



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et  
de la communication (DETEC)

**Office fédéral des transports OFT**  
Programme Stratégie énergétique 2050 des transports publics  
(SETP 2050)

# Installation fixe d'accumulation d'énergie

**Projet SETP 2050, N°074**

Rapport final

**Philippe Barrade, HES-SO Valais/Wallis**

**Institut des Systèmes Industriels, HES-SO Valais/Wallis, Rte du Rawil 47, CP,  
1950 Sion 2, philippe.barrade@hevs.ch, www.hevs.ch/isi**

**Richard Zuber, Chemins de Fer du Jura**

**Département Infrastructures Electrotechniques, Rue de la Gare 23, 2720 Trame-  
lan, richard.zuber@les-cj.ch, www.les-cj.ch**

### **Groupe d'accompagnement**

M. Daniel Schaller, PLANAIR SA • INGENIEURS CONSEILS, SIA Crêt 108a, CH-2314 La Sagne

M. Tristan Chevroulet, Chef de projet Stratégie énergétique des transports publics Dépt. fédéral Environnement, Transport, Energie et Communication

### **Mentions légales**

Éditeur:

Office fédéral des transports OFT

Programme : Stratégie Énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050)

CH-3003 Berne

Conduite du programme

Tristan Chevroulet, OFT

Numéro de projet: 074

Source

Accessible gratuitement par Internet

[www.bav.admin.ch/energie2050](http://www.bav.admin.ch/energie2050)

Seul l'auteur (e) ou les auteurs (es) sont responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Berne,

le

[15.11.2018]

## Contenu

Executive Summary en allemand .....	2
Executive Summary dans une seconde langue nationale .....	2
Executive Summary en anglais .....	2
Résumé en allemand .....	4
Résumé dans une seconde langue nationale .....	8
1. Situation de départ.....	12
2. Objectifs du travail .....	12
3. Approche adoptée et état des connaissances actuelles.....	13
3.1. Remarques préliminaires.....	13
3.2. Modélisation du matériel roulant .....	13
3.3. Topologie du réseau des CJ.....	17
3.4. Modèle électrique du réseau des CJ.....	20
3.5. Procédure implémentée pour la simulation du réseau des CJ .....	24
4. Résultats .....	26
4.1. Préambule et conventions .....	26
4.2. Etude comportementale du réseau des CJ sans accumulation d'énergie.....	27
4.3. Analyse de la validité de l'outils d'étude développé .....	33
5. Discussion .....	34
5.1. Intégration d'un accumulateur – Sous-station Sceut.....	34
5.2. Analyse de performances .....	37
6. Conclusions et recommandations.....	42
Références .....	44
Annexes .....	45
A. Paramètres des rames en circulation sur le réseau des CJ .....	45
B. Tables horaires .....	47
C. Modélisation électrique de la ligne électrique .....	48

## Executive Summary en allemand

Im Rahmen einer von den Chemins de Fer du Jura (CJ) in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt. Ziel von diesem ist es herauszufinden, ob es technisch und wirtschaftlich machbar ist im Bahnstromnetz der CJ einen Energiespeicher zu integrieren. Zwei Indikatoren sind dafür zu analysieren: Möglichkeit zur Erhöhung der zurückgewonnenen Bremsenergie der Züge und die Begrenzung der Leistungsspitzen zwischen den Unterwerken und dem Versorgungsnetz.

Ein Simulationswerkzeug wurde erstellt, welches das Rollmaterial, toplogische Gegebenheiten des Streckennetzes, den Fahrplan und die Topologie des Bahnstromnetzes berücksichtigt. Um die Plausibilität der Resultate zu verifizieren, wurden die Resultate des Simulator in einem ersten Schritt ohne zusätzlichen Energiespeicher überprüft. Der Vergleich der monatlichen Stromrechnung für das Unterwerk „Sceut“ lieferte einen Unterschied von nur + 1.3 % zwischen der realen und der „virtuellen“ Rechnung. Dies bestätigt die Richtigkeit des Simulationswerkzeuges und dessen Resultate.

Infolgedessen wurde der Simulator für die weiterführende Untersuchung zur Integration eines Energiespeichers verwendet. Dieser Speicher wird parallel zum Unterwerk „Sceut“ angeschlossen. Dies wird dadurch gerechtfertigt, weil an dieser Station die meiste Energie verbraucht wird und die markantesten Leistungsspitzen auftreten. Eine Strategie für das Ladezustand-Management wurde implementiert. Diese Strategie führt zu einer Minderung der Energieberechnung um 10 % und reduziert ebenfalls die Rechnung für die Leistungsspitzen um 18 %. Schlussendlich ergibt sich somit eine Reduktion der gesamten Stromrechnung für das Unterwerk Sceut um 12.14 %.

Dieses Gewinnpotential wurde als zu gering eingestuft, weshalb ein Energiespeicher parallel zum Standort Sceut nicht sinnvoll ist. Dies unter dem Vorbehalt weiterführender Studien.

## Executive Summary dans une seconde langue nationale

Dans le cadre d'une étude préliminaire proposée par les Chemins de Fer du Jura (CJ), un outil de simulation a été développé. L'objectif est d'identifier s'il est techniquement et financièrement possible d'insérer sur le réseau des CJ une installation d'accumulation d'énergie. Deux indicateurs sont à analyser : l'augmentation des possibilités de récupération de l'énergie lors des freinages des trains, ainsi que la limitation des puissances crêtes que les sous-stations doivent fournir au réseau.

Un simulateur de réseau a été défini, pour lequel le matériel roulant, les contraintes topologiques et horaires, ainsi que la topologie électrique ont été modélisées. Cet outil a été testé sans intégration d'installation d'accumulation d'énergie afin de s'assurer de la consistance des résultats qui sont fournis. La comparaison d'une facture mensuelle adressée au CJ pour la sous-station « Sceut » à une facture virtuelle établie selon les bilans d'énergie et de puissance crête obtenus par ce simulateur montre une différence de +1.3%, ce qui valide l'outil développé

Le simulateur de réseau a par conséquent été utilisé pour l'étude d'une installation d'accumulation d'énergie en parallèle de la sous-station « Sceut ». Cette dernière est en effet la plus sollicitée en termes d'énergie injectée à la caténaire. C'est également la sous-station pour laquelle le niveau de puissance crête est le plus grand. Une stratégie de gestion de l'état de charge de la batterie a été implémentée. Elle conduit à réduire de 10% la facture en énergie et de 18% la valeur crête de la puissance. Au final, la facture mensuelle pour la sous-station « Sceut » est réduire de 12.14%.

Ce potentiel de réduction a été jugé minime, raison pour laquelle il n'a pas été jugé utile d'envisager l'implantation d'un dispositif de stockage en parallèle de la sous-station « Sceut », sous réserve d'études complémentaires.

## Executive Summary en anglais

In the frame of a preliminary study proposed by the Chemins de Fer du Jura (CJ), a simulation tool has been developed. The objective is to identify if it makes sense technically et financially to insert on such a network an installation for fix energy storage. Two potential gains must be investigated: the

increase of energy recovering possibilities when the trains are braking, as well as the limitation of the peak power the feeding stations have to provide to the network.

A simulator has been defined, where the trains, the topological and schedule constraints, and the electrical topology of the entire system are modeled. This tool has been tested without accumulator, in order to study the accuracy of the results. The comparison of a monthly bill addressed to the CJ for the feeding station "Sceut" to a virtual bill obtained through energy and power balance from the simulation tool led to a +1.3% difference, which validates the tool that is developed.

This network simulation has then been used for the study of fix energy storage installation, in parallel with the feeding station "Sceut". This last is indeed that one which is the most solicited in terms of energy required. It is also the feeding station that must provide the highest level of peak power. An energy management strategy is implemented for the battery. It leads to a 10% reduction for the energy bill, and a reduction of 18% for the maximal peak power. As a final balance, the monthly bill for the feeding station is reduced down to 12.14%.

This possible reduction in a monthly bill was judged too low. This is why it was not recommended the launch the practical integration such a storage system in parallel with one the feeding station, under the condition of complementary studies.

## Résumé en allemand

Im Rahmen einer Machbarkeitsanalyse, in Auftrag gegeben durch die Chemins de fer du Jura (CJ), wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt. Ziel ist es herauszufinden, ob es technisch und finanziell möglich ist, einen Energiespeicher in das Bahnstromnetz der CJ zu integrieren. Dazu sind zwei Indikatoren zu analysieren:

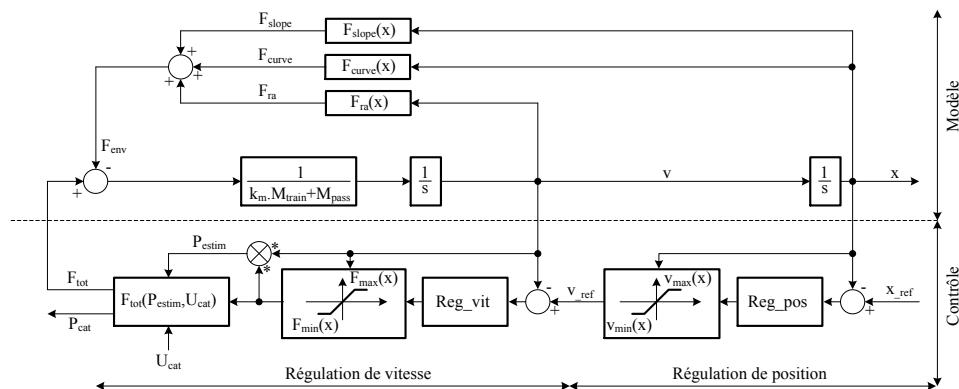
- Möglichkeit zur Erhöhung der Rückgewinnung der Bremsenergie.
- Limitieren der Leistungsspitzen welche von den Unterwerken in das Netz zurückgegeben werden.

Die Analyse ist in drei Teile gegliedert.

- Entwickeln und anpassen eines Simulators für den Regionalverkehr.
- Überprüfen der Gültigkeit der erhaltenen Resultate.
- Studie zur Integration eines Energiespeichers in das Bahnstromnetz.

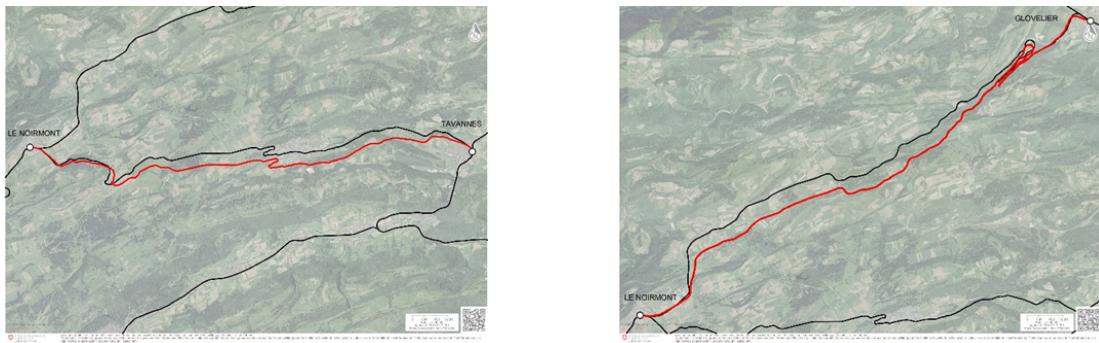
Als Grundlage für das Simulationsmodell diente eine vorgängige Studie für Chemin de Fer Lausanne-Echallens-Bercher SA (LEB). Um präzisere Resultate zu erhalten, wurde dieses Grundlagenmodell erweitert und verbessert. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei den folgenden Elementen geschenkt:

- Modellierung des Rollmaterials: In der nachfolgenden Grafik ist ein Blockschema des implementierten Zugmodells ersichtlich.



Einerseits beinhaltet dieses Modell das dynamische Verhalten der simulierten Zugkomposition, wie auch die nötigen Regelschleifen um den Zug zwischen zwei Bahnhöfen zu bewegen. Dies wird durch einen Positionsregler sichergestellt, wobei Geschwindigkeitsbegrenzungen eingehalten werden (Geschwindigkeitsregler) und Traktionskräfte begrenzt werden (Begrenzen der Traktionskräfte in Funktion der Geschwindigkeit und der Fahrleitungsspannung). Zu guter Letzt stellt das Zugmodell dem übergeordneten Bahnnetzmodell die momentan verbrauchte oder zurückgewonnene Leistung zur Verfügung.

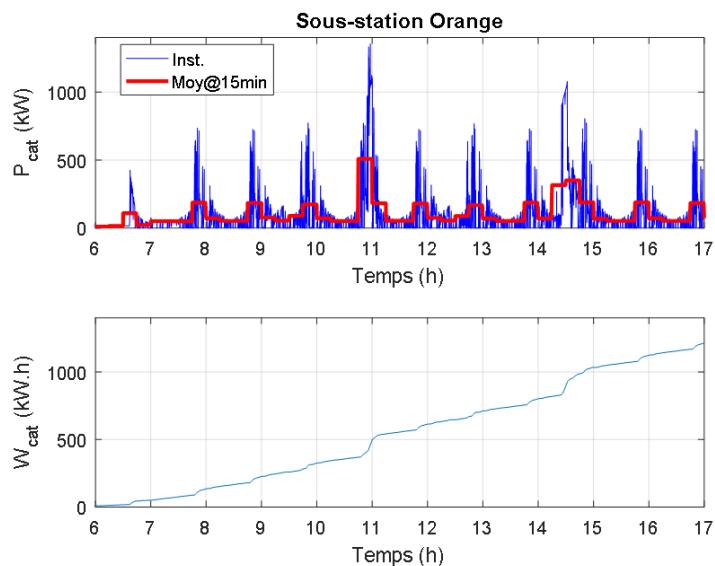
- Modellierung der topologischen Gegebenheiten und des Fahrplans: Der Leistungsbedarf eines Zuges hängt von der Streckenführung (Steigung, Kurven, usw.) ab. Auch diese Daten wurden in das Berechnungsmodell integriert, dies ist in der nachfolgenden Grafik ersichtlich. Um die täglichen Zugbewegungen zwischen den verschiedenen Bahnhöfen zu ermitteln, wurden ebenfalls die Fahrpläne analysiert und eingehalten. Letztlich respektiert das Simulationsmodell ebenfalls alle Geschwindigkeitsbegrenzungen strikt. Fordert ein Streckenabschnitt beispielsweise eine Geschwindigkeitsreduktion, wird dies durch Bremsen sichergestellt.



- Modellierung des Stromnetzes: Besondere Aufmerksamkeit wurde der Modellierung des komplexen elektrischen Bahnstromnetzes der CJ gezeitigt. Diese Komplexität wird durch die ständig wechselnde Position der Züge im Streckennetz weiter erhöht. Aus diesem Grund wurde eine Bibliothek elementarer Leitungsabschnitte erstellt (Bahnhofsabschnitt mit/ohne Zug, Leitungsabschnitt mit/ohne Zug, usw.). Bei jedem Berechnungsschritt kalkuliert das Simulationswerkzeug die aktuelle Position der Züge und erstellt in Abhängigkeit dazu eine „Netlist“ relativ zum realen Stromnetz aus den elementaren Leitungsabschnitten. Die mittels der Oberleitung zwischen den Zügen und den Unterwerken ausgetauschten elektrischen Ströme, werden anschliessend mittels dieser „Netlist“ berechnet. Das Spannungspotential an jedem Kontaktpunkt zwischen Zug / Oberleitung oder Unterwerk / Oberleitung wird ebenfalls errechnet.

Das entwickelte Simulationswerkzeug wurde ohne integrierten Energiespeicher auf die korrekte Funktionsweise getestet.

Als aussagekräftige Resultate wurde die Energiebilanz zwischen allen Unterwerken und dem Versorgungsnetz, sowie die Spitzenleistung, die in die Fahrleitung gespeist wird, identifiziert.



Die Stromrechnung des Energieversorgers an die CJ stellt sich aus zwei Teilen zusammen; der verbrauchten Energie und der monatlichen Leistungsspitze. Deshalb ist Ermittlung eines gemittelten Leistungsprofils von wesentlicher Bedeutung für das Projekt, weil dieses die monatliche Stromrechnung signifikant beeinflusst. Mittels dieser Leistungsspitze wurde das Simulationsmodell verifiziert. Dazu wurde eine reale Stromrechnung mit einer simulierten virtuellen Stromrechnung verglichen. Der Vergleich dieser beiden Stromrechnungen für das Unterwerk „Sceut“ lieferte eine Differenz von nur gerade +1.3 %. Somit kann das Simulationswerkzeug für gültig erklärt werden.

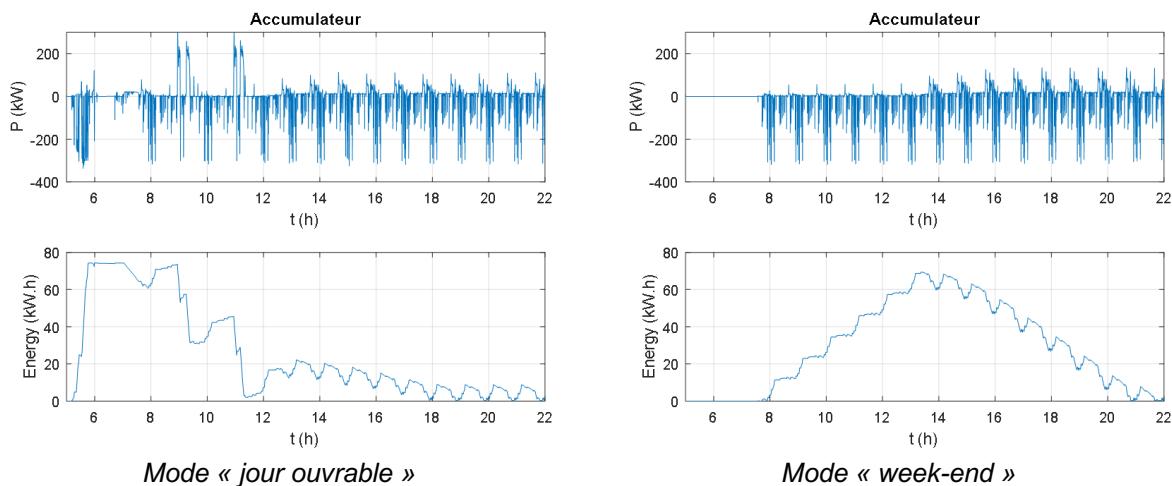
Durch die gute Übereinstimmung der Simulationsresultate, wurde dieses für die weiterführende Untersuchung zur Integration eines Energiespeichers benutzt:

- Auf Basis der zuvor erhaltenen Resultate wurde entschieden, den Energiespeicher parallel zum Unterwerk „Sceut“ zu platzieren. Dies rechtfertigt sich dadurch, dass dieses Unterwerk erhebliche Leistungsspitzen aufweist. Ebenfalls ist der Energiebezug, verglichen mit den restlichen Unterwerken, an diesem Standort am höchsten.
- Der Energiespeicher wurde von dem Unternehmen Vivatec vordimensioniert. Der Speicher muss fähig sein eine Leistung von 300 kW während 15 Minuten zu liefern, was einer Energiemenge von 75 kWh entspricht.

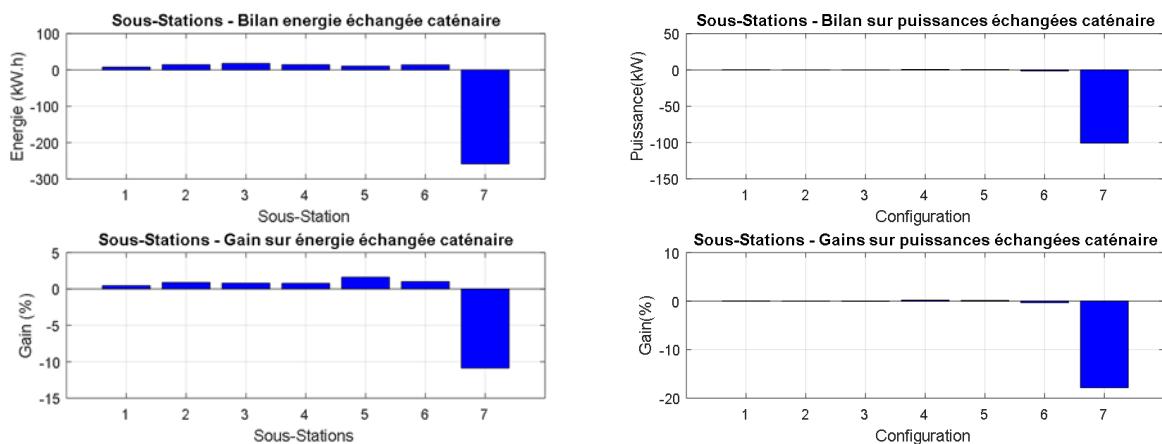
Der erste Schritt der weiterführenden Analyse besteht darin, eine Strategie zur Verwaltung des Ladezustands der Batterie zu definieren. Es wurden folgende Kriterien definiert:

- Zu Beginn, wie auch am Ende eines Tages muss die Batterie entladen sein. Dies entspricht einer globalen Energiebilanz von Null.
- Die Batterie wird nur mittels zurückgewonnener Bremsenergie der Züge aufgeladen. Dies ermöglicht eine Erhöhung der rückgewonnenen Bremsenergie, was dem ersten Ziel der Studie entspricht. Das Entladen der Batterie basiert auf einer Filterung der Leistung des Unterwerks «Sceut». Das Filter entspricht einem gleitenden Mittelwert mit einem Fenster von einer Minute. Dadurch begrenzen sich die Leistungsspitzen welches das Unterwerk mit dem Versorgungsnetz austauscht. Dies entspricht dem zweiten Ziel der vorliegenden Studie. In Funktion des Ladezustands des Speichers und des aktuellen Tagesfahrplans wird die Entladeleistung angepasst.

Nachfolgend der simulierte Verlauf des Ladezustands des Speichers für zwei typische Tage (Arbeitstag und Wochenende). Dadurch, dass an Wochenenden keine Güterzüge fahren, werden zwei unterschiedliche Strategien für die Handhabung der Entladeleistung des Speichers benötigt.



Die beiden wichtigsten Resultate zeigen den Gewinn durch die Integration eines Batteriespeichers parallel zum Unterwerk «Sceut».



### *Gains sur les énergies injectées*

### *Gains sur les puissances crêtes injectées*

Wie erwartet erlaubt die Integration des Energiespeichers eine Reduktion der Rechnung für die bezogene Energie um 10 % und reduziert die Rechnung für die Leistungsspitzen um 18 %. Dieser Gewinn wird durch die anderen Unterwerke etwas gemindert, dies durch den globalen Wirkungsgrad des Systems. Wird die globale Energierechnung gesenkt, führt die Integration des Energiespeichers zu höheren Strömen in der Fahrleitung. Als Konsequenz ergeben sich zusätzliche Verluste, welche sich auf die übrigen Unterwerke verteilen.

Alle diese Ergebnisse führten ebenfalls zu einer "virtuellen" Rechnung für die Unterstation Sceut, die mit der "virtuellen" Rechnung für den batterielosen Fall verglichen wurde. Die Integration des Batteriespeichers erlaubt die Stromrechnung dieses Unterwerks um 12.14 % zu reduzieren.

Diese Gewinnmarge wurde als zu gering erachtet, weshalb die Implementierung des Energiespeichers parallel zum Unterwerk „Sceut“ als nicht empfehlenswert eingestuft wurde. Dies unter dem Vorbehalt zu weiterführenden Studien betreffend:

- Optimierung des Ladezustand-Managements des Batteriespeichers.
- Optimierung der Dimensionierung des Speichers.
- Optimierung des Standortes des Speichers.

## Résumé dans une seconde langue nationale

Dans le cadre d'une étude préliminaire proposée par les Chemins de Fer du Jura (CJ), un outil de simulation a été développé. L'objectif est d'identifier s'il est techniquement et financièrement possible d'insérer sur le réseau des CJ une installation d'accumulation d'énergie. Deux indicateurs sont à analyser :

- Augmentation des possibilités de récupération de l'énergie lors des freinages des trains.
- Limitation des puissances crêtes que les sous-stations doivent fournir au réseau.

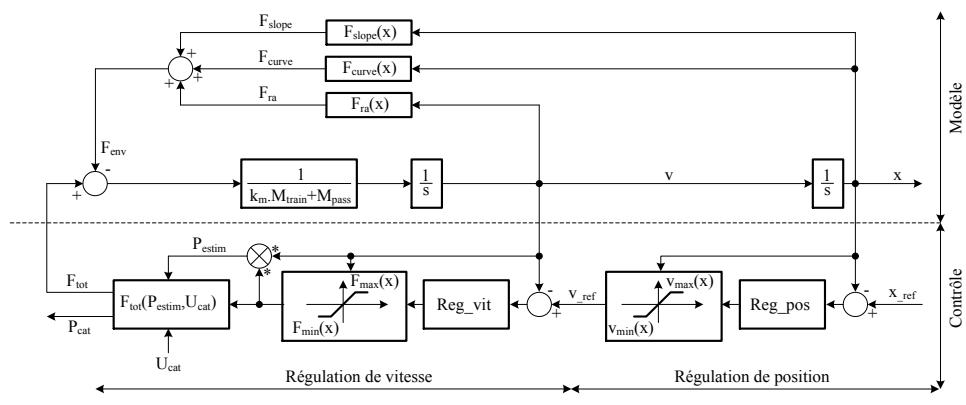
Cette étude est ainsi divisée en trois parties :

- Développement et adaptation d'un simulateur d'un réseau de trains régionaux.
- Analyse de la consistance des résultats obtenus.
- Etude de l'intégration d'un accumulateur d'énergie

La définition d'un simulateur de réseau a repris comme base le travail précédemment effectué pour la Compagnie du Chemin de Fer Lausanne-Echallens-Bercher SA (LEB).

L'outil à disposition a été amélioré de manière à conduire à des résultats plus précis. Un soin particulier a été accordé aux éléments suivants :

- Modélisation du matériel roulant : nous donnons ci-après le modèle de train tel qu'implémenté dans notre simulateur.



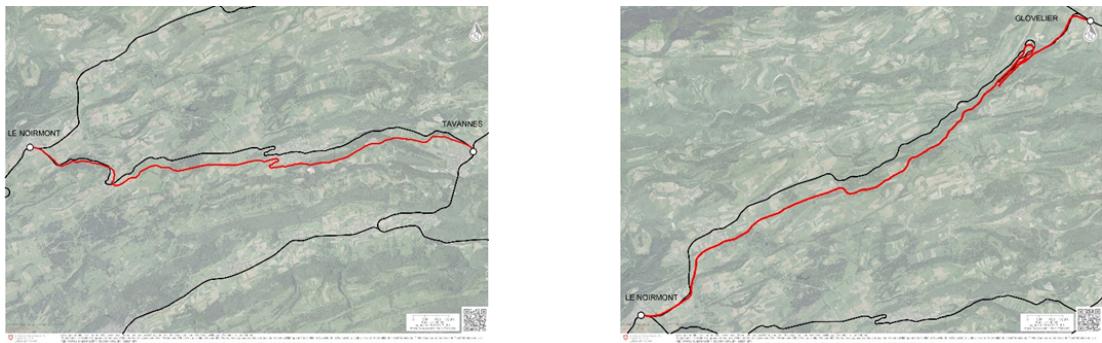
**Modèle comportemental d'une rame**

Ce modèle comprend d'une part le comportement dynamique des véhicules simulés. Il comprend également les boucles de régulation qui permettent de déplacer les trains d'une gare à l'autre (régulation de position), en respectant des limitations de vitesses (régulation de vitesse), tout en limitant les forces de traction selon la nature du train simulé (limitation de force en fonction de la vitesse ou de la tension caténaire). Enfin, ce modèle comprend un lien vers le modèle électrique du réseau des CJ, afin d'identifier les puissances qui sont échangées.

- Modélisation de contraintes topologiques et horaires: les besoins en puissance des véhicules dépendent de considérations liées aux déclivités et virages rencontrés sur le parcours. Ces données ont été intégrées après tests de leur validité. Ceci est montré sur figure suivante.

De même les horaires de service ont été analysés, afin de déterminer les circulations des trains entre gares.

Enfin, les profils de limitation de vitesse sont analysés et implémentés. Dans ce cadre, l'outils de simulation défini permet d'assurer un respect strict de ces limitation, notamment en anticipant le freinage lorsqu'une section de parcours demande une réduction de vitesse.



**Validation des données de sinusoïde**

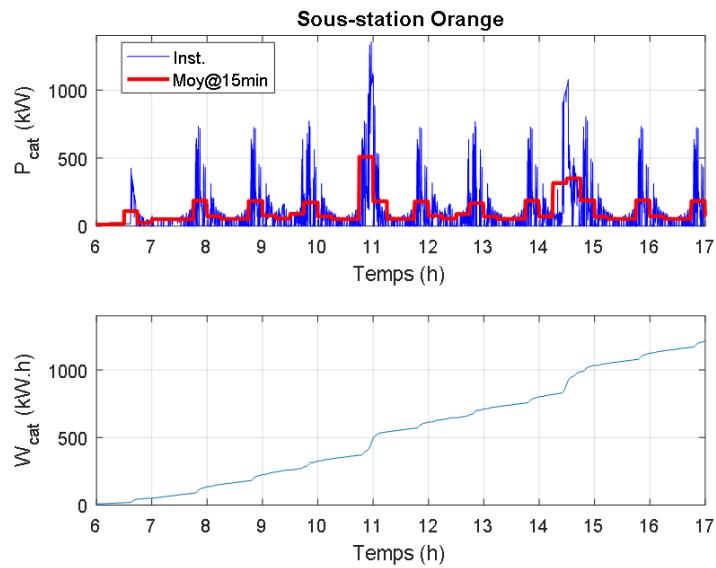
- Modélisation du réseau électrique: un soin particulier est accordé à cette modélisation vu la complexité du schéma électrique équivalent au réseau des CJ. Cette complexité est renforcée par la position toujours changeante des trains sur le parcours.

C'est pourquoi une librairie de sections élémentaires a été développées (section gare avec/sans trains, section tronçon avec/sans trains, etc...). A chaque pas de calcul, le simulateur développé analyse la position des trains, et construit une netlist relative à l'ensemble du réseau à partir des éléments de cette bibliothèque.

C'est cette netlist qui est résolue afin d'identifier les courants échangés entre les trains et les sous-stations d'alimentation via la caténaire. Cette résolution donne également l'ensemble des potentiels électriques à chaque point de connexion entre caténaire et train/sous-station.

Le simulateur développé a été testé sans intégration d'installation d'accumulation d'énergie. Ceci afin de s'assurer de la consistance des résultats qui sont fournis.

Parmi les résultats significatifs on peut mentionner un bilan des énergies fournies au réseau par l'ensemble des sous-stations d'alimentation, ainsi que les puissances crêtes injectées à la caténaire.



**Bilan de puissance et d'énergie entre sous-station et caténaire**

L'identification de ces profils de puissance moyenne est une donnée fondamentale à ce projet, dans la mesure où le fournisseur d'énergie pour le réseau des CJ base une partie de ses factures sur le kilo-watt de pointe mensuel.

C'est grâce à cette dernière spécificité que la validité du simulateur a été testée : nous avons comparé une facture mensuelle adressée au CJ pour la sous-station Sceut à une facture virtuelle établie selon les bilans d'énergie et de puissance crête obtenus par ce simulateur. La comparaison des prix « ré-

els » et « virtuel » montre une différence de +1.3%, ce qui valide l'outil développé selon l'un des deux objectifs de l'étude.

L'outil de simulation a par conséquent été utilisé pour l'étude d'une installation d'accumulation d'énergie :

- Après analyse des résultats précédemment obtenus, il a été décidé de placer l'accumulateur en parallèle de la sous-station « Sceut ». Cette dernière est en effet la plus sollicitée en termes d'énergie injectée à la caténaire. De plus, c'est la sous-station pour laquelle le niveau de puissance crête est le plus grand.
- La société Vivatec a pré-dimensionné l'installation, qui doit pouvoir fournir une puissance de 300kW pendant 15 minutes, soit une énergie de 75kWh.

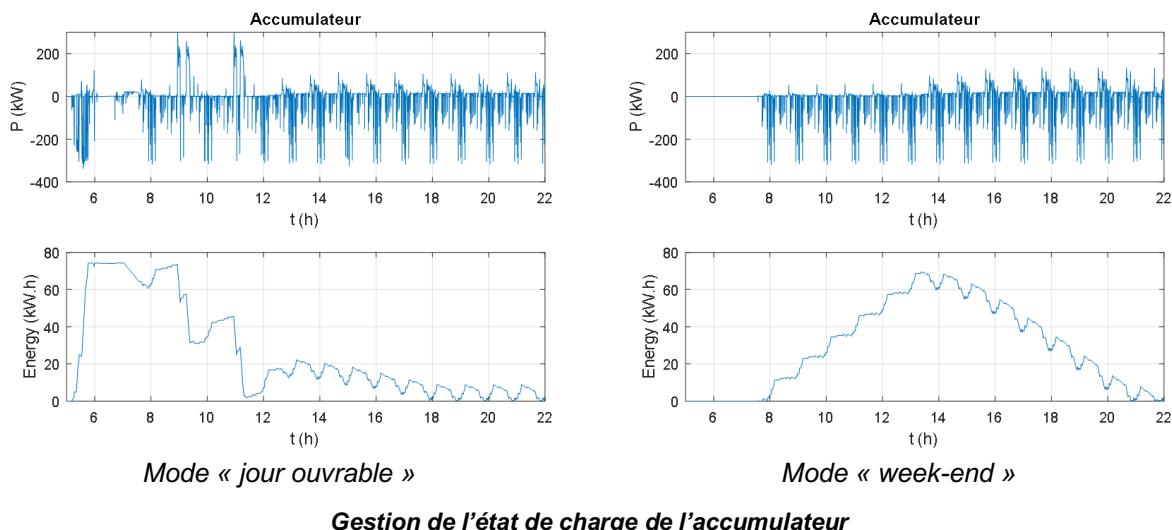
La première étape consiste à définir une stratégie de gestion de l'état de charge de la batterie. Nous avons fixé les critères suivants :

- En début de journée, la batterie est déchargée. Elle doit également être déchargé en fin de journée (bilan énergétique global nul).
- La charge de batterie ne peut être faite que lorsque les trains réinjectent de l'énergie lors de leur freinage. Ceci pour augmenter les possibilités de récupération de l'énergie lors des freinages des trains (premier objectif de l'étude).

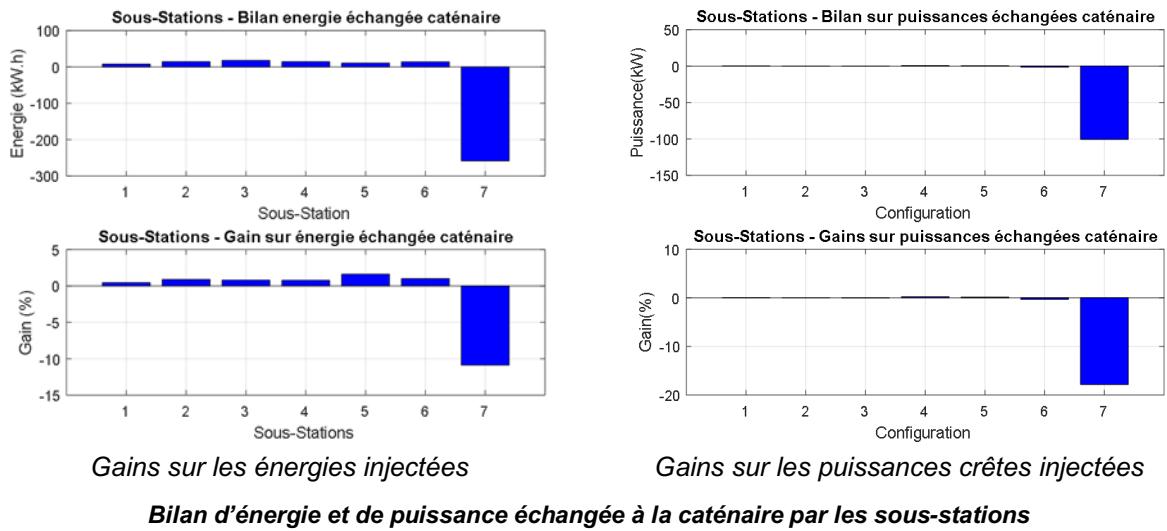
La décharge de la batterie est mise en œuvre suivant le principe de filtrage de la puissance fournie par la sous-station Sceut, selon une valeur moyenne glissante calculée sur 1 minute. Ceci pour limiter les puissances crêtes que les sous-stations doivent fournir au réseau (second objectif de l'étude).

Selon l'état de charge de l'accumulateur, et selon l'état du trafic selon l'horaire, cette puissance de décharge est ajustée.

Nous donnons sur la figure suivante l'évolution simulée de l'état de charge de l'accumulateur sur deux journées type, qui demandent deux stratégies différentes pour la gestion de la puissance de décharge de la batterie : il n'y a pas de trains marchandises le week-end.



Les deux résultats majeurs proposés donnent les gains liés à l'intégration d'un accumulateur en parallèle de la sous-station Sceut (référencée N° 7).



Comme attendu, l'ajout d'un accumulateur permet de réduire de 10% la facture en énergie et de 18% la valeur crête de la puissance. On notera cependant un report de gains positifs sur les autres sous-stations, ce qui est lié à la notion de rendement global du système. En effet, si la facture globale en énergie est réduite, l'ajout d'un système d'accumulation augmente les courants circulant sur la caténaire, induisant des pertes additionnelles qui se reportent sur les autres sous-stations.

L'ensemble de ces résultats a permis de générer également une facture « virtuelle » pour la sous-station Sceut, qui a été comparé à la facture « virtuelle » pour le cas sans batterie. La présence d'une batterie permet de réduire de 12.14% la facture mensuelle.

Ce potentiel de réduction a été jugé minime, raison pour laquelle il n'a pas été jugé utile d'envisager l'implantation d'un dispositif de stockage en parallèle de la sous-station Sceut, sous réserve d'études complémentaires liées :

- A l'optimisation de la stratégie de gestion de l'état de charge de la batterie.
- A l'optimisation du dimensionnement de cette batterie.
- A la recherche du meilleur point de connexion possible à la caténaire (entre deux sous-stations par exemple).

## 1. Situation de départ

Suite à l'acceptation par l'Office Fédéral des Transports (OFT) de la demande de financement soumise par les Chemins de Fer du Jura (CJ), il a été convenu d'entreprendre l'étude qui consiste à identifier les potentiels du stockage d'énergie pour l'alimentation de trains dédiés au transport voyageurs et marchandises [1].

En effet, le réseau des CJ entre les gares de Pré-Petitjean et Glovelier est à pente constante de 25‰, avec deux sous-stations d'alimentation (Sceut et Pré-Petitjean). Selon l'horaire 2016/2017, les trains se croisent à Bollement.

Face à cet état des lieux, deux enjeux se présentent :

- Le train descendant est contraint d'utiliser le frein électrique sur quasiment 13 kilomètres. Les impératifs liés à une meilleure gestion du rendement énergétique du réseau des CJ conduisent à pouvoir récupérer l'énergie de freinage quand il n'y a pas d'autres consommateurs sur la ligne, puis de la restituer à la caténaire lorsque le train repart de Glovelier.
- D'autre part, le réseau des CJ fait face à la problématique de limitation des puissances maximales injectées par les sous-stations d'alimentation. Face à la politique de tarification du fournisseur d'électricité, il est primordial pour le CJ de limiter les puissances de pointe, sans ajout de sous-station supplémentaire ni demande de construction de nouvelle ligne d'alimentation.

Parallèlement, la Haute Ecole d'Ingénierie (HEI) de HES-SO Valais/Wallis a développé un outil de simulation de réseau de trains régionaux dans le cadre d'un projet précédent, mené pour le compte de la Compagnie du Chemin de Fer Lausanne-Echallens-Bercher SA (LEB) [1]. Cet outil permet en particulier de prendre en compte l'intégration de systèmes d'accumulation, qu'ils soient embarqués à bord de rames ou bien qu'ils soient connectés à la caténaire.

## 2. Objectifs du travail

L'objectif principal de ce travail est l'identification de l'apport de l'intégration de systèmes d'accumulation au sein du réseau des CJ, selon deux critères principaux :

- Elévation du rendement en maximisant les possibilités de récupération de l'énergie au freinage.
- Diminution des puissances crêtes injectées par les sous-stations d'alimentation.

Face à ces deux objectifs, l'étude réalisée par la HES-SO Valais/Wallis pour le compte de la société LEB a clairement montré que la solution la plus efficace pour répondre à ces deux critères consiste à recourir au stockage embarqué au sein des motrices. Cependant, les contraintes propres aux CJ ont conduit d'emblée à rejeter cette possibilité :

- vu la nature des rames historiquement en opération sur le réseau, qui demanderaient des adaptations trop compliquées,
- vu la nature des rames de conception plus récentes, où cette possibilité n'est techniquement pas envisagée.

De fait, la poursuite des objectifs de ce travail consistera en l'étude de l'apport de l'intégration de systèmes d'accumulation à la caténaire du réseau des CJ. Les accumulateurs considérés seront donc vus comme des sous-stations additionnelles, ayant toutefois la caractéristique d'être réversibles par opposition aux sous-stations conventionnelles qui ne le sont pas.

Afin de répondre à l'objectif principal fixé, trois thèmes principaux seront développés:

- Adaptation de l'outil de simulation développé pour le LEB au réseau des CJ. L'objet consiste à personnaliser le simulateur à disposition pour prendre en compte la topologie du réseau (déclivités, courbures, position des stations), la position et la nature des stations d'alimentation. Parmi les gains en performance recherchée, une prise en compte plus fine de l'architecture électrique sera entreprise.

Les modèles comportementaux des rames seront toujours implémentés sous forme de bilans de puissances. Si de tels modèles pour les rames « voyageurs » sont déjà à disposition, ceux relatifs aux trains marchandises seront à développer.

- Analyse des résultats obtenus pour s'assurer de la consistance des résultats obtenus, donnant la situation de référence pour le réseau sans accumulateur.
  - Exploitation de l'outil de simulation en vue de l'étude de l'insertion d'éléments dédiés au stockage d'énergie sur la caténaire (stockage sédentaire). Ces accumulateurs ont déjà fait l'objet d'un dimensionnement par la société Vivatec GmbH. Les variations paramétriques qui seront pratiquées seront donc relatives à l'emplacement des accumulateurs sur le réseau, ainsi qu'aux stratégies de gestion de leur état de charge.
- Les indicateurs analysés seront relatifs à l'énergie récupérée lors du freinage des trains, à la contribution des accumulateurs quant à la limitation des puissances instantanées prélevées aux sous-stations d'alimentation.

On précise enfin que vu le temps à disposition, il a été convenu avec les CJ de se focaliser sur l'environnement proche de la sous-station la plus « problématique » quant à la thématique des puissances crête, à savoir la sous-station Sceut. Si le principe de départ a de fait conduit à n'envisager qu'une modélisation partielle du réseau des CJ, décision a cependant été prise de simuler l'ensemble de ce réseau, afin d'identifier l'impact d'une sous-station d'accumulation sur l'ensemble du système, ainsi que d'éviter des hypothèses de travail trop restrictives.

### 3. Approche adoptée et état des connaissances actuelles

#### 3.1. Remarques préliminaires

Dans la mesure où la base de cette étude consiste à disposer d'un modèle numérique du réseau des CJ, une phase conséquente de ce projet a consisté en l'adaptation de l'outil précédemment développé pour le LEB. Cette adaptation peut être décrite selon trois activités principales :

- Enrichissement des librairies à disposition qui définissent le matériel roulant parcourant le réseau considéré.
- Analyse fine de données topographiques afin de décrire plus précisément les déclivités et courbes sur le parcours. Le but est d'être plus précis sur les besoins en puissance instantanée et en énergie des convois.
- Prise en compte plus précise des spécificités liées à la topologie de l'alimentation électrique du réseau, avec réécriture des solveurs dédiés à la résolution du modèle numérique du système. L'objectif est de disposer d'un outil modulaire et facilement réutilisable pour des études ultérieures, tout en permettant une analyse des flux d'énergie au sein du réseau tant en régime permanent qu'en régime transitoire.

#### 3.2. Modélisation du matériel roulant

Le type de matériel roulant pris en compte est tel que celui en opération sur le réseau des CJ, à savoir :

- Rames passager Be 4/4 2016 +B+ABt
- Rames passager Abe 2/6 (GTW)
- Rames marchandises Be 4/4 615 AJD

L'ensemble des données et paramètres relatifs à ces rames a été fourni par les CJ, complété par les données issues de [2]. Ces données permettent de définir un modèle comportemental de chacune des rames circulant sur le réseau, afin d'identifier les besoins en puissance de traction et de freinage. De manière conventionnelle, ce modèle est décrit par la relation :

$$(k_M \cdot M_{train} + M_{pass}) \cdot \frac{dv}{dt} = F_{tot} - F_{env} \quad (1)$$

Avec :

- $M_{train}$  : masse du train,
- $M_{pass}$  : masse de la charge,
- $k_M$  : coefficient de masse tournante,
- $F_{tot}$  : force de traction,
- $F_{env}$  : force de résistance à l'avancement.

Afin de pouvoir résoudre ce modèle, son implémentation dans le simulateur mis au point est telle que définie à la Figure 1, où l'on notera qu'un traitement par causalité intégrale permet d'éviter toute mise en œuvre de calcul dérivé [3]. Ceci permet d'obtenir facilement des résultats stables, avec des temps de calculs réduits.

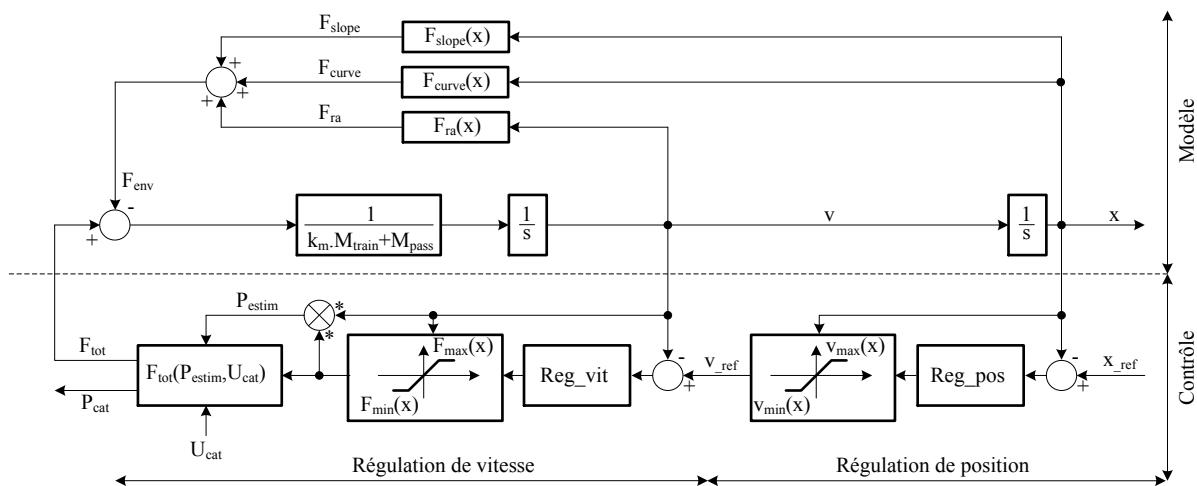


Figure 1 Modèle comportemental d'une rame

Le modèle comportemental d'une rame comprend d'une part le modèle proprement dit, tel que spécifié dans l'équation (1). Sa résolution nécessite de connaître à chaque instant la force de résistance à l'avancement  $F_{env}$ . Cette dernière peut être positive (résistance à l'avancement), ou bien négative (assistance à l'avancement). Dans tous les cas, elle est la somme des trois forces distinctes :

- $F_{ra}$  , force de résistance à l'avancement, qui définit la résistance à l'avancement du véhicule liée aux forces aérodynamiques et de friction. Des possibilités de création d'abaques sont fournies dans [4], dont un résultat est fourni à titre d'exemple à la Figure 2. De manière conventionnelle, cette abaque inclut la force de décrochage relative à la mise en vitesse du train. D'autre part, on note que cette force s'oppose dans tous les cas à l'avancement du train.

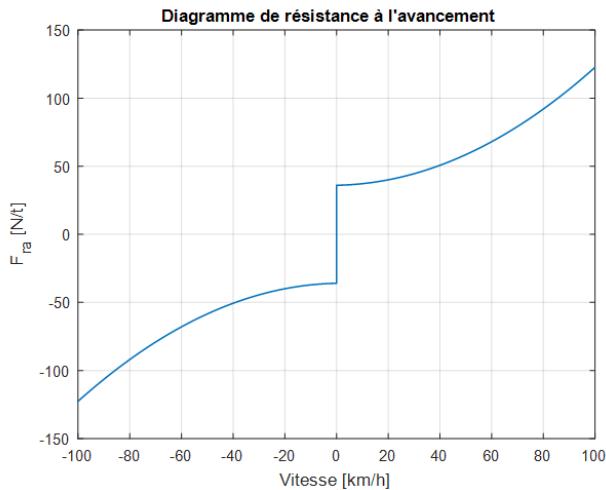


Figure 2 Force de résistance à l'avancement

- $F_{curve}$ , force de frottement liée aux rayons de courbure des virages, qui s'oppose également dans tous les cas à l'avancement du train. Cette force est définie par [5]:

$$F_{curve} = \frac{k_e}{R_v} 10^{-3} (M_{train} + M_{pass}) g \quad (2)$$

Avec :

- $k_e = 530 \text{ m}$  pour une voie métrique,
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,
- $R_v$  le rayon du virage.

On notera enfin que cette force est nécessairement fonction de la position du train sur le parcourt.

- $F_{slope}$ , force liée à la gravité donc liée à la déclivité (positive ou négative) rencontrée par le train. Dans le domaine ferroviaire, cette déclivité  $i$  est exprimée en « pour mille », approximation jugée valide dans le contexte des déclivités maximales observées pour le réseau des CJ. Bien évidemment, cette force peut s'opposer ou favoriser l'avancement du train. Selon [4] et [5], cette force s'exprime par :

$$F_{slope} = (M_{train} + M_{pass}) g \cdot i \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

On notera également que cette force est nécessairement fonction de la position du train sur le parcourt.

La résolution du modèle tel que proposé sur la Figure 1 est également conditionné par une boucle de réglage, comportant deux régulateurs cascadés :

- *Régulation de position* : règle la position  $x$  de la rame sur le parcours, qui doit tendre vers une position de référence  $x_{ref}$ . Cette dernière représente la position de l'arrêt à atteindre. Une fois celui-ci atteint, une nouvelle référence  $x_{ref}$  est générée, selon l'horaire, pour parvenir à l'arrêt suivant. Et ainsi de suite.

Cette régulation de position génère une référence de vitesse  $v_{ref}$ , qui est bornée pour respecter la limitation de vitesse en vigueur selon la position courante du véhicule.

- *Régulation de vitesse* : règle la vitesse  $v$  de la rame sur le parcourt, qui doit suivre la référence  $v_{ref}$  fournie par la régulation de position. Cette régulation de vitesse génère la force de traction/freinage  $F_{tot}$ , qui est doublement bornée :

- Par le diagramme de traction effort-vitesse caractérisant la rame considérée. L'exemple d'un tel diagramme est donné à la Figure 3, qui définit les efforts de traction et freinage maximum admissibles en fonction de la vitesse de la rame.

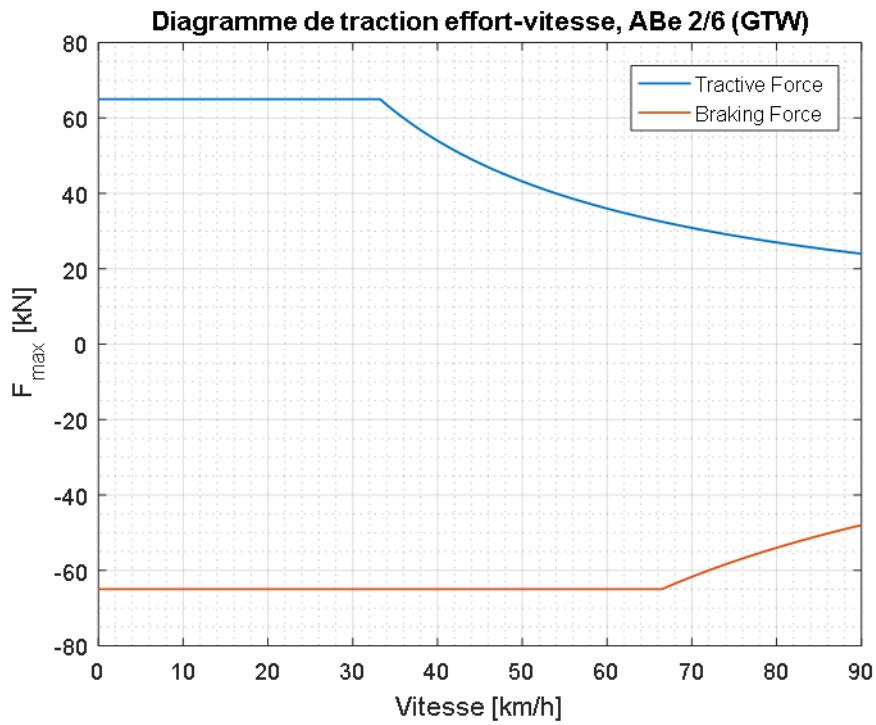


Figure 3 Diagramme de traction effort-vitesse pour rame ABe 2\*6 (GTW)

- Par le diagramme de limitation de la puissance caractérisant cette même rame. L'exemple d'un tel diagramme est donné à la Figure 4, qui définit la puissance de traction maximale admissible en fonction de la tension caténaire. Il y est également défini la puissance de freinage maximale admissible qui peut être réinjectée à la caténaire par récupération d'énergie.

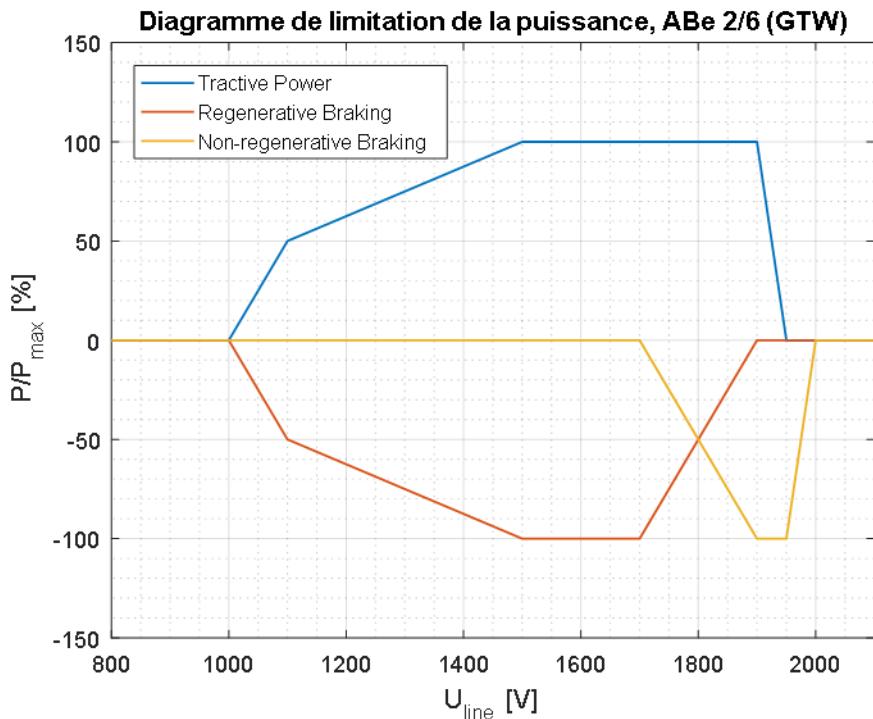


Figure 4 Diagramme de limitation de la puissance pour rame ABe 2/6 (GTW)

Ce dernier élément de limitation est fondamental, car il génère de manière liée:

- La force de traction/freinage requise pour mouvoir la rame et obtenir son comportement dynamique.
- La puissance échangée à la caténaire, porte d'entrée pour lier le comportement dynamique de la rame au réseau d'alimentation, tout en prenant en compte les fluctuations de tensions de ce dernier sur d'éventuelle limitation de puissance admissible pour la rame. Cela permet en particulier d'identifier la nature du freinage du train : par dissipation ou par récupération.

Afin de pouvoir être intégré dans l'outil de simulation développé, le modèle comportemental des trains considérés tel que défini à la Figure 1 doit pouvoir être alimenté par les paramètres suivants :

- Paramètres relatifs aux rames considérées, fournis par les CJ, complété par les données issues de [2] : il s'agit en premier lieu des masses des rames et leurs passagers, le coefficient de masses tournantes et des forces de résistances à l'avancement telles que définies à la Figure 2. Ces données sont complétées par les puissances maximales pour les auxiliaires, le chauffage et la climatisation, ainsi que par les diagrammes effort-vitesse et limitation de puissance. L'ensemble des données considérées sont données en annexe A.
- Paramètres génériques, fonction de la topologie du réseau : la résolution du comportement dynamique des rames considérées demande la connaissance d'un certain nombre de paramètres qui sont fonction de la position de la rame sur le réseau :
  - Forces  $F_{slope}$  et  $F_{curve}$  exercées sur le véhicule, obtenues par « lookup table » à partir de la position de la rame sur le parcours.
  - Limitations de vitesse, également obtenues par « lookup table » à partir de la position de la rame sur le parcours.
  - Succession des positions  $x_{ref}$  des arrêts des rames sur le parcours, liée à la notion d'horaire.

La détermination de ces contraintes n'est pas directement liée aux rames, mais au parcours qui leur est imposé ce qui justifie l'examen précis de la topologie du réseau. Ce dernier point fait l'objet de la section suivante.

### 3.3. Topologie du réseau des CJ

**Profil d'élévation** : selon la relation (3), ce profil a un impact sur la résistance ou l'aide à l'avancement de la rame considérée. Ces profils ont donc été également implémentés sous formes de tables de données ( $F_{slope}(x)$  selon la Figure 1), en fonction de la position sur le parcours, à partir des documents [6] [7] et [8]. Nous ne les donnons pas ici.

Cependant, afin de tester la consistance de ces données, nous avons reconstitué le profil de variation d'altitudes correspondant, et comparé le résultat à des points d'altitude de référence. Le résultat est présenté à titre d'exemple sur la Figure 5 pour Tavannes-La Chaux-de-Fonds (TA->CF) et Le Noir-mont-Glovelier (NT->GLO).

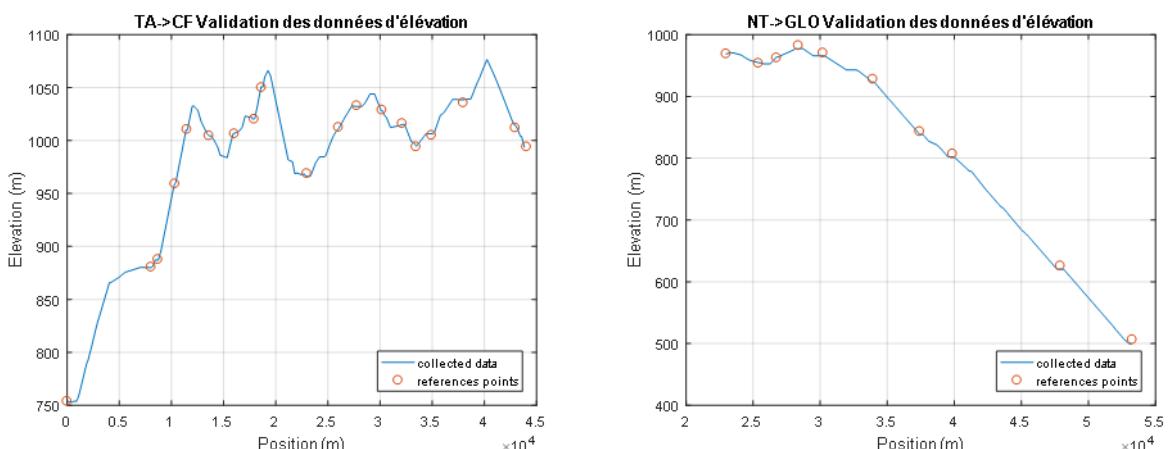


Figure 5 Validation des données d'élévation

**Rayon de virages** : selon la relation (2), ce profil a un impact sur la résistance ou l'aide à l'avancement de la rame considérée. Ces profils ont donc été également implémentés sous formes de tables de données ( $F_{curve}(x)$  selon la Figure 1), en fonction de la position sur le parcours, à partir des documents [6] [7] et [8]. Nous ne les donnons pas ici.

A l'instar du point précédent, nous avons testé la consistance de ces données en reconstituant ces changements de direction, et en les superposant avec des cartes géographique. Nous donnons à titre d'exemple le résultat de cette activité à la Figure 6 pour le tronçon Le Noirmont-Tavannes ainsi que pour le tronçon Le Noirmont-Glovelier.

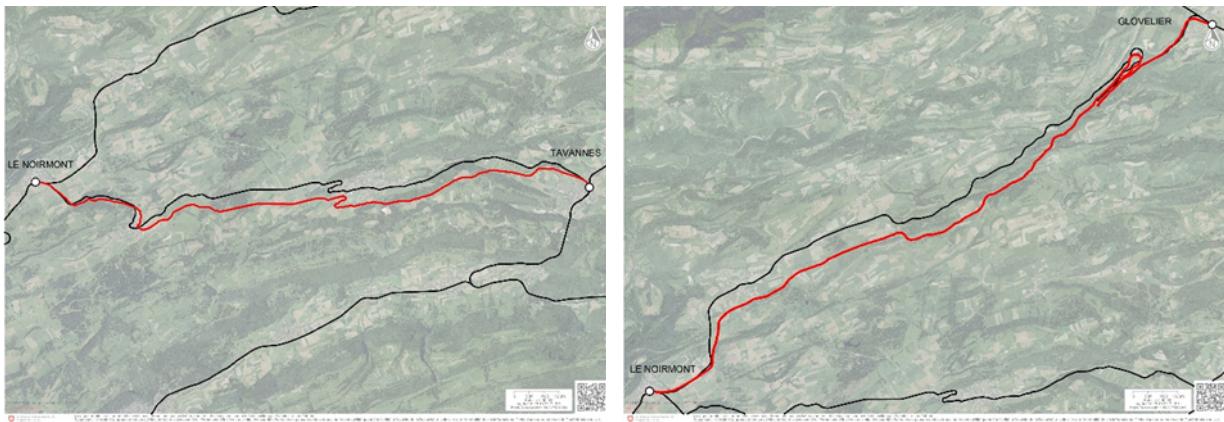


Figure 6 Validation des données de sinusoïde

Hors cette activité de contrôle de la consistance de données, la particularité est enfin que nous n'avons pas fait de distinction entre virage à droite et virage à gauche, cette dernière propriété n'ayant pas d'impact sur la résistance à l'avancement des trains.

**Limitations de vitesse** : selon la résolution du modèle dynamique de rame proposé à la Figure 1, l'identification des limitations de vitesse sur le parcours est fondamentale afin que la régulation de position fournit une référence de vitesse  $v_{ref}$  qui soit bornée. Comme pour les éléments précédents, les profils de limitation de vitesse ont été implémentés sous formes de tables de données, en fonction de la position  $x$  sur le parcours. Ceci, à partir des documents [6] [7] et [8].

Une spécificité implémentée par ailleurs dans l'exploitation de ces tables de données, est liée à l'accélération/décélération limitée des rames, liées aux limitations de la force de traction des véhicules. Selon ces limitations par exemple, on doit anticiper tout freinage afin de ne pas dépasser la vitesse autorisée dans une succession de section de type « vitesse élevée » vers « vitesse réduite ».

Un exemple est fourni pour le tronçon Tavannes-La Chaux-de-Fonds, où l'accélération maximale a été fixée à  $0.1 \cdot m/s^2$  pour mieux différencier les courbes de vitesse autorisée et de vitesse réelle. On remarque que le profil final de vitesse en orange ne dépasse jamais les limitations de vitesse en bleu tout en maximisant la vitesse du train et en respectant l'accélération et décélération de consigne.

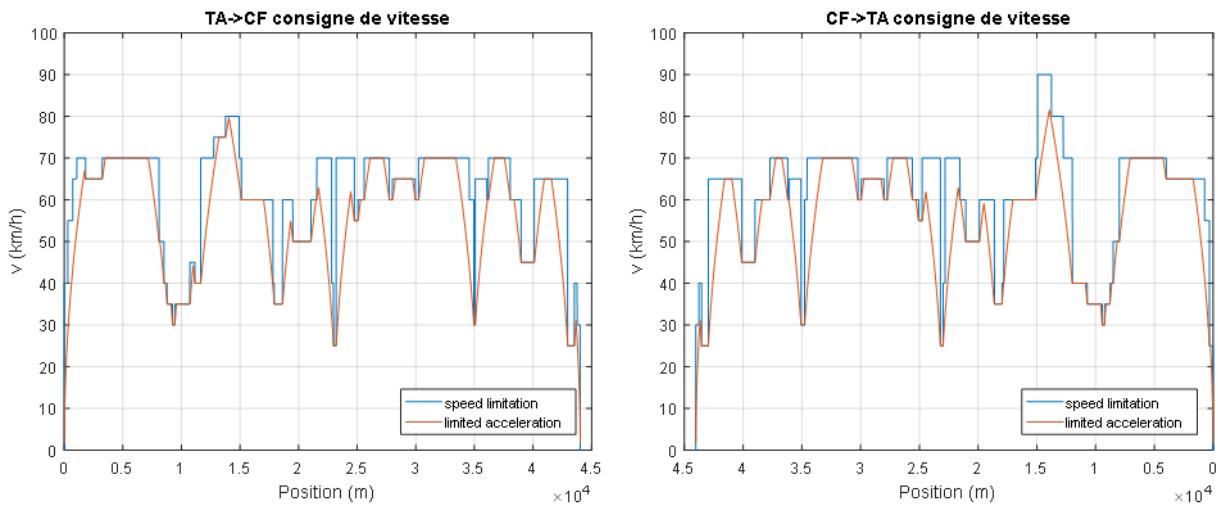


Figure 7 Profil de vitesse entre Tavannes et La Chaux-de-Fonds avec une accélération limitée à  $0.1\text{m/s}^2$

**Succession des arrêts aux positions  $x_{ref}$  et horaires:** les positions  $x_{ref}$  des différents arrêts du réseau sont également identifiées à partir des documents [6] [7] et [8]. La spécificité géographique du réseau des CJ est qu'il est bâti en étoile autour de la gare « Le Noirmont ». Par convention, nous avons choisi de diviser ce réseau en deux sections :

- Section 1 : de Tavannes vers la Chaux-de-Fonds, via Le Noirmont.
- Section 2 : de Le Noirmont vers Glovelier.

Toujours par convention, nous avons choisi pour position de référence  $x=0\text{m}$  la gare de Tavannes. La position est croissante en direction de Le Noirmont (section 1). Elle est également croissante de le Noirmont vers la Chaux-de-Fonds, référencée par rapport à la section 1. Elle est de même croissante de le Noirmont vers Glovelier, mais référencée par rapport à la section 2.

Pour conduire une rame d'un arrêt à un autre, ces positions de références doivent être nécessairement couplées à la gestion de l'horaire tel que mis en œuvre par les CJ, pour lequel le document de référence [9] a été analysé. La spécificité d'exploitation du réseau des CJ est que l'on doit prendre en compte deux types d'horaires :

- *Horaire cadencé* : la référence temporelle est relative, c'est-à-dire par exemple pour l'horaire des trains passagers reliant Tavannes au Noirmont, les trains en partance de Tavannes partent toujours à la minute 47 de chaque heure. La définition de l'horaire n'est réalisée que sur la première période du train, puis il se répète autant de fois que nécessaire par période journalière.

Selon l'horaire graphique [9], 5 trains sont opérés selon ce principe. Il s'agit des trains passagers suivants :

- o 2 trains passagers cadencés circulant sur la ligne Tavannes – Le Noirmont,
- o 3 trains passagers cadencés circulant sur la ligne Glovelier – Le Noirmont – Chaux-de-Fonds.
- *horaire non-cadencé* : destiné dans le cas de cette étude uniquement aux trains marchandises. Ce type d'horaire est fondé sur la spécification d'une référence temporelle absolue. Typiquement, la définition de l'horaire d'un train marchandise qui arrive en gare de Glovelier à 6h06 et attend un peu moins de 3 heures avant de repartir à 8h55 n'aurait pas été possible avec un horaire cadencé. Dans ce contexte, 3 trains sont opérés selon ce principe. Il s'agit de trains marchandises :
- o 1 train marchandises, circulant entre Saignelégier et Glovelier,
- o 2 trains marchandises, circulant entre Glovelier et la Chaux-de-Fonds.

Cette analyse conduit à définir la position théorique des rames sur le parcours, en fonction de temps alloué pour le service. Le détail est fourni en annexe B. Une représentation synthétique est proposée

à la Figure 8, qui propose simultanément l'identification des différents arrêts, couplée à la notion d'horaire de service.

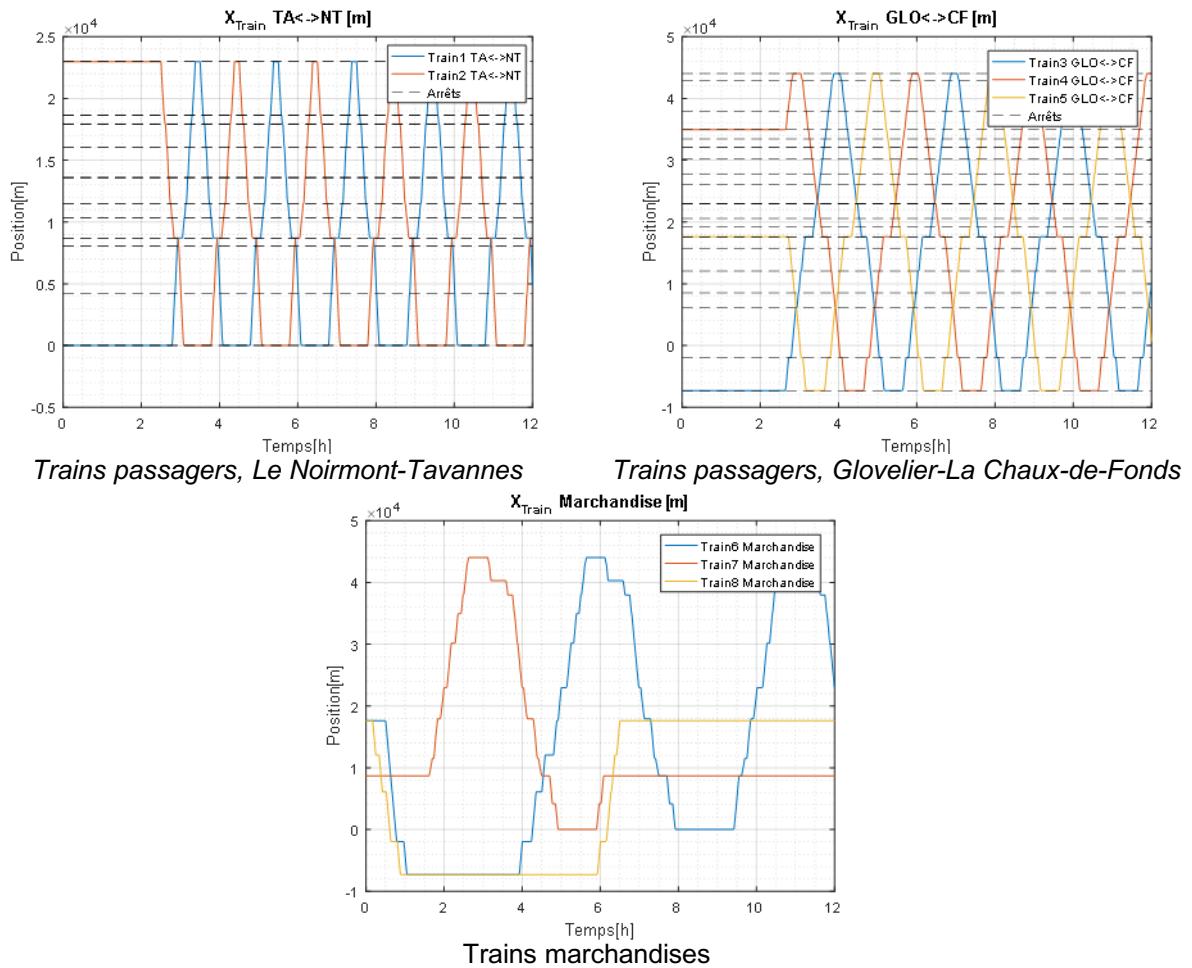


Figure 8 Horaire de service et position des arrêts

### 3.4. Modèle électrique du réseau des CJ

Le modèle décrit précédemment doit permettre, pour chacune des rames circulant sur le réseau, de déterminer les contraintes appliquées à leur réseau d'alimentation électrique. Ce dernier a donc été modélisé, en incorporant non-seulement le comportement dynamique des rames y circulant, mais également des modèles des sous-stations d'alimentation tout comme des modèles de sous-stations à accumulateurs.

**Ligne de contact:** le principe de départ était de modéliser la ligne de contact (caténaire) comme un conducteur unique, caractérisé par sa résistance linéique, avec des sous-stations alimentant des portions du réseau non liées entre elles. L'analyse du document définissant cette ligne de contact [10] a montré qu'il était difficile de juger cette hypothèse comme valide par a priori. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de diviser l'intégralité du réseau électrique en 32 sections élémentaires, délimitée chacune par leur sectionnement électrique. Chacune de ces sections élémentaires peut être:

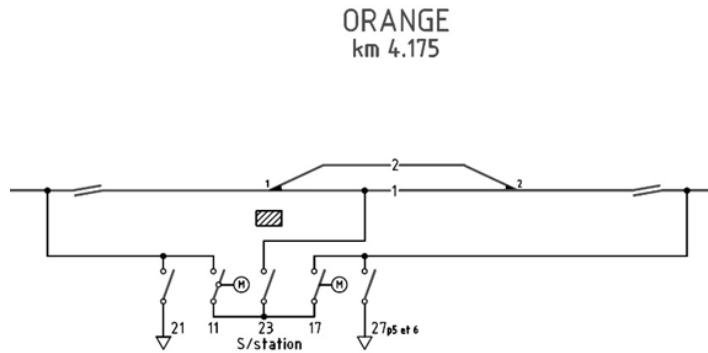
- soit une section de transit (entre deux gares),
- soit une gare:
  - o Tramelan,
  - o Les Breuleux,
  - o Les Bois,

- La Cibourg,
- Bellevue,
- Saignelegier,
- Bollement,
- soit une gare comportant une sous-station:
  - Orange,
  - Les Réussilles,
  - Le Noirmont,
  - La Ferrière,
  - Pré-Petijean.

A ces stations dites élémentaires, considérées comme telle car toutes bâties selon des topologies identiques, se rajoutent des stations particulières car bâties sur des topologies spécifiques:

- Section de transit comportant une sous-station d'alimentation, avec point de distribution vers une gare adjacente et sections:
  - Sceut.
- Gares de bout de ligne:
  - Tavannes,
  - Glovelier.
- Gare particulière de par l'origine des points d'injection et la connexion vers les sections adjacentes:
  - Combe--Tabeillon.
- Gare en bout de ligne, comportant une sous-station:
  - La chaux--de--Fonds: avec une mention particulière. En effet, la sous-station associée à cette gare n'est pas gérée par le CJ. Elle est par ailleurs distante de 5km des divers points d'injection en gare. De plus, les points d'injections ont pour source la caténaire convergeant vers le réseau des CJ.

Pour chacune de ces sections élémentaires, nous avons recherché la correspondance entre le schéma topologique issu de [10] et un circuit électrique équivalent. L'exemple d'une telle correspondance est donné par la Figure 9 et la Figure 10.



**Figure 9 section type Gare et Sous-station**

## Gare et Sous-Station

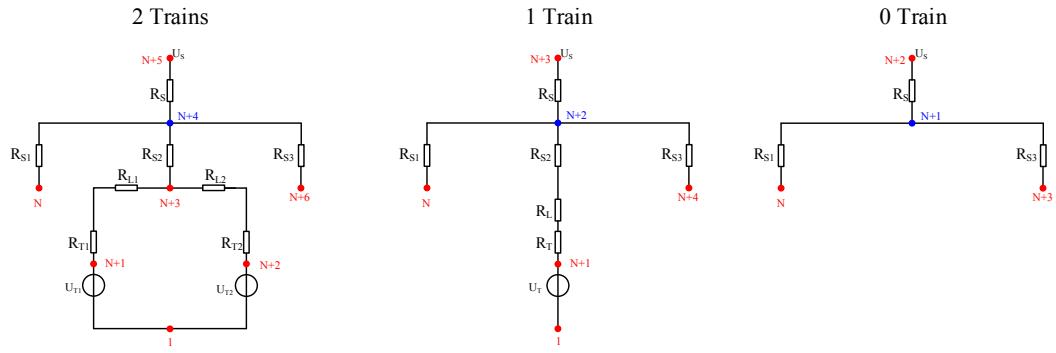


Figure 10 Netlists associées à une section de type Gare et Sous-station

Ces deux illustrations sont relatives à la gare/Sous-station "Orange". La conversion de la topologie électrique de la Figure 9 est donnée à la Figure 10, selon que deux, un ou encore aucun train n'est présent en gare. Nous avons adopté les notations suivantes:

- Le noeud noté  $U_s$  est la tension nominale à vide générée par la sous-station, associé à une résistance  $R_s$  qui représente d'une part l'impédance interne de la sous-station ainsi que la résistance liée au câblage entre la sous-station et le poste de distribution associé.
- les résistances  $R_{si}$  représentent les résistances de connexion entre le poste de distribution et les points d'injection (vers caténaire de section ou sections adjacentes).
- les résistances  $R_{li}$  sont les résistances de ligne, vues entre chaque train et le point d'injection de la section.
- les résistances  $R_{ti}$  sont les résistances de contact entre pantographe et caténaire.
- les tensions notées  $U_{ti}$  sont les tensions que chaque train impose à la caténaire. Nous définissons cela plus avant dans le paragraphe dédié au lien entre pantographe et ligne de contact.

Toute section relative à une gare comportant une sous-station sera décrite ainsi, seules changeant les valeurs des résistances, obtenues selon le document [2].

Au-delà de cet exemple, chaque type de section telle que mentionnée précédemment fait l'objet d'une conversion en netlist équivalente. On dispose de fait d'un répertoire de netlist, ainsi que d'une table de donnée qui répertorie les différentes valeurs de résistances telles qu'issues de [2]. L'ensemble de ces éléments est décrit en annexe 0.

**Lien entre ligne de contact, trains, sous-stations et accumulateurs fixes** : de manière conventionnelle, le type de simulateur présenté ici consiste à modéliser la caténaire et sa topologie d'alimentation par un réseau de résistance, à l'image de ce qui a été décrit au paragraphe précédent.

L'étape suivante consiste à représenter les sous-stations d'alimentation par des sources de tension continue non-réversible en courant, et les trains par des sources de courant. Le courant mis en jeux par ces derniers est le rapport entre la puissance échangée à la caténaire (déduite de la résolution du modèle de la Figure 1) et la tension vue par ces mêmes trains à leurs points de connexion respectifs.

Ce type de modélisation est communément adopté [5], mais présente cependant un désavantage majeur. En effet, les puissances échangées par chaque train sont en permanence fluctuantes. Le système entier n'est donc jamais en état stationnaire. Le fait que les sous-stations et les trains ne soient reliés que par des résistances conduit à des variations de tension caténaires quasi-instantanées. De fait, le seul moyen de résoudre cette difficulté est de considérer qu'à chaque pas de calcul le système entier est en régime stationnaire. Entre deux pas de calculs, un nombre conséquent d'itération est à réaliser pour que chaque pas de calcul résultant conduise à un résultat stable et valide.

De fait, même si les pas de calculs peuvent être choisis de manière un peu lâche, le nombre d'itérations qui doit être opéré entre chaque pas de calcul conduit à des temps de simulation qui peuvent s'avérer rédhibitoires.

Des études plus récentes montrent que la prise en compte d'inerties en tension et en courant conduisent naturellement à un système bien plus stable à modéliser [3]. Grâce à de telles inerties, les tensions/courants au sein du réseau ne peuvent varier aussi instantanément. Il n'est donc plus besoin, entre deux pas de calculs, de lancer un nombre d'itérations qui conduisent à une solution valide. En conséquence, même avec un pas de calcul réduit, la simplicité de résolution offerte donne un temps de simulation court.

De fait, en ensemble de librairies a été développé pour connecter les modèles de train et de sous-station au modèle de la ligne de contact. Nous donnons à la Figure 11 les modèles génériques qui ont été implémentés.

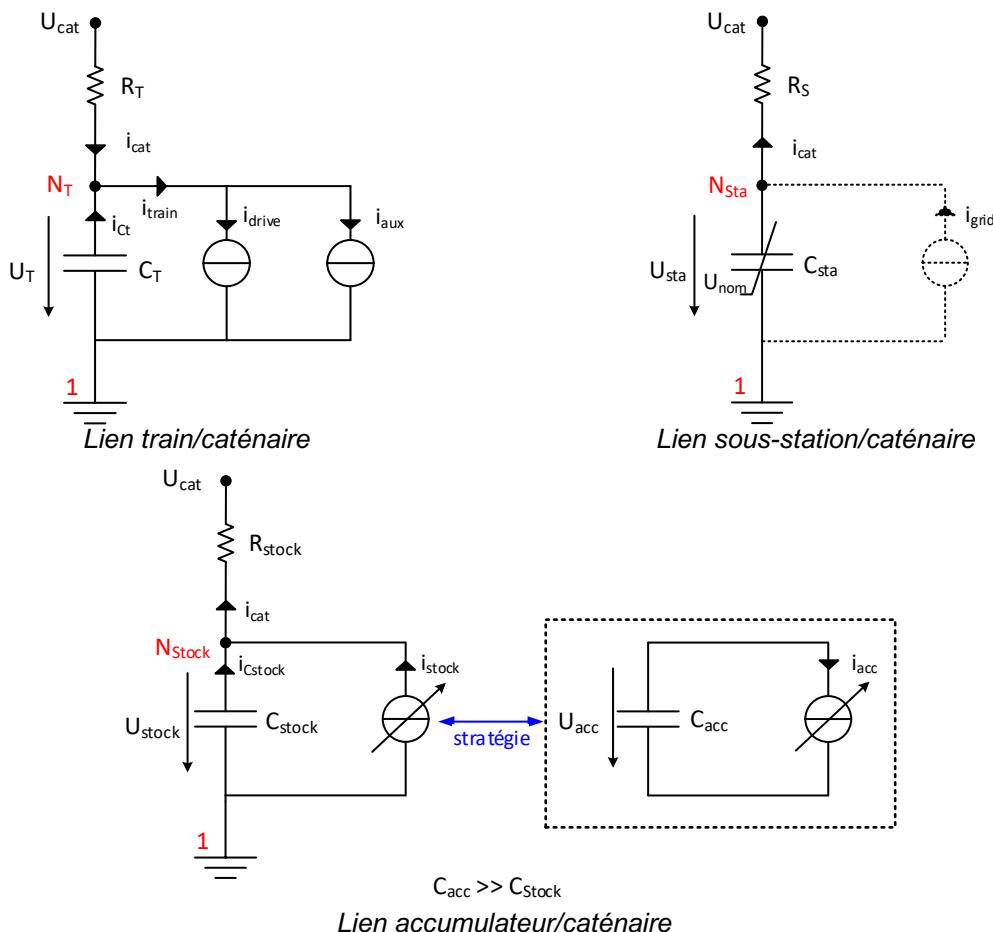


Figure 11 Intégration de trains, sous-station et accumulateurs

- Lien Train/Caténaire: un condensateur est connecté entre la masse (noeud 1) et le noeud de la section correspondante où le train se trouve (voir par exemple la Figure 10). Ce condensateur voit deux courants: celui échangé avec la caténaire, et le courant  $i_{Ti}$  relatif au courant de traction plus auxiliaires. Ce courant peut être positif ou négatif, selon que les besoins en puissance du véhicule sont positifs ou négatifs (freinage par ré-injection sur la caténaire). Ce courant est identifié par le rapport entre la puissance échangée à la caténaire par le train (obtenu par résolution du modèle en Figure 1) et la tension caténaire effectivement vue par le train.
- Lien Sous-station--Caténaire: un condensateur est connecté entre la masse (noeud 1) et le noeud de la section correspondante où la sous-station se trouve (voir par exemple la Figure 10). Ce condensateur ne voit que le courant échangé avec la caténaire, qui ne peut être que positif car les sous-stations d'alimentation sont non-réversibles en courant.

De fait, tout courant fourni à la caténaire entraînant une chute de la tension  $U_{sta}$ , cette dernière sera "saturée" à la tension nominale à vide de la sous-station. Au contraire, tout courant remontant de la caténaire entraînant une augmentation de la tension  $U_{sta}$ , cette dernière évolue-

ra de manière à ce que ce courant reste nul et ne puisse changer de signe. C'est un moyen simple de modéliser la non-réversibilité en courant de la sous-station.

- Lien accumulateur/caténaire: un condensateur est connecté entre la masse (nœud 1) et le nœud de la section correspondante où l'accumulateur est connecté. On notera que ce type de modèle est identique à celui d'un train, à ceci près que nous avons choisi de n'aborder ici que du stockage en fixe. De fait, un tel modèle sera toujours à position (section) fixe. La différence est ici que le courant échangé avec la caténaire sera défini par la puissance de charge/décharge de l'accumulateur, divisée par la tension caténaire effectivement vue par le dispositif d'accumulation. Nous reviendrons sur ce point lors de l'analyse des performances d'un accumulateur proprement dites.

Nous tenons à préciser enfin que la prise en compte de ces condensateurs n'a rien de virtuel pour assurer uniquement la stabilité d'un solveur numérique. A l'opposé de cela, ils représentent des éléments physiques sur le réseau:

- Ces condensateurs existent pour la plupart des trains, du moins de conception récente. Il s'agit la capacité du filtre d'entrée d'alimentation des équipements de traction et des auxiliaires [11].
- Toute ligne de type caténaire est nécessairement inductive ( $1\mu H/M$ ). Nous ne souhaitons pas modéliser cette nature inductive, car les forts «  $di/dt$  » lors de changement de section conduisent à des sur-tensions noyant les résultats principaux par des pics de tension répétés. C'est la raison pour laquelle la nature inductive des lignes a été prise en compte par des éléments duaux de type condensateurs (tout condensateur parallèle est dual à une inductance série [12]), représentant à tout le moins le même contenu énergétique que les inductances de ligne série auxquelles ils sont substitués.

### **3.5. Procédure implémentée pour la simulation du réseau des CJ**

La présente section entend décrire succinctement l'ensemble de opérations effectuées pour la simulation du réseau des CJ proprement dite. La résolution des modèles précédemment introduits se fait de manière séquentielle, à chaque pas de calcul.

Les grandeurs d'entrée prises en compte à chaque pas de calcul sont les tensions aux bornes de chacun des condensateurs du système.

Les grandeurs de sortie sont les courants échangés entre la caténaire et chacun des trains, puis chacune des sous-stations d'alimentation et chacun des accumulateurs (deux au maximum) intégrés au réseau.

#### **Traitement de modèle pour les rames :**

A chaque pas de calcul et pour chaque train:

- Une régulation de position est mise en œuvre pour réaliser le transit du train considéré d'une gare à l'autre. Ce régulateur fournit une référence de vitesse. Pour cela, l'horaire généré pour prendre en compte les contraintes horaires est exploité (Figure 8). Ce régulateur fournit une vitesse de référence pour le train.
- La référence en vitesse est bornée, pour que celle-ci ne sorte pas des profils de vitesse limite avec prise en compte des accélérations maximales, tels que ceux présentés à la Figure 7.
- Un régulateur de vitesse est alors implémenté, qui calcule la force de traction nécessaire pour suivre la vitesse de référence, en prenant en compte les forces de résistance à l'avancement comme grandeurs de « feed-forward ».
- Selon le type de train, cette force de traction est bornée selon les abaques telles que présentées à la Figure 3.

Le produit de la vitesse et de la force de traction nécessaire à cette vitesse donne la puissance de traction.

La puissance de traction est éventuellement bornée en fonction de la tension caténaire vue par le condensateur associé, selon les abaques Figure 4. Dans la mesure où ce cas de figure se présente, la force de traction est réévaluée pour identifier l'impact de cette limitation sur la vitesse réelle du véhicule.

- A cette puissance de traction est ajoutée la puissance requise pour les auxiliaires. Si la somme de ces deux puissances est négative (réinjection sur la caténaire), le freinage par dissipation sera potentiellement activé selon des courbes données en Figure 4. Dans ce dernier cas, cela sera pris en compte pour réévaluer la puissance échangée avec la caténaire.

Une fois que la puissance échangée à la caténaire est identifiée:

- en référence avec le modèle de liaison entre train et caténaire (défini à la Figure 11), on considère comme courant échangé à la caténaire celui calculé au pas de calcul précédent.
- le courant de traction est identifié par le rapport entre la puissance échangée à la caténaire et la tension aux bornes du condensateur d'entrée.
- le courant dans le condensateur est la différence de ces deux courants.
- l'intégration de ce courant donne la nouvelle tension aux bornes du condensateur.

Le résultat de ce traitement fournit ainsi au simulateur:

- l'ensemble des tensions de condensateur d'entrée pour chaque train.
- les positions respectives de chaque train sur le parcours.

#### ***Traitements de modèle pour les sous-stations :***

Comme déjà mentionné précédemment pour la Figure 11, le condensateur associé à chaque sous-station ne voit que le courant échangé avec la caténaire, qui ne peut être que positif car les sous-stations d'alimentation sont non-réversibles en courant. De fait, à chaque pas de calcul:

- les courants de ces condensateurs sont identifiés à partir des courants échangés à la caténaire lors du pas de calcul précédent,
- ces courants sont intégrés pour donner la nouvelle tension à vide générée par les sous-stations,
- chaque tension est limitée et ne peut descendre en dessous de la tension nominale à vide des sous-stations,
- si ces tensions doivent augmenter, c'est que la non-réversibilité en courant des sous-stations est sollicitée. On s'assure alors que cela est le cas (test de la valeur nulle du courant).

Le résultat de ce traitement fournit ainsi au simulateur:

- l'ensemble des tensions à vide pour chaque sous-station,
- par opposition au train, leurs positions respectives sont fixes et connues par avance.

#### ***Traitements de modèle pour les accumulateurs fixes :***

A chaque pas de calcul:

- on considère comme courant échangé à la caténaire celui calculé au pas de calcul précédent.
- le courant injecté par l'accumulateur est identifié par le rapport entre la puissance échangée à la caténaire et la tension aux bornes du condensateur d'entrée. La détermination de cette puissance sera explicitée lors de l'analyse réalisée en section 4.
- le courant dans le condensateur est la différence de ces deux courants.
- l'intégration de ce courant donne la nouvelle tension aux bornes du condensateur.

Le résultat de ce traitement fournit ainsi au simulateur:

- l'ensemble des tensions à vide pour chaque accumulateur fixe,
- par opposition au train, leurs positions respectives sont fixes et connues par avance.

### **Netlist du réseau et résolution :**

A chaque pas de calcul, la Netlist globale associée à l'intégralité du réseau est construite. Nous rappelons que ce réseau est constitué de 32 sections élémentaires. Par convention, la section Tavannes est le kilomètre 0, pour des positions croissantes jusqu'à la section Le Noirmoint. De cette section, deux branches se séparent, l'une vers la Chaux-de-Fonds, la seconde vers Glovelier. Dans tous les cas, les positions vers ces deux gares sont croissantes:

Section par section, on combine les netlist des sections élémentaires suivant la nature de succession des sections.

- à chaque ajout de section, on détermine le nombre de train qui y est présent, ainsi que les tensions de condensateurs d'entrée correspondantes.
- à chaque ajout de section comportant une sous-station, on détermine la tension de condensateur équivalent qui y correspond.
- le set de matrices finalement obtenues est combiné de manière à obtenir:
  - o la matrice d'admittances du réseau.
  - o le vecteur de potentiels imposés par chaque condensateur.
- La combinaison de ces matrices donne les potentiels sur chacun des nœuds du réseau.
- Le traitement de ces potentiels combiné aux résistances séries de chaque source (impédance interne des sous-stations et résistance de contact pantographe-caténaire) donne finalement les courants échangés entre la caténaire et les éléments qui y sont connectés (sous-stations et trains).

Le résultat de ce traitement fournit en résultat final:

- les potentiels caténaire "vus" par chaque train.
- les potentiels caténaire "vus" en sortie des sous-stations d'alimentation.
- les courants échangés avec la caténaire par chaque train.
- les courants fournis par chaque station d'alimentation.
- par combinaison:
  - o les puissances fournies par chaque sous-station.
  - o les puissances échangées par chaque train avec la caténaire.

## **4. Résultats**

### **4.1. PRÉAMBULE ET CONVENTIONS**

Avant de mettre en œuvre l'outil de simulation du réseau des CJ tel que décrit dans la section précédente pour identifier l'apport des technologies dédiées au stockage, ce simulateur a fait l'objet d'un ensemble de tests :

- Afin de qualifier les bilans de puissance et énergie sur ce réseau. Le résultat de cette activité est le point de référence sur lequel se bâti l'analyse liée à l'ajout d'un accumulateur sur le réseau.
- Afin de déterminer les indicateurs de comparaison.
- Afin de s'assurer de la consistance des résultats obtenus.

Les résultats qui seront présentés dans cette section ont été obtenus dans le cadre de la simulation de 12h30 de fonctionnement du réseau des CJ (de 5h00 à 17h30), soit une partie seulement d'une journée de semaine type. Nous avons choisi cet horizon réduit afin de présenter des résultats bruts qui soient lisibles. Le nombre de trains pris en compte est le suivant:

- 3 trains passagers sur le parcours Glovelier-La Chaux-de-Fonds, trains notés 1, 2 et 3, selon horaires cadencés.
- 2 trains passager sur le parcours Tavannes-Le Noirmont, trains notés 4 et 5, selon horaires cadencés.
- 3 trains marchandises, réalisant chacun un ou deux aller-retour par jour ouvrable sur le parcours Glovelier-La Chaux-de-Fonds tels que spécifié selon [9]. Ces trains sont notés 6, 7 et 8.

Les données de position et d'horaire sont telles que présentées à la Figure 8.

Afin de juger des contraintes que chaque type de convoi applique au réseau des CJ, trois jeux de résultats sont proposés, respectivement liés à trois configurations différentes :

- Configuration 1: 5 trains passagers uniquement.
- Configuration 2: 3 trains marchandises uniquement.
- Configuration 3 : intégralité de la flotte (8 trains au total).

De plus, afin de pouvoir comparer les contraintes appliquées au 7 sous-stations d'alimentation du réseau sur un même graphique, ces sous-stations ont été numérotées comme suit :

- 1: Orange.
- 2: Les réussilles.
- 3: Le Noirmont
- 4: La Ferrière.
- 5: Chaux-De-Fonds.
- 6: Pré-Petitjean.
- 7: Sceut.

Nous soulignons par ailleurs que l'ensemble des résultats qui vont être présentés sont issus de simulations dont la durée est de 18 minutes pour 12h30 de fonctionnement du réseau des CJ. Ceci représente un rapport de 41 entre le temps réel et le temps de calcul. Ce résultat est obtenu pour un pas de calcul maximal de 0.1s. Lors de certains transitoires, ce pas de calcul est néanmoins réduit de dans un facteur 100. Chacun des relevés présentés comporte ainsi une résolution minimale de 450'000 point calculés.

## 4.2. ETUDE COMPORTEMENTALE DU RÉSEAU DES CJ SANS ACCUMULATION D'ÉNERGIE

### **Analyse des interactions entre trains et caténaire**

Les résultats fournis par le simulateur développé pour cette étude sont de manière brute les courants échangés à la caténaire par les différents trains en opérations sur le réseau. Combiné avec cette information, on dispose également de la tension caténaire vue par chacun de ces trains.

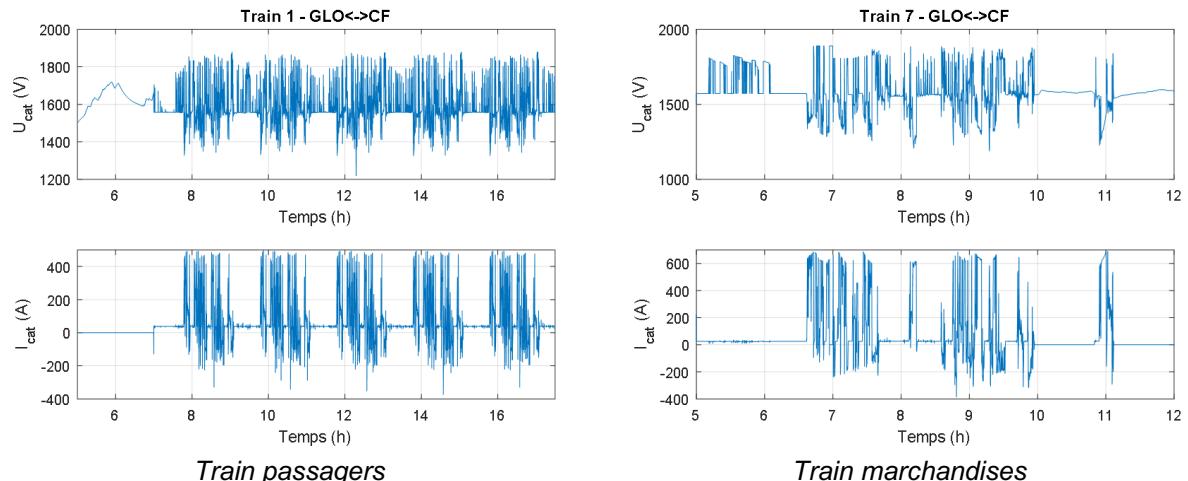
Une illustration de ces résultats est proposée à la Figure 12, pour deux trains « type »

- Train 1 : train passagers selon horaire cadencé sur la ligne Tavannes-Le Noirmont.

On notera le fort bruit sur le courant caténaire ainsi que la tension de cette dernière. Tant pour le courant que la tension, l'horizon de simulation est large, faisant apparaître les fluctuations de courant et de tension comme du bruit alors même qu'elles sont liées aux accélération/décélération du véhicule, de l'ordre de la minute.

De plus, si les variations de courant sont effectivement liées à la mise en œuvre du véhicule, les variations de tension sont de plus conjointement liées aux variations de tension dues aux autres véhicules sur la ligne.

L'analyse de ces résultats permet de s'assurer de l'implémentation correcte des stratégies de gestion des accélération/décélération des véhicules, dans la mesure où les fluctuations de tension (et de courant) restent prescrites dans les données fournies.



**Figure 12 Tension caténaire et courant échangé entre train et caténaire**

- Train 7 : train marchandises selon horaire non-cadencé sur la ligne Glovelier-La Chaux-de-Fonds.

Les mêmes commentaires que précédemment peuvent être réalisés, avec ici une particularité. En effet, en début de service, ce train voit la tension caténaire fluctuer, alors qu'un courant négligeable est échangé à la caténaire. Ce cas de figure est de manière générale liée à deux éléments distincts :

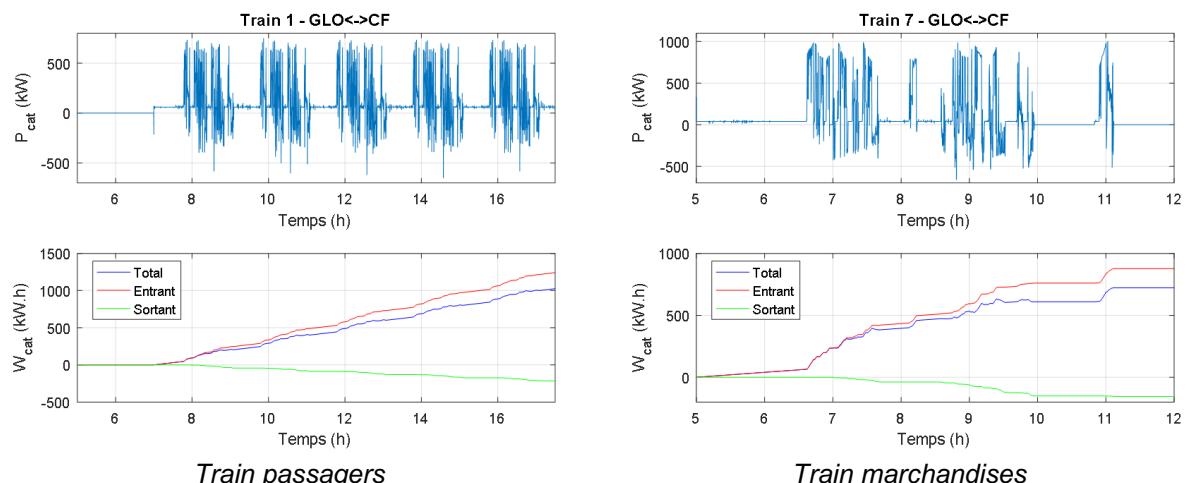
- o Soit le train est à l'arrêt, et voit fluctuer la tension caténaire à cause de trains en opération à proximité. Dans ce cas, on peut en conclure que les contraintes imposées par ces derniers sont principalement dues au fait qu'ils ne font que freiner.
- o Soit le train est en opération, et on peut en conclure que les contraintes qu'il impose au réseau sont également liées à son freinage (trajet en pente descendante).

L'analyse de l'horaire donné à la Figure 8 montre que c'est la première analyse qu'on doit retenir ici : de 5h00 à 6h30, le train 7 est à l'arrêt alors que les trains 6 et 8 sont en opération, sur des trajets descendants.

Ces analyses sont complétées par la combinaison des données brutes courant/tension, afin de calculer :

- La puissance instantanée que chaque train échange à la caténaire.
- L'énergie que chaque train échange à la caténaire, par intégration par rapport au temps de la puissance.

Une illustration des résultats obtenus est fournie à la Figure 13, toujours pour les trains 1 et 7.



**Figure 13 Puissance et énergie échangées entre train et caténaire**

- Train 1 : le fort bruit sur le courant caténaire ainsi que la tension de cette dernière induit nécessairement de fortes fluctuations de la puissance échangée avec la caténaire. Cependant, le profil de puissance échangée n'est relatif qu'au train lui-même, et est une image de ses accélérations et décélérations propres.

On notera les changements de signe de la puissance : positive lorsque le train prélève à la caténaire, puis négative lorsque le train réinjecte quand il freine, lorsqu'il le peut.

Ceci est corrélé avec l'analyse de l'énergie échangée à la caténaire, qui peut être divisée en deux postes principaux :

- o Profil « Entrant » : énergie effectivement prélevée à la caténaire.
- o Profil « Sortant » : énergie réinjectée à la caténaire lors de freinage.

La somme de ces deux profils donne l'énergie « Totale » échangée à la caténaire. Vu le bilan final de ces profils, on peut en conclure qu'indépendamment du rendement du système de traction lui-même, ce train est confronté à une ligne peu réceptive lorsqu'il souhaite freiner

- Train 2 : les mêmes commentaires sont à réaliser. On notera cependant que la durée de mise en œuvre de ce train est réduite par rapport au train 1, avec cependant un niveau similaire d'énergie échangée avec la caténaire. Cette similitude s'explique par les masses plus conséquentes que ce train marchandises doit assumer.

Les bilans énergétiques introduits ici permettent de caractériser de manière synthétique la manière dont la flotte de train interagit avec la caténaire, pour un horizon de simulation donné. Un exemple est donné à la Figure 14, où sont spécifiés en bleu les niveaux d'énergie prélevés à la caténaire, et en rouge les niveaux d'énergie réinjectée. Pour chaque configuration envisagée, la numérotation des trains correspondants est croissante de la gauche vers la droite.

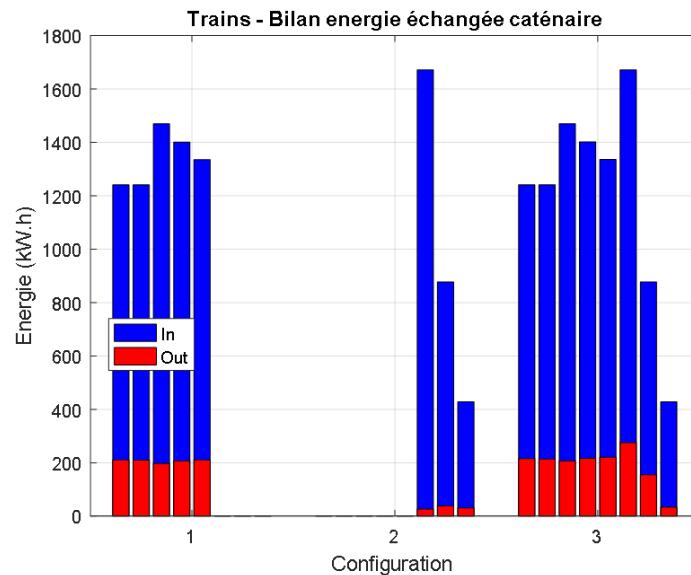


Figure 14 Bilan d'énergie échangée entre trains et caténaire

- Configuration 1 : dans le cas où seuls les trains passagers sont présents, les énergies restituées à la caténaire lors de freinage sont toutes de même niveau, dans un rapport moyen de 6 par rapport à l'énergie prélevée à la caténaire. Ceci montre à l'évidence que dans la mesure où le freinage d'un train n'est pas synchronisé avec l'accélération d'un autre convoi, la ligne n'est que peu disponible pour la réinjection d'énergie. On doit de plus préciser que l'énergie « achetée » à la caténaire comprend non seulement la couverture des besoins de traction, mais également l'alimentation des auxiliaires. Ce dernier poste contribue à accroître les besoins en énergie.
- Configuration 2 : dans le cas où seuls les trains marchandise sont présents, on ne peut que constater la faible proportion d'énergie restituée au freinage par rapport aux énergies prélevées à la caténaire. Ceci est dû au faible nombre de convois sur la ligne, dont la mise en œuvre n'est de plus pas synchronisée. Pour ce qui est de l'énergie « achetée » à la caténaire,

les niveaux varient fortement, selon la nature de la mise en opération (le train 6 est celui qui réalise le plus grand nombre de kilomètres journaliers), ainsi que les dénivélés rencontrés.

- Configuration 3 : lorsque tous les trains sont présents, il n'y a pas a priori de modification significative dans les besoins en énergie des trains par rapport aux deux cas précédents. En revanche, les niveaux d'énergie réinjectée sont revus à la hausse. Ceci est particulièrement vrai pour les trains marchandises, pour lesquels la présence de trains passagers sur la ligne rend cette dernière plus réceptive. Le train 8 est un cas particulier, dans la mesure où il est mis en opération en début de journée, sur un parcours en descente, avec peu de trains passagers présents sur le réseau.

Ces premières analyses permettent ainsi de s'assurer de la cohérence des résultats fournis par le simulateur.

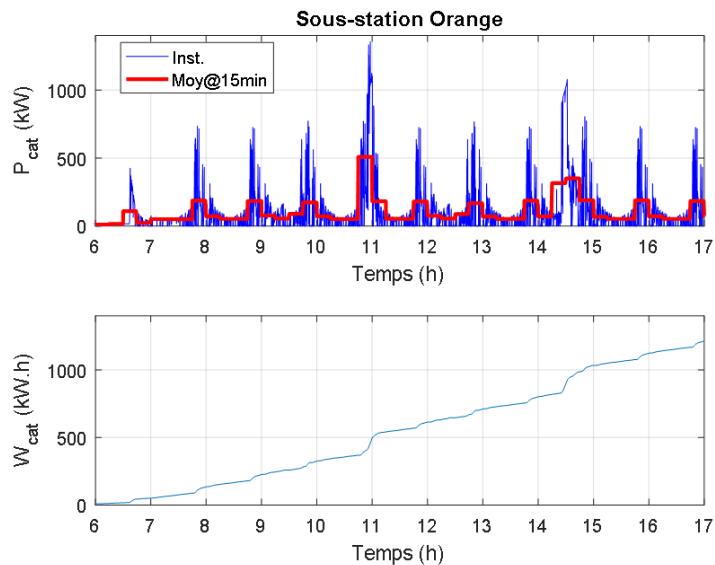
#### **Analyse des interactions entre sous-stations et caténaire**

Le même type d'analyse peut être réalisé pour ce qui concerne les sous-stations d'alimentation du réseau des CJ. Nous ne donnons cependant pas les relevés de courant injectés à la caténaire, ces données brutes ne fournissant que peu d'information exploitable.

En revanche, tout comme pour les trains, les tensions caténaires et les courants injectés sont combinés afin d'identifier :

- Les puissances injectées par les sous-stations à la caténaire.
- L'énergie que chaque sous-station fournit à la caténaire, par intégration par rapport au temps de la puissance.

Un exemple de résultat obtenu est donné pour la Sous-station Orange en Figure 15



**Figure 15 Bilan de puissance et d'énergie entre sous-station et caténaire**

Pour le profil de puissance, la courbe de référence est la puissance en bleu. Cette puissance est nécessairement fortement fluctuante selon le trafic, à l'image de l'horaire cadencé pour les trains passagers et de sollicitations épisodiques de la part de l'un des trois trains marchandises. Dans tous les cas, la sous-station étant non-réversible, cette puissance n'est jamais négative.

Ceci est confirmé par l'analyse du profil d'énergie, toujours croissant dans le temps, dont la valeur finale indique l'énergie que la sous-station aura dû injecter à la caténaire sur l'horizon de simulation considéré. De fait, sur un horizon de simulation donné, on a la possibilité d'identifier les contributions respectives de chaque sous-station à l'alimentation en énergie du réseau.

Un exemple d'illustration est donné à la Figure 16 pour les sept sous-stations du réseau, selon les trois configurations étudiées dans cette section.

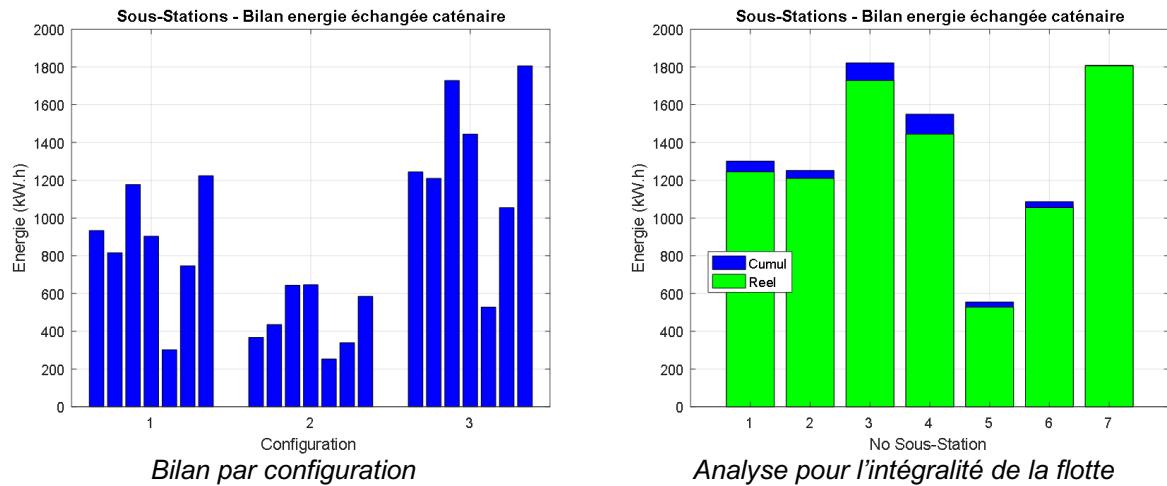


Figure 16 Bilan des énergies échangées entre sous-stations et caténaire

Selon la courbe de gauche, le bilan global des énergies fournies à la caténaire montre que les besoins en énergie pour alimenter les trains passagers (configuration 1) et marchandises (configuration 2) sont relativement voisins. Quand bien même les trains marchandises réalisent un nombre de kilomètres moins important que les trains passagers, les masses à déplacer ont une influence notable sur les besoins en énergie.

La courbe de droite rappelle un commentaire déjà réalisé. Les bilans en bleu sont la somme des besoins en énergie liés à la présence unique des trains passagers et des mêmes besoins en énergie liés à la présence unique des trains marchandises. Les bilans en vert sont en revanche relatifs aux besoins en énergie réels, lorsque tous les trains sont présents sur le réseau. Ces besoins en énergie sont réduits, ce qui confirme une deuxième fois que le nombre de trains présents permet de maximiser les possibilités de récupération d'énergie au freinage, ce qui conduit à réduire les besoins en énergie auxquels les sous-stations doivent répondre.

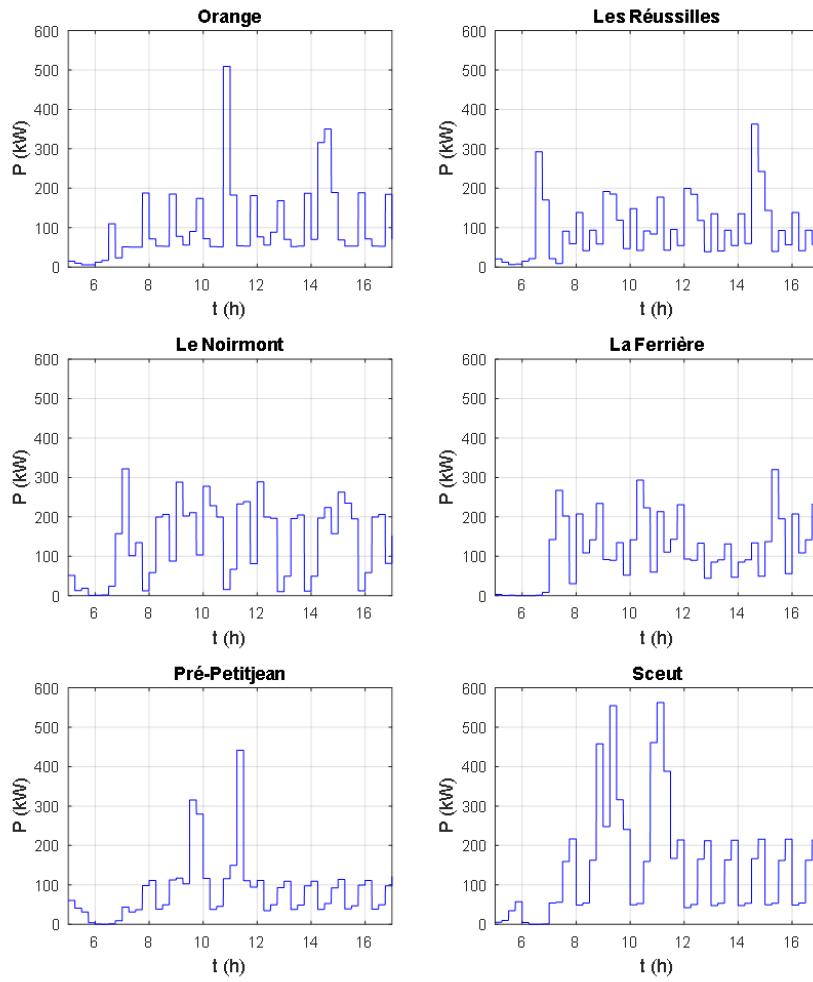
Dans tous les cas, de tels relevés montrent que d'un point de vue énergétique, les sous-stations Le Noirmont et Sceut sont celles qui sont le plus sollicité.

Si l'on considère à nouveau le profil de puissance, l'exploitation de ce résultat conduit à considérer la manière dont on doit interpréter l'évolution temporelle de cette puissance. En effet, la valeur de la puissance maximale mise en œuvre par chaque sous-station est un élément clef, qui doit être minimisé ne serait-ce que pour des questions liées à la facturation du fournisseur d'énergie.

La politique de ce dernier est de facturer le kilo-watt de pointe mensuel. Cette puissance de pointe est établie en analysant la valeur moyenne de la puissance par fenêtres fixes de 15 minutes. Sur un mois, c'est la valeur de puissance moyenne à 15 minutes la plus élevée qui sera retenue.

De fait, à chaque calcul des puissances instantanées injectées par les sous-stations à la caténaire est associée une identification de la valeur moyenne de cette même puissance par fenêtres fixes de 15 minutes. Cela correspond au profil en rouge sur la Figure 15 pour la sous-station Orange.

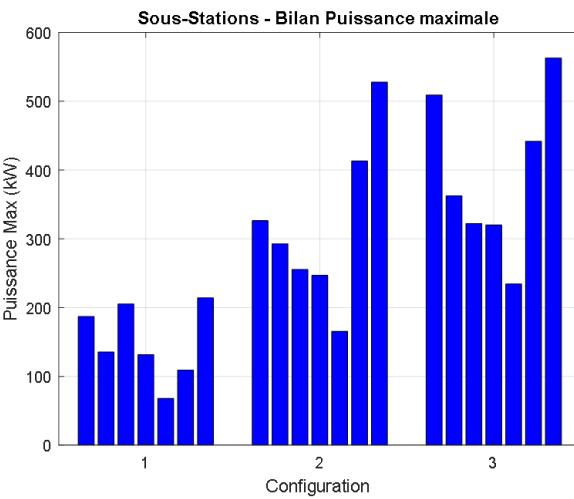
L'intégralité de telles profils est donnée pour six des sept sous-stations du réseau des CJ à la Figure 17 (la sous-station à La Chaux de Fonds étant un cas particulier hors du cadre de notre étude).



**Figure 17 Profils de puissance moyenne entre sous-station et caténaire, tranches de 15 minutes**

Une première analyse rapide montre que de toutes les sous-stations, Sceut est celle qui est d'emblée la plus sollicitée. A cause de trains marchandises, elle doit fournir à deux reprises une puissance crête de l'ordre de 550kW.

Ce commentaire est validé par l'analyse des puissances crêtes sous-station par sous-station donnée à la Figure 18, selon les trois configurations envisagées dans cette section. Par configuration, les sous-stations sont numérotées de gauche à droite, selon les conventions adoptées également dans cette section.



**Figure 18 Bilan de puissances crêtes entre sous-station et caténaire**

On confirme ici que les contraintes en puissance crête sont liées à la circulation de trains marchandises : les puissances crêtes relevées pour une journée d'exploitation du réseau des CJ lorsque l'ensemble des trains circulent (configuration 3) sont extrêmement proches de celles observées lorsque seuls des trains marchandises sont en œuvre (configuration 2). A l'opposé la circulation de trains passagers uniquement (configuration 1) n'impacte que peu sur les valeurs crêtes de puissance fournies par chaque sous-station.

#### 4.3. ANALYSE DE LA VALIDITÉ DE L'OUTILS D'ÉTUDE DÉVELOPPÉ

Les analyses précédemment réalisées montrent que l'outil de simulation développé répond aux exigences du présent projet. Les résultats fournis permettent, selon les cas de figure étudiés, de déterminer les variations de niveaux d'énergie que les trains réinjectent à la caténaire lors de freinage.

De même, l'analyse des puissances crêtes que chaque sous-station injecte à la caténaire permet d'identifier, selon les cas de figure étudiés, quelles sous-stations sont les plus sollicitées, et par quel type de train.

Les conclusions à laquelle nous parvenons à l'issue des premiers résultats obtenus sont de fait les suivantes :

- D'un point de vue énergétique, la sous-station Sceut est de celles qui la plus sollicitée.
- D'un point de vue des puissances crête, la sous-station Sceut est celle qui est la plus sollicitée.

L'ensemble de ces résultats obtenus par simulation, confirme les constatations réalisées par les CJ. Cependant, si notre étude montre que le simulateur développé conduit à des résultats logiques, nous avons souhaité identifier la précision des résultats obtenus.

Ne disposant pas de l'ensemble des relevés temporel relatifs aux mesures sur site des puissances échangées par les trains à la caténaire et aux puissances injectées par les sous-stations (lesquelles données devraient être de plus synchronisées), nous avons choisi une approche macroscopique, en se focalisant sur la sous-station Sceut. C'est la sous-station qui de toute évidence doit recevoir l'appui d'une installation d'accumulation d'énergie.

Les CJ ont mis à disposition une facture adressée par leur fournisseur d'énergie, relative à la sous-station Sceut pour la période du 01.01.2018 au 31.01.2018. Cette facture est basée sur la mesure de trois éléments principaux :

- La puissance crête mensuelle.
- L'énergie consommée au mois, divisées en deux postes (haut et bas tarif, selon l'heure à laquelle cette énergie est achetée).
- L'énergie réactive échangée avec le réseau AC d'alimentation.

L'estimation de ce dernier poste ne faisant pas partie de ce projet, nous ne l'avons pas considéré. Ne retenant que la puissance crête et l'énergie consommée, nous avons analysé cette facture, en prenant en compte :

- Le coût de l'énergie achetée.
- L'utilisation du réseau (qui prend en compte la puissance crête mensuelle).
- Diverses taxes et redevances, liées à la quantité d'énergie achetée.

Le résultat est proposé sur le Tableau 1, pour la colonne « Reference BKW », et conduit à une facturation de CHF 11'433.87 (hors donc l'énergie réactive). On notera que pour cette somme, la puissance crête mesurée ce mois-là (630.4kW) définit 20.12% de la facture totale, et 37% du poste « Utilisation du réseau ».

Dans la mesure où une telle facture est basée sur des mesures effectives, nous avons choisi ceci comme une référence. Nous avons ainsi identifié pour le mois de janvier 2018 le nombre de jours ouvrables et de jours de week-end. Nous avons lancé un set de deux simulations de service complet pour ces deux types de journées. Pour ces deux jeux de simulation, nous avons identifié par post-processing :

- L'énergie mise en jeu par la sous-station Sceut, divisée en postes « tarif haut » et « tarif bas ».
- La puissance crête fournie par la sous-station Sceut.

Les résultats obtenus ont été multipliés par autant des jours ouvrables et de jours week-end que comprends le mois considéré, ce qui a permis d'établir une « facture virtuelle », que nous avons comparée à la facture réellement envoyée par les BKW. Le résultat figure sur la colonne « facture virtuelle » du Tableau 1.

	Reference BKW			Facture Virtuelle		
Tarif						
Puissance Pmax/mois (kW)			630.4			562.8
<b>Puissance Pmax/mois total (kW)</b>			<b>630.4</b>			<b>562.8</b>
Energie/travail haut tarif (kWh)			60640			64697
Energie/travail bas tarif (kWh)			6033			4338
<b>Energie/travail total (kWh)</b>			<b>66673</b>			<b>69035</b>
Energie	Prélèvement	Prix (CHF)	Montant (CHF)	Prélèvement	Prix (CHF)	Montant (CHF)
Energie haut tarif (kWh)	60640	5.65	3426.16	64697	5.65	3655.3805
Energie bas tarif (kWh)	6033	4.54	273.8982	4338	4.54	196.9452
<b>Sous-total</b>			<b>3700.06</b>			<b>3852.33</b>
Utilisation du réseau						
Puissance facturée (kW)	630.4	3.65	2300.96	562.8	3.65	2054.22
Travail haut tarif (kWh)	60640	5.79	3511.06	64697	5.79	3745.96
Travail bas tarif (kWh)	6033	2.9	174.96	4338	2.9	125.8
Service Système swissgrid (kWh)	66673	0.32	213.35	69035	0.32	220.91
<b>Sous-total (CHF)</b>			<b>6200.33</b>			<b>6146.89</b>
Redevances						
Taxe encouragement légale	66673	2.3	1533.48	69035	2.3	1587.81
<b>Sous-total (CHF)</b>			<b>1533.48</b>			<b>1587.81</b>
			<b>Total (CHF)</b>	<b>11433.87</b>		<b>Total (CHF)</b>
						<b>11587.03</b>

**Tableau 1 Facture réelle et facture virtuelle**

Pour la facture virtuelle obtenue, on sous-estime de 10.7% la puissance crête, mais on surestime de 3.5% l'énergie. La puissance crête simulée (562.8kW) définit 17.7% de la facture totale, et 33% du poste « Utilisation du réseau ».

Du point de vue financier, les ordres de grandeurs entre la facture virtuelle et la facture réelle sont conservés. *Au final, la facture virtuelle s'écarte de +1.3% de la facture réelle, ce qui permet de juger de la validité des résultats fournis par le simulateur développé pour cette étude.*

Nous précisons enfin que l'établissement de cette facture a pour base un jeu de deux simulations, de durées 25 minutes chacune. Nous sommes donc en mesure de spécifier le fonctionnement d'un mois (31 jours) du réseau des CJ au prix de 50 minutes de temps de calcul.

## 5. Discussion

### 5.1. INTÉGRATION D'UN ACCUMULATEUR – SOUS-STATION SCEUT

#### **Dimensionnement et position de l'accumulateur**

Dans le cadre du dépôt de demande de financement de ce présent projet, il est spécifié que l'accumulateur à insérer sur le réseau des CJ a déjà fait l'objet d'un dimensionnement en vue d'une implémentation future.

Pré-dimensionnée par la société Vivatec GmbH, l'accumulateur à insérer doit pouvoir fournir une puissance de 300kW pendant 15 minutes, soit une énergie utile de 75kWh. Nous avons de plus fixé les éléments suivants :

- Puissance maximale injectée/absorbée à la caténaire : 300kW.

- Courant maximal injecté absorbé à la caténaire pour garantie sur le rendement « roundtrip » : 200A.
- Rendement moyen pour charge/décharge, comprenant les pertes dans l'accumulateur et le convertisseur statique associé : 95%.

Pour son intégration dans notre simulateur, cet accumulateur a été implémenté selon le schéma déjà introduit à la Figure 11. Ce modèle d'accumulateur est basé sur la charge/décharge d'un condensateur équivalent, comportant une résistance série pour modéliser les pertes du système.

La stratégie de charge/décharge que nous développerons plus loin définit le courant de charge/décharge de cet accumulateur. Par un bilan de puissance, on en déduit le courant échangé avec la caténaire.

Pour l'insertion de cet accumulateur sur le réseau des CJ, nous rappelons que de toutes les sous-stations, la sous-station Sceut est celle la plus sollicitée du point de vue des puissances crêtes, qui doivent pouvoir être réduites. Nous l'illustrons à nouveau à la Figure 19

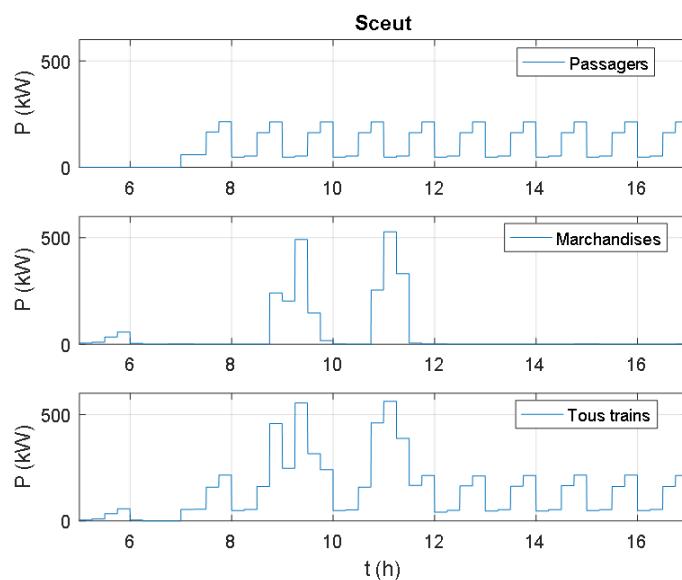


Figure 19 Bilan de puissance et d'énergie entre sous-station et caténaire

Trois relevés sont proposés, relatifs aux puissances moyennes à fenêtres fixes de 15 minutes fournies par la sous-station Sceut. Le premier relevé est relatif à la seule flotte de trains passagers. Le second aux trains marchandise. Ces relevés montrent que les contraintes en puissance crête sont définies par les trains marchandise, cette sous-station voyant de plus passer tous ces convois dans une région dont la géographie inclut des pentes significatives.

Nous avons de fait focalisé notre étude sur l'ajout du dispositif d'accumulation sur la sous-station Sceut.

### Stratégies de gestion de l'état de charge

La difficulté principale consiste à définir la manière dont on gère l'état de charge de la batterie, afin de :

- Maximiser la capitalisation de l'énergie réinjectée par les trains au freinage.
- Minimiser la puissance crête fournie par la sous-station.

Nombre d'études portent sur cette thématique, et il n'est pas possible en l'état de les tester toutes [14]. Deux possibilités ont cependant été envisagées :

- Stratégies par a priori, basées par des règles d'observation de l'évolution du système, demandant un nombre réduit de grandeurs à mesurer et facilement implantables.

- Stratégies basées sur des processus d'optimisation, demandant un nombre élevé de mesures et des processus de calcul et d'implémentation complexes.

Le 2<sup>nd</sup> type de stratégie aurait pu être mis en œuvre, étant entendu que l'outil de simulation développé permet en tout temps et en tout point du réseau l'accès à l'ensemble des grandeurs courant et tension. Par souci de réalisme, et dans l'hypothèse d'une implémentation future, nous avons choisi de définir une stratégie basée sur des règles. Ceci est d'autant plus aisé de mise en œuvre que le système étudié est déterministe de par la constance des trajets effectués par les trains et la répétabilité journalière de l'horaire.

Nous avons donc fixé les critères suivants :

- En début de journée, la batterie est déchargée. Elle doit également être déchargée en fin de journée, de manière à offrir un bilan énergétique global nul. Cela permet également de n'avoir qu'un cycle complet charge/décharge par jour.
- La charge de batterie ne peut être faite que lorsque les trains réinjectent de l'énergie lors de leur freinage. Ceci pour augmenter les possibilités de récupération de l'énergie lors des freinages des trains, ce qui est l'objectif premier de cette l'étude.

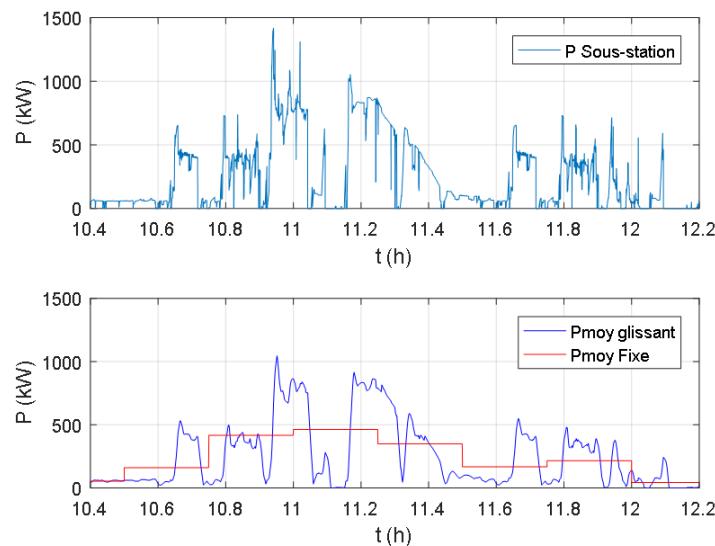
Ce critère est satisfait par la mesure de la tension caténaire au point de connexion du système d'accumulation. La puissance de recharge (prélevée à la caténaire) sera d'autant plus grande que la tension mesurée sera élevée que la tension caténaire nominale.

- La décharge de la batterie est mise en œuvre suivant le principe de filtrage de la puissance fournie par la sous-station Sceut, selon une valeur moyenne glissante calculée sur 1 minute. Ceci pour limiter les puissances crêtes que la sous-station doit fournir au réseau, ce qui représente le second objectif de l'étude.

Selon l'état de charge de l'accumulateur, et selon l'état du trafic selon l'horaire, cette puissance de décharge est ajustée.

Ce dernier point est fondamental, dans la mesure où les contraintes en puissance imposées à la sous-station Sceut sont principalement dues aux trains marchandise. Dans la limite des 300kW de puissance maximale de décharge autorisée, la puissance de décharge demandée à la batterie sera d'autant plus élevée dans la plage horaire où les trains marchandises sont à proximité de la sous-station Sceut.

Ces considérations sont illustrées à la Figure 20, où nous donnons la puissance instantanée fournie par la sous-station Sceut, sa valeur moyenne à fenêtre fixe de 15 minutes, et la valeur moyenne glissante établie sur 1 minute.



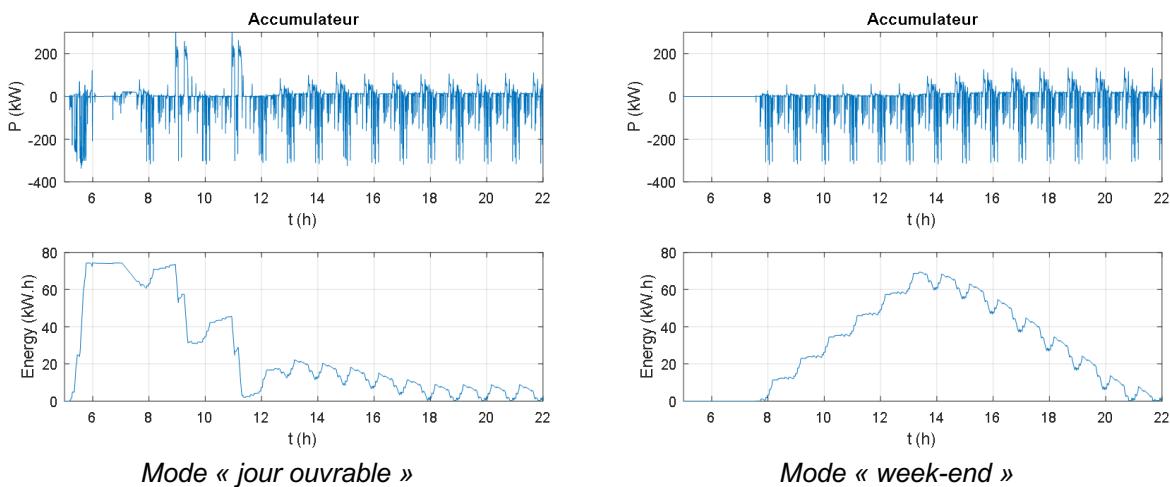
**Figure 20 Stratégie de filtrage la puissance injectée par la sous-station Sceut**

Le calcul de valeur moyenne glissante à 1 minute permet effectivement d'obtenir une image « filtrée » de la puissance instantanée. Même si ce filtre induit un retard par rapport aux valeurs instantanées de la puissance, il permet en revanche d'anticiper sur la valeur prise par la valeur moyenne à fenêtre fixe.

C'est donc cette valeur moyenne glissante à 1 minute qui sert à la stratégie de décharge de la batterie pour limiter la puissance crête de la puissance fournie par la sous-station Sceut :

- A chaque instant, la puissance moyenne fournie par la sous-station Sceut est établie sur la minute précédente.
- La puissance de référence pour la décharge de l'accumulateur est obtenue par le produit de la valeur moyenne glissante sur une minute et d'un coefficient, qui est ajusté de manière à ce que :
  - o La puissance maximale admissible pour l'accumulateur ne soit pas dépassée.
  - o La puissance de référence soit maximale si l'accumulateur est pleinement chargé.
  - o La puissance de référence soit minimale si l'accumulateur est déchargé.

Nous donnons à titre d'exemple sur la Figure 21, le comportement de l'accumulateur piloté par une telle stratégie, pour deux simulations différentes : service complet en jour de semaine, où toute la flotte est en circulation, puis en week-end où les trains marchandises ne sont pas présents.



**Figure 21 Gestion de l'état de charge de l'accumulateur**

En jour de semaine, la stratégie priviliege en premier la réactivité de l'accumulateur aux contraintes liées aux trains à marchandises. Ce sont les deux premiers de la journée qui chargent l'accumulateur par récupération. Ce sont également eux qui de 9h00 à 12h00 déchargent l'accumulateur. Lorsque les trains marchandises ne sont plus en activité, le coefficient de détermination la puissance de décharge pour l'accumulateur est ajustée de manière à rendre la batterie réactive pour le trafic passager.

C'est d'ailleurs là une réelle difficulté de détermination d'une stratégie efficace, dans la mesure où les contraintes liées au trafic passager sont radicalement différentes de celles du trafic marchandises. C'est la raison pour laquelle les lois de variation temporelles du coefficient de détermination de la puissance de décharge pour l'accumulateur ont dû être adaptées le week-end, afin de maximiser l'usage de la batterie alors que les trains de marchandises sont absents.

## 5.2. ANALYSE DE PERFORMANCES

Les résultats qui seront présentés dans cette section ont été obtenus dans le cadre de la simulation pour une journée de semaine type. Pour les conventions d'étude nous reprenons les mêmes conventions que dans la section 4.1 :

- Les trains numérotés de 1 à 5 sont des trains passagers.
- Les trains numérotés de 6 à 8 sont des trains marchandises.
- Nous comparerons deux configurations différentes :

- Configuration 1 : toute la flotte est prise en compte, sans accumulateur à la sous-station Sceut.
- Configuration 2 : toute la flotte est prise en compte, avec accumulateur à la sous-station Sceut.

### Bilan énergétique pour les trains :

L'analyse de l'énergie échangée entre trains et caténaire permet de s'assurer que la réponse à l'objectif de maximiser l'énergie est atteint. Le résultat obtenu est présenté à la Figure 22.

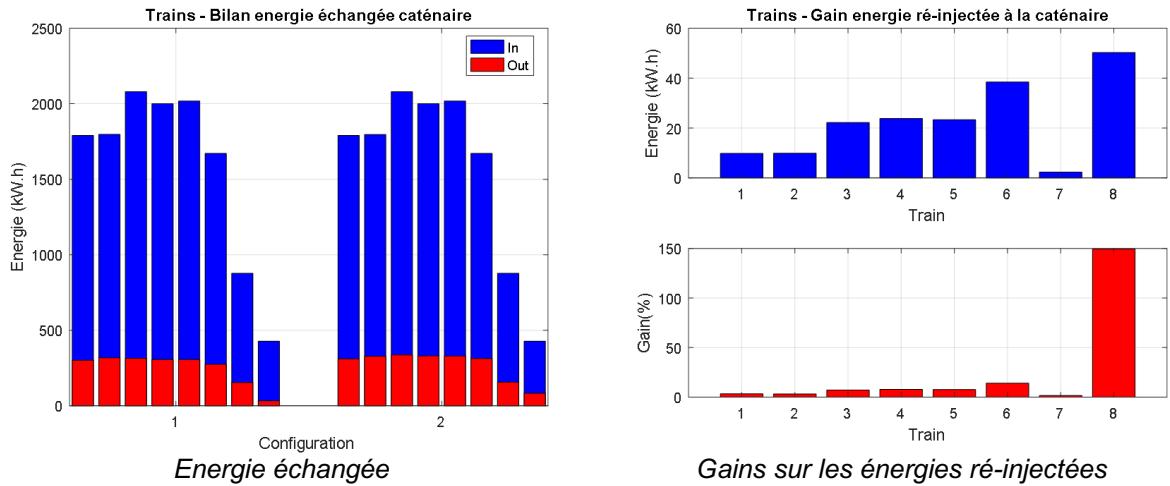


Figure 22 Bilan d'énergie échangée à la caténaire par les trains

L'analyse de l'énergie échangée entre trains et caténaire selon que l'accumulateur est présent ou pas est présentée sur la courbe de gauche. Comme les différences ne sont pas criantes, nous proposons de référer les gains en énergie réinjectée par rapport au cas « sans accumulateur ». Cela est présenté sur les tracés de droite, en valeurs absolues et relatives. On devra retenir les éléments suivants :

- Les gains absolus observés sont tous positifs, pour l'ensemble de la flotte de trains. Etant entendu que la stratégie de gestion de l'état de charge de l'accumulateur est principalement définie pour être pro-active face aux trains marchandises, c'est pour ces derniers que l'énergie sauvegardée est la plus élevée.
- Les gains relatifs confirment ce résultat, avec une mention particulière pour le train marchandises 8. En l'absence d'accumulateur, ce train opère en tout début de service, alors que peu de trains sont présents sur la ligne. Le fait d'ajouter un accumulateur sur son trajet permet de rendre la ligne d'emblée réceptive lorsque ce train réinjecte de l'énergie au freinage. C'est en particulier ce train (et le train 6) qui chargent pour grande partie la batterie en début de journée, leur parcours étant descendant.

On valide ainsi le fait que la présence d'un accumulateur à la sous-station Sceut permet de relever le niveau d'énergie récupérée lors du freinage de trains.

Il y a cependant une restriction. La récupération accrue d'énergie lors du freinage de trains est significative lorsque peu de trains sont présents sur la ligne. Lorsque toute la flotte de trains passagers est en activité, il y a un effet de foisonnement qui rend d'emblée la ligne réactive en cas de réinjection d'énergie, surtout si celle-ci est réalisée sur un point éloigné de l'accumulateur : toute énergie réinjectée sera préféablement absorbée par un train voisin avant que de parvenir à l'accumulateur, en prenant également en compte les pertes en ligne. Ceci explique pourquoi les gains en énergie réinjectée sont faibles pour les trains passagers.

### Bilan énergétique et de puissance pour les sous-stations :

Une analyse identique est réalisée pour l'ensemble des sous-stations alimentant le réseau des CJ. Le bilan des énergies injectées par chaque sous-station est donné à la Figure 23. La courbe de gauche compare ces niveaux d'énergie sans (configuration 1) puis avec (configuration 2) présence d'un accumulateur à la sous-station Sceut (numérotée 7). La courbe de droite donne les gains en énergie dus

à la présence d'un accumulateur, sous-station par sous-station, en valeur absolue et en valeur relative.

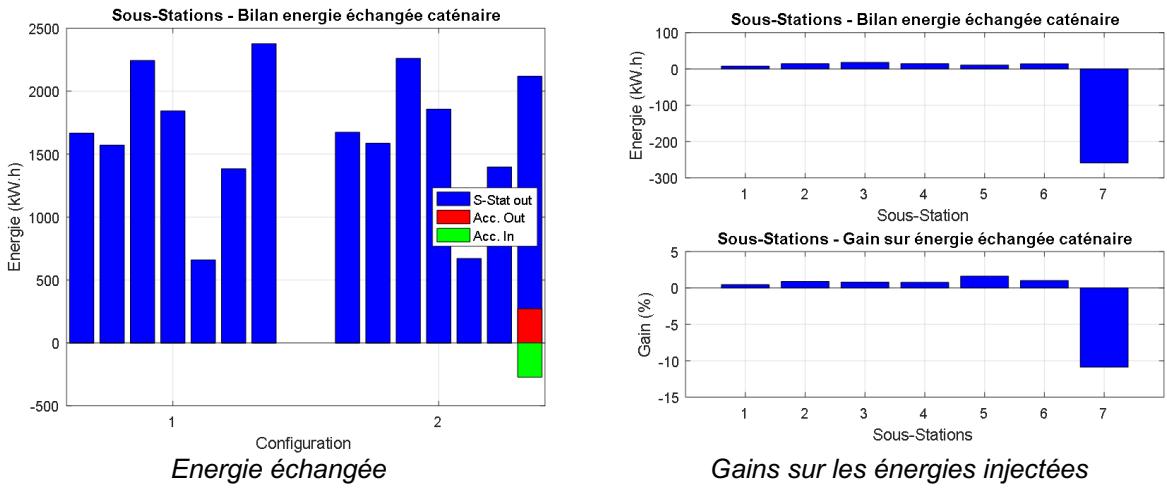


Figure 23 Bilan d'énergie échangée à la caténaire par les sous-stations

Nous avons d'emblée spécifié sur la sous-station Sceut la présence de l'accumulateur (position 7 en configuration 2). Comme spécifié, les énergies prélevées et réinjectées à la caténaire sont symétriques : cela correspond à un bilan énergétique journalier nul.

On note également de manière évidente le gain énergétique négatif de -11% sur l'énergie injectée à la caténaire par la sous-station Sceut. Ceci est bien évidemment dû à l'accumulateur, qui soulage la sous-station face aux besoins en énergie des trains grâce à l'énergie pré-stockée lorsque les premiers trains ont freiné.

En revanche, un point à mentionner est relatif aux gains positifs en énergie pour toutes les autres sous-stations, même si ces gains sont de l'ordre de 1% à 2 %. La présence de l'accumulateur sur la sous-station Sceut semble conduire à un report de demande en énergie sur les autres sous-stations. Ceci alors même les niveaux d'énergie réinjectée sont relevés pour tous les trains (voir la Figure 22). L'analyse qui peut être réalisée est la suivante :

- La somme des gains absolus en énergie reste négative : le réseau est dans son intégralité moins énergivore grâce à la présence de l'accumulateur.
- Le fait que l'énergie réinjectée par un train soit pour partie absorbée par l'accumulateur conduit à un "manque à gagner" pour les autres trains en accélération. L'énergie « manquante » est donc prise sur la sous-station la plus proche.

C'est une conclusion déjà réalisée dans le cadre de l'étude [2], qui avait montré que la seule possibilité de récupération d'énergie au freinage de trains qui minimise des flux d'énergie pervers consiste à embarquer des accumulateurs directement sur les trains.

Une analyse complémentaire est réalisée sur les puissances de crête que chaque sous-station doit fournir sur une journée. Le bilan de ces puissances est donné à la Figure 24. La courbe de gauche compare ces niveaux de puissances sans (configuration 1) puis avec (configuration 2) présence d'un accumulateur à la sous-station Sceut (numérotée 7). La courbe de droite donne les gains en puissance crête dus à la présence d'un accumulateur, sous-station par sous-station, en valeur absolue et en valeur relative.

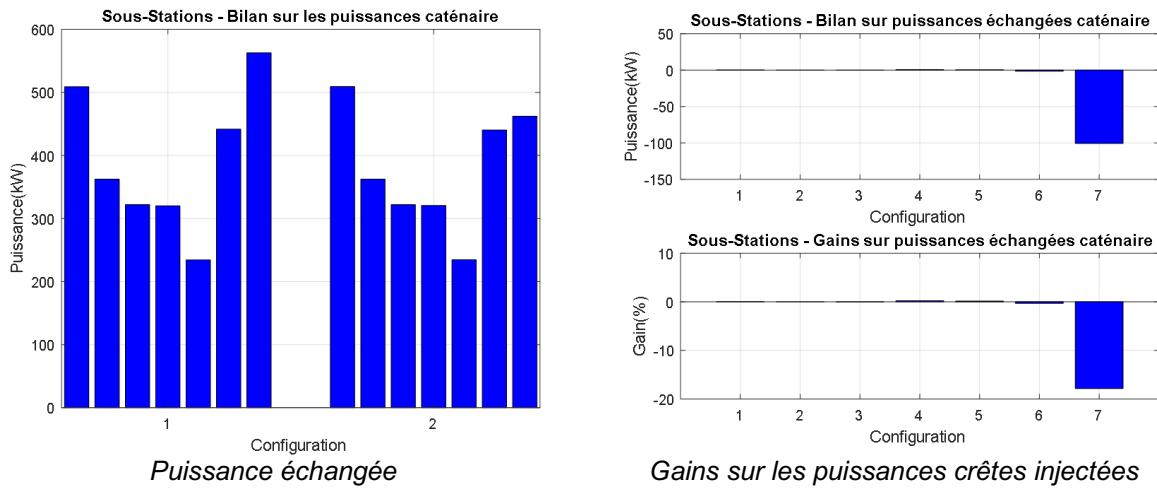


Figure 24 Bilan de puissance échangée à la caténaire par les sous-stations

On note d'emblée que la présence d'un accumulateur à la sous-station Sceut permet une réduction de 18% de la valeur crête de la puissance qu'elle doit fournir. De par l'emplacement de cet accumulateur, ainsi que par la stratégie de gestion de son état de charge, cette réduction est locale. Le report de diminution de puissance crête sur les autres sous-stations est quasiment négligeable, même si les sous-stations de proximité sont légèrement impactées (moins de 1%), également à la baisse.

On valide ainsi la stratégie de gestion de l'état de charge de l'accumulateur, dédiée à réduire la puissance crête injectée par la sous-station à laquelle il est affecté, sans impacter des sous-stations voisines. On retiendra ainsi que du point de vue des puissances, l'addition d'un dispositif d'accumulation a un effet local, à moins de compliquer les stratégies de gestion de son état de charge. Cela n'a pas été envisagé en regard de considérations sur le rendement global de l'installation.

#### Considérations sur la notion de rendement global :

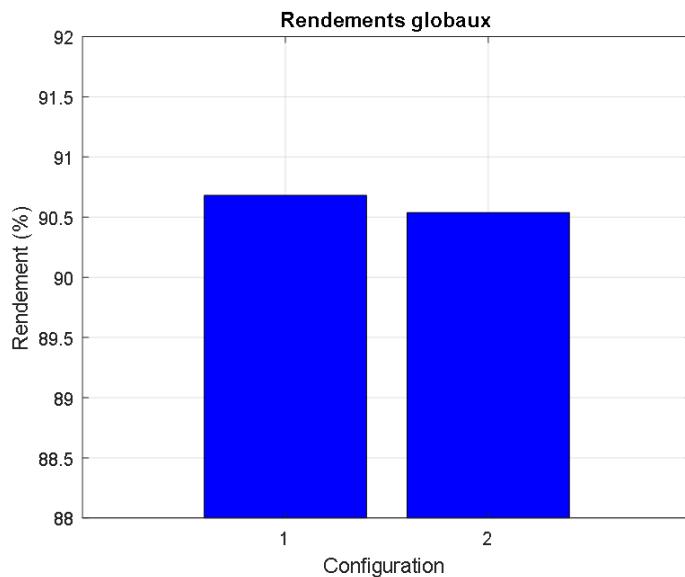
Nous avons analysé en quoi l'ajout d'un accumulateur en parallèle de la sous-station Sceut peut avoir un impact sur le rendement global du réseau des CJ.

A partir des bilans d'énergie sur une journée de fonctionnement du réseau des CJ, nous avons fait le rapport entre l'énergie échangée par les trains à la caténaire et l'énergie injectée à la caténaire par les sous-stations du réseau. Pour ce calcul, le bilan énergétique de l'accumulateur n'intervient pas, étant entendu que la stratégie de gestion de état de charge conduit à un bilan énergétique journalier nul : la batterie est déchargée en début de service, elle le redevient en fin de journée (voir la Figure 21).

Ce calcul permet d'obtenir le rendement global de l'installation, et caractérise en fin de compte les pertes en ligne du système. Nous proposons à la Figure 25 le bilan de ce rendement selon que l'accumulateur est absent (configuration 1) ou présent (configuration 2).

Dans le cas de réseau sans installation d'accumulation en parallèle de la sous-station Sceut, on note un rendement de l'ordre de 90.75%. Les pertes en ligne semblent par défaut relativement élevées.

Les valeurs des résistances série considérées pour nos simulations, extraites et déduites de [3], sont peut-être surestimées. Indépendamment de cela, le rendement est de toute manière fortement impacté par les circulations de courant sur la ligne, qui sont des processus naturellement complexes. En effet, l'énergie « achetée » par un train à la caténaire peut provenir directement d'une sous-station. Elle peut également provenir d'un autre train qui réinjecte lors de son freinage, sachant que ce dernier réinjecte de l'énergie également « achetée » à une sous-station, ou bien « achetée » à un autre train, etc....



**Figure 25 Rendement global**

On observe que dans le cas de l'ajout d'un accumulateur à la sous-station Sceut, le rendement global est affecté à la baisse (90.6% contre 90.75%). Cette diminution n'est pas réellement significative, mais montre que l'ajout d'un accumulateur sur la ligne augmente les possibilités de flux d'énergie sur la ligne, avec par conséquent une augmentation des pertes associées.

On retrouve ici aussi une propriété déjà mentionnée pour un autre réseau [2] : si l'ajout d'un accumulateur sur la ligne permet de diminuer de manière globale la facture énergétique, les flux d'énergie complexes au sein de tels système conduisent à une dégradation du rendement global.

Il y a ainsi un découplage entre « facture énergétique » et « rendement global ».

#### **Considérations d'ordre financier :**

Dans le paragraphe 4.3, nous avons effectué une analyse pour déterminer la validité de l'outil de simulation développé pour la présente étude. La comparaison d'une facture mensuelle relative à la sous-station Sceut a été comparée à une facture « virtuelle », obtenue à partir des résultats de simulation pour un mois complet. Le niveau de précision observé a été identifié à 1.3%.

Compte tenu de cette précision, nous avons réutilisé cette approche pour identifier le potentiel de gain financier permis par l'ajout d'un accumulateur en parallèle de la sous-station Sceut. Le résultat est fourni au Tableau 2.

Les deux colonnes sont relatives aux factures mensuelles établies sans, puis avec système d'accumulation.

Sur un mois de fonctionnement, on note les résultats déjà mentionnés dans le cas de l'intégration d'un système d'accumulation. Tant la puissance crête que les niveaux d'énergie sont minorés grâce à l'insertion d'un accumulateur :

- Puissance crête : -17.87%
- Energie totale : -10.92%

D'autre part :

- La puissance crête définit 17.7% de la facture totale sans accumulateur, elle définit à présent 16.57% de la facture totale en présence d'un accumulateur. Soit un niveau similaire.
- La puissance crête définit 33% du poste « Utilisation du réseau » sans accumulateur, elle définit à présent 31.6% du même poste en présence d'un accumulateur. Soit un niveau similaire également.

		Facture Virtuelle		Facture virtuelle avec Acc.		
<b>Tarif</b>						
Puissance Pmax/mois (kW)			562.8			462.2
<b>Puissance Pmax/mois total (kW)</b>			<b>562.8</b>			<b>462.2</b>
Energie/travail haut tarif (kWh)			64697			57663
Energie/travail bas tarif (kWh)			4338			3834
<b>Energie/travail total (kWh)</b>			<b>69035</b>			<b>61497</b>
<b>Energie</b>	<b>Prélèvement</b>	<b>Prix (CHF)</b>	<b>Montant (CHF)</b>	<b>Prélèvement</b>	<b>Prix</b>	<b>Montant</b>
Energie haut tarif (kWh)	64697	5.65	3655.3805	57663	5.65	3257.9595
Energie bas tarif (kWh)	4338	4.54	196.9452	3834	4.54	174.0636
<b>Sous-total</b>			<b>3852.33</b>			<b>3432.02</b>
<b>Utilisation du réseau</b>						
Puissance facturée (kW)	562.8	3.65	2054.22	462.2	3.65	1687.03
Travail haut tarif (kWh)	64697	5.79	3745.96	57663	5.79	3338.69
Travail bas tarif (kWh)	4338	2.9	125.8	3834	2.9	111.19
Service Système swissgrid (kWh)	69035	0.32	220.91	61497	0.32	196.79
<b>Sous-total (CHF)</b>			<b>6146.89</b>			<b>5333.7</b>
<b>Redevances</b>						
Taxe encouragement légale	69035	2.3	1587.81	61497	2.3	1414.43
<b>Sous-total (CHF)</b>			<b>1587.81</b>			<b>1414.43</b>
		<b>Total (CHF)</b>	<b>11587.03</b>		<b>Total</b>	<b>10180.15</b>

**Tableau 2 Gain financier lié à l'intégration d'une sous-station d'accumulation d'énergie**

Quand bien même la présence d'un accumulateur en parallèle de la sous-station Sceut permet de réduire les niveaux de puissance crête mensuelle et d'énergie fournie, l'influence de la puissance crête (qui représente un poste important dans la facture totale) reste similaire, avec ou sans accumulateur.

En fin de compte, la facture totale avec accumulateur présente néanmoins une réduction de 12.14% (économie de 1406.9CHF sur le mois analysé). Si prometteur que soit ce résultat, il est jugé comme trop faible, eu égard aux investissements à consentir pour installer un dispositif de stockage d'énergie en parallèle de la sous-station Sceut par rapport aux économies mensuelles estimées à partir des résultats présentés ici.

## 6. Conclusions et recommandations

Dans la continuité d'une étude antérieure réalisé pour le compte de la Compagnie du Chemin de Fer Lausanne-Echallens-Bercher SA (LEB), ce présent projet a comme base développé un outil de simulation de réseau de trains régionaux tel qu'opéré par les Chemins de Fer du Jura (CJ).

Outre la prise en compte des spécificités du réseau des CJ en termes de topographie, horaires et type de matériel roulant, un effort conséquent a été réalisé quant à la modélisation plus fine de la topologie électrique de l'alimentation des trains via la caténaire.

Au résultat, un indicateur de validité des résultats obtenus par cet outil de simulation a consisté à comparer une facture adressée par le fournisseur d'énergie des CJ à une facture virtuelle établie par le simulateur développé. Cette comparaison conduit à un écart de 1.3% entre ces deux factures.

L'analyse de l'insertion d'un système d'accumulation a été entreprise, pour un type de batterie déjà dimensionnée par un partenaire industriel. A l'issue de l'analyse des contraintes imposées au réseau

des CJ, ce dispositif de stockage a été placé en sous-station de Sceut, avec pour but de répondre à deux missions :

- Elévation du rendement en maximisant les possibilités de récupération de l'énergie au freinage.
- Diminution des puissances crêtes injectées par les sous-stations d'alimentation.

La réponse à ces deux critères a conduit à définir des stratégies de gestion de l'état de charge en fonction des contraintes imposées par les convois marchandises, qui sont les plus exigeant en termes de puissance crête, et pour lesquels les potentiels de récupération d'énergie au freinage sont les plus élevés.

Les résultats obtenus montrent une réduction de 10% de la facture en énergie, et de 18% de la valeur crête de la puissance pour un mois de fonctionnement. L'ensemble de ces gains permet de réduire de 12.14% la facture mensuelle pour la sous-station Sceut.

Ce potentiel de réduction a été jugé minime, raison pour laquelle il n'a pas été jugé utile d'envisager l'implantation d'un dispositif de stockage en parallèle de la sous-station Sceut.

C'est d'ailleurs un résultat qui confirme celui déjà obtenu dans le cadre de l'étude réalisée pour le LEB. En effet, il y était démontré que la solution la plus efficace pour maximiser l'énergie récupérée au freinage des trains tout en réduisant la demande en puissance crête sur les sous-stations d'alimentation consiste à embarquer des accumulateurs directement sur les trains.

Le potentiel de réduction de facture mensuelle pour une sous-station est ici limité, qui plus est fortement influencée par la notion de puissance crête. Ce résultat doit cependant être pondéré sous réserve d'études complémentaires liées :

- A l'optimisation de la stratégie de gestion de l'état de charge de la batterie.

On doit cependant prêter attention que s'il est facile de lancer des processus complexes d'optimisation sur un simulateur de réseau, on doit toujours se projeter vers une implémentation de stratégie pour un système réel. C'est la raison pour laquelle la stratégie considérée dans cette présente étude a été définie selon des critères pragmatiques, dans le souci de pouvoir être portée et implémentable sur un système à l'échelle 1.

- A l'optimisation du dimensionnement de cette batterie.

Nous avons considéré dans ce projet la batterie comme étant déjà dimensionnée. Il y a cependant un lien étroit entre stratégie de gestion de l'état de charge, critère de fonctionnement et stratégie. C'est à notre sens le poste qui offre le plus de souplesse pour un travail d'optimisation.

- A la recherche du meilleur point de connexion possible à la caténaire (entre deux sous-stations par exemple). Avec comme restriction que de par la topologie géographique du réseau des CJ, tous les points d'injection qui pourraient être intéressants ne sont pas forcément accessibles.

## Références

- [1] R. Zuber, «Plan de projet SETP 2050 - Offre pour une étude préliminaire - Installation fixe d'accumulation d'énergie,» Chemins de Fer du Jura, 2017.
- [2] P. Barrade, «Alimentation de véhicules électriques par caténaire - Apport des technologies dédiées au stockage,» HES-SO Valais/Wallis, Institut des Systèmes Industriels, Sion, 2017.
- [3] ENOTRAC, «Etude réseau courant de traction ECH-121.02-001.V1.0.Rapport\_simulations,» ENOTRAC AG, Thun, 2015.
- [4] C. MAYET, «Simulation énergétique flexible d'un carrousel de métros basée sur la REM,» Université de Lille1, Lille, 2016.
- [5] J.-M. Allenbach, Techniques ferroviaires, Lausanne: PPUR, 2013.
- [6] B. DESTRAZ, «Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride TH4083,» EPFL, Lausanne, 2008.
- [7] CJ, «Etat Caractéristique de la voie Le Noirmont-La Chaux-de-Fonds,» CJ, Tramelan, 2017.
- [8] CJ, «Etat caractéristique de la voie Le Noirmont - Glovelier,» CJ, Tramelan, 2017.
- [9] CJ, «Etat caractéristique de la voie Tavannes - Le Noirmont,» CJ, Tramelan, 2017.
- [10] CJ, «Horaire graphique CJ 2016-2017,» CJ, Tramelan, 2017.
- [11] CJ, «42.20-428k, Schéma des lignes de contact 20.07.2017,» CJ, Tramelan, 2017.
- [12] Switzerland, ABB, «Convertisseur compact bordline cc600-dc, type fw d684 600kva,» Manuel de service, 2009.
- [13] Y. Chéron, Application des règles de la dualité à la conception de nouveaux convertisseurs à transistors de puissance, I. N. Polytechnique, Éd., Toulouse: PhD, 1982.
- [14] E. Bilbao, «Energy Management Strategies Based on Dynamic Programming for Applications with Energy Storage Capacity,» PhD - Th. N° 5729 - EPFL, Lausanne, CH, 2013.

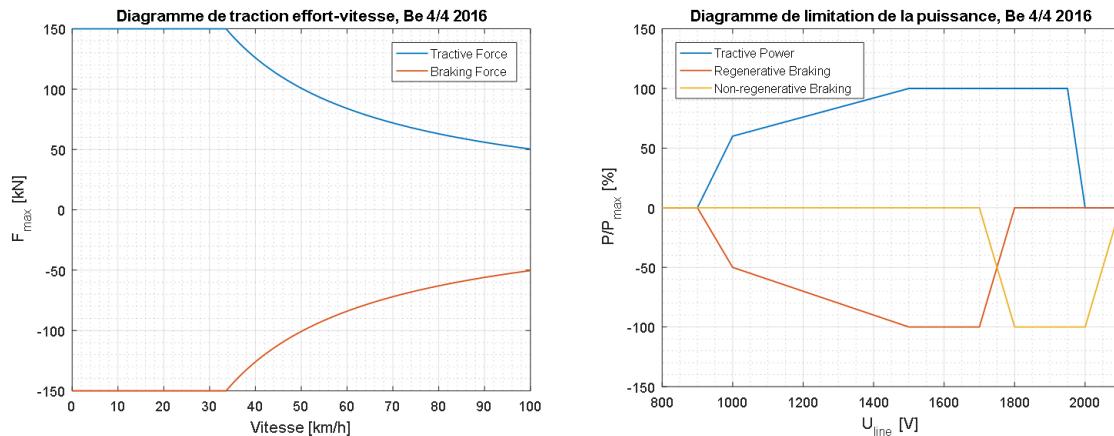
## Annexes

### A. PARAMÈTRES DES RAMES EN CIRCULATION SUR LE RÉSEAU DES CJ

**Rame automotrice Be 4/4 2016 :**

Paramètre	Valeur	Unité	Source	Remarque
Masse à vide	45	t	CJ	
Charge utile	9	t	CJ	
Masse totale	54	t	CJ	
Masse tournante	15	%	Enotrac	hypothèse
Vitesse max.	100	km/h	CJ	
Rendement max.	0.92	-	Enotrac	hypothèse
Effort max. traction	150	kN	CJ	
Effort max. freinage	150	kN	CJ	
Tension nominale	1500	V	CJ	diagramme limitation de puissance
Puissance max. traction	1400	kW	CJ	diagramme effort-vitesse
Puissance max. freinage	1400	kW	CJ	diagramme effort-vitesse
Puissance max. auxiliaires	40	kW	Enotrac	hypothèse (tot. auxiliaires 85 kW)
Puissance max. chauffage	45	kW	Enotrac	hypothèse (tot. auxiliaires 85 kW)
Puissance max. climatisation	45	kW	Enotrac	hypothèse (tot. auxiliaires 85 kW)

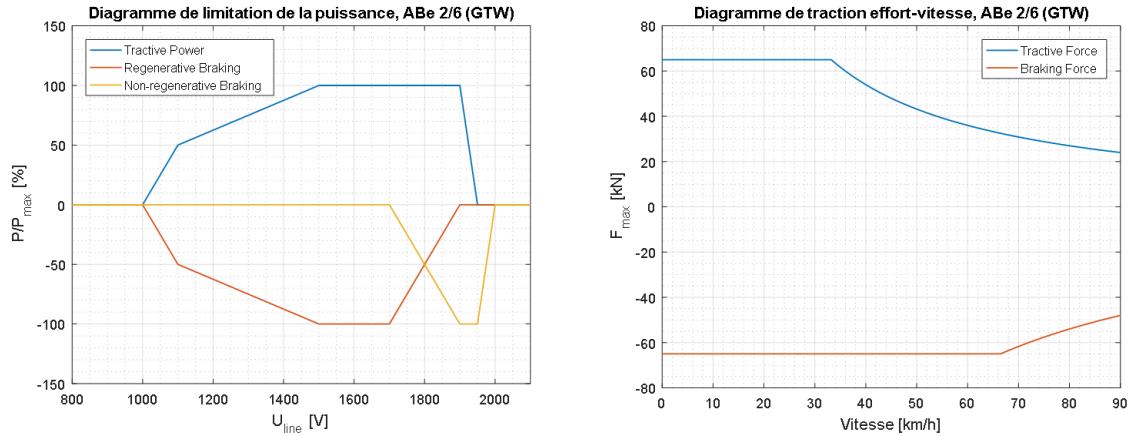
- Diagramme de limitation de puissance selon la tension caténaire et diagramme effort-vitesse



**Rame automotrice ABe 2/6 (GTW):**

Paramètre	Valeur	Unité	Source	Remarque
Masse à vide	40.6	t	CJ	
Charge utile	13.4	t	CJ	
Masse totale	54	t	CJ	
Masse tournante	10	%	Enotrac	hypothèse
Vitesse max.	90	km/h	CJ	
Rendement max.	0.87	-	CJ	
Effort max. traction	65	kN	CJ	
Effort max. freinage	65	kN	CJ	
Tension nominale	1500	V	CJ	diagramme limitation de puissance
Puissance max. traction	600	kW	CJ	diagramme effort-vitesse
Puissance max. freinage	1200	kW	CJ	diagramme effort-vitesse
Puissance max. auxiliaires	40	kW	CJ	
Puissance max. chauffage	40	kW	CJ	
Puissance max. climatisation	40	kW	CJ	

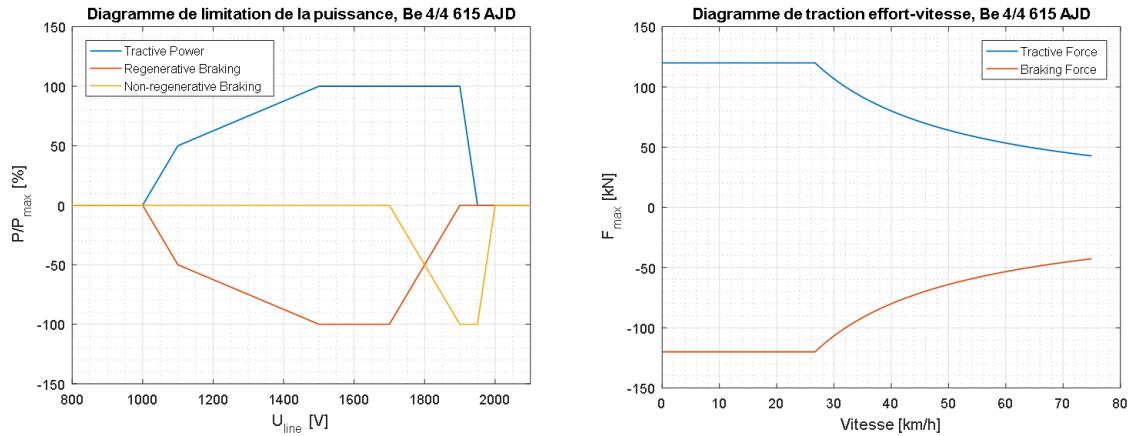
- Diagramme de limitation de puissance selon la tension caténaire et diagramme effort-vitesse



### Locomotive Be 4/4 615 AJD:

Paramètre	Valeur	Unité	Source	Remarque
Masse à vide	34.7	t	CJ	
Charge utile	175.3	t	CJ	
Masse totale	210	t	CJ	
Masse tournante	8	%	Enotrac	hypothèse
Vitesse max.	75	km/h	CJ	
Rendement max.	0.87	-	Enotrac	hypothèse
Effort max. traction	120	kN	CJ	
Effort max. freinage	120	kN	CJ	
Tension nominale	1500	V	CJ	diagramme limitation de puissance
Puissance max. traction	890	kW	CJ	diagramme effort-vitesse
Puissance max. freinage	890	kW	CJ	diagramme effort-vitesse
Puissance max. auxiliaires	40	kW	Enotrac	hypothèse
Puissance max. chauffage	10	kW	Enotrac	hypothèse
Puissance max. climatisation	0	kW	Enotrac	hypothèse

- Diagramme de limitation de puissance selon la tension caténaire et diagramme effort-vitesse



## B. TABLES HORAIRES

Stations d'arrêt	Départ [min]	Troncon
Glovelier	38	2
Combe-Tabeillon	47	2
Bollement	56	2
La Combe	58	2
Pré-Petitjean	3	2
Le Bémont	6	2
Saignelégier	20	2
Muriaux	21	2
Les Emibois	23	2
Noirmont	27	2
Le Noirmont	27	1
Le Creux-des-Biches	30	1
Le Boéchet	31	1
Les Bois	34	1
La Large-Journée	35	1
La Chaux d'Abel	37	1
La Ferrière	39	1
La Cibourg	42	1
La Chaux-de-Fonds-Est	48	1
La Chaux-de-Fonds	56	1
La Chaux-de-Fonds	2	1
La Chaux-de-Fonds-Est	4	1
La Cibourg	9	1
La Ferrière	13	1
La Chaux d'Abel	14	1
La Large-Journée	15	1
Les Bois	18	1
Le Boéchet	20	1
Le Creux-des-Biches	22	1
Le Noirmont	27	1
Noirmont	29	2
Les Emibois	31	2
Muriaux	32	2
Saignelégier	43	2
Le Bémont	44	2
Pré-Petitjean	48	2
La Combe	51	2
Bollement	55	2
Combe-Tabeillon	5	2
Glovelier	15	2

Table horaire cadencé Glovelier – Chaux-de-Fonds

Stations d'arrêt	Départ [min]	Troncon
Tavannes	47	1
Orange	50	1
Tramelan-Dessous	54	1
Tramelan	3	1
Tramelan-Chalet	6	1
Les Reussilles	9	1
Le Pied d'Or	10	1
La Chaux-des-Breuleux	13	1
Les Breuleux	15	1
Les Breuleux-Eglise	16	1
Le Noirmont	24	1
Le Noirmont	30	1
Les Breuleux-Eglise	35	1
Les Breuleux	37	1
La Chaux-des-Breuleux	39	1
Le Pied d'Or	41	1
Les Reussilles	45	1
Tramelan-Chalet	47	1
Tramelan	56	1
Tramelan-Dessous	57	1
Tavannes	7	1

Table horaire cadencé Tavannes – Le Noirmont

Stations d'arrêt	Départ [min]	Troncon
Saignelégier	30	2
Combe-Tabeillon	58	2
Glovelier	66	2
Glovelier	235	2
Combe-Tabeillon	254	2
Bollement	270	2
Pré-Petitjean	288	2
Saignelégier	295	2
Noirmont	302	2
Le Noirmont	308	1
Les Bois	319	1
La Ferrière	327	1
La Cibourg	331	1
La Chaux-de-Fonds	341	1
La Chaux-de-Fonds	367	1
Bellevue	395	1
La Cibourg	405	1
Le Noirmont	419	1
Le Noirmont	422	1
Les Breuleux	437	1
Les Reussilles	445	1
Tramelan	462	1
Orange	471	1
Tavannes	474	1
Tavannes	565	1
Tramelan	577	1
Les Reussilles	585	1
Les Breuleux	595	1
Le Noirmont	603	1
Le Noirmont	609	1
Les Bois	620	1
La Chaux-de-Fonds	639	1
La Chaux-de-Fonds	667	1
Bellevue	695	1
La Cibourg	705	1
Les Bois	713	1
Le Noirmont	720	1
Noirmont	721	2
Saignelégier	726	2

Table horaire non-cadencé marchandise 1

Stations d'arrêt	Départ [min]	Troncon
Tramelan	97	1
Les Reussilles	104	1
Les Breuleux	114	1
Le Noirmont	123	1
Le Noirmont	124	1
Les Bois	137	1
La Ferrière	146	1
La Cibourg	150	1
La Chaux-de-Fonds	160	1
La Chaux-de-Fonds	187	1
Bellevue	215	1
La Cibourg	225	1
Les Bois	233	1
Le Noirmont	242	1
Le Noirmont	242	1
Les Breuleux	257	1
Les Reussilles	265	1
Tramelan	282	1
Orange	291	1
Tavannes	295	1
Tavannes	354	1
Orange	361	1
Tramelan	366	1

Table horaire non-cadencé marchandise 2

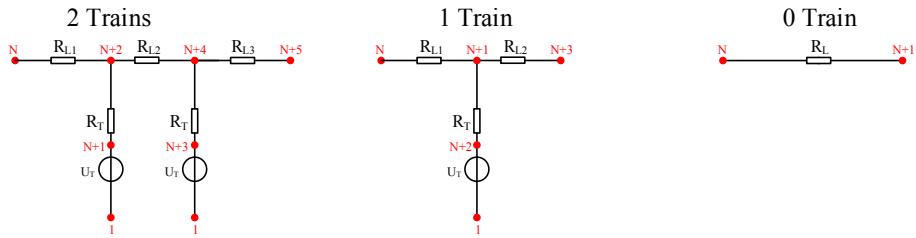
Stations d'arrêt	Départ [min]	Troncon
Saignelégier	10	2
Pré-Petitjean	20	2
Bollement	31	2
Combe-Tabeillon	48	2
Glovelier	58	2
Glovelier	355	2
Combe-Tabeillon	369	2
Bollement	377	2
Pré-Petitjean	385	2
Saignelégier	392	2

Table horaire non-cadencé marchandise 2

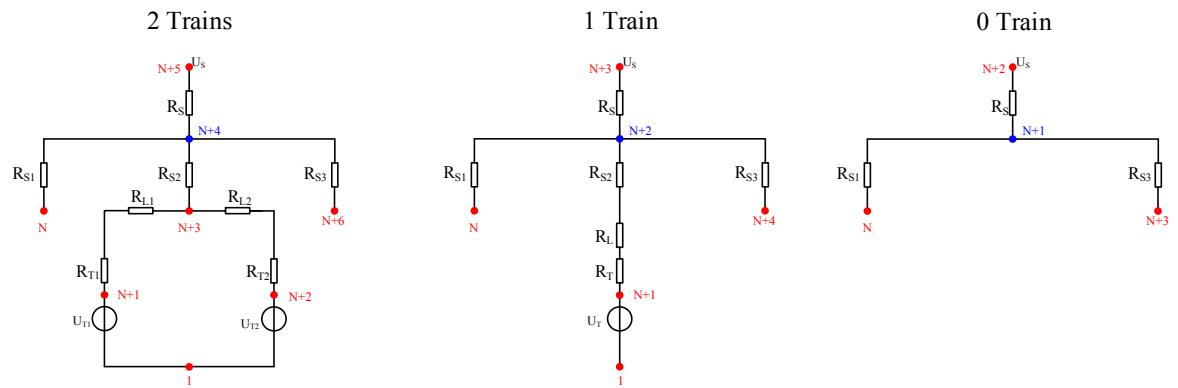
### C. MODÉLISATION ÉLECTRIQUE DE LA LIGNE ÉLECTRIQUE

#### Bibliothèques de Netlists :

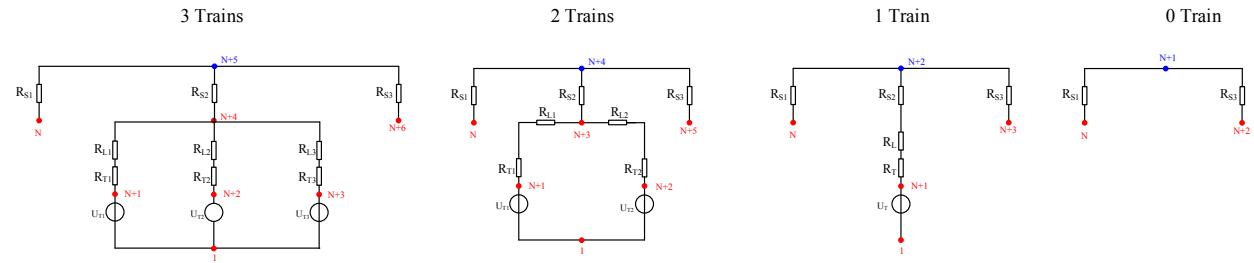
Section de transit simple



#### Gare et Sous-Station

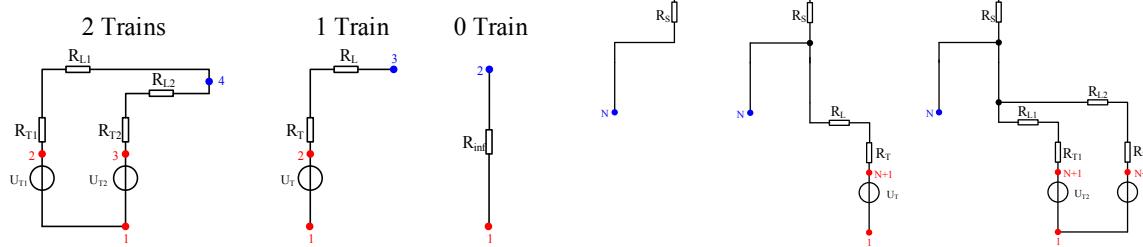


#### Gare Simple



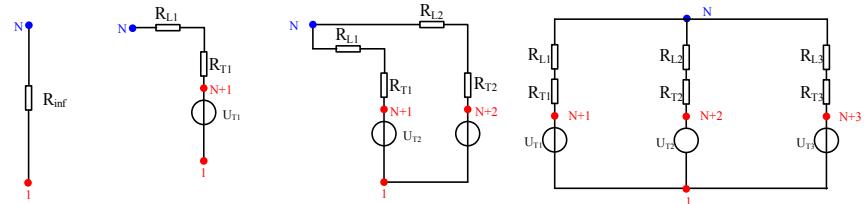
#### Gare, Fin de Ligne (KM44.033 – La Chaux de Fonds)

#### Gare, Bout de Ligne (Tavannes - KM0)



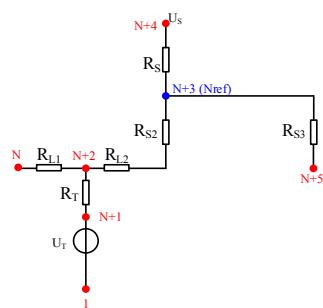
## Gare, Fin de Ligne (KM30.283 – Glovelier)

0 Train      1 Train      2 Trains      3 Trains

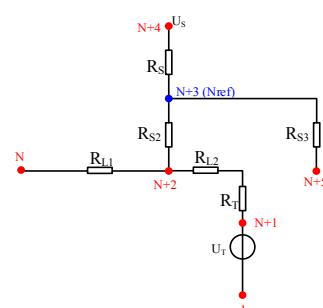


## Section Sceut

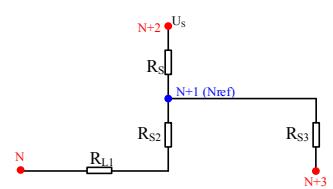
1 Train – Cas 1



1 Train – Cas 2

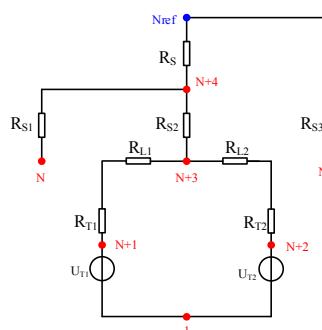


0 Train

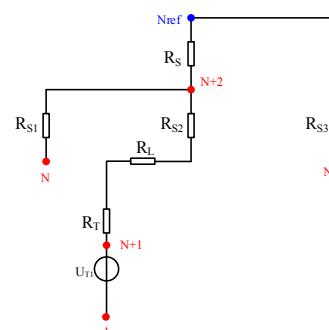


## Section Combe - Tabeillon

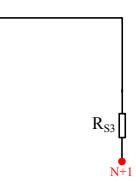
2 Trains



1 Trains

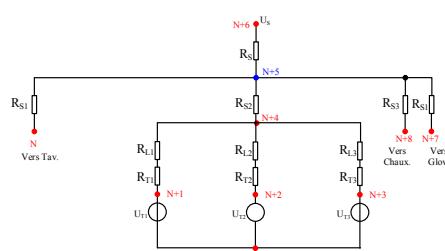


0 Trains

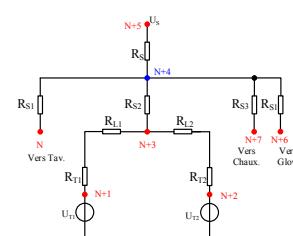


## Section Le Noirmont

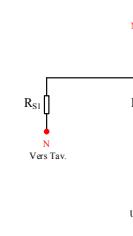
3 Trains



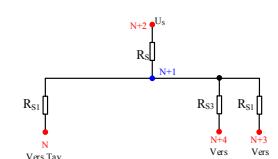
2 Trains



1 Train



0 Train



## Paramètres de sections

Section	Tronçon	Nature	Nom	KM début (km)	Distrib (km)	KM fin (km)	Longeur (m)	U nom (V)	R s (Ω)	S distrib (mm²)	Lond. Distrib (m)	Nb. Distrib	R s d (Ω)	Rs (Ω)	Coeff	Rs1 (Ω)	Rs2 (Ω)	Rs3 (Ω)
1	1	Gare - Debut de ligne	Tavannes	0	0	0.2	200						0	0	0	0	0	0
2	1	Ligne		0.2	0	4.085	3885						0	0	0	0	0	0
3	1	Gare - S-Stat.	Orange	4.085	4.175	4.295	210	1581	0.076	240	38	2	0.00133	0.07738	1.5	0.011935842	0.013926316	0.015915789
4	1	Ligne		4.295	0	8.554	4259						0	0	0	0	0	0
5	1	Gare	Tramelan	8.554	8.704	8.954	400						0	0	0	0	0	0
6	1	Ligne		8.954	0	11.384	2430	1581	0.117	240	25	2	0.000875	0.1117875	1.5	0.013263158	0.019231579	0.0252
7	1	Gare - S-Stat.	Les Reussilles	11.384	11.484	11.674	290	1581					0	0	0	0	0	0
8	1	Ligne		11.674	0	17.667	5993						0	0	0	0	0	0
9	1	Gare	Les Breuleux	17.667	17.927	18.202	535						0	0	0	0	0	0
10	1	Ligne		18.202	0	22.329	4127	1581	0.076	240	58	3	0.001353333	0.077353333	1.5	0.086210526	0.039789474	0.0252
11	1	Gare - S-Stat.	Le Noirmont	22.329	22.979	23.279	950						0	0	0	0	0	0
12	1	Ligne		23.279	0	29.977	6698						0	0	0	0	0	0
13	1	Gare	Les bois	29.977	30.177	30.357	380						0	0	0	0	0	0
14	1	Ligne		30.357	0	34.751	4394						0	0	0	0	0	0
15	1	Gare - S-Stat.	La Ferrière	34.751	34.931	35.081	330	1581	0.076	240	20	2	0.0007	0.0767	1.5	0.023873684	0.021884211	0.019884377
16	1	Ligne		35.081	0	37.5	2419						0	0	0	0	0	0
17	1	Gare	La Cl Bourg	37.5	37.95	38.2	700						0	0	0	0	0	0
18	1	Ligne		38.2	0	40.107	1907						0	0	0	0	0	0
19	1	Gare	Bellevue	40.107	40.133	40.447	363						0	0	0	0	0	0
20	1	Ligne		40.447	0	43.873	3403						0	0	0	0	0	0
21	1	Gare - Fin Ligne	Chaux-De-Fonds	43.873	43.873	44.033	160	1581	0.076				0.52763191	0.603638191				
22	2	Ligne		23.629	0	28.101	4472						0	0	0	0	0	0
23	2	Gare	Saignelégier	28.101	28.371	28.531	530						0	0	0	0	0	0
24	2	Ligne		28.371	0	33.622	4991						0	0	0	0	0	0
25	2	Gare - S-Stat.	Pré-Petitjean	33.622	33.922	34.102	480	1581	0.092	240	28	2	0.00098	0.09288	1.5	0.039789474	0.031831579	0.023873884
26	2	Ligne		34.102	0	39.777	5625						0	0	0	0	0	0
27	2	Gare	Bollement	39.727	39.887	39.937	210						0	0	0	0	0	0
28	2	Ligne - S-Stat	Séduit	39.937	43.573	43.683	3746	1581	0.076	240	18	2	0.00063	0.07683	1.5	0.007794377	0.014588474	0
29	2	Ligne		43.683	0	47.771	4083						0	0	0	0	0	0
30	2	Gare	Combe - Tabellion	47.771	47.941	48.041	270	0.07663					0	0	0	0	0	0
31	2	Ligne		48.041	0	52.979	4938						0	0	0	0	0	0
32	2	Gare	Glovelier	52.979	0	53.262	283						0	0	0	0	0	0