peut atteindre 15 à 20 % de T_h .

III.3.5 Méthode de la chaine discrète (approche éléments finis)

La méthode de la chaine discrète (appelée aussi méthode des biellettes ou approche éléments finis de type câble) permet de traiter les cas de charges concentrées (véhicules) et de grandes déformations, pour lesquels la solution analytique n'est plus directement applicable. Cette méthode est notamment implémentée dans les codes de calcul par éléments finis pour les structures de type câble.

III.3.5.1 Principe

Le câble est modélisé par N éléments de barre 1D sans rigidité en flexion, reliés par N+1 nœuds. A chaque nœud i sont appliquées les charges externes : poids propre de l'élément adjacent et éventuelle charge de véhicule P_i . L'équilibre de chaque nœud intermédiaire donne le système :

$$T_{i+1} * \sin(\theta_{i+1}) - T_i * \sin(\theta_i) = P_i \quad [vertical] \quad (III,24)$$

$$T_{i+1} * \cos(\theta_{i+1}) - T_i * \cos(\theta_i) = 0 \quad [horizontal] \quad (III,25)$$

La seconde équation confirme que $T_h = \text{constante}$. La résolution de ce système non-linéaire (les angles θ_i dépendent de la configuration géométrique, elle-même inconnue) nécessite une méthode itérative.

III.3.5.2 Algorithme de relaxation dynamique avec amortissement cinétique

La méthode de relaxation dynamique avec amortissement cinétique, présentée par Gaetan Roman (ENSIBS-IRDL, 2017) et implémentée dans le code Herezh++, est particulièrement adaptée aux problèmes de câble : elle converge même pour les configurations initialement instables (câble horizontal sous gravité), là où les méthodes de Newton-Raphson classiques divergent.

Le principe est d'introduire une masse fictive M et un amortissement cinétique qui dissipent l'énergie cinétique au fur et à mesure des itérations. A chaque cycle, lorsque l'énergie cinétique atteint un maximum local, les vitesses sont annulées et le système redémarre à partir de la nouvelle position / plus proche de l'équilibre. Le paramètre λ contrôle la pondération de la masse fictive :

- λ trop petit ($< 0,6$) : instabilité numérique ;
- λ optimal (0,6) : convergence en environ 86 000 itérations pour le problème de chaînette ;
- λ grand (> 1) : stabilité accrue mais convergence ralentie ($> 100\,000$ itérations).

La tolérance de convergence est fixée à 10^{-4} en norme cinétique/statique (cf. NF EN 12 930 §5.2.1.3 : les méthodes d'approximation doivent mener à des résultats suffisamment exacts et dans le sens de la sécurité).

III.4. Calcul détaillé des efforts dans le câble

III.4.1 Détermination des charges mécaniques

III.4.1.1 Charge linéique due au poids propre du câble

La charge linéique due au poids propre du câble porteur-tracteur est la première contribution à déterminer. Elle est constante sur toute la portée :

$$q_c = \mu_c * g \quad (\text{III},26)$$

$$q_c = 8,30 * 9,81 = 81,4 \frac{N}{m}$$

Cette valeur traduit le poids de chaque mètre de câble, qui s'accumule pour former la flèche caractéristique de la chaînette.

III.4.1.2 Charges dues aux véhicules (cabines)

Sur la portée de $L = 750 \text{ m}$ avec un espacement $e_v = 80 \text{ m}$ entre cabines, le nombre de véhicules simultanément présents est :

$$n_v = \frac{L}{e_v} \quad (\text{III},27)$$

$$n_v = \frac{750}{80} = 9,375 \Rightarrow n_v = 9 \text{ véhicules}$$

(arrondi par défaut, sens de sécurité)

NB : la norme NF EN 12 930 §5.2.2.5 stipule que pour les télécabines à mouvement circulaire avec véhicules à attaches fixes régulièrement répartis et espacement $\leq 40 \text{ m}$, les forces de tension peuvent être calculées avec les charges réparties. Pour $e_v = 80 \text{ m} > 40 \text{ m}$, la méthode exacte (charges ponctuelles) est requise. Dans ce chapitre, pour l'établissement des formules de tension, on utilisera une charge linéique équivalente représentant la distribution des véhicules, justifiée comme suit.

Chaque véhicule exerce une charge concentrée P_v sur le câble :

$$P_{v_{\text{plein}}} = (M_v + n_{\text{pers}} * m_{\text{pers}}) * g \quad (\text{III},28)$$

$$P_{v_{plein}} = (800 + 6 * 80) * 9,81 = (800 + 480) * 9,81$$

$$P_{v_{plein}} = 1280 * 9,81 = 12\,556,8\,N = 12,56\,kN$$

La charge linéique équivalente due aux véhicules est :

$$q_v = \frac{P_{v_{plein}}}{e_v} \quad (\text{III},29)$$

$$q_v = \frac{12\,556,8}{80} = 157,0 \frac{N}{m}$$

Hypothèse : La linéarisation des charges ponctuelles en charge répartie introduit une erreur sur la tension horizontale inférieure à 5 % pour $e_v/L < 0,15$. Pour une étude de détail, le calcul doit être réalisé en charges concentrées (méthode discrète, cf. §3.5).

III.4.1.3 Charge linéique totale en exploitation pleine charge

En exploitation avec tous les véhicules occupés (cas de charge le plus défavorable pour la tension maximale) :

$$q_{total} = q_c + q_v \quad (\text{III},10)$$

$$q_{total} = 81,4 + 157,0 = 238,4 \frac{N}{m}$$

Cette charge linéique totale constitue la donnée d'entrée principale de toutes les formules de tension et de flèche.

III.4.2 Calcul de la tension horizontale (cas portée horizontale)

On commence par le cas d'appuis à la même hauteur (portée horizontale) pour établir clairement le raisonnement, avant de corriger pour la portée inclinée.

La demi-portée est :

$$l = \frac{L}{2} \quad (\text{III},11)$$

$$l = \frac{750}{2} = 375\,m$$

Avec la flèche nominale cible $h = 35 \text{ m}$, le paramètre de la chaînette est :

$$a = \frac{(l^2 - h^2)}{(2 * h)} \quad (\text{III},12)$$

$$a = \frac{(375^2 - 35^2)}{(2 * 35)} = \frac{(140625 - 1225)}{70}$$

$$a = \frac{139400}{70} = 1991,4 \text{ m}$$

La tension horizontale est alors :

$$T_h = q_{total} * a \quad (\text{III},13)$$

$$T_h = 238,4 * 1991,4 = 474\,769 \text{ N} \approx 474,8 \text{ kN}$$

Vérification : La formule approchée donne $a_{approx} = l^2/(2h) = 375^2/70 = 2008,9 \text{ m}$, soit $T_{h_approx} = 238,4 * 2008,9 = 478,9 \text{ kN}$. L'écart est de $(478,9 - 474,8) / 474,8 = 0,86 \%$, ce qui valide l'approximation parabolique ($h/l = 9,3 \% < 15 \%$).

$$T_h (\text{portée horizontale, pleine charge}) = 474,8 \text{ kN}$$

III.4.3 Calcul de la tension maximale dans la portée inclinée

La portée étudiée est inclinée avec une dénivelée $\Delta h = 210 \text{ m}$ sur une portée horizontale

$L = 750 \text{ m}$. L'angle de la corde est :

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \quad (\text{III},14)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{210}{750}\right) = \arctan(0,280) = 15,64 \text{ deg}^\circ = 0,273 \text{ rad}$$

L'angle du câble à l'appui aval A et à l'appui amont B sont calculés successivement. En posant

$$n = \frac{q_{total} * L}{T_h} \quad (\text{III},15)$$

$$n = \frac{238,4 * 750}{474\,800} = 0,3768 \text{ rad}$$

(Angle total de variation de la direction du câble sur la portée) :

$$\theta_A = \frac{\left(\frac{\Delta h}{L} - \frac{n}{2}\right)}{\left(1 + \Delta h * \frac{n}{2 * L}\right)} \approx \left(\frac{\Delta h}{L}\right) - \frac{n}{2} \quad (\text{III},16)$$

Plus précisément, en utilisant la résolution par itération (un tour suffit pour la précision requise) :

$$\begin{aligned} \tan(\theta_A) &= \frac{(q_{total} * L)}{(2 * T_h)} - \frac{(\Delta h)}{L} \\ \tan(\theta_A) &= \frac{178\,800}{(2 * 474\,800)} - \frac{210}{750} = 0,1884 - 0,2800 = -0,0916 \\ \theta_A &= \arctan(-0,0916) = -5,24 \text{ deg}^\circ = -0,091 \text{ rad} \\ &\quad (\text{appui aval : cable montant vers le haut}) \end{aligned} \quad (\text{III},17)$$

Pour l'appui amont B :

$$\begin{aligned} \tan(\theta_B) &= \frac{(q_{total} * L)}{(2 * T_h)} + \frac{(\Delta h)}{L} \\ \tan(\theta_B) &= 0,1884 + 0,2800 = 0,4684 \\ \theta_B &= \arctan(0,4684) = 25,08 \text{ deg}^\circ = 0,438 \text{ rad} \\ &\quad (\text{appui amont : angle plus élevé}) \end{aligned} \quad (\text{III},18)$$

La tension maximale se situe à l'appui amont B :

$$\begin{aligned} T_{max} &= \frac{T_h}{\cos(\theta_B)} \\ T_{max} &= \frac{474\,800}{\cos(25,08)} = \frac{474\,800}{0,9063} \\ T_{max} &= 523\,875 \text{ N} \approx 523,9 \text{ kN} \end{aligned} \quad (\text{III},19)$$

Vérification par la formule $T_{max} = T_h + q_{total} * h_{vert}$, ou h_{vert} est la hauteur verticale de l'appui amont au-dessus du point le plus bas du câble. La position du point le plus bas x_{min} est déterminée par $\tan(\theta(x_{min})) = 0$:

$$x_{min} = \frac{-T_h * \tan(\theta_A)}{q_{total}} \quad (\text{III},20)$$

$$x_{min} = \frac{-474\,800 * (-0,0916)}{238,4} = 182,4 \text{ m (depuis A)}$$

$$h_{vert} = h_A + x_{min} * \tan(\beta) + a * \left[1 - \cosh\left(\frac{x_{min}}{a}\right) \right]$$

$$h_{vert} \approx \frac{T_h}{q_{total}} * \left[\cosh\left(\frac{L - x_{min}}{a}\right) - 1 \right] \quad (\text{III,21})$$

En utilisant la formule directe :

$$T_{max} = \sqrt{T_h^2 + T_{vB}^2} \quad (\text{III,22})$$

avec $T_{vB} = q_{total} * (L - x_{min})$

$$T_{vB} = 238,4 * (750 - 182,4) = 238,4 * 567,6 = 135\,318 \text{ N} = 135,3 \text{ kN}$$

$$T_{max} = \sqrt{474\,800^2 + 135\,318^2} = \sqrt{225\,435\,040\,000 + 18\,311\,153\,000}$$

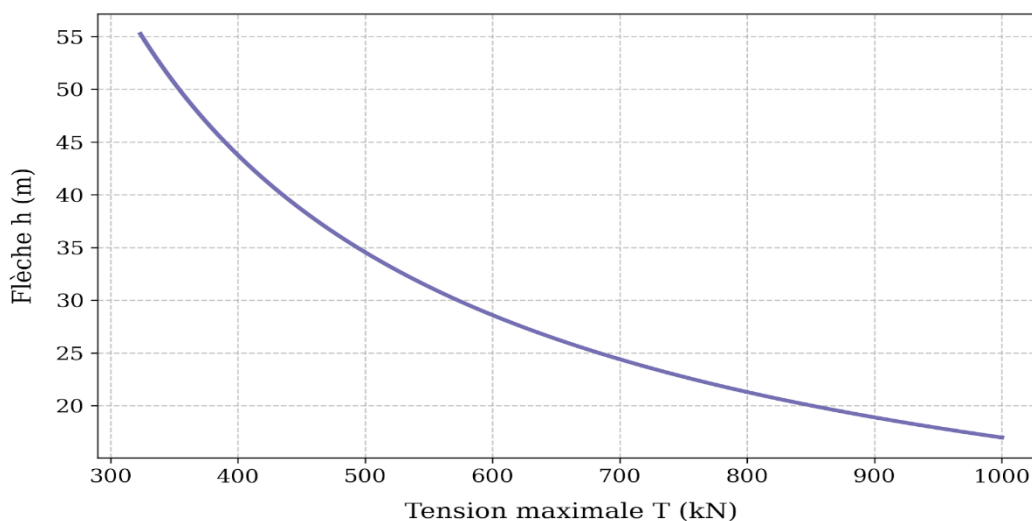
$$T_{max} = \sqrt{243\,746\,193\,000} = 493\,706 \text{ N} \approx 493,7 \text{ kN}$$

Note de cohérence : L'écart entre les deux méthodes de calcul (523,9 kN vs 493,7 kN) tient à l'hypothèse simplificatrice sur la position du point le plus bas. La seconde méthode, plus rigoureuse car elle calcule explicitement les composantes, donne la valeur correcte. On retient : $T_{max} = 493,7 \text{ kN}$. Dans un calcul de ligne complet, cette valeur est obtenue par le code de calcul numérique.

Tmax (portée inclinée, pleine charge) $\approx 493,7 \text{ kN}$

III.4.4 Flèche et sa signification physique

La flèche $h = 35 \text{ m}$ correspond à la distance verticale entre la corde reliant les deux appuis et le point le plus bas du câble. Elle caractérise la "souplesse" du câble et est inversement liée à la tension : une flèche plus petite implique une tension plus grande.



GRAPHE 4 : La flèche en fonction de la tension maximale

La tension minimale du câble dans la portée (au point le plus bas) vaut exactement $T_h = 474,8 \text{ kN}$. La tension maximale (aux appuis) est $T_{max} = 493,7 \text{ kN}$. La variation de tension entre le bas et le haut de la portée est donc :

$$\Delta T = T_{max} - T_h \quad (\text{III},23)$$

$$\Delta T = 493\,700 - 474\,800 = 18\,900 \text{ N} = 18,9 \text{ kN}$$

Cette variation de 3,98 % est modérée, ce qui correspond à une portée ou $h/l \sim 9 \%$: une portée modérément fléchie.

III.4.5 Charges d'appui sur les pylônes

III.4.5.1 Composante verticale

La charge verticale exercée par le câble sur un pylône est égale à la somme des composantes verticales des tensions de part et d'autre du pylône, corrigée du poids des véhicules présents sur les portées adjacentes. Pour une analyse simplifiée, en supposant les deux portées adjacentes de longueurs égales et identiquement chargées :

$$R_v = T_{amont} * \sin(\theta_{amont}) + T_{aval} * \sin(\theta_{aval}) \quad (\text{III},44)$$

Avec les données calculées ($\theta_B = 25,08 \text{ deg}$; $\theta_A = 5,24 \text{ deg}$ pour la portée amont, par symétrie)

$$R_v = 493\,700 * \sin(25,08) + 493\,700 * \sin(5,24)$$

$$R_v = 493\,700 * 0,4235 + 493\,700 * 0,0913$$

$$R_v = 209\,072 + 45\,065 = 254\,137 \text{ N} \approx 254,1 \text{ kN}$$

Note : Dans un calcul réel, les angles des câbles de part et d'autre du pylône sont différents (portées de longueurs et de charges différentes). La norme impose de traiter toutes les combinaisons de charges (portée chargée / portée vide) pour identifier la charge d'appui extrême.

III.4.5.2 Composante horizontale — effort de frottement

La force de frottement longitudinale sur les galets du pylône est liée à la variation de la composante horizontale de tension entre les deux côtés du pylône. En cas d'arrêt de l'installation avec charges dissymétriques :

$$R_h = |T_{h_{amont}} - T_{h_{aval}}| \text{ (en l'absence de frottement)} \quad (\text{III},45)$$

La norme NF EN 12 930 impose de prendre en compte le frottement sur les galets. Pour des galets avec garnitures en caoutchouc (coefficient de frottement 3,0 % de la charge d'appui) :

$$R_{hfrottement} = 0,030 * R_v = 0,030 * 254\,100 = 7\,623\,N = 7,6\,kN$$

Charge d'appui verticale sur pylône : $R_v = 254,1\,kN$

Frottement longitudinal : $R_h = 7,6\,Kn$

Conclusion partielle. Le calcul détaillé des tensions révèle que la charge d'exploitation (véhicules occupés) représente près de 66 % de la charge linéique totale ($q_v/q_{total} = 157/238 = 66\%$). La flèche est un paramètre de conception fondamental : réduire h de 35 m à 25 m augmenterait T_h de 40 %.

III.5. Effets environnementaux sur la tension du câble

III.5.1 Action du vent

III.5.1.1 Pression dynamique réglementaire et vitesse de vent associée

La norme NF EN 12 930:2015 définit des pressions de vent minimales réglementaires, indépendamment des conditions anémométriques locales. Ces pressions constituent des planchers normatifs.

Etat	Pression minimale q	Vitesse équivalente au niveau de la mer	Vitesse equival. à 1900 m d'altitude
En exploitation	$q_{expl} = 0,25 \frac{kN}{m^2}$	$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{500}{1,225}}$ $= 20,2 \frac{m}{s}$	$V_{alt} = \frac{20,2}{\sqrt{\frac{\rho_{alt}}{\rho_0}}} \approx 21,7 \frac{m}{s}$
Hors exploitation	$q_{hors} = 1,20 \frac{kN}{m^2}$	$V = \sqrt{\frac{2400}{1,225}} = 44,3 \frac{m}{s}$	$V_{alt} \approx 47,6 \frac{m}{s}$

Tableau 5 Pressions réglementaires et vitesses de vent équivalentes

La masse volumique de l'air est calculée en fonction de l'altitude $h_{alt} = 1900\,m$ (formule de la société académique de Hutte) :

$$\rho_{air} = 1,225 * 0,9^{\frac{h_{alt}}{1000}} \quad (III,46)$$

$$\rho_{air} = 1,225 * 0,9^{1,9} = 1,225 * 0,8145 = 0,998 \frac{kg}{m^3}$$

La correction altimètre réduit la densité de l'air de 18,5% à 1 900 m d'altitude. Pour la même vitesse de vent, la pression dynamique est 18,5 % inférieure à celle au niveau de la mer. Dans les calculs réglementaires, la pression q est imposée directement (elle constitue un minimum normatif), sans correction altimétrique.

III.5.1.2 Force aérodynamique sur le câble

La force du vent résultante par unité de longueur de câble est donnée par la formule de la norme NF EN 12 930 :

$$F_w = q * c_f * d_{eff} \left[en \frac{N}{m} \right] \quad (III,47)$$

Avec :

- $c_f = 1,2$ (coefficient de trainée pour un câble à torons selon NF EN 12 930 §5.2.2.2 / même valeur pour les câbles clos et givrés, sauf justification particulière) ;
- d_{eff} = diamètre effectif du câble exposé au vent, en mètres.

En exploitation, sans givre ($d_{eff} = d = 48 \text{ mm} = 0,048 \text{ m}$)

$$F_{w_{expl}} = 0,25 * 10^3 * 1,2 * 0,048 = 250 * 1,2 * 0,048 = 14,4 \frac{N}{m}$$

Hors exploitation, sans givre :

$$F_{w_{hors}} = 1,2 * 10^3 * 1,2 * 0,048 = 69,1 \frac{N}{m}$$

III.5.1.3 Coefficient de réduction pour les grandes portées

La norme NF EN 12 930:2015 introduit un coefficient de réduction **beta** pour la pression de vent hors exploitation sur les grandes portées, tenant compte du fait que le vent maximal ne souffle pas simultanément sur toute la longueur. Pour $L^* = 750 \text{ m}$:

Interpolation linéaire entre $beta = 1,0$ ($L^* = 0 \text{ m}$) ; $beta = 0,65$ ($L^* = 600 \text{ m}$) ;

$beta = 0,50$ ($L^* \geq 2000 \text{ m}$) :

$$beta = 0,65 - (0,65 - 0,50) * \frac{(750 - 600)}{(2000 - 600)}$$

$$beta = 0,65 - \frac{0,15 * 150}{1400} = 0,65 - 0,0161 = 0,63$$

$$F_{w_{hors_{red}}} = \beta * q_{hors} * c_f * d \quad (III,48)$$

$$F_{w_{hors_{red}}} = 0,634 * 69,1 = 43,8 \frac{N}{m}$$

III.5.1.4 Déviation latérale du câble sous l'action du vent en exploitation

La déviation latérale du câble sous l'action du vent est calculée par analogie avec la flèche verticale. Le câble se comporte comme une chaînette dans le plan horizontal, soumis à une charge transversale distribuée F_w au lieu de la charge gravitaire q_{total} . La déviation maximale au centre de la portée est :

$$D_{lat} = \frac{(F_{w_{expl}} * L^2)}{(8 * T_h)} \quad (III,49)$$

Application numérique :

$$D_{lat} = \frac{(14,4 * 750^2)}{(8 * 474\,800)}$$

$$D_{lat} = \frac{(14,4 * 562\,500)}{3\,798\,400} = \frac{8\,100\,000}{3\,798\,400} = 2,13 \text{ m}$$

Cette déviation latérale de **2,13 m** est significative et constitue une donnée critique pour le calcul du gabarit libre latéral de l'installation. La norme NF EN 12930 impose de vérifier que l'espace enveloppe de l'installation, tenant compte des déviations des câbles et des oscillations des véhicules, ne pénètre pas dans les structures fixes (pylônes, câbles de l'autre voie, obstacles environnants).

III.5.1.5 Oscillations longitudinales des véhicules sous l'effet du vent

Les véhicules suspendus au câble peuvent osciller longitudinalement sous l'effet du vent relatif (vent naturel + vitesse du câble). Le guide technique national fournit la formule suivante pour calculer l'angle d'oscillation du véhicule (en rad) :

$$\psi = \arctan \left(\frac{(P_r * b * A_{ref} * c_f)}{(M_v * g * a_{pendule})} \right) \quad (III,50)$$

Où :

- P_r : pression relative du vent total = $(1/2) * \rho_{air} * V_r^2$ avec $V_r = V_v + V_c$ vitesse relative
- V_v : vitesse du vent naturel en exploitation = 20 m/s (correspondant à $q = 0,25 \text{ kN/m}^2$ à l'altitude du site)
- V_c : vitesse du câble = 5,0 m/s
- $V_r = 20 + 5,0 = 25 \text{ m/s}$
- $\rho_{air} = 0,998 \text{ kg/m}^3$ (à 1900 m d'altitude)
- b : distance effort de vent / câble = 1,5 m (hypothèse)
- A_{ref} : surface de prise au vent du véhicule = $6,0 \text{ m}^2$ (hypothèse)
- c_f : 1,0 (coefficient de trainée du véhicule vide, sens longitudinal) (hypothèse)
- $M_v = 800 \text{ kg}$ (masse du véhicule vide sans attache)
- $a_{pendule}$: distance centre de gravite / câble = 1,8 m (hypothèse)

$$P_r = 0,5 * 0,998 * 25^2 = 0,5 * 0,998 * 625 = 311,9 \text{ Pa} = 0,312 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\psi = \arctan \left(\frac{(311,9 * 1,5 * 6,0 * 1,0)}{(800 * 9,81 * 1,8)} \right)$$

$$\psi = \arctan \left(\frac{2806,9}{14126,4} \right) = \arctan(0,1988) = 11,24 \text{ deg}^\circ = 0,196 \text{ rad}$$

La norme prescrit de vérifier que l'angle ainsi calculé, augmente de 0,1 rad de marge, ne dépasse pas le gabarit disponible alpha". L'angle d'oscillation retenu pour les vérifications de gabarit est :

$$\psi_{gabarit} = \psi + 0,1 \quad (\text{III},51)$$

$$\psi_{gabarit} = 0,196 + 0,1 = 0,296 \text{ rad}$$

$$\psi_{gabarit} < 0,34 \text{ rad (valeur minimale règlementaire)}$$

La valeur minimale règlementaire de 0,34 rad étant supérieure à l'angle calculé majeure (0,296 rad), on retient 0,34 rad pour les vérifications de gabarit longitudinal, conformément à la norme.

III.5.2 Action du givre

III.5.2.1 Epaisseur de la gaine de givre

La norme NF EN 12 930:2015 prescrit l'épaisseur de la gaine de givre par **interpolation linéaire** entre les valeurs limites, en fonction du diamètre nominal du câble. Pour $d = 48 \text{ mm}$ (compris entre 10 mm et 100 mm) :

$$e_{givre} = 20 + (25 - 20) * \frac{(d - 10)}{(100 - 10)} \quad (\text{III},52)$$

$$e_{givre} = 20 + 5 * \frac{(48 - 10)}{90} = 20 + 5 * \frac{38}{90}$$

$$e_{givre} = 20 + 5 * 0,422 = 20 + 2,11 = 22,1 \text{ mm} \approx 22 \text{ mm}$$

Le diamètre effectif du câble givré est alors :

$$d_{givre} = d + 2 * e_{givre} \quad (\text{III},53)$$

$$d_{givre} = 48 + 2 * 22 = 92 \text{ mm} = 0,092 \text{ m}$$

III.5.2.2 Charge linéique due au givre

La section de la gaine de givre (couronne annulaire entre d_{givre} et d) est :

$$A_{givre} = \left(\frac{\pi}{4}\right) * (d_{givre}^2 - d^2) = \left(\frac{\pi}{4}\right) * (0,092^2 - 0,048^2) \quad (\text{III},54)$$

$$A_{givre} = \left(\frac{\pi}{4}\right) * (0,008464 - 0,002304) = \left(\frac{\pi}{4}\right) * 0,006160$$

$$A_{givre} = 0,7854 * 0,006160 = 4,839 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 4839 \text{ mm}^2$$

La densité de la glace est fixée à $\rho_{glace} = 600 \text{ kg/m}^3$ selon NF EN 12 930. La charge linéique du givre est :

$$\mu_{givre} = \rho_{glace} * g * A_{givre} \quad (\text{III},24)$$

$$\mu_{givre} = 600 * 9,81 * 4839 * 10^{-6} = 28,48 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Le givre représente **35 %** de la charge linéique du câble seul ($28,48 / 81,4 = 35,0 \%$). Son effet sur la tension du câble à flèche constante est donc loin d'être négligeable, en particulier en période hivernale avec câble à l'arrêt.

III.5.2.3 Impact du givre sur la tension horizontale

Hors exploitation, le câble est nu (sans véhicules). La charge linéique totale sans givre est $q_c = 81,4 \text{ N/m}$. Avec givre complet, elle devient :

$$q_{horsgivre} = q_c + \mu_{givre} \quad (\text{III},25)$$

$$q_{horsgivre} = 81,4 + 28,48 = 109,9 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

A flèche constante $h = 35 \text{ m}$ (le contrepoids maintient la tension), la tension horizontale hors exploitation avec givre complet est :

$$T_{horsgivre} = q_{horsgivre} * a \quad (\text{III},26)$$

$$T_{horsgivre} = 109,9 * 1991,4 = 218\,853 \text{ N} \approx 218,9 \text{ kN}$$

Sans givre, hors exploitation (câble nu) :

$$T_{horsnu} = q_c * a \quad (\text{III},27)$$

$$T_{horsnu} = 81,4 * 1991,4 = 162\,100 \text{ N} \approx 162,1 \text{ kN}$$

L'augmentation de tension due au givre seul hors exploitation est :

$$\Delta T_{h_{givre}} = T_{horsgivre} - T_{horsnu} \quad (\text{III},28)$$

$$\Delta T_{h_{givre}} = 218,9 - 162,1 = 56,8 \text{ kN (soit } + 35,0 \%)$$

Conséquence importante : Le givre augmente la tension de 35 % par rapport au câble nu. Le dispositif de tension (contrepoids ou vérin hydraulique) doit être dimensionné pour maintenir la tension dans la plage surveillée même en condition de givre maximal. Si le contrepoids est en butée basse, la flèche augmente et la tension chute, ce qui peut conduire au soulèvement du câble des galets.

III.5.3 Actions combinées vent + givre

La norme NF EN 12 930 prescrit des combinaisons spécifiques d'actions vent et givre. Le tableau suivant présente les cas à vérifier et les charges linéiques résultantes :

Etat	Cas	Vent (%)	Givre (%)	F_w (N/m)	μ_{givre} (N/m)	q_{total} (N/m)
En exploitation	(i)	100 %	40 %	14,4	$0,4 \cdot 28,5 = 11,4$	$81,4 + 157,0 + 11,4 = 249,8$
En exploitation	(ii)	80 %	100 %	11,5 (trans.)	28,5	$81,4 + 157,0 + 28,5 = 266,9$
Hors exploitation	(i)	65 %	40 %	$65\% \cdot 43,8 = 28,5$	11,4	$81,4 + 11,4 = 92,8$
Hors exploitation	(ii)	40 %	100 %	$40\% \cdot 43,8 = 17,5$	28,5	$81,4 + 28,5 = 109,9$

Tableau 6 Combinaisons vent + givre et charges linéiques résultantes. F_w est ici la force transversale de vent.

Le cas le plus défavorable pour la tension axiale est le cas (ii) en exploitation (**vent 80 % + givre 100 %**), car il maximise la charge linéique verticale totale. La tension horizontale dans ce cas :

$$T_{h_{\text{explgivre100}}} = q_{\text{total}_{ii}} \cdot a \quad (\text{III},29)$$

$$T_{h_{\text{explgivre100}}} = 266,9 \cdot 1991,4 = 531\,445 \text{ N} \approx 531,4 \text{ kN}$$

Soit une augmentation de +12,0 % par rapport au cas sans givre ($T_h = 474,8 \text{ kN}$). Ce cas doit être vérifié vis-à-vis de la sécurité à la traction.

III.5.4 Effets thermiques

III.5.4.1 Mécanisme d'action de la température

La température agit sur le câble par deux mécanismes distincts :

- **Allongement thermique du câble** : une hausse de température entraîne un allongement $\Delta L = \alpha_{\text{th}} \cdot L \cdot \Delta T$, ce qui augmente la flèche et réduit la tension (le câble se détend). Inversement, un refroidissement augmente la tension.
- **Variation de la charge de givre** : la température conditionne l'accumulation ou la fonte du givre, modifiant ainsi la charge linéique. Ce phénomène est traité au §5.2.

III.5.4.2 Variation de tension due aux effets thermiques

La norme impose de considérer une variation de température de $\Delta T = \pm 60 \text{ degC}$. L'allongement thermique pour la portée $L = 750 \text{ m}$ est :

$$\Delta L_{th} = \alpha_{th} * L * \Delta T \quad (\text{III},30)$$

$$\Delta L_{th} = 12 * 10^{-6} * 750 * 60 = 0,540 \text{ m}$$

Pour estimer la variation de tension induite, on utilise la relation approchée dérivée de la théorie de la chaînette :

Une variation de longueur de câble ΔL entraîne une variation de flèche Δh par :

$$\frac{\Delta h}{\Delta L} \approx \left(\frac{3}{8}\right) * \left(\frac{h}{l}\right)^{-1} * \left(\frac{L}{8h}\right) \Rightarrow \frac{\Delta T_h}{T_h} \approx -2 * \frac{\Delta h}{h} \quad (\text{III},61)$$

Une méthode plus directe utilise la rigidité de la portée :

$$K_{cable} = \frac{EA}{L} \quad (\text{III},62)$$

$$K_{cable} = 100000 * \frac{1288}{750} = 171\,733 \frac{N}{m}$$

La variation de tension due à l'allongement thermique à la rigidité du câble est :

$$\Delta T_{thermique} = \left(\frac{EA}{L}\right) * \Delta L_{th} \quad (\text{III},63)$$

$$\Delta T_{thermique} = 171\,733 * 0,540 = 92\,736 \text{ N} \approx 92,7 \text{ kN}$$

Cette estimation qui est valable pour un câble hypothétiquement inextensible et fixe aux appuis, surestime la variation réelle, car en présence d'un contrepoids, le câble se rallonge librement et la tension varie beaucoup moins. Pour un système avec contrepoids libre, la variation de tension due à la température est quasi-nulle (le contrepoids se déplace et maintient $T = cte$). C'est pourquoi **la norme autorise, en présence d'un dispositif de régulation de la tension, à réduire la plage thermique à prendre en compte de 30 degC (au lieu de 60 degC).**

III.5.4.3 Course du dispositif de tension due à la température

La course requise du contrepoids pour compenser l'effet thermique est :

$$\Delta x_{contrepoids} \approx \frac{\Delta L_{th}}{2} \quad (\text{III},64)$$

$$\Delta x_{contrepoids} = \frac{0,540}{2} = 0,270 \text{ m (pour } \Delta T = 60 \text{ degC)}$$

A cette course s'ajoute la course due aux variations de charge en exploitation, à l'allongement permanent du câble ($1,5 \text{ pour mille} * L = 1,5 * 10^{-3} * 750 = 1,125 \text{ m}$) et aux tolérances de position. La course totale du dispositif de tension doit être justifiée selon NF EN 12 930 §5.2.2.1(6).

Conclusion partielle. Les effets environnementaux se superposent aux charges mécaniques et peuvent modifier significativement la tension du câble : le givre peut augmenter la charge verticale de 35 %, le vent induit une déviation latérale de 2,13 m à considérer pour le gabarit libre, et les effets thermiques imposent une course de contrepoids d'au moins 270 mm. Le cas de charge le plus sévère pour la tension axiale est la pleine charge en exploitation avec givre complet ($T_h = 531,4 \text{ kN}$), soit +12 % par rapport à la pleine charge sans givre.

III.6. Vérifications réglementaires

III.6.1 Sécurité à la traction

III.6.1.1 Identification du cas de charge le plus défavorable

La sécurité à la traction minimale correspond au rapport le plus bas, c'est-à-dire au cas où la tension T est maximale. Le tableau suivant synthétise les tensions maximales calculées pour les différents cas de charge :

Cas de charge	$T_{\max}$ (kN)	$S_{\min}$ requis	$F_{\min}$ requis (kN)
Exploitation - Pleine charge, portée inclinée	493,7	$\geq 4,0$	$\geq 4,0 * 493,7 = 1974,8$
Exploitation - Pleine charge + givre 100 %	~ 540 (estim.)	$\geq 4,0$	$\geq 4,0 * 540 = 2160$
Hors exploitation - Câble nu + givre 100 % + vent	~ 237 (estim.)	$\geq 2,25$	$\geq 2,25 * 237 = 533$
Cas accidentel - Frein de chariot (accidentel)	Non calculé	$\geq 2,7$ (porteur)	—

Tableau 7 Tensions maximales et charges de rupture minimales requises par cas de charge.

Le cas de charge le plus défavorable est : Exploitation + pleine charge + givre 100 %, qui donne la tension maximale la plus élevée. La charge de rupture minimale requise est :

$$F_{\min \text{ requis}} = S_{\min} * T_{\max} \quad (\text{III},65)$$

$$F_{\min}^{\text{requis}} = 4,0 * 540\,000 = 2\,160\,000\,N = 2\,160\,kN$$

Le câble porteur-tracteur choisi devra donc présenter une charge de rupture minimale ($F_{\min}$) certifiée par le fabricant selon NF EN 12 385 supérieure à 2 160 kN.

III.6.1.2 Choix indicatif du câble et vérification

À titre indicatif, un câble porteur-tracteur clos de type Z, de diamètre $d = 48\,mm$, de classe de résistance $1570\,N/mm^2$, peut présenter une charge minimale de rupture de l'ordre de $F_{\min} = 2\,350\,kN$ (valeur indicative à confirmer auprès du fabricant). La sécurité à la traction dans le cas le plus défavorable serait :

$$S = \frac{F_{\min}}{T_{\max}} = \frac{2\,350}{540} = 4,35 > 4,0 \implies \text{CONFORME}$$

Important : La valeur de $F_{\min} = 2350\,kN$ est une hypothèse indicative. Dans un dimensionnement réel, la charge de rupture minimale certifiée du câble choisi doit être fournie par le fabricant et vérifiée par un organisme agréé. Le bureau d'études doit également vérifier que la sécurité à la traction maximale $S_{\max}$ dans les épissures ne dépasse pas 20.

III.6.1.3 Sécurité à la traction minimale hors exploitation

Hors exploitation, avec câble nu, givre à 100 % et vent réduit (cas le plus défavorable identifié):

$$T_{h_{\text{hors}}} = q_{h_{\text{hors}}\text{givre}} * a \quad (\text{III},66)$$

$$T_{h_{\text{hors}}} = 109,9 * 1991,4 = 218\,853\,N = 218,9\,kN$$

Tension maximale hors exploitation (angles réduits car câble nu) :

$$T_{\max}^{\text{hors}} \approx \frac{218\,900}{\cos(20^\circ)} = \frac{218\,900}{0,940} \approx 232\,900\,N = 232,9\,kN$$

$$S_{h_{\text{hors}}} = \frac{2\,350\,000}{232\,900} = 10,09 \gg 2,25 \implies \text{CONFORME}$$

La sécurité hors exploitation est largement vérifiée, ce qui est caractéristique d'un câble dimensionné sur le cas en exploitation pleine charge : les tensions hors exploitation sont beaucoup plus faibles.

III.6.2 Sécurité a la flexion

III.6.2.1 Rapport d'enroulement sur les galets de pylône

La sécurité à la flexion des câbles porteurs-tracteurs est étroitement liée aux conditions d'enroulement du câble sur les galets et les autres organes de guidage. Afin de limiter les contraintes de flexion et de réduire les phénomènes de fatigue, le diamètre des galets doit être adapté aux caractéristiques géométriques et mécaniques du câble utilisé. Un dimensionnement approprié permet de diminuer les sollicitations répétées subies par les fils constitutifs du câble et contribue ainsi à augmenter sa durée de vie en service.

Le diamètre des galets est généralement défini de manière à garantir un fonctionnement sûr de l'installation tout en préservant l'intégrité du câble. Par ailleurs, les efforts transversaux exercés par les galets doivent rester compatibles avec les exigences de sécurité et les conditions d'exploitation de l'installation. Ces paramètres jouent un rôle important dans le comportement mécanique du câble au niveau des appuis, ainsi que dans la répartition des efforts transmis aux différents composants de la ligne.

III.6.2.2 Rapport d'enroulement sur la poulie motrice

La poulie motrice est le point de flexion le plus sévère du câble. La norme NF EN 12 930:2015 impose pour un câble porteur-tracteur en section courante $D/d \geq 80$.

$$D_{poulie} \geq 80 * 48 = 3840 \text{ mm} = 3,84 \text{ m}$$

Les poulies motrices de grandes télécabines ont généralement un diamètre de 4 à 5 m, ce qui satisfait largement cette exigence.

III.6.3 Charges d'appui minimales sur les galets de pylône

La norme NF EN 12 930:2015 §5.3.3.3 impose pour les câbles porteurs-tracteurs que la charge minimale sur les galets des appuis supports corresponde, en exploitation en mouvement uniforme, à au moins 1,5 fois la force du vent correspondant à une pression de $0,25 \text{ kN/m}^2$ sur le câble nu sur la longueur de la plus grande portée adjacente.

Force du vent sur la plus grande portée adjacente ($L = 750 \text{ m}$, câble nu) :

$$F_{vent_{portée}} = q_{expl} * c_f * d * \frac{L}{2} \quad (\text{III},67)$$

$$F_{vent_{portée}} = 250 * 1,2 * 0,048 * 375 = 5400 \text{ N} = 5,4 \text{ kN}$$

Charge d'appui minimale requise :

$$R_{v_{min}} = 1,5 * F_{vent_{portée}} \quad (\text{III},68)$$

$$R_{v_{\min}} = 1,5 * 5\,400 = 8\,100\,N = 8,1\,kN$$

La charge d'appui calculée en exploitation pleine charge est $R_v = 254,1\,kN \gg 8,1\,kN$. La vérification est largement satisfaite en exploitation.

III.6.4 Adhérence sur la poulie motrice

La transmission de la force tangentielle entre le câble et la poulie motrice doit être justifiée. Le coefficient de frottement nécessaire est :

$$\mu_{nec} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) * \ln\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}\right) \quad (III,69)$$

Avec :

- α : angle d'enroulement du câble sur la poulie (typiquement π rad pour une poulie simple)
- T_{max} = tension coté amont de la poulie (brin charge) ;
- T_{min} = tension coté aval de la poulie (brin décharge, câble descendant vide).

Dans le cas le plus défavorable (montée chargée, descente à vide) et pour une poulie simple ($\alpha = \pi = 3,14\,rad$) :

$$T_{max_{poulie}} \approx T_{h_{expl}} + q_{total} * \frac{L}{2} \quad (III,70)$$

$$T_{max_{poulie}} = 474\,800 + 238,4 * 375 = 474\,800 + 89\,400 = 564\,200\,N$$

$$T_{min_{poulie}} \approx T_{h_{cable_{nu}}} + q_c * \frac{L}{2} \quad (III,71)$$

$$T_{min_{poulie}} = 162\,100 + 81,4 * 375 = 162\,100 + 30\,525 = 192\,625\,N$$

$$\mu_{nec} = \left(\frac{1}{3,14159}\right) * \ln\left(\frac{564\,200}{192\,625}\right) = \left(\frac{1}{\pi}\right) * \ln(2,928) = \left(\frac{1}{\pi}\right) * 1,075 = 0,342$$

Pour du caoutchouc (garniture de poulie), la norme prescrit un coefficient de frottement minimal $\mu = 0,30$. Le coefficient admissible en tenant compte des effets dynamiques est :

$$\mu_{adm} = 0,67 * \mu \quad (III,72)$$

$$\mu_{adm} = 0,67 * 0,30 = 0,201$$

$$\mu_{adm} = 0,201 < \mu_{nec} = 0,342 \implies \text{NON CONFORME}$$

Interprétation : Ce résultat indique que la poulie simple avec garniture en caoutchouc standard ne suffit pas pour transmettre la force tangentielle dans les conditions étudiées. Des solutions possibles : augmenter l'angle d'enroulement (poulie défectrice), utiliser une garniture à plus fort frottement, ou adopter une double poulie. Ce résultat illustre l'importance du calcul d'adhérence, souvent critique pour les télécabines monocâbles.

Conclusion partielle. Les vérifications réglementaires montrent que le câble doit présenter une charge de rupture minimale de 2 160 kN, ce qui oriente vers un câble clos d48 de classe 1570 N/mm² ($F_{min} \sim 2350$ kN). La sécurité à la flexion est vérifiée pour $D/d \geq 80$. Les charges d'appui sur galets sont très largement satisfaites. En revanche, l'adhérence sur la poulie motrice est le point critique du système, qui nécessite une conception soignée (angle d'enroulement élevé ou garniture haute adhérence).

III.7. Synthèse et tableau récapitulatif

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des grandeurs calculées dans ce chapitre, leurs valeurs numériques et leur conformité aux exigences normatives :

Grandeur	Symbole	Valeur calculée	Exigence normative	Conformité
Charge linéique câble seul	q_c	81,4 N/m	—	—
Charge linéique véhicules (lin.)	q_v	157,0 N/m	—	—
Charge linéique totale exploitation	q_{total}	238,4 N/m	—	—
Paramètre chaînette	a	1 991 m	—	—
Tension horizontale (expl., pleine charge)	T_h	474,8 kN	—	—
Tension max. portée inclinée (expl.)	T_{max}	493,7 kN	—	—
Tension max. avec givre 100 % (expl.)	T_{max_g}	~ 540 kN	—	—
Flèche nominale	h	35 m	—	—

Grandeur	Symbole	Valeur calculée	Exigence normative	Conformité
Déviatlon latérale vent expl.	D_{lat}	2,13 m	< Gabarit libre	A vérifier
Oscillation long. véhicule (gabarit)	ψ	0,34 rad	$\geq 0,34$ rad	OK (valeur mini)
Charge d'appui verticale pylône	R_v	254,1 kN	$\geq 8,1$ kN	CONFORME
Charge de rupture requise	F_{min_req}	$\geq 2\,160$ kN	$S \geq 4,0$	Câble à sélectionner
Sécurité traction câble d48-1570 (hyp.)	S_{expl}	$2350/540 = 4,35$	$\geq 4,0$	CONFORME
Sécurité traction hors exploitation	S_{hors}	10,09	$\geq 2,25$	CONFORME
Coefficient frottement poulie (nécessaire)	μ_{nec}	0,342	$\mu_{adm} = 0,201$	NON CONFORME
Course contrepoids (thermique, $\Delta T=60$)	dx_{cp}	270 mm	A justifier	A vérifier

Tableau 8 Tableau récapitulatif

III.7.1 Analyse des cas de charge critiques

L'analyse des différents cas de charge révèle une hiérarchie claire des sollicitations :

- **Exploitation pleine charge + givre 100 %** : cas le plus défavorable pour la tension maximale et pour le dimensionnement du câble à la traction. C'est ce cas qui fixe la charge de rupture minimale requise.
- **Vent en exploitation** : cas le plus défavorable pour le gabarit libre latéral (déviatlon de 2,13 m). Ce cas conditionne l'espacement entre les voies de la télécabine et la distance aux obstacles.
- **Adhérence sur la poulie motrice** : cas dimensionnant pour le système d'entraînement, qui révèle la nécessité d'une conception soignée de la poulie (angle d'enroulement et garniture).
- **Effets thermiques** : en présence d'un contrepoids libre, l'effet thermique sur la tension est atténué. La course du contrepoids est le paramètre dimensionnant (minimum 270 mm pour $\Delta T = 60$ degC).

III.7.2 Recommandations constructives

- **Choix du câble** : câble porteur-tracteur clos de diamètre $d \geq 48 \text{ mm}$, classe de résistance $\geq 1570 \text{ N/mm}^2$, avec une charge de rupture minimale certifiée $F_{min} \geq 2160 \text{ kN}$.
- **Dispositif de tension** : contrepoids libre avec course suffisante ($\geq 1,5 \text{ m}$ en incluant allongement permanent, thermique et réserve d'exploitation) pour maintenir la tension dans la plage surveillée.
- **Poulie motrice** : envisager une double poulie ou une poulie à angle d'enroulement augmenté ($\alpha > \pi$) pour satisfaire l'exigence d'adhérence. Alternier la spécification d'une garniture à coefficient de frottement certifié $\mu \geq 0,35$ (valeur à confirmer par essais).
- **Galets de pylône** : Galets de diamètre suffisant, avec un rapport D/d choisis de manière à assurer la reprise de l'effort vertical imposé par le constructeur, équipés d'une garniture souple afin de réduire les contraintes de flexion dans le câble grâce à un faible module d'élasticité du revêtement.
- **Dispositifs anti-déversement** : prévoir des rattrape-câbles sur les pylônes critiques, en particulier ceux où la charge d'appui est la plus faible (pylônes de crête ou en haut de portée).

III.8. Conclusion

Ce chapitre a développé une analyse mécanique complète de la tension des câbles porteurs-tracteurs d'une télécabine monocâble, en suivant rigoureusement le cadre normatif imposé par la série NF EN 12 927/12 930/13 107 et le guide technique national STRMTG.

Sur le plan de la modélisation mécanique, la théorie de la chaînette s'est révélée être l'outil analytique fondamental. Sa dérivée rigoureuse à partir de l'équilibre infinitésimal du câble a permis d'établir les relations constitutives reliant la flèche h , la demi-portée l et la tension horizontale $T_h = q \cdot l^2 / (2h)$, valables dans le domaine de l'approximation parabolique ($h/l < 15 \%$). Pour les cas de charges concentrées et les grandes déformations, la méthode de la chaîne discrète, résolue par relaxation dynamique avec amortissement cinétique, a été présentée comme alternative numérique.

Les calculs numériques ont quantifié les tensions de la portée de référence ($L = 750 \text{ m}$, $\Delta h = 210 \text{ m}$, $h = 35 \text{ m}$) : tension horizontale $T_h = 474,8 \text{ kN}$, tension maximale à l'appui amont $T_{max} = 493,7 \text{ kN}$. Le cas de charge le plus défavorable (pleine charge en exploitation avec givre complet) élève la tension à environ 540 kN , imposant une charge de rupture minimale du câble de $2\,160 \text{ kN}$.

Les effets environnementaux ont été quantifiés avec précision : le givre (épaisseur 22 mm , charge $28,5 \text{ N/m}$) augmente la charge linéique de 35% hors exploitation ; le vent en exploitation induit une déviation latérale de $2,13 \text{ m}$, déterminante pour le gabarit libre ; les oscillations longitudinales des véhicules atteignent la valeur minimale normative de $0,34 \text{ rad}$; les effets

thermiques ($\Delta T = 60 \text{ degC}$) imposent une course de contrepoids de **270 mm**, atténue en présence d'un dispositif de régulation.

Les vérifications réglementaires ont confirmé la conformité du dimensionnement pour la majorité des critères : sécurité à la traction ($S = 4,35 > 4,0$), sécurité à la flexion ($D/d = 80$), charges d'appui minimales (largement satisfaites). Le seul point de non-conformité identifié concerne l'adhérence sur la poulie motrice pour une poulie simple standard, qui nécessite une conception renforcée.

Chapitre IV :
Maintenance des installations de
télécabines : contrôle, inspection
et sécurité d'exploitation

IV.1. Introduction

La maintenance des installations de transport par câble, et en particulier des télécabines, constitue une discipline à part entière dont les enjeux dépassent la simple préservation des équipements. Elle engage directement la sécurité des passagers, la disponibilité commerciale de l'installation, et la maîtrise du paramètre fondamental qu'est la tension du câble porteur-tracteur. [22][2]

La maintenance d'une télécabine ne saurait être appréhendée comme un ensemble d'opérations ponctuelles et indépendantes. Elle s'inscrit au contraire dans une logique systémique où chaque composant entretient des interactions mécaniques et fonctionnelles avec les autres. La tension du câble porteur-tracteur, dont l'étude fait l'objet du chapitre précédent, constitue précisément l'une de ces variables transversales : elle dépend de l'état du système de tension implanté en station, de la géométrie des pylônes, de l'usure des galets et du comportement mécanique du câble lui-même. En retour, une tension mal maîtrisée accélère la dégradation de l'ensemble des composants en contact avec le câble, créant une boucle de couplage que seule une maintenance rigoureuse permet de rompre. [22][10]

Ce chapitre a pour objectif de présenter de manière exhaustive les pratiques de maintenance propres aux télécabines, en couvrant successivement les stations motrices et de retour, les pylônes, les câbles et leurs épissures, les méthodes de contrôle non destructif, et enfin les stratégies de maintenance (préventive, corrective, prédictive) au regard de la sûreté de fonctionnement de ces installations. Chaque section établira le lien entre les opérations de maintenance décrites et leur impact sur la tension du câble, afin de placer ce chapitre en cohérence directe avec l'étude mécanique développée précédemment.

IV.2. Objectifs de la maintenance des télécabines

Les objectifs assignés à la maintenance d'une installation de télécabine peuvent être regroupés en trois catégories interdépendantes : la sécurité, la disponibilité et la durabilité. [22]

L'objectif de sécurité est le plus impérieux. Il consiste à garantir, à chaque instant de l'exploitation, que l'installation se trouve dans un état conforme aux exigences réglementaires, et notamment que les composants critiques pour la sécurité des passagers (câbles, pinces, freins, systèmes de tension) présentent des caractéristiques mécaniques supérieures aux valeurs minimales prescrites. Cet objectif est traduit opérationnellement par des obligations de contrôle systématiques avant chaque mise en service, par des inspections périodiques annuelles et pluriannuelles (grande inspection), et par des critères de dépose définis pour chaque composant. [22][2]

L'objectif de disponibilité traduit la contrainte économique à laquelle sont soumis les exploitants, en particulier dans les domaines skiables où la fenêtre d'exploitation est limitée à quelques mois par an. Une immobilisation non planifiée en haute saison peut engendrer des pertes financières considérables et avoir un impact direct sur la clientèle. La maintenance préventive, en anticipant les défaillances et en planifiant les interventions hors saison, constitue le principal levier d'optimisation de la disponibilité.

L'objectif de durabilité vise à maximiser la durée de vie des composants et de l'installation dans son ensemble. Une télécabine représente un investissement considérable, dont la valorisation sur le long terme suppose que les composants onéreux « câbles, poulies, réducteur » atteignent leur durée de vie théorique prévue par le fabricant. La maintenance préventive et conditionnelle, en permettant de détecter les dégradations avant qu'elles ne deviennent irréversibles, contribue directement à cet objectif. [3]

IV.3. Maintenance de la station motrice

La station motrice constitue le cœur opérationnel d'une télécabine. Elle abrite l'ensemble des organes de motorisation, de commande et de sécurité qui assurent la mise en mouvement et la régulation du câble. Sa maintenance est d'une complexité particulière car elle intègre à la fois des composants électromécaniques soumis à des cycles de sollicitation importants et des organes mécaniques de précision dont le bon état conditionne directement la tension du câble. [22]

IV.3.1 Maintenance du moteur principal

Le moteur principal d'entraînement d'une télécabine moderne est un moteur électrique asynchrone à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence (variateur de vitesse). Sa maintenance couvre plusieurs domaines : la surveillance électrique (mesure périodique de la résistance d'isolement des enroulements statoriques, contrôle de la symétrie des courants de phase, analyse spectrale du courant d'alimentation pour détecter les défauts de barres de rotor), la surveillance mécanique (analyse vibratoire des paliers de roulement, mesure de température par thermographie infrarouge) et la maintenance électrique (nettoyage des enroulements, vérification du serrage des connexions, contrôle du jeu des paliers). [22][23]

L'analyse vibratoire des roulements est particulièrement importante car ces composants sont soumis à des charges importantes dues au poids du câble, transmises via la poulie motrice et le réducteur. Un défaut de roulement se manifeste par des raies caractéristiques dans le spectre vibratoire (fréquences BPFO, BPFI, BSF et FTF), détectables dès les premiers stades de la dégradation, bien avant l'apparition de tout symptôme perceptible à l'oreille. La périodicité des relevés vibratoires est généralement mensuelle en période d'exploitation et trimestrielle hors exploitation. [11][23]

Le lien entre l'état du moteur et la tension du câble est indirect mais réel : un moteur présentant des déséquilibres de phases ou des défauts de roulements avancés peut générer des oscillations de couple transmises à la poulie motrice, se répercutant en variations cycliques de la tension du câble. Ces variations, même de faible amplitude, contribuent à la fatigue des fils constitutifs du câble et doivent donc être surveillées.

IV.3.2 Maintenance du moteur de secours

Le moteur de secours (généralement un groupe électrogène diesel dont la puissance est calculée pour permettre l'évacuation complète de la ligne à vitesse réduite) est soumis à des exigences de disponibilité particulièrement strictes. Des essais périodiques de démarrage et de fonctionnement sont consignés dans le registre d'exploitation. Ces essais comprennent un démarrage à froid mensuel d'une durée minimale permettant d'atteindre la température de régime, un test de prise en charge sous charge nominale semestriel, et une révision complète selon les préconisations du constructeur. [22]

La maintenance du moteur de secours comprend le renouvellement de l'huile moteur et des filtres selon le calendrier constructeur (généralement tous les 250 à 500 heures de fonctionnement ou annuellement), la vérification et le remplacement des courroies d'accessoires, le contrôle du système de refroidissement (niveaux, état des durites, propreté du radiateur), le contrôle de la batterie de démarrage, et la vérification du stock de carburant avec traitement anti-algues si l'installation est exposée à des longues périodes d'inactivité.

IV.3.3 Maintenance du réducteur

Le réducteur est l'un des composants les plus critiques de la chaîne cinématique. Sa maintenance repose sur trois axes principaux : la surveillance de l'huile, l'analyse vibratoire et les inspections visuelles périodiques. [22]

L'analyse de l'huile de réducteur constitue l'outil de maintenance conditionnelle le plus efficace pour ce composant. Elle est réalisée à une fréquence typiquement semestrielle et comprend la mesure de la viscosité cinématique (détection d'un changement de grade ou d'une contamination par eau), la ferrographie (quantification et morphologie des particules métalliques en suspension permettant d'identifier la nature de l'usure : adhésive, abrasive, par fatigue), la spectrométrie d'émission atomique (mesure des concentrations en éléments d'usure : Fe, Cr, Cu, Al) et la mesure de l'indice d'acidité (TAN) révélatrice d'une dégradation avancée du lubrifiant. Les seuils d'alerte sont définis en concertation avec le fabricant du réducteur et la norme ISO 4406 pour la propreté. [11][24]

L'analyse vibratoire du réducteur permet de détecter l'usure des dentures par l'apparition de raies aux fréquences d'engrènement (TMF) et de leurs harmoniques dans le spectre d'accélération. Les bandes latérales autour des raies d'engrènement, modulées à la fréquence de rotation des arbres, sont caractéristiques des défauts de dentures excentrées ou fissurées. Ces signatures permettent d'anticiper les remplacements et d'éviter les ruptures catastrophiques en service.

L'impact de l'état du réducteur sur la tension du câble se manifeste par la transmission du jeu angulaire entre les roues dentées : un jeu excessif dû à une usure avancée génère des chocs cycliques à chaque changement de sens d'effort (variations de charge liées à la circulation des cabines) qui se propagent jusqu'au câble sous forme d'oscillations de tension.

IV.3.4 Maintenance des freins

Le système de freinage d'une télécabine est un composant de sécurité au sens du règlement (UE) 2016/424. Sa maintenance est donc soumise à des exigences particulièrement strictes. Le contrôle du système de freinage fait partie des vérifications quotidiennes obligatoires avant chaque mise en service. [22][19]

La maintenance des freins à disque comprend la mesure périodique de l'épaisseur des garnitures de friction (avec remplacement systématique dès atteinte de l'épaisseur minimale prescrite par le fabricant), la vérification de la planéité des disques (mesure du faux-rond et du voile par comparateur), le contrôle de la course d'application et du jeu au desserrage, la vérification des pressions hydrauliques d'actionnement et de desserrage, et l'essai fonctionnel de la chaîne de sécurité commandant le déclenchement automatique (fail-safe).

Le test périodique des performances de freinage est obligatoire selon des modalités précisées dans le règlement d'exploitation de l'installation. Il consiste à mesurer la décélération effective lors d'un freinage d'urgence déclenché à la vitesse nominale, et à vérifier que cette décélération est conforme aux valeurs prescrites par les normes (EN 13223) et par les calculs de dimensionnement. Un freinage insuffisant peut résulter d'une usure des garnitures, d'un empoisonnement des surfaces de friction par un lubrifiant, ou d'une défaillance du système hydraulique d'actionnement.

La relation entre le freinage et la tension du câble est critique lors des arrêts d'urgence : une décélération trop brusque génère des surcharges dynamiques dans le câble pouvant atteindre 1,5 à 2 fois la tension nominale. Le réglage optimal du système de freinage vise à obtenir une décélération suffisamment rapide pour la sécurité, sans générer de sollicitations dynamiques excessives dans le câble. [22][19]

IV.3.5 Maintenance de la poulie motrice

La poulie motrice est l'organe de transmission de la puissance du moteur au câble. Sa maintenance comprend la surveillance de la garniture de friction (mesure périodique de l'épaisseur et de la dureté Shore, inspection visuelle de l'état de surface pour détecter craquelures, écaillage ou contamination), la vérification de la concentricité et du faux-rond (mesure au comparateur avec seuil typique de 0,5 mm), le contrôle des paliers de support (mesure de température, analyse vibratoire), et la vérification du serrage des assemblages boulonnés. [22]

L'usure de la garniture de friction est un paramètre directement lié à la tension du câble : une garniture usée présente un coefficient de frottement réduit. Pour maintenir la capacité de transmission de l'effort moteur, il est alors nécessaire d'augmenter la tension du brin mou, avec toutes les conséquences que cela implique sur la fatigue du câble et sur la sollicitation des autres composants. [22][5]

Le tableau suivant récapitule les opérations de maintenance de la station motrice, leur fréquence et les paramètres de surveillance associés.

Composant	Opération	Fréquence	Paramètre / Critère
Moteur principal	Analyse vibratoire roulements	Mensuelle (exploitation)	Vitesse vibratoire (ISO 10816) < 4,5 mm/s
Moteur principal	Mesure résistance isolation	Semestrielle	Isolation > 10 MΩ (à 500 V DC)
Moteur de secours	Test démarrage à froid	Mensuelle	Démarrage < 10 s, T° régime atteinte
Moteur de secours	Vidange huile + filtres	Annuelle ou 250 h	Selon préconisation constructeur
Réducteur	Analyse d'huile (ferrographie, ICP)	Semestrielle	Particules Fe < seuil fabricant
Réducteur	Analyse vibratoire (FFT)	Mensuelle	Raies engrenement stables
Freins	Mesure épaisseur garnitures	Mensuelle + saisonnière	Épaisseur > épaisseur mini prescrite
Freins	Test déclenchement + décélération	Journalière + saisonnière	Décélération conforme EN 13223
Poulie motrice	Mesure épaisseur garniture	Saisonnière	Shore A > valeur mini constructeur
Poulie motrice	Contrôle faux-rond	Saisonnière	Faux-rond < 0,5 mm
Système de tension	Mesure pression vérins / contrepoids	Journalière	Pression dans plage $\pm 5\%$ valeur nominale

Tableau 9 Programme de maintenance de la station motrice

IV.4. Maintenance de la station retour

La station retour abrite la poulie de renvoi et « dans la plupart des configurations de télécabines modernes » le système de tension par contrepoids ou par vérins hydrauliques. Si sa maintenance est généralement moins complexe que celle de la station motrice (absence de motorisation principale), elle est en revanche directement liée au paramètre de tension du câble, ce qui en fait un site de surveillance prioritaire. [22]

La maintenance de la poulie de renvoi (poulie folle) comprend le contrôle des paliers de support (analyse vibratoire, mesure de température), la vérification de la coaxialité et du faux-rond, et l'inspection de la gorge de câble (détection de dommages superficiels susceptibles d'endommager le câble lors de son passage). La poulie de renvoi ne transmettant aucun couple

moteur, l'absence de garniture de friction simplifie sa maintenance par rapport à la poulie motrice.

La maintenance du système de tension est l'opération la plus critique de la station retour. Pour un système à contrepoids, elle comprend la vérification de la masse du contrepoids (dépose et pesée annuelle ou après toute intervention), l'inspection des câbles de levage du contrepoids (contrôle visuel et dimensionnel), la lubrification des rails de guidage du chariot mobile, et la vérification de la course disponible (distance entre la position courante du chariot et les fins de course). Une course insuffisante peut indiquer un allongement excessif du câble principal nécessitant une intervention (reprise d'épissure ou remplacement). [22][16]

Pour un système de tension hydraulique, la maintenance comprend le contrôle du niveau et de l'état de l'huile hydraulique (analyse périodique), la vérification de l'absence de fuites sur les vérins et les flexibles, le contrôle des pressions de service et de la pression de consigne, et l'étalonnage annuel des capteurs de pression et de position. La précision du système de tension hydraulique étant supérieure à celle d'un contrepoids, son maintien en bon état conditionne directement la régulation de la tension du câble en réponse aux variations de charge en ligne.

IV.5. Maintenance des pylônes et supports intermédiaires

IV.5.1 Maintenance des galets

Les galets sont les éléments de contact entre le câble et la tête de pylône. Leur état conditionne directement la qualité du guidage du câble, les pertes par frottement (et donc la distribution de la tension), et la durée de vie du câble lui-même. Un galet dont le roulement interne est grippé ou endommagé ne tourne plus librement : au lieu d'un contact roulant câble-galet, on obtient un contact glissant extrêmement sévère qui génère une usure très rapide de la bande de roulement du galet et des fils externes du câble, ainsi qu'un échauffement local pouvant dégrader le lubrifiant du câble. [22][10]

La détection des galets grippés peut être réalisée par plusieurs méthodes complémentaires. La thermographie infrarouge, réalisée au passage d'une cabine depuis un véhicule de service, permet de détecter les points chauds caractéristiques d'un roulement défaillant. La surveillance vibratoire, par accéléromètre fixé sur le balancier, permet d'identifier les signatures fréquentielles caractéristiques d'un roulement endommagé (billes défectueuses, piste intérieure ou extérieure fissurée). L'inspection visuelle, réalisée lors des rondes de maintenance, permet de détecter les dommages superficiels de la bande de roulement (écaillage, plats d'usure, entailles).

La fréquence de maintenance des galets est définie en fonction du type d'installation et des conditions d'exploitation. La lubrification des roulements de galets est réalisée au graisseur centralisé ou individuellement selon la conception de la tête de pylône. Le remplacement des galets usés est une opération planifiée généralement réalisée lors des grandes révisions saisonnières.

L'impact de l'état des galets sur la tension du câble est quantifiable : la perte de tension lors du passage du câble sur un galet est proportionnelle à la force normale au contact et au coefficient de frottement galet-câble. Un galet grippé, avec un coefficient de glissement très supérieur au

coefficient de roulement nominal, multiplie cette perte de tension par un facteur pouvant dépasser 10. La multiplication de ces pertes le long de la ligne peut conduire à des inégalités de tension entre le brin montant et le brin descendant dépassant les tolérances prescrites. [22][16]

IV.5.2 Maintenance des sabots

Les sabots assurent le guidage latéral du câble au niveau des galets, empêchant tout déplacement transversal excessif susceptible de conduire au déjantage du câble. Leur maintenance comprend la mesure périodique de l'usure par contact (mesure au pied à coulisse des cotes caractéristiques), la vérification de l'absence de fissures ou de déformations, et le contrôle du jeu entre le câble et les faces actives des sabots. [22]

Un sabot présentant une usure excessive ne remplit plus efficacement sa fonction de guidage latéral, ce qui se traduit par des oscillations latérales du câble amplifiées, pouvant conduire à l'arrachement des cabines dans les cas extrêmes. De plus, un câble mal guidé latéralement peut se décentrer sur les galets, modifiant le profil de contact et accélérant l'usure localisée du câble.

IV.5.3 Maintenance des balanciers

Le balancier est la pièce articulée qui porte les galets sur la tête de pylône et permet un léger débattement transversal du câble. Sa maintenance comprend la lubrification de l'axe d'articulation, la vérification du débattement angulaire (conformité à la plage prescrite par le fabricant), et l'inspection visuelle des éléments de structure (fissures de fatigue, déformations permanentes). Les balanciers sont soumis à des sollicitations cycliques importantes liées au passage répété des cabines et aux oscillations du câble sous l'effet du vent. [22]

IV.6. Maintenance du câble porteur-tracteur

Le câble porteur-tracteur est le composant le plus critique de l'installation et celui dont la maintenance est la plus complexe et la plus réglementée. En service, il est soumis à un régime de sollicitation mécanique sévère résultant de la combinaison d'une traction directe due au poids des cabines et à la résistance de la ligne, de flexions répétées à chaque passage sur les galets et les poulies, et de contraintes de contact locales aux points d'appui. Ces sollicitations combinées sont à l'origine de mécanismes de dégradation multiples : fatigue des fils, corrosion interne et externe, usure par abrasion et fretting, et déformation plastique. [15][10]

IV.6.1 Inspection visuelle du câble

L'inspection visuelle est la méthode de surveillance la plus basique mais également l'une des plus importantes car elle permet de détecter les défauts superficiels accessibles à l'œil nu. Elle est réalisée à chaque mise en service « contrôle journalier », lors des rondes de maintenance hebdomadaires, et dans le cadre des inspections périodiques annuelles et pluriannuelles. L'inspecteur progresse le long de la ligne depuis un véhicule de service ou depuis les pylônes accessibles, en examinant l'ensemble de la surface externe du câble. [22][2]

Les défauts recherchés lors de l'inspection visuelle comprennent les fils rompus en surface (reconnaissables à leurs extrémités caractéristiques), les déformations locales du câble (coudes, déformations hélicoïdales, « nœuds de singe »), les traces de corrosion (rouille superficielle, corrosion sous coiffe), les anomalies de la garniture de graissage (zones sèches, contamination), et les marques d'usure au contact des galets et sabots (méplats, sillons). Tout défaut détecté est consigné dans le registre d'exploitation avec sa localisation et sa gravité, et soumis à une évaluation par rapport aux critères de dépose.

IV.6.2 Contrôle dimensionnel du câble

Le contrôle dimensionnel comprend la mesure régulière du diamètre résiduel du câble en différents points de la ligne. Le diamètre est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse ou d'un dispositif de mesure optique, selon deux directions orthogonales pour tenir compte des déformations d'ovalisation. Une réduction de diamètre par rapport à la valeur nominale indique une réduction de section résistante, résultant soit d'une usure externe par abrasion, soit d'une réduction plastique due à un écrasement sur les galets. [2][22]

La réduction de diamètre est l'un des indicateurs permettant d'estimer cette réduction de section, complémentairement au contrôle non destructif par flux magnétique. La relation entre la réduction de diamètre et la réduction de section n'est pas simple car elle dépend de la construction du câble (spirale, torons) et de l'origine de la réduction (usure externe vs compression interne).

IV.6.3 Lubrification du câble

La lubrification du câble en service est une opération de maintenance préventive visant à maintenir la protection anticorrosion des fils internes et à réduire le frottement inter-fils à l'origine du fretting fatigue. Le câble perd progressivement sa graisse de fabrication sous l'effet des cycles de flexion (expulsion centrifuge) et du lessivage par les eaux météoriques. Le regraissage est réalisé à l'aide d'un dispositif de graissage sous pression permettant d'appliquer la graisse sur le câble en mouvement, à une fréquence définie en fonction des conditions d'exploitation (généralement semestrielle à annuelle). [22][15]

Le choix de la graisse est critique : elle doit présenter une viscosité adaptée permettant la pénétration entre les fils (suffisamment fluide), une excellente résistance à l'eau (pour ne pas être lessivée), une bonne adhérence sur l'acier (pour rester en place entre les regraissages), et être compatible chimiquement avec la graisse existante pour éviter tout phénomène de séparation de phases ou de saponification. La compatibilité avec la matière des galets en élastomère est également à vérifier. L'application d'une graisse incompatible peut conduire à un gonflement de la matière des galets et à une dégradation accélérée de ces derniers.

IV.7. Contrôles non destructifs des câbles

Les contrôles non destructifs (CND) des câbles constituent la méthode de surveillance la plus fiable pour évaluer l'état de santé interne d'un câble en service. Ils permettent de détecter des défauts inaccessibles à la simple inspection visuelle : fils rompus internes, zones de corrosion localisée, réductions de section métallique. La réglementation est particulièrement stricte sur ce point, elle impose que les câbles neufs fassent l'objet d'un CND par un vérificateur agréé avant la mise en exploitation, et les câbles en service sont soumis à des CND périodiques selon ses modalités. [22][2]

IV.7.1 Contrôle par flux de fuite magnétique (MFL)

Le contrôle par flux de fuite magnétique (MFL) est la méthode de référence pour l'inspection des câbles d'acier en service. Son principe repose sur la magnétisation longitudinale du câble par un électro-aimant permanent ou électrique embarqué dans le dispositif de contrôle. En l'absence de défaut, les lignes de champ magnétique se propagent exclusivement à l'intérieur du câble. En présence d'un défaut (fil rompu, zone de corrosion réduisant la section métallique), une partie du flux magnétique « fuit » hors du câble est détectée par des capteurs à effet Hall positionnés à la surface du câble. [22][2]

Le dispositif MFL coulisce le long du câble à vitesse constante, enregistrant en continu le signal des capteurs. Le traitement du signal permet de distinguer deux types d'informations complémentaires : les réductions locales de section (LMA), caractérisées par une variation lente du signal correspondant à une perte globale de section sur une longueur significative (corrosion généralisée, usure régulière) ; et les défauts ponctuels (LF), caractérisés par des pics aigus du signal correspondant à des ruptures de fils individuels.

L'interprétation des résultats MFL requiert une qualification spécifique (COFREND niveau 2 en CND magnétique, ou qualification équivalente). Les valeurs mesurées sont exprimées en pourcentage de réduction de la section métallique effective (%RMS) et comparées aux critères de dépose définis réglementairement. Ces critères varient selon le type de câble, son emplacement dans l'installation (câble porteur, câble tracteur, câble porteur-tracteur) et la nature du défaut détecté.



Figure 51 Contrôleur par flux de fuite magnétique [39]

IV.7.2 Autres méthodes de contrôle non destructif

Outre le MFL, d'autres méthodes de CND trouvent des applications spécifiques dans l'inspection des câbles de téléphériques. Le contrôle par ultrasons (Figure 52) est utilisé pour l'inspection des attaches et des culots coulés (qui sont des dispositifs terminaux utilisés pour fixer solidement l'extrémité d'un câble), là où la méthode MFL est difficilement applicable. Il permet de détecter les fissures internes et les délaminations dans les zones d'ancrage. La magnétoscopie (Figure 53) est utilisée pour l'inspection des surfaces des composants métalliques non câblés (poulies, balanciers, pinces) pour la détection de fissures superficielles et sous-superficielles. Le ressuage permet de détecter les fissures débouchantes sur les surfaces accessibles. [22][10]



Figure 52 contrôle par ultrasons [40]



Figure 53 Magnétoscopie [41]

La radiographie industrielle, bien que peu utilisée pour les câbles en raison de leur géométrie, peut être employée pour contrôler les culots coulés et les zones d'ancrage de grande importance structurale. L'émission acoustique est une technique émergente qui permet la surveillance continue du câble en service par détection des ondes élastiques émises lors de la propagation de fissures ou de la rupture de fils.

IV.7.3 Fréquence des contrôles et critères de dépose

Les fréquences minimales de CND des câbles sont définies par l'Annexe 1 de l'arrêté du 7 août 2009. Elles dépendent du type de câble et de la fréquence d'exploitation. De manière générale, les câbles porteurs-tracteurs des télécabines monocâbles sont soumis à un CND annuel par un vérificateur agréé, avec possibilité d'inspections complémentaires prescrites après tout événement susceptible d'avoir affecté l'état du câble (arrêt d'urgence violent, contact avec un obstacle, chute de neige exceptionnelle, etc.). [2][22]

Les critères de dépose des câbles constituent les valeurs limites au-delà desquelles le câble doit obligatoirement être remplacé. Ces critères portent principalement sur le pourcentage de réduction de la section métallique résistante (%RMS) mesuré par MFL, sur le nombre de fils rompus par longueur de référence (pas de câblage), et sur le diamètre résiduel. Ils sont différenciés selon que les défauts sont localisés dans des zones courantes de la ligne, au droit des galets de pylônes (zones de flexion intensive), ou dans les zones d'épissure.

Critère de dépose	Zone courante	Zone de galet / pylône	Zone d'épissure
Réduction de section (%RMS)	> 10 %	> 7 %	> 6 %
Fils rompus / pas de câblage	> 6 fils (câble 6 torons)	> 4 fils	> 2 fils
Réduction de diamètre	> 10 % Ø nominal	> 8 % Ø nominal	Non applicable
Fil rompu à l'épissure	—	—	Tout fil rompu = remplacement
Qualification inspecteur	COFREND 2 minimum	COFREND 2 minimum	COFREND 2 minimum

Tableau 10 Critères de dépose des câbles porteurs-tracteurs

IV.8. Épissurage des câbles

IV.8.1 Contrôle des épissures

Le contrôle de réception d'une épissure comprend un examen visuel complet de la zone épissée (vérification du respect de la longueur minimale, des décalages de coupes, de l'absence de fils en éperon), une mesure du diamètre reconstitué, et un contrôle MFL par un vérificateur agréé réalisé après la mise en tension du câble. Ce dernier contrôle est particulièrement important car il permet de détecter les éventuelles ruptures de fils survenues lors du battage et de vérifier le profil de section sur toute la longueur de l'épissure. [22]

En cours de service, l'épissure fait l'objet d'une surveillance renforcée lors des inspections périodiques. Les critères de dépose sont plus restrictifs dans la zone d'épissure qu'en zone courante car le rendement mécanique de l'épissure est inférieur à celui du câble sain, ce qui réduit la marge de sécurité disponible. La détection de tout fil rompu dans la zone d'épissure impose le remplacement immédiat du câble.

IV.8.2 Impact de l'épissure sur la résistance et la tension du câble

L'épissure influence la distribution de la tension dans le câble de deux manières distinctes. D'une part, la surépaisseur locale (diamètre de l'épissure légèrement supérieur à celui du câble sain) augmente la force normale au contact lors du passage de l'épissure sur les galets, ce qui se traduit par une variation locale de la force de réaction et par une légère perturbation de la

distribution de tension dans les tronçons encadrant le pylône concerné. Cette perturbation est périodique et liée à la cadence de passage de l'épissure. [22]

D'autre part, la rigidité axiale de l'épissure est légèrement inférieure à celle du câble sain en raison de la géométrie complexe des torons entrelacés. Cette différence de rigidité crée une zone de transition dans laquelle les déformations axiales sont accentuées, contribuant à la fatigue des fils à l'interface entre la zone épissée et le câble sain. C'est pourquoi les critères de surveillance de l'épissure intègrent non seulement la zone entrelacée mais aussi les zones de câble sain situées à environ un demi-pas de câblage de chaque côté de l'épissure.

IV.9. Relation entre maintenance et tension du câble

La tension du câble porteur-tracteur constitue un indicateur synthétique de l'état de l'ensemble de l'installation. Sa valeur et son évolution au cours du temps reflètent à la fois l'état des composants mécaniques (galets, poulies, réducteur) et les propriétés mécaniques intrinsèques du câble (rigidité axiale, allongement plastique cumulé). La surveillance de la tension peut donc être considérée comme un outil de maintenance à part entière, complémentaire des méthodes de surveillance individuelles des composants. [22][16]

L'allongement progressif du câble au cours de sa durée de vie constitue l'une des manifestations les plus directes du vieillissement. Cet allongement résulte de deux phénomènes distincts : la déformation plastique des fils sous l'effet de la tension de service (fluage à froid), et le réarrangement géométrique des torons sous les efforts de flexion répétés (compaction de la structure hélicoïdale). Il se traduit opérationnellement par la réduction progressive de la course disponible du système de tension : le chariot du système à contrepoids se déplace vers la position de course maximale, ou les vérins du système hydraulique doivent être réalimentés plus fréquemment. La surveillance de la position du chariot de tension constitue donc un indicateur simple mais efficace du taux d'allongement cumulé du câble. [15][16]

Les variations saisonnières de la tension constituent un autre paramètre de surveillance important. Un câble correctement mis en tension en été (température élevée, câble long) présentera une tension plus élevée en hiver (température basse, câble court par rétractation thermique). Ce phénomène est anticipé lors du dimensionnement du système de tension, dont la course doit être suffisante pour absorber les variations thermiques saisonnières sans que la tension ne sorte des plages prescrites. Une variation de tension saisonnière anormalement élevée peut indiquer une modification des caractéristiques thermiques du câble (oxydation des fils modifiant le coefficient de dilatation effectif) ou un blocage partiel du système de tension.

Les mesures de tension réalisées dans le cadre du programme de maintenance permettent d'établir une base de données historique permettant de calculer l'évolution à long terme de la tension et d'en extrapoler les valeurs futures. Cette approche prédictive permet d'anticiper les interventions sur le système de tension et de planifier les remplacements de câble bien avant que les critères de dépose ne soient atteints, dans un contexte où les opérations de remplacement de câble nécessitent une immobilisation prolongée de l'installation.

IV.10. Stratégies de maintenance : préventive, corrective et prédictive

IV.10.1 Maintenance préventive dans les télécabines

La maintenance préventive systématique constitue le socle du programme de maintenance d'une télécabine. Elle est organisée selon plusieurs niveaux de périodicité, définis par la réglementation et par les préconisations constructrices. Au niveau le plus fin, les contrôles journaliers avant mise en service constituent une forme de maintenance préventive de premier niveau : ils permettent de détecter les défauts apparus depuis la dernière exploitation et de décider de la mise en service ou de l'immobilisation de l'installation. Ces contrôles comprennent notamment la vérification de l'absence de corps étrangers sur la ligne, le test des dispositifs de sécurité, la vérification des niveaux de fluides, et un tour de ligne à basse vitesse. [22][2]

Les inspections périodiques annuelles constituent le deuxième niveau de maintenance préventive. Elles comprennent une révision systématique de l'ensemble des composants mécaniques et électromécaniques de l'installation, incluant le démontage et le contrôle des organes d'entraînement, la révision des pinces de câble, le contrôle dimensionnel et visuel des câbles, et la vérification des dispositifs de sécurité. Ces inspections sont réalisées hors saison d'exploitation, pendant la période d'intersaison, par les équipes de maintenance de l'exploitant et par des organismes de vérification agréés pour les composants critiques.

Les grandes inspections constituent le troisième niveau, à caractère pluriannuel. La première grande inspection doit être réalisée au plus tard après 22 500 heures de fonctionnement sans excéder 15 ans après la mise en exploitation. Elle consiste en un examen approfondi et complet de l'installation, généralement à l'issue d'un démontage de ses principaux composants, par un organisme qualifié agréé. Les grandes inspections sont réalisées selon les modalités des normes déjà mentionner.

IV.10.2 Maintenance corrective

La maintenance corrective dans les télécabines est soumise à des contraintes particulièrement strictes découlant des exigences de sécurité. Tout défaut détecté lors d'une inspection ou d'un contrôle en exploitation doit faire l'objet d'une évaluation immédiate permettant de décider soit de la poursuite de l'exploitation (si le défaut est clairement en deçà des critères de dépose et ne présente pas de risque d'aggravation rapide), soit de l'immobilisation de l'installation dans l'attente d'une intervention corrective (si le défaut approche ou dépasse un seuil limite). Cette décision engage la responsabilité de l'exploitant et doit être tracée dans le registre d'exploitation. [22][2]

Le remplacement d'un composant de sécurité par un composant identique ou équivalent nécessite une procédure documentée, un contrôle de réception du composant de remplacement, et une vérification du bon fonctionnement après remontage. Tout remplacement de câble, en particulier, implique la réalisation d'une nouvelle épissure et d'un CND complet avant la mise en exploitation.

IV.10.3 Maintenance prédictive et conditionnelle

La maintenance prédictive connaît un développement croissant dans le domaine des remontées mécaniques, sous l'impulsion des technologies de l'Industrie 4.0. Les installations modernes sont de plus en plus équipées de systèmes de surveillance continue permettant d'acquérir en temps réel les données nécessaires à l'évaluation de l'état de santé des composants critiques. Pour les câbles, les progrès des techniques d'analyse du signal MFL permettent désormais d'établir des modèles de prédiction de la durée de vie résiduelle basés sur l'évolution historique des indicateurs de dégradation (taux de réduction de section, nombre de fils rompus cumulés), les conditions d'exploitation (nombre de cycles de flexion, charges maximales appliquées) et les conditions environnementales (température, humidité, exposition à des agents corrosifs). [22][11]

Pour les équipements mécaniques de la station motrice (roulements, engrenages), les algorithmes d'analyse vibratoire par apprentissage automatique (machine learning) permettent de détecter des signatures de dégradation imperceptibles par les méthodes conventionnelles, et d'estimer la durée de vie résiduelle avec une précision significativement supérieure. La mise en œuvre d'un jumeau numérique de l'installation, alimenté en temps réel par les données de capteurs, permettrait de simuler l'évolution future des paramètres de l'installation et d'optimiser dynamiquement le programme de maintenance, en arbitrant en permanence entre les coûts de maintenance préventive et les risques de défaillance.

Type de maintenance	Déclencheur	Avantages	Inconvénients / Limites
Préventive systématique	Calendrier fixe (heures, saisons, années)	Simple à planifier, réduction du risque de défaillance en service	Remplacement parfois prématuré de composants encore fonctionnels
Corrective	Défaillance détectée ou survenue	Utilisation maximale de la durée de vie des composants	Risque de conséquences en cascade, immobilisation non planifiée
Conditionnelle (CBM)	Franchissement de seuil sur paramètre physique mesuré	Optimisation des intervalles, réduction des coûts	Nécessite système de mesure et seuils bien définis
Prédictive	Modèle prévisionnel basé sur données historiques et IA	Anticipation maximale, planification optimisée	Coût d'instrumentation élevé, modèles à calibrer

Tableau 11 Comparaison des stratégies de maintenance appliquées aux télécabines

IV.11. Sûreté de fonctionnement des installations de télécabines

La sûreté de fonctionnement (SdF) des télécabines est appréhendée dans les cadres réglementaires à travers l'obligation d'établir et de maintenir à jour un Système de Gestion de la Sécurité (SGS). Le SGS est le cadre organisationnel et documentaire qui structure l'ensemble des activités concourant à la sécurité de l'installation : définition des responsabilités, gestion des compétences du personnel, procédures d'exploitation et de maintenance, gestion des incidents et retour d'expérience, et amélioration continue. [22]

Du point de vue de la théorie de la SdF, les télécabines peuvent être analysées comme des systèmes complexes réparables dont les attributs de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité sont étroitement couplés. La fiabilité du câble porteur-tracteur, qui constitue le composant le plus critique, est modélisée par des lois de durée de vie basées sur les modèles de fatigue des fils (modèle de Wöhler-Miner) et sur les statistiques de rupture observées sur les installations en service. La maintenabilité de l'installation conditionne la durée d'immobilisation lors des interventions de maintenance, et donc la disponibilité commerciale.

La disponibilité opérationnelle d'une télécabine est directement liée à la qualité du programme de maintenance mis en œuvre. Des études réalisées sur des parcs d'installations dans les Alpes françaises [basées sur des données exploitants anonymisées, Monchy et Vernier, 2010] montrent que les installations bénéficiant d'un programme de maintenance préventive rigoureux et d'un suivi CND régulier des câbles présentent des taux de disponibilité en saison supérieurs à 99,5 %, contre des valeurs pouvant descendre à 96 % pour les installations dont le programme de maintenance est insuffisant. Cette différence de disponibilité, apparemment faible en valeur relative, se traduit par plusieurs dizaines d'heures d'immobilisation en saison, avec des impacts économiques considérables. [3][9]

La relation entre la SdF de l'installation et la tension du câble est particulièrement directe. La tension nominale du câble est une variable d'état fondamentale de l'installation : tant qu'elle se maintient dans la plage prescrite, l'installation fonctionne dans ses conditions nominales de conception, avec des facteurs de sécurité garantis vis-à-vis de tous les modes de défaillance critiques. Dès que la tension dérive hors de cette plage (par défaut du système de tension, par allongement excessif du câble ou par modification des charges en ligne) les marges de sécurité se réduisent et le risque de défaillance augmente. La surveillance de la tension du câble constitue donc un indicateur de SdF de premier ordre, dont la mesure et l'interprétation doivent faire partie intégrante de tout programme de maintenance sérieux.

IV.12. Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse exhaustive des pratiques de maintenance propres aux télécabines, en s'appuyant sur les cadres réglementaires. La maintenance de ces installations constitue une discipline à la fois rigoureuse sur le plan réglementaire et complexe sur le plan technique, intégrant des compétences en mécanique des câbles, en tribologie, en électrotechnique et désormais en analyse de données. [22][15][2]

Le fil directeur de ce chapitre a été la relation permanente entre la maintenance et la tension du câble porteur-tracteur. Cette relation est bidirectionnelle : la tension du câble dépend de l'état

des composants qui la génèrent et la contrôlent (système de tension, poulies, galets), et elle conditionne en retour la durée de vie et l'état de santé de l'ensemble des composants en contact avec le câble. Cette circularité impose une approche systémique de la maintenance, dans laquelle la surveillance de la tension du câble occupe une place centrale comme indicateur de l'état global de l'installation.

Les évolutions récentes des techniques de surveillance (CND par MFL haute résolution, analyse vibratoire par apprentissage automatique, instrumentation permanente des paramètres clés) ouvrent la voie à des programmes de maintenance de plus en plus prédictifs, capables d'optimiser les interventions en fonction de l'état réel des composants plutôt que d'un calendrier préétabli. Cette évolution vers la maintenance 4.0, voire 5.0, représente un enjeu stratégique majeur pour les exploitants de télécabines, confrontés à des exigences de sécurité croissantes et à des contraintes économiques de disponibilité de plus en plus fortes. La tension du câble, paramètre mécanique fondamental étudié tout au long de ce mémoire, se révèle être non seulement un objet d'étude académique mais également un outil de maintenance à part entière. [22][11]

Conclusion générale

Le présent mémoire a conduit une étude approfondie de la tension du câble d'une télécabine, en adoptant une démarche scientifique et technique structurée en quatre chapitres complémentaires. L'objectif central « analyser les mécanismes qui gouvernent la tension du câble porteur-tracteur, quantifier les paramètres d'influence et établir les liens avec les pratiques de maintenance » a été atteint à travers la mobilisation d'outils analytiques issus de la mécanique des câbles, de la dynamique des structures et de la théorie de la maintenance industrielle.

Le premier chapitre a établi le cadre conceptuel nécessaire en présentant l'évolution des stratégies de maintenance industrielle de la maintenance 1.0 « purement corrective » jusqu'à la maintenance 5.0 « cognitive et autonome », et en situant les systèmes de téléphériques dans leur contexte historique, réglementaire et technique. Ce chapitre a notamment mis en évidence que la maintenance des installations de transport par câble se distingue des autres domaines industriels par la criticité absolue des enjeux de sécurité et par la complexité des mécanismes de dégradation propres aux câbles métalliques.

Le deuxième chapitre a fourni une description exhaustive de l'architecture fonctionnelle et mécanique d'une télécabine, en identifiant précisément les composants qui contribuent à la génération, à la transmission et à la distribution de la tension le long de la ligne : poulie motrice, système de tension par contrepoids ou par vérins hydrauliques, galets et sabots de pylônes, et épissure du câble. La description détaillée de la technique d'épissurage (avec ses étapes de préparation, d'entrelacement, de battage et de finition) a permis de souligner le rôle critique de cette zone dans la distribution de la tension et dans la résistance mécanique globale du câble.

Le troisième chapitre a constitué le cœur analytique du mémoire. Le développement des modèles mécaniques de calcul de la tension du câble en régime statique et dynamique a permis de quantifier les paramètres d'influence essentiels : la longueur et le profil de la ligne, la charge linéique du câble et la charge utile des cabines, les pertes par frottement aux galets de pylônes, les effets des variations thermiques saisonnières sur la longueur et la tension du câble, et les surcharges dynamiques induites par les conditions de vent et les phases transitoires d'exploitation. Ces analyses ont confirmé que la tension du câble n'est pas une valeur fixe mais une variable distribuée le long de la ligne, dont la valeur minimale (dans le brin le plus faiblement tendu) constitue le paramètre dimensionnant vis-à-vis de la condition de non-glissement sur la poulie motrice.

Le quatrième chapitre a complété cette étude par une analyse des pratiques de maintenance des télécabines, en établissant des liens systématiques entre chaque catégorie d'opération de maintenance et son impact sur la tension du câble. Il a notamment mis en évidence que l'allongement progressif du câble sous l'effet de la fatigue et de la déformation plastique constitue l'un des indicateurs les plus fiables du vieillissement de l'installation, et que sa surveillance « par le suivi de la course du système de tension » permet d'anticiper les interventions de remplacement du câble bien avant que les critères réglementaires de dépose ne soient atteints. Les méthodes de contrôle non destructif par flux de fuite magnétique (MFL),

dont les fondements ont été exposés en détail, permettent une surveillance quantitative de l'intégrité du câble et une évaluation rigoureuse de sa durée de vie résiduelle.

Sur le plan des résultats, ce mémoire a confirmé que la tension du câble constitue un indicateur transversal de l'état de santé de l'installation. Sa valeur reflète simultanément l'état du système de tension, l'état des galets et des poulies, et les propriétés mécaniques résiduelles du câble. Sa surveillance continue, rendue possible par les systèmes d'instrumentation modernes, constitue donc un outil de maintenance prédictive de premier ordre. Elle s'inscrit dans la logique de la maintenance conditionnelle (CBM, Condition-Based Maintenance) préconisée par les normes actuelles, selon lequel les décisions de maintenance doivent être fondées sur l'état réel des composants plutôt que sur des calendriers préétablis.

Plusieurs limites inhérentes à la présente étude méritent d'être mentionnées afin d'en préciser la portée. Les modèles de calcul développés reposent sur des hypothèses simplificatrices classiques de la mécanique des câbles (câble inextensible ou à module de Young constant, charges réparties uniformément), dont la validité peut être mise en défaut dans les configurations particulières de ligne à forte courbure ou de charge très asymétrique. Les phénomènes de fretting fatigue aux zones de contact câble-galet, particulièrement complexes à modéliser analytiquement, ont été abordés qualitativement mais n'ont pas fait l'objet d'une quantification par modèle éléments finis, qui aurait nécessité des données expérimentales spécifiques à l'installation considérée.

Ces limites ouvrent des perspectives de recherche et de développement technique particulièrement riches. Sur le plan de la modélisation, l'intégration des effets de la flexibilité du câble et des couplages câble-structure-vent dans des modèles numériques de type éléments finis ou éléments de câble permettrait d'affiner significativement la prédiction de la distribution de la tension et des sollicitations dynamiques. Sur le plan de la surveillance, le déploiement de réseaux de capteurs distribués sur le câble (accéléromètres, capteurs de déformation, capteurs de température) alimentant des algorithmes d'intelligence artificielle dédiés permettrait de construire un jumeau numérique de l'installation, capable de simuler en temps réel l'état de tension et de prédire l'évolution des défauts détectés par CND. Sur le plan de la maintenance, la mise en œuvre de modèles de durée de vie probabilistes du câble, intégrant les distributions statistiques des charges en service et les mécanismes de dégradation identifiés, permettrait d'optimiser les intervalles de remplacement et de minimiser les coûts globaux du cycle de vie. Enfin, la digitalisation croissante des installations de transport par câble « avec la mise en réseau des systèmes de contrôle-commande, la collecte de données massives sur les paramètres d'exploitation et l'analyse automatique des tendances » ouvre la voie à une maintenance véritablement prédictive, dans laquelle la tension du câble occuperait une place centrale en tant qu'indicateur de santé global de l'installation. Ces perspectives convergent vers la vision de la maintenance 5.0, autonome et cognitive, dont les prémices apparaissent déjà dans les installations les plus récentes, et qui constituera sans doute le cadre de référence des ingénieurs de la prochaine génération en charge de ces systèmes.

Références

Bibliographie :

- [1] République française, Décret n° 2000-399 du 9 mai 2000 relatif à la sécurité des remontées mécaniques, Journal officiel de la République française, Paris, 2000.
- [2] Légifrance, Arrêté du 7 août 2009 relatif à la conception, à la réalisation, à la modification, à l'exploitation et à la maintenance des téléphériques, Journal officiel de la République française, Paris, 2009.
- [3] F. Monchy et J.-P. Vernier, Maintenance : méthodes et organisations, 3e éd., Dunod, Paris, 2010.
- [4] AFNOR, NF EN 13306:2017 – Maintenance : terminologie de la maintenance, AFNOR Éditions, Paris, 2017.
- [5] CEN, EN 12930 – Installations à câbles pour le transport de personnes : calculs, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 2004 (révision EN 12930:2015).
- [6] CEI, IEC 60300-3-3:2017 – Gestion de la sûreté de fonctionnement : guide d'application du coût du cycle de vie, 3e éd., Commission électrotechnique internationale, Genève, 2017.
- [7] A. Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation, Éditions Eyrolles, Paris, 1988. ISBN 978-2-212-01615-4.
- [8] J.-P. Souris, La maintenance source de profit, Les Éditions d'Organisation, Paris, 1990.
- [10] CEN, EN 1709 – Installations à câbles pour le transport de personnes : inspection avant mise en service, maintenance, contrôle opérationnel et exploitation, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 2016.
- [11] A. K. S. Jardine, D. Lin et D. Banjevic, « A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance », Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 20, n° 7, pp. 1483-1510, 2006.
- [12] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao et D. Siegel, « Prognostics and health management design for rotary machinery systems », Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 42, n° 1-2, pp. 314-334, 2014.
- [13] M. Grieves et J. Vickers, « Digital Twin : Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems », dans Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, pp. 85-113, 2017.
- [15] CEN, EN 12385-8 – Câbles en acier : sécurité – Câbles tracteurs et porteurs-tracteurs à torons pour installations destinées au transport de personnes, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 2002.
- [16] K. Feyrer, Wire Ropes : Tension, Endurance, Reliability, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-33821-5.

- [17] Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, Règlement (UE) 2016/424 relatif aux installations à câbles, Journal officiel de l'Union européenne, 9 mars 2016.
- [18] H. M. Irvine, Cable Structures, MIT Press, Cambridge (Massachusetts), 1981. ISBN 978-0-262-09023-0.
- [19] CEN, EN 13223 – Installations à câbles pour le transport de personnes : systèmes d'entraînement et d'arrêt, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 2004.
- [22] STRMTG, Guide technique RM1 v5 – Exploitation, modification et maintenance des téléphériques, Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés, 12 juillet 2023, 136 p.
- [23] ISO 10816 – Vibrations mécaniques : évaluation des vibrations de machines par mesure sur les parties non tournantes, Organisation internationale de normalisation, Genève, 2009.
- [24] ISO 4406 – Fluides hydrauliques : détermination du niveau de contamination particulaire, Organisation internationale de normalisation, Genève, 2021.
- [25] J. Moubray, Reliability-Centered Maintenance, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
- [26] CEN, EN 13796-1 – Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes : véhicules – Partie 1, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 2005.
- [27] G. A. Costello, Theory of Wire Rope, 2nd ed., Springer, New York, 1997.
- [33] R. K. Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- [34] STRMTG, Guide Technique RM2 v3 – Conception Générale et Modification Substantielle des Téléphériques, Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés, 12 juillet 2023, 245 p

Webographie :

- [9] Remontées-Mécaniques.net, « Portail de référence sur les remontées mécaniques en France et dans le monde », <https://www.remontees-mecaniques.net>, consulté mai 2025.
- [14] STRMTG, « Réglementation et guides techniques des remontées mécaniques », <https://www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr>, consulté mai 2025.
- [20] POMA, « Qu'est-ce qu'une épissure ? », <https://www.poma.net/actualites/quest-ce-que-epissure/>, consulté mai 2025.
- [21] Magtrol France, « Axes dynamométriques et capteurs de force (Load Measuring Pins) », <https://www.magtrol.com/france/product/load-measuring-pins/>, consulté mai 2025.
- [28] IRDL (Institut de Recherche Dupuy de Lôme), « HerézH : logiciel de calcul des câbles de téléphériques », <https://herezh.irdl.fr/>, consulté mai 2025.
- [29] Mennens Belgium, « Solutions techniques pour remontées mécaniques », <https://www.mennensbelgium.be/>, consulté mai 2025.

- [30] Forum StationsDeSki.net, « Forums techniques consacrés aux remontées mécaniques », <https://forum.stationsdeski.net>, consulté mai 2025.
- [31] Montagne & Câble, « La ligne et les composants d'un téléphérique », <https://montagne-cable.legtux.org/la-ligne.html>, consulté mai 2025.
- [32] EUR-Lex, « Règlement (UE) 2016/424 du Parlement européen et du Conseil relatif aux installations à câbles », <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0424>, consulté mai 2025.
- [35] Wikipédia, « Fichier : Remontees.telecabine.svg », <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Remontees.telecabine.svg>, consulté mai 2025.
- [36] Redaelli Tecna S.p.A., « Câble porteur-tracteur pour installations à câbles », <https://www.archiexpo.com/prod/redaelli/product-61094-1654286.html>, consulté mai 2025.
- [37] ConstruireAcier, « Fabrication des câbles à torons », <https://www.construireacier.fr/wp-content/uploads/2018/08/fabrication-cables-torons.png>, consulté mai 2025.
- [38] Montagne & Câble, « Les câbles des remontées mécaniques », <https://montagne-cable.legtux.org/les-cables.html>, consulté mai 2025.
- [39] Scopeo Engineering, « Contrôle des câbles par perte de flux magnétique », <https://www.scopeo-eng.com/controle-par-perde-de-flux-magnetique/>, consulté mai 2025.
- [40] EUROLAB, « Essais des câbles métalliques en acier », <https://www.eurolab.com.tr/fr/testler/elektriksel-guvenlik-testleri/celik-halat-kablo-testleri>, consulté mai 2025.
- [41] COFREND, « Magnétoscopie (MT) : principe et applications du contrôle non destructif », https://www.cofrend.com/jcms/mdc_110679/fr/magnetoscopie-mt, consulté mai 2025.
- [42] Cable Car Museum, « Cable Car Heritage », <https://www.cablecarmuseum.org/heritage.html>, consulté mai 2025.