



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)

RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE DISSIPÉE AU FREINAGE SUR VOIE ÉTROITE MARTIGNY- CHÂTELARD

P-095

Rapport final

Philippe Cossy, Transports de Martigny et Régions SA (TMR SA)

Rue de la Poste 3, CP 727, 1920 Martigny, philippe.cossy@tmrsa.ch, www.tmrsa.ch

Martin Aeberhard, Railectric

Wankdorffeldstrasse 88, 3014 Berne, martin.aeberhard@railectric.com, www.railectric.com

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: 095

Source

Accessible gratuitement par Internet

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 23.11.2018

Contenu

Executive Summary en allemand.....	2
Executive Summary en français.....	2
Executive Summary en anglais	2
Résumé en allemand	2
Résumé dans une seconde langue nationale	3
1. Situation de départ	3
2. Objectifs du travail.....	3
3. Approche adoptée et état des connaissances actuelles.....	3
4. Résultats	4
Analyse technique	4
Analyse économique	5
5. Discussion	6
6. Conclusions et recommandations	6
Liste des symboles et abréviations	7
Références	7
Annexe 1	8
Annexe 2	9
Annexe 3	10
Annexe 4	11
Annexe 5	12
Annexe 6	13
Annexe 7	14
Annexe 8	15
Annexe 9	16
Annexe 10	17
Annexe 11	18

Executive Summary en allemand

Diese Studie vergleicht die verschiedenen Lösungen, die heute existieren, um die Rückgewinnung jener Energie zu erhöhen, die sonst beim Bremsen von TMR-Zügen zwischen Vernayaz und Salvan, einem Zahnstangenabschnitt, verloren geht. Auf der Grundlage eines technischen Berichts, in dem die Streckenbeschaffenheit und die Simulationen der Anzahl und Art des Schienenverkehrs festgelegt wurden, reagierten verschiedene Hersteller auf eine indikative Ausschreibung, in der sie ihre innovative oder bewährte Technologie vorschlagen konnten. Die Speicherung in stationären Batterien, durch Schwungräder oder die Rückspeisung von Strom in das Netz des Stromversorgers werden mit dem aktuellen Zustand verglichen. Aufgrund der hohen Kosten für Basisinvestitionen und Batteriewechsel kann der Break-Even-Punkt von Lösungen mit Speicher nicht erreicht werden, während er durch ein reversibles Unterwerk und den Rückkauf der Energie durch den Lieferanten erreicht werden kann.

Executive Summary en français

Cette étude compare entre elles les différentes solutions qui existent à ce jour pour valoriser l'énergie dissipée au freinage des trains TMR entre Vernayaz et Salvan, tronçon à crémaillère. Sur la base d'un rapport technique spécifiant les caractéristiques de ligne et des simulations de nombre et type de circulations ferroviaires, des industriels ont répondu à un appel d'offre indicatif, lors duquel ils ont pu proposer leur technologie, innovante ou éprouvée. Les variantes de stockage dans des batteries stationnaires, par des volants d'inertie ou la réinjection du courant dans le réseau du fournisseur d'électricité sont confrontées à l'état actuel. Du fait des coûts élevés pour l'investissement de base et pour le renouvellement des batteries, le seuil de rentabilité ne peut être atteint par un stockeur, alors qu'il peut l'être par l'intermédiaire d'une sous-station réversible et le rachat du courant par le fournisseur.

Executive Summary en anglais

This study compares the different solutions that exist today to increase the reuse of energy generated during braking of TMR trains between Vernayaz and Salvan, a rack and pinion section. Otherwise this energy is dissipated in the form of heat. On the basis of a technical report specifying the line characteristics and simulations of the number and type of rail traffic, manufacturers responded to an indicative call for tenders, during which they were able to propose their innovative or proven technology. Storage in stationary batteries, by flywheels or the reinjection of current into the grid of the electricity supplier are confronted with the current state. Due to the high costs for basic investment and battery replacement, the break-even point cannot be reached by storage solutions, whereas it can be achieved through a reversible substation and the purchase of the regenerated power by the supplier.

Résumé en allemand

TMR lässt jedes Jahr rund 500.000 kWh Wärme an die Umwelt abfließen, die durch das Bremsen von 18 Zügen pro Tag erzeugt wird, die die Zahnradbahn Martigny-Châtelard (Mt-Blanc Express) befahren. Dieser Strom kann von Zügen, die in die entgegengesetzte Richtung fahren, nicht genutzt werden. Ziel dieser Studie ist es, die verfügbaren Optionen zur Rückgewinnung dieser verlorenen Energie aus wirtschaftlicher Sicht zu vergleichen und festzustellen, ob es eine günstigere Option gibt, als beim Status quo zu bleiben. Im Rahmen einer indikativen Ausschreibung unterbreiteten die Hersteller auf der Grundlage eines im Voraus vorgelegten Spezifikationsberichts Vorschläge. Lösungen, die sich auf neue Speichertechnologien (Batterien, Schwungräder, stationär oder fahrzeugseitig) oder auf die Wiedereinspeisung von Strom in das Netz des Lieferanten (reversible Umspannwerke und Stromweiterverkauf) konzentrieren, wurden vorgeschlagen und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen. Unabhängig von den ökologischen oder technischen Aspekten scheint es, dass diese neuen Speichertechnologien immer noch zu teuer sind, um eine profitable Investition zu ermöglichen. Auch die Lösung eines reversiblen Umspannwerks bietet keinen wesentlichen finanziellen Vorteil. Wenn dieser Energieverschwendung jedoch Kosten zugeschrieben werden, ist es untragbar, nichts zu tun. Die Wahl muss daher zwischen einer innovativen, aber teuren, nicht unbedingt ökologischen Technologie und einer bewährten Technologie auf der Grundlage einer nachhaltigen Partnerschaft zwischen dem Infrastrukturbetreiber und dem Traktionsstromanbieter liegen. Für jede Lösung muss noch eine Abwägung der Vor- und Nachteile vorgenommen werden; erfolgt die Wahl nur unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Aspekte, fällt die Wahl eindeutig auf die Sicherheit der genannten bewährten Technologie.

Résumé en français

Chaque année, TMR laisse se dissiper dans l'environnement l'équivalent d'env. 500'000 kWh sous forme de chaleur, cette énergie étant produite par le freinage de 18 trains/jour qui descendent la voie à crémaillère du Martigny-Châtelard (Mt-Blanc Express). Ce courant n'est pas utilisable par les trains circulant en sens inverse. Cette étude vise à comparer, d'un point de vue économique, les solutions qui se présentent pour valoriser cette énergie perdue et de déterminer s'il en existe une qui soit plus favorable que d'en rester au statu quo. Par appel d'offre indicatif, des industriels ont fait des propositions, établies sur la base d'un rapport de spécification transmis au préalable. Des solutions axées sur les nouvelles technologies de stockage (batteries, volants d'inertie, stationnaires ou embarquées) ou sur la réinjection du courant dans le réseau du fournisseur (sous-station réversible et revente d'électricité) ont été proposées et comparées d'un point de vue économique. Indépendamment des aspects écologiques ou techniques, il s'avère que ces nouvelles technologies de stockage sont encore trop coûteuses pour permettre un investissement rentable. La solution d'une sous-station réversible ne présente pas non plus un gros avantage financier. Toutefois, si l'on attribue un coût à ce gaspillage énergétique, ne rien faire est intolérable. Il s'agit donc de choisir entre une technologie innovante mais coûteuse, pas forcément écologique, et une technologie éprouvée mais reposant sur un partenariat durable entre l'exploitant de l'infrastructure et le fournisseur de courant de traction. Une pesée des avantages et inconvénients reste à faire pour chaque solution car, en ne considérant que les aspects économiques, le choix s'oriente clairement sur la sécurité de ladite technologie éprouvée.

1. Situation de départ

Les Transports de Martigny et Régions SA (TMR SA) exploitent et gèrent l'infrastructure ferroviaire de la ligne Martigny-Châtelard (MC). Cette ligne comporte un tronçon à crémaillère (200‰ de pente). L'alimentation électrique est en courant continu, la tension nominale est de 850 V. Le courant de traction est transporté en alternance via ligne aérienne ou rail de contact. Les rames sont équipées d'un système de freinage rhéostatique et régénératif. L'important dénivelé du tronçon à crémaillère constitue un fort potentiel énergétique. Ce potentiel n'est pas valorisé et l'énergie produite est dissipée dans l'environnement sous forme de chaleur. La valorisation directe est empêchée par la distance excessive entre producteur (train descendant) et consommateur (train montant), respectivement en raison des pertes de tension liées à la résistance du rail de contact. A cela s'ajoute une situation défavorable du consommateur, lui-même en descente (Finhaut -> Le Châtelard) lors du pic de production. Cette énergie ne peut être réinjectée dans le réseau en l'absence de sous-station réversible.

2. Objectifs du travail

L'objectif général des investigations menées par TMR SA est de déterminer s'il existe un moyen de valoriser cette énergie perdue, soit par l'intermédiaire des nouvelles technologies de stockage, soit par celui d'une sous-station réversible et le rachat du courant par le fournisseur. Ce moyen ne peut être viable à long terme que s'il offre des avantages économiques par rapport au statu quo, ou que s'il offre des avantages environnementaux sans surcoût par rapport au statu quo.

3. Approche adoptée et état des connaissances actuelles

Hypothèse 1 : les progrès dans le développement des nouvelles technologies de stockage permettent de stocker l'énergie pour la réutiliser comme courant de traction, selon le cycle charge/décharge spécifié pour la ligne et sans engendrer de surcoût par rapport à la situation actuelle.

Pour vérifier cette hypothèse, un rapport de spécification a été établi et mis à disposition des fabricants et fournisseurs de systèmes de stockage de l'énergie (batteries, volants d'inertie). Sur cette base, des offres indicatives ont été établies et transmises en retour.

Hypothèse 2 : le courant produit intéresse le fournisseur, qui propose un prix de rachat permettant d'amortir l'installation d'une sous-station réversible.

Pour vérifier cette hypothèse, une offre indicative a été sollicitée auprès d'un fabricant reconnu puis une négociation a été entamée auprès du fournisseur, afin de déterminer dans quelle mesure il était intéressé au rachat de courant et à quel prix.

Au final, les variantes des 2 hypothèses sont comparées à l'aide d'un tableur, permettant de déterminer si l'une ou l'autre est plus avantageuse par rapport au statu quo et si oui, laquelle. Ce tableur tient compte des différents coûts d'investissement, du prix variable du courant, des différentes durées de vie

des batteries ou encore des différents coûts d'installation, de maintenance, d'entretien ou de renouvellement.

4. Résultats

ANALYSE TECHNIQUE

L'analyse du potentiel d'économie d'énergie se base sur des simulations avec l'outil μ PAS/ZFS. Il s'agit d'un simulateur du mouvement des trains selon des horaires avec calcul du flux de charge électrique intégré. La circulation des trains est modélisée selon l'exploitation actuelle, c'est-à-dire 18 allers/retours par jour. Les trains peuvent être composés d'une US ou d'une UM de motrices des types Z800 ou Z870. Les hypothèses de charge de la rame (nombre de passagers, donc masse), et de la puissance auxiliaire (auxiliaires de traction, éléments de confort, chauffage/climatisation notamment) jouent un rôle important: la première influence l'énergie potentielle lors de la montée / descente et donc l'énergie potentiellement récupérable; la deuxième doit être considérée comme une perte d'énergie non récupérable. Pour chaque composition possible, neuf combinaisons de charge et de puissance auxiliaire ont été définies, ainsi que le nombre de telles circulations par an. Ces hypothèses se trouvent dans l'annexe 1.

Techniquement, le stockeur est modélisé comme une sous-station réversible au lieu-dit Plannaz (entre Vernayaz et Salvan), tandis que les autres sous-stations (existantes) à Vernayaz, Salvan et Finhaut sont des sous-stations unidirectionnelles à diodes (voir annexe 2). Pour cette étude, la pente de la caractéristique tension/courant de Plannaz a été choisie identique à celle de Salvan (et extrapolée dans le quadrant du flux d'énergie chemin de fer $\rightarrow$ stockeur). En revanche, la tension à vide de ce système était variable et choisie de telle façon que sur un cycle horaire (un train dans chaque direction), l'énergie absorbée par le stockeur soit identique à celle débitée. Les pertes dans le système de stockage (pertes convertisseur, pertes batteries, chauffage / refroidissement du bâtiment) sont prises en compte hors de la simulation, dans le calcul de la consommation d'énergie. Il est à noter que le but de cette étude consiste à analyser la faisabilité technique et économique de la récupération d'énergie, et non pas de développer le stockeur proprement dit, ou son principe de contrôle et réglage.

Pour le calcul d'économie d'énergie de base, les hypothèses suivantes (qui se basent sur les indications fournies par les constructeurs qui ont répondu à l'appel d'offres indicatif) ont été utilisées :

- Energie cyclable : 90 kWh¹
- Rendement énergétique du convertisseur (du stockeur) : 96 %²
- Rendement énergétique de la batterie : 90 %²
- Chauffage : 1.5 kW pendant 90 jours / an
- Climatisation : 7.5 kW pendant 90 jours / an

Un exemple d'un résultat de simulation est donné dans l'annexe 3.

L'annexe 4 montre, pour le stockeur défini ci-dessus, la consommation d'énergie avec/sans stockeur pour chaque type de circulation.

Dans l'annexe 5, les valeurs de consommation de chaque type de circulation sont multipliées par leur nombre annuel (selon annexe 1). L'économie annuelle se situe à 600 MWh, sur un total sans stockeur de 3'360 MWh, donc une **économie de 18%**.

On voit immédiatement la dominance des circulations en US. C'est la raison pour laquelle un stockeur de 90 kWh a été choisi comme référence : bien que dans le cas de la descente d'une UM il ne peut pas absorber toute l'énergie récupérée par le train. En raison du faible nombre de circulations en UM, le choix d'un stockeur plus grand risque de ne pas se justifier économiquement. L'annexe 6 en donne la justification : pour la variation de la capacité cyclable du stockeur (de 50 à 200 kWh), les économies d'énergie annuelles (et financières) sont indiquées. Il est bien évident qu'en dessous de 90 kWh, le potentiel d'économie montre une forte diminution, puisque dans ces cas même toute l'énergie d'une US à la descente ne pourrait plus être absorbée. Inversement, en dessus de 90 kWh, le potentiel d'économie ne monte plus que faiblement, puisque tout "excès" de capacité ne sert plus qu'à absorber l'énergie supplémentaire que peut produire une UM. En revanche, on peut supposer que le prix d'achat et de maintenance (remplacement des batteries) du système soit fortement dominé par le prix des

¹ L'énergie cyclable n'est pas identique à la capacité physique des batteries. Dans le cas présent, cette valeur (énergie cyclable) signifie qu'avec 18 cycles par jour de charge / décharge de 90 kWh chacun, la durée de vie des batteries indiquée par les constructeurs peut être atteinte.

² La supposition d'un rendement constant représente une simplification. Le rendement dépend sans doute du point de fonctionnement du système considéré. Il est toutefois très difficile d'obtenir des données plus détaillées des fournisseurs. Une fois le choix du système fait, il est recommandé de faire une analyse plus détaillée.

batteries, et donc étroitement lié à la capacité. Le choix de 90 kWh semble donc représenter un optimum économique pour l'exploitation définie dans l'annexe 1.

Il est toutefois recommandé que le système soit conçu de manière modulaire, afin de pouvoir augmenter la capacité de stockage dans le futur. Une telle augmentation pourrait être justifiée, soit par une augmentation du nombre de circulations en UM, soit par la réduction du prix des batteries.

Une solution par volants d'inertie a également été proposée par un industriel. La capacité de cyclage est également de 90 kWh, comme pour les systèmes à batteries. Le rendement énergétique est cependant inférieur à celui des batteries : 82% pour le cycle charge-décharge. Il n'y a pas de besoin de chauffage, mais la puissance pour le refroidissement est élevée par rapport à celui nécessaire pour les batteries : 100 kW pendant 90 jours.

La sous-station réversible proposée est constituée comme suit : Les nouveaux éléments seront tous logés dans un conteneur (y compris les transformateurs), qui sera installé à côté de la sous-station existante de Vernayaz. La sous-station existante et classique de Vernayaz sera maintenue et assurera l'alimentation du chemin de fer aussi dans le futur. La partie nouvelle sera connectée électriquement en parallèle à la sous-station existante, et ne servira que pour réalimenter des excès d'énergie lors de la descente des trains dans le réseau triphasé.

Le jeu de barre 16 kV triphasé de la sous-station existante sera prolongé (par câbles) dans le nouveau conteneur, où un disjoncteur 16 kV assurera l'alimentation et, en cas de besoin, la disjonction sélective de la partie réversible.

En aval de ce disjoncteur, deux chaînes indépendantes de conversion continu – triphasé sont prévues. Chacune de ces chaînes est composée d'un sectionneur triphasé 16 kV, d'un transformateur sec, de l'onduleur à IGBT et d'un disconnecteur DC qui raccorde au DC de la sous-station existante. La connexion à la ligne, ainsi que la protection de la ligne, auront donc lieu par les disjoncteurs DC de la sous-station existante.

Les deux chaînes auront une puissance de 750 kW chacune (1500 kW pour la sous-station). La division en deux chaînes présente deux avantages :

- Redondance : Si une chaîne est hors service, la partie réversible de la sous-station peut continuer de fonctionner avec la moitié de la puissance.
- Réalisation par étapes : Il est possible de n'équiper, dans un premier temps, qu'une seule chaîne. Sa puissance de 750 kW correspond à la puissance récupérée d'une US à la descente³. La deuxième chaîne pourrait être installée (toujours dans le même conteneur) ultérieurement, quand le nombre de trains formés en UM aura augmenté.

Il n'est pas décidé si cette option (réalisation par étapes) sera prise. Toutes les analyses décrites dans ce rapport (potentiel d'économie d'énergie, coûts), se basent sur l'hypothèse de l'installation des deux chaînes dès le début.

Il est aussi à noter que cette solution avec chaîne double n'est probablement pas la moins chère possible. Dans le cas de réalisation d'une sous-station réversible il est conseillé d'évaluer également une solution avec une seule chaîne de 1500 kW.

Le rendement énergétique utilisé dans les calculs est de 97% (indication du fournisseur du système 98%). Pour les besoins en chauffage (90 jours par an) et refroidissement (90 jours par an) la moitié des chiffres indiqués pour les stockeurs à batteries a été supposé.

Le fait qu'une sous-station réversible peut opérer dans les quatre quadrants de puissance côté AC pourrait être utilisé pour produire de la puissance réactive dans le réseau 16 kV sans surcoûts. Cette possibilité a été prise en compte dans l'analyse économique.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Un calcul de la valeur actuelle nette sur 25 ans est effectué pour les variantes suivantes :

³ La puissance électrique est plus basse à la descente par rapport à la montée pour deux raisons :
a). Vitesse autorisée plus basse à la descente qu'à la montée, donc puissance mécanique plus basse à la descente
b)- Même pour une puissance mécanique identique, dans le cas de la montée les pertes dues à la résistance à l'avancement, les pertes de la chaîne de traction ainsi que toute la puissance auxiliaire s'ajoute à la puissance mécanique pour donner la puissance électrique, tandis qu'en freinage par récupération ces éléments doivent être soustraits de la puissance mécanique, la puissance électrique est donc plus basse.

- Statu Quo (Variante 0, pas d'investissement / maintenance de systèmes supplémentaires, pas d'économie d'énergie)
- Trois variantes de stockeurs à batteries de 90 kWh (trois fournisseurs potentiels), Variantes 1 - 3
- Une variante de stockeur à volant d'inertie, Variante 4
- Une sous-station réversible, Variante 5 sans fourniture de puissance réactive, et Variante 6 avec fourniture de puissance réactive.

Les trois variantes de stockeurs se différencient notamment par leur prix d'investissement, ainsi que par le prix et la fréquence du remplacement des batteries.

Les économies d'énergie sont celles citées ci-dessus pour toutes les variantes. Le taux d'intérêt pour ce calcul est fixé à 2.5% pour toutes les variantes. Le prix de l'énergie (aux points de raccordement des sous-stations au réseau moyenne tension) est supposé être 0.15 CHF/kWh à l'achat et 0.05 CHF/kWh à la revente. Ces derniers chiffres incluent l'énergie électrique et toutes les charges dues à l'utilisation des réseaux.

Le tableur du calcul des Life Cycle Costs (LCC) est présenté dans l'annexe 7.

5. Discussion

Les résultats de l'analyse économique sont présentés dans les annexes 8 – 10. L'annexe 8 présente l'évolution des coûts par rapport au temps.

On distingue facilement que les solutions à stockeur ne peuvent pas être rentabilisées sur 25 ans. Tandis que la solution à volants d'inertie souffre surtout de son coût d'investissement très élevé et de son rendement moins favorable pour ce type de cycle de stockage / déstockage, l'importance des changements de batteries est également nettement visible.

Pour la sous-station réversible telle-quelle, la rentabilité (break-even-point) est juste atteinte à la fin des 25 ans. Si l'on suppose que la sous-station réversible puisse compenser la totalité de la puissance réactive "consommée" par les trois sous-stations de la ligne, le break-even peut être atteint au bout de 18 ans. Une optimisation pourrait être cherchée avec le fournisseur de l'énergie en allant au-delà, en intégrant la sous-station réversible dans son système de réglage de tension.

Une simple analyse de sensibilité est présente dans les annexes 9 et 10.

Dans l'annexe 9, les coûts d'achat d'énergie passent de 0.15 à 0.20 CHF/kWh, tandis que la revente de l'énergie récupérée passe de 0.05 à 0.07 CHF/kWh. On constate qu'avec cette supposition, le désavantage des stockeurs diminue, sans pour autant atteindre le break-even dans les 25 ans. Pour la sous-station réversible, le break-even est atteint, dans cette hypothèse, après une quinzaine d'années.

Dans l'annexe 10, de nouveau avec les coûts d'énergie initiaux, les coûts de remplacement des batteries ont systématiquement été divisés par 2. Tandis qu'il est impossible de chiffrer exactement ce facteur aujourd'hui, il paraît raisonnable de s'attendre à une baisse sensible des coûts de batteries dans les 25 ans à venir. Pour les meilleures variantes de stockeurs à batteries, cette hypothèse permet d'atteindre le break-even au bout des 25 ans.

L'annexe 11 finalement montre, en dehors des considérations économiques, le bilan de l'énergie économisé proprement.

6. Conclusions et recommandations

Le statu quo, à savoir ne pas investir pour la récupération de l'énergie dissipée au freinage, semble demeurer l'alternative la plus favorable économiquement. Ce constat est toutefois un peu pessimiste : tous les calculs ont été effectués en prenant les chiffres les plus défavorables, et il n'en demeure pas moins qu'une rentabilité est atteinte par l'une des alternatives, au bout d'un grand nombre d'années. Par ailleurs, dans le contexte actuel de la SETP2050, laisser perdre ~500'000 kWh/an n'est plus acceptable, notamment en termes écologiques. En termes économiques, il est donc nécessaire de convertir en CHF les kWh perdus (500'000 kWh/an = CHF 75'000.-) et de les imputer négativement dans la balance comparative des alternatives. Dès lors, l'investissement pour l'une ou l'autre des variantes ne se discute plus et un choix s'impose.

Soit TMR décide de jouer la carte de l'innovation, en mettant en place une technologie peu éprouvée mais dont on sait que le bilan écologique est très défavorable (énergie grise des batteries, besoin et recyclage des matières premières rares), et qui, économiquement, n'est pas possible sans l'apport de fonds de soutien externes (p. ex. soutien financier de l'OFT ou de l'OFEN).

Soit TMR mise sur la sécurité en s'appuyant sur une technologie, certes peu innovante (sous-station réversible) mais éprouvée, qui de surcroît s'appuie sur de l'existant (réseau fournisseur électrique) et sans même la nécessité d'un apport financier externe.

La plupart des constats réalisés dans cette étude portent à recommander ce second choix (sous-station réversible et revente de courant). Il est cependant nécessaire qu'un partenariat soit établi entre TMR et son fournisseur de courant de traction. En cas d'entente, ce projet aurait le mérite de miser sur la proximité, la collaboration entre acteurs locaux et le développement régional, en toute cohérence avec les principes du label Valais Excellence.

Liste des symboles et abréviations

Cette partie contient l'ensemble des symboles et abréviations utilisés dans le rapport (avec les unités correspondantes et les définitions).

UM	Unité multiple (composition ferroviaire)
US	Unité simple (composition ferroviaire)

Références

- [1] M. Aeberhard : *17_027_V01_TMR_Specification_Energy_Storage_System* – Railectrics, 18 pages, 2017.
- [2] IEC 62924: *Railway applications – Fixed installations – Stationary energy storage system for DC traction systems, Final draft international standard*, 9/2221/FDIS, 2016,
- [3] Bombardier: *Beschreibung Antriebsstrang TMR Be 4/8*, document SK 2007-00, version F, 2012

Annexe 1

Types de circulation avec nombre de circulations par an.

2800 US

masse vide: 72 t

2700 aller retour par an

	Puissance auxiliaire minimale (45%) 14 kW (20% Ptot)	Puissance auxiliaire moyenne (45%) 35 kW (50% Ptot)	Puissance auxiliaire maximale (10%) 69 kW
Charge minimale 750 kg (60%) 2082 A/R (10 personnes)	A1 937 circulations A/R par an	A2 937 circulations A/R par an	A3 208 circulations A/R par an
Charge moyenne 6'000 kg (20%) 694 A/R (80 personnes)	A4 312 circulations A/R par an	A5 312 circulations A/R par an	A6 70 circulations A/R par an
Charge maximale 13'350 kg (20%) 694 A/R (178 personnes)	A7 312 circulations A/R par an	A8 312 circulations A/R par an	A9 70 circulations A/R par an

2800 UM

masse vide: 144 t

720 aller retour par an

	Puissance auxiliaire minimale (45%) 28 kW (20% Ptot)	Puissance auxiliaire moyenne (45%) 70 kW (50% Ptot)	Puissance auxiliaire maximale (10%) 138 kW
Charge minimale 750 kg (10 personnes)	B1 0 circulations A/R par an	B2 0 circulations A/R par an	B3 0 circulations A/R par an
Charge moyenne 12'000 kg (80%) 576 A/R (160 personnes)	B4 259 circulations A/R par an	B5 259 circulations A/R par an	B6 58 circulations A/R par an
Charge maximale 26'700 kg (20%) 144 A/R (356 personnes)	B7 65 circulations A/R par an	B8 65 circulations A/R par an	B9 14 circulations A/R par an

2870 US

masse vide: 70 t

2700 aller retour par an

	Puissance auxiliaire minimale (45%) 21 kW (20%Ptot)	Puissance auxiliaire moyenne (45%) 52 kW (50% Ptot)	Puissance auxiliaire maximale (10%) 104 kW
Charge minimale 750 kg (60%) 2082 A/R (10 personnes)	C1 937 circulations A/R par an	C2 937 circulations A/R par an	C3 208 circulations A/R par an
Charge moyenne 5'400 kg (20%) 694 A/R (72 personnes)	C4 312 circulations A/R par an	C5 312 circulations A/R par an	C6 70 circulations A/R par an
Charge maximale 15'975 kg (20%) 694 A/R (213 personnes)	C7 312 circulations A/R par an	C8 312 circulations A/R par an	C9 70 circulations A/R par an

2870 UM

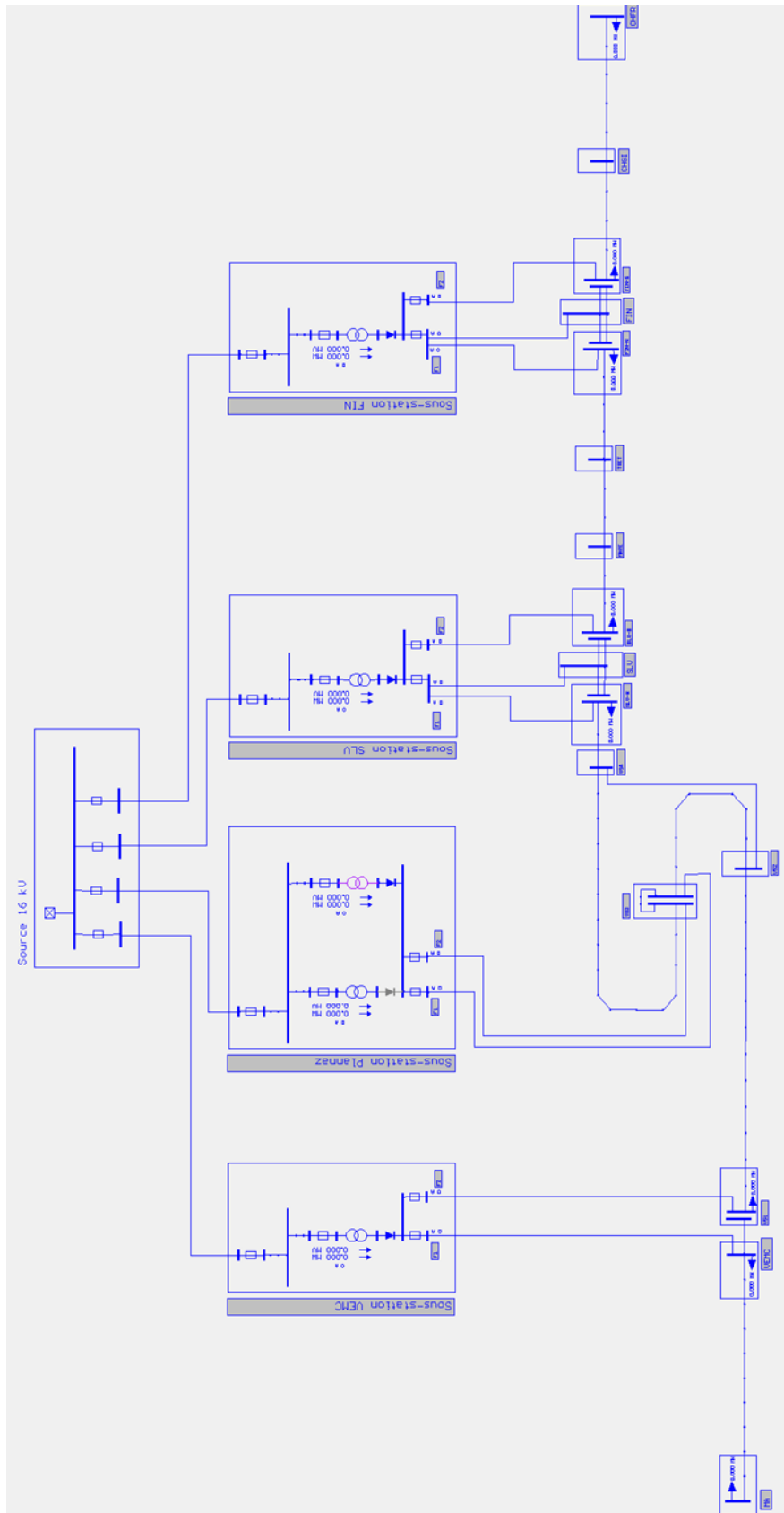
masse vide: 140 t

720 aller retour par an

	Puissance auxiliaire minimale (45%) 42 kW (20% Ptot)	Puissance auxiliaire moyenne (45%) 104 kW (50% Ptot)	Puissance auxiliaire maximale (10%) 208 kW
Charge minimale 750 kg (10 personnes)	D1 0 circulations A/R par an	D2 0 circulations A/R par an	D3 0 circulations A/R par an
Charge moyenne 10'800 kg (80%) 576 A/R (144 personnes)	D4 259 circulations A/R par an	D5 259 circulations A/R par an	D6 58 circulations A/R par an
Charge maximale 31'950 kg (20%) 144 A/R (426 personnes)	D7 65 circulations A/R par an	D8 65 circulations A/R par an	D9 14 circulations A/R par an

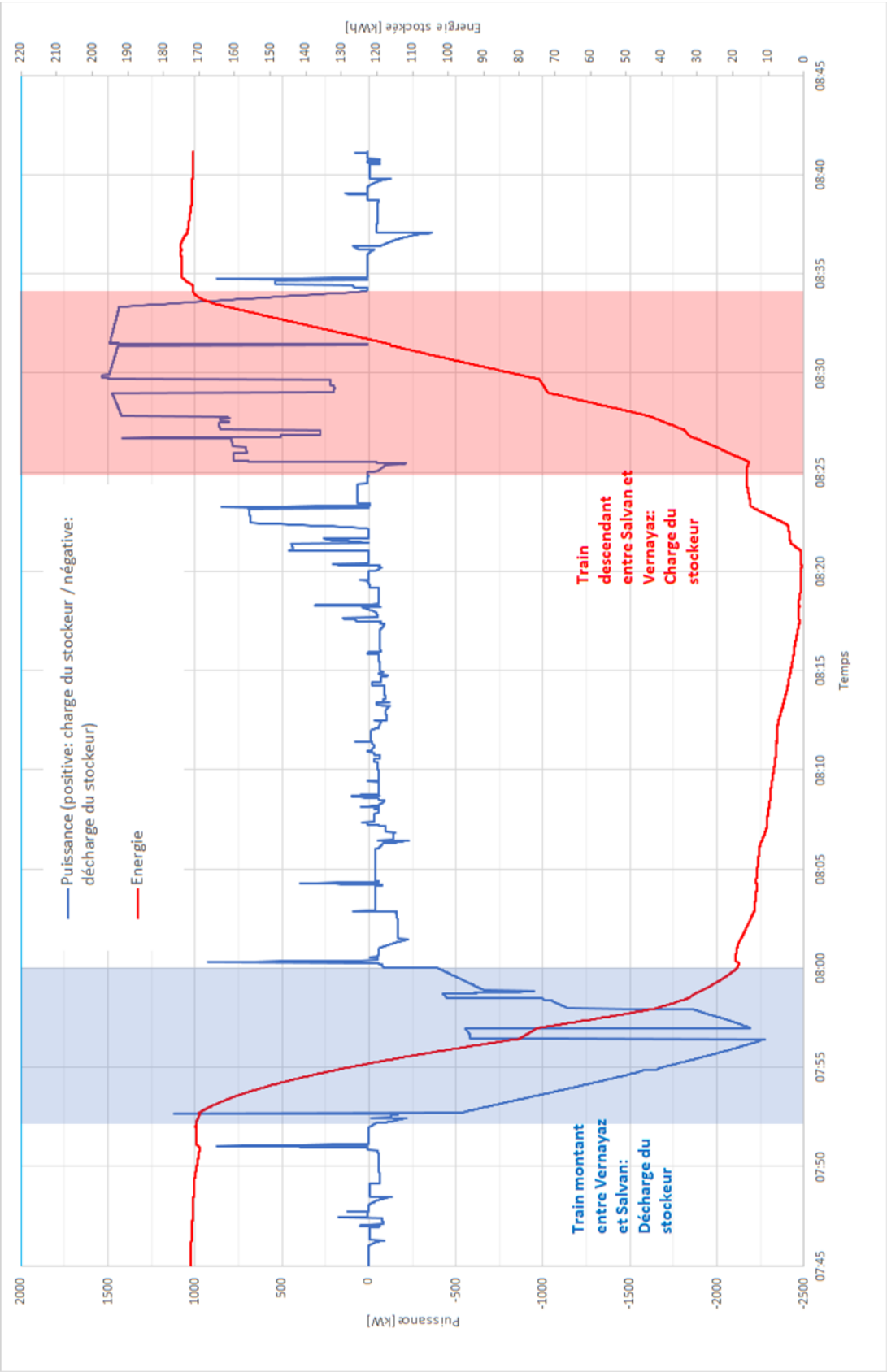
Annexe 2

Schéma électrique de la simulation. La sous-station réversible de Plannaz comporte deux groupes, dont un seul est actif.



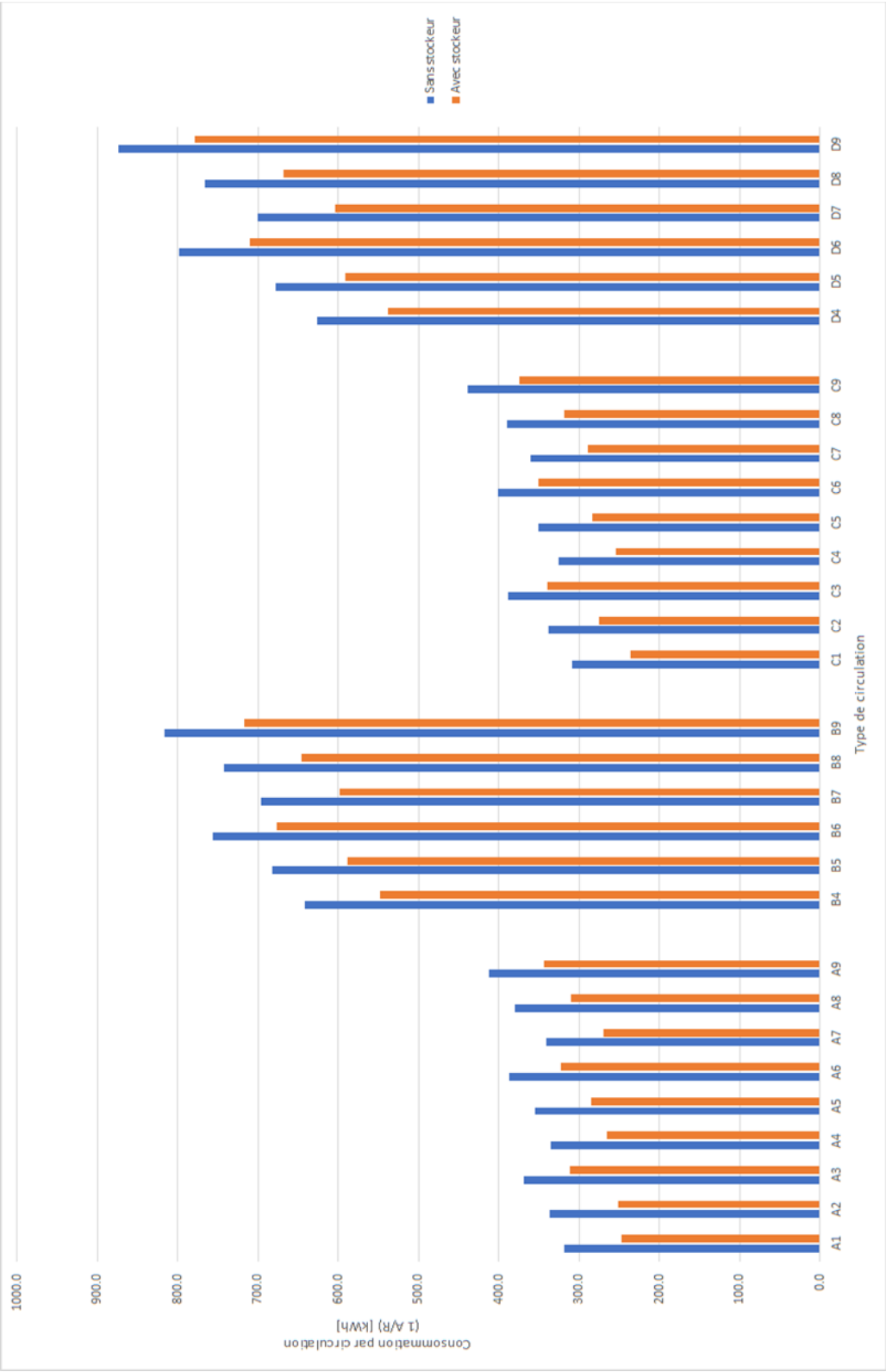
Annexe 3

Exemple d'un résultat de simulation: Puissance et énergie du stockeur (cet exemple est pour le cas d'un stockeur plus grand > 170 kWh, qui serait capable de récupérer l'énergie produite par une UM à la descente).



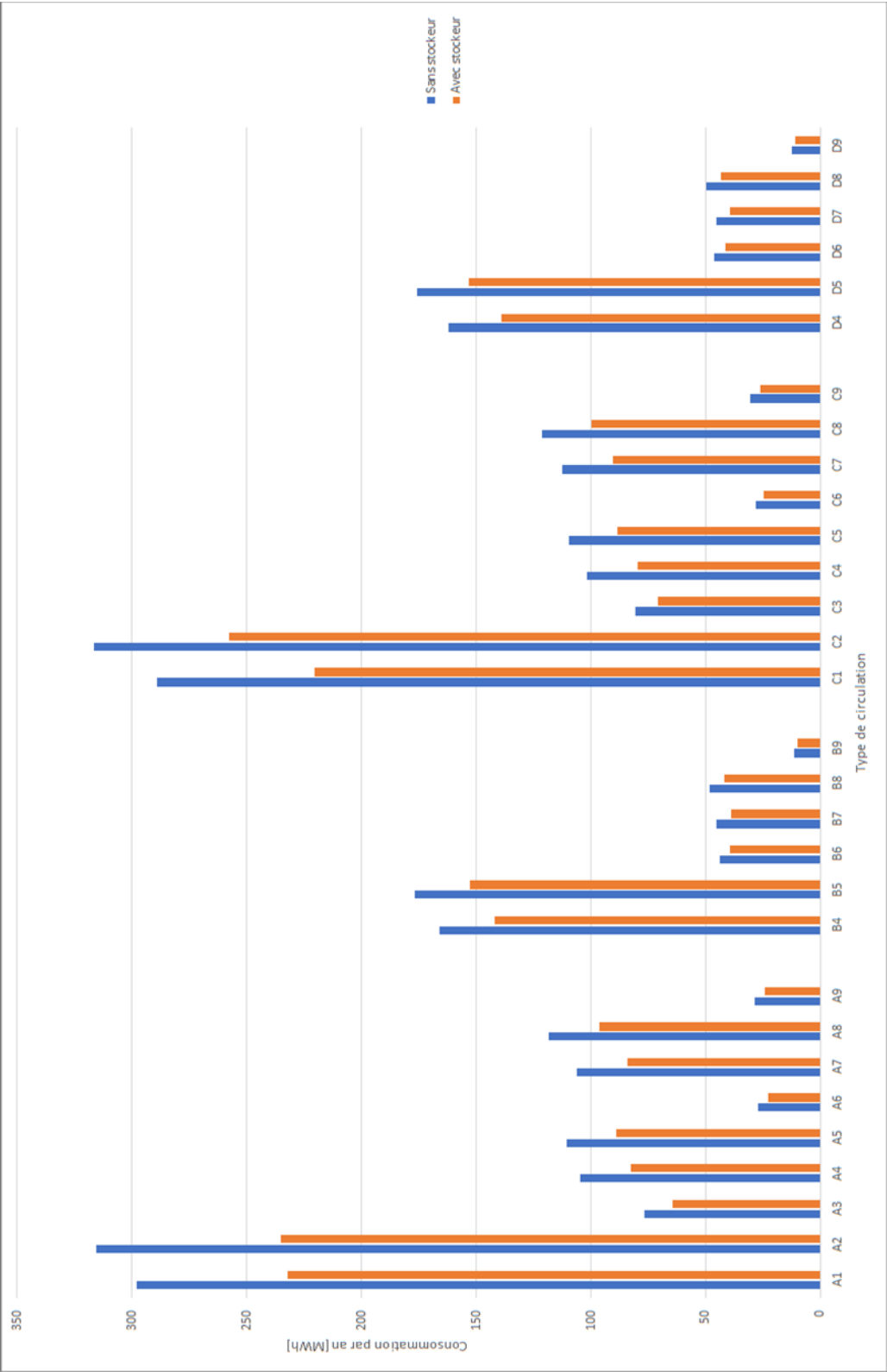
Annexe 4

Consommation par circulation (un aller / retour entre Martigny et Le Châtelard frontière) pour chaque type de circulation selon Annexe 1, avec / sans stockeur. Les données du stockeur sont celles du chapitre 4 ; notamment l'énergie cyclable de 90 kWh.



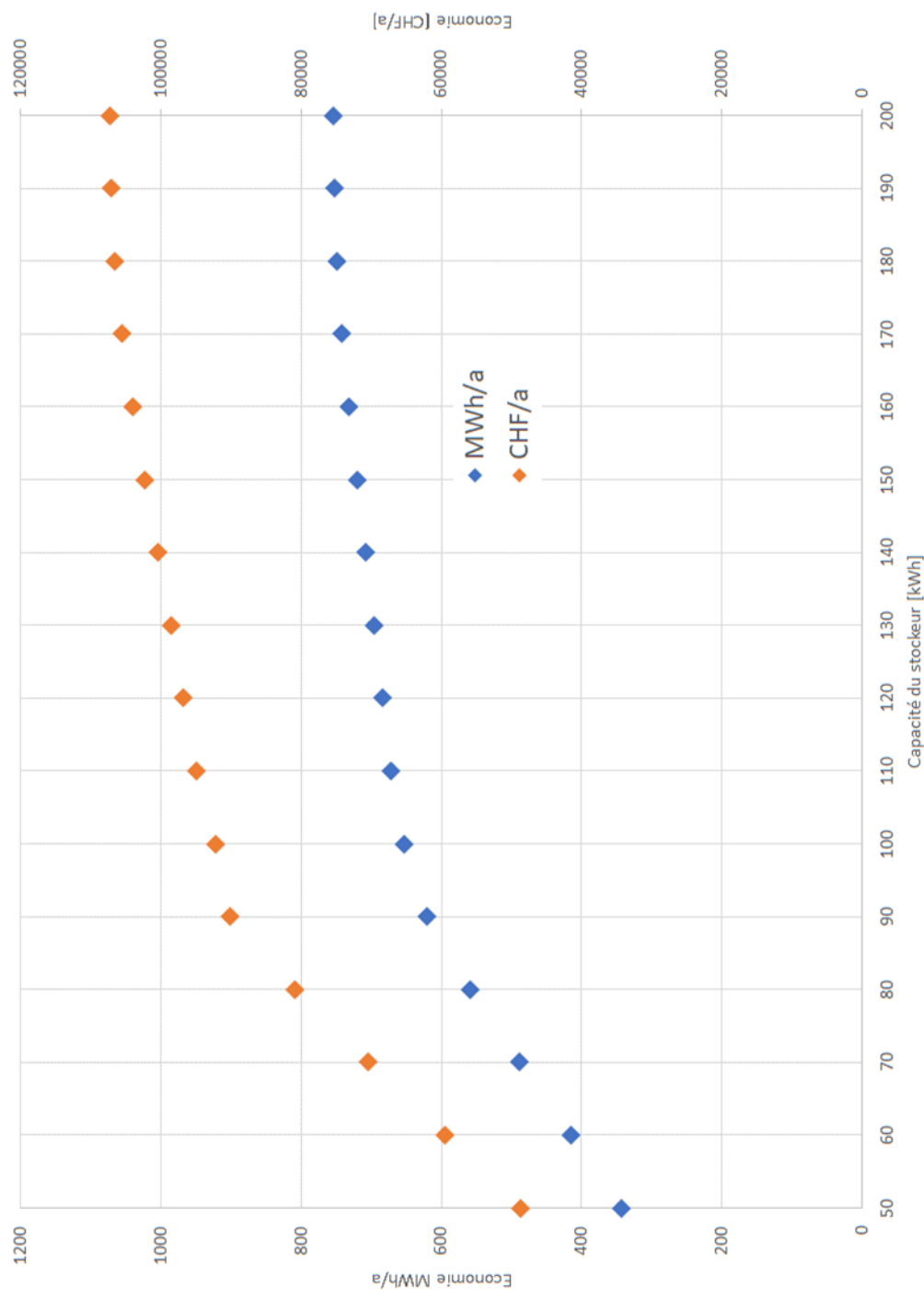
Annexe 5

Consommation annuelle avec/sans stockeur, en prenant en compte le nombre annuel de circulations de chaque type selon Annexe 1.



Annexe 6

Analyse de l'influence de la capacité cyclique du stockeur. Un coût de 0.15 CHF/kWh est supposé pour calculer l'économie financière annuelle.

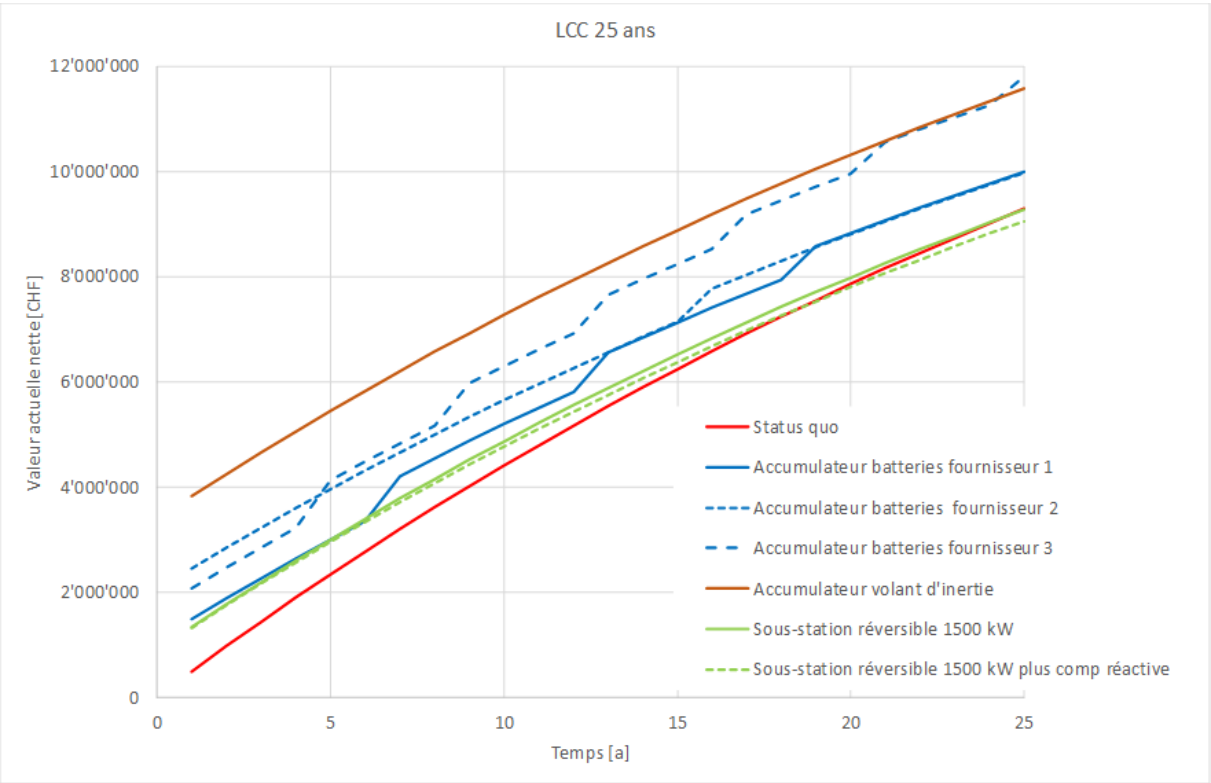


Calcul économique (valeur actuelle nette sur 25 ans) pour le statu quo (Variante 0), trois variantes de stockeurs à batteries (Variantes 1 à 3), une variante de stockeur à volants d'inertie (4) et une sous-station réversible (Variante 5).

14/18

Annexe 8

Life Cycle Costs (LCC) en fonction du temps

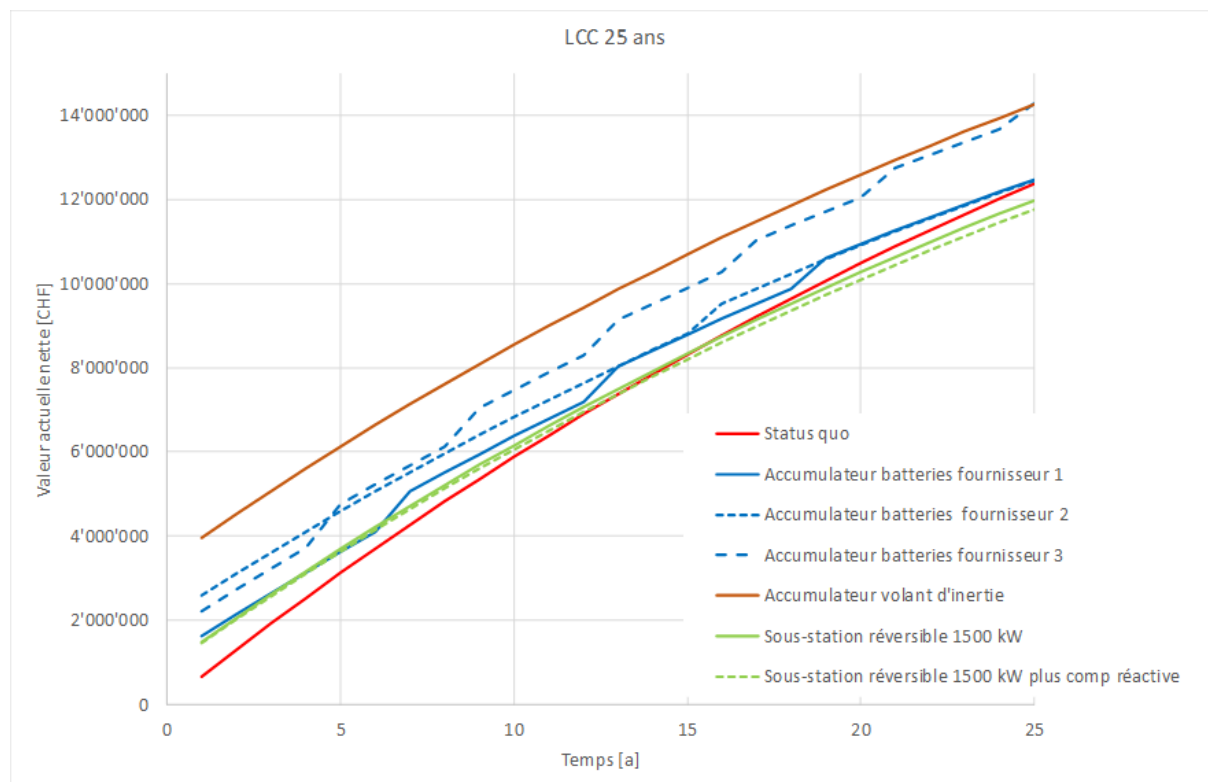


Annexe 9

LCC Analyse de sensibilité 1

Achat de l'énergie à 0.20 CHF/kWh au lieu de 0.15 CHF/kWh

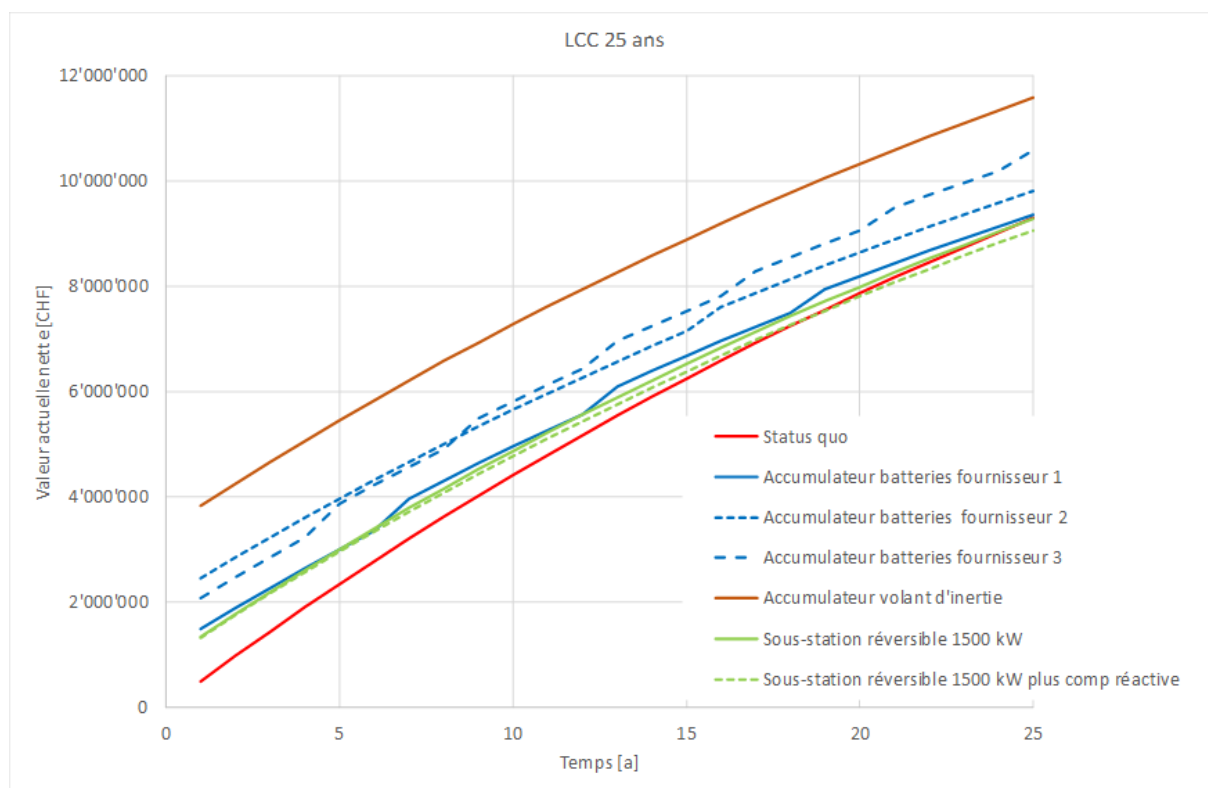
Revente de l'énergie à 0.07 CHF/kWh au lieu de 0.05 CHF/kWh



Annexe 10

LCC Analyse de sensibilité 2

Tous les coûts de remplacement des batteries divisés par 2.



Annexe 11

Economie et "gaspillage" d'énergie.
Barres bleues : Economie d'énergie par an, par rapport au status quo (Variante 0)
Barres rouges : "Gaspillage", ou économie d'énergie par an non réalisée par rapport à la meilleure variante (Variante 5).
Barres hachurées : Variantes à stockeurs de 180 kWh au lieu de 90 kWh. Il est important de noter que toute l'analyse LCC est basée, pour les variantes à stockeur, sur 90 kWh. Le passage à 180 kWh améliore l'économie d'énergie, mais détériore la situation LCC par rapport à celle présentée ci-dessus.

