



Etude Energie du réseau 900V des TPF

Rapport de l'étude énergie de la phase 2

ECH-294.06_02-001
Version 1.0

Mandant :

Transports publics fribourgeois Infrastructure
SA
Rue Louis d'Affry 2
1701 Fribourg

Mandataire :

ENOTRAC AG
Seefeldstrasse 8
CH-3600 Thun
Tel. +41 (0)33 346 66 11
Fax +41 (0)33 346 66 12
e-mail: info@enotrak.com
www.enotrak.com

Validé

14.07.2017

ECH-294.06_02-001.V1.0.Rapport_etude_energie.docx

© ENOTRAC AG

Version actuelle

Version	Date	Statut	Etabli	Vérfié	Validé
1.0	14.07.2017	Validé	S. Rochat	S. Nydegger	S. Nydegger

Version précédente

Version	Date	Statut	Etabli	Vérfié	Validé

Modifications par rapport à la version précédente

Mentions légales

Ce document a été établi dans le cadre de l'exécution d'un mandat et est propriété d'ENOTRAC AG. Le commanditaire jouit du droit d'usage du document et de son contenu. Toute reproduction, communication à des tiers ou exploitation du contenu sont interdites sans autorisation écrite.
© ENOTRAC AG

Bookmarks

Titre du projet	ProjTitle1	Etude Energie du réseau 900V des TPF
	ProjTitle2	
Titre du document	DocTitle1	Rapport de l'étude énergie
	DocTitle2	de la phase 2
	DocTitle3	
Référence du document	DocNumber	ECH-294.06_02-001
Mandant	ClientName	Transports publics fribourgeois Infrastructure SA
	ClientAddr	Rue Louis d'Affry 2 1701 Fribourg
Logos	EnoLogoHeader	
	ClientLogo1Header	
	ClientLogo2Header	
Contact	Contact	Stany Rochat, Tel. +41 (0)33 346 66 19
	Contact_Mail	stany.rochat@enotrac.com

Table des matières :

	Executive Summary	4
1	Cadre, introduction et principes d'évaluation	7
1.1	Stratégie énergétique 2050 des transports publics – SETP 2050	7
1.2	Introduction	7
1.3	Principes d'évaluation	8
2	Résumé et recommandations / <i>Zusammenfassung und Empfehlungen</i>	9
3	Scénarios d'étude	16
3.1	Scénario de référence	16
3.1.1	Exploitation	16
3.1.2	Auxiliaires, chauffage et climatisation	17
3.1.3	Réseau	18
3.2	Scénarios d'économie	19
3.2.1	Conduite économique (coasting)	19
3.2.2	Couplage avec le réseau MOB	20
3.2.3	Tension de freinage augmentée	20
3.2.4	Optimisation de la régulation du chauffage	21
3.2.5	Onduleurs dans les sous-stations de Palézieux et Bulle	21
3.3	Récapitulatif des scénarios de simulation	22
3.4	Logiciel de simulation FABEL	23
4	Bilan et analyse énergétique	25
4.1	Bilan de la consommation annuelle et du potentiel d'économie	26
4.1.1	Energie annuelle totale au niveau 900 VDC	26
4.1.2	Energie dissipée	27
4.2	Analyse des résultats par scénario et comparaison avec le scénario de référence	28
4.2.1	Scénario de référence	28
4.2.2	Conduite économique	28
4.2.3	Couplage avec le réseau MOB	29
4.2.4	Tension de freinage augmentée	29
4.2.5	Optimisation de la régulation du chauffage	30
4.2.6	Onduleurs	30
4.3	Pointes d'énergie	32
5	Coûts d'investissement et bilan économique	34
5.1	Coûts de mise en œuvre des pistes d'économie	34
5.2	Coût de l'énergie	35
5.3	Bilan économique	36
6	Abreviations et Références	38
6.1	Abréviations	38
6.2	Références	38

EXECUTIVE SUMMARY

Français

Les Transports publics fribourgeois Infrastructure SA (TPF) ont projeté des économies d'énergie sur leur réseau traction 900 V à courant continu. Pour y parvenir de la façon la plus efficace possible, les TPF ont mandaté ENOTRAC pour une étude énergie.

Pour cette étude, documentée dans le présent rapport, ENOTRAC a simulé l'application de diverses pistes d'économies. Les simulations permettent de connaître précisément la consommation de chacun des scénarios et, par comparaison entre eux, de déterminer l'économie d'énergie possible ainsi que le facteur de réduction des pointes de puissance. Les scénarios étudiés concernent l'exploitation (style de conduite), l'infrastructure d'approvisionnement électrique (implantation d'onduleurs, couplage avec le réseau MOB) et le matériel roulant (caractéristique du freinage régénératif, gestion du chauffage des compartiments voyageurs).

De façon générale, l'étude démontre le fort potentiel d'économie des pistes étudiées. La rentabilité, en revanche, n'est pas donnée pour toutes les pistes. Le potentiel d'économie d'un style de conduite économique de type « marche sur l'erre » est en particulier très élevé. L'économie réelle dépendra cependant fortement de l'horaire futur, en particulier de la possibilité effective d'utiliser la marge horaire.

Les simulations montrent également que le rehaussement du niveau maximal de la tension au freinage des nouveaux véhicules (actuellement en dessous du maximum autorisé, afin d'assurer la compatibilité avec le matériel roulant plus ancien) permettrait, en soi, une économie d'énergie non négligeable par l'augmentation du taux d'énergie récupérée par les autres véhicules sur le réseau. De plus, cette mesure permettrait également de tirer meilleur profit des onduleurs étudiés qui, avec le réglage actuel des véhicules, ne sont pas rentables.

Le couplage des réseaux TPF et MOB (Chemin de fer Montreux – Oberland Bernois) au niveau 900 VDC permet une économie sensible avec un investissement relativement modeste grâce à l'échange d'énergie qui est rendu possible entre les trains des deux exploitants. La mise en œuvre de ce couplage est recommandée. La gestion active du chauffage offre certaines perspectives, mais demande d'approfondir certaines questions concernant la faisabilité technique et les coûts de mise en œuvre.

Il appartient désormais aux TPF de mettre en œuvre les mesures dont la rentabilité a été démontrée et, le moment venu, de refaire le point sur celles dont le retour sur investissement n'est pas donné dans les conditions actuelles.

Deutsch

Die Freiburgische Verkehrsbetriebe Infrastruktur AG (TPF) hat sich Energieeinsparungen auf ihrem 900-V-DC-Netz zum Ziel gesetzt. TPF hat daher ENOTRAC beauftragt, mittels einer Energiestudie die nötigen Grundlagen zu erarbeiten, damit anschliessend möglichst effiziente Massnahmen formuliert und umgesetzt werden können.

Diese Studie, welche im vorliegenden Bericht dokumentiert ist, wurde mittels Simulationsrechnungen durchgeführt. Diese liefern für jede der untersuchten Massnahme den resultierenden Leistungs- und Energiebedarf. Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Szenarien erlaubt somit die Quantifizierung der eingesparten Energie als auch der Reduktion der Leistungsspitzen. Mittels

Simulationen wurden die folgenden Massnahmen untersucht: ökologischer Fahrstil, Integration von Wechselrichtern, Netzkopplung mit der MOB, Erhöhung der Spannung bei Rekuperations-Bremse sowie spannungsabhängige Regelung der Heizung des Fahrgastraums.

Die Studie zeigt und bestätigt grundsätzlich das Potential der Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs. Ein grosses Potential für Energieeinsparungen ist insbesondere durch eine energiesparende Fahrweise („coasting“) zu erwarten. Die tatsächlichen Einsparungen sind jedoch stark vom künftigen Fahrplan abhängig - im Speziellen von der Möglichkeit, die heutigen Fahrzeitreserven hierfür auch nutzen zu können.

Allein die Erhöhung der zulässigen Spannung beim Rekuperieren ermöglicht eine signifikante Energieeinsparung – aktuell ist diese Spannung für die neuen Fahrzeuge aus Kompatibilitätsgründen mit dem noch alten Rollmaterial tiefer als eigentlich möglich/sinnvoll angesetzt. Mit einer höheren Spannung kann die rekuperierte Energie wesentlich weiter transportiert werden, was dazu führt, dass tendenziell mehr potentielle Abnehmer von Bremsenergie vorhanden sind. Die Ergebnisse haben weiter gezeigt, dass ohne Erhöhung der zulässigen Spannung für das Bremsen die Massnahme "Wechselrichter" auf keinen Fall rentabel sein kann – und auch mit Erhöhung der Spannung nur unter gewissen Bedingungen.

Die Kopplung der 900 VDC Netze der TPF und der MOB (Montreux – Berner Oberland Bahn) erlaubt erhebliche Einsparungen bei relativ moderaten Investitionskosten. Durch die Kopplung entsteht die Möglichkeit eines Energieaustausches zwischen den Fahrzeugen beider Betreiber. Die Umsetzung dieser Massnahme wird daher als sinnvoll erachtet. Die aktive Regelung der Heizung des Fahrgastraums bietet zwar auch Potential, erfordert jedoch noch weitere Abklärungen zur technischen Machbarkeit und zu den Kosten für die Umsetzung.

Als nächster Schritt gilt nun die Umsetzung der Massnahmen, die sich als rentabel gezeigt haben. Massnahmen, die unter den heutigen Bedingungen nicht als profitabel erscheinen, sollen zu gegebener Zeit erneut evaluiert werden.

English

The Transports publics fribourgeois Infrastructure (TPF) aim energy saving on their 900 VDC traction network. In order to reach this objective on the most efficient way, TPF mandated ENOTRAC with an energy study. In this study, ENOTRAC simulated the implementation of different energy saving measures. The load flow simulations allow to know very precisely the energy consumption and power flow of every simulated scenario and, by comparing them to each other, to determine the potential energy saving as well as the possible reduction of power peaks. The investigated scenarios were exploring possible measures regarding the operation (driving style), the power supply infrastructure (use of substations with inverters, linking of TPF and MOB networks) and the rolling stock (rheostatic braking characteristics, power-management for heating in passenger area).

Basically, the study confirms the saving potential of the investigated measures. It particularly shows a significant saving potential with a "coasting" driving style. However, the real saving will highly depend on the future timetable, particularly the effective possibility to reuse the driving time margin.

The simulations also show that the increase of the maximal braking voltage on the new vehicles (presently below the allowed maximum, in order to insure compatibility with the older rolling stock's characteristics) could allow significant energy saving thanks to the higher amount of energy that can be recovered by other trains on the network. Moreover, this measure allows to increase significantly the energy part recovered by the inverters. As simulations show, inverters are proven to be economically not profitable under present brake settings conditions.

The electric coupling between the TPF and MOB (Montreux – Berner Oberland Bahn) networks on 900 VDC level allows energy exchange between the vehicles of both operators, thus resulting into a substantial energy saving with moderate costs. This implementation is therefore recommended. The evaluated active heating management provides certain outlook, but would require to deepen the issue regarding technical feasibility and implementation costs.

The next step is to implement the measures that were proven to be cost-effective. In due time, the measures that aren't profitable under current conditions, should be re-evaluated.

1 CADRE, INTRODUCTION ET PRINCIPES D'ÉVALUATION

1.1 Stratégie énergétique 2050 des transports publics – SETP 2050

Avec la Stratégie énergétique 2050 [3], le Conseil fédéral présente comment le système énergétique doit être transformé par étapes à l'horizon 2050. Il a, pour ce faire, confié à l'Office fédéral des transports (OFT) la mission de réaliser un programme concernant le système des transports publics. A cet effet, l'OFT dispose depuis 2014 d'un programme intitulé « Stratégie énergétique des transports publics (SETP 2050) ».

Les Transports publics fribourgeois Infrastructure SA (ci-dessous : TPF) ont fait part de leur intérêt de réaliser - dans le cadre du programme SETP 2050 - une évaluation de la consommation électrique de leur réseau de traction à courant continu 900 V à voie métrique.

A la demande de l'OFT, l'évaluation est réalisée en 2 phases :

- Phase 1 :
 - exploitation des relevés d'énergie moyenne tension 2014
 - évaluation de l'exploitation réelle
 - définition des pistes pour la phase 2
- Phase 2 :
 - simulation de l'exploitation et des mesures envisagées
 - évaluation des mesures et du rapport coût-efficacité
 - recommandations

La première phase de l'étude, réalisée en 2015, est documentée dans le rapport [1]. La seconde phase, basée sur les pistes d'économies définies dans la phase 1, est l'objet du présent rapport.

1.2 Introduction

Le réseau de traction à courant continu 900 V à voie métrique des TPF est situé dans les Préalpes fribourgeoises entre 668 m et 858 m d'altitude. La ligne principale, sujette à la présente étude, relie Palézieux à Montbovon via Bulle. D'une longueur totale de 48 km, elle est aujourd'hui alimentée par 9 sous-stations de traction (10 à l'avenir avec la nouvelle sous-station de Palézieux). Le couplage de la ligne de contact à Montbovon avec le réseau du chemin de fer Montreux Oberland Bernois (MOB) est actuellement normalement déclenché, de ce fait aucun échange d'énergie n'a lieu entre les réseaux TPF et MOB.

Une étude de l'alimentation a été menée pour le réseau continu 900 V dans la première moitié de l'année 2016 par ENOTRAC (voir [2]). Cette étude avait pour but d'évaluer l'alimentation 900 VDC actuelle en regard de l'exploitation prévue à l'horizon 2030 en considérant notamment le nouveau matériel roulant nettement plus puissant, la circulation de rames en double traction et la cadence horaire plus élevée. Pour cette étude, des simulations dynamiques de l'exploitation 2030 ont été faites. Les résultats des simulations ont été analysés pour formuler les mesures de renforcement à mettre en œuvre par les TPF afin d'assurer l'exploitation prévue sans restriction liée à l'alimentation

électrique. Ces mesures, également décrites dans [2], sont prises en compte dans la présente étude énergétique.

1.3 Principes d'évaluation

L'analyse des résultats des simulations est faite selon les trois axes suivants dans la présente étude énergie :

1. Possibilité de réutiliser l'énergie inutilisée (énergie dissipée dans les rhéostats faute de repreneurs à proximité) : quel est le potentiel total, où cette énergie est-elle perdue, comment peut-elle être réutilisée ?
2. Possibilité de réduire les pointes de puissance (puissance 15 minutes, potentiellement sujette à une tarification particulière et offrant donc un plus grand potentiel d'économie financière).
3. Réduction de la consommation.

Les scénarios de simulations sont analysés autour de ces trois axes. Autant les conséquences énergétiques (économie de kWh) que financières (économie en CHF) sont étudiées afin de déterminer le retour sur investissement des mesures proposées. Dans ce cadre, un calcul des investissements nécessaires avec indication des investissements non amortissables (sur 10 ans) est fourni.

2 RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS / ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Dans le cadre de cette étude, certaines pistes d'économies esquissées dans [1] ont été approfondies et simulées pour démontrer leur potentiel. Ce potentiel d'économie a été comparé aux investissements nécessaires pour évaluer la rentabilité de chacune des pistes. Les pistes étudiées sont les suivantes :

- Sensibilisation des conducteurs de trains à une **conduite économe** en énergie (marche sur l'erre, ou « coasting »).
- **Couplage électrique avec le réseau MOB** (Montreux - Oberland Bernois) à Montbovon (avec sous-station MOB à Montbovon équipée dans le futur d'un onduleur).
- **Augmentation de la tension admissible** sur l'ensemble du réseau voie métrique lors du freinage.
- **Modulation active du chauffage** embarqué (en fonction de la tension ligne, en particulier lors du freinage).
- **Implantation d'onduleur(s)** réseau de récupération dans les sous-stations TPF :
 - 1 onduleur seul dans la nouvelle sous-station de Palézieux
 - 1 onduleur seul dans la nouvelle sous-station de Planchy (Bulle)
 - 1 onduleur à Palézieux et 1 onduleur à Planchy.

Les scénarios d'économie sont détaillés dans la section 3.2. Pour évaluer le potentiel d'économie, les scénarios ont été comparés à un scénario de référence dont voici les caractéristiques principales :

- Exploitation et horaire 2030, avec, en journée, 2 trains par heure et direction entre Palézieux et Gruyères plus 1 train entre Palézieux et Montbovon. Durant la semaine, aux heures de pointe, les trains circulent en unités multiples (double traction).
- Réseau continu 900 V renforcé selon les mesures suggérées dans l'étude réseau [2].
- Tronçon Bulle - Broc ne faisant plus partie du réseau continu 900 V.

Les simulations montrent que dans le **scénario de référence 2030**, l'énergie totale annuelle injectée dans le réseau 900 VDC (pertes dans le réseau moyenne tension et les sous-stations non comprises) s'élève à quelques 8'900 MWh. Ceci représente une augmentation d'un facteur 2.5 par rapport à 2014 (relevés d'énergie active au niveau moyenne tension pour l'année 2014, voir [1] sections 2 et 3.3). Le nombre de tonnes-kilomètres (produit de la masse totale des convois par la distance parcourue par chacun d'entre eux) simulés pour 2030 a, quant à lui, triplé par rapport à 2014. L'énergie qui est absorbée au pantographe (cumul de tous les trains) représente 92 % de l'énergie injectée dans le réseau DC. Les 8 % restant représentent les pertes dans le réseau DC (câbles d'alimentation + ligne de contact). 34 % de l'énergie absorbée au pantographe est transformée en énergie mécanique servant à vaincre la résistance à l'avancement (résistance de l'air, roulement, courbes). Les 66 % restants sont utilisés pour le chauffage / la climatisation (13 %) ¹, les besoins propres de la traction et les pertes (28 %) ² ou dissipées en freinage rhéostatique (21 %) ou mécanique (4 %). 54 % de l'énergie électrique générée au freinage potentiellement disponible

¹ Puissance admise en entrée qui se retrouve en sortie, voir section 3.1.2 et sa remarque.

² Ces 28% sont composés pour moitié (14%) des pertes (convertisseurs, moteurs,...) puisque le rendement de la chaîne de traction varie entre 40 et 90 % (selon le point de fonctionnement) et pour l'autre moitié (14%) des auxiliaires véhicules (ventilation, compresseurs, pompes,...), voir section 3.1.2.

(énergie rhéostatique + réinjectée) est dissipée dans les rhéostats. Cette énergie inutilisée représente le potentiel maximum d'énergie qui peut théoriquement être économisée par la mise en œuvre de mesure d'économie.

Le Tableau 2-1 donne le bilan issu des simulations avec l'énergie annuelle consommée dans le réseau 900 VDC ainsi que, pour chaque scénario d'économie, la différence absolue et relative par rapport au scénario de référence, c'est-à-dire l'économie d'énergie et financière possible par la mise en œuvre des mesures correspondantes.

Il faut noter que la combinaison de pistes ne permet pas nécessairement d'additionner linéairement les gains de chacune d'elle prise séparément.

Scénario	Energie consommée au niveau du réseau 900 VDC [kWh]	Différence absolue par rapport au sc. de référence (économie) [kWh]	Différence relative par rapport au sc. de référence (économie) [%]	Economie annuelle par rapport au sc. de référence au prix actuel de l'énergie [kCHF/an]
E01 Référence	8'932'380			
E02 Conduite économique (coasting)	7'629'967	1'302'413	14.6% / 5%³	177 / 50
E03 Couplage MOB	8'828'305	104'075	1.2%⁴	6
E04 Tension freinage 1'200 V	8'682'552	249'828	2.8%	34
E05 Tension freinage 1'350 V	8'608'367	324'013	3.6%	44
E06 Modulation chauffage	8'663'821	268'560	3.0%	36
E07 Onduleur Palézieux	8'704'881	227'499	2.5%⁴	8
E08 Onduleur Bulle (Planchy)	8'587'230	345'150	3.9%⁴	12
E09 Onduleurs Palézieux + Bulle	8'369'914	562'466	6.3%⁴	19

Tableau 2-1 Energie annuelle consommée au niveau du réseau 900 VDC pour chaque scénario avec la différence absolue et relative par rapport au scénario de référence et économie annuelle financière correspondante (au prix actuel de l'énergie, sans prise en compte des investissements nécessaires) ; pour les scénarios avec onduleur ou couplage avec le réseau MOB (E03, E07, E08 et E09), l'énergie consommée représente la différence entre l'énergie annuelle injectée et l'énergie reprise du réseau 900 V continu

La **conduite économique telle que simulée** (marche sur l'erre permettant d'utiliser **toute** la marge de l'horaire 2030 par rapport au temps technique minimal entre deux stations) permettrait d'économiser théoriquement presque 15 % d'énergie. Cette économie dépend cependant des possibilités réelles d'utiliser cette marge horaire : l'horaire 2030 présentera-t-il effectivement autant de marge ? Quelle est l'influence des retards éventuels forçant les conducteurs à rouler en marche tendue ? Le style de conduite actuel est-il déjà en partie économique (ce qui réduirait le potentiel d'économie restant) ? Etc. En outre, l'investissement nécessaire est fortement dépendant de la mise en œuvre : d'une « simple » sensibilisation des conducteurs à un système coûteux de gestion du trafic, ce dernier permettant de se rapprocher de l'optimisation atteinte avec les simulations. Sans

³ Selon la direction donnée à la mise en œuvre de cette piste, voir explications sous le tableau et en section 4.2.2.

⁴ Economie fortement limitée par la faible tension de freinage des véhicules, voir explications ci-dessous et en section 4.2.6.4.

gros investissements techniques, l'économie escomptée par une sensibilisation des conducteurs de trains de devrait guère dépasser les 5 %, notamment par le fait que la ligne, majoritairement à voie unique, limite la flexibilité de l'exploitation. Mais dans tous les cas, l'économie reste significative, même sans assistance technique. Il est donc recommandé de mettre en œuvre ce qui est possible pour sensibiliser / former le personnel de conduite et exploiter au moins partiellement la marge de manœuvre disponible au niveau de l'horaire, et ceci déjà pour l'horaire actuel. Parallèlement à cela, nous conseillons d'approfondir l'étude des opportunités et des coûts dans une étude plus détaillée une fois les grandes lignes de mise en œuvre des autres pistes d'économie connues.

Le **couplage du réseau TPF avec celui du MOB** à Montbovon permet de récupérer un peu plus de 1 % de l'énergie de traction. Au vu du faible investissement nécessaire à sa mise en œuvre, il est recommandé de réaliser ce couplage au plus vite, dans la mesure où les prérequis techniques nécessaires sont réunis. Une économie plus grande peut être attendue en combinant ce couplage à la piste d'augmentation de la tension de freinage sur les véhicules (voir explications concernant les onduleurs ci-dessous).

L'**augmentation de la tension de freinage** permet, selon la tension maximale visée, d'économiser 3 à 4 % d'énergie. Cette augmentation n'est actuellement pas réalisable, en raison de la présence sur le réseau de véhicules plus anciens qui ne sont pas prévus pour supporter de telles tensions. A terme, cette augmentation de la tension de freinage à 1'200 V doit cependant absolument être envisagée. Une augmentation au-delà de la tension maximale admise de 1'200 V ($U_{\max 2}$ selon les DE-OCF [5]) doit être discutée avec l'Office Fédéral des Transports (OFT).

Des simulations de test (supplémentaires) combinant certaines mesures entre elles, montrent que l'augmentation de la tension de freinage augmente massivement la part d'énergie qui peut être récupérée par la présence éventuelle d'onduleurs sur le réseau.

La **modulation du chauffage** permet d'économiser jusqu'à 3 % d'énergie. Cette valeur représente cependant un cas idéal, qui pourrait s'avérer inférieure dans la réalité (en fonction de la température effective dans le compartiment voyageurs, qui ne peut être prise en compte dans les simulations sans modélisation thermique détaillée du véhicule). Nous recommandons d'étudier les coûts de mise en œuvre de cette piste et de les comparer à l'économie maximale donnée ici pour décider du bien-fondé d'études thermiques plus détaillées avant de passer à la réalisation.

Il est à noter que l'économie envisageable pourrait se trouver réduite par la mise en œuvre d'autres mesures (particulièrement l'augmentation de la tension de freinage).

L'installation d'**onduleur(s)** permet une économie qui dépend de leur emplacement. L'emplacement de Palézieux (fortes pentes, mais situé en bout de ligne limitant le « rayon d'action » de l'onduleur) permet une économie d'énergie de 2.5 % et celui de Bulle de près de 4 % avec les caractéristiques de véhicules considérées. Les investissements relativement importants et la différence entre le prix de l'énergie à l'achat (y.c. distribution et taxes) et à la reprise excluent cependant une rentabilité à moyen terme : aucune des solutions étudiées ne s'avère rentable sur 10 ans avec les prix actuels de l'énergie (voir section 5.2 à ce sujet). Dans les conditions simulées, avec le réglage actuel des véhicules, il faudrait près de 50 ans pour rembourser l'investissement de départ à Palézieux et 35 ans pour Bulle.

Cependant, des simulations supplémentaires « test » combinant un onduleur avec l'augmentation de la tension de freinage montrent que cette augmentation est une condition essentielle pour tirer pleinement profit des onduleurs. Avec une augmentation de la tension à 1'200 V, il est possible de récupérer 2 à 3 fois plus d'énergie et d'augmenter ainsi massivement les chances d'amortir un/des onduleur(s).

Dans les conditions actuelles (réglage des véhicules à 1'085 V), l'installation d'onduleurs n'est pas recommandée. Si la tension de freinage peut être augmentée, les pistes incluant des onduleurs doivent absolument être reprises dans des simulations définitives combinant les pistes réellement mises en œuvre afin de démontrer leur rentabilité.

.....

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden gewisse der in [1] skizzierten Möglichkeiten zur Einsparung von Energie vertieft betrachtet. Mittels Simulationen wurde das Potential dieser Möglichkeiten bestimmt und zur Beurteilung der Rentabilität wurden die entsprechenden Einsparungen den dazu nötigen Investitionen gegenüber gestellt. Folgende Optionen zur Energieeinsparung wurden untersucht:

- *Sensibilisierung der Lokomotivführer für eine **energiesparende Fahrweise** („coasting“).*
- ***Kopplung des elektrischen Netzes mit dem Netz der MOB** (Montreux – Oberland Bernois) in Montbovon (mit einer zukünftig mit einem Wechselrichter ergänzten Gleichrichterstation in Montbovon).*
- *Auf dem ganzen Meterspur-Netz **Erhöhung der zulässigen Spannung** beim Rückspeisen ins Kettenwerk (Rekuperation beim Bremsen).*
- ***Aktive Regelung der Heizung/Klimatisierung** der Fahrzeuge in Funktion der Fahrdrachtspannung, im Speziellen während den Bremsvorgängen.*
- ***Einbau von Wechselrichtern** in neu geplanten Gleichrichterstationen der TPF mit den Varianten:*
 - *1 Wechselrichter in der neuen Gleichrichterstation Palézieux*
 - *1 Wechselrichter in der neuen Gleichrichterstation Planchy (Bulle)*
 - *Je 1 Wechselrichter in Palézieux und Planchy.*

Die obigen Energiespar-Szenarien sind im Abschnitt 3.2 detailliert beschrieben. Für die Bestimmung des Energiesparpotentials wurden die Szenarien mit einem Referenzszenario verglichen. Dessen Haupteigenschaften sind:

- *Betrieb und Angebot nach Fahrplankonzept 2030: Täglich zwei Züge pro Stunde und Richtung zwischen Palézieux und Gruyères und ein Zug pro Stunde und Richtung zwischen Palézieux und Montbovon. Werktags (Montag-Freitag) verkehren die Züge während der Hauptverkehrszeit in Doppeltraktion.*
- *Das 900-V-DC-Netz ist gemäss den Vorschlägen der Netzstudie [2] verstärkt*
- *Der Abschnitt Bulle – Broc ist nicht mehr Teil des 900-V-DC-Netzes.*

*Die Simulationen zeigen, dass im **Referenzszenario 2030** rund 8900 MWh Energie in das 900-V-DC-Netz eingespeist werden (Verluste im Mittelspannungsnetz und in den Gleichrichterstationen nicht berücksichtigt). Dies ist eine Zunahme um den Faktor 2.5 im Vergleich zu 2014 (Ablesewerte des Wirkenergiebezugs auf Mittelspannungsniveau im Jahr 2014, siehe [1] Abschnitte 2 und 3.3). Die Zahl der Bruttotonnen (Brutto-Massen der verkehrenden Züge multipliziert mit der zurückgelegten Distanz; aufsummiert für alle Züge) gemäss dem Fahrplankonzept 2030 hat sich ihrerseits im Vergleich zu 2014 verdreifacht. Die ab Fahrleitung bezogene Energie (kumuliert über alle Züge) entspricht 92 % der ins DC-Netz eingespeisten Energie. Die restlichen 8 % sind die Verluste im DC-Netz (Speiseleitungen und Fahrleitung). 34 % der am Stromabnehmer bezogenen Energie wird in mechanische Energie zur Überwindung des Fahrwiderstands (Luftwiderstand, Rollwiderstand,*

Kurvenwiderstand) gewandelt. Die restlichen 66 % werden für Heizung/Klimatisierung (13 %)⁵, Traktions-Hilfsbetriebe und –Verluste (28 %)⁶ benötigt oder werden beim rheostatischen (21 %) und mechanischen Bremsen (4 %) dissipiert. 54 % der beim Bremsen generierten und verfügbaren elektrischen Energie (Summe der rheostatischen und der rückgespeisten Energie) wird im Referenzszenario in den Bremswiderständen "verheizt". Diese nicht genutzte Energie stellt das maximale Potential der Energie dar, die theoretisch mit Massnahmen eingespart werden kann.

Tabelle 2-1 zeigt für alle simulierten Szenarien die jährlich bezogene Energie für das 900-V-DC-Netz, die absolute als auch relative jährliche Einsparung an Energie bezogen auf die Referenzvariante und daraus abgeleitet die jährlichen finanziellen Einsparungen, welche mit den entsprechenden Massnahmen zu erwarten sind (ohne Einrechnung der Investitionskosten).

Anmerkung: Die Umsetzung mehrerer Massnahmen führt nicht zu Einsparungen entsprechend der Addition der Einsparungen der einzelnen Massnahmen.

Szenario	Für das 900-V-DC-Netz bezogene Energie (Netto) [kWh]	Absolute Differenz zum Referenzszenario [kWh]	Relative Differenz zum Referenzszenario [%]	Jährliche finanzielle Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario [kCHF/an]
E01 Referenz	8'932'380			
E02 energiesparende Fahrweise (coasting)	7'629'967	1'302'413	14.6% / 5% ⁷	177 / 50
E03 Netzkopplung mit MOB	8'828'305	104'075	1.2% ⁸	6
E04 zulässige Spannung beim Bremsen 1'200 V	8'682'552	249'828	2.8%	34
E05 zulässige Spannung beim Bremsen 1'350 V	8'608'367	324'013	3.6%	44
E06 Spannungsabhängige Regelung Heizung/Klima.	8'663'821	268'560	3.0%	36
E07 Wechselrichter Palézieux	8'704'881	227'499	2.5% ⁸	8
E08 Wechselrichter Bulle (Planchy)	8'587'230	345'150	3.9% ⁸	12
E09 Wechselrichter Palézieux + Bulle	8'369'914	562'466	6.3% ⁸	19

Tabelle 2-1 : Jährliche bezogene Energie des 900-V-DC-Netzes für alle untersuchten Szenarien mit der absoluten und relativen Differenz zum Referenzszenario sowie der jährlichen finanziellen Einsparung (basierend auf aktuellen Energiepreisen sowie ohne Berücksichtigung der entsprechend nötigen Investitionen). Für die Szenarien mit Wechselrichter oder Netzkopplung mit MOB (E03, E07, E08 und E09) entspricht die bezogene Energie der Differenz zwischen der ins 900-V-DC-Netz eingespeisten und der daraus ins Mittelspannungsnetz rückgespeisten Energie.

⁵ Basierend auf einer angenommenen Leistung für HLK, welche sich im Ergebnis 1:1 niederschlägt (siehe dazu Abschnitt 3.1.2).

⁶ Diese 28 % sind ihrerseits zur einen Hälfte (14 %) Verluste (der Stromrichter, der Motoren, ...) und zur anderen Hälfte (14 %) der Energiebedarf der Hilfsbetriebe (Ventilation, Kompressoren, Pumpen,...). Anmerkung: der Wirkungsgrad der Traktion variiert je nach Arbeitspunkt zwischen 40 % und 90 %. Siehe auch Abschnitt 3.1.2.

⁷ Variiert je nach Umsetzung dieser Massnahmen, siehe nachfolgende Erläuterungen und Abschnitt 4.2.2

⁸ Die Einsparungen sind stark durch die Begrenzung auf die geringe Spannung beim Rekuperieren limitiert. Siehe nachfolgende Erläuterungen und Abschnitt 4.2.6.4

Die in der Simulation angewendete energiesparende Fahrweise (coasting unter Ausnutzung aller Fahrzeitreserven des Fahrplans 2030 zwischen zwei Stationen) erlaubt im Vergleich zur Fahrweise einer Fahrt mit minimaler technischer Fahrzeit eine (theoretische) Einsparung von fast 15 % Energie. Diese Einsparung hängt jedoch stark von den tatsächlich nutzbaren Fahrzeitreserven im Fahrplan 2030 ab: Enthält der Fahrplan tatsächlich so grosse Fahrzeitreserven? Welches sind die Einflüsse allfälliger Verspätungen, die den Lokomotivführer zu straffer Fahrweise zwingen? Ist der Fahrstil bereits heute energetisch vorteilhaft (was das noch einsparbare Potential senkt)? Etc. Zudem sind die nötigen Investitionen zur Umsetzung der Massnahme stark von der Art der Umsetzung abhängig: Die Spanne reicht von einer „einfachen“ Sensibilisierung für die energetisch vorteilhafte Fahrweise bis zu einem technisch aufwändigen Verkehrsleitsystem. Letzteres würde die grösste Annäherung an das Optimum der Simulationen erlauben. Ohne grosse technische Unterstützung dürften die Einsparungen mit blosser Sensibilisierung der Lokomotivführer kaum mehr als 5 % Einsparungen ermöglichen, insbesondere da der überwiegende Teil der Strecke einspurig ist und nur geringe betriebliche Flexibilität erlaubt. Trotzdem ist das Einsparpotential auch ohne technische Unterstützung signifikant. Es wird daher empfohlen die Ausbildung und Sensibilisierung der Lokomotivführer zu initiieren und so zumindest einen Teil des Potentials der Fahrzeitreserven zu nutzen – dies auch bereits für den aktuellen Fahrplan und Betrieb. Parallel dazu schlagen wir vor, die Studie des Potentials und der Kosten zu vertiefen, sobald die generelle Stossrichtung weiterer Massnahmen zur Energieeinsparung bekannt ist.

Die **Kopplung des Netzes der TPF in Montbovon mit demjenigen der MOB** erlaubt eine Einsparung von etwas mehr als 1 % der Traktionsenergie. Unter dem Gesichtspunkt der geringen notwendigen Investition wird empfohlen, diese Massnahme nach der Schaffung der technischen Voraussetzungen so bald als möglich umzusetzen. Eine noch höhere Einsparung kann erwartet werden, wenn diese Netzkopplung mit der Massnahme der höheren Rückspeisespannung kombiniert wird (siehe auch die nachfolgende Erklärung zu Wechselrichtern).

Die **Erhöhung der zulässigen Spannung beim Rekuperieren** erlaubt je nach angestrebter Spannung Energieeinsparungen von 3 bis 4 %. Im Moment ist aus Kompatibilitätsgründen mit dem älteren Rollmaterial des 900 VDC Netzes eine solche Erhöhung nicht möglich. Mittelfristig sollte jedoch eine Erhöhung der zulässigen Spannung beim Rekuperieren auf 1'200 V unbedingt angestrebt werden. Eine Erhöhung über 1'200 V ($U_{\max 2}$ gemäss AB-EBV [5]) müsste mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) abgesprochen werden.

Zusätzliche Testsimulationen mit Kombinationen von Massnahmen haben gezeigt, dass die Erhöhung der zulässigen Spannung beim Rekuperieren das Einsparpotential beim Einsatz eines Wechselrichters als Massnahme deutlich erhöht.

Eine **aktive spannungsabhängige Regelung der Heizung** erlaubt Energieeinsparungen von bis zu 3 %. Dieser Wert stellt jedoch einen Idealfall dar, der in Realität wohl nicht erreicht wird (aufgrund der effektiven Temperatur in den Fahrzeugabteilen, einer Grösse, welche in den Simulationen ohne eine detaillierte thermische Modellierung der Fahrzeuge berücksichtigt werden kann). Es wird empfohlen, die Kosten dieser Massnahme und den Vergleich mit den hier ausgewiesenen Einsparungen detailliert abzuklären, bevor allenfalls eine vertiefte thermische Studie und die Umsetzung realisiert werden.

Anmerkung: Die vorausgesagte Energieeinsparung dieser Massnahme dürfte durch Kombination mit anderen Massnahmen – insbesondere die Spannungserhöhung bei der Rekuperation – reduziert ausfallen.

Der Umfang der Energieeinsparungen durch den **Einsatz von Wechselrichtern** hängt vom Ort der Installation ab. Der Standort Palézieux (groses Gefälle, die Lage am Ende des Netzes schränkt jedoch den „Wirkungsbereich“ des Wechselrichters ein) erlaubt eine Energieeinsparung von 2.5 % und derjenige von Bulle eine solche von fast 4 % - im Zusammenspiel mit den Charakteristiken der

betrachteten Fahrzeuge. Die relativ hohen Investitionen und die Differenz zwischen dem Kauf der Energie (inklusive Netznutzungskosten und weitere Abgaben) und dem Erlös bei der Rückspeisung schliessen eine mittelfristige Amortisation aus. Keine der untersuchten Lösungen mit Wechselrichtern erweist sich bei den aktuellen Energiepreisen (siehe Abschnitt 5.2) innerhalb von 10 Jahren als rentabel. Unter den Bedingungen der Simulationen, insbesondere der heutigen Fahrzeugeigenschaften beim Rekuperieren, würde eine Amortisierung der Initialinvestitionen für den Standort Palézieux fast 50 Jahre und für den Standort Bulle 35 Jahre dauern.

Zusätzliche Testsimulationen haben jedoch gezeigt, dass bei der Kombination von Wechselrichter(n) mit der Erhöhung der zulässigen Spannung beim Rekuperieren, diese Spannungserhöhung einen sehr wichtigen positiven Einfluss hat. Mit der Erhöhung der zugelassenen Spannung beim Rekuperieren auf 1'200 V wird es möglich, dass 2 bis 3 Mal mehr Energie rekuperiert werden kann und dadurch die Chancen zur Amortisation einer Lösung mit Wechselrichter(n) stark erhöht werden.

Unter den aktuellen Bedingungen (Fahrzeuge speisen maximal bis 1'085 V Fahrleitungsspannung zurück) wird die Installation von Wechselrichtern nicht empfohlen. Falls jedoch die Spannung beim Rekuperieren erhöht werden kann, so müssen die Massnahmenvarianten mit Wechselrichtern unbedingt nochmals detailliert betrachtet werden.

3 SCÉNARIOS D'ÉTUDE

L'étude est menée par comparaison des différents scénarios d'études (qui se basent sur les pistes formulées à l'issue de la phase 1, voir [1]) avec un scénario de référence. Ce scénario de référence, décrit ci-dessous, est basé sur les informations fournies par TPF quant à l'exploitation de la ligne sur le long terme (horizon 2030) et sur les mesures formulées dans l'étude d'alimentation [2].

3.1 Scénario de référence

3.1.1 Exploitation

L'exploitation est modélisée d'après l'horaire prévu pour 2030 fourni par les TPF [4] et montré dans la Figure 3-1 ci-dessous.

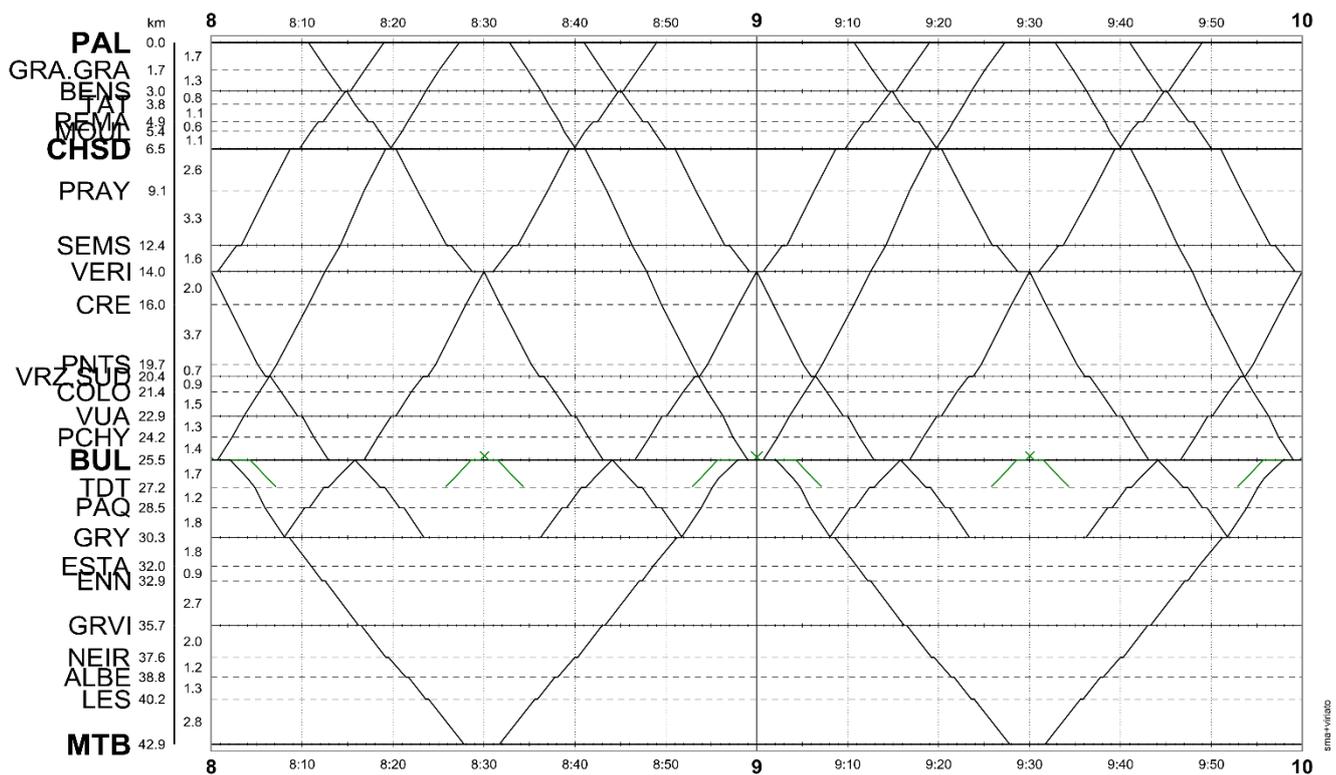


Figure 3-1 Horaire de base pour l'étude, extrait de [4]. Les traits verts représentent les trains circulant sur la voie normale du tronc commun entre Bulle et la Tour-de-Trême (pas considérés ici)

En journée, 1 train par heure et direction circule entre Palézieux et Montbovon et 2 trains par heure et direction circulent, en plus, entre Palézieux et Gruyères. Au total, se sont donc 3 trains par heure qui circulent dans chaque direction jusqu'à Gruyères. Durant la semaine, aux heures de pointe, les trains circulent en unités multiples (UM, double traction) selon le Tableau 3-1. Le week-end, l'horaire reste le même, mais tous les trains circulent cependant en unité simple.

Les trains ne sont en moyenne remplis qu'à 20 % en dehors des heures de pointes. Entre Bulle et Palézieux, le taux d'occupation est de 100 % durant les heures de pointes (HP) du matin ainsi qu'entre Palézieux et Bulle durant les HP du soir. Le week-end, il est admis que tous les trains sont remplis à 50 % sur la partie « touristique » de la ligne, entre Bulle et Montbovon et à 25 % sur le reste de la ligne.

Plage horaire [h]	Palézieux - Gruyères		Palézieux - Montbovon		Taux d'occupation des trains	
	cadence	compos.	cadence	compos.	PAL → MTB	MTB → PAL
00:00 - 05:00	-	-	-	-	-	-
05:00 - 06:00	1h	US	1h	US	20%	20%
06:00 - 08:30 (HP du matin)	30 min	UM	1h	UM	20%	BUL-PAL: 100% reste: 20%
08:30 - 16:00	30 min	US	1h	US	20%	20%
16:00 - 19:00 (HP du soir)	30 min	UM	1h	UM	PAL-BUL: 100% reste: 20%	20%
19:00 - 20:00	30 min	US	1h	US	20%	20%
20:00 - 24:00	1h	US	1h	US	20%	20%

Tableau 3-1 Cadence des trains et compositions (en semaine) entre Palézieux (PAL) et Montbovon (MTB). Le nombre total de trains sur la première partie de la ligne (Palézieux - Gruyères) est un cumul des deux cadences. Le week-end, les cadences indiquées restent les mêmes, mais tous les trains circulent en US (unités simples).

3.1.2 Auxiliaires, chauffage et climatisation

Selon les données du véhicule mises à disposition par Stadler, chaque rame dispose d'une puissance de chauffage « de confort » (uniquement compartiment voyageur et postes de conduite, chauffages attelage, pare-brise etc. non inclus) de **100 kW**. Cette puissance est principalement fournie par le convertisseur auxiliaire (HBU, fournissant le 400 V / 50 Hz), même si les convecteurs de la voiture intermédiaire sont alimentés depuis la ligne de train en 900 V continu.

Les puissances installées ne sont cependant pas consommées en permanence. Des enregistrements faits par Stadler en mars et en juillet 2016 sur les véhicules TPF en circulation sur la ligne ont permis de confirmer les valeurs de consommation suivantes pour les auxiliaires :

- Puissances des auxiliaires de **confort** (chauffage / climatisation) :
 - Été / hiver : **37 %** de la puissance installée
 - Printemps / automne : **7 %** de la puissance installée
- Puissances des auxiliaires **restants** (compresseurs, pompes, ventilation, etc.) : **25 kW**.

Ainsi, pour les simulations, une puissance moyenne de 37 kW est admise pour l'été et l'hiver (« haute saison » au niveau des auxiliaires) et de 7 kW pour le printemps et l'automne (« entre-saison ») en plus des 25 kW qui restent constants, indépendamment de la saison.

Tous les scénarios sont ainsi simulés en « haute saison » (été/hiver) et en « entre-saison » (printemps/automne) et consolidés afin d'obtenir une moyenne annuelle représentative (à raison de 6 mois d'entre-saison et 6 mois de haute saison).

Remarque : les valeurs utilisées restent des hypothèses. Même si ces hypothèses, basées sur notre expérience, ont pu être vérifiées par les mesures faites par Stadler sur plusieurs jours, cela reste approximatif en l'absence de mesures effectives sur le long terme (> 1 année). Les puissances admises ici sont des données d'entrée des simulations qui se retrouvent « telles quelles » en sortie et ne font pas l'objet de l'étude⁹.

3.1.3 Réseau

Le réseau renforcé (scénario F000) de l'étude [2] sert de base à l'étude énergétique. Il s'agit du réseau 900 V, en mode normal, renforcé. Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- Les économies d'énergie sont significatives sur le long terme. Pour cette raison, il est nécessaire de ne pas considérer l'état du réseau actuel alors que les mesures de renforcement (indispensables pour continuer à exploiter) sont connues.
- Réseau 900 V car un passage à 1500V, possible, est pour l'instant trop hypothétique et éloigné dans le temps pour être pris en compte.
- La nouvelle sous-station de Palézieux recommandée dans l'étude d'alimentation sera réalisée (PAP prévue pour 2017), portant le nombre total de sous-stations à 10.
- TPF prévoit de mettre également en œuvre, au fur et à mesure des travaux faits sur la ligne, les autres mesures recommandées dans l'étude (section des conducteurs, puissance des sous-stations renouvelées, ...).

Selon les indications des TPF, les écarts suivants ont cependant été pris en compte dans l'étude par rapport au scénario F000 de [2] (mesures de renforcement qui ne seront pas mises en œuvre telles quelles) :

- La sous-station d'Albeuve a été remplacée par une nouvelle sous-station à **Neirivue**, avec une puissance nominale de **1'250 kVA** (au lieu des 2000 A recommandée dans [2]).
- Sur la base de son âge, la sous-station de la **Tour-de-Trême actuelle** (1998) reste en fonction et n'est pas renouvelée. Elle est donc prise en compte dans l'étude avec sa puissance nominale actuelle de 1065 kVA (au lieu de 2000 A recommandés dans [2] pour une nouvelle sous-station).

⁹ Pour véritablement approfondir la question, un modèle thermique du véhicule serait nécessaire. Un tel modèle, qui sort du scope de la présente étude, devrait prendre en compte la répartition des corps de chauffage, la diffusion de la chaleur, le nombre de passagers, l'isolation, l'épaisseur des vitrages, le temps d'ouverture des portes, etc.

3.2 Scénarios d'économie

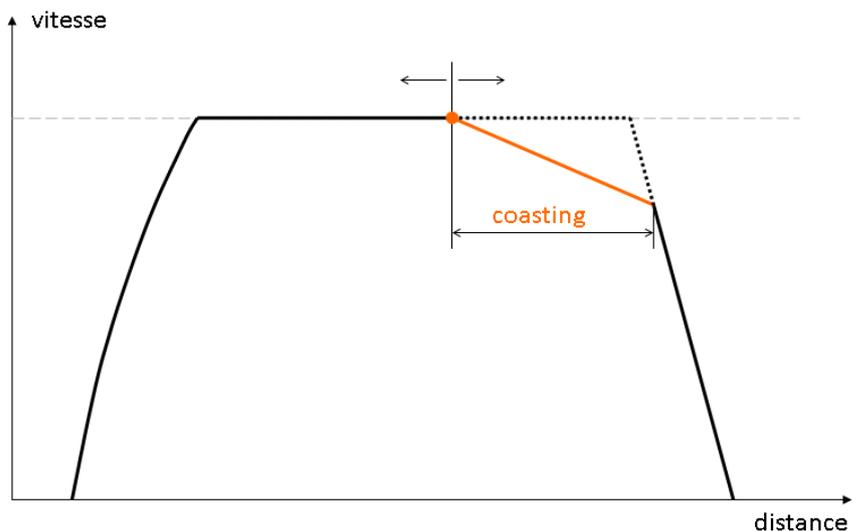
La phase 1 de l'étude énergie propose des pistes d'analyse pour la phase 2 (voir Tableau 6-1 page 37 de [1]). Ces pistes ont été évaluées par les TPF quant à leur pertinence et possibilités de mise en œuvre pour aboutir aux scénarios finalement étudiés du Tableau 3-2 ci-dessous.

Mesure selon [1]	ID dans [1]	Précisions / mise en œuvre	Section
Sensibilisation des conducteurs de trains à une conduite économe en énergie	1	Réinvestir la réserve horaire dans une conduite plus économique	3.2.1
Couplage électrique avec le réseau MOB à Montbovon (avec sous-station MOB à Montbovon équipée dans le futur d'un onduleur réseau de récupération)	6		3.2.2
Augmentation de la tension admissible sur l'ensemble du réseau voie étroite lors du freinage	7		3.2.3
Modulation active du chauffage embarqué (en fonction de la tension ligne, en particulier lors du freinage)	11		3.2.4
Implantation d'onduleur(s) réseau de récupération dans les sous-stations TPF	12	Onduleurs à Palézieux et Bulle	3.2.5

Tableau 3-2 Scénarios d'étude avec renvoi à la section les décrivant

3.2.1 Conduite économique (coasting)

Dans ce scénario, le profil de vitesse est optimisé par la recherche du meilleur point de coasting avant chaque station (laisser rouler le train au lieu de maintenir la vitesse maximale et freiner au dernier moment). Pour ce faire, toute la réserve d'horaire est utilisée pour passer d'une marche tendue (« flat-out », qui consiste à tendre en tout temps vers le profil de vitesse maximale) à une marche sur l'erre (« coasting », qui consiste à laisser rouler le train traction coupée une fois la vitesse maximale atteinte). Par rapport à la marche tendue utilisée dans le scénario de référence, la marche sur l'erre permet d'économiser du courant de traction par ex. à l'approche d'un point d'arrêt ou d'une zone à vitesse réduite et surtout de limiter les pointes d'énergie au freinage (et donc le freinage mécanique et/ou rhéostatique).

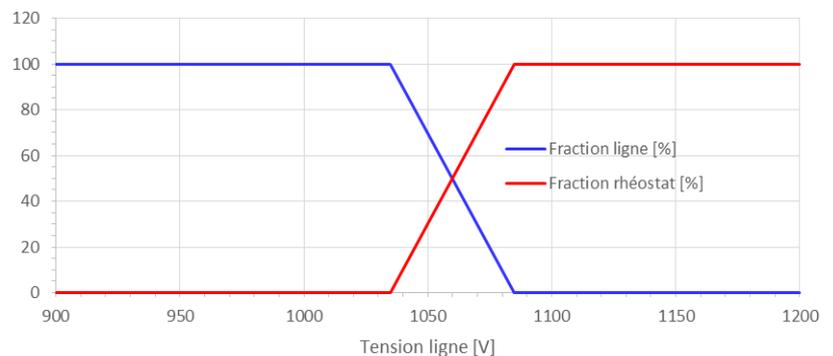


3.2.2 Couplage avec le réseau MOB

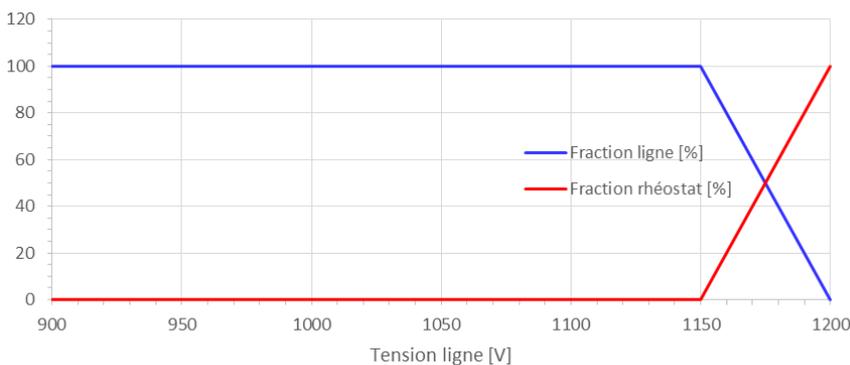
Les réseaux d'alimentation en courant de traction du MOB (Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois) et des TPF sont aujourd'hui électriquement séparés en gare de Montbovon. Un projet existe pour relier les deux réseaux. Cette liaison, faite via la barre collectrice de la sous-station de Montbovon (qui appartient au MOB mais alimente aussi la ligne TPF), est effective dans ce scénario d'étude, ce qui permet un échange d'énergie entre les deux réseaux. Du point de vue des TPF, la principale économie réside dans la récupération de l'énergie de freinage par l'onduleur dont la sous-station de Montbovon sera équipée. Ce scénario permet donc de démontrer l'économie d'énergie qui pourra être atteinte par la mise en œuvre du couplage le moment venu.

3.2.3 Tension de freinage augmentée

Pour des raisons de compatibilité avec le matériel roulant actuel (anciennes rames), les rames sont actuellement réglées pour réinjecter le courant de freinage dans la ligne de contact jusqu'à **1'085 V** uniquement. Au-delà de cette tension, l'énergie est dissipée dans les rhéostats de freinage comme le montre le diagramme de la figure ci-contre.



Selon les Dispositions d'exécution de l'Ordonnance sur les chemins de fer (DE-OCF [5]), DE 44c, § 5.1.3, une variation de tension de +/- 30 % est admissible, ce qui signifie, pour un système dont la tension nominale est de 900 V, que la tension de ligne peut monter jusqu'à **1'200 V**.



Dans ce scénario d'étude, le réglage de la transition ligne / rhéostats est optimisé pour récupérer le plus d'énergie possible dans les limites des DE-OCF (voir diagramme dans la figure ci-contre). En effet, plus la tension de ligne est élevée au freinage, plus le rayon dans lequel des consommateurs potentiels peuvent récupérer l'énergie est large. C'est ainsi

qu'un plus grand nombre de repreneurs potentiels existe et que globalement, une fraction plus grande de l'énergie de freinage peut être récupérée au lieu d'être dissipée.

Une variante de ce scénario consiste à laisser monter la tension de freinage à **1'350 V** (tension nominale + 50 %) au lieu de 1'200 V (respectivement 1'085 V dans le scénario de référence). Cette tension, qui se situe au-delà de la tension maximale autorisée par les DE-OCF [5], a été proposée comme variante par l'OFT directement.

3.2.4 Optimisation de la régulation du chauffage

Actuellement, le chauffage dans les rames est commandé de façon « classique », en fonction de la température qui règne dans le compartiment voyageur ou le poste de conduite uniquement. Si la consigne donnée par le thermostat intervient « par hasard » en phase de freinage, cette énergie proviendra en priorité de l'énergie récupérée par la chaîne de traction. Dans le cas contraire, elle est tirée de la ligne de contact. L'idée de ce scénario consiste à asservir le chauffage du compartiment voyageur et des postes de conduite à la tension de ligne afin de profiter de chauffer au moment qui est le plus propice du point de vue énergétique (freinage du train en question ou autre train à proximité en phase de freinage).

Le principe est illustré dans la Figure 3-2 ci-dessous. Dans ce scénario, l'énergie de chauffage n'est pas fournie par une puissance moyenne sur toute la course comme dans le scénario de référence (voir section 3.1.2). Au lieu de cela, c'est la puissance maximale (installée) qui est fournie lorsque la tension de ligne est supérieure à un certain seuil. Ce seuil est fixé de façon à ce que l'énergie fournie (utile) sur une course soit la même que dans le scénario de référence. Ainsi, l'énergie utile au chauffage est identique (pas de diminution du confort). L'économie réside uniquement dans la provenance de l'énergie (maximisation de la part provenant du freinage régénératif).

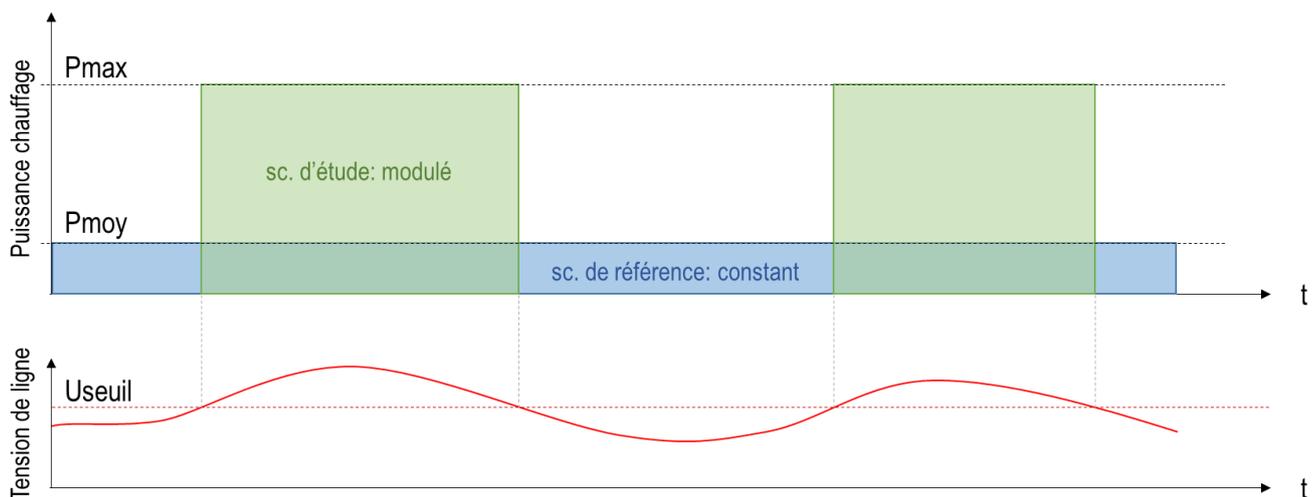


Figure 3-2 Illustration du principe de modulation de l'énergie de chauffage. Le chauffage modulé est enclenché lorsque la tension de ligne est supérieure au seuil défini (U_{seuil}). Le seuil est fixé de sorte à ce que la surface sous la courbe bleue (chauffage moyen constant, sc. de référence) soit égale à celle sous la courbe verte (chauffage modulé, sc. d'étude)

3.2.5 Onduleurs dans les sous-stations de Palézieux et Bulle

Ces scénarios intègrent la présence d'un onduleur en parallèle du redresseur dans la sous-station de Palézieux et/ou de Planchy (Bulle) permettant de réinjecter l'énergie de freinage dans le réseau moyenne tension. Le choix des emplacements a été fait en collaboration avec les TPF, en considération des aspects énergétiques (topologie de la ligne, distance suffisante entre les deux emplacements) et pratiques (place à disposition dans les locaux).

Plusieurs simulations sont ici effectuées pour vérifier la rentabilité d'une seule installation (si oui, laquelle) ou des deux (fonctionnement simultané).

3.3 Récapitulatif des scénarios de simulation

Pour chaque scénario (de référence ou d'économie), 4 simulations sont faites pour représenter :

- journée de **semaine** et **week-end** (voir exploitation section 3.1.1)
- journée de **haute saison** et **entre-saison** (voir auxiliaires section 3.1.2).

Les scénarios sont ensuite consolidés sur une année avec :

- 5 jours de semaine et 2 jours de week-end par semaine, 52 semaines par année ;
- 6 mois de moyenne saison et 6 mois de haute saison par année.

Les scénarios et simulations sont listés dans le Tableau 3-3 ci-dessous. Toutes les simulations ont été faites avec un intervalle de temps de 1 s. Une simulation recouvre l'entier de la journée (0h00 jusqu'à 24h00).

Identifiant du scénario	Base de données FABEL	réseau 2030	exploitation 2030	Marche tendue	Marche sur erre	Réseau TPF et MOB indépendant	Réseau TPF et MOB couplés	Freinage régénératif → 1085 V	Freinage régénératif → 1200 V	Freinage régénératif → 1350 V	Chauffage commandé « classique »	Chauffage modulé	Onduleur Palézieux	Onduleur Bulle	Remarque
E01	r_p294p06u02m001v02_2_161108_131238 r_p294p06u02m001v02_3_161216_161133 r_p294p06u02m001v02_2_161109_100435 r_p294p06u02m001v02_3_161216_180312	x	x	x		x		x			x				Référence
E02	r_p294p06u02m001v02_2_161220_111927 r_p294p06u02m001v02_3_161220_113019 r_p294p06u02m001v02_2_161220_112646 r_p294p06u02m001v02_3_161220_120108	x	x		x	x		x			x				Conduite économique
E03	r_p294p06u02m001v02_2_161110_172434 r_p294p06u02m001v02_3_161110_215337 r_p294p06u02m001v02_2_161111_021952 r_p294p06u02m001v02_3_161111_073208	x	x	x			x	x			x				Couplage MOB
E04	r_p294p06u02m001v02_2_170109_153848 r_p294p06u02m001v02_3_170109_200131 r_p294p06u02m001v02_2_170109_174933 r_p294p06u02m001v02_3_170109_221036	x	x	x		x			x		x				Tension freinage 1200 V
E05	r_p294p06u02m001v02_2_170110_001701 r_p294p06u02m001v02_3_170110_044420 r_p294p06u02m001v02_2_170110_023010 r_p294p06u02m001v02_3_170110_065143	x	x	x		x				x	x				Tension freinage 1350 V
E06	r_f0011chauf_2_161216_133555 r_f0012chauf_3_161222_073614 r_f0013chauf_2_161222_143615 r_f0014chauf_3_161222_144015	x	x	x		x		x				x			Modulation chauffage
E07	r_p294p06u02m001v02_2_161214_181924 r_p294p06u02m001v02_3_161214_091500 r_p294p06u02m001v02_2_161213_133923 r_p294p06u02m001v02_3_161213_134849	x	x	x		x		x			x		x		Onduleur Palézieux

Identifiant du scénario	Base de données FABEL	réseau 2030	exploitation 2030	Marche tendue	Marche sur erre	Réseau TPF et MOB indépendant	Réseau TPF et MOB couplés	Freinage régénératif → 1085 V	Freinage régénératif → 1200 V	Freinage régénératif → 1350 V	Chauffage commandé « classique »	Chauffage modulé	Onduleur Palézioux	Onduleur Bulle	Remarque
E08	r_p294p06u02m001v02_2_161214_211034 r_p294p06u02m001v02_3_161214_120635 r_p294p06u02m001v02_2_161213_164605 r_p294p06u02m001v02_3_161213_182041	x	x	x		x		x			x			x	Onduleur Bulle
E09	r_p294p06u02m001v02_2_161214_235544 r_p294p06u02m001v02_3_161214_145206 r_p294p06u02m001v02_2_161213_193750 r_p294p06u02m001v02_3_161213_222126	x	x	x		x		x			x		x	x	Onduleur PAL + Bulle

Tableau 3-3 Liste des scénarios avec les bases de données FABEL (4 simulations par scénario)

3.4 Logiciel de simulation FABEL

FABEL est un logiciel développé par ENOTRAC AG qui permet la simulation de systèmes de transport à alimentation électrique (trains, tramways, trolleybus). Pour cela, l'exploitation est simulée selon un horaire donné dans une fenêtre de temps définie, en interaction avec le réseau électrique (alternatif ou continu) lié au tracé. Théoriquement, le réseau peut être fortement maillé et parcouru simultanément par un nombre pratiquement illimité de trains.

Lors de la simulation de l'avancement du train, tous les paramètres sont considérés : le parcours physique (pentes, courbes, tunnels, stations), le réseau électrique, les véhicules (effort de traction et de freinage, répartition de la masse sur la longueur du train, résistance à l'avancement, puissance des auxiliaires, etc.) et l'exploitation (horaire, charge en passagers, signaux). Grâce à une superposition des limitations d'accélération, de décélération et des à-coups ainsi qu'un dispositif anticollision, il est possible d'atteindre un fonctionnement très proche de l'exploitation réelle.

Sur la base des données du modèle, FABEL calcule les flux de courant et les tensions effectives du réseau (lignes de contact, câbles d'alimentation, sous-stations, accumulateurs d'énergie) en fonction du temps. La position momentanée du train et son besoin en énergie sont pris en compte à chaque instant. Du fait que les tensions et les courants s'influencent mutuellement, l'algorithme procède de façon itérative. En plus de sous-stations classiques, les onduleurs et les dispositifs de stockage d'énergie (fixes ou embarqués) peuvent également être modélisés.

Une fois les simulations effectuées, il est possible d'analyser, de tracer ou de synthétiser toutes les grandeurs jugées pertinentes pour l'étude : puissance instantanée d'une sous-station ou d'un véhicule, bilan de puissance au niveau des sous-stations, du réseau 900 VDC ou des véhicules, proportion d'énergie récupérée ou dissipée dans les rhéostats de freinage, pointes de puissance, consommation sur le long terme, réduction de la consommation atteinte par les différentes mesures étudiées, etc. Toutes les données du modèle et les résultats sont enregistrés dans une base de données garantissant la traçabilité des simulations et permettant d'approfondir l'analyse au besoin ultérieurement.

Les résultats livrés par FABEL ont déjà été à maintes reprises validés par des comparaisons avec des mesures faites sur des installations d'approvisionnement en énergie de traction ainsi que sur des véhicules. Ce logiciel est utilisé depuis plus de 25 ans par ENOTRAC pour des projets dans le monde entier et adapté en permanence aux nouveaux besoins et aux avancements de la technique par une équipe de spécialistes interne à l'entreprise. FABEL est également un des outils de référence dans le développement de la nouvelle norme prEN 50641:2014 (*Exigences relatives à la validation des outils de simulation utilisés pour la conception des systèmes d'alimentation de la traction*).

4 BILAN ET ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Cette section présente le bilan purement énergétique (sans considérations financières) des scénarios d'économie simulés. La section 4.1 dresse le bilan de la consommation totale annuelle d'énergie ainsi que la quantité d'énergie dissipée pour chaque scénario. La section 4.2 fournit une brève analyse par scénario. L'analyse de rentabilité est faite à la section 5.

La consolidation des simulations journalières (haute saison / entre-saison, semaine / week-end) en valeurs annuelles est expliquée dans le récapitulatif des simulations à la section 3.3.

La terminologie utilisée dans ce chapitre pour les différentes quantités d'énergie échangées entre le réseau moyenne tension (MT) et 900 VDC se place du point de vue du réseau 900 VDC. C'est-à-dire que **l'énergie injectée** est l'énergie qui circule depuis le réseau MT vers le réseau 900 VDC, **l'énergie reprise** est celle qui circule du réseau 900 VDC vers le réseau MT ou MOB (scénarios avec onduleurs ou le couplage MOB) et **l'énergie consommée** représente la différence entre l'énergie injectée et l'énergie reprise (énergie nette).

4.1 Bilan de la consommation annuelle et du potentiel d'économie

4.1.1 Energie annuelle totale au niveau 900 VDC

Le tableau ci-dessous présente le bilan énergétique issu des simulations, consolidées sur une année pour tous les scénarios.

Scénario	Energie injectée annuelle dans le réseau 900 VDC [kWh]	Energie reprise annuelle du réseau 900 VDC [kWh]	Energie consommée annuelle au niveau du réseau 900 VDC [kWh]	Différence absolue annuelle par rapport au sc. de référence (économie) [kWh]	Différence relative par rapport au sc. de référence (économie) [%]
E01 Référence	8'932'380	0	8'932'380	-	-
E02 Conduite économique (coasting)	7'629'967	0	7'629'967	1'302'413	14.6%
E03 Couplage MOB	8'942'285	113'980	8'828'305	104'075	1.2%
E04 Tension freinage 1'200 V	8'682'552	0	8'682'552	249'828	2.8%
E05 Tension freinage 1'350 V	8'608'367	0	8'608'367	324'013	3.6%
E06 Modulation chauffage	8'663'821	0	8'663'821	268'560	3.0%
E07 Onduleur Palézieux	9'012'938	308'057	8'704'881	227'499	2.5%
E08 Onduleur Bulle (Planchy)	9'058'382	471'152	8'587'230	345'150	3.9%
E09 Onduleurs Palézieux + Bulle	9'137'271	767'357	8'369'914	562'466	6.3%

Tableau 4-1 Energie annuelle totale injectée, reprise et consommée au niveau du réseau 900 VDC pour chaque scénario avec la différence absolue et relative par rapport au scénario de référence. L'énergie consommée est l'énergie injectée par toutes les sous-stations dans le réseau 900 VDC. Pour les scénarios avec onduleur ou couplage avec le réseau MOB (E03, E07, E08 et E09), l'énergie consommée est donnée par la différence entre l'énergie totale injectée et l'énergie totale reprise du réseau 900 VDC

4.1.2 Energie dissipée

Le tableau ci-dessous présente le rapport entre l'énergie dissipée dans les rhéostats et l'énergie électrique de freinage totale. Cette dernière est donnée par la somme de l'énergie de freinage rhéostatique et de l'énergie réinjectée dans le réseau DC par les trains. Ce rapport indique l'énergie maximale potentiellement récupérable (en théorie, si toute l'énergie dissipée dans les rhéostats pouvait être valorisée autrement). Les pistes d'économie mises en place doivent viser à réduire cette part d'énergie (énergie inutilisée → 0). La dernière colonne indique la différence d'énergie potentiellement récupérable par rapport au scénario de référence (ou indication d'« économie d'énergie inutilisée »).

Scénario	Energie de freinage rhéostatique [kWh]	Energie réinjectée par les trains [kWh]	Energie totale de freinage électrique [kWh]	Proportion d'énergie rhéostatique (énergie inutilisée) [%]	Différence par rapport au sc. de référence (économie d'énergie inutilisée) [%]
E01 Référence	1'750'945	1'467'369	3'218'314	54.4%	-
E02 Conduite économique (coasting)	1'037'266	1'021'599	2'058'865	50.4%	4.0%
E03 Couplage MOB	1'643'353	1'574'282	3'217'635	51.1%	3.3%
E04 Tension freinage 1'200 V	1'438'721	1'779'410	3'218'131	44.7%	9.7%
E05 Tension freinage 1'350 V	1'334'419	1'883'895	3'218'314	41.5%	12.9%
E06 Modulation chauffage	1'507'886	1'409'288	2'917'174	51.7%	2.7%
E07 Onduleur Palézieux	1'514'142	1'703'754	3'217'896	47.1%	7.4%
E08 Onduleur Bulle (Planchy)	1'388'985	1'828'363	3'217'348	43.2%	11.2%
E09 Onduleurs Palézieux + Bulle	1'162'364	2'054'618	3'216'982	36.1%	18.3%

Tableau 4-2 Energie rhéostatique et énergie réinjectée par les trains (dont la somme forme l'énergie totale de freinage électrique), proportion de la part rhéostatique par scénario et différence par rapport au scénario de référence

4.2 Analyse des résultats par scénario et comparaison avec le scénario de référence

4.2.1 Scénario de référence

Dans le scénario de référence, l'énergie totale annuelle injectée dans le réseau 900 VDC (pertes dans le réseau moyenne tension et les sous-stations non comprises) s'élève à **8'932 MWh**. Remarque : cette énergie est celle qui est consommée avec un style de conduite de type « marche tendue ». Si, dans la réalité, certaines courses sont faites avec un style de conduite plus économique, l'énergie réellement consommée s'en trouve réduite (voir explications du scénario « coasting », section 4.2.2).

L'énergie qui est absorbée au pantographe (cumul de tous les trains) représente 92 % de l'énergie injectée dans le réseau DC. Les 8 % restant représentent les pertes dans le réseau DC (câbles d'alimentation + ligne de contact).

34 % de l'énergie absorbée au pantographe est transformée en énergie mécanique servant à vaincre la résistance à l'avancement (résistance de l'air, courbes). Les 66 % restants sont utilisés pour le chauffage / la climatisation (13 %), les besoins propres de la traction et les pertes (28 %) ou dissipées en freinage rhéostatique (21 %) ou mécanique (4 %).

54 % de l'énergie électrique générée au freinage potentiellement disponible (énergie rhéostatique + réinjectée, pertes et consommation des auxiliaires non comprises) est dissipée dans les rhéostats. Cette énergie inutilisée représente le potentiel maximum d'énergie qui peut théoriquement être économisée par la mise en œuvre de mesure d'économie.

Les relevés d'énergie active au niveau moyenne tension pour l'année 2014 (corrigés de façon à obtenir l'énergie de traction nette, voir phase 1 de l'étude énergie [1], sections 2 et 3.3) font état d'une consommation annuelle de 3'500 MWh¹⁰. La consommation d'énergie à l'horizon 2030, avec l'horaire prévu, pourrait donc augmenter d'un facteur 2.5 par rapport à 2014. Le nombre de tonnes-kilomètres (produit de la masse totale des convois par la distance parcourue par chacun d'entre eux) simulés pour 2030 (165 Mio de t·km avec l'horaire décrit à la section 3.1.1) a, quant à lui, triplé par rapport à 2014¹⁰.

4.2.2 Conduite économique

La conduite économique, qui consiste dans les simulations à accélérer normalement jusqu'à la vitesse maximale puis en une marche sur l'erre (coasting) jusqu'au prochain arrêt, permet de réduire notablement la quantité d'énergie de freinage mécanique et rhéostatique. Même si l'énergie réinjectée est elle aussi réduite par rapport à la marche tendue du scénario de référence, le bilan global reste nettement positif : la proportion d'énergie rhéostatique (rapport entre l'énergie dissipée dans les rhéostats et l'énergie électrique de freinage totale) passe à 50 % (-4 % par rapport au scénario de référence).

Selon les simulations, l'énergie totale de traction peut être réduite de près de **15 %** par une marche sur l'erre par rapport au scénario de référence. Cette valeur est un maximum : dans la réalité, il n'est

¹⁰ Tronçon Bulle - Broc inclus dans les relevés 2014 (consommation d'énergie et tonnes-kilomètres), contrairement à la présente phase de l'étude énergie.

pas toujours possible de rouler en marche sur l'erre comme c'est le cas dans la simulation (retard sur l'horaire exigeant la marche tendue par exemple). Mais également parce qu'il est probablement pessimiste de considérer toutes les courses de la simulation de référence comme étant faites en marche tendue (certaines courses sont en réalité peut-être déjà plus économiques que la marche tendue considérée, ce qui réduit la marge d'économie restante).

Il y a cependant un autre élément à considérer : le niveau d'optimisation atteint ici par simulations ne peut être atteint par l'être humain sans système intégré d'assistance à la conduite qui permette de prendre en compte tous les paramètres, cela d'autant plus que la topologie de la ligne majoritairement à voie unique restreint passablement la liberté de manœuvre pour l'exploitation. Un tel système est cependant complexe et très coûteux. Une alternative consiste à sensibiliser, former et entraîner les conducteurs de train sans mesures techniques particulières. Dans l'analyse de rentabilité, les deux variantes « assistance à la conduite » et « training humain » sont poursuivies séparément en raison du grand écart qui les sépare au niveau de l'économie d'énergie. Pour la seconde, l'économie envisageable estimée s'élève à environ 1/3 de l'économie maximale, soit environ 5 %.

4.2.3 Couplage avec le réseau MOB

Le couplage avec le réseau MOB, dans l'hypothèse où toute l'énergie disponible (freinage des rames TPF) peut être reprise par le futur onduleur de la sous-station de Montbovon ou par des consommateurs sur le réseau MOB, permet de réinjecter plus d'énergie dans la ligne de contact. La proportion d'énergie de freinage inutilisée passe ainsi à 51 % (-3 % par rapport au scénario de référence) et la consommation globale d'énergie est réduite de **1.2 %**. Il faut noter qu'une augmentation de la tension maximale de freinage permettrait d'augmenter sensiblement la quantité d'énergie récupérée par le couplage.

4.2.4 Tension de freinage augmentée

4.2.4.1 Augmentation à 1'200 V

Par une augmentation de la tension maximale admissible au freinage à 1'200 V (U_{max2} selon les DE-OCF [5], au lieu de 1'085 V actuellement), il est possible de réduire l'énergie dissipée dans les rhéostats (-18 % par rapport au scénario de référence), énergie qui peut être réinjectée car consommée par des trains plus éloignés qui « n'y ont pas accès » lorsque le train ne récupère que jusqu'à 1'085 V. La proportion d'énergie de freinage inutilisée est réduite à 45 % (-9 % par rapport au scénario de référence) et la consommation d'énergie globale sur l'année s'en trouve ainsi réduite de **2.8 %**.

4.2.4.2 Augmentation à 1'350 V

Par une augmentation de la tension de freinage à 1'350 V (tension nominale + 50 %), la réduction de l'énergie de freinage rhéostatique va encore plus loin que dans la variante 1'200 V (-24 % par rapport au scénario de référence). La proportion d'énergie de freinage inutilisée est réduite à 42 % (-12 % par rapport au scénario de référence), réduisant la consommation globale d'énergie sur l'année de **3.6 %**.

4.2.5 Optimisation de la régulation du chauffage

La tension de seuil (Useuil, voir section 3.2.4) a été calculée sur la base des simulations de référence en tenant compte de tous les types de train en circulation et d'horaires (semaine et week-end). En moyenne, la tension de seuil se situe aux alentours de 970 V pour la haute saison (voir section 3.1.2). Cela signifie que si, dans l'idéal, chaque train chauffe à la puissance max (100 kW) quand (et uniquement quand) sa tension de ligne est supérieure à 970 V, l'énergie globale de chauffage sera la même que si tous les trains avait chauffé constamment avec une puissance moyenne (en haute saison) de 37 kW. L'énergie utile au chauffage est donc la même dans les simulations F0061 / F0062 que dans les simulations de référence (F0011 / F0012), mais c'est le moment où l'énergie est fournie qui diffère, permettant ainsi d'utiliser pour le chauffage une partie de l'énergie qui aurait été dissipée dans les rhéostats. C'est ce potentiel qui est mis en évidence dans les simulations.

Remarque : cette considération représente un cas idéal ; dans la réalité, la consigne de chauffage doit être soumise en premier lieu à la température régnant dans le compartiment voyageurs puis, dans la mesure où la température le permet, à la tension de ligne. Il est par exemple possible qu'il faille en réalité chauffer un peu plus que simplement quand la tension de ligne « le permet », ce qui réduit l'économie réelle. Les simulations montrent ainsi le potentiel d'économie maximal. Si celui-ci se révèle suffisant pour ne pas exclure cette piste d'économie, des essais « grandeur nature » seront nécessaires pour valider définitivement l'économie réelle et la comparer aux coûts, non négligeables, inhérents à une adaptation de la régulation du chauffage.

Par cette modulation du chauffage, la proportion d'énergie de freinage inutilisée est réduite à 52 % (-2 % par rapport au scénario de référence). La consommation d'énergie annuelle est réduite de **3 %**, avec une différence marquée entre la « haute saison » (été ou hiver, forte consommation de chauffage et climatisation : 4 % d'économie) et l'entre-saison (printemps ou automne : 2 % d'économie). En plus des réserves exprimées ci-dessus, il faut en outre tenir compte du fait que le bilan de ce scénario profite du réglage particulièrement défavorable de la tension maximale de freinage (à partir de 1'085 V, toute l'énergie de freinage est actuellement envoyée dans les rhéostats). La mise en œuvre de la piste d'économie « tension de freinage augmentée » réduirait la marge d'économie de la piste décrite ici.

4.2.6 Onduleurs

Les onduleurs permettent d'économiser de l'énergie par la réinjection d'une partie de l'énergie de freinage dans le réseau moyenne tension. Au niveau énergétique, il s'agit d'une vraie économie puisque cette énergie peut ensuite être réutilisée ailleurs. Au niveau économique (financier) cependant, les divers frais et taxes qui s'appliquent à l'achat d'énergie (distribution, facturée en plus de l'énergie à proprement parler) n'étant pas remboursés par le fournisseur lors de la reprise de l'énergie, l'économie réelle est inférieure à celle qui serait faite par une technologie permettant de consommer moins au niveau DC (et donc de ne pas acheter cette énergie du tout). Une même quantité d'énergie réinjectée dans le réseau à l'aide d'onduleur(s) fournit donc un rendement économique moins bon que si elle était économisée à l'aide d'autres mesures.

Le profil en long de la ligne (Figure 4-1) montre que l'emplacement de Palézieux profite d'une topologie optimale pour un onduleur avec la différence d'altitude importante entre Châtel-St-Denis et Palézieux. Le « rayon d'action » de l'onduleur est cependant ici réduit par le fait qu'il se trouve en bout de ligne (récupération uniquement depuis une direction). Autour de Bulle, la déclivité est moins importante (bien que tout de même fortement marquée) mais le rayon s'étend dans les deux directions.

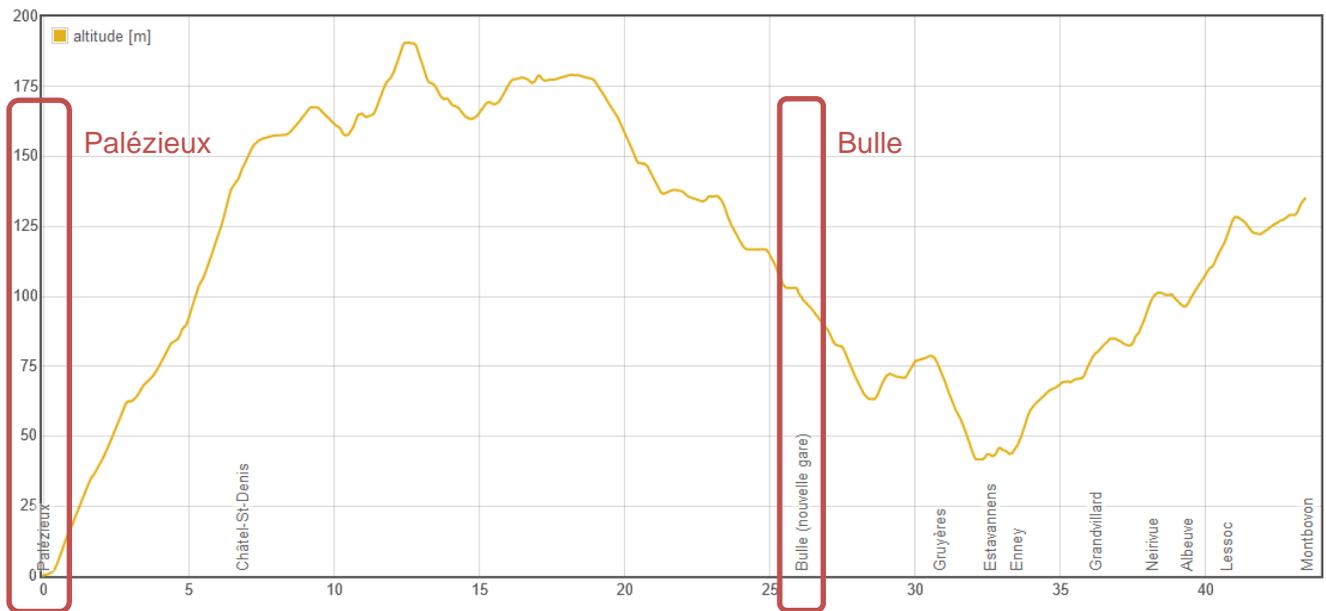


Figure 4-1 Profil en long de la ligne entre Palézieux et Montbovon avec altitude relative montrant la topologie de la ligne autour des deux emplacements considérés pour les scénarios avec onduleurs

4.2.6.1 Onduleur unique à Palézieux

Avec une sous-station réversible à Palézieux, l'énergie dissipée dans les rhéostats peut être réduite à 47 % (-7 % par rapport au scénario de référence) et la consommation d'énergie globale sur l'année s'en trouve ainsi réduite de **2.5 %**.

4.2.6.2 Onduleur unique à Bulle (Planchy)

Avec une sous-station réversible à Bulle, l'énergie dissipée dans les rhéostats peut être réduite à 43 % (-11 % par rapport au scénario de référence) et la consommation d'énergie globale sur l'année s'en trouve ainsi réduite de **3.9 %**. La même installation, avec le même investissement de départ, est donc plus rentable à Bulle qu'à Palézieux. Ceci s'explique notamment par la situation de Palézieux en bout de ligne qui réduit de moitié le rayon d'action de l'onduleur.

4.2.6.3 Onduleurs à Palézieux et Bulle

Avec des sous-stations réversibles à Palézieux et à Bulle, l'énergie dissipée dans les rhéostats peut être réduite à 36 % (-18 % par rapport au scénario de référence) et la consommation d'énergie globale sur l'année s'en trouve ainsi réduite de **6.3 %**. On remarque que l'économie respective de chacun des onduleurs pris séparément est presque entièrement conservée (cumulable) avec l'installation des deux onduleurs ; cela signifie que leur rayon d'action respectif ne se chevauchent pas et qu'une seconde installation ne pègre pas le rendement de la première.

4.2.6.4 Combinaison de l'augmentation de la tension de freinage avec onduleur

Le fait que la tension de freinage soit limitée à 1'085 V (passage à un freinage rhéostatique entre 1'035 V et 1'085 V, voir section 3.2.3) limite fortement l'efficacité des onduleurs. Le train qui freine se comporte en source de tension et l'onduleur en consommateur. Or la récupération ne peut avoir lieu

que tant que la différence de tension entre la source et le consommateur est supérieure à la chute de tension dans les lignes et câbles séparant le train et l'onduleur. Une simulation de test supplémentaire **combinant l'onduleur à Bulle et l'augmentation de freinage à 1'200 V** a permis de montrer que **l'économie d'énergie est multipliée par un facteur 2 à 3** (9 à 10 % de réduction de l'énergie consommée au lieu de 3.9 %). Si l'augmentation de la tension de freinage s'avère faisable, les pistes incluant des onduleurs doivent absolument être reprises dans des simulations définitives combinant les pistes réellement mise en œuvre.

4.3 Pointes d'énergie

Dans cette section, les pointes d'énergie injectée (énergie circulant du réseau MT vers le réseau DC) sont comparées entre le scénario de référence et les scénarios d'économie. La puissance injectée de chaque sous-station a été intégrée pour chaque tranche de 15 minutes de simulation (5h00-5h15, 5h15-5h30, etc.) et les maximums absolus de chaque scénario sont comparés entre eux pour calculer la réduction. Dans le Tableau 4-3, les valeurs relatives (réduction de la pointe maximale) sont données. Par exemple, la conduite économique simulée permet de réduire la pointe de puissance maximale sur l'année de 12 % pour la sous-station de Bossonnens ou de 9 % pour Châtel.

Remarque : les valeurs données par sous-station sont indicatives car fortement liées à l'horaire (lieu de croisements, temps d'attente,...) qui n'est d'ailleurs pas encore connu précisément. La réduction de 39 % à la sous-station de La Tour est par exemple déterminée par une combinaison de départs simultanés en gares de Bulle et La Tour de Trême qui se trouvent décalés par la marche sur l'erre simulée dans la conduite économique. La moyenne de toutes les sous-stations (dernière ligne du tableau) est, en revanche, un indicateur relativement fiable de la réduction qu'il est possible d'atteindre avec une mesure.

Sous-station	E02 Conduite économique (coasting)	E03 Couplage MOB	E04 Tension freinage 1200V	E05 Tension freinage 1350V	E06 Modulation chauffage	E07 Onduleur Palézieux	E08 Onduleur Bulle (Planchy)	E09 Onduleurs Palézieux + Bulle
Bossonnens	12%	0%	1%	3%	3%	0%	0%	0%
Châtel	9%	0%	2%	3%	5%	0%	0%	0%
Estavannens	13%	0%	1%	1%	9%	0%	-1%	-1%
La Tour	39%	0%	2%	2%	11%	0%	0%	0%
Montbovon	11%	-4%	0%	4%	-7%	0%	0%	0%
Neirivue	11%	0%	3%	5%	3%	0%	0%	0%
Palézieux	-3%	0%	2%	3%	12%	0%	0%	0%
Planchy	16%	0%	4%	5%	5%	0%	0%	0%
Semsaes	19%	0%	2%	3%	5%	0%	-1%	-1%
Vaulruz	28%	0%	3%	4%	6%	0%	-2%	-2%
Moyenne	15%	0%	2%	3%	5%	0%	0%	0%

Tableau 4-3 Réduction des pointes d'énergie (intégration de la puissance injectée sur 15 minutes) maximales pour les scénarios d'économie par sous-station et en moyenne pour toutes les sous-stations. Les valeurs négatives indiquent (localement) une augmentation de la pointe maximale

Dans le contrat actuel des TPF avec ses fournisseurs d'énergie, les pointes ne sont généralement pas facturées séparément. D'entente avec les TPF, les pointes d'énergie ne sont donc pas abordées dans l'analyse économique de la section 5. La réduction des pointes d'énergie reste intéressante, car il est possible qu'à long terme celles-ci soient facturées.

5 COÛTS D'INVESTISSEMENT ET BILAN ÉCONOMIQUE

L'économie d'énergie est une chose à considérer. Pour décider de la rentabilité, et donc dans une certaine mesure de la faisabilité, il faut cependant également connaître les coûts d'investissement nécessaires à la mise en œuvre des pistes envisagées. En outre, le bilan énergétique final (énergie consommée) ne suffit pas toujours à évaluer l'économie financière qui peut être faite : l'énergie n'étant souvent pas reprise par les fournisseurs aux mêmes conditions tarifaires qu'elle est vendue (les frais de distribution et taxes, payées en achetant l'énergie, etc. ne sont pas remboursés lorsque l'énergie est réinjectée dans le réseau MT par un onduleur par exemple), il est nécessaire de considérer séparément l'énergie injectée et l'énergie reprise. Ces éléments sont abordés dans cette section afin d'esquisser la rentabilité qui peut être attendue des différentes pistes. Le chiffrage de certains investissements dépasse cependant le cadre de cette étude et requière, le cas échéant, une analyse plus approfondie une fois les paramètres manquant connus.

5.1 Coûts de mise en œuvre des pistes d'économie

Conduite économique

Le coût de la conduite économique est fortement dépendant de la façon dont elle est mise en œuvre : d'une formation des conducteurs (variante « training humain », voir section 4.2.2) à un système d'assistance à la conduite (variante « assistance à la conduite »), la fourchette est très grande. Pour une formation interne, les coûts sont estimés à **CHF 50'000.-**. L'estimation des coûts pour un système d'assistance à la conduite dépasse le cadre de cette étude et devrait être faite ultérieurement si cette piste devait effectivement être poursuivie.

En plus de l'investissement financier, c'est également du temps de parcours qui est investi pour économiser de l'énergie. Dans les simulations du scénario conduite économique avec coasting (marche sur l'erre), le temps de parcours technique (sans arrêt aux stations) est prolongé de 10 à 20 % (selon les trains) par rapport au scénario de référence (marche tendue). Remarque : les heures de départs publiées à l'horaire restent identiques, c'est l'arrivée aux stations qui est retardée pour rouler de façon moins gourmande.

Couplage avec le réseau MOB

Techniquement, cette solution est relativement simple à mettre en œuvre. La possibilité de liaison existe déjà mais le couplage est normalement ouvert. Pour la mise en place d'un système de comptage de l'énergie à l'interface entre les deux systèmes, l'investissement est estimé à un maximum de **CHF 30'000.-** (si pas déjà en place).

Tension de freinage augmentée

Le coût de cette modification du matériel roulant est difficile à estimer précisément car l'ampleur des travaux est très variable : selon qu'il s'agisse d'une simple modification de réglage de l'équipement de traction (mise à jour software) ou d'une modification hardware (par exemple par rapport aux convecteurs de la voiture intermédiaire qui sont alimentés depuis la ligne de train en 900 V continu). Les TPF estiment les coûts à plusieurs dizaines de milliers de francs. Pour l'instant, cette modification n'est pas possible pour des raisons de compatibilité avec le matériel roulant plus ancien. Une fois les

contraintes techniques levées et les coûts de modification connus, ces derniers devront être comparés à l'apport généré par la mise en œuvre donné à la section 5.3.

Optimisation de la régulation du chauffage

De façon analogue à l'augmentation de la tension de freinage, la modification de la régulation de chauffage demande une expertise poussée au niveau du matériel roulant, en tenant compte des paramètres très spécifiques au matériel TPF (commande actuelle du chauffage, comportement thermique des véhicules, retour des clients concernant la température dans les trains,...) pour estimer les coûts et les possibilités réelles de mise en œuvre. Cette estimation doit être faite par TPF ultérieurement et comparée à l'apport généré par la mise en œuvre donné à la section 5.3

Onduleurs

Dans le principe, une sous-station avec onduleur fonctionne de manière identique aux sous-stations classiques. Elles sont cependant équipées d'un onduleur en parallèle du redresseur¹¹ qui permet de réinjecter l'énergie générée par les trains au freinage dans le réseau moyenne tension. Le principe de fonctionnement est le suivant : tant que la tension de ligne (mesurée à la barre collectrice de la sous-station) est inférieure à la tension à vide U_0 , le courant est soutiré du réseau moyenne tension et injecté dans la caténaire. En revanche, dès que la tension de ligne dépasse la tension à vide (poussée par le train en freinage sans repeneur à proximité), un courant s'établit entre le train et la sous-station qui l'ondule pour le renvoyer dans le réseau moyenne tension 50 Hz. Le flux de puissance doit donc "vaincre" les résistances du réseau continu 900 V, des câbles d'injection et la résistance interne de l'onduleur pour qu'une récupération ait effectivement lieu. Dans la pratique, l'onduleur a une tension à vide un peu plus élevée que celle de redresseur afin de limiter le courant de circulation (entre redresseur et onduleur).

L'investissement initial total (ingénierie, coûts internes, mise en service compris) pour un onduleur est actuellement de l'ordre de CHF 400'000.- à 500'000.- (selon la puissance nécessaire) en plus du coût du reste de la sous-station (transformateur, redresseurs, installations moyenne tension, raccordement,...). Au vu des puissances en présence ici (maximum de 350 kW¹² de valeur RMS sur 15 minutes) et du fait que les sous-stations concernées ne sont pas encore construites (synergie dans la planification, pas d'ajout d'un onduleur par après), un coût de **CHF 400'000.-** a été considéré **par onduleur**.

5.2 Coût de l'énergie

Les prix servant de base aux calculs de rentabilité sont ceux payés par TPF au *Groupe e*, fournisseur de l'énergie moyenne tension pour la plupart des sous-stations. Les tarifs applicables sont différenciés selon la saison (tarif d'**été** du 1^{er} avril au 30 septembre et d'**hiver** du 1^{er} octobre au 31 mars) et l'heure (**heures pleines** du lundi au vendredi entre 7h et 23h et le samedi entre 7h et 13h30, **heures creuses** pour le reste).

Lors de l'achat, le prix total se compose de l'énergie elle-même, de la distribution, d'une taxe swissgrid et d'une taxe fédérale ainsi que d'un supplément pour fourniture de courant de sources

¹¹ Dans les installations en service, la pratique recommande l'installation d'un redresseur et d'un onduleur distincts afin de tirer le meilleur parti de chaque équipement. Le redresseur pour sa tenue des courts-circuits, des surcharges et sa très haute disponibilité. L'onduleur pour le réglage fin et indépendant de la tension.

¹² Avec le réglage actuel des véhicules.

renouvelables. Pour la reprise (réinjection dans le réseau moyenne tension), seul le prix de l'énergie est considéré dans le calcul.

Les intervalles des tarifs de facturation (été / hiver, HP / HC) ne correspondent pas toujours aux intervalles des simulations (HE / ES, semaine / week-end). Les différents tarifs ont été appliqués aux simulations selon la répartition suivantes :

Simulation	Tarif appliqué
haute saison (chauffage / clim. haut)	50 % été / 50 % hiver
moyenne saison (chauff. / clim. bas)	50 % été / 50 % hiver
semaine (lundi-vendredi)	95 % HP / 5 % HC (trains circulant avant 7h et après 23 h)
week-end (samedi-dimanche)	25 % HP (samedi matin) / 75 % HC (reste du week-end)

Tableau 5-1 Répartition sur les simulations des tarifs d'achat et de reprise de l'énergie appliqués

5.3 Bilan économique

Dans le Tableau 5-2 ci-dessous, l'énergie annuelle totale injectée (énergie qui circule depuis le réseau MT vers le réseau 900 VDC) a été multipliée par le coût de l'énergie à l'achat en tenant compte de la répartition des tarifs sur les intervalles de simulation (voir Tableau 5-1) pour donner le coût annuel de l'énergie injectée (2^e colonne). L'énergie annuelle totale reprise a été multipliée par le tarif applicable à la reprise d'énergie pour donner l'apport annuel d'énergie reprise (3^e colonne). La différence entre les deux donne l'économie annuelle (4^e colonne), respectivement sur 10 ans¹³ (5^e colonne). Cette économie est comparée aux coûts d'investissement, le cas échéant, donnés à la section 5.1 pour indiquer le degré de rentabilité (non rentable, rentabilité faible, moyenne ou élevée) attendu. Remarque : les coûts d'investissement ne tiennent compte ni des intérêts, ni de la maintenance supplémentaire éventuelle et le prix de l'énergie peut fortement varier durant la période d'amortissement. Pour ces raisons, le calcul de rentabilité reste indicatif.

¹³ Cette durée, sensiblement plus courte que la durée de vie des équipements concernés (typiquement 20 ans pour un onduleur par exemple), vient d'une volonté de voir les investissements rentables à pas trop long terme en raison de l'évolution des technologies, des prix de l'énergie, d'un passage éventuel à 1'500 VDC, etc.)

Scénario	Coût annuel énergie injectée [kCHF/an]	Apport annuel énergie reprise [kCHF/an]	Economie annuelle par rapport au sc. de référence [kCHF/an]	Economie sur 10 ans par rapport au sc. de référence [kCHF/10 ans]	Investissement pour mise en œuvre [kCHF]	Rentabilité sur 10 ans
E01 Référence	1'211	0	-	-	-	-
E02 Conduite éco « assistance »	1'034	0	177	1'770		(★★)
E02b Conduite éco « training » ¹⁴				~500	50	★★★
E03 Couplage MOB	1'212	7.0	6	60	30	★
E04 Tension freinage 1'200 V	1'177	0	34	340		(★)
E05 Tension freinage 1'350 V	1'167	0	44	440		(★★)
E06 Modulation chauffage	1'174	0	36	360		(★)
E07 Onduleur Palézieux	1'221	18.9	8	80	400	non
E08 Onduleur Bulle (Planchy)	1'228	28.8	12	120	400	non
E09 Onduleurs Palézieux + Bulle	1'238	47.0	19	190	800	non

Tableau 5-2 Bilan économique avec l'économie annuelle / sur 10 ans par rapport au scénario de référence comparé avec les coûts d'investissement ; la dernière colonne indique le degré de rentabilité qui peut être attendu : ★ = faible, ★★ = moyen, ★★★ = élevé, () = indicatif car investissement non chiffrable dans le cadre de cette étude

Remarque concernant les scénarios avec **onduleur(s)** : l'énergie récupérée dans les simulations est fortement limitée par la limitation de la tension de freinage à 1'085 V des véhicules. Des simulations supplémentaires « test » combinant un onduleur avec l'augmentation de la tension de freinage montrent que cette augmentation est une condition essentielle pour tirer pleinement profit des onduleurs, permettant d'espérer une rentabilité à moyen terme. Les simulations des scénarios E03, E07, E08 et E09 doivent être répétées avec la tension de freinage augmentée si celle-ci s'avère réalisable.

¹⁴ Variante du scénario E02, pas simulée. Réduction de la consommation estimée à 1/3 de celle du scénario E02 (voir section 4.2.2).

6 ABREVIATIONS ET RÉFÉRENCES

6.1 Abréviations

DC	Courant continu (de l'anglais <i>Direct Current</i>)
ES	Entre-saison (désigne ici les périodes annuelles de faible à moyenne consommation des auxiliaires, en été comme en hiver)
HC	Heures creuses
HP	Heures de pointe
HS	Haute-saison (désigne ici les périodes annuelles de moyenne à forte consommation des auxiliaires, en été comme en hiver)
MOB	Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois
MT	Moyenne tension
MTB	Montbovon
OFT	Office Fédéral des Transports
PAL	Palézieux
TPF	Transports publics fribourgeois Infrastructure SA
UM	Unité multiple (double traction)
US	Unité simple

6.2 Références

- [1] **Etude Energie Phase 1**, SETP 2050, Rapport étude énergie, ECH-294.06_01-101, ENOTRAC AG, Version 3.0, 17.11.2015
- [2] **Etude alimentation** TPF réseau 900 V, Horaire 2030, Rapport de simulation, ECH-294.08-141, ENOTRAC AG, Version 1.0, 14.07.2016
- [3] **Stratégie énergétique 2050** des transports publics - SETP 2050, <https://www.bav.admin.ch/bav/fr/home/themes/liste-alphabetique-des-sujets/environnement/strategie-energetique-2050-des-transports-publics--setp-2050.html>, 05.10.2016
- [4] **Horaire RERSUD SB 15** : Palézieux - Bulle - Montbovon, sma+viriato, 13.10.2015
- [5] **DE-OCF 742.141.11** Dispositions d'exécution de l'Ordonnance sur les chemins de fer, Département fédéral de l'environnement – des transports – de l'énergie et de la communication (OFT), état au 1er juillet 2014