

Filière Systèmes industriels

Orientation Power & Control

Travail de bachelor

Diplôme 2023

Adrien Azzalini

*Modélisation de remontées mécaniques en vue
de la maîtrise de leur consommation*

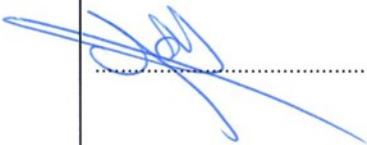
Professeur
Prof. Philippe Barrade

Expert
Urs Gisler

Date de remise
18.08.2023

Filière / Studiengang SYND	Année académique / Studienjahr 2022-23	No TB / Nr. BA PC/2023/94
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Adrien Azzalini Professeur / Dozent Philippe Barrade	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Urs Gisler , urs.gisler@sisag.ch Sisag AG, Industriegebiet Reuss, Zone C, Militärstrasse 3, 6467 Schattdorf	

Titre / Titel Modélisation de remontées mécaniques en vue de la maîtrise de leur consommation
Description / Beschreibung La société Sisag SA produit des systèmes de contrôle-commande et de gestion complexes pour le transport de passagers et de marchandises. Spécialisée, entre autres, dans les systèmes de contrôle-commande pour les transports à câbles urbains et touristiques, elle se trouve confrontée à la problématique d'une meilleure gestion ou optimisation de la consommation énergétique de telles installations. Qu'elles soient en opération, ou par anticipation pour les installations mises en activité dans le futur. Le but de ce travail est de mettre en œuvre un outil de simulation qui soit capable d'identifier et chiffer les besoins en puissance/énergie d'une installation type remontée mécanique. Implémenté sur un ordinateur de type « temps réel », un tel modèle doit pouvoir échanger des données/consignes avec une supervision déportée, afin d'entreprendre les études liées à l'optimisation énergétique de telles installations. Objectifs / Ziele — Définition d'un cas d'étude type, lié à une installation déjà existante pour s'assurer que les modèles établis donnent des résultats concordants par rapport à un jeu de données mesurées. — Définition et mise en œuvre d'un modèle numérique de remontée mécanique, par simulation « off-line ». — Déport de modèle sous simulateur temps réel, et mise en œuvre de protocoles de communications pour pilotage via supervision déportée. — Analyse des champs de possible pour une optimisation énergétique.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / Leiter der Vertiefungsrichtung: <i>F. Moghaddem</i> ¹ Etudiant / Student: 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 15.05.2023 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation: 19 - 20.06.2023 Remise du rapport final / Abgabe des Schlussberichts: 18.08.2023, 12:00 Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 25.08.2023 – HEI 28.08.2023 – Monthey 31.08.2023 – Visp Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine/Woche 36 (04-07.09.2023)
--	---

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

Modélisation de remontées mécaniques en vue de la maîtrise de leur consommation



Diplômant/e Adrien Azzalini

Objectif du projet

Ce projet a pour but d'identifier et de déterminer les besoins en énergie d'une remontée mécanique par la mise œuvre d'un modèle traité par ordinateur de type « temps-réel ».

Méthodes | Expériences | Résultats

Sisag AG conçoit et commercialise des systèmes de commandes et entraînements pour les remontées mécaniques. Afin de maîtriser et optimiser la consommation électrique de leurs installations, Sisag souhaite définir des stratégies d'exploitation applicables aux installations existantes, comme futures.

Sur la base de modèles et de descriptions mathématiques existants, un outil de simulation paramétrable a été implémenté. La confrontation du modèle à des relevés de mesures effectués pour plusieurs jours d'exploitation ont permis d'en affiner les paramètres, afin de représenter la réalité au plus proche. Il est ainsi possible de déterminer l'énergie électrique consommée sur une journée donnée, à +/- 5%, dans le cas d'étude considéré.

L'étude de différents scénarios et la quantification de l'influence de paramètres tels que la vitesse de marche ou encore le nombre de véhicules en ligne ont été réalisés par simulation. En plus des effets sur l'énergie consommée, la répercussion de ces stratégies sur le temps de trajet et les éventuelles files d'attente ont été prises en compte.

Il en résulte une stratégie d'exploitation adaptant la vitesse de marche selon l'affluence des passagers. Selon les résultats simulés, des économies de 20% à 35% seraient atteignables.

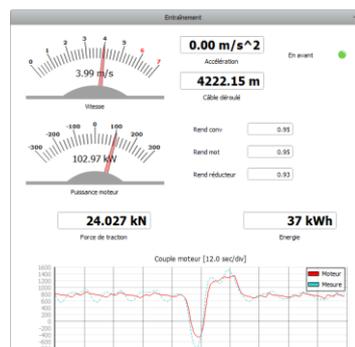
Travail de diplôme | édition 2023 |

Filière
Systèmes industriels

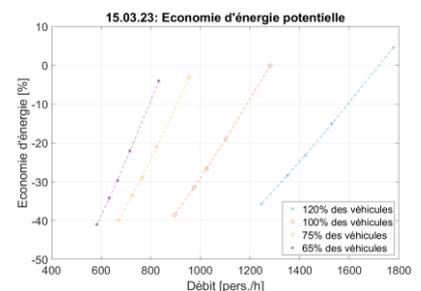
Domaine d'application
Power & Control

Professeur responsable
Philippe Barrade
philippe.barrade@hevs.ch

Partenaire
Sisag AG



Aperçu des outils de supervision en cours de simulation. Les valeurs calculées sont superposées en temps réel aux mesures de référence.



Effet de la vitesse de marche et du nombre de véhicules sur la consommation électrique, pour une journée de référence (15 mars 2023).

Modellierung von Einseilumlaufbahnen für die Kontrolle des elektrischen Verbrauchs

Diplomand/in Adrien Azzalini



Ziel des Projekts

Ziel dieses Projekt ist es, mit Hilfe eines Modells auf einem «Echtzeit» Simulator, den Energiebedarf einer Umlauf-Ein-Seilbahn zu identifizieren und zu beziffern.

Methoden | Experimente | Resultate

Sisag AG entwickelt Seilbahn-Antriebe und -Steuerungen. Um den Energieverbrauch von Seilbahnen zu kontrollieren und optimieren, möchte die Sisag passende Betriebsstrategien definieren. Diese sollen für existierende sowie zukünftige Anlagen anwendbar sein.

Auf der Grundlage von vorhandenen Daten wurde ein variables Modell auf einem Simulator implementiert. Die Genauigkeit des Modells im Vergleich zur Realität konnte durch den Vergleich mit Messdaten aus mehreren Betriebstagen bestimmt werden. Dies hat das Feinjustieren der Parameter erlaubt. Der elektrische Tagesverbrauch kann so mit einer Ungenauigkeit von +/- 5% bestimmt werden.

Die Bestimmung des Einflusses von Parametern wie der Fahrgeschwindigkeit oder die Anzahl der verwendeten Fahrzeuge wurde durch verschiedene Szenarien simuliert. Der Einfluss auf die Fahrzeit sowie auf die Wartezeit für die Kunden wurde auch berücksichtigt.

Daraus resultiert ein Vorschlag für eine Betriebsstrategie, bei welcher die Fahrgeschwindigkeit dynamisch an die Anzahl Personen angepasst wird. Die Simulation wurde auf zwei verschiedene Tage ausgelegt und das Einsparungspotenzial liegt bei rund 20% bis 35% Prozent.

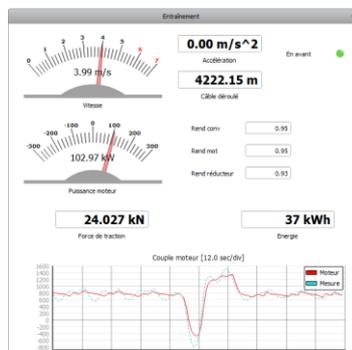
Diplomarbeit
| 2023 |

Studiengang
Systemtechnik

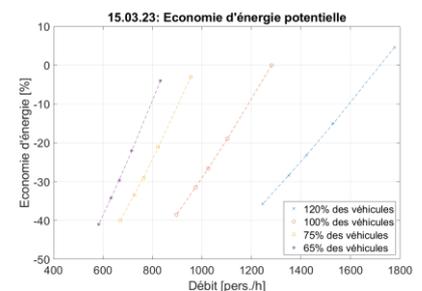
Anwendungsbereich
Power & Control

Verantwortliche/r Dozent/in
Philippe Barrade
phillippe.barrade@hevs.ch

Partner
Sisag AG



Übersicht von den Anzeigen in den Simulationen. Die berechneten Werte werden mit den Echtzeitsimulationen verglichen.



Einfluss der Fahrgeschwindigkeit und Anzahl Fahrzeuge auf den Energieverbrauch für einen Referenzbetriebstag (15. März 2023)

Informations sur le rapport

Contact

Auteur : AdrienAzzalini
Bachelor Etudiant
HES-SO//Valais Wallis
Suisse
Email : adrien@azzalini.ch

Declaration of honor

I, undersigned, Adrien Azzalini, hereby declare that the work submitted is the result of a personal work. I certify that I have not resorted to plagiarism or other forms of fraud. All sources of information used and the author quotes were clearly mentioned.

Place, date : 17 août 2023

Signature :



Remerciements / Danksagungen

An meine deutschsprachigen Kollegen, die mit der Sprache von Molière arbeiten mussten, möchte ich meinen Dank in der Sprache von Göthe richten.

Anlässlich der Fertigstellung dieser Bachelorarbeit denke ich an alle Personen, die zu ihrer Entstehung beigetragen haben, und an diejenigen, die mich während der gesamten Zeit unterstützt haben. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Mein herzlicher Dank geht an Urs Gisler, der den Verlauf der Arbeit genau verfolgt und alle notwendigen Daten zur Verfügung gestellt hat. Vielen Dank an Marco Zraggen, Eric Bellon, Michael Arnold und Urs Gisler für ihr Vertrauen und die Einrichtung des Projekts. Danke an die Abteilung « Seilbahnen » von Sisag für die Zusammenarbeit. Danke an Jean-Luc Gfeller und Lionel May (Téléverbier SA) für die Informationen über die Gondelbahn Le Châble (VS) - Verbier. Danke an meine Korrekturleser und Rechtschreibprüfer, an meine Freunde, die mir oft geholfen haben, die Perspektive zu wechseln. Danke an die Mitarbeiter und Professoren der HEI für ihre Hilfe. Besonderer Dank gilt Herrn Philippe Barrade, der sich bereit erklärt hat, diese Arbeit zu betreuen, und der sich voll und ganz in das Projekt eingebracht hat. Vielen Dank auch an alle anderen Personen, die in irgendeiner Weise an diesem Abenteuer beteiligt waren.

A l'heure de la finalisation de ce travail de Bachelor, j'adresse une pensée à toutes les personnes ayant contribué à sa réalisation et à celles qui m'ont soutenu tout du long. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans elles. Mes chaleureux remerciements vont à Urs Gisler, qui a suivi de près le déroulé du travail et fourni toutes les données nécessaires à sa réalisation. Merci à Marco Zraggen, Eric Bellon, Michael Arnold et Urs Gisler pour la confiance témoignée et la mise sur pied du projet. Merci au département « remontées mécaniques » de Sisag pour la collaboration. Merci à Jean-Luc Gfeller et Lionel May (Téléverbier SA) pour les renseignements concernant la télécabine Le Châble (VS) - Verbier. Merci à mes relecteurs et relectrices orthographiques, à mes amis qui m'ont bien souvent aidé à changer de perspective. Merci aux collaborateurs et professeurs de la HEI pour l'aide apportée. Un grand merci à M. Philippe Barrade qui a accepté de superviser ce travail et qui s'est totalement investi dans le projet. Merci à toutes les autres personnes ayant participé de près ou de loin à cette aventure.

Table des matières

Table des matières	XI
Table des figures	XIII
Liste des tableaux	XIII
1 Introduction	1
1.1 Contexte et but	2
1.2 La consommation énergétique dans les remontées mécaniques	3
1.2.1 Les innovations de la branche	3
1.2.2 Identification des consommateurs	4
2 Modélisation	7
2.1 Modèles existants de remontées mécaniques	7
2.2 Modèle choisi	8
2.2.1 Station de renvoi	10
2.2.2 Portée entre deux pylônes	10
2.2.3 Pylône	12
2.2.4 Station motrice	14
2.2.5 Zones d'accélération/ralentissement	16
2.2.6 Charge	18
3 Implémentation	19
3.1 Outils utilisés	19
3.2 Références : temps et mesures	19
3.3 Gestion des véhicules et de la charge	20
3.4 Station de renvoi et ligne	22
3.5 Entraînement	22
3.6 Système SCADA et post traitement	24
3.7 Échantillonnage et résolution	26
3.8 Paramétrisation du modèle	26
3.9 Grandeurs d'entrée et de sortie	27
3.10 Accélération de la simulation	27
3.10.1 Compensation des effets	28
3.11 Données de référence	29
3.11.1 Pré-traitement	29
3.11.2 Consistance des mesures	29
3.12 Analyse de la précision du modèle	32
3.12.1 Calibration	32

Table des matières

3.12.2 Observations	34
3.12.3 Résumé des observations	38
4 Étude de stratégies d'optimisation énergétique	39
4.1 Situation actuelle	40
4.2 Résultats de simulation et stratégie d'optimisation	41
4.2.1 Effets de la vitesse et du nombre de véhicules	41
4.2.2 Proposition d'une stratégie d'exploitation	44
4.3 Recommandations finales	50
5 Conclusion	51
A Extraits de code	LIII
A.1 Code source des fonctions	LIII
A.1.1 <i>Calcul arrivée passagers</i>	LIII
A.1.2 <i>Débit passagers</i>	LIII
A.1.3 <i>Lancement cabines</i>	LIV
A.1.4 <i>Ligne</i>	LIX
A.1.5 <i>Calcul coefficient de frottement</i>	LXII
A.1.6 <i>EcoMode</i>	LXII
Bibliographie	65
Acronymes	67
Glossaire	69

Table des figures

1.1	Bilan de puissance d'un téléphérique débrayable à mouvement continu	4
2.1	Principe de représentation de la ligne	9
2.2	Représentation schématique de la Station de Renvoi (SR)	10
2.3	Approximation d'une portée par un arc de parabole	11
2.4	Représentation schématique d'un pylône P_i	12
2.5	Effet de la suppression de la discontinuité dans l'équation (2.10)	13
2.6	Représentation des forces agissant sur un pylône	14
2.7	Bilan des forces sur la Station Motrice (SM)	15
2.8	Principe d'entraînement de l'installation	16
2.9	Lanceur d'un télésiège débrayable	17
2.10	Représentation schématique du lanceur/ralentisseur	17
3.1	Vue d'ensemble du modèle	19
3.2	Gestion de la référence temporelle dans le modèle	20
3.3	Gestion des véhicules et des passagers	21
3.4	Détermination de l'arrivée des passagers ainsi que du débit correspondant .	21
3.5	Calcul des forces en jeu dans la mécanique de ligne	22
3.6	Division en sous-systèmes du bloc <i>Entraînement</i>	23
3.7	Asservissement en vitesse	24
3.8	Extraits du panel SCADA	25
3.9	Vue d'ensemble de deux journées d'exploitation	30
3.10	Estimation du rendement moteur-convertisseur	31
3.11	Effets des coefficients de frottement	33
3.12	Répartition réelle des véhicules sur la ligne	34
3.13	Effet de la charge sur les oscillations lentes	35
3.14	Oscillations rapides dues au couplage/découplage des véhicules	36
3.15	Écart de simulation dû à la diminution du grain proportionnel	38
4.1	Adaptation de débit	40
4.2	Points de fonctionnement	40
4.3	Effet de la vitesse et du nombre de véhicules sur la consommation électrique	43
4.4	Comparaison de la puissance développée à différentes charges	44
4.5	Diagramme de flux de la stratégie d'exploitation	45
4.6	Application des résultats de simulation à une stratégie d'exploitation	46
4.7	Affluence des passagers pour les quatre jeux de données	48
4.8	Résultats de la stratégie d'exploitation pour le 15 mars 2023	49
4.9	Résultats de la stratégie d'exploitation pour le 16 juillet 2023	50

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques principales TCD4 Le Châble (VS) - Verbier	3
1.2	Répartition de la puissance pour un télésiège, selon Energiemanagment Bergbahnen	5
2.1	Paramètres du modèle	8
2.2	Définition des symboles mathématiques	9
2.3	Valeurs des coefficients de frottements	14
3.1	Grandeurs d'entrée du simulateur	27
3.2	Grandeurs de sortie du simulateur	27
3.3	Grandeurs mesurées sur l'installation	29
3.4	Détermination de la causes des oscillations lentes	34
3.5	Comparaison des valeurs moyennes	37
4.1	Règles d'adaptation de vitesse actuelles	40
4.2	Résultats de simulation	42
4.3	Temps de trajet en fonction de la vitesse	46
4.4	Seuils d'adaptation stratégique de vitesse	47
4.5	Proposition de paramètres de stratégie d'exploitation pour les 15 mars et 16 juillet 2023	49
4.6	Résultats de la stratégie d'exploitation	49

1 | Introduction

L'Organisation des Nations Unies (ONU) a défini dix-sept Objectifs de Développement Durable (ODD) visant à la création d'un avenir meilleur et durable pour tous (1). Dans le cadre de cet aparté visant à situer ce projet au sein des ODD, seront abordés les deux objectifs suivants :

N°7 : Énergie propre et d'un coût abordable
N°9 : Industrie, innovation et infrastructures

Les sous objectifs 7.3 : « D'ici à 2030, multiplier par deux le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique » et 9.4 : « D'ici à 2030, moderniser l'infrastructure et adapter les industries afin de les rendre durables, par une utilisation plus rationnelle des ressources et un recours accru aux technologies et procédés industriels propres et respectueux de l'environnement, chaque pays agissant dans la mesure de ses moyens. » (1) concernent tout particulièrement ce projet.

Les remontées mécaniques sont des moyens de transports principalement utilisés à des fins de loisirs : sports d'hiver, accès à des points de vue, etc. Leur utilisation pour le transport urbain est de plus en plus étudiée. Cette solution présente de nombreux avantages tels que : faible impact au sol, constructions relativement légères et compactes, exploitation demandant peu de ressources en personnel. Le transport à câble n'en demeure pas moins un gros consommateur d'énergie, électrique notamment. Les concepteurs d'aujourd'hui travaillent à la limitation de l'utilisation des ressources lors de la conception, du montage, de l'exploitation et la maintenance de telles installations. L'intégration de production d'énergie renouvelable aux infrastructures, l'installation d'équipements plus efficaces et l'exploitation de manière stratégique sont trois grandes pistes permettant l'atteinte des objectifs fixés.

Le transport à câble, dans son utilisation urbaine permet également de tisser des voies de communication en terrain accidenté. La Paz, capitale de la Bolivie, s'est dotée d'un réseau de télécabines ayant profondément révolutionné et facilité les déplacements de ses habitants. Ce projet novateur est cité en exemple et démontre l'intérêt et les bénéfices de l'intégration du câble à l'urbanisme (2), en plus de contribuer à l'objectif 9.a : « Faciliter la mise en place d'une infrastructure durable et résiliente dans les pays en développement en renforçant l'appui financier, technologique et technique apporté aux pays d'Afrique, aux pays les moins avancés, aux pays en développement sans littoral et aux petits États insulaires en développement. » (1).

L'importance de ce moyen de transport dans l'urbanisme mondial de demain est établi. Le but commun de la branche des remontées-mécaniques, et de ce travail, est de permettre d'exploiter le potentiel à son maximum, et de manière intelligente.

Gestion et sobriété énergétique sont des thèmes d'actualité qui connaissent un intérêt public très particulier depuis plusieurs années. Dans un contexte géopolitique européen et mondial tendu, les termes de « crise énergétique », « pénurie » (d'électricité ou encore de gaz) ne manquent pas de faire les gros titres. En début d'année 2022, sont parus plusieurs

articles de presse s'inquiétant de la consommation énergétique des domaines skiables suisses. En effet, la Confédération annonçait ne pas exclure la fermeture des domaines skiables en cas de pénurie électrique.(3) Qu'en est-il de leur apparent grand besoin énergétique en comparaison de leur plus-value ? Que font les exploitants et professionnels de la branche pour maîtriser et diminuer leur consommation ?

L'association faîtière Remontées mécaniques suisses (RMS) a mis sur pied un groupe de travail dont la mission est d'informer le public et les professionnels sur la consommation énergétique des domaines skiables. Ce groupe, actif depuis la fin de la pandémie de COVID-19, a publié plus de 20 communiqués de presse et quelques 350 contributions sur les réseaux sociaux (4). Mais depuis quand les exploitants suisses sont-ils actifs dans ce domaine ? En 2010 déjà, RMS publiait une étude (5), financée en partie par le SECO, ayant pour but¹ « [...] d'élever sensibilité de la branche des remontées mécaniques sur les thèmes Énergie et Image Énergétique, ainsi que de mettre à disposition des entreprises des guides d'application pratiques. »(5).

La branche des sports de neige a une volonté réelle d'inscrire ses activités dans la durabilité. Au delà des économies énergétiques et financières non négligeables occasionnées par l'amélioration du parc d'installation, il est crucial pour les acteurs du tourisme d'avoir une vision à long terme. Les grandes stations valaisannes développent le tourisme quatre saisons et enregistrent de fréquentations record en été. L'exigence et la conscience écologique des clients toujours plus grandissante pousse les acteurs du terrain, ainsi que les industries, à prendre le tournant de la transition écologique et à consommer l'énergie de manière intelligente.

1.1 Contexte et but

L'entreprise uranaise Sisag AG développe des systèmes de commandes électriques et entraînements pour tous types de remontées mécaniques. Son porte-folio de produits comprend également une panoplie de logiciels et services cloud servant à l'exploitation des domaines skiables et de leurs infrastructures. Depuis plus de quinze ans, Sisag propose des services de gestion de l'énergie, permettant de limiter les pics de charges soutirées ou injectées dans le réseau. Aujourd'hui, l'enjeu de la maîtrise de la consommation énergétique ne se limite plus au lissage des courbes de consommation. En effet, il est souhaitable de connaître et maîtriser la consommation instantanée du domaine. Il est pour cela nécessaire de pouvoir influencer l'exploitation des installations par le biais d'un algorithme dédié prenant en compte des facteurs tels que : affluence des skieurs, conditions météo, consommation instantanée, type d'installation, etc. ...

La mise au point d'un tel algorithme demande une très bonne connaissance du système réglé. Il est nécessaire d'identifier les paramètres influençables et de localiser les éléments éligibles à une optimisation énergétique par modification des conditions d'exploitation.

L'objet de ce travail est la modélisation mathématique d'une remontée mécanique afin de déterminer en fonction du temps, pour une charge et vitesse (variables) données, la puissance électrique nécessaire à son fonctionnement. L'implémentation de ce modèle dans un simulateur et sa validation doit permettre de donner à Sisag les outils nécessaires au développement de l'algorithme d'optimisation énergétique.

1. Texte original traduit par mes soins

1.2 La consommation énergétique dans les remontées mécaniques

Selon les désirs de Sisag AG, ce document se concentrera sur la modélisation d'un téléphérique débrayable à mouvement continu. L'installation de référence choisie est la télécabine quatre places Le Châble (VS) - Verbier. Cette installation officie comme transport public depuis décembre 2021 et est exploitée plus de dix-huit heures par jour. Ceci représente une sollicitation beaucoup plus élevée que les installations dédiées aux sports d'hiver, ouvertes en moyenne sept à huit heures par jour, et uniquement durant la période hivernale. De plus, un flux non négligeable de personnes empruntant la télécabine sur la descente permet d'observer différents cas de charge au long d'une journée d'exploitation. L'ensemble de ces particularités rend l'étude de cette installation spécifique particulièrement intéressante.

Les caractéristiques principales de la télécabine sont reprises dans la table 1.1.

Le Châble (VS) - Verbier	
Altitude de départ	826 m
Altitude d'arrivée	1450 m
Année de construction	2001
Rénovation entraînement et système de commande	2022
Nbr. de place/véhicule	4
Nbr. de véhicules	100
Débit horaire	1281 pers/h
Vitesse nominale	5 m/s
Tension	Aval, hydraulique
Entraînement	Amont, MAS

Table 1.1 Caractéristiques principales TCD4 Le Châble (VS) - Verbier

1.2 La consommation énergétique dans les remontées mécaniques

1.2.1 Les innovations de la branche

Exploitants, constructeurs mécaniques et concepteurs de commande développent activement de nouvelles solutions plus économes en énergie et plus durable. Une revue rapide de la presse spécialisée permet de se faire une bonne idée de l'état actuel du marché.

Les constructeurs Leitner et Poma, membres du groupe HTI, mettent un accent particulier sur la durabilité et l'efficacité de leurs produits. Au travers de solutions d'entraînement directs avec des convertisseurs à haute efficacité, une production photovoltaïque intégrée aux stations, une récupération de chaleur (refroidissement de l'électronique) pour le chauffage des locaux, Leitner cherche à diminuer et optimiser ses installations afin de les rendre plus durables, sans nuire ni à l'expérience utilisateur, ni aux performances de l'installation (6). Poma propose des remontées mécaniques à faible impact environnemental au travers de sa gamme « LIFE (Low Impact For Environment) » (7). L'innovation est cette fois-ci orientée sur l'énergie grise et les ressources utiles à la production/construction/recyclage des installations. Ces produits commencent à être installés sur le terrain et séduisent les exploitants : Leitner installera cet été deux télésièges durables en Autriche. (8).

Chapitre 1. Introduction

Toutefois, afin de trouver des solutions complètes applicables à des installations existantes ou sujettes à rénovation partielle, il faut se tourner vers les fournisseurs de commandes électriques. L'entreprise Frey Stans AG a développé une solution de stockage d'énergie liée au bus continu du variateur de fréquence de l'entraînement principal (9) et (10). Ce système permet des échanges d'énergie entre les batteries, le moteur principal, le réseau et une installation photovoltaïque. En plus de la consommation instantanée de l'énergie solaire, il est possible de lisser la demande de puissance vue du réseau et de se passer d'un entraînement de secours (thermique). En effet, le système est opéré de telle manière qu'une énergie suffisante pour rapatrier les véhicules en station soit en tout temps disponible.

Enfin, la plus part des fournisseurs de commandes électriques proposent un système de régulation de la vitesse en fonction de l'affluence des skieurs. Leitner (6) ainsi qu'une étude de Szlosarek ; Yan ; Kröger ; Nussbaumer (11) avancent qu'un tel dispositif permettrait une réduction de l'énergie consommée de l'ordre des 20 %. Il s'agit, à mon sens, de la piste la plus évidente afin de maîtriser et optimiser la consommation électrique d'un téléphérique débrayable à mouvement continu.

1.2.2 Identification des consommateurs

L'étude Energiemanagment Bergbahnen (5) avance une estimation de la consommation énergétique totale des exploitants de remontées mécaniques suisse en comparaison de la production helvétique et des autres grands consommateurs. La consommation électrique annuelle des remontées mécaniques suisses représente :

- 0.27% de la production suisse annuelle
- 100% de la consommation annuelle des hôtels et restaurants zurichois
- 11% des besoins annuels de la ville de Bâle

Il est également estimé que 55% de l'énergie électrique consommée par les domaines skiables suisses sert à l'exploitation des remontées mécaniques.

Le bilan de puissance ci-dessous (fig.1.1) identifie les différents consommateurs/pertes de notre cas d'analyse.

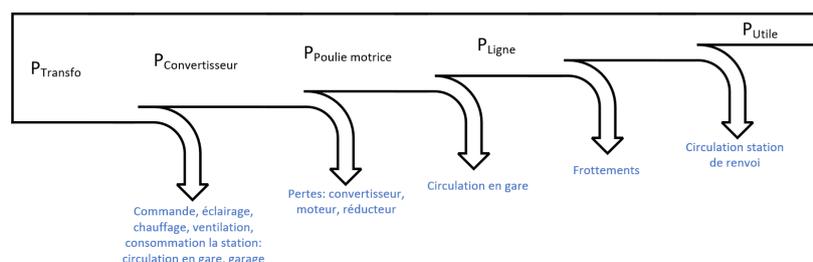


Figure 1.1 Bilan de puissance d'un téléphérique débrayable à mouvement continu

1.2 La consommation énergétique dans les remontées mécaniques



Ce schéma ne prend pas en compte les besoins électriques de la station de renvoi (commande, chauffage, ventilation, circulation en gare). Ils font cependant partie intégrante de la consommation totale.

Toujours dans la même étude, Zegg ; Küng ; Grossrieder (5) publient une répartition chiffrée de la puissance électrique. Ces chiffres ont été calculés pour une installation spécifique de type télésiège chargé à 65% de sa capacité, tournant à 5 m/s. (cf. tab. 1.2)

Répartition de la puissance en pourcentage du total	
Stations (amont et aval)	5%
Pertes moteur, réducteur, variateur	11%
Résistance au vent (à 5 m/s)	4%
Frottements	40%
Transport effectif de la charge	40%

Table 1.2 Répartition de la puissance pour un télésiège, selon Energiemanagement Bergbahnen

Il devient alors évident qu'il est intéressant de modéliser la ligne de la remontée-mécanique et son entraînement. Les stations et leurs consommateurs ont un faible impact et il n'est alors pas utile de s'intéresser à leur comportement. Le modèle, dont ce travail fait l'objet, se limitera à la mécanique de la ligne (pylônes, câble, poulies motrices et de renvoi, entraînement).

2 | Modélisation

2.1 Modèles existants de remontées mécaniques

Dans la littérature spécialisée, plusieurs modèles de remontées mécaniques sont proposés. Là aussi, l'intérêt est porté sur le comportement de la ligne et la dynamique des câbles.

Ici un résumé des ouvrages consultés et des principes retenus :

Selon Szlosarek ; Yan ; Kröger ; Nussbaumer (11), il est d'usage de répartir la charge des véhicules de manière uniforme sur le câble et d'ajouter ce terme à la masse linéique de celui-ci. Ils supposent ensuite le câble rigide et indéformable, ce qui leur permet d'approximer son tracé par des segments de droites. Pour la modélisation des frottements, le modèle proposé par Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka (12) est appliqué. Cependant, par manque de données expérimentales publiées, les coefficients de frottements utilisés ont été déterminés par régression. Ils noteront des écarts avec les valeurs publiées par Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka (12) et les expliqueront par l'évolution des technologies et matériaux utilisés depuis cette étude.

Czitary (13) propose quant à lui des méthodes de calcul déterminant la position exacte des véhicules dans le plan (x,y) du profil en long. Il approxime toute fois la courbure du câble tendu entre deux pylônes par une parabole, au lieu de travailler avec l'équation de la chaînette. Ce modèle permet de connaître également les forces en jeu à tous les points critiques : pylônes, stations et véhicules. Dans un chapitre dédié aux télésièges, des valeurs de coefficient de frottement sec sont proposés : $\mu \in [0.015, 0.025]$. Les frottements visqueux sont négligés et l'origine des ces valeurs n'est cependant pas explicitée.

Les solutions proposées jusqu'ici décrivent le comportement statique d'une installation. Les travaux de Steinbrunn (14) et Liedl (15) exposent un modèle dynamique complet pour un téléphérique à va-et-vient, et respectivement pour tout type de téléporté. Les échanges de longueur entre les portées sont ainsi prises en compte et le profil de ligne devient dynamique. Alors que Steinbrunn (14) ne calcule pas les frottements, mais les considère comme constants¹, Liedl (15) applique le modèle proposé par Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka (12). Les frottements visqueux et secs sont pris en compte. Là encore, les valeurs de ces coefficients ne sont pas clairement énoncés. Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka publient des valeurs mesurées sur quelques installations spécifiques.

1. Il propose de déterminer leur valeur par mesures localisées sur l'installation.

2.2 Modèle choisi

Sur la base des travaux précités, le modèle se construira selon les principes présentés dans ce chapitre. La liste des paramètres du modèle est donnée par le tableau 2.1, et les nomenclatures mathématiques sont définies dans le tableau 2.2.

Description	Désignation	Valeur	Unité
Coordonnées x des stations et pylônes	-	multiples	m
Coordonnées y des stations et pylônes	-	multiples	m
Flèches maximales des portées	-	multiples	m
Force de tension en aval	F_t	240	kN
Inertie de l'entraînement principal	J_e	46.43	kgm ²
Intervalle entre véhicules	-	56.2	m
Longueur zone d'accélération/décélération	-	8	m
Masse d'un passager	m_p	90	kg
Masse d'une cabine	m_c	401	kg
Masse linéique du câble	$q_{\text{câble}}$	7.65	kg/m
Nombre de passager par cabine	-	4	-
Nombre de véhicules	n_c	100	-
Puissance mécanique maximale du moteur	-	560	kW
Rapport de réduction du réducteur	i	76.452	-
Rayon poulie motrice	R_{SM}	2.2	m
Rendement convertisseur	η_{conv}	?	-
Rendement moteur principal	η_{mot}	?	-
Rendement réducteur	η_r	0.93	-
Vitesse de traînage en gare (à vitesse nominale)	v_{gare}	0.3	m/s
Vitesse nominale de marche	-	5	m/s

Table 2.1 Paramètres du modèle

Système de coordonnées

Un système de coordonnées orthonormé à deux dimensions est utilisé. Son origine est définie par l'axe de rotation de la poulie de renvoi (cf. figure 2.1). Un troisième axe, nommé s et confondu avec le tracé du câble dans le plan x, y , permet la situation d'objets sur la longueur de la ligne. Le début et fin de la ligne sont respectivement nommés (SR) et (SM). Les pylônes sont numérotés de P_1 à P_n , en allant de l'aval vers l'amont.

Objets référencés

Disposent de coordonnées x, y, s :

- **Section** Une section est composée d'un pylône et de la portée de câble entre celui-ci et le pylône suivant
- **Véhicule (ou cabine)**
- **Station de renvoi** Comprend la poulie de renvoi, le dispositif de tension et la portée de câble jusqu'au pylône N°1.
- **Station motrice** Comprend la poulie motrice et le dispositif d'entraînement.

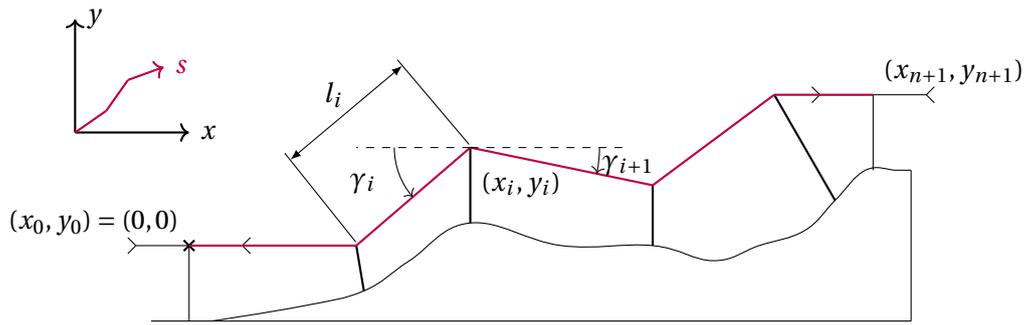


Figure 2.1 Principe de représentation de la ligne

Symboles mathématiques utilisés

s	$[-]$	$s \in \{d, m\}$ respectivement pour le brin descendant et le brin montant
n	$[-]$	Nombre de pylônes.
n_c	$[-]$	Nombre de véhicules.
i	$[-]$	Numéro d'un objet sur le profil en long. $i = 0$ pour Station de Renvoi (SR) et $i = n + 1$ pour la Station Motrice (SM)
x_i	$[m]$	Coordonnée x d'un objet sur le profil en long, $i \in [0, n + 1]$
y_i	$[m]$	Coordonnée y d'un objet sur le profil en long, $i \in [0, n + 1]$
s_i	$[m]$	Position s d'un objet sur le profil en long, $i \in [0, n + 1]$
l_i	$[m]$	Longueur de la droite virtuelle reliant les sommets des pylônes P_i et P_{i-1}
x_{c_k}	$[m]$	Coordonnée x de la cabine N° k sur le tracé
y_{c_k}	$[m]$	Coordonnée y de la cabine N° k sur le tracé
s_{c_k}	$[m]$	Position s de la cabine N° k sur le câble
γ_i^s	$[\circ]$	Angle formé par l'asymptote du câble et l'axe x entre les pylônes P_{i-1} et P_i
$\alpha_{i_b}^s$	$[\circ]$	Angle effectif formé par le câble et l'axe x sur le côté amont du pylône P_{i-1}
$\alpha_{i_h}^s$	$[\circ]$	Angle effectif formé par le câble et l'axe x sur le côté aval du pylône P_i
φ_i^s	$[\circ]$	Angle de déviation du câble imprimé par le pylône P_i
$T_{i_b}^s$	$[N]$	Tension du câble côté amont du pylône P_{i-1}
$T_{i_h}^s$	$[N]$	Tension du câble côté aval du pylône P_i
$F_{N_i}^s$	$[N]$	Force normale exercée par le câble montant/descendant sur le pylône P_i
$F_{R_i}^s$	$[N]$	Force de frottement exercée par le câble montant/descendant sur le pylône P_i
F_T	$[N]$	Force de traction exercée par l'entraînement sur la poulie motrice
$m_{i_h}^s$	$[kg]$	Masse totale en mouvement vue depuis l'aval du pylône P_{i+1}
$m_{c_k}^s$	$[kg]$	Masse de la cabine N° k , sur le brin s
v_T	$[m/s]$	Vitesse de marche de l'installation
s_T	$[m]$	Longueur de câble déroulé
m_{tot}	$[kg]$	Masse totale mise en mouvement

Table 2.2 Définition des symboles mathématiques

2.2.1 Station de renvoi

D'un point de vue cinématique, la Station de Renvoi (SR) est schématisée par une poulie déviant le câble porteur-tracteur de 180°. Il sera considéré que le palier axe-poulie est sans frottement. Les tensions T_0^d, T_0^m sont alors identiques. Un dispositif de tension permet de réguler la grandeur de ces forces, telles que représentées sur la figure 2.2. Il est à noter qu'en cas d'accélération, une force F_a supplémentaire est nécessaire à l'accélération de la poulie. Celle-ci n'est pas représentée sur la figure en question.

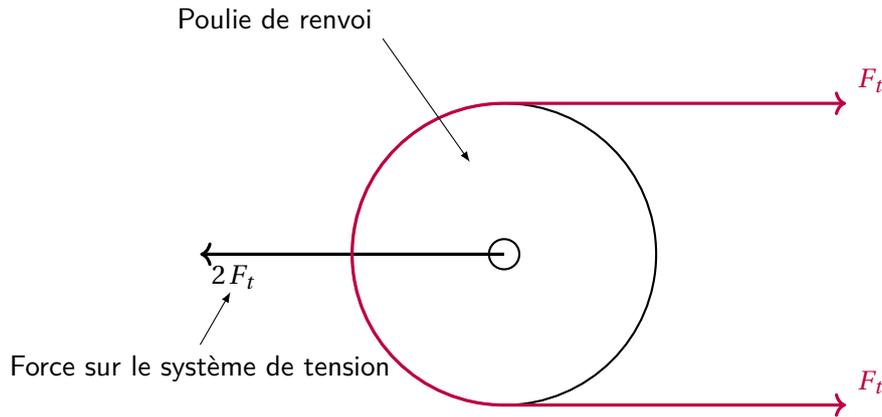


Figure 2.2 Représentation schématique de la Station de Renvoi (SR)

Conformément aux définitions précédemment énoncées, pour la Station de Renvoi (SR), $i = 0$.

Nous pouvons alors exprimer la masse en mouvement en amont de la station :

$$m_{0_h}^{d+m} = 2(s_1 - s_0) q_{\text{câble}} + \sum_{k=1}^{n_c} m_{c_k} p \quad \text{avec } p = 1 \text{ si } x_0 < x_{c_k} < x_1 \text{ sinon } 0 \quad (2.1)$$

L'angle du câble par rapport au sol entre la SR et le pylône N°1 est de 0° par convention. Le poids propre du câble et celui des cabines présentes sur la section, n'ont donc pas d'influence sur les forces présentes dans le câble (avec les méthodes de calcul appliquées). Étant donnée la faible distance entre le premier pylône et la poulie motrice (quelques mètres), l'approximation est acceptable. La tension dans les brins est alors :

$$T_{0_h}^m = T_{0_h}^d = \frac{F_t}{2} \quad (2.2)$$

2.2.2 Portée entre deux pylônes

Une portée, ou section de câble est définie par un segment de câble sur lequel agissent les forces de tension, son poids propre, ainsi que le poids des véhicules présents sur la section. Le câble est considéré comme étant flexible. Ses elongations mécanique et thermique sont négligées. Les portées étant relativement courtes, et la force de tension grande comparativement aux poids appliqués sur une portée, sa courbure entre deux pylônes est approximée par un arc parabole (13). Sa trajectoire est déterminée a priori, sur la base du profil en long de l'installation. Les coordonnées des pylônes et du point de flèche maximal (f sur la figure 2.3) sont connues et la flèche maximale est considérée

comme se trouvant au milieu de la portée. L'ajustement d'un arc de parabole passant par ces trois points permet de déterminer les coordonnées x, y, s du câble sur tout le profil en long, par pas de cinquante centimètres. En dérivant la courbe obtenue en entrée et sortie de pylône, nous pouvons obtenir l'angle effectif $\alpha_{i_b/h}^s$ entre le câble et l'horizontale. Ceci est illustré sur la figure 2.3.

N.B. : Le profil en long du cas d'étude spécifie deux jeux de valeurs pour les flèches : ligne à vide et courbure maximale. Il a été décidé de choisir le cas de courbure maximale en première approche. De manière à affiner le modèle, il est envisageable d'adapter le profil de ligne en cours de simulation. De plus, dans le cas de charges fortement asymétriques, la différenciation du profil de montée et descente serait justifiable.

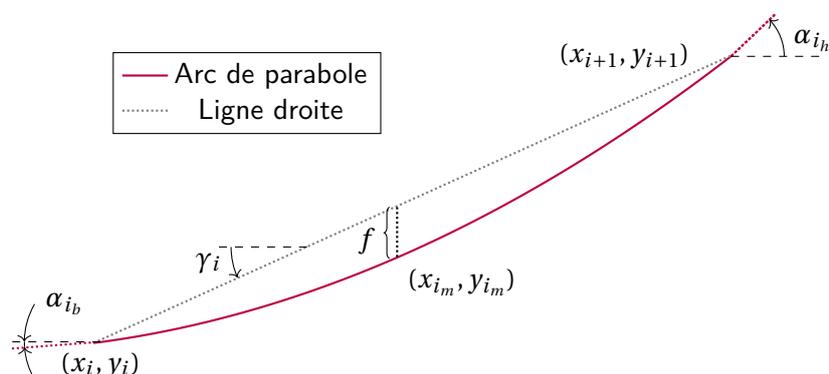


Figure 2.3 Approximation d'une portée par un arc de parabole

Pour construire le vecteur s , il est nécessaire de calculer la longueur de l'arc de parabole. Pour se faire, la relation suivante est utilisée :

$$l = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + (p'(x))^2} dx \quad (2.3)$$

Où $p(x)$ est la fonction déterminant l'arc de parabole.

De manière analogue à la Station de Renvoi (SR), la masse totale en mouvement vue de l'amont de la section se détermine ainsi :

$$m_{i_h}^{d+m} = m_{i-1_h}^{d+m} + 2(s_i - s_{i+1}) q_{\text{câble}} + \sum_{k=1}^{n_c} m_{c_k} p \quad \text{avec } p = 1 \quad \text{si } x_i < x_{c_k} < x_{i+1} \quad \text{sinon } 0 \quad (2.4)$$

Selon les hypothèses réalisées et en supposant la répartition des véhicules comme uniforme, la force en sortie d'une portée de câble peut être exprimée ainsi (13) :

$$T_{i_h}^s = T_{i_b}^s + g q_{\text{câble}} (y_{i+1} - y_i) + g \cdot \sum_{k=1}^{n_c} m_{c_k} \sin(\gamma_i) p \quad \text{avec } p = 1 \quad \text{si } x_i < x_{c_k} < x_{i+1} \quad \text{sinon } 0 \quad (2.5)$$

2.2.3 Pylône

Chaque tête de pylône est composée d'un nombre variable de poulies, assemblées sur un balancier assurant une répartition égale de la force normale entre celles-ci (11). Nous pouvons alors considérer la tête de pylône comme un point de contact unique avec le câble, et en déduire les forces normales $F_{N_i}^{m+d}$ et de frottements $F_{R_i}^m, F_{R_i}^d$ en présence. A des fins de compréhension, la tête de pylône, sur un brin, est représentée sur la figure 2.4 par un balancier de deux poulies.

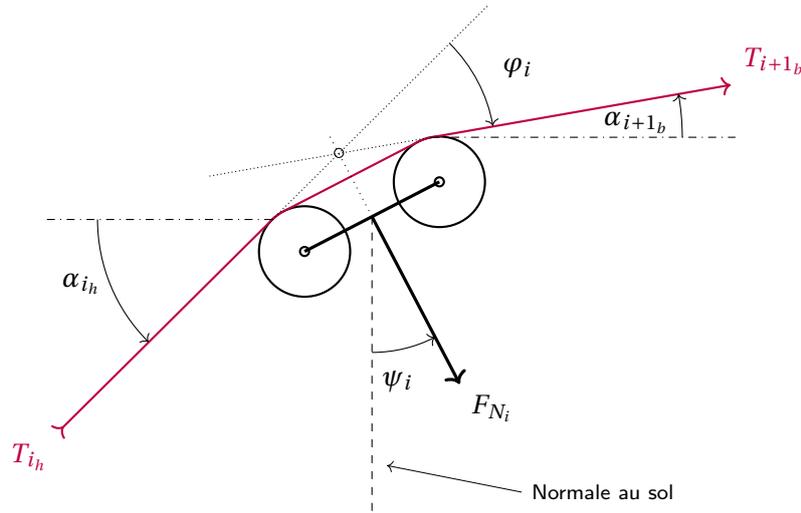


Figure 2.4 Représentation schématique d'un pylône P_i

L'angle de déviation du câble est donné par,

$$\varphi_i^s = \alpha_{i_h}^s - \alpha_{i+1_b}^s \quad (2.6)$$

Ce qui permet de calculer les forces normales sur le pylône (13) :

$$F_{N_i}^s = (T_{i_h}^s + T_{i+1_b}^s) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i^s}{2}\right) \quad (2.7)$$

$$F_{N_i}^{m+d} = F_{N_i}^m + F_{N_i}^d \quad (2.8)$$

Les forces de frottement sont perpendiculaires à leur force normale respective et toujours dirigées contre le sens de déplacement du câble. Afin d'obtenir une force de frottement positive pour les pylônes où φ_i est négatif², il est nécessaire de considérer la valeur absolue de la force normale.

$$F_{R_i}^s = \mu(v_T) \cdot \left| F_{N_i}^s \right| \quad (2.9)$$

2. Le pylône imprime une pente plus marquée au câble.

Coefficients de frottements

Le coefficient total de frottement μ se calcul de la manière suivante, selon le modèle de Richter (12) :

$$\mu = \text{sign}(v_t) \cdot \mu_s + \mu_v \cdot v_T \tag{2.10}$$

La modélisation du phénomène par une partie statique (Coulomb) et une autre dépendante de la vitesse permet de prendre (entre autres) en compte les éléments suivants :

- Frottements des paliers/roulements
- Résistance au frottement de l'air
- Déformation élastique des garnitures de poulie
- Frottements internes du câble dus à sa flexion

L'équation (2.10) cause des instabilités lors de la simulation du système pour des petites vitesses ou des changements de direction. Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka proposent de remplacer le saut de (2.10) à $v = 0$ par la fonction arctan. L'expression du coefficient de frottement devient ainsi (12) :

$$\mu = \frac{2}{\pi} \arctan(K_c \cdot v_T) \cdot \mu_s + \mu_v \cdot v_T \tag{2.11}$$

Où $K_c = 100$

La figure 2.5 superpose le modèle idéal et l'approximation par une fonction arctan.

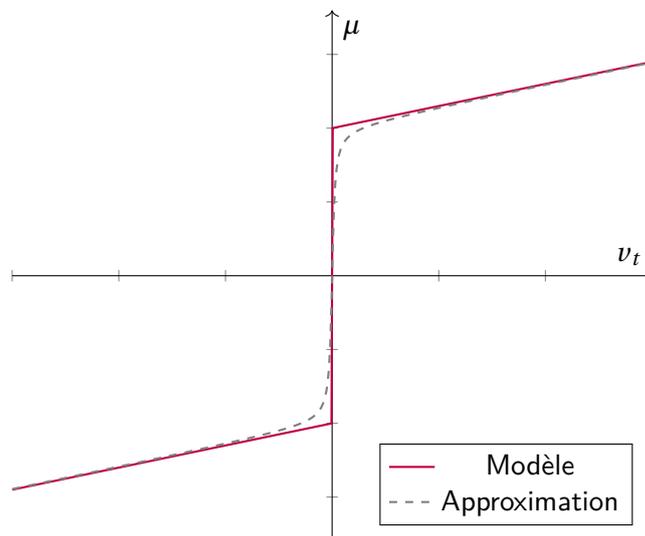


Figure 2.5 Effet de la suppression de la discontinuité dans l'équation (2.10)

Le tableau 2.3 récapitule les valeurs de coefficient trouvées dans la littérature.

En ajoutant les frottements, la force en amont du pylône devient :

$$T_{i+1_b}^m = T_{i_n}^m + F_{R_i}^m \tag{2.12}$$

Source	μ_s [-]	μ_v [s/m]
Czitary (13)	$\in [0.015, 0.025]$	-
Szlosarek ; Yan ; Kröger ; Nussbaumer (11)	0.0096	0.0052
Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka (12)	0.03	$\in [0.001, 0.0024]$
DIN EN 12930 (11)	0.03	-

Table 2.3 Valeurs des coefficients de frottements

pour le brin montant, respectivement

$$T_{i+1_b}^d = T_{i_h}^d - F_{R_i}^d \quad (2.13)$$

pour le brin descendant.

La relation (2.7) est exacte si $T_{i_h}^s = T_{i+1_b}^s$, et permet une approximation des forces acceptable si $F_{R_{i+1}} \ll T_{i_h}^s$.

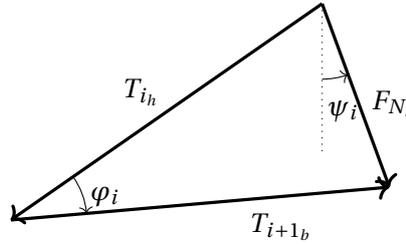


Figure 2.6 Représentation des forces agissant sur un pylône

L'étude de la fig 2.6 permet d'en déduire l'expression exacte (théorème du cosinus)

$$F_{N_i}^s = \sqrt{\left(T_{i+1_b}^s\right)^2 + \left(T_{i_h}^s\right)^2 - 2 T_{i+1_b}^s T_{i_h}^s \cos \varphi_i} \quad (2.14)$$

Dans un premier temps, l'approximation (2.7) sera considérée comme acceptable. Les résultats futurs de simulations détermineront s'il-y-a lieu de modifier la méthode de calcul.

2.2.4 Station motrice

La station motrice est schématisée par une poulie sur laquelle agissent les forces T_{n+1}^d et T_{n+1}^m dues aux tensions dans les brins montants et descendants du câble, ainsi qu'un couple M_a et une force F_a résultants. C'est à ce niveau que la dynamique du système est résolue. Le couple M_a peut être exprimé par une force F_T de traction, tangentielle à la roue (cf. figure 2.7).

L'équation de la dynamique, appliquée à ce modèle est ainsi :

$$\sum \vec{F} = m \vec{a}_T \Leftrightarrow T_{n+1}^d + F_T - T_{n+1}^m = m_{tot} a_T \Leftrightarrow a_T = \frac{1}{m_{tot}} \left(T_{n+1}^d + F_T - T_{n+1}^m \right) \quad (2.15)$$

‡. En prenant les frottements en compte.

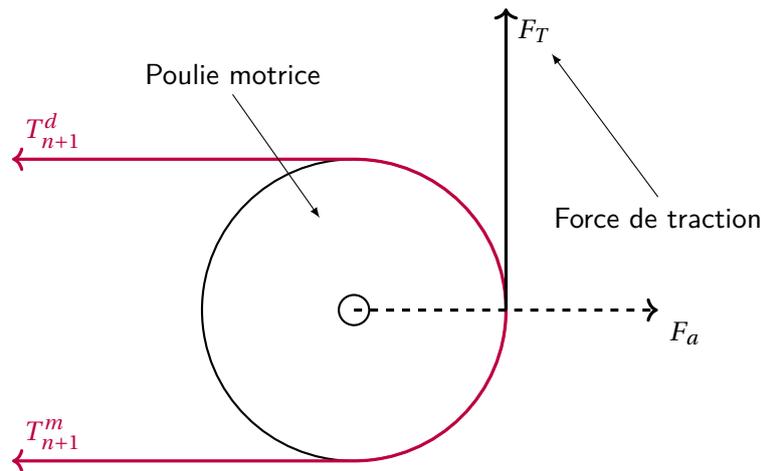


Figure 2.7 Bilan des forces sur la Station Motrice (SM)

Ce qui permet de déterminer la vitesse du câble :

$$v_T = \int \frac{1}{m_{tot}} (T_{n+1}^d + F_T - T_{n+1}^m) dt \quad (2.16)$$

Ainsi que la longueur de câble déroulé :

$$s_T = \iint \frac{1}{m_{tot}} (T_{n+1}^d + F_T - T_{n+1}^m) dt dt \quad (2.17)$$



La masse m_{tot} de l'équation (2.15) comprend l'ensemble des masses à mettre en mouvement : câbles, cabines, charges ainsi que les inerties rapportées : poulies, entraînement.

Il est important de noter que s'il n'est pas insensé de négliger les inerties de poulie dans un premier temps, il n'est pas possible de le faire pour l'entraînement principal, et notamment le volant d'inertie (fig. 2.8). Sa masse rapportée sur la ligne (plusieurs dizaines de tonnes) n'est pas négligeable en comparaison aux masses mises en mouvement.

Grâce à la conservation de l'énergie cinétique et du théorème de Steiner, il est possible de déterminer la masse équivalente m_e^{eq} de l'entraînement d'inertie J_e .

$$\frac{1}{2} J_e \omega_m^2 = \frac{1}{2} J_e' \omega_p^2 \quad \text{avec} \quad i = \frac{\omega_m}{\omega_p}$$

$$\left. \begin{array}{l} J_e' = J_e i^2 \\ J_e' = m_e^{eq} R_{SM}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow m_e^{eq} = \frac{J_e i^2}{R_{SM}^2}$$

Calcul des grandeurs moteur et électriques

Afin d'obtenir des valeurs parlantes et habituellement mesurées sur les installations, il est nécessaire de déterminer les grandeurs mécaniques contraignant le moteur.

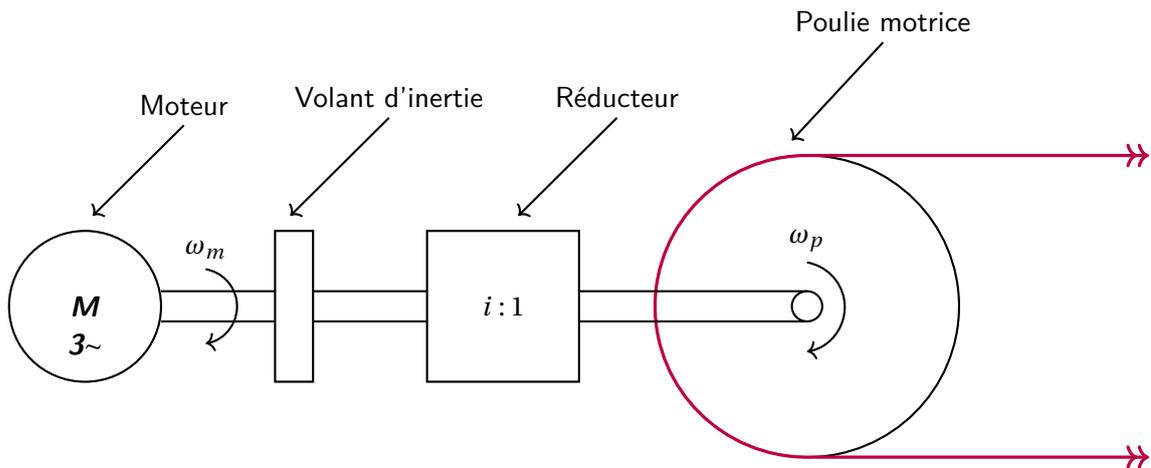


Figure 2.8 Principe d'entraînement de l'installation

Le couple moteur est exprimable ainsi :

$$M_{mot} = \frac{F_T \cdot R_{SM}}{\eta_r \cdot i} \quad (2.18)$$

La vitesse angulaire est alors :

$$\omega_{mot} = \frac{v_T}{R_{SM}} \cdot i \quad (2.19)$$

La puissance mécanique du moteur en est ainsi déduite :

$$P_{mot}^{mec} = \omega_{mot} \cdot M_{mot} = \frac{F_T \cdot v_T}{\eta_r} \quad (2.20)$$

La puissance électrique active échangée avec le réseau est estimable grâce au rendement du moteur et du convertisseur.

$$P_{reseau} = \frac{P_{mot}^{mec}}{\eta_{mot} \cdot \eta_{conv}} \quad (2.21)$$

2.2.5 Zones d'accélération/ralentissement

Le système de mise en mouvement des cabines est directement entraîné par le câble porteur-tracteur. Le mécanisme de traînage des véhicules en gare est composé de poutres à pneus fixes, qui mettent les cabines en mouvement par friction. La modification de la vitesse des pneus dans les zones d'accélération/décélération est effectuée à l'aide de courroies avec différents rapports de réduction. La photo 2.9 illustre cela.

Afin de modéliser la puissance et les forces nécessaires à cette fonction, le système est schématisé selon la figure 2.10. L'accélération est considérée comme constante et la longueur des ralentisseurs/lanceurs est connue.



Figure 2.9 Lanceur d'un télésiège débrayable

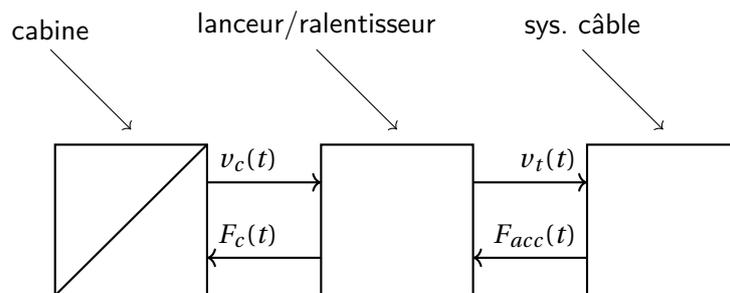


Figure 2.10 Représentation schématique du lanceur/ralentisseur

Accélération

Pour accélérer une cabine, l'entraînement principal fournit une force (supplémentaire) constante au système, durant le temps d'accélération. En considérant la vitesse du câble comme constante, la puissance fournie au système de pneus est alors constante sur toute la période d'accélération. Ceci nous livre les équations suivantes :

$$\begin{cases} v(t) = \frac{1}{m_c} \cdot F_{acc} \cdot t + v_{gare} & \Rightarrow t_{acc} = \frac{v_T - v_{gare} \cdot m_c}{F_{acc}} \\ x(t) = \frac{1}{2m_c} \cdot F_{acc} \cdot t^2 + v_{gare} t & \Rightarrow \Delta x = \frac{1}{2m_c} \cdot F_{acc} \cdot t_{acc}^2 + v_{gare} t_{acc} \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_{acc} = \frac{2\Delta x}{v_T + v_{gare}} \\ F_{acc} = \frac{m_c}{2\Delta x} \cdot (v_T^2 - v_{gare}^2) \end{cases} \quad (2.22)$$

- Où :
- t_{acc} Temps d'accélération d'une cabine
 - F_{acc} Force constante nécessaire à l'accélération
 - Δx Distance de sur laquelle la cabine est accélérée

F_{acc} s'ajoute alors durant t_{acc} à la tension dans le câble en sortie de gare.

Décélération

Le système précédemment étudié fonctionne à l'inverse. Le flux de puissance va de la cabine vers le ralentisseur à pneus. A l'instant où une cabine entre en gare (à vitesse $v_{c_0} = v_T$), il est possible de déterminer la force constante F_{acc} à appliquer sur la cabine et le temps nécessaire à la décélération (cf. équation (2.22)). Pour chaque pas de calcul, la puissance instantanée transmise par la cabine est calculée et permet de déduire la force résultante vue par le câble.

$$\begin{cases} t_{acc} &= \frac{2\Delta x}{v_T + v_{gare}} \\ F_c &= \frac{m_c}{2\Delta x} \cdot (v_{gare}^2 - v_T^2) \\ a_c &= \frac{1}{2\Delta x} \cdot (v_{gare}^2 - v_T^2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_c(t) &= F_c \cdot (v_{c_0} + a_c \cdot t) \\ F_{acc}(t) &= \frac{P_c(t)}{v_T(t)} \end{cases} \quad (2.23)$$

2.2.6 Charge

La charge d'une installation variant dans le temps, il est nécessaire de prendre en compte la fréquentation actuelle lors du lancement d'une nouvelle cabine sur la ligne. Le flux de personnes embarquant (à la SM ou SR) est mesuré par les tourniquets de contrôle d'accès. A chaque fois qu'une personne valide son abonnement, l'information est enregistrée. La zone d'embarquement est modélisée par un « réservoir à clients ». Le nombre de passagers en attente est incrémenté à chaque passage de tourniquet. Une cabine embarque toujours quatre clients (capacité maximum) ou le nombre de personnes présentes, si celui-ci est inférieur.

La masse d'une cabine est ainsi déterminée :

$$m_{c_k}^s = m_c + p \cdot m_p \quad \text{avec } p \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (\text{nbr. de passagers}) \quad (2.24)$$

3 | Implémentation

La simulation doit permettre de visualiser au cours du temps les grandeurs mécaniques et électriques permettant la compréhension de la consommation énergétique. Ces grandeurs doivent permettre de déterminer quels sont les éléments ayant le plus d'influence sur la consommation et de quantifier leurs effets sur la consommation (finale et au cours du temps).

3.1 Outils utilisés

Dans un premier temps, le modèle de base a été implémenté dans Matlab/Simulink, afin de prouver sa faisabilité et valider l'architecture/organisation du modèle. Un simulateur Hardware In the Loop (HIL) de la marque Typhoon a été utilisé pour les différentes simulations avec le modèle définitif. L'un des principaux avantages de cet outil est la mise à disposition de modèles fonctionnels de MAS régulées et systèmes de conversion de puissance (électroniques). La modélisation de la partie électrique de l'entraînement est réalisable à moindre frais. Ce système permet également la communication directe avec le monde extérieur. Il est alors tout à fait imaginable de connecter la simulation avec le système de commande d'une installation réelle, afin de faire tourner un clone virtuel en parallèle.

Le modèle est écrit en C, ainsi qu'à l'aide de blocs standards fournis avec les bibliothèques logicielles du simulateur. La ligne est considérée comme un système passif contraint d'un côté par la charge et la station aval (cabines, passagers, système de tension), et de l'autre par la station motrice (cf. fig. 3.1).

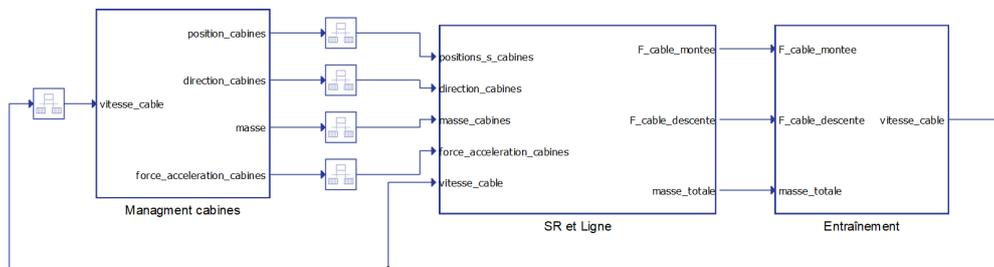


Figure 3.1 Vue d'ensemble du modèle

3.2 Références : temps et mesures

Afin de s'assurer du synchronisme de toutes les valeurs calculées vis à vis des données de référence, une variable unique détermine le temps. Cette valeur est ensuite passée aux différentes fonctions, si besoin est. La figure 3.2 illustre cela et en donne également l'utilisation pour l'interpolation des données de référence.

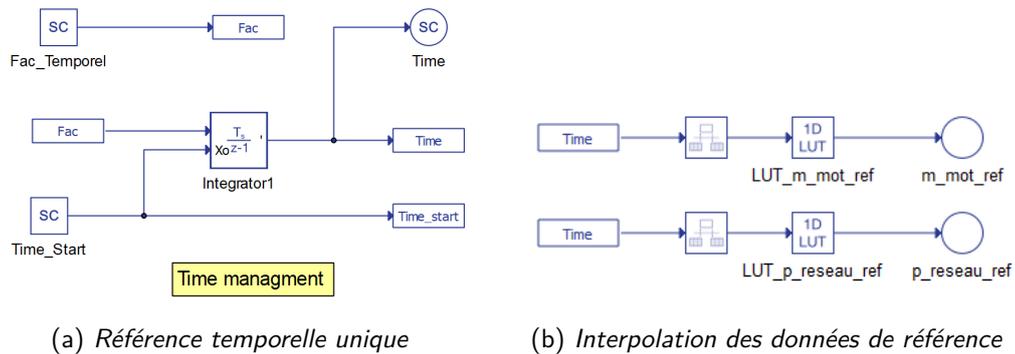


Figure 3.2 Gestion de la référence temporelle dans le modèle

3.3 Gestion des véhicules et de la charge

Ce rôle est attribué au bloc *Management cabines* visible sur la figure 3.1. Les équations des chapitres 2.2.6 et 2.2.5 sont codées dans le sous-système *Lancement cabines*. À l'intérieur de celui-ci sont gérés le cadencement des véhicules, leur accélération/décélération, leur charge, ainsi que le comptabilisation des personnes en attente. La position des cabines sur le câble est obtenue par intégration de leur direction, multipliée par la vitesse du câble. (cf. fig. 3.3)



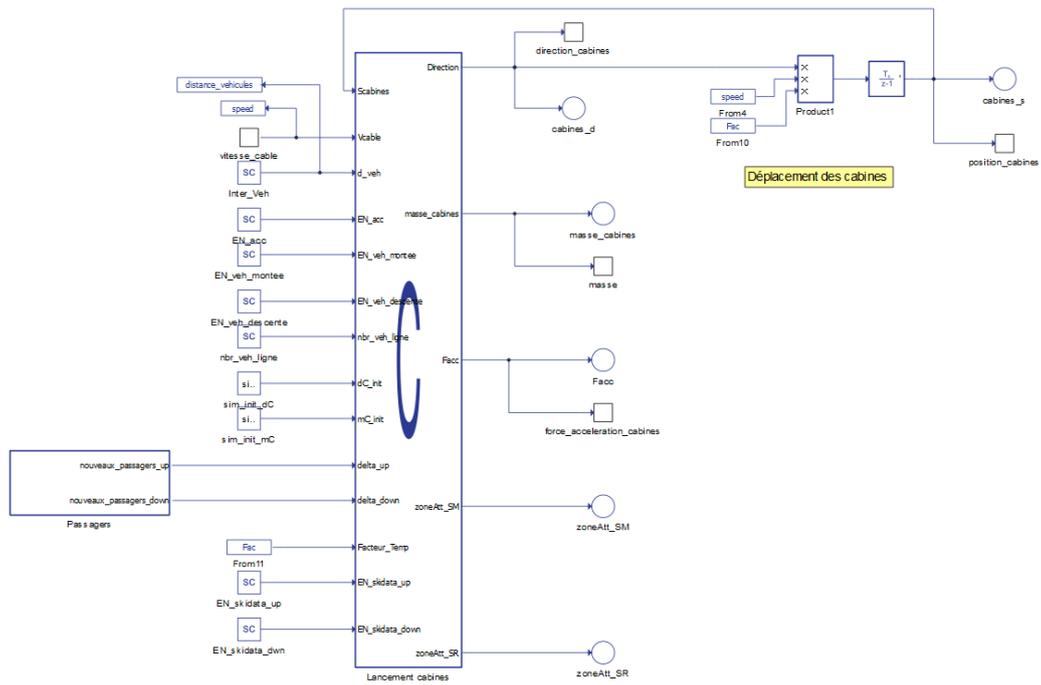
Chaque bloc « C » permet la spécification de trois sections de code :

- *Initialisation function* : exécutée à l'initialisation de la simulation
- *Output function* : exécutée à chaque pas de calcul
- *Update function* : exécutée à chaque pas de calcul, après *Output function*

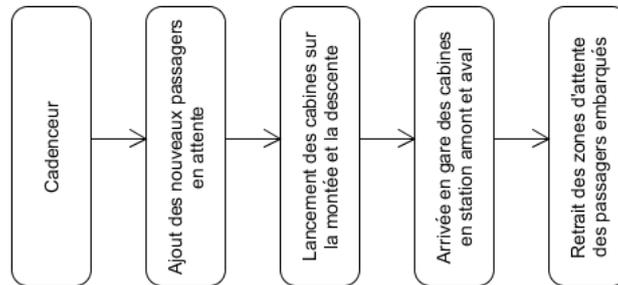
Le contenu des ces blocs est spécifié dans les annexes.

Encapsulé dans le bloc *Passagers*, le nombre de nouveaux passagers dans les gares est déterminé par la différence de la somme cumulée des passages entre deux pas de calculs. Cette information permet également de calculer le débit d'arrivée des clients. Une somme glissante, sur une fenêtre de soixante secondes, délivre le débit en pers./min (fig. 3.4).

3.3 Gestion des véhicules et de la charge



(a) Schéma-bloc



(b) Diagramme de flux de la fonction Lancement cabines

Figure 3.3 Gestion des véhicules et des passagers

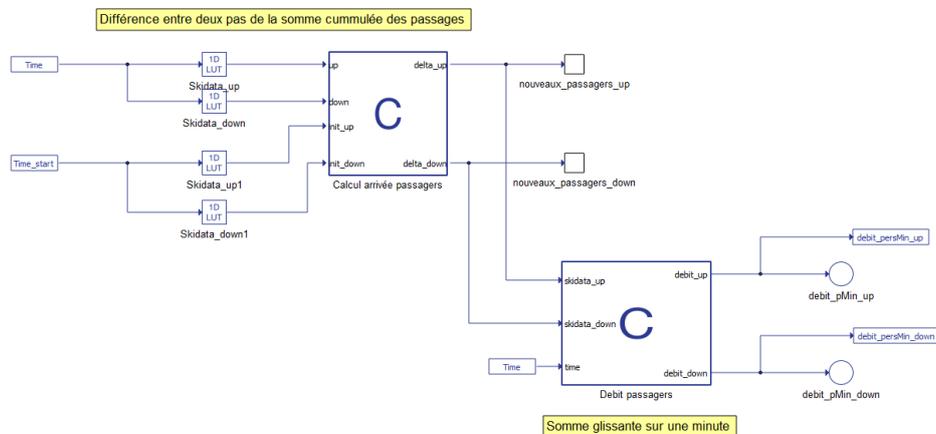
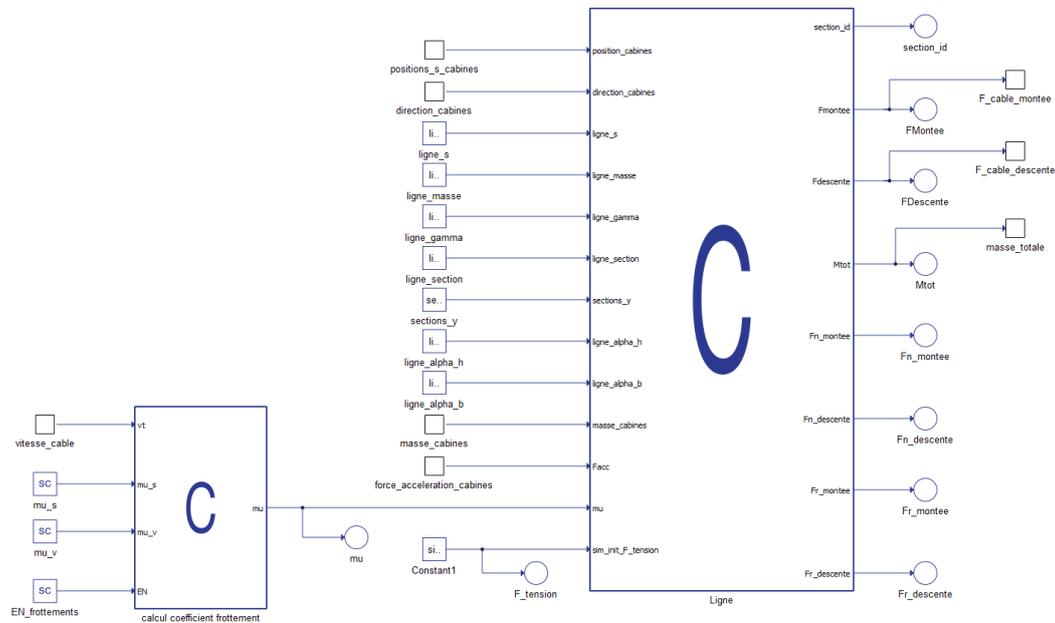


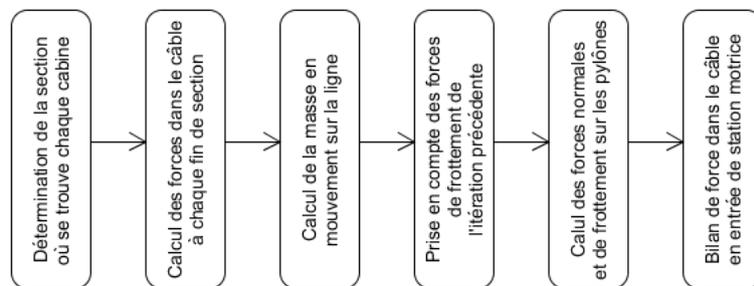
Figure 3.4 Détermination de l'arrivée des passagers ainsi que du débit correspondant

3.4 Station de renvoi et ligne

Tous les calculs concernant la mécanique de ligne et la station de renvoi sont attribués au bloc principal *SR et Ligne* (fig. 3.1). Conformément aux relations énoncées aux chapitres 2.2.1, 2.2.2 et 2.2.3, les forces en jeu sont déterminées au sein des fonctions *Ligne* et *Calcul coefficient frottement* (cf. fig. 3.5).



(a) Schéma-bloc



(b) Diagramme de flux de la fonction Ligne

Figure 3.5 Calcul des forces en jeu dans la mécanique de ligne

3.5 Entraînement

Les équations de la dynamique et celles relatives à la chaîne cinématique (chap. 2.2.4) sont implémentées à l'aide de blocs standards dans le sous-système *Entraînement* (fig. 3.1). La figure 3.6 illustre la division en sous-systèmes choisie. Un asservissement en vitesse est implémenté sur la poulie motrice. La force de traction dans le câble nécessaire est déterminée par le régulateur, en fonction de l'erreur de vitesse. Ceci est représenté sur la figure 3.7. Un régulateur PI avec feed-forward (FF) a été mis en place. Le terme FF permet de limiter les saut abruptes causés par les discontinuités des forces présentes dans le câble. La valeur de ce terme est fixée comme étant la différence entre les forces dans

le brin montant et descendant du câble. Cela représente la force de traction nécessaire au maintien de la vitesse de l'installation. La force de traction est également limitée de manière à ce que la puissance mécanique délivrée par le moteur ne puisse pas excéder les limites passées en paramètre.

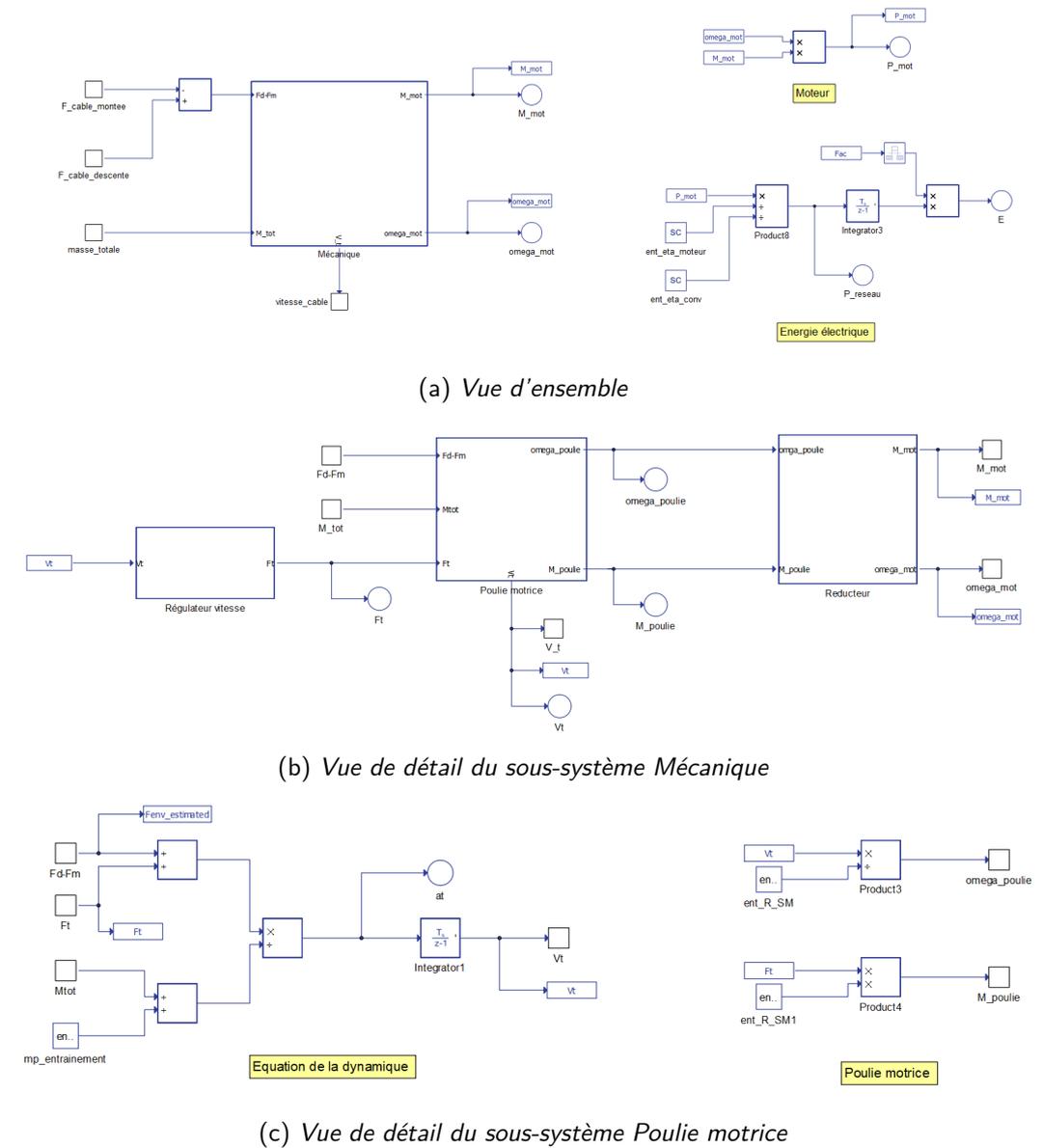
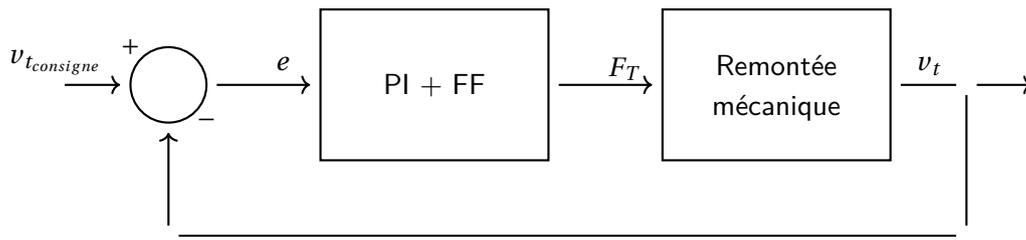
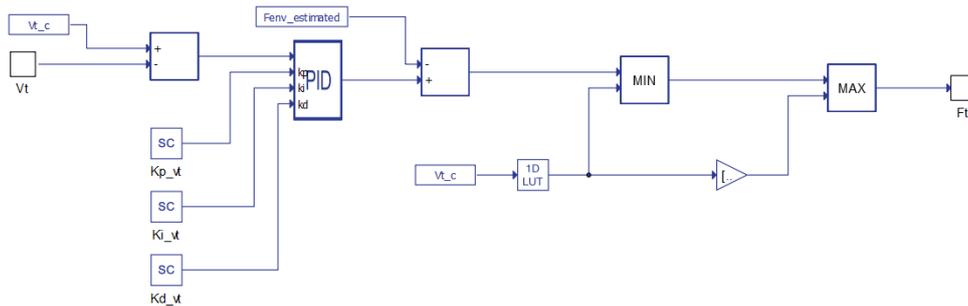


Figure 3.6 Division en sous-systèmes du bloc Entraînement



(a) Schéma de principe



Régulateur

(b) Implémentation

Figure 3.7 Asservissement en vitesse

3.6 Système SCADA et post traitement

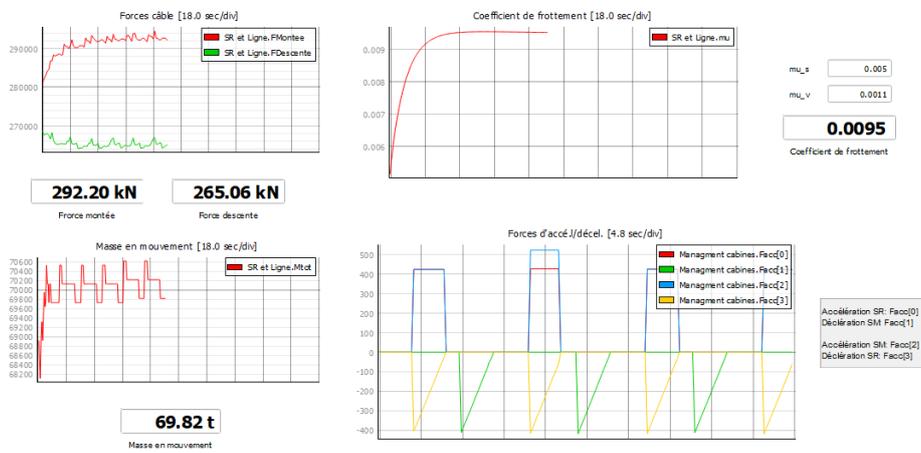
Le panel SCADA, créé sur la bases des bibliothèques logicielles à disposition, permet la visualisation des données et l'adaptation des paramètres de manière conviviale en cours de simulation. Les forces calculées peuvent être visualisées de manière globale, ou pylône par pylône. Un suivi individuel des véhicules est également possible. L'outil « oscilloscope » rend possible l'enregistrement de signaux à haute fréquence, en cours de simulation. Ceux-ci peuvent ensuite être exportés aux format « .CSV » ou « .MAT ». Le widget « data logger » permet quant à lui l'enregistrement de signaux à plus basse fréquence ($\geq 250\text{ms}$). Pour l'analyse des résultats, les signaux voulus ont été enregistrés au format « .CSV ». Les graphiques et autres valeurs en découlant ont été obtenus sur Matlab.

Quelques extraits du panel SCADA sont représentés sur la figure 3.8 .

3.6 Système SCADA et post traitement



(a) Fonctions principales



(b) Forces dans le câble



(c) Supervision d'un pylône et d'une cabine

Figure 3.8 Extraits du panel SCADA

3.7 Échantillonnage et résolution

Du modèle

Le bloc « Managment cabines » (cf. fig. 3.1) est échantillonné à $100\mu s$. Cela signifie que la position des cabines est calculée avec une précision de $100 \cdot 10^{-6} [s] \cdot 5 [m/s] = 0.5 mm$ ¹. Il faut cependant garder en tête que les coordonnées de la ligne ont un échantillonnage plus élevé. Une interpolation linéaire est effectuée entre les points calculés.

Les blocs « SR et Ligne » et « Entraînement » modélisant des phénomènes mécaniques plus lents, et nécessitant des ressources de calcul plus élevées, sont échantillonnés à 10ms. Les forces en jeu dans le systèmes sont alors déterminées, à chaque fois que le câble a parcouru cinq centimètres².

Des résultats

Le système SCADA utilisé permet l'enregistrement des signaux souhaités à une fréquence de deux mille points par seconde, soit un point toutes les $500\mu s$ (2.5 mm de câble déroulé).

3.8 Paramétrisation du modèle

Un script Matlab permet la spécification des données de l'installation (contenu du tab. 2.1). Les coordonnées x,y,s de la ligne sont ensuite échantillonnées par pas de cinquante centimètres, et les véhicules répartis uniformément sur la ligne. Toutes les données descriptives et les mesures décrites au chapitre 3.11 sont enregistrés dans un fichier « .MAT ». Celui-ci est lu par le simulateur temps-réel au moment de la compilation. Il est ainsi possible de simuler le comportement de n'importe quel téléphérique débrayable à mouvement continu de topologie analogue, de manière rapide et souple.

Le système SCADA du simulateur permet l'ajustement des paramètres suivants en cours de simulation :

- Gains du régulateur PI de vitesse
- Rendement du convertisseur, moteur et réducteur
- Coefficients de frottement de ligne
- Profil de vitesse de référence
- Distance entre les véhicules
- Nombre de véhicules en ligne

Les fonctions suivantes sont également désactivables à tout moment :

- Lancement des véhicules en station motrice
- Lancement des véhicules en station de renvoi
- Accélération/déclération des véhicules
- Frottements
- Passagers sur la montée
- Passagers sur la descente

1. Pour une vitesse d'exploitation nominale

2. Idem note précédente

L'occupation des véhicules à un temps t n'étant pas connue sur l'installation de référence, il est nécessaire de commencer la simulation quelques minutes avant l'ouverture afin de disposer des bonnes conditions initiales.

3.9 Grandeurs d'entrée et de sortie

Le tableau 3.1 liste les entrées du modèle, le 3.2 regroupe l'ensemble des grandeurs calculées et enregistrables en simulation.

Désignation modèle	Description	Unité	Échantillonnage [s]
Vt	Profil de consigne de vitesse au cours du temps	m/s	10m
Skidata_up	Somme cumulée (depuis $t=0$) des passagers montants	Pers.	100 μ
Skidata_down	Somme cumulée (depuis $t=0$) des passagers descendants	Pers.	100 μ

Table 3.1 Grandeurs d'entrée du simulateur

Désignation modèle	Description	Unité	Échantillonnage [s]
F_{acc}	Force d'accélération/décélération des cabines	N	100 μ
at	Accélération de la ligne	m/s ²	10m
cabines_d	Direction des cabines	-1/0/1	100 μ
cabines_s	Coordonnées s des cabines	m	100 μ
E	Energie soutirée au réseau	Wh	10m
Fdescente	Force dans le brin de câble descendant en entrée de poulie motrice	N	10m
Fmontee	Force dans le brin de câble montant en entrée de poulie motrice	N	10m
Fn_descente	Forces normales d'appui sur les pylônes causées par le brin descendant	N	10m
Fn_montee	Forces normales d'appui sur les pylônes causées par le brin montant	N	10m
Fr_descente	Forces de frottement sur les pylônes causées par le brin descendant	N	10m
Fr_montee	Forces de frottement sur les pylônes causées par le brin montant	N	10m
Ft	Force de traction appliquée sur la poulie motrice	N	10m
M_mot	Couple moteur	Nm	10m
m_mot_ref	Couple moteur de référence (mesuré)	Nm	10m
M_poulie	Couple développé sur la poulie motrice	N	10m
masse_cabines	Masse des cabines	kg	100 μ
Mtot	Masse totale en mouvement sur la ligne	kg	10m
mu	Coefficient de frottement global de la ligne	-	10m
omega_mot	Vitesse angulaire du moteur	rad/s	10m
omega_poulie	Vitesse angulaire de la poulie motrice	rad/s	10m
P_mot	Puissance mécanique du moteur	W	10m
P_reseau	Puissance active échangée avec le réseau	W	10m
p_reseau_ref	Puissance active de référence échangée avec le réseau (mesurée)	kW	10m
section_id	Numéro de section dans laquelle se trouve chaque cabine	-	10m
Time	Temps de la simulation	s	100 μ
St	Distance de câble déroulé	m	10m
Vt	Vitesse de marche de l'installation	m/s	10m
Vt_c	Vitesse de marche de consigne (mesurée ou générée)	m/s	10m
ZoneAtt_SM	Occupation de la zone d'embarquement en station motrice	Pers.	100 μ
ZoneAtt_SR	Occupation de la zone d'embarquement en station retour	Pers.	100 μ

Table 3.2 Grandeurs de sortie du simulateur

3.10 Accélération de la simulation

L'accélération du temps d'un facteur soixante permet de simuler une journée d'exploitation en une vingtaine de minutes. Pour parvenir à cela, nous grugeons le bloc *Management cabines* afin de lui faire croire que le temps s'écoule plus rapidement. Ainsi, pour une bilan de force et une vitesse résultante donnés, le système fait avancer les véhicules soixante fois plus rapidement. Pour maintenir une concordance, les données de consignes (vitesse, passagers) sont également accélérées. Cette modification influe sur la résolution du modèle. La position des cabines a maintenant une résolution de

$100 \cdot 10^{-6}[\text{s}] \cdot 5[\text{m/s}] \cdot 60 = 30\text{mm}$ et les forces sont déterminées chaque fois que le câble aura avancé de 3 mètres. La portée la plus courte étant de 33.8 mètres, cette résolution est suffisante pour que les résultats de simulation restent représentatifs.

3.10.1 Compensation des effets

Les sauts de consigne provoquant des accélérations plus fortes, le régulateur réagira de manière violente. Ceci donne lieu à des pics de puissance très élevés et artificiels. En divisant le gain proportionnel du régulateur de vitesse du même facteur que l'accélération temporelle, les pics de puissances dus à un saut de consigne retrouvent des valeurs proches de celles de références. Cela a cependant un inconvénient : La vitesse simulée de l'installation ne suit plus correctement la consigne et en cas de régimes transitoires successifs, une erreur non négligeable est temporairement introduite sur les calculs de couple et puissance. Ceci sera illustré en détail dans le chapitre 3.12.2.

3.11 Données de référence

Le système de commande de Sisag AG permet l'enregistrement d'une grande gamme de données lors du fonctionnement de l'installation. Afin de pouvoir confronter le modèle avec la réalité, les grandeurs de la table 3.3 ont été récupérées. Les données correspondantes des tourniquets d'accès ont été ajoutées afin de contraindre le modèle de manière réaliste.

Description	Valeur observée	Désignation
Consigne de vitesse	non	m/s
Vitesse réelle câble	non	m/s
Couple moteur	oui	Nm
Courant moteur	non	A
Courant réseau	non	A
Consigne de distance entre véhicules	non	m
Puissance active réseau	non	kW

Table 3.3 Grandeurs mesurées sur l'installation

3.11.1 Pré-traitement

Chaque jeu de données représente un jour complet d'exploitation. Les jours suivants ont été choisis :

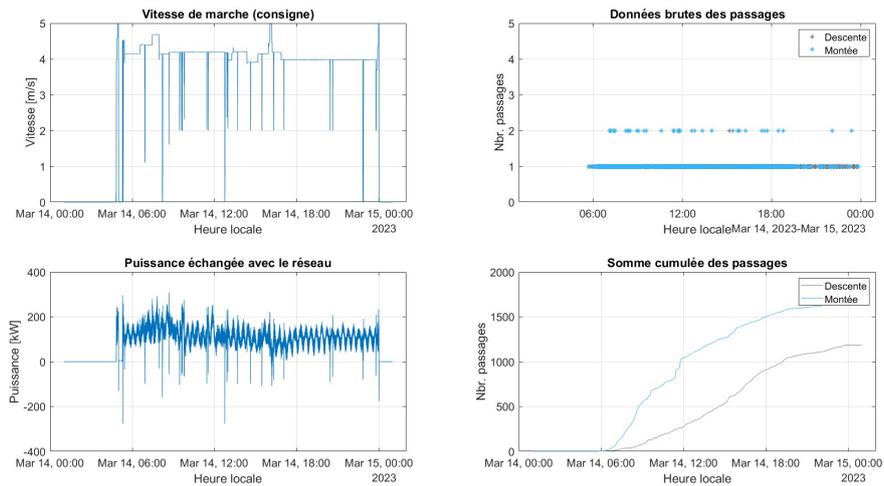
- Mardi 14 et mercredi 15 mars 2023 (exploitation hivernale, heure d'hiver (HEC))
- Samedi 15 et dimanche 16 juillet 2023 (exploitation estivale, heure d'été (HEEC))

Afin d'assurer le synchronisme entre tous les jeux de données, ils ont été ré-échantillonnés à la seconde dans le fuseau horaire local. L'enregistrement des données dans le système de commande se faisant dans le standard UTC tous les jeux de données s'étendent alors localement de 01h00 resp. 02h00 le matin au jour J à 01h00 resp. 02h00 le matin au jour J+1. La figure 3.9 montre les données ré-échantillonnées pour deux jours d'exploitation.

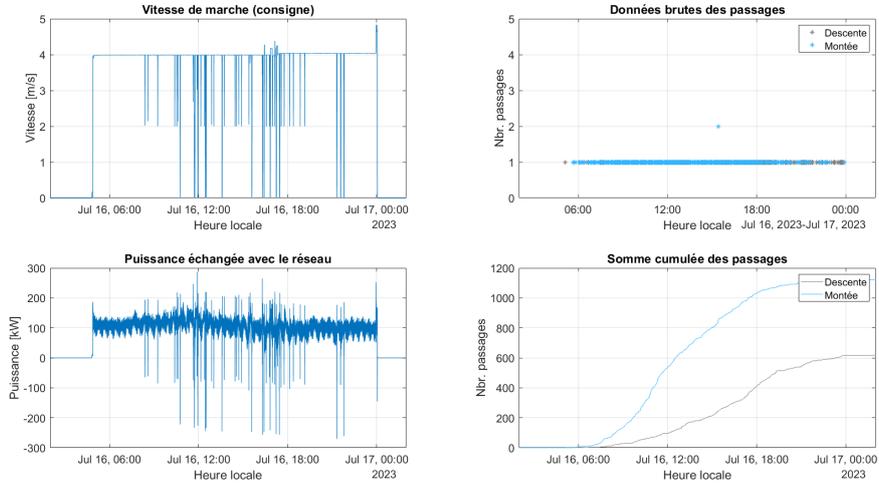
3.11.2 Consistance des mesures

Le couple moteur étant calculé par le convertisseur de fréquence, et non directement mesuré, il est nécessaire de s'assurer de la qualité du calcul. La puissance mécanique du moteur est calculée à l'aide des mesures de vitesse et de couple. Celle-ci est ensuite superposée sur la mesure de puissance (active) soutirée au réseau. L'écart constaté entre les deux courbes doit représenter le rendement du convertisseur et du moteur. La figure 3.10 montre cela pour la journée du 14 mars. Nous pouvons en déduire que l'ensemble moteur-convertisseur a un rendement d'environ 90%.

Chapitre 3. Implémentation



(a) 14 mars 2023



(b) 16 juillet 2023

Figure 3.9 Vue d'ensemble de deux journées d'exploitation

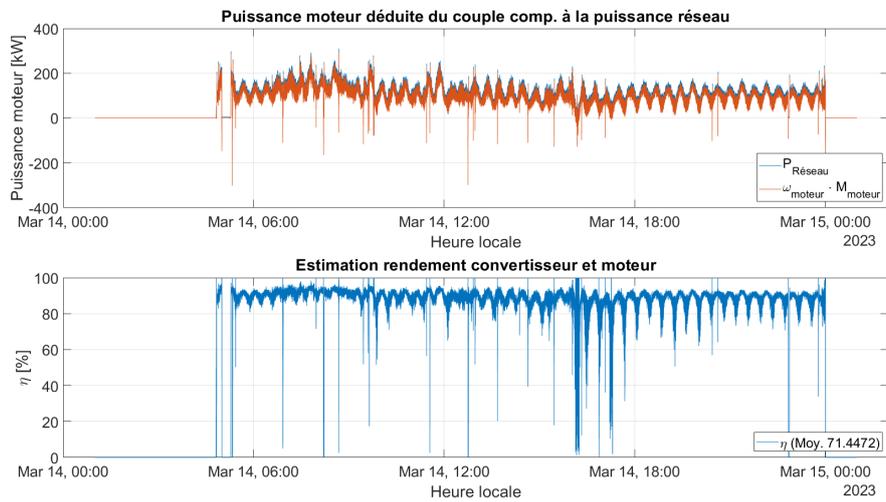


Figure 3.10 Estimation du rendement moteur-convertisseur

3.12 Analyse de la précision du modèle

Le couple développé par le moteur a été choisi comme valeur de référence pour déterminer la qualité du modèle. Cette grandeur est dépendante de tous les phénomènes physiques de la ligne. De plus, les caractéristiques du réducteur étant bien connues, sa valeur peut être déterminée sans hypothèse supplémentaire. Le modèle a été calibré avec le jeu de données du 15 mars 2023, puis confirmé avec celui du 14 mars.

Les éléments suivants ont été observés :

- Valeur moyenne
- Variations lentes dues à la charge
- Oscillations rapides dues au lancement/ralentissement des véhicules

3.12.1 Calibration

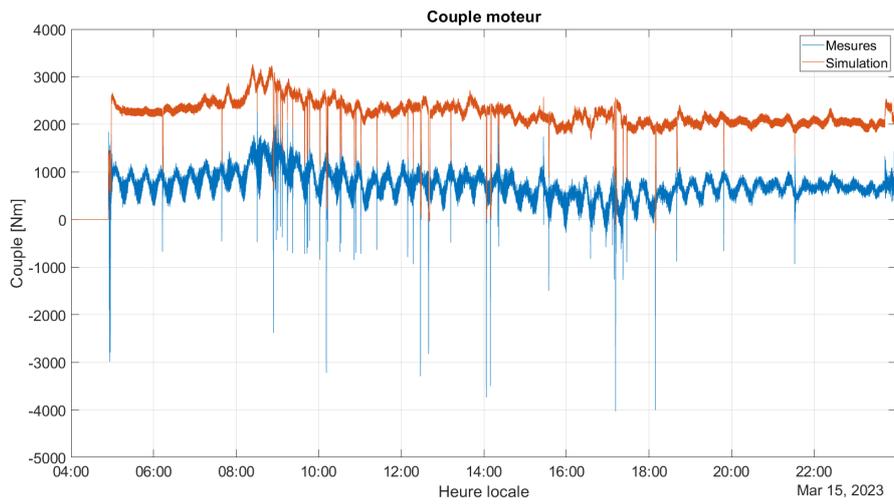
Coefficients de frottement

Les valeurs proposées par Szlosarek ; Yan ; Kröger ; Nussbaumer (11) (cf. tab. 2.3) ont été choisies comme valeurs de départ. Les simulations effectuées montrent que celles-ci sont trop élevées pour notre cas d'étude. Un affinage par essais successifs a permis de déterminer que les valeurs $\mu_s = 0.005$ et $\mu_v = 0.0011$ étaient le meilleur compromis. Ceci est illustré par la figure 3.11.

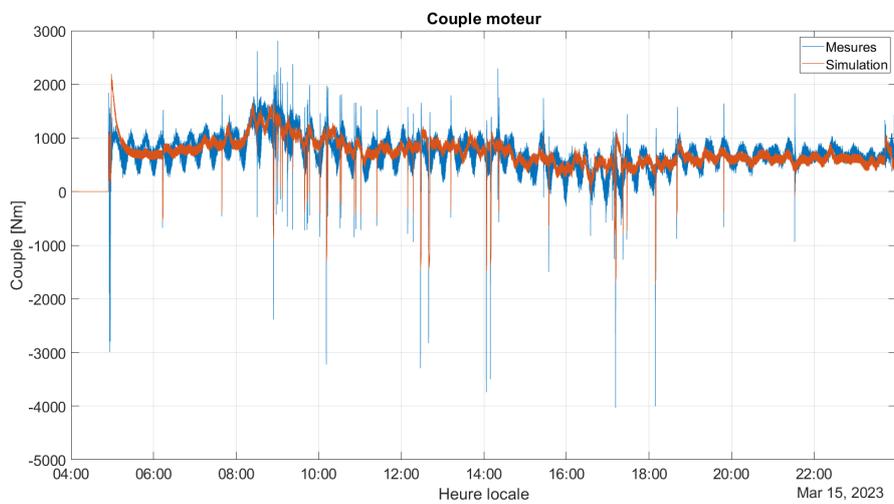
Nous noterons que si le coefficient μ_v se trouve dans la plage de valeurs publiées par Richter ; Meyer-Piening ; Oplatka (12), μ_s est plus faible que toutes les références.

Rendement

Le rendement du réducteur étant connu avec précision, seuls ceux du convertisseur et moteur ont été adaptés. Le rendement combiné de ces deux appareils ayant été estimé à 0.9 au chap. 3.11.2, il a été supposé que leur efficacité étaient identiques. Les valeurs fixées sont donc : $\eta_{mot} = \eta_{conv} = 0.95$.



(a) $\mu_s = 0.0096$ et $\mu_v = 0.0052$



(b) $\mu_s = 0.005$ et $\mu_v = 0.0011$

Figure 3.11 Effets des coefficients de frottement

3.12.2 Observations

Oscillations lentes de couple

La mesure de puissance présente, indépendamment de la période de mesure, une oscillation sinusoïdale d'une amplitude de 25% de la valeur moyenne, avec une période d'environ 25 minutes. Il est également notable que l'oscillation est très peu influencée par la vitesse d'exploitation. Lors d'un arrêt, puis redémarrage, l'oscillation en question reprend à l'endroit où elle avait été arrêtée. Cette caractéristique permet de suspecter qu'une asymétrie dans la charge soit à l'origine de ce phénomène. Plusieurs hypothèses ont été étudiées, sans qu'aucune ne donne de réponse pleinement satisfaisante. Le tableau 3.4 répertorie les hypothèses testées.

Hypothèse	Effet observé
Variation de la force de tension hydraulique de $\pm 8\%$	aucune influence
Répartition non homogène des véhicules (selon fig. 3.12)	aucune influence
Présence de charge (passagers) (fig. 3.13b)	faible oscillation
Absence de charge (passagers) (fig. 3.13a)	aucune oscillation

Table 3.4 Détermination de la causes des oscillations lentes

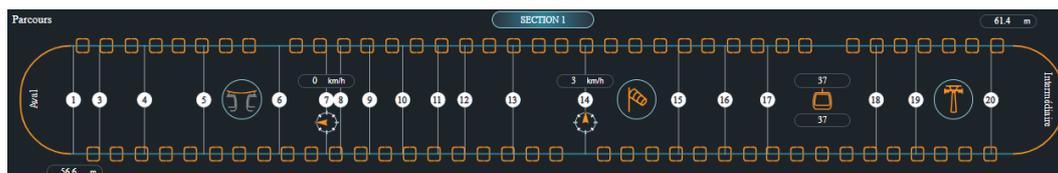
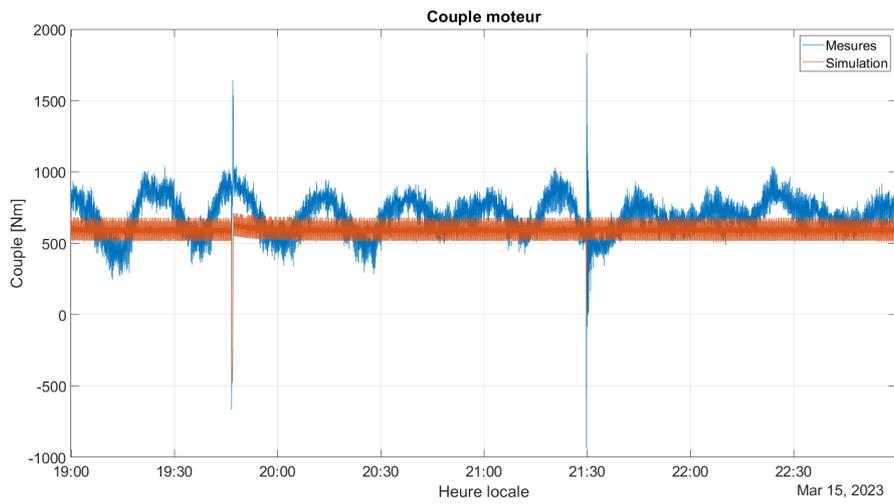
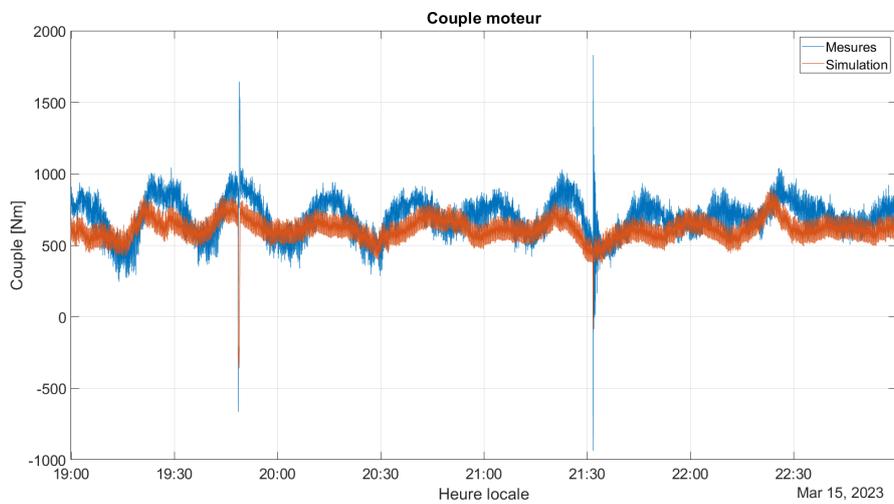


Figure 3.12 Répartition réelle des véhicules sur la ligne

Ces résultats montrent que la fréquence d'arrivée des passagers cause effectivement ce phénomène. Les amplitudes en jeu ne concordent cependant pas. Il n'est alors pas clair si la charge cause l'intégralité de ces oscillations, ou si d'autres phénomènes non modélisés les amplifient. Le déphasage variable entre les oscillations mesurées et simulées peut s'expliquer par le temps indéterminé s'écoulant entre le passage d'un client aux bornes d'accès et l'embarquement effectif sur la ligne.



(a) *Sans passagers*



(b) *Avec passagers*

Figure 3.13 Effet de la charge sur les oscillations lentes

Oscillations rapides de couple

A chaque fois qu'une cabine est couplée/découplée du câble, la modification de la masse en mouvement engendre une réaction immédiate de l'entraînement, qui maintient la vitesse de marche constante. La période de cette oscillation dépend donc de la vitesse de marche et de l'écart réel des véhicules sur le tracé. Ce phénomène est clairement visible sur les mesures de couple, ainsi que les résultats de simulation (cf. fig. 3.14).

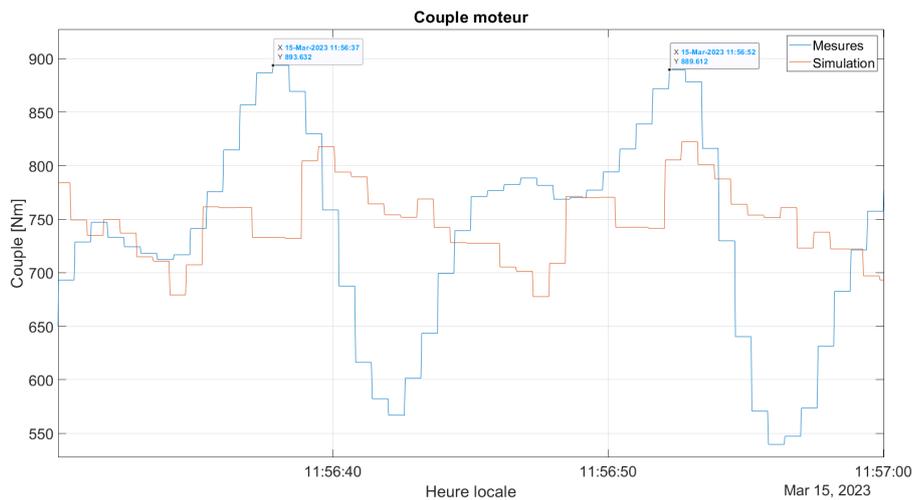


Figure 3.14 Oscillations rapides dues au couplage/découplage des véhicules

La différence d'amplitude constatée sur la figure précédente (3.14) se retrouve sur toute la durée de simulation. Cela peut être dû à la modélisation quasi idéale du dispositif d'accélération/freinage des véhicules (système considéré sans perte).

Le déphasage constaté est dû à l'implémentation du cadencement des véhicules. La distance entre deux cabines simulées est rigoureusement identique. Dans la réalité, les glissements et frottements occasionnés lors du déplacement des véhicules en gare engendrent des « retards » et « avances ». Bien qu'une zone de régulation de distance (cadenceur) permette de corriger cette erreur, la distance réelle n'est jamais constante. De plus, la distance inter-véhicule n'est pas forcément un diviseur de la longueur de câble. La fréquence de lancement des cabines est ainsi légèrement variable dans le temps, et très difficilement prédictible.

Valeurs moyennes

Le tableau 3.5 montre les écarts des valeurs moyennes de couple et de puissance pour les 14 et 15 mars. Afin de supprimer les effets de bord liés au démarrage et à l'arrêt de l'installation (idem chap. 3.12.2), les moyennes sont calculées sur une plage horaire allant de 06h00 à 23h00.

Jeu de données	Valeur moyenne		Erreur	
	Mesure	Simulation	Absolue	Relative
14 mars 2023	721.65 Nm	685.4 Nm	-36.2 Nm	-5 %
15 mars 2023	733.8 Nm	707.2 Nm	-26.6 Nm	-3.6 %
15 juillet 2023	672.3 Nm	682.2 Nm	9.9 Nm	+1.47 %
16 juillet 2023	675.5 Nm	679 Nm	3.5 Nm	+0.5 %

(a) Couple moteur

Jeu de données	Valeur moyenne		Erreur	
	Mesure	Simulation	Absolue	Relative
14 mars 2023	114.7 kW	109.2 kW	-5.5 kW	-4.77 %
15 mars 2023	117.6 kW	113.5 kW	-4.1 kW	-3.5 %
15 juillet 2023	104.7 kW	104 kW	-0.7 kW	-0.7 %
16 juillet 2023	104.5 kW	102.8 kW	-1.7 kW	-1.6 %

(b) Puissance réseau

Table 3.5 Comparaison des valeurs moyennes



Il a été déterminé que les données concernant l'affluence pour les 15 et 16 juillet présentent de écarts avec la réalité. La charge étant sous estimée, la simulation aurait dû calculer des valeurs moyennes plus élevées. Il faut donc observer ces résultats avec précaution, même s'ils sont proches de la réalité.

La table 3.5 nous permet d'estimer la précision du modèle à $\pm 5\%$ (sur les valeurs moyennes).

Dérives

Dues à l'accélération de la simulation

Lors de sauts rapides de consigne, le simulateur ne parvient pas à suivre correctement la vitesse de marche. Ceci est causé par la diminution du gain proportionnel (fonctionnement au chap. 3.10.1). Le couple (et par extension puissance) nécessaire à la décélération/accélération est présent sur une grande plage temporelle. Les résultats obtenus lors de ces phénomènes ne sont donc pas représentatifs de la réalité. La figure 3.15 représente un tel cas.

Non identifiées

Certains creux ou bosses de puissances ne se retrouvent pas, en amplitude, dans les valeurs simulées. Il n'a pas pu être clairement déterminé pourquoi cela advenait. Dus à leur ponctualité, il est possible que la charge à ce moment précis soit mal connue. En

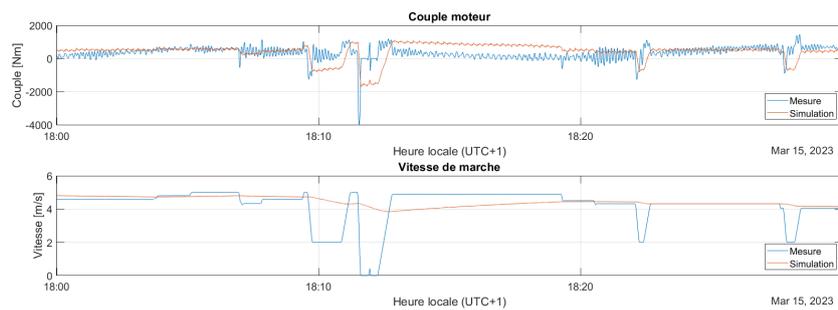


Figure 3.15 *Écart de simulation dû à la diminution du gain proportionnel*

effet, l'installation dispose de plusieurs véhicules matériel, et leur utilisation n'est pas répertoriée. Il est alors possible que de transport matériel soit effectué à ce moment là. Il s'agit cependant d'une hypothèse difficilement vérifiable.

3.12.3 Résumé des observations

A la lumière des éléments analysés ci-dessous, nous pouvons en conclure que le modèle implémenté représente la réalité de manière suffisamment fidèle, pour analyser la consommation énergétique à l'échelle d'un jour d'exploitation. Il sera cependant gardé à l'esprit que les résultats de simulations si situent à $\pm 5\%$ de la réalité³. De plus, l'installation réelle est plus instable que le modèle, et oscille donc avec une plus grande amplitude et durant plus longtemps après une saut de consigne (de vitesse).

3. Dans le cas d'étude considéré

4 | Étude de stratégies d'optimisation énergétique

La diminution de la vitesse d'exploitation et le nombre de véhicules sont deux paramètres facilement modifiables sur une installation existante. Aucune modification structurelle n'est nécessaire, et la mise en place des mesures peut être faite manuellement, ou directement dans le système de commande. La vitesse de marche influe sur l'énergie nécessaire à la mise en mouvement de la charge, ainsi que les pertes occasionnées par frottement. La limitation de la masse en mouvement permet de diminuer l'énergie nécessaire à la mise en mouvement de la charge, et également de réduire les frottements. Contrairement à l'adaptation de vitesse, ceci est difficilement réalisable en cours d'exploitation. Nous partirons de l'hypothèse que le nombre de cabines est fixe pour une journée d'exploitation.

D'autres améliorations, telles que l'utilisation de garnitures élastomères plus performantes, permettent des gains d'énergie considérables (11). Cependant, nous nous intéresserons ici aux deux mesures précitées.

En reprenant la représentation des zones d'embarquement par un réservoir à passagers (cf. chap. 2.2.6), nous pouvons formaliser sa modélisation grâce à l'équation (4.1). Nous continuerons à négliger le fait que certains clients ne remplissent pas les véhicules à 100% de leur capacité, ainsi que le délais entre le passage aux tourniquets et la sortie de gare de la cabine.

$$\frac{d\#Pers.}{dt} = d_{in} - d_{out}(v_T) \quad (4.1)$$

Où :

- d_{in} Débit d'arrivée des passagers
- d_{out} Débit théorique de l'installation
- $\#Pers.$ Nombre de personnes en attente

Le but premier de la remontée mécanique est de transporter les clients de la station aval à la station amont, ou inversement. La contrainte principale est définie comme le temps d'attente dans les zones d'embarquement. Pour s'assurer que l'installation soit en tout temps capable d'absorber le flux de passagers, il est nécessaire que le débit de sortie soit supérieur ou égal au débit d'entrée (équ. (4.1)). Nous pouvons alors traiter ce problème avec un adaptateur de débit monté en cascade, tel que sur la figure 4.1. La modification continue de la vitesse d'exploitation n'étant pas souhaitable, un algorithme de type « fuzzy logic » semble le plus adapté.

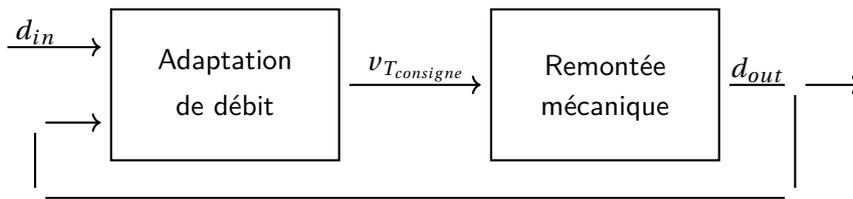


Figure 4.1 Adaptation de débit

4.1 Situation actuelle

Sisag AG a mis en place un « EcoMode », agissant sur la vitesse d'exploitation. Celui-ci reflète la topologie proposée ci-dessus. L'algorithme consiste en un set de règles, présenté dans le tableau 4.1. Il en résulte une discrétisation de la caractéristique vitesse-débit. Trois points de travail sont ainsi définis, tels que représentés sur la figure 4.2. A chaque valeur de débit d'arrivée des passagers correspond une vitesse de marche, respectivement un débit effectif maximal.

Affluence	Vitesse de consigne	$\frac{d\#Pers.}{dt}$ min/max
0 - 720 Pers./h	4 m/s	-17 / -5 [Pers./min]
720 - 1800 Pers./h	4.3 m/s	-6 / +12 [Pers./min]
> 1800 Pers./h	5 m/s	+9 / - [Pers./min]

Table 4.1 Règles d'adaptation de vitesse actuelles

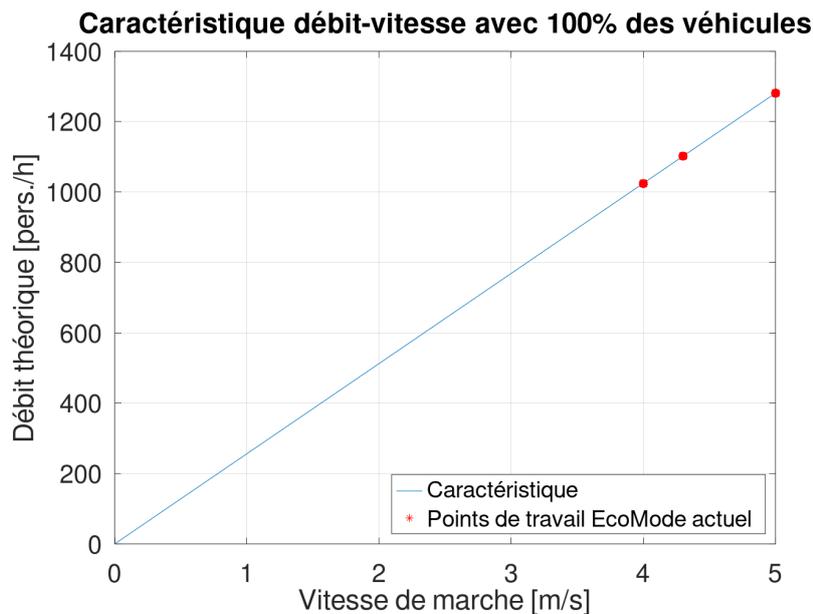


Figure 4.2 Points de fonctionnement

4.2 Résultats de simulation et stratégie d'optimisation

Afin de quantifier les effets de la vitesse et du nombre de véhicules sur la puissance développée et l'énergie consommée, plusieurs scénarios ont été simulés. Sur la base des résultats obtenus, une stratégie d'exploitation visant à optimiser la consommation énergétique sera proposée et validée par simulation.

4.2.1 Effets de la vitesse et du nombre de véhicules

Afin de chiffrer l'augmentation ou diminution de la consommation d'énergie causée par la modification de la vitesse de marche et/ou le nombre de véhicules, une simulation de référence pour chaque jeu de données (jour d'exploitation) a été obtenue ainsi :

- La vitesse de consigne mesurée est adaptée :
 - Les arrêts et réductions de vitesse (2 m/s) ont été conservés
 - La vitesse de croisière est fixée à 5 m/s
- 100% des véhicules sont mis en ligne avec un espacement de 56.2 m.
- L'énergie en kWh est obtenue par intégration de la puissance instantanée sur toute la durée de la simulation.

Le pourcentage d'économie réalisé est calculé selon :

$$\Delta_E = \frac{E_{sim} - E_{sim_{ref}}}{E_{sim_{ref}}} \quad (4.2)$$



Δ_E représente la part d'énergie économisée, par rapport aux conditions de référence, pour un jour d'exploitation donné, si l'installation avait fonctionné selon les conditions de simulation. Il faut également relever que la précision du modèle n'est pas prise en compte dans ce calcul.

La figure 4.3 représente graphiquement les résultats de simulations du tableau 4.2 pour le 15 mars 2023.

Chapitre 4. Étude de stratégies d'optimisation énergétique

Vitesse de croisière [m/s]	Pourcentage de véhicules en ligne	Intervalle [m]	Débit [pers./h]	Energie [kWh]	Économie [%]	Paramètre varié
15 mars 2023						
5	120	40,5	1778	2848	4,6	Véhicules
4,3	120	40,5	1529	2304	-15	Vitesse et véhicules
4	120	40,5	1422	2088	-23,2	Vitesse et véhicules
3,8	120	40,5	1351	1949	-28,4	Vitesse et véhicules
3,5	120	40,5	1244	1749	-35,7	Vitesse et véhicules
5	100	56,2	1281	2722	0	-
4,3	100	56,2	1102	2203	-19	Vitesse
4	100	56,2	1025	1977	-26,6	Vitesse
3,8	100	56,2	974	1865	-31,5	Vitesse
3,5	100	56,2	897	1674	-38,5	Vitesse
5	75	75,35	956	2639	-3	Véhicules
4	75	75,35	764	1938	-29	Vitesse et véhicules
4,3	75	75,35	822	2137	-21,4	Vitesse et véhicules
3,8	75	75,35	726	1809	-33,5	Vitesse et véhicules
3,5	75	75,35	669	1624	-40	Vitesse et véhicules
5	65	86,5	832	2609	-4	Véhicules
4,3	65	86,5	716	2112	-22	Vitesse et véhicules
4	65	86,5	666	1915	-29,6	Vitesse et véhicules
16 juillet 2023						
5	100	56,2	1281	2673	0	-
4,3	100	56,2	1102	2159	-19,2	Vitesse et véhicules
4	100	56,2	1025	1955	-26,8	Vitesse et véhicules
3,8	100	56,2	974	1823	-31,8	Vitesse et véhicules
3,5	100	56,2	897	1634	-39	Vitesse et véhicules
5	75	75,35	956	2591	-3	Véhicules
4,3	75	75,35	822	2093	-21,7	Vitesse et véhicules
4	75	75,35	764	1895	-29	Vitesse et véhicules
3,8	75	75,35	726	1768	-34	Vitesse et véhicules
3,5	75	75,35	669	1584	-40	Vitesse et véhicules
5	65	86,5	832	2560	-4,2	Véhicules
4,3	65	86,5	716	2069	-22,6	Vitesse et véhicules
4	65	86,5	666	1873	-29,9	Vitesse et véhicules
3,8	65	86,5	633	1747	-34,6	Vitesse et véhicules
3,5	65	86,5	583	1566	-41,4	Vitesse et véhicules

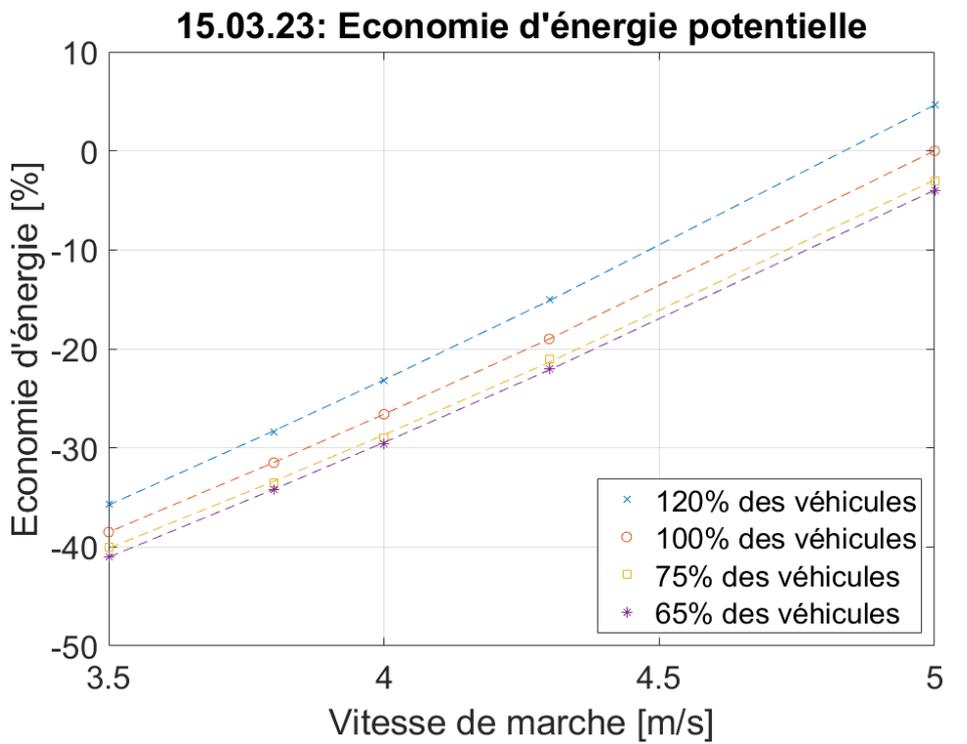
Table 4.2 Résultats de simulation

La figure 4.3a démontre qu'à vitesse et charge journalière identique, le nombre de véhicules influe légèrement sur la consommation. Moins il y a de véhicules en ligne, plus la consommation électrique est basse. En fonctionnant avec moins de cabines, le nombre d'accélération et de décélération en gare est plus petit et demande moins de ressources. De plus, la tension dans le brin montant et celle dans le brin descendant sont plus petites et occasionnent moins de pertes par frottement.

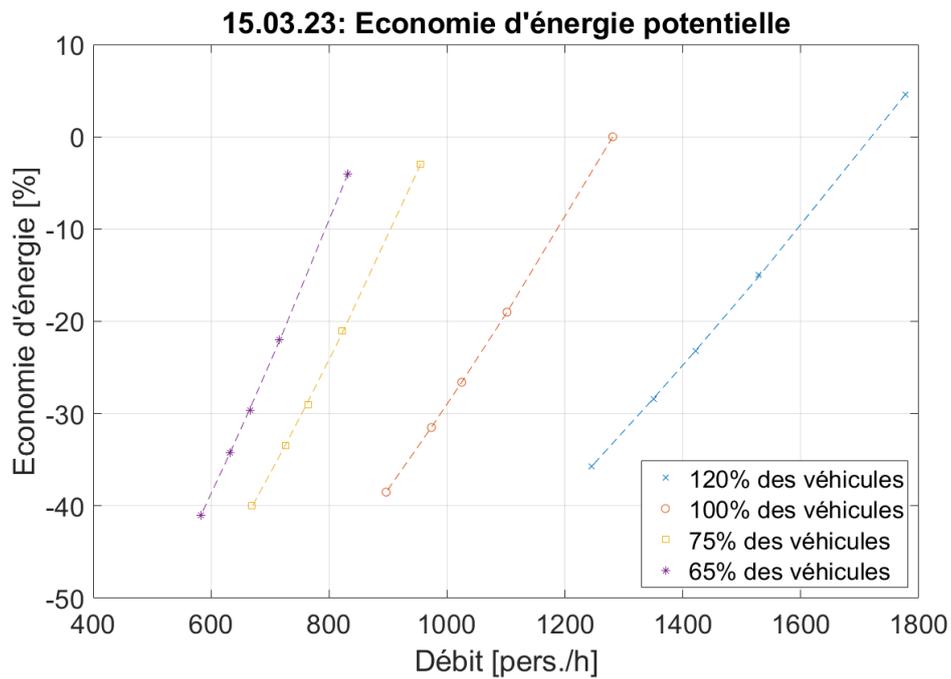
L'étude de la figure 4.3b met en évidence que la vitesse a une très grande influence sur la consommation électrique. Pour un débit théorique donné, il est toujours plus favorable de l'atteindre à plus faible vitesse. Il est également intéressant de relever que le nombre de véhicules affecte grandement la sensibilité débit/énergie consommée. Moins il y a de véhicules en ligne, plus la gamme de débits atteignables est restreinte, pour un delta de vitesse fixe.

Puissance développée sous différentes charges

La figure 4.4a trace la puissance moyenne développée par le moteur en fonction de la vitesse, avec 100% des véhicules. Les valeurs sont données en pourcentage de la puissance moyenne à 5 m/s (129 kW). La figure 4.4b compare l'effet de la charge sur la puissance moyenne développée sur une journée. La présence de passagers semble avoir un plus faible impact à haute vitesse.

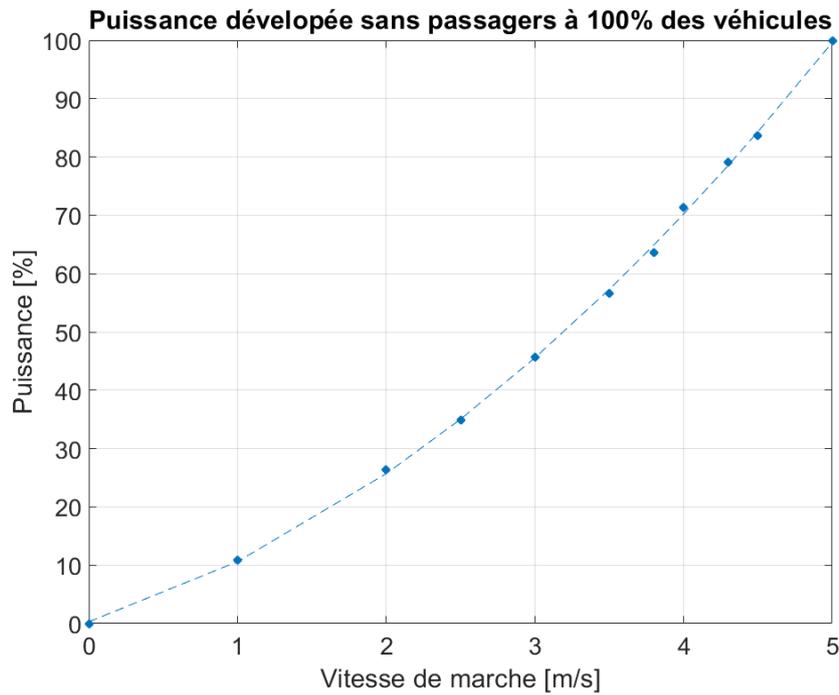


(a) Représenté en fonction de la vitesse

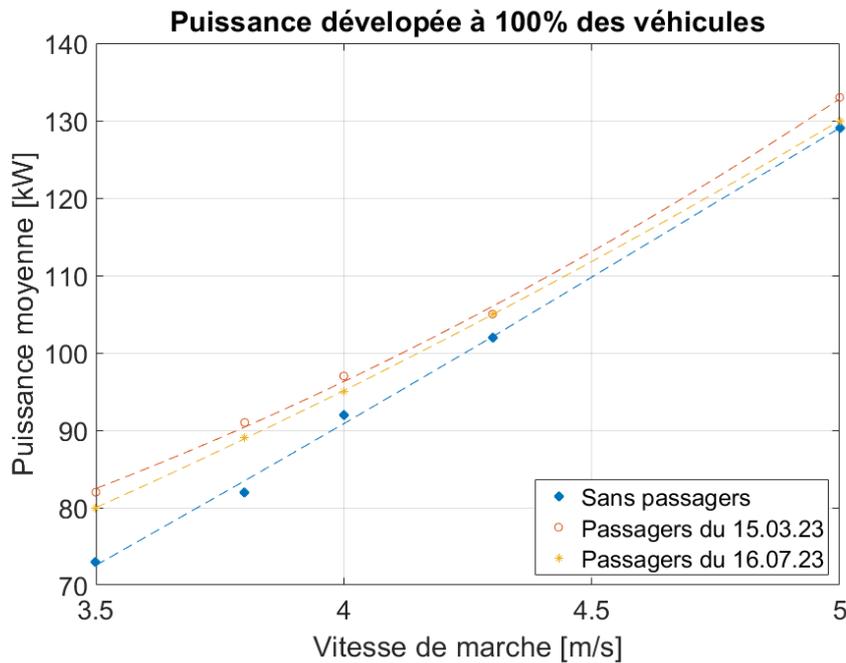


(b) Représenté en fonction du débit théorique

Figure 4.3 Effet de la vitesse et du nombre de véhicules sur la consommation électrique



(a) A vide (sans passagers)



(b) Effet de la charge

Figure 4.4 Comparaison de la puissance développée à différentes charges

4.2.2 Proposition d'une stratégie d'exploitation

Jusqu'ici l' « EcoMode » considérait le nombre de véhicules comme fixe et utilisait la vitesse comme levier d'adaptation du débit de l'installation. Suite aux résultats obtenus, une autre perspective se révèle plus intéressante. En fixant la vitesse de croisière de

4.2 Résultats de simulation et stratégie d'optimisation

l'installation au minimum acceptable, et en adaptant le débit « nominal » de l'installation à l'aide du nombre de véhicules, on assure la sélection d'un point de fonctionnement économe. L'adaptation de la vitesse en fonction du débit d'arrivée des passagers est conservée afin d'absorber un éventuel afflux soudain de passagers. La figure 4.5 illustre la structure précédemment décrite.

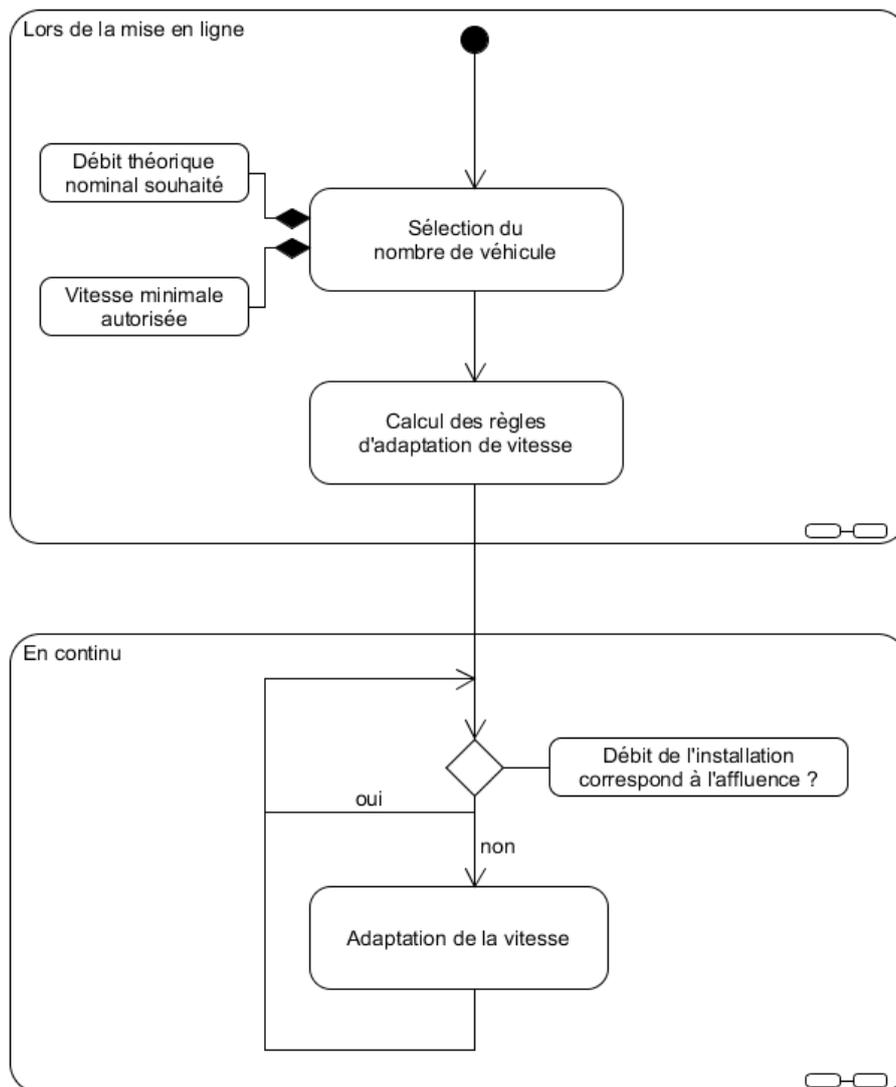


Figure 4.5 Diagramme de flux de la stratégie d'exploitation

Détermination des paramètres

La satisfaction de la clientèle vis à vis du service de transport est un facteur essentiel pour les exploitants. Afin de ne pas péjorer la qualité du service, il est nécessaire de veiller à ce que le temps de trajet ne soit pas trop augmenté. La lecture du tableau 4.3 nous permet de fixer une vitesse minimale en-dessous de laquelle il n'est pas sensé d'exploiter. En plus de cela, et de manière analogue au système actuel, une vitesse différente peut être choisie, lorsque personne ne se trouve sur la ligne.

Vitesse	Temps de trajet
2.5 m/s	15' 34"
3 m/s	12' 59"
3.5 m/s	11' 07"
4 m/s	9' 43"
4.5 m/s	8' 39"
5 m/s	7' 47"

Table 4.3 Temps de trajet en fonction de la vitesse

La vitesse minimale fixée définit les points de travail de base disponibles (cf. fig. 4.6).

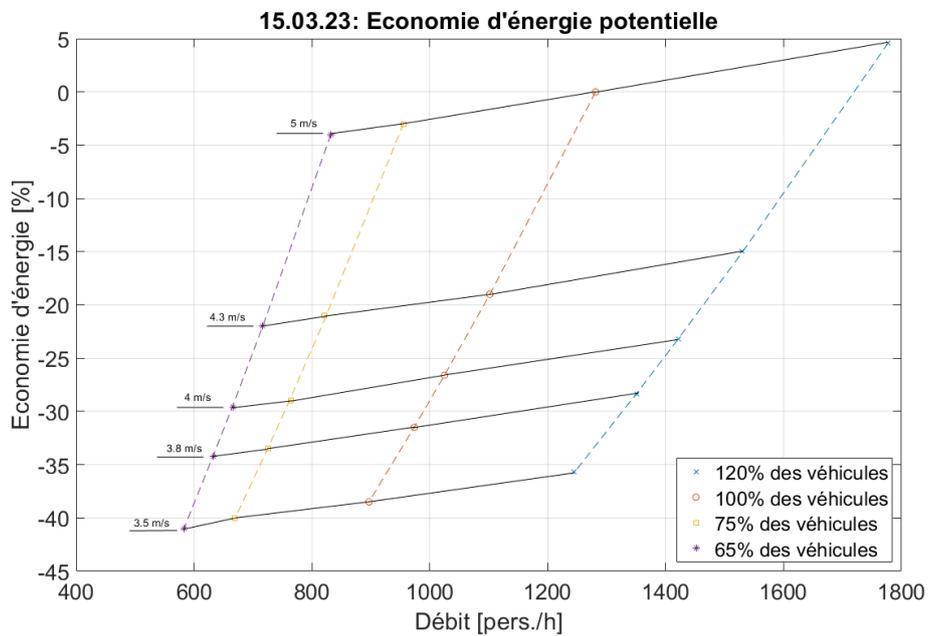


Figure 4.6 Application des résultats de simulation à une stratégie d'exploitation

Le temps d'attente est le second critère pris en compte pour préserver le service. Cela implique que l'installation aie en tout temps la capacité d'absorber le flux de passagers. A chaque dégarage, l'exploitant a la possibilité de choisir le nombre de véhicules mis en ligne. Il restreint ainsi la gamme de débits atteignables lors de l'exploitation. Toujours sur la courbe pleine précédemment identifiée, la sélection du débit théorique détermine le nombre de véhicules à mettre en ligne. Le point de travail sélectionné devrait l'être de telle sorte que le débit théorique minimal soit suffisant pour tout moment de la journée d'exploitation (pas de création de file d'attente).

La création d'une file d'attente due à l'afflux soudain de passagers n'est pas souhaitable, car dégrade l'expérience client. L'adaptation de vitesse permet alors de « booster » temporairement le débit horaire, au prix d'une consommation électrique plus élevée. L'affluence aux tourniquets de contrôle d'accès est calculée en continu. De manière à éviter des modifications trop rapides de la vitesse de fonctionnement, les principes sui-

4.2 Résultats de simulation et stratégie d'optimisation

vants seront observés : une différence de 3 pers./min est présente entre deux échelons ; une augmentation de vitesse est active durant au moins dix minutes. De manière analogue à une réduction de vitesse classique, un temps minimal à basse vitesse devrait être observé¹. Le seuil de 3 pers./min impose la finesse de l'adaptation du débit. Cette valeur a été fixée empiriquement en simulation, et est à adapter au contexte lors d'une implémentation réelle.

Il est ainsi possible de déterminer le nombre de seuils intermédiaires de débit et leur valeur :

$$Nbr_{\text{seuils interm.}} = \left\lfloor \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}{S_{\text{débit}} \cdot 60} \right\rfloor \quad (4.3)$$

Où $S_{\text{débit}}$ [pers./min] est la sensibilité de l'affluence d'arrivée des passagers (ici 3 pers./min). Les débits sont en pers./h .

Les seuils de débits peuvent alors se calculer ainsi :

$$s_i^d = d_{\text{min}} + S_{\text{débit}} \cdot 60 \cdot i \quad \text{avec } i \in \mathbb{N}, [0, Nbr_{\text{seuils interm.}}] \quad (4.4)$$

Les vitesses de marche correspondantes s'obtiennent selon :

$$s_i^v = \frac{s_i^d \cdot \text{distance}_{\text{entre véhicules}}}{3600 \cdot Nbr_{\text{passagers par véhicule}}} \quad (4.5)$$

Avec s_i^d en pers./h.

Le tableau 4.4 regroupe les valeurs de seuil calculées pour l'utilisation de 120%, 100%, 75% et 65% des véhicules.

Débit d'arrivée [pers./min]		Vitesse [m/s]	Débit d'arrivée [pers./min]		Vitesse [m/s]
120% des véhicules			75% des véhicules		
ligne vide		3	ligne vide		3
$0 < d \leq 21$		3.5	$0 < d \leq 11$		3.5
$21 < d \leq 24$		4	$11 < d \leq 14$		4.4
$24 < d \leq 27$		4.6	$14 < d$		5
$27 < d$		5			
100% des véhicules			65% des véhicules		
ligne vide		3	ligne vide		3
$0 < d \leq 15$		3.5	$0 < d \leq 10$		3.6
$15 < d \leq 18$		4.2	$10 < d \leq 13$		4.6
$18 < d$		5	$13 < d$		5

Table 4.4 *Seuils d'adaptation stratégique de vitesse*

1. Les installations disposent généralement de boutons permettant à l'opérateur de diminuer la vitesse d'exploitation à un niveau prédéfini. Cette réduction de vitesse est active durant un temps minimum.

Sélection du jeu de paramètres : proposition pour le cas d'étude

L'étude des figures 4.7 nous permet de déterminer le débit minimal nécessaire à l'absorption des passagers. Les valeurs des graphiques précédemment cités sont calculées sur la base des données de contrôle d'accès et discrétisées à la minute. Afin de ne pas sur ou sous évaluer les besoins, les phénomènes extrêmes ont été écartés. Les valeurs suivantes sont retenues :

- 14 mars 2023 : 15 pers./min (900 pers./h)
- 15 mars 2023 : 15 pers./min
- 15 juillet 2023 : 8 pers./min (480 pers./h)
- 16 juillet 2023 : 8 pers./min

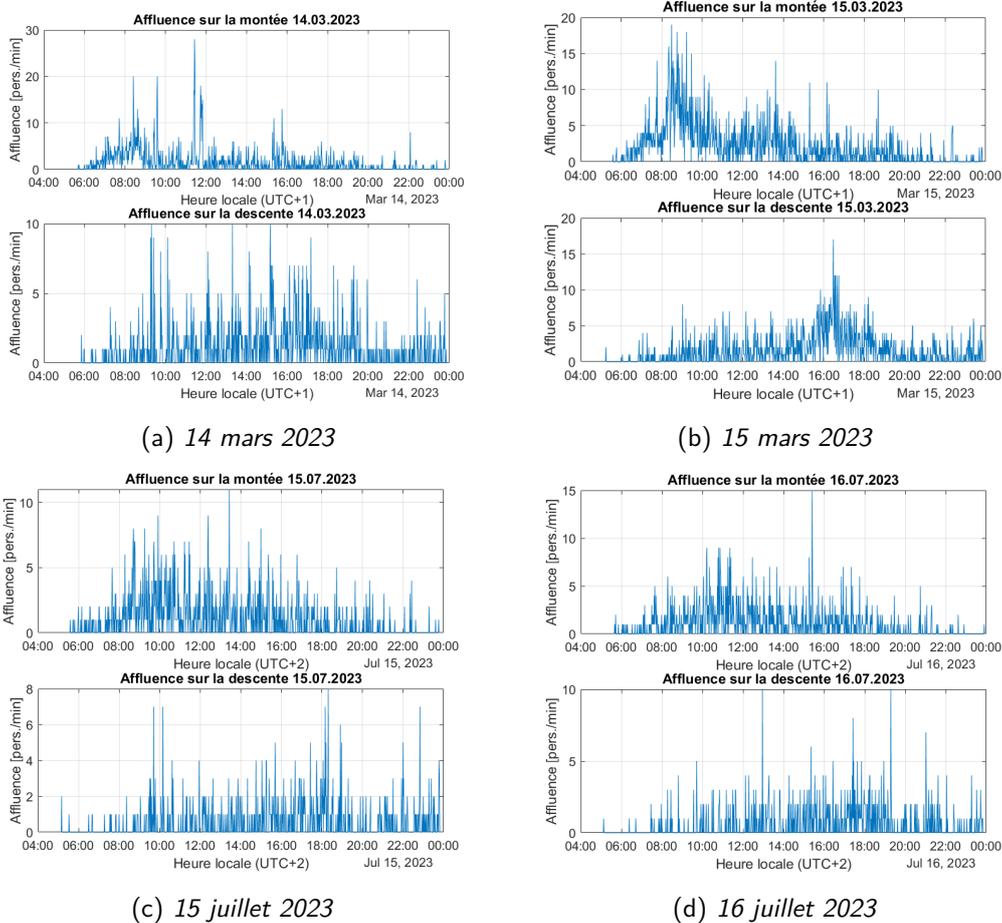


Figure 4.7 Affluence des passagers pour les quatre jeux de données

Sur la base du tableau 4.3, il a été déterminé qu'une vitesse minimale de 3.5 m/s était un bon compromis. Le temps de trajet augmente de quatre minutes et vingt secondes, pour s'établir à 11' 07". Une durée plus élevée serait, au ressenti d'utilisateur, difficilement acceptable. A contrario, il n'y a pas de contre-indication temporelle à diminuer encore la vitesse lorsque que la ligne est vide. Il est donc proposé de la fixer à 3 m/s.

Conformément à la démarche exposée dans la section précédente, le tableau 4.5 récapitule les paramètres choisis.

4.2 Résultats de simulation et stratégie d'optimisation

Jour	Vitesse câble vide [m/s]	Vitesse minimale [m/s]	Nombre véhicules [%]
15 mars	3	3.5	100
16 juillet	3	3.5	65
16 juillet	3	3.5	100

Table 4.5 Proposition de paramètres de stratégie d'exploitation pour les 15 mars et 16 juillet 2023

Résultats en simulation

Le code implémenté en C pour générer la consigne de vitesse est disponible en annexe. Les résultats du tableau 4.6 et les figures 4.8 démontrent un bon fonctionnement de système d'adaptation de débit pour le 15 mars. Aucune file d'attente supplémentaire n'est créée (comparé aux enregistrements), et l'économie potentielle est estimée à 38%. Cependant, nous relèverons que la stratégie avec 65% des véhicules, appliquée au 16 juillet (cf. fig 4.9) n'a aucun avantage par rapport à la stratégie maintenant 100% des véhicules en ligne. Le potentiel d'économie d'énergie est quasiment identique et le fonctionnement à 65% cause une augmentation de l'attente à certains moments de la journée.

Jour	Couple moyen [Nm]	Puissance moyenne [kW]	Économie [kWh]	Économie [%]
15 mars 2023	608	847	-985	-36
16 juillet 2023 (65% des véhicules)	580	805	-1023	-38.3
16 juillet 2023 (100% des véhicules)	598	794	-1045	-39

Table 4.6 Résultats de la stratégie d'exploitation

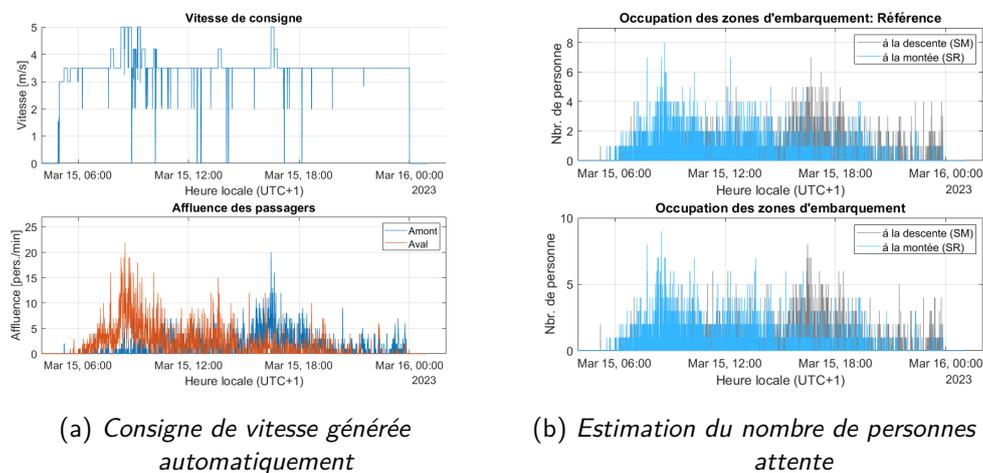


Figure 4.8 Résultats de la stratégie d'exploitation pour le 15 mars 2023

Chapitre 4. Étude de stratégies d'optimisation énergétique

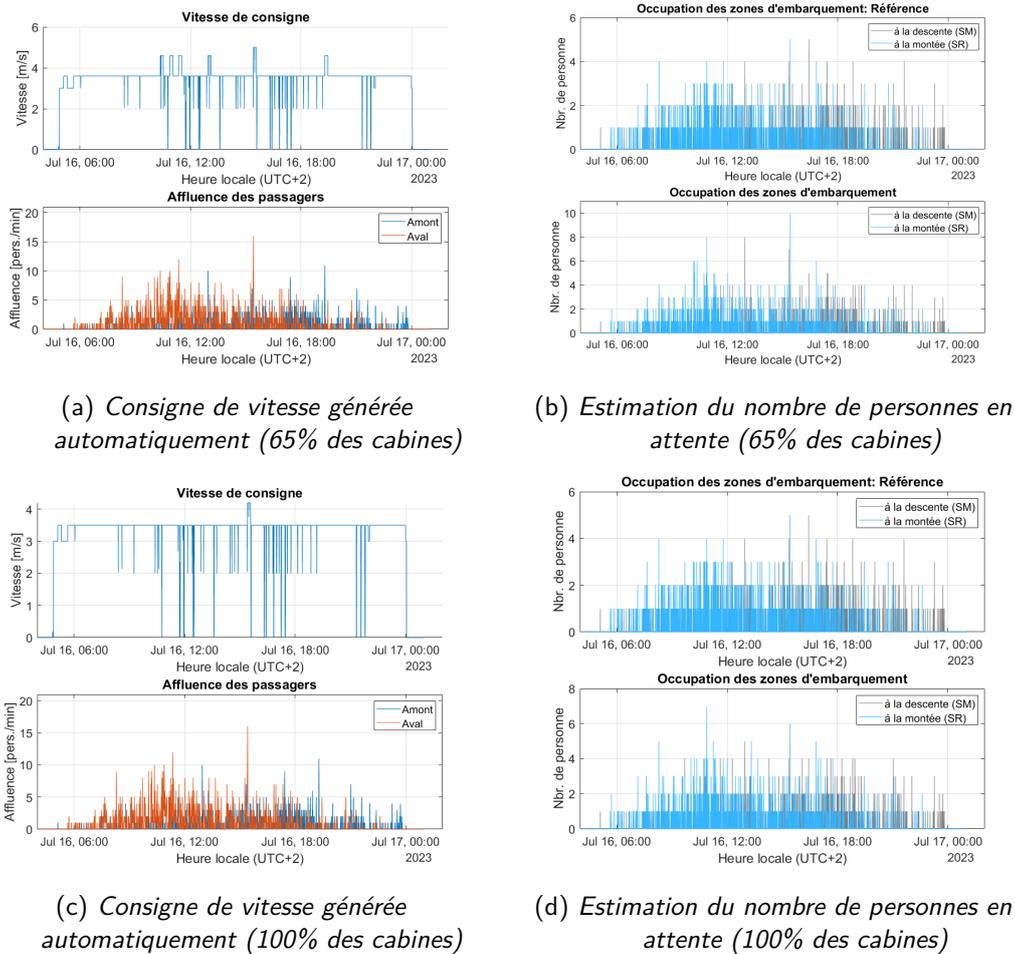


Figure 4.9 Résultats de la stratégie d'exploitation pour le 16 juillet 2023

4.3 Recommandations finales

Au vu des résultats de simulation obtenus, il semble que la limitation du nombre de véhicules en période de faible affluence n'apporte pas suffisamment de bénéfices, si la stratégie d'exploitation est appliquée telle que proposée. La limitation de la vitesse seule se révèle cependant très intéressante. Afin d'exploiter l'installation de manière optimale, il serait alors suffisant d'utiliser les nouvelles règles d'adaptation de vitesse (tab. 4.1, pour 100% des véhicules). Des économies d'énergie de l'ordre de -35%, par rapport aux conditions de référence seraient atteignables.

Si, au cours des années futures, la fréquentation de l'installation venait à augmenter, une nouvelle analyse du point de fonctionnement optimal serait intéressante. En effet, si l'on venait à travailler régulièrement à des débits de l'ordre de 1200 pers./h, l'augmentation du nombre de véhicule permettrait le transport des passagers à plus basse vitesse.

5 | Conclusion

Si la stratégie d'exploitation proposée des installations permet des économies d'énergie substantielles, la combinaison de plusieurs solutions ouvre la voie à une conception nouvelle de ces infrastructures. Les stations d'arrivée et de départ offrent des surfaces propices à l'installation de panneaux solaires. La consommation électrique des remontées mécaniques de montagne ayant lieu de jour, l'autoconsommation de l'énergie solaire produite est intéressante. Les locaux de surveillance pourraient être chauffés grâce à la chaleur dégagée par l'électronique de puissance. La production d'énergie renouvelable intégrée, l'utilisation au mieux des ressources générées (chaleur) et à disposition (électricité), la mise en œuvre de matériaux à faible impact feront ensemble le transport à câble de demain.

La modélisation d'un téléphérique débrayable à mouvement continu a permis l'obtention d'un outil d'analyse et de simulation flexible. Pour un téléporté similaire, la simple modification des paramètres est suffisante. En plus de la détermination des grandeurs mécaniques et électriques nécessaires à l'étude de la consommation, le modèle permet de visualiser l'impact d'une stratégie sur la clientèle. La prise en compte dynamique des passagers rend possible l'estimation du nombre de personnes en attente et la prévention de la création d'une file d'attente, qui serait due à une mauvaise stratégie d'exploitation. L'utilisation de tout ces éléments a permis de déterminer une stratégie d'exploitation simple par son essence et son implémentation. La diminution de la vitesse de croisière des installations rend des économies d'énergie de l'ordre de 20% à 35% possibles¹. L'adaptation dynamique du débit (par la vitesse) permet d'assurer le maintien de la qualité du service fourni aux passagers.

Perspectives techniques

Afin d'améliorer la justesse du modèle, les pistes suivantes ont été proposées :

- Modélisation du système de courroies des dispositifs de lancement/ralentissement
- Génération, a priori, de plusieurs profils de ligne et sélection dynamique d'un profil en cours de simulation

Ces deux modifications pourraient permettre d'améliorer la réponse du modèle et de mieux retrouver les oscillations rapides et lentes de couple. Il est également envisageable de lier la partie mécanique à la partie électrique. L'implémentation d'un modèle de MAS et de convertisseur de puissance dans le type de simulateur utilisé est tout à fait envisageable. Les bibliothèques à disposition comportent des modèles de moteur et convertisseurs divers. Il serait alors possible de simuler l'effet des différents phénomènes mécaniques sur les grandeurs électriques et inversement.

Dans une vision encore plus globale, le remplacement d'une installation par une simulation en temps-réel permettrait de tester en direct des stratégies d'exploitation et d'en voir les effets, sans risquer de perturber l'exploitation réelle.

1. Par rapport aux conditions de référence définies au chapitre 4

Pour conclure

Les objectifs visés au début de ce travail ont été atteints. Un modèle flexible de remontée mécanique identifiant et chiffrant ses besoins énergétiques a été défini et implémenté sur un simulateur temps réel de type HIL. Différents leviers utiles à la maîtrise de la consommation électriques ont été identifiés et leur influence chiffrée. Finalement, une stratégie d'exploitation permettant d'optimiser la consommation électrique, tout en ne péjorant pas le transport des passagers, a été proposée et ses effets déterminés par simulation.

A | Extraits de code

A.1 Code source des fonctions

A.1.1 Calcul arrivée passagers

```
1 // OUTPUT FUNCTION
2 cum_up = floor(up);
3 delta_up = cum_up - old_up;
4 old_up = cum_up;
5
6 cum_down = floor(down);
7 delta_down = cum_down - old_down;
8 old_down = cum_down;
9
10 // INITIALISATION FUNCTION
11 cum_up = 0;
12 old_up = floor(init_up);
13 delta_up = 0;
14
15 cum_down = 0;
16 old_down = floor(init_down);
17 delta_down = 0;
```

A.1.2 Débit passagers

```
1 // OUTPUT FUNCTION
2
3 dt += time - time_old;
4 time_old = time;
5
6 counter_up += skidata_up;
7 counter_down += skidata_down;
8
9 /*-----
10     CALCUL DE DEBIT
11 -----*/
12
13 if(dt >= 1){
14     for(i=0;i<59;i++){
15         vals_up[i] = vals_up[i+1];
16         vals_down[i] = vals_down[i+1];
17     }
18     vals_up[59] = counter_up;
19     vals_down[59] = counter_down;
20
21     counter_up = 0;
22     counter_down = 0;
23     dt = 0;
24 }
25
26 debit_down = 0;
27 debit_up = 0;
28 for(i=0;i<60;i++){
29     debit_down += vals_down[i];
30     debit_up += vals_up[i];
```

Annexe A. Extraits de code

```
31 }
32
33 // INITIALISATION FUNCTION
34 for(i=0;i<60;i++){
35     vals_up[i] = 0;
36     vals_down[i] = 0;
37 }
38
39 debit_down = 0;
40 debit_up = 0;
41 dt = 0;
42 time_old = 0;
```

A.1.3 Lancement cabines

```
1 // OUTPUT FUNCTION
2
3 /*-----
4 *      CADENCEUR
5 -----*/
6
7 dist_globale = dist_globale + Vcable*Tech_fast*Facteur_Temp;
8
9 //Vitesse de traînage en station
10 V_gare = (veh_vitesse_gare/reg_vt_c)*Vcable;
11
12 //Cadenceur
13 if (dist_globale >= d_veh){
14     dist_globale = 0.0;
15     Start = 1;
16 }else{
17     Start = 0;
18 }
19
20
21 /*-----
22 *      SKIDATA
23 -----*/
24
25 if(EN_skidata_up > 0){
26     buffer_pers_up += delta_up;
27 }else{
28     buffer_pers_up = 0;
29 }
30
31 if(EN_skidata_down > 0){
32     buffer_pers_down += delta_down;
33 }else{
34     buffer_pers_down = 0;
35 }
36
37 /*-----
38 *      LANCEMENT DES CABINES
39 -----*/
40
41 //Lancement des cabines station aval
42 if (Start == 1 && EN_veh_montee > 0 && busy[0]==0){
43     for (index=0; index<nbr_veh_ligne;index++){ //nbr_veh_ligne pour
44         limiter les véhicules en ligne
```

A.1 Code source des fonctions

```
44     if ((Scabines[index]<=0.0)&&(Direction[index]==0.0)){ //Cabine
45         ↪ libre
46         busy[0] = 1;
47
48         // Masse et passagers
49         if(buffer_pers_up >=veh_nbrPers){
50             masse_cabines[index] = (veh_m_cabine_p +
51                 ↪ veh_nbrPers*veh_m_personne);
52             buffer_pers_up -= veh_nbrPers;
53         }else{
54             masse_cabines[index] = (veh_m_cabine_p +
55                 ↪ buffer_pers_up*veh_m_personne);
56             buffer_pers_up = 0;
57         }
58
59         // Accélération
60         if(EN_acc > 0){
61             Facc[0] = masse_cabines[index]/(2*veh_longueur_zon_acc)
62                 ↪ *(Vcable*Vcable-V_gare*V_gare);
63             t_acc[0] =
64                 ↪ (2*veh_longueur_zon_acc)/(Vcable+V_gare)/Facteur_Temp;
65             index_acc[0] = index;
66         }else{
67             Direction[index] = 1;
68             busy[0] = 0;
69         }
70     }
71     break;
72 }
73
74 //Accélération en station aval
75 if(t_acc[0] != 0 && EN_acc >0){
76     counter_t_acc[0] +=Tech_fast;
77     // Ctrl fin accél.
78     if(counter_t_acc[0] >= t_acc[0]){
79         t_acc[0] = 0;
80         counter_t_acc[0] = 0;
81         Facc[0] = 0;
82         Direction[index_acc[0]] = 1;
83         index_acc[0] = -1;
84         busy[0] = 0;
85     }
86 }
87
88 //Lancement des cabines station amont
89 if (Start == 1 && EN_veh_descente > 0 && busy[2]==0){
90     for (index=0; index<nbr_veh_ligne;index++){ //nbr_veh_ligne pour
91         ↪ limiter les véhivules en ligne
92         if ((Scabines[index]>=ligne_stot)&&(Direction[index]==0.0)){
93             ↪ //Cabine libre
94             busy[2] = 1;
95
96             // Masse et passagers
97             if(buffer_pers_down >=veh_nbrPers){
```

Annexe A. Extraits de code

```
95         masse_cabines[index] = (veh_m_cabine_p +
96             ↪ veh_nbrPers*veh_m_personne);
97         buffer_pers_down -= veh_nbrPers;
98     }else{
99         masse_cabines[index] = (veh_m_cabine_p +
100             ↪ buffer_pers_down*veh_m_personne);
101         buffer_pers_down = 0;
102     }
103
104     // Accélération
105     if(EN_acc > 0){
106         Facc[2] = masse_cabines[index]/(2*veh_longueur_zon_acc)
107             ↪ *(Vcable*Vcable-V_gare*V_gare);
108         t_acc[2] =
109             ↪ (2*veh_longueur_zon_acc)/(Vcable+V_gare)/Facteur_Temp;
110         index_acc[2] = index;
111     }else{
112         Direction[index] = -1;
113         busy[2] = 0;
114     }
115     break;
116 }
117
118 //Accélération en station amont
119 if(t_acc[2] != 0 && EN_acc > 0){
120     counter_t_acc[2] +=Tech_fast;
121     // Ctrl fin accél.
122     if(counter_t_acc[2] >= t_acc[2]){
123         t_acc[2] = 0;
124         counter_t_acc[2] = 0;
125         Facc[2] = 0;
126         Direction[index_acc[2]] = -1;
127         index_acc[2] = -1;
128         busy[2] = 0;
129     }
130 }
131
132
133
134 /*-----
135 * ARRÊT DES CABINES
136 -----*/
137
138 //Arrêt des cabines
139 for (index=0; index<veh_nbrVehicules;index++){
140     if ((Direction[index]==1) && (Scabines[index] >= ligne_stot) &&
141         ↪ busy[1]==0){ // amont
142
143         busy[1] = 1;
144
145         if(EN_acc > 0){
146             a_cabine_acc[1] =
147                 ↪ (V_gare*V_gare-Vcable*Vcable)/(2*veh_longueur_zon_acc);
148             F_cabine_acc[1] = masse_cabines[index]*a_cabine_acc[1];
```

A.1 Code source des fonctions

```
147         t_acc[1] =
148             ↪ (2*veh_longueur_zon_acc)/(Vcable+V_gare)/Facteur_Temp;
149         index_acc[1] = index;
150         masse_cabines[index] = 0.0; // Pour retirer la cabine du bilan
151             ↪ de masse de la ligne
152     }else{
153         Direction[index] = 0;
154         busy[1] = 0;
155     }
156 }
157 if ((Direction[index]== -1) && (Scabines[index] <= 0.0) &&
158     ↪ busy[3]==0){ // aval
159     busy[3] = 1;
160
161     if(EN_acc > 0){
162         a_cabine_acc[3] =
163             ↪ (V_gare*V_gare-Vcable*Vcable)/(2*veh_longueur_zon_acc);
164         F_cabine_acc[3] = masse_cabines[index]*a_cabine_acc[3];
165         t_acc[3] =
166             ↪ (2*veh_longueur_zon_acc)/(Vcable+V_gare)/Facteur_Temp;
167         index_acc[3] = index;
168         masse_cabines[index] = 0.0; // Pour retirer la cabine du bilan
169             ↪ de masse de la ligne
170     }else{
171         Direction[index] = 0;
172         busy[3] = 0;
173     }
174 }
175
176 //Déccélération en station amont
177 if(t_acc[1] != 0 && EN_acc > 0){
178     counter_t_acc[1] +=Tech_fast;
179     // Fcâble = P_cabine / V_câble
180     Facc[1] = F_cabine_acc[1]*(Vcable +
181         ↪ counter_t_acc[1]*a_cabine_acc[1])/Vcable;
182
183     // Ctrl fin accél.
184     if(counter_t_acc[1] >= t_acc[1]){
185         t_acc[1] = 0;
186         counter_t_acc[1] = 0;
187         Facc[1] = 0;
188         a_cabine_acc[1] = 0;
189         F_cabine_acc[1] = 0;
190         Direction[index_acc[1]] = 0; // Arrêt cabine (ici pour éviter
191             ↪ lancement et ralentissement simultanés)
192         index_acc[1] = -1;
193         busy[1] = 0;
194     }
195 }
196 //Déccélération en station aval
197 if(t_acc[3] != 0 && EN_acc > 0){
```

Annexe A. Extraits de code

```
197     counter_t_acc[3] +=Tech_fast;
198     // Fcâble = P_cabine / V_câble
199     Facc[3] = F_cabine_acc[3]*(Vcable +
    ↪ counter_t_acc[3]*a_cabine_acc[3])/Vcable;
200
201     // Ctrl fin accél.
202     if(counter_t_acc[3] >= t_acc[3]){
203         t_acc[3] = 0;
204         counter_t_acc[3] = 0;
205         Facc[3] = 0;
206         a_cabine_acc[3] = 0;
207         F_cabine_acc[3] = 0;
208         Direction[index_acc[3]] = 0; // Arrêt cabine (ici pour éviter
    ↪ lancement et ralentissement simultanés)
209         index_acc[3] = -1;
210         busy[3] = 0;
211     }
212 }
213
214
215
216 /*-----
217 * NETTOYAGE VARIABLES
218 -----*/
219
220 if(EN_acc <= 0){
221     for(index=0;index<4;index++){
222         t_acc[index] = 0;
223         counter_t_acc[index] = 0;
224         Facc[index] = 0;
225         index_acc[index] = 0;
226     }
227 }
228
229 /*-----
230 * MISE A JOUR DES SKIDATA
231 -----*/
232
233 zoneAtt_SM = buffer_pers_down;
234 zoneAtt_SR = buffer_pers_up;
235
236 // INITIALISATION FUNCTION
237 Start = 0;
238 dist_globale = 0.0;
239 V_gare = 0;
240
241 for (index=0; index<veh_nbrVehicules; index++){
242     Direction[index] = dC_init[index];
243     masse_cabines[index] = mC_init[index];
244 }
245
246 for(index=0;index<4;index++){
247     Facc[index] = 0;
248     t_acc[index] = 0;
249     counter_t_acc[index] = 0;
250     index_acc[index] = 0;
251     a_cabine_acc[index] = 0;
252     F_cabine_acc[index] = 0;
```

```

253     busy[index] = 0;
254 }
255
256 buffer_pers_up = 0;
257 buffer_pers_down = 0;

```

A.1.4 Ligne

```

1 // OUTPUT FUNCTION
2
3 /*-----
4 *          CABINES
5 -----*/
6 //Détermination de la position des cabines
7 for(index=0;index<veh_nbrVehicules;index++){
8     i=0;
9     for(i=0;i<length_ligne;i++){
10         if(position_cabines[index]>ligne_s[i]){
11             section_id[index] = ligne_section[i];
12         }
13     }
14 }
15
16
17 //Présence des cabines sur les brins
18 for(index=0;index<veh_nbrVehicules;index++){
19     if(direction_cabines[index]==1){ //Montée
20         presence_cabines_montee[index] = section_id[index];
21     }
22
23     if(direction_cabines[index]==-1){ //Descente
24         presence_cabines_descente[index] = section_id[index];
25     }
26 }
27
28
29 /*-----
30 *          MASSE EN MVMT ET TENSIONS SIMPLES
31 -----*/
32
33 //Calcul par des masses et tensions par sections
34 for(i=0;i<sections_nbrSections;i++){
35
36     //Ajout de la masse des cabines
37     for(index=0;index<veh_nbrVehicules;index++){
38         if(presence_cabines_montee[index] == (i+1)){ //Montée
39             masse_montee[i] += masse_cabines[index];
40         }
41
42         else if(presence_cabines_descente[index] == (i+1)){ //Descente
43             masse_descente[i] += masse_cabines[index];
44         }
45     }
46
47     //Calcul de la tension sur la montée
48     tension_montee[i] += g*cable_q_cable*(sections_y[i+1]-sections_y[i]);
49     tension_montee[i] +=
50     - g*(masse_montee[i]+ligne_masse[i])*sin(ligne_gamma[i]);
51     //tension_montee[i] += Fr_montee_interne[i+1];

```

Annexe A. Extraits de code

```
51
52 //Calcul de la tension sur la descente
53 tension_descente[i] +=
54   ↳ g*cable_q_cable*(sections_y[i+1]-sections_y[i]);
55 tension_descente[i] +=
56   ↳ g*(masse_descente[i]+ligne_masse[i])*sin(ligne_gamma[i]);
57
58 //Masse totale
59 Mtot += masse_montee[i] + masse_descente[i] + 2*ligne_masse[i];
60 }
61
62 /*-----
63 * FORCES SUR LES PYLONES
64 -----*/
65
66 //Caclcul des forces normales sur les pylones
67 for(i=0;i<sections_nbrPylones;i++){
68   phi = ligne_alpha_h[i] - ligne_alpha_b[i+1];
69
70   //Calcul de la force en entrée de pylône
71   for(j=0;j<=i;j++){
72     Fn_montee[i] += tension_montee[j];
73     Fn_descente[i] += tension_descente[j];
74
75     if(j>0){ //frottements
76       Fn_montee[i] += Fr_montee_interne[j-1];
77       Fn_descente[i] -= Fr_descente_interne[j-1];
78     }
79   }
80
81   //Calcul de la force en sortie de pylône
82   tension_montee_h[i] = Fn_montee[i] + Fr_montee_interne[i];
83   tension_descente_h[i] = Fn_descente[i] - Fr_descente_interne[i];
84
85   //Calcul de la force normale sur les pylônes
86   Fn_montee[i] = (Fn_montee[i] + tension_montee_h[i])*sin(phi/2);
87   Fn_descente[i] = (Fn_descente[i] + tension_descente_h[i])*sin(phi/2);
88
89   //Calcul et mise en mémoire des frottements
90   Fr_montee_interne[i] = mu*fabs(Fn_montee[i]);
91   Fr_descente_interne[i] = mu*fabs(Fn_descente[i]);
92
93   //Mise à jour des sorties
94   Fr_montee[i] = Fr_montee_interne[i];
95   Fr_descente[i] = Fr_descente_interne[i];
96 }
97
98 // Mise a jour des forces totales du câble
99 Fmontee =tension_montee_h[sections_nbrPylones-1] + Facc[1];
100 Fdescente = tension_descente_h[sections_nbrPylones-1] + Facc[2];
101
102 // INITIALISATION FUNCTION
103 // Initialisation
104 g = 9.81;
105 Mtot = 0;
106 Fmontee = 0;
```

```

107 Fdescente = 0;
108
109 // Initialisation des variables relatives aux véhicules
110 for(i=0;i<veh_nbrVehicules;i++){
111     section_id[i] = 0;
112     presence_cabines_montee[i] = 0;
113     presence_cabines_descente[i] = 0;
114 }
115
116
117 // Initialisation des variables relatives aux portées
118 for(i=0;i<20;i++){
119     masse_montee[i] = 0;
120     masse_descente[i] = 0;
121     tension_montee[i] = 0;
122     tension_descente[i] = 0;
123 }
124
125 // Tension imposée par le système de tension en SR
126 tension_montee[0] = sim_init_F_tension/2 + Facc[0];
127 tension_descente[0] = sim_init_F_tension/2 + Facc[3];
128
129 // Initialisation des variables relatives aux pylônes
130 for(i=0;i<19;i++){
131     Fn_montee[i] = 0;
132     Fn_descente[i] = 0;
133     Fr_montee_interne[i] = 0;
134     Fr_descente_interne[i] = 0;
135     tension_montee_h[i] = 0;
136     tension_descente_h[i] = 0;
137 }
138
139 // UPDATE FUCTION
140 //Reset des variables internes après exécution
141
142 // Véhicules
143 for(i=0;i<veh_nbrVehicules;i++){
144     section_id[i] = 0;
145     presence_cabines_montee[i] = 0;
146     presence_cabines_descente[i] = 0;
147 }
148
149 // Portées
150 for(i=0;i<sections_nbrSections;i++){
151     masse_montee[i] = 0;
152     masse_descente[i] = 0;
153     tension_montee[i] = 0;
154     tension_descente[i] = 0;
155 }
156
157 // Tension imposée par le système de tension en SR
158 tension_montee[0] = sim_init_F_tension/2 + Facc[0];
159 tension_descente[0] = sim_init_F_tension/2 + Facc[3];
160
161 // Pylônes
162 for(i=0;i<sections_nbrPylones;i++){
163     Fn_montee[i] = 0;
164     Fn_descente[i] = 0;

```

Annexe A. Extraits de code

```
165     Fr_montee[i] = 0;
166     Fr_descente[i] = 0;
167     tension_montee_h[i] = 0;
168     tension_descente_h[i] = 0;
169 }
170
171 Mtot = 0;
172 Fmontee = 0;
173 Fdescente = 0;
```

A.1.5 Calcul coefficient de frottement

```
1 // OUTPUT FUNCTION
2 if(EN > 0){
3     mu = (2/pi)*atan(Kc*vt)*mu_s + vt*mu_v;
4 }else{
5     mu = 0;
6 }
7
8 // INITIALISATION FUNCTION
9 pi = 3.14159;
10 mu = 0;
11 Kc = 100;
```

A.1.6 EcoMode

```
1 // OUPUT FUNCTION
2 // Sélection débit maximal
3 if(d_up > d_dwn){
4     debit = d_up;
5 }else{
6     debit = d_dwn;
7 }
8
9 // EcoMode
10 if((debit == 0) && (counter_cable_vide >= lim_cable_vide)){
11     vt_consigne = vitesse_cable_vide;
12 }
13 else if(debit <= debit_seuil_1){
14     vt_consigne = vitesse_seuil_1;
15 }
16 }else if(debit <= debit_seuil_2){
17     vt_consigne = vitesse_seuil_2;
18 }
19 /*}else if(debit <= debit_seuil_3){
20     vt_consigne = vitesse_seuil_3;
21 */
22 }else{
23     vt_consigne = vitesse_max;
24 }
25
26 //Hystérèse temporelle
27 if((changed_counter < hyst_temp) && (vt_consigne <= old_consigne)){
28     changed_counter += Tech*Fac;
29     vt_consigne = old_consigne;
30 }
31
32 //Détection changement de consigne
33 if( (old_consigne != vt_consigne)){
```

```
34     changed_counter = 0;
35 }
36
37 //Détection cable vide
38 if(debit != 0){
39     counter_cable_vide = 0;
40 }else{
41     counter_cable_vide += Tech*Fac;
42 }
43
44 old_consigne = vt_consigne;
45
46 // INITIALISATION FUNCTION
47 // PARAMETRES
48 hyst_temp = 10*60;
49
50 vitesse_cable_vide = 3;
51 vitesse_seuil_1 = 3.5;
52 vitesse_seuil_2 = 4.4;
53 vitesse_max = 5;
54
55 // CALCUL PARAMETRES INTERNES
56 changed_counter = hyst_temp;
57 lim_cable_vide = ligne_stot/vitesse_seuil_1;
58
59 debit_seuil_1 = veh_nbrPers*vitesse_seuil_1/distance_vehicules*60;
60 debit_seuil_2 = veh_nbrPers*vitesse_seuil_2/distance_vehicules*60;
61 //debit_seuil_3 = veh_nbrPers*vitesse_seuil_3/distance_vehicules*60;
62
63 // UPDATE FUNCTION
64 debit_seuil_1 = veh_nbrPers*vitesse_seuil_1/distance_vehicules*60;
65 debit_seuil_2 = veh_nbrPers*vitesse_seuil_2/distance_vehicules*60;
66 //debit_seuil_3 = veh_nbrPers*vitesse_seuil_3/distance_vehicules*60;
```


Bibliographie

1. BODIGUEL, Jocelyn. *Objectifs de développement durable* [Développement durable] [en ligne]. 2023. [visité le 2023-08-10]. Disp. à l'adr. : <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>.
2. Télécabines urbaines : l'histoire d'une réussite bolivienne - Le Temps [en ligne]. 2018 [visité le 2023-08-10]. ISSN 1423-3967. Disp. à l'adr. : <https://www.letemps.ch/monde/ameriques/telecabines-urbaines-lhistoire-dune-reussite-bolivienne>.
3. BLUM, Gianna. *Les domaines skiables consomment autant d'énergie que 40'000 ménages* [Blick] [en ligne]. 2022-08-06. [visité le 2023-05-24]. Disp. à l'adr. : <https://www.blick.ch/fr/news/suisse/remontees-mecaniques-neige-artificielle-les-domaines-skiables-consomment-autant-denergie-que-40000-menages-id17767095.html>. Section : News.
4. *Seilbahnen Schweiz* - SBS [seilbahnen.org] [en ligne]. 2023. [visité le 2023-05-24]. Disp. à l'adr.: <https://seilbahnen.org/de/>.
5. ZEGG, Roland; KÜNG, Thomas; GROSSRIEDER, Roman. Energiemanagement Bergbahnen. *Seilbahnen Schweiz*. 2010, n° 1. ISSN 1662.7466.
6. *High-Tech solutions for sustainable ropeway operation* [en ligne]. Leitner AG, 2022 [visité le 2023-05-24]. Disp. à l'adr. : <https://www.leitner.com/fr/notre-societe/le-developpement-durable/>.
7. *Produits éco-responsables* [POMA] [en ligne]. [visité le 2023-05-24]. Disp. à l'adr.: <https://www.poma.net/expertise/innovation-recherche-et-developpement/produits-eco-responsables/>.
8. KRESTEL, Dieter. Zwei nachhaltige 6er-Sesselbahnen für Kitzbühel. *ISR*. 2023, n° 2, p. 24-25.
9. *Devons-nous continuer à économiser l'électricité* [seilbahnen.org] [en ligne]. 2023. [visité le 2023-05-24]. Disp. à l'adr. : <https://seilbahnen.org/fr/Services/e-newsletters/Top-News/2-2023/Muessen-wir-weiterhin-Strom-sparen>.
10. BAUMANN, Damian. Ein weiterer Quantensprung für die Standseilbahn Sierre-Crans-Montana. *ISR*. 2023, n° 1, p. 18-19. Aussi disponible à l'adresse : <https://de.isr.at/singleview/article/ein-weiterer-quantensprung-fuer-die-standseilbahn-sierre-crans-montana>.
11. SZLOSAREK, Robert; YAN, Chenguang; KRÖGER, Matthias; NUSSBAUMER, Christian. Energy efficiency of ropeways : a model-based analysis. *Springer*. 2019, p. 617-635.

Bibliographie

12. RICHTER, Thomas ; MEYER-PIENING, Hans Reinhard ; OPLATKA, Gàbor. *Schwingungsverhalten von Einseil-Umlaufbahnen beim Anfahren und Bremsen : transientes Verhalten eines ausgedehnten Vielmassenschwingers*. 1989. Thèse de doct. Place : Zürich Publication Title : Schwingungsverhalten von Einseil-Umlaufbahnen beim Anfahren und Bremsen Series : Mitteilungen aus dem Institut für Leichtbau und Seilbahntechnik.
13. CZITARY, Eugene. *Seilschwebbahnen*. 2., erweiterte Auflage. Wien : Springer-Verlag, 1962.
14. STEINBRUNN, Johann. *Modellbindung und Simulation der Fahrdynamik von Pendel-Seilbahnen*. Erlangen, 1978. Thèse de doct. Universität Erlangen-Nürnberg.
15. LIEDL, Stephan. *Bewegungen und Kräfte des Seilsystems und der Fahrzeuge von Seilschwebbahnen im Fahrbetrieb*. 2015. Thèse de doct. Herbert Utz Verlag. Edition : 2., unveränderte Auflage ISBN : 9783831680863 Place : München Series : Fördertechnik - Materialfluss - Logistik.

Acronymes

HEC Heure d'Europe Centrale (UTC+1). 29

HEEC Heure d'Été d'Europe Centrale (UTC+2). 29

HIL Hardware In the Loop. 19, 52

MAS Machine tournante Asynchrone. 3, 19, 51

ODD Objectifs de Développement Durable. 1

ONU Organisation des Nations Unies. 1

RMS Remontées mécaniques suisses. 2

SECO Secrétariat d'Etat à l'Économie. 2

SM Station Motrice. 8, 9, 15, 18, XIII

SR Station de Renvoi. 8–11, 18, XIII

TCD Télécabine Débrayable. 3, XIV

UTC Temps universel coordonné, standard international basé sur l'heure du méridien de Greenwich (GMT). 29

Glossaire

téléphérique débrayable à mouvement continu Selon l'ordonnance fédérale N°743.121.1 :

« Les téléphériques à mouvement continu à pinces débrayables sont des téléphériques dont les véhicules se détachent du câble en mouvement (câble tracteur ou câble porteur-tracteur) dans les stations. Les véhicules peuvent être fermés (cabines) ou ouverts (sièges). » . 3, 4, 26, 51, XIII