



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)

Analyse du potentiel de contribution des batteries embarquées au réseau d'alimentation électrique des trolleybus

Rapport final



Martin Aeberhard, Railectric GmbH

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

Trevor Bagnall, Railectric GmbH

Wankdorffeldstrasse 88, 3014 Bern, trevor.bagnall@railectric.com, www.railectric.com

Groupe d'accompagnement

Roland Sallin, TRANSPORTS PUBLICS DE LA REGION LAUSANNOISE SA

Mme Loureiro Arantes Alexandrina, Stagiaire, TRANSPORTS PUBLICS DE LA REGION LAUSANNOISE SA

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: P-156

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 12.10.2020

Contenu

Executive Summary Deutsch	2
Executive Summary Français.....	2
Executive Summary English.....	2
Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
1. Situation de départ	6
2. Objectifs du travail.....	6
3. Méthodologie et hypothèses et données de base.....	7
3.1. Introduction	7
3.2. Modèle de simulation.....	7
3.2.1. Contexte	7
3.2.2. Données fournies par les TL (aquisition de la base de donnée)	7
3.2.3. Modèle du réseau électrique pour la simulation.....	8
3.2.4. Véhicules.....	11
3.2.5. Horaires	12
3.3. Méthodes d'analyse des résultats	13
3.3.1. Consommation d'énergie.....	13
3.3.2. Tension ligne	15
3.3.3. Charge des sous-stations	15
3.4. Aperçu des simulations exécutés.....	16
4. Résultats	18
4.1. Consommation d'énergie.....	18
4.2. Profiles de tension	20
4.3. Charge des sous-stations	22
5. Analyse du potentiel d'Economie d'énergie	23
6. Conclusions et recommandations.....	25
Liste des symboles et abréviations.....	25
Références	25
Annexes.....	27
Profiles de tension	27
Charge des sous-stations	55

Executive Summary Deutsch

In der vorliegenden Studie wird der Einfluss der Ausrüstung von Trolleybussen mit Traktionsbatterien mithilfe von Simulationen untersucht. Anhand des Netzes der Verkehrsbetriebe von Lausanne (TL) werden verschiedene Szenarien der Ausrüstung zukünftigen Flotte mit Batterien, oder mit Rekuperation der Energie in das Fahrleitungsnetz, simuliert und miteinander verglichen. Die Ausrüstung sämtlicher Busse mit Batterien ermöglicht im Fahrplan-Szenario 2025 eine Energie-Einsparung von etwa 13% im Vergleich zu einem Szenario ohne Rückgewinnung der Bremsenergie. Darüber hinaus zeigen die Simulationen weitere wichtige Vorteile der Ausrüstung mit Batterien auf. Die Energiespeicherung auf den Fahrzeugen ermöglicht eine sehr weitgehende Glättung der aus dem Netz bezogenen Leistungsspitzen. Dadurch werden Spannungseinbrüche im Netz stark reduziert und die Auslastung der Unterwerke wird gleichmässiger. Investitionen in die Infrastruktur der Energieversorgung können damit vermieden oder viel weiter in die Zukunft verschoben werden. Das Potential der Rekuperation ist demgegenüber ohne Investitionen in die Energieversorgungs-Infrastruktur deutlich geringer. Einzig mit der Erweiterung von Unterwerken so, dass sie Energie ins Dreiphasennetz zurückspeisen können, liesse sich noch etwas mehr Energie einsparen als mit den Batterien, jedoch ohne die anderen genannten Vorteile ebenfalls zu erzielen.

Executive Summary Français

Dans la présente étude, l'influence de l'équipement des trolleybus avec des batteries de traction est examinée au moyen de simulations. Sur la base du réseau de transports publics de Lausanne (TL), différents scénarios d'équipement des futures flottes avec des batteries ou avec la récupération d'énergie dans le réseau de lignes aériennes sont simulés et comparés. L'équipement de tous les bus avec des batteries permettra des économies d'énergie d'environ 13 % dans le scénario de l'horaire 2025 par rapport à un scénario sans récupération de l'énergie de freinage. En outre, les simulations montrent d'autres avantages importants de l'équipement des bus avec des batteries. Le stockage d'énergie sur les véhicules permet un lissage des pics de puissance tirés du réseau. Cela réduit considérablement les chutes de tension dans le réseau et rend l'utilisation des sous-stations plus uniforme. Les investissements dans l'infrastructure d'approvisionnement en énergie peuvent ainsi être évités ou reportés beaucoup plus loin dans l'avenir. En revanche, le potentiel de récupération est nettement plus faible sans l'investissement dans l'infrastructure de sous-stations bidirectionnelles. Seule l'extension des sous-stations de manière à ce qu'elles puissent réinjecter de l'énergie dans le réseau triphasé permettrait d'économiser plus d'énergie qu'avec des batteries embarquées, mais sans atteindre les autres avantages mentionnés précédemment.

Executive Summary English

In this study, the influence of equipping trolley buses with traction batteries is examined by means of simulations. Based on the Lausanne Public Transport Network (TL), different scenarios of equipping future fleets with batteries, or with energy recuperation in the catenary network, are simulated and compared. Equipping all buses with batteries will allow energy savings of around 13% in the 2025 timetable scenario compared with a scenario without recuperation of braking energy. In addition, the simulations show further important advantages of equipping buses with batteries. The energy storage on the vehicles enables a very extensive smoothing of the power peaks drawn from the grid. This greatly reduces voltage drops in the grid and makes the utilisation of the substations more even. Investments in the energy supply infrastructure can thus be avoided or postponed much further into the future. By contrast, the potential for recuperation is significantly lower without investment in energy supply infrastructure. Only by extending substations in such a way that they can feed energy back into the three-phase grid could a little more energy be saved than with batteries, but without also achieving the other advantages mentioned.

Zusammenfassung

Trolleybusse werden heute in zunehmendem Mass mit Traktionsbatterien ausgerüstet. Im Gegensatz zu reinen Batteriebussen erlaubt die Kombination der beiden Techniken (Speisung aus einer Fahrleitung und/oder Batterie) das sogenannte In-Motion-Charging. Das heisst dass keine speziellen Ladestationen notwendig sind, sondern die Batterien während der Fahrt und während den Halten an allen Stationen, insbesondere bei den meistens etwas längeren Halten an den Endstationen aus der Fahrleitung nachgeladen werden. Die Batterien dienen in erster Linie dazu, kurze Abschnitte auch ohne gehobene Stromabnehmer befahren zu können, z.B. bei Baustellen oder im Fall einer Störung im speisenden Netz. In Zukunft ist auch denkbar, dass gewisse Netzerweiterungen erfolgen können, ohne dass diese zwingend mit einer Fahrleitung ausgerüstet werden müssen. Die Batterien werden aber insbesondere auch dazu genutzt, beim Bremsen die durch die Motoren erzeugte elektrische Energie zu speichern und anschliessend im Fahrbetrieb wieder nutzbar zu machen.

In der vorliegenden Studie geht es darum, das Systemverhalten derartiger Busse in einem grossen System zu untersuchen und mit der anderen Lösung der Energie-Rückgewinnung beim Bremsen, der Rückspeisung in das Fahrleitungsnetz, zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell des gesamten Trolleybus-Netzes der Verkehrsbetriebe von Lausanne (TL) erstellt. Es wurde einerseits der Fahrplan von heute (2020) mit der aktuellen Fahrzeug-Flotte und dem aktuellen Einsatzplan dieser Fahrzeuge auf den verschiedenen Linien simuliert. Zum anderen wurde der geplante Fahrplan des Jahres 2025 simuliert, wobei verschiedene denkbare Szenarien der Flotten-Erneuerung und -Erweiterung berücksichtigt wurden.

Parallel dazu wurde das Modell für den Trolleybus mit Batterie erstellt. Die in der Simulation zu berücksichtigenden Parameter des Batterie-Managements (Strategie und Parameter zum Laden und Entladen der Batterie) wurden zusammen mit einem Hersteller solcher Busse definiert und zusätzlich auf Probefahrten im Netz der TL validiert.

Die Auswertung der Simulations-Ergebnisse erfolgte hinsichtlich:

- Gesamtem Energieverbrauch
- Spannungsprofil entlang der befahrenen Strecken
- Auslastung der Unterwerke.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Hinsichtlich Reduktion des Energieverbrauchs ist der Betrieb mit Trolleybussen, welche mit Batterien ausgestattet sind, einem solchen mit ausschliesslich rekuperierenden Bussen, über ohne Anpassungen in den Unterwerken, klar überlegen. Gegenüber einer hypothetischen Situation ohne Energierückspeisung lässt die Ausrüstung aller Busse mit Batterien eine Gesamteinsparung von ca. 13% erwarten. Dieser prozentuale Einsparungsgrad ist allerdings stark abhängig von der Energie, welche für Nebenbetriebe (Heizung, Lüftung, Klima, Hilfsbetriebe) aufgewendet werden muss. Diese Energieanteile können bis zu einem Drittel des gesamten Energieverbrauchs ausmachen und können unabhängig von der Technologie nicht zurückgewonnen werden. Weiter spielen die gewählte Lade-/Entladestrategie der Batterien sowie die physikalischen Eigenschaften der Batterien selber eine Rolle.

Eine noch grössere Energieersparung (nahezu 18%) liesse sich allerdings erzielen, wenn alle Busse (ausser den Doppelgelenkbussen, die standardmässig mit Batterien ausgerüstet werden) rekuperieren könnten UND die Unterwerke auch Energie ins Dreiphasennetz zurückspeisen könnten. Dies erfordert allerdings nicht unbedeutende Investitionen in die Unterwerke. Es wurde nur die hypothetische Situation untersucht, dass alle Unterwerke rückspeisen können. Es wird aber vermutet, dass bereits mit der Ausrüstung einer geringeren Anzahl Unterwerke ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden könnten. Sollte diese Strategie gewählt werden, wären vertiefende Untersuchungen empfehlenswert.

Hinsichtlich der Spannungsqualität ist die Ausrüstung aller Busse mit Batterien die weitaus beste Strategie. Die Möglichkeit auch grössere Mengen Energie an Bord speichern zu können führt dazu, dass die Energieaufnahme des einzelnen Busses sehr ausgeglichen wird, Lastspitzen werden stark geglättet. Dadurch treten keine starken Spannungseinbrüche im Netz mehr auf. Die im Spannungsverlauf entlang der Strecken feststellbaren Unterschiede sind durchaus sehr gross, deren Nutzen allerdings nicht ganz einfach zu beziffern. Weil die Spannungseinbrüche bei den anderen Szenarien zwar durchaus teilweise sehr gross, aber zeitlich begrenzt sind, wirkt sich dies kaum auf die Fahrzeiten aus. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass mit dem Ziel, realistische Leistungsverläufe zu

erhalten, die abschnittswise Höchstgeschwindigkeiten im Bereich von Erfahrungswerten der TL angesetzt wurden und fast immer deutlich unter den im Innenstadtbereich grundsätzlich zulässigen 50 km/h liegen. Bei Fahrten in diesem Geschwindigkeitsbereich würde der Einfluss von Spannungseinbrüchen auf die Fahrzeuge-Performance deutlicher spürbar. Ausserdem kann sich der Ausfall einzelner Unterwerke oder Speisepunkte bei den Lösungen ohne Batterie rasch auf den Betrieb auswirken, während solche Ausfälle für die mit Batterien ausgerüsteten Busse keine spürbaren Auswirkungen hätten.

Falls sich die TL dazu entschliessen, mit Horizont 2025 alle Busse mit Batterien auszurüsten, ist die Spannungsqualität im Netz derart gut, dass keine Investitionen in die Speise-Infrastruktur notwendig sind. Andernfalls müsste die aufgrund der vorhandenen Ergebnisse und ggf. zusätzlichen Simulationen (z.B. mit Ausfällen von Unterwerken oder anderen Netzelementen) noch vertieft geprüft werden.

Hinsichtlich der Auslastung der Unterwerke ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Spannung. Über lange Zeitbereiche (mehrere Stunden) müssen die Unterwerke zwar, bis auf die oben genannten Unterschiede, bei allen Szenarien eine ähnliche Energiemenge liefern. Im Fall der Ausrüstung der Busse mit Batterien fliesst diese Energie aber viel konstanter, die Auslastung der Unterwerke wird gleichmässiger. Die Simulationen haben gezeigt, dass mit dem Fahrplan 2025 bei keinem der untersuchten Szenarien ein Unterwerk überlastet wird. Eine Investition in höhere Unterwerksleistungen ist also nicht erforderlich, im Fall der Ausrüstung aller Busse mit Batterien lassen sich Investitionen in höhere Unterwerksleistungen am weitesten hinauszögern.

Die Autoren empfehlen den TL, als nächstes den Grundsatzentscheid zu fällen, ob sie angesichts der genannten Vorteile möglichst rasch auf eine vollständig mit Batterien ausgerüstete Flotte übergehen wollen, oder doch auf einen Mischbetrieb auch mit rekuperierenden Fahrzeugen setzen wollen. Mit letzterem liesse sich der Energieverbrauch noch etwas stärker senken, aber nur falls auch in die entsprechende Infrastruktur mit rückspeisefähigen Unterwerken investiert würde.

Résumé

Aujourd'hui, les trolleybus sont de plus en plus souvent équipés de batteries de traction. Contrairement aux bus à batterie pures, la combinaison des deux technologies (alimentation par ligne aérienne de contact et/ou batterie) permet la charge dite "In-Motion-Charging". Cela signifie qu'aucune station de charge spéciale n'est nécessaire, mais que les batteries sont rechargées à partir de la ligne aérienne de contact pendant le voyage et lors des arrêts à toutes les stations, en particulier lors des arrêts généralement un peu plus longs aux terminus. Les batteries ont pour principale tâche de pouvoir rouler sur de courtes distances, même avec les perches au toit, par exemple sur les chantiers ou en cas de défaillance du réseau d'alimentation. À l'avenir, il est également envisageable que certaines extensions de réseau puissent être réalisées sans qu'il soit nécessaire de les équiper d'une ligne aérienne de contact. Mais les batteries sont aussi utilisées notamment pour stocker l'énergie électrique générée par les moteurs lors du freinage, puis pour la rendre à nouveau utilisable pendant la conduite.

L'objectif de cette étude est d'examiner le comportement de ces bus dans un authentique réseau et de le comparer avec l'autre solution de récupération d'énergie lors du freinage, c'est-à-dire la réinjection d'énergie dans le système ligne aérienne de contact. A cet effet, un modèle de simulation de l'ensemble du réseau de trolleybus des Transports Publics de la région lausannoise (TL) a été créé. D'une part, l'horaire d'aujourd'hui (2020) a été simulé avec la flotte actuelle de véhicules et le plan actuel de déploiement de ces véhicules sur les différentes lignes. D'autre part, l'horaire prévu pour 2025 a été simulé, en tenant compte de divers scénarios envisageables pour le renouvellement et l'expansion de la flotte.

En parallèle, le modèle du trolleybus à batterie a été créé. Les paramètres de gestion de la batterie à prendre en compte dans la simulation (stratégie et paramètres de charge et de décharge de la batterie) ont été définis en collaboration avec un fabricant de tels bus et ont été validés lors d'essais sur le réseau TL.

L'évaluation des résultats de la simulation a été effectuée en ce qui concerne

- Consommation totale d'énergie
- Profils de tension le long des itinéraires parcourus
- Utilisation de la puissance installée des sous-stations.

Les résultats peuvent être résumés comme suit :

En termes de réduction de la consommation d'énergie, les résultats avec des trolleybus équipés de batteries sont nettement supérieurs à ceux avec des trolleybus uniquement à récupération, si l'on évite des investissements dans les sous-stations bidirectionnelles. Par rapport à une situation hypothétique sans récupération d'énergie, l'équipement de tous les bus avec des batteries nous permet d'espérer une économie globale d'environ 13 %. Toutefois, ce pourcentage d'économie dépend fortement de l'énergie qui doit être utilisée pour les auxiliaires (chauffage, ventilation, climatisation, autres auxiliaires). Ces parts d'énergie peuvent représenter jusqu'à un tiers de la consommation totale d'énergie et ne peuvent être récupérées, quelle que soit la technologie utilisée. En outre, la stratégie de charge/décharge choisie et les propriétés physiques des batteries elles-mêmes jouent un rôle.

Cependant, des économies d'énergie encore plus importantes (près de 18 %) pourraient être réalisées si tous les bus (sauf bus à double articulation, qui sont équipés de batteries comme standard) pouvaient récupérer et si les sous-stations réinjectaient de l'énergie dans le réseau triphasé. Toutefois, cela nécessiterait des investissements non négligeables dans les sous-stations. Seule la situation hypothétique où toutes les sous-stations peuvent récupérer de l'énergie a été examinée. Toutefois, on suppose que de bons résultats similaires pourraient être obtenus en équipant un plus petit nombre de sous-stations. Si cette stratégie devait être choisie, des enquêtes plus approfondies seraient recommandées.

En ce qui concerne la qualité de tension dans la ligne de contact, équiper tous les trolleybus de batteries est de loin la meilleure stratégie. La possibilité de stocker une quantité d'énergie à bord entraîne une consommation d'énergie très équilibrée du trolleybus individuel et les pics de charge sont ainsi lissés sur le réseau. Cela signifie qu'il n'y a plus de chutes de tension importantes dans le réseau. D'un scénario à l'autre, les différences de la courbe de tension le long des lignes sont certes très importantes, mais il n'est pas facile de quantifier les avantages. Les chutes de tension dans les autres scénarios sont très importantes dans certains cas, mais limitées dans le temps grâce à l'électronique, cela a peu d'effet sur les temps de trajet dans le milieu urbain. Il convient toutefois de noter que, dans le but d'obtenir des courbes de puissance réalistes, les vitesses maximales par tronçon ont été fixées dans la plage des valeurs d'expérience des TL et sont toujours bien inférieures aux 50 km/h généralement autorisés dans le centre-ville. Dans cette plage de vitesse, l'influence des chutes de tension sur les performances du véhicule est peu perceptible. A vitesse plus élevée, le temps de parcours pourrait être influencé.

En outre, une défaillance électrique d'une sous-station ou d'un point d'alimentation pourrait rapidement perturber le fonctionnement et l'horaire des bus. Les batteries embarquées pourraient compensées cette avarie temporaire.

Si les TL décident d'équiper tous les trolleybus de batteries à l'horizon 2025, la qualité de tension dans le réseau sera si bonne qu'aucun investissement dans l'infrastructure d'alimentation ne sera nécessaire. Dans le cas contraire, il faudrait l'examiner de manière plus approfondie sur la base des résultats existants et, si nécessaire, procéder à des simulations supplémentaires (par exemple en cas de défaillance de sous-stations ou d'autres éléments du réseau).

En ce qui concerne l'utilisation des sous-stations, le tableau est similaire à celui de la tension. Sur de longues périodes (plusieurs heures), les sous-stations doivent fournir une quantité d'énergie similaire dans tous les scénarios, à l'exception des différences mentionnées ci-dessus. Mais si les trolleybus sont équipés de batteries, cette énergie circule beaucoup plus constamment, et la charge des sous-stations devient plus régulière. Les simulations ont montré qu'avec l'horaire 2025, aucun des scénarios examinés ne surchargera une sous-station. Il n'est donc pas nécessaire d'investir dans une capacité de sous-stations plus élevée ; si tous les bus sont équipés de batteries, c'est l'investissement dans l'acquisition de nouvelles sous-stations électriques onéreuses qui peut être évité.

Les auteurs recommandent que les TL prennent ensuite la décision fondamentale de savoir si, compte tenu des avantages mentionnés ci-dessus, elles veulent passer le plus rapidement possible à une flotte entièrement équipée de batteries, ou si elles veulent opter pour une exploitation mixte avec des véhicules de récupération également. Avec ce dernier scénario, la consommation d'énergie pourrait être encore réduite, mais seulement si des investissements étaient également réalisés dans l'infrastructure correspondante avec des sous-stations bidirectionnelles.

1. Situation de départ

Dans le passé, la technologie ne permettait pas de réutiliser l'énergie de freinage en injectant dans les réseaux de trolleybus. Les anciennes générations de véhicules ne disposaient pas des systèmes à récupération d'énergie. Les véhicules plus récents ont la possibilité de réinjecter l'énergie de freinage dans la ligne de contact. Toutefois, en raison de la basse tension (600 V_{DC}), cela n'est possible que si d'autres véhicules consomment simultanément de l'énergie en se trouvant à proximité. Plus l'écart est grand entre le véhicule injectant et les véhicules consommant de l'énergie, plus les pertes en ligne et les chutes de tension deviennent importantes.

Toutefois, il est peu probable que ce désavantage soit trop important à Lausanne, du moins dans le centre-ville, en raison de la forte densité du trafic.

Les progrès de la technologie des batteries permettent aujourd'hui d'équiper un bus d'un module de batterie d'un poids acceptable, capable d'absorber l'énergie générée lors des cycles d'accélération et de freinage courants dans les transports urbains. Il est également possible de prendre en compte l'énergie potentielle qui n'est pas négligeable dans le cas de Lausanne en raison des grandes dénivellations.

La question se pose donc de savoir quelle méthode de récupération de l'énergie est la plus efficace : la réinjecter dans le réseau d'alimentation et l'utiliser par d'autres véhicules, ou la stocker dans des batteries sur les véhicules et l'utiliser par ces véhicules eux-mêmes.

Outre la récupération de l'énergie de freinage, les batteries des véhicules offrent d'autres avantages pour le fonctionnement du réseau : les pics de puissance, très prononcés dans le trafic local et urbain, peuvent être compensés par le véhicule. On peut s'attendre à ce que le profil de tension du réseau s'améliore et que la charge des sous-stations soit plus uniformément répartie. Ces deux facteurs ouvrent la perspective de pouvoir se passer de coûteuses extensions de réseau ou du moins de les reporter dans le temps.

En outre, l'ajout de batteries de traction aux trolleybus présente d'autres avantages, mais ceux-ci ne sont pas étudiés ni évalués dans le présent document. Il s'agit notamment de la possibilité d'exploiter sans ligne aérienne de contact sur de courte distance, par exemple en cas de chantiers, de la possibilité de ne pas équiper les dépôts et les ateliers de lignes de contact, et de prolongements de lignes sans ligne de contact.

2. Objectifs du travail

Il s'agit d'étudier le comportement du réseau d'alimentation entre la ligne de contact et les batteries embarquées sur les deux aspects suivants :

- Analyser les problèmes effectifs assimilés aux chutes de tension dans le réseau d'alimentation électrique
- Analyser les pertes de puissance pour les véhicules subissant la chute de tension afin d'adapter les infrastructures.

Les objectifs du travail peuvent être résumés comme suit :

Créer un modèle de simulation de l'ensemble du réseau de trolleybus de Lausanne. Ce modèle sera utilisé pour simuler à la fois l'exploitation actuelle et celle prévue pour 2025. Pour l'horaire 2025, différents scénarios réalistes de la composition possible d'une flotte évolutive des véhicules avec et sans batteries de traction seront étudiés. Les simulations doivent être évaluées par rapport à :

- La consommation d'énergie dans l'ensemble du réseau
- Les profils de tension sur tous les lignes
- La charge de toutes les sous-stations.

3. Méthodologie et hypothèses et données de base

3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre seront présentés le modèle de simulation utilisé et les méthodes d'analyse des résultats ainsi qu'un aperçu des simulations exécutées.

3.2. MODÈLE DE SIMULATION

3.2.1. Contexte

L'étude du réseau de trolleybus des TL nécessite la construction d'un modèle informatique pour simuler la dynamique complexe du réseau. Le simulateur utilisé est μ PAS/DC, qui a été complété par un modèle des batteries embarqués, décrit plus loin.

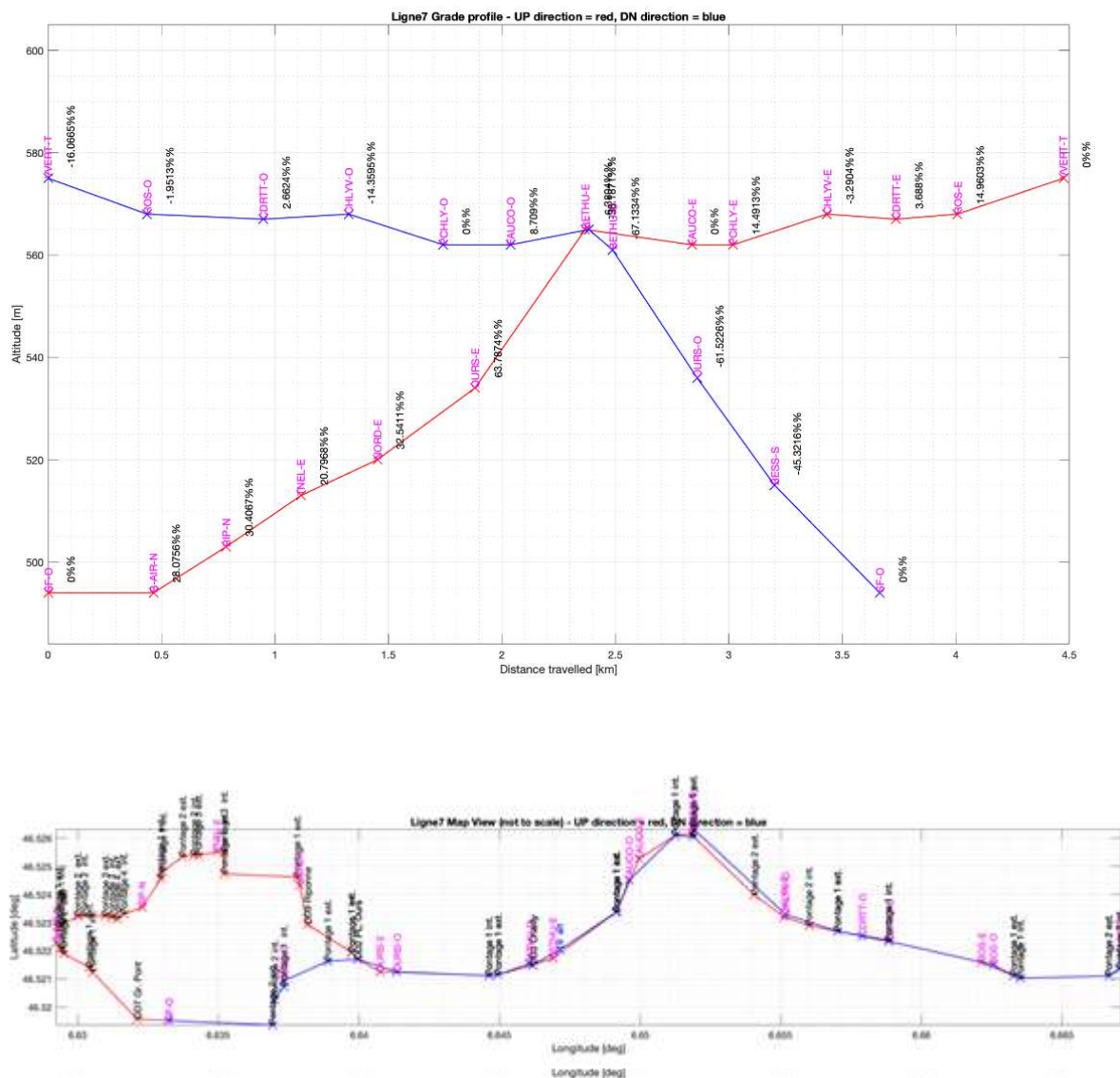
Le modèle informatique comprend :

- Des points géographiques (latitude, longitude, altitude) :
 - Des arrêts de bus (311 au total)
 - Changements d'altitude importants entre les stations
 - Les liaisons électriques
 - Points d'alimentation
 - Isolation/interrupteurs entre les secteurs électriques
- - Paramètres de l'infrastructure électrique :
 - Lignes de contact trolleybus
 - Sous-stations
 - Câbles d'alimentation
- - Paramètres des véhicules
 - Trolleybus à deux essieux, avec remorque (TBR)
 - Trolleybus articulé avec récupération de l'énergie de freinage (TBAREGEN)
 - Trolleybus articulé avec batteries (TBABATT)
 - Trolleybus à double articulation avec batteries (TBDBATT)

3.2.2. Données fournies par les TL (acquisition de la base de donnée)

En collaboration avec le TL, des diagrammes de lignes, des cartes et des plans de réseau, les données géographiques du réseau et les vitesses maximales par section ont été fournies dans un format informatique type Excel, Acrobat pour chaque ligne de trolleybus (10 lignes commerciales au total). Un processus de vérification des données a été effectué pour s'assurer que les données fournies ne comportent pas d'erreurs significatives - la marge d'erreur étant celle de la précision du GPS (généralement ± 10 m). Quelques ajustements ont été effectués pour s'assurer que les points de données sont tous linéaires en fonction de la trajectoire du véhicule. La vérification des données est effectuée à l'aide d'un script Matlab qui calcule également d'autres informations importantes nécessaires au modèle électrique, telles que la distance linéaire entre les coordonnées de latitude/longitude. Le script Matlab produit des interprétations visuelles des données dans les profils de carte et de profil de ligne (altitude). Un exemple est présenté à la Figure 1.

Au cours du processus de vérification des données, les modèles de réseaux géographiques et électriques sont construits automatiquement pour chaque ligne. Ainsi, après une vérification réussie, le modèle généré peut directement être importé dans l'outil de simulation.



9/11/17, 3:03 PM

3.2.3. Modèle du réseau électrique pour la simulation

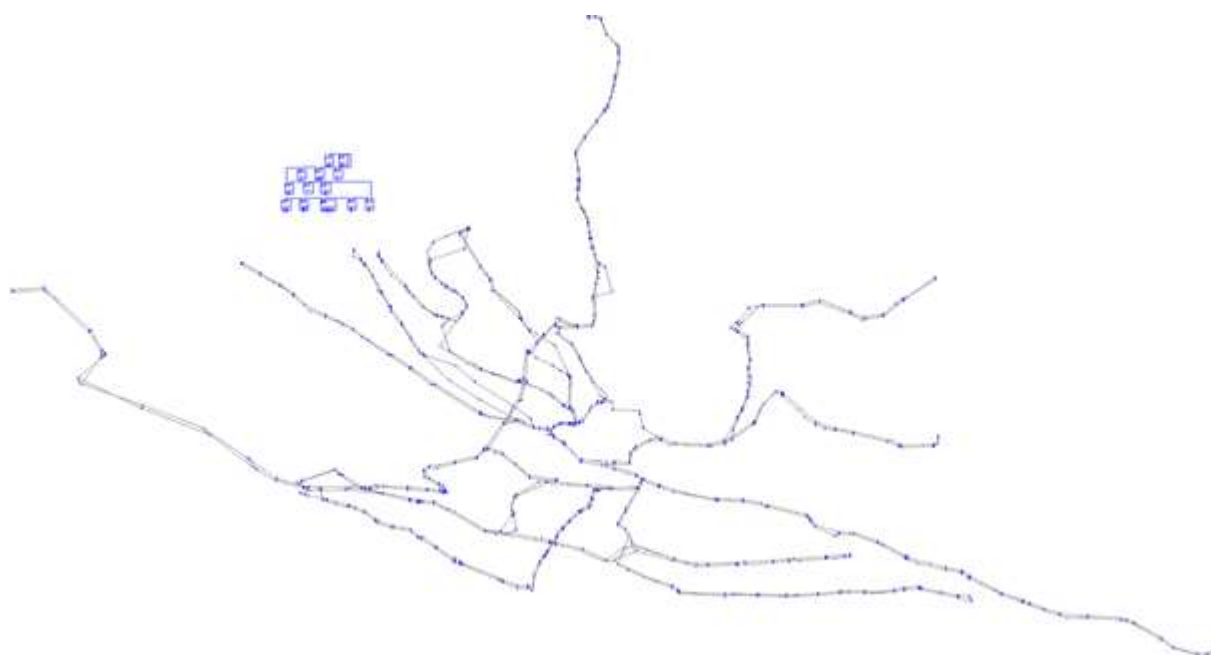


Figure 2 Réseau des lignes de contact. Les lignes dans les deux directions y sont représentées séparément

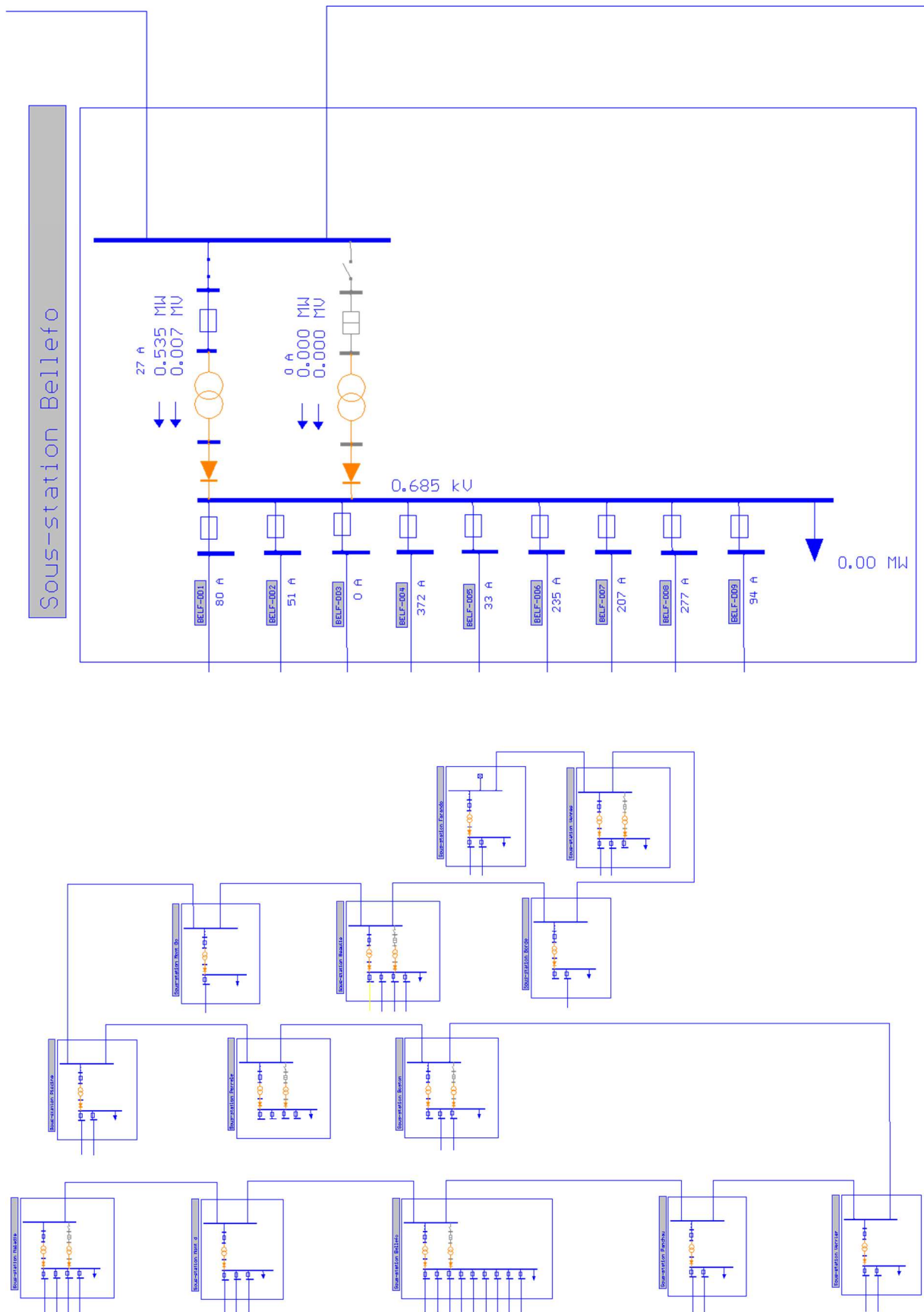


Figure 3 Extrait du modèle des sous-stations (en haut : détail d'une sous-station, en bas : ensemble du réseau)

3.2.4.Véhicules

Les types de véhicules mentionnés ci-dessous sont utilisés dans les simulations :

- TBR : Trolleybus à deux essieux avec remorque, ni batterie ni récupération
- TBA : Trolleybus à trois essieux et une articulation. Dans les simulations, il en existe une variante à batteries (TBABATT) et une variante à récupération.
- TBD : Trolleybus à quatre essieux et deux articulations. Ce type existe seulement avec batteries.
- Dans la réalité, les lots de TBA livrés en 2010 et 2014 ne sont pas complètement identiques. Pour les simulations, le même modèle de véhicule est utilisé pour les TBA 2010 et 2014. En effet, on suppose le véhicule le moins performant (240 kW) puisse être momentanément surchargé à 320 kW, soit de puissance équivalente.

Le véhicule TBR est modélisé comme une unité de propulsion équipée d'une remorque - comme dans la réalité.

Pour les véhicules équipés de batteries, des données supplémentaires, telles que l'état de charge de la batterie (SOC %, State Of Charge), sont enregistrées. Ces informations peuvent être utilisées pour déterminer un état de charge delta pour un trajet aller-retour, qui peut également être utilisé pour optimiser les paramètres de charge de la batterie du type de véhicule.

Les flux de charge dans un trolleybus à batteries sont représentés à la Figure 4. Trois particularités méritent d'être soulignées ici :

1. Le convertisseur de ligne (DC/DC converter) est unidirectionnel, c'est-à-dire aucune énergie peut être renvoyée à la ligne de contact. L'énergie produite par les moteurs lors du freinage est utilisée pour alimenter les auxiliaires et pour charger la batterie.
2. La puissance du convertisseur de ligne est limitée à 180 kW, tandis que la puissance maximale à la roue est de 320 kW. Si la puissance combinée de traction et des auxiliaires dépasse les 180 kW, le solde doit être fourni par la batterie.
3. Une simplification du modèle de simulation est démontrée par la flèche pointillée à la Figure 4 : En réalité, il existe deux types de charge auxiliaire. Une partie des auxiliaires est alimentée à partir du circuit intermédiaire à courant continu (par exemple circuits de chauffage). Une autre partie (par exemple moteurs auxiliaires) est alimentée par une sortie triphasée dédiée aux auxiliaires dans le convertisseur de traction (c'est la partie représentée par la flèche pointillée). Dans la simulation, toute la charge auxiliaire est supposée être alimentée par le circuit intermédiaire (Paux).

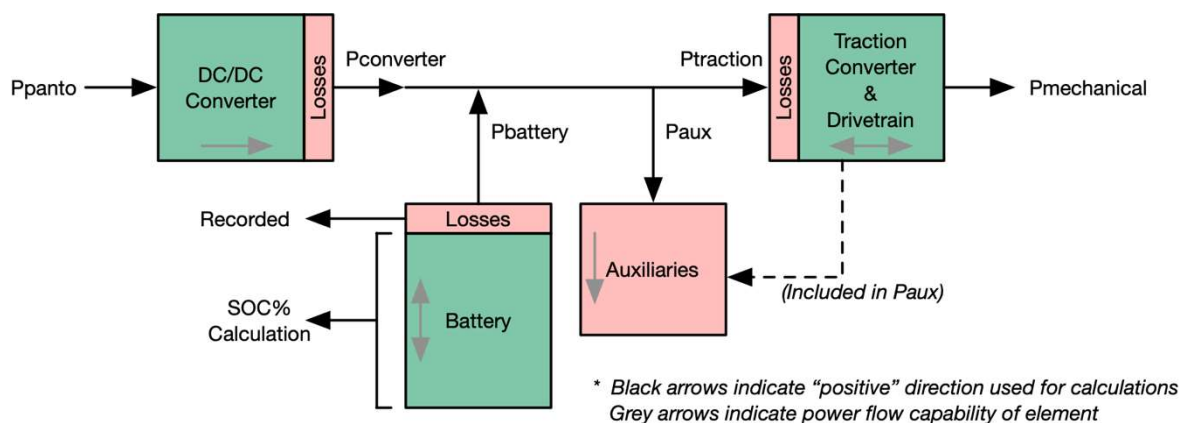


Figure 4 Schéma de principe d'un trolleybus à batteries

Les pertes d'énergie dans la chaîne de traction sont calculées, à chaque instant de la simulation, comme suit :

- Efficacité du convertisseur de ligne : 95% constant
- Efficacité de la chaîne convertisseur de traction + moteurs de traction + réducteurs : 85% constant
- Les pertes de la batterie sont calculées à partir du courant de la batterie, en supposant une résistance électrique interne de la batterie de 0.12 Ω .

Pour la puissance auxiliaire, la démarche suivante a été choisie : Lors d'une campagne de mesure en été 2020, une puissance auxiliaire moyenne de 12 kW a été enregistré pour un TBA. Si l'on réfère ce chiffre à la masse à vide du véhicule, cela représente 0.6 kW/t. Pour les simulations, ces 0.6 kW/t sont utilisés pour tous les types de véhicules. Bien qu'une puissance auxiliaire plus ou moins élevée puisse être consommée par le véhicule, les valeurs utilisées dans ces simulations doivent représenter une moyenne à long terme. Ainsi, les résultats des simulations sont destinés à l'analyse de la consommation d'énergie, par opposition à une analyse des performances du réseau dans le pire des cas.

Dans les simulations, la charge des véhicules avec des passagers est de 50% de leur charge maximale. Il est à noter que la charge à vide d'un TBA équipé de batteries est de 1.2 t de plus qu'un TBA sans batteries (mais avec possibilité de récupération).

Un défi particulier pour une entreprise autrement active dans le secteur ferroviaire était la dérivation des formules pour la résistance à l'avancement des véhicules routiers. Pour le TBD la formule suivante avait été développée lors d'une première étude trolleybus [1] et confirmée alors par le fabricant des bus :

$$F \text{ [kN]} = 3.7 + 0.0045 \cdot (v[\text{m/s}])^2 \quad (1)$$

Pour le TBD cette formule est reprise dans la présente étude, pour les autres types de véhicules, la partie constante de cette formule est adaptée de manière linéaire avec le poids des véhicules.

3.2.5. Horaires

L'horaire est analysé pendant une plage d'une heure une fois que le réseau est saturé par tous les véhicules soit en heure de pointe. La fenêtre choisie est celle d'une heure de pointe.

Il n'est pas réaliste de démarrer les horaires de chaque ligne en même temps (par exemple : xx:00:00) car cela produira des pics et des chutes de tension irréalistes dus à des accélérations simultanées. Les temps de « démarrage » pour chaque ligne sont donc déterminés de manière aléatoire et lissés dans le temps.

Pour l'horaire actuelle (2020), les cadences sont celles publiées dans l'horaire CFF et simulées entre 7h00 et 8h00, un jour de semaine hors période de vacances. A savoir, la flotte actuelle de trolleybus ne couvre pas l'intégralité de l'offre, d'où des véhicules thermiques diesel (ABA) complète l'horaire.

Pour l'horizon 2025, les intervalles utilisés dans la simulation ont été indiqués par les TL. Sur toutes les lignes, les intervalles alternent entre 7 et 8 minutes, c'est-à-dire une cadence de 7.5 minutes en moyenne.

Le déploiement du matériel roulant est comme suit :

Pour la simulation 2020 :

L1	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen
L2	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen				
L3	TBA regen												
L4	TBA regen	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	TBA regen						
L6	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen	TBA regen	ABA	TBA regen			
L7	TBR	TBA regen	TBR	ABA	TBR	TBA regen	TBR						
L8	TBA regen												
L9	TBR												
L21	TBA regen												
L25	TBA regen												

Figure 5 Déploiement des types de véhicules sur les lignes. Le type ABA est un bus diesel qui circule aux heures de pointe aujourd'hui, mais qui n'influence pas le réseau d'alimentation électrique et n'est donc pas pris en compte dans la simulation

Pour les simulations 2025, les lignes 7 et 9 sont entièrement équipées en TBA, tandis que les autres lignes sont entièrement équipées de TBA. Pour la répartition entre les TBA à récupération et ceux à batteries, voir plus bas la méthodologie dans le chapitre 3.3.

3.3. MÉTHODES D'ANALYSE DES RÉSULTATS

3.3.1. Consommation d'énergie

Le simulateur μ PAS/DC enregistre, à chaque instant de la simulation, les puissances de chaque véhicule et des éléments du réseau d'alimentation choisis au préalable. Tant qu'il n'y a pas de véhicules à batteries, l'énergie absorbée ou fournie par un élément s'obtient facilement en intégrant la puissance de cet élément sur le temps d'observation, dans le cas présent les 3600 secondes entre 7h00 et 8h00. Les pertes énergétiques des lignes électriques sont la différence entre la totalité de l'énergie fournie par l'ensemble des sous-stations, et la somme de l'énergie consommé par la totalité des véhicules.

En revanche, pour les véhicules munis d'une batterie, les choses se compliquent un peu. La raison se trouve dans le fait qu'en général, l'état de charge d'une batterie n'est pas le même au début et à la fin d'une course. Pour établir une comparaison équitable des systèmes, cette différence (du contenu d'énergie dans la batterie) est prise en compte comme suit (voir aussi Figure 6) :

- Si le contenu d'énergie de la batterie est **plus bas** à la fin de la course (ou de la fenêtre d'observation) qu'au départ de la course (ou l'entrée dans la fenêtre d'observation): Dans ce cas, de l'énergie stocké dans la batterie avant la course (ou avant la fenêtre d'observation) a contribué au mouvement du véhicule, elle doit être remplacé tôt au tard par une consommation tirée de la ligne en dehors de la fenêtre d'observation. Ce solde doit donc être **additionné** à l'énergie fournie par la ligne pendant la fenêtre d'observation (= fenêtre de simulation).
- Si le contenu d'énergie de la batterie est **plus élevé** à la fin de la course (ou de la fenêtre d'observation) qu'au départ de la course (ou l'entrée dans la fenêtre d'observation): Dans ce cas, un surplus d'énergie a été tiré de la ligne pendant la course, ce surplus pourra être utilisé lors d'une future course en dehors de la fenêtre d'observation. Ce solde doit donc être **soustrait** de l'énergie fournie par la ligne pendant la fenêtre d'observation (= fenêtre de simulation).

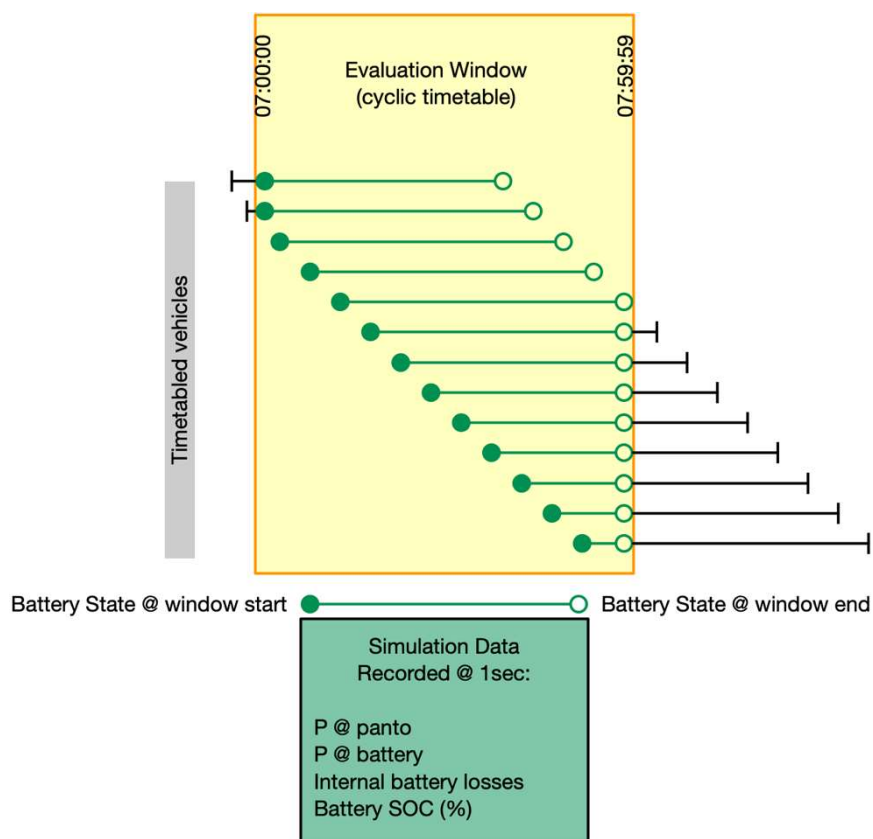


Figure 6 Représentation des courses dans la fenêtre de simulation et en dehors. Pour chaque course, la différence de contenu énergétique de la batterie est calculée entre un cercle vide et un cercle rempli.

La partie du cycle de charge/décharge de la batterie hors de la fenêtre d'observation est, elle aussi, accompagnée de pertes. Le calcul suivant (Tableau 1) fournit une estimation des pertes subies lors d'une recharge aux stations terminus des lignes commerciales pour compenser la différence du contenu énergétique des batteries dans la fenêtre de simulation (voir ci-dessus).

Le temps de recharge peut être considérablement réduit en abaissant l'alimentation auxiliaire pendant l'arrêt aux stations terminus en raison de la limitation de courant de 80 A aux cuillères. L'impact sur les pertes est très minimal, mais sont prises en compte.

Les simulations selon les scénarios tl_2025 décrit dans le chapitre 3.4 indiquent que l'énergie de recharge requise à la fin de la fenêtre d'évaluation est la suivante :

tl_2025_2,4 &5 :	~270kWh
tl_2025_3a :	~1200kWh
tl_2025_3b :	~530kWh

Par conséquent, pour fournir une indication (échelonnable) du temps d'arrêt et des pertes de batterie encourues, le tableau suivant peut être utilisé pour évaluer l'impact (en utilisant une énergie moyenne à être chargé de 1000kWh comme exemple). Notez que la réduction de la puissance auxiliaire pendant les arrêts peut permettre de disposer de puissance pour charger la batterie, d'où les différents cas.

Estimation des pertes batteries - Charge à l'arrêt

Véhicule/Paramètres de simulation	
Tension panto	690 V
Courant panto maximum	80 A
Puissance panto	55.2 kW
Efficacité convertisseur ligne	95 %
Tension batterie typique	690 V
Résistance batterie	0.12 ohm
Energie à charger	1000 kWh
Nombre de véhicules	229 vehicles
Energie moyenne par véhicule	4.37 kWh/vehicle

Effet de la variation de la puissance auxiliaire à l'arrêt						
Puissance auxiliaire	30	25	20	15	10	kW
Puissance disponible pour charger la batterie	22.44	27.44	32.44	37.44	42.44	kW
Courant de charge batterie	32.52	39.77	47.01	54.26	61.51	A
Pertes batterie	0.13	0.19	0.27	0.35	0.45	kW
Puissance qui charge effectivement la batterie	22.31	27.25	32.17	37.09	41.99	kW
Heures pour la recharge de chaque vehicule	0.20	0.16	0.14	0.12	0.10	hours
Minutes pour la recharge de chaque vehicule	11.74	9.61	8.14	7.06	6.24	mins
kWh pertes par véhicule	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	kWh
kWh pertes totales, tous véhicules	5.69	6.96	8.24	9.53	10.81	kWh

Tableau 1 Calcul des pertes lors de la recharge des batteries aux terminaux des lignes

3.3.2.Tension ligne

Pour chaque simulation et pour chaque ligne un graphique est produit qui combine la tension enregistrée sur chaque véhicule.

3.3.3.Charge des sous-stations

Afin d'évaluer la charge des différentes sous-stations, la méthode de la ligne de durée de charge pondérée dans le temps (LDCPT) est appliquée à leur puissance. Pour calculer la LDCPT, on varie la longueur d'une fenêtre d'évaluation, dans laquelle l'on calcule des moyennes et qui est poussé le long du tracé d'en bas. Pour chaque longueur de la fenêtre, la valeur maximale est retenue et marqué dans le diagramme de la LDCPT. Cela permet une comparaison simple de la charge avec la puissance nominale des sous-stations et, si nécessaire, avec leur capacité de surcharge limitée dans le temps.

3.4. APERÇU DES SIMULATIONS EXÉCUTÉES

Pour la suite de l'analyse, nous avons retenu sept modèles de flotte de véhicules qui permettront de mettre en évidence les points forts et faibles du réseau et des pertes énergétiques par comparaison. A savoir le modèle tl_2020 est la flotte réelle des véhicules circulant sur le réseau tl. Pour la prévision de la flotte 2025, il y a plusieurs configurations en conservant les véhicules non-amortis et en faisant des rétrofits ou des nouvelles acquisitions dont les technologies des performances connues aujourd'hui afin de maintenir un nouvel horaire à 7.5 minutes sur l'ensemble des lignes de trolleybus.

Remarque / Explications :

- tl_2020 sert de référence. La comparaison entre les simulations 2025 et 2020 permet d'avoir une idée de l'influence de l'amélioration des dessertes sur la consommation d'énergie, sur la tension au long des lignes, et sur la charge des sous-stations.
- tl_2025_1 est purement hypothétique : Dans cette simulation l'on suppose qu'aucune énergie n'est régénérée lors du freinage. Ceci n'est ni le cas aujourd'hui (les TBA récupèrent) ni envisagé pour le futur, mais le scénario permet de juger, en comparant avec les autres simulations 2025, le gain en efficacité énergétique de la récupération et/ou des batteries.
- tl_2025_2 suppose que l'ensemble de la flotte TBA actuelle et future reste soit à récupération (pas de batteries). En revanche, les TBD sont toujours munis de batteries.
- tl_2025_3a suppose que l'ensemble de la flotte TBA sera équipé de batteries (rétrofit des TBA existants avec batteries).
- tl_2025_3b suppose que les TBA existants restent à récupération, mais les TBA acquis dans le futur seront équipés de batteries.
- tl_2025_4 : Le parc des véhicules est identique à tl_2025_2, mais un nombre de sectionnements dans le réseau d'alimentation électrique seront pontés, c'est-à-dire que des sous-stations seront mis en parallèle. Cela peut nécessiter des ajustements à la protection.
- tl_2025_5 est identique à tl_2025_4, mais en plus les sous-stations sont supposées être réversibles.

Au Tableau 2, les simulations exécutées sont résumées.

Référence de la simulation	Horaire	Nombre véhicules/courses	Technologie freinage électrique des véhicules			Réseau d'alimentation
			TBR	TBA	TBD	
tl_2020	2020	59/179	Rhéostat	Récupération	-	Actuel
tl_2025_1	7,5min	76/229	-	Rhéostat (sans récupération - situation hypothétique)	Rhéostat (sans récupération - situation hypothétique)	Actuel
tl_2025_2	7,5min	76/229	-	Récupération	Batterie	Actuel
tl_2025_3a	7,5min	76/229	-	Batterie	Batterie	Actuel
tl_2025_3b	7,5min	76/229	-	Mélange de véhicules à batterie et de récupération	Batterie	Actuel
tl_2025_4	7,5min	76/229	-	Récupération	Batterie	Mise en parallèle de sous-stations
tl_2025_5	7,5min	76/229	-	Récupération	Batterie	Mise en parallèle de sous-stations ET sous-stations réversibles

Tableau 2 Aperçu des simulations

Explications :

Colonne Nombre véhicules/coures : Le premier chiffre représente le nombre maximal de véhicules opérant simultanément à tout instant de la fenêtre de simulation. Le deuxième chiffre représente le nombre de courses qui ont entièrement ou partiellement lieu dans la fenêtre de simulation.

Le déploiement des types des véhicules est comme suit : Dans toutes les simulations 2025, les lignes 7 et 9 sont à TBD qui sont toujours à batteries. Pour les autres simulations (sauf tl_2025_3b) les TBA sont soit entièrement à batteries ou à récupération selon le *Tableau 2*. Pour la simulation tl_2025_3b le déploiement est comme suit (et pourrait éventuellement être optimisé) :

L1=batteries	L7=TBD
L2=récupération	L8= récupération
L3=batteries	L9=TBD (batteries)
L4= récupération	L21=2/3 récupération, 1/3 batteries
L6= récupération	L25= récupération

4. Résultats

4.1. CONSOMMATION D'ÉNERGIE

La Figure 7 montre, pour chaque scénario de simulation, la totalité de l'énergie de traction consommée (comme relevé aux sous-stations), pendant une heure de pointe (7h00 à 8h00).

Afin de mettre en évidence les changements très notables selon les différents scénarios de simulation, les éléments suivants y sont marqués par des couleurs différentes :

- Bilan de l'énergie absorbée et réinjectée aux perches des véhicules
- Pertes dans les lignes aériennes de contact
- Energie nécessaire en dehors de la fenêtre de simulation pour ramener le contenu énergétique des batteries à celui au départ.
- Pertes énergétiques pendant cette recharge en dehors de la fenêtre de simulation.

La consommation totale nécessaire correspond à la hauteur totale de chaque barre.

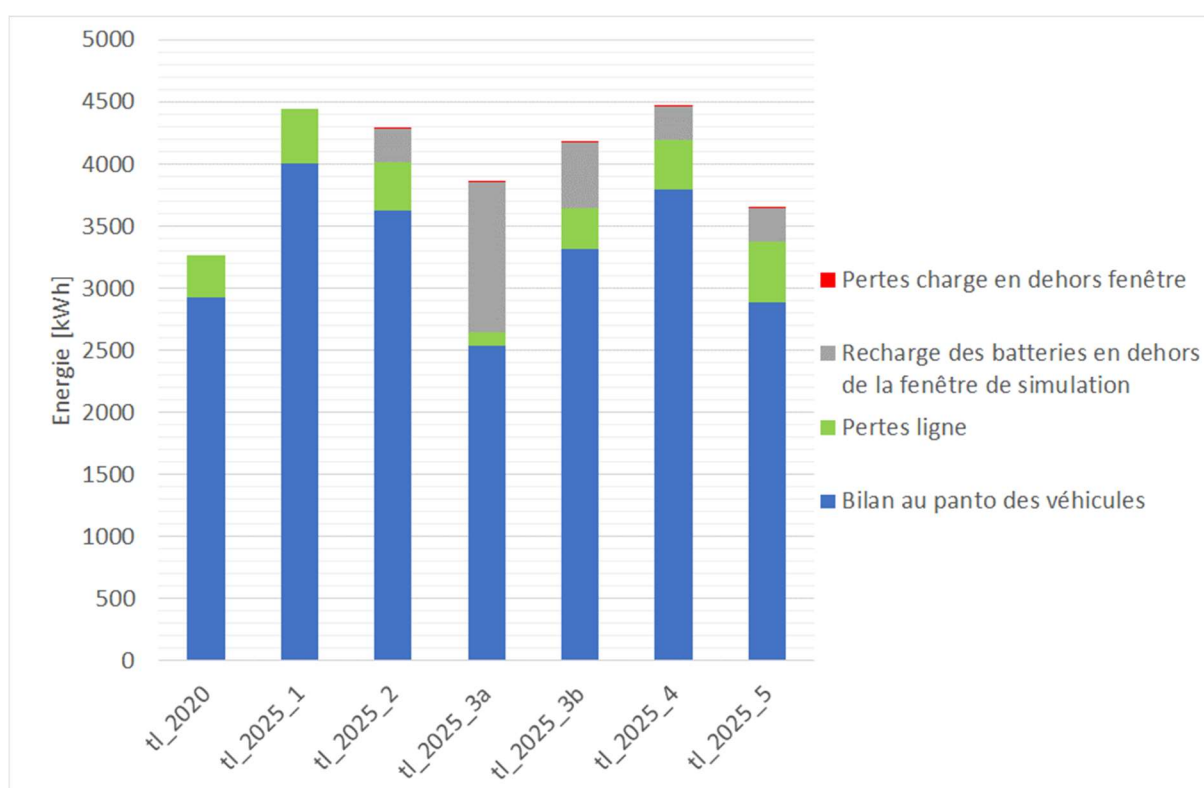


Figure 7 Consommation d'énergie de traction de l'ensemble du réseau trolleybus (somme aux sous-stations) pour une heure de pointe (7h00 à 8h00)

L'analyse des résultats se trouve au chapitre 5.

La Figure 8 montre les économies relatives en [%] par rapport à la simulation de référence tl_2025_1. Nous rappelons que cette flotte n'est pas représentative (voir ci-dessus) ni pour la flotte actuelle ni pour aucune des variantes envisagées pour le futur, mais elle sert de référence en ne récupérant aucune énergie de freinage.

L'effet légèrement négatif visible à la simulation tl_2025_4 nécessite une investigation plus approfondie. Il est supposé que les courses profitent d'un meilleur profil de tension est opérant donc moins souvent en mode de réduction de la puissance dû à la tension, ce qui résulte en des cycles d'accélération plus « dynamique ». Il y a certainement le même phénomène aux simulations 3a, 3b et 5, mais dans ces cas, ce phénomène négatif est surcompensé par la meilleure récupération de l'énergie de freinage.

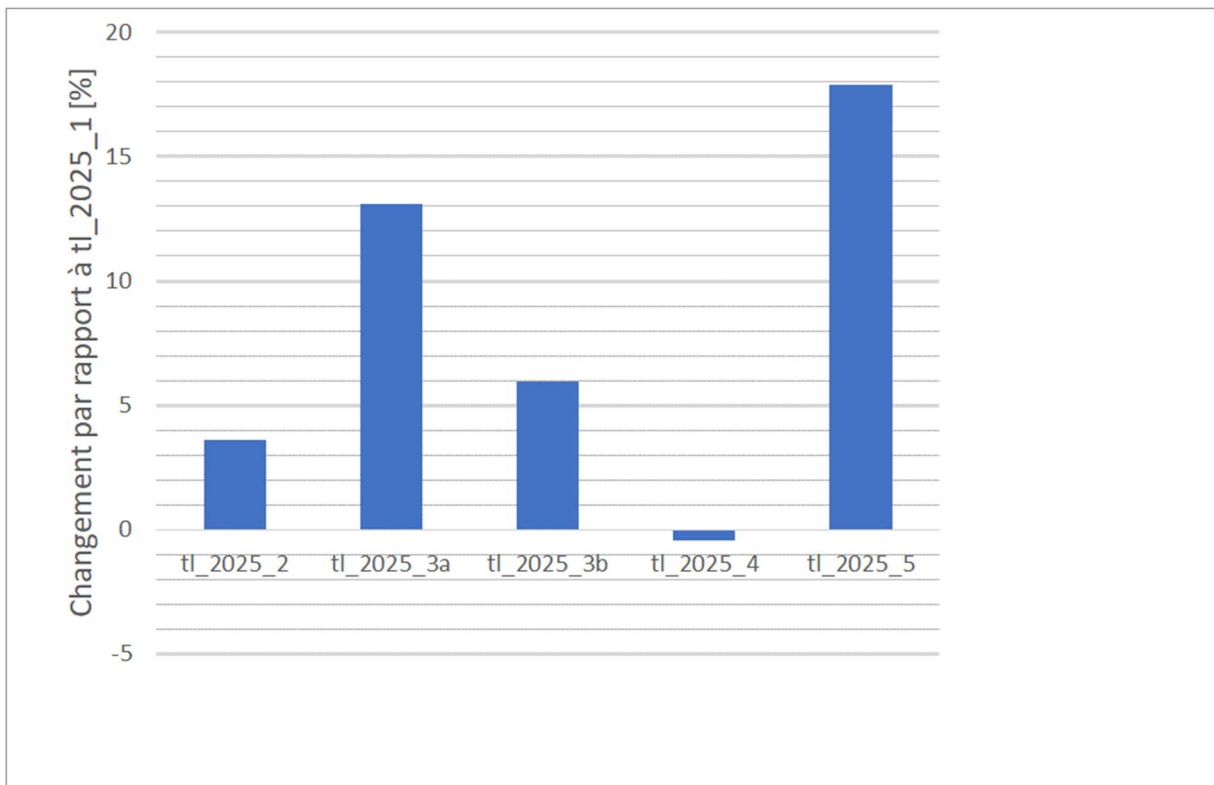


Figure 8 Réductions de la consommation d'énergie relatives par rapport à la simulation de référence, tl_2025_1

A noter que dans la simulation tl_2025_5, toutes les sous-stations sont réversibles. Une première analyse laisse à supposer qu'un résultat presque aussi bon pourrait être atteint en convertissant seulement trois ou quatre sous-stations réversibles (probablement Bellefontaine, Beaulieu, Mont d'Or, Emmaus-Vennes à confirmer par des simulations détaillés).

4.2. PROFILES DE TENSION

L'ensemble des graphiques de la tension sont compilés aux annexes. A titre d'exemple, la Figure 9 montre le profil de tension de la ligne 4 obtenu à la simulation tl_2025_2. Dans cette simulation, la ligne 4 est exploitée avec des TBA à récupération. En revanche la Figure 10 montre le profil de tension de la ligne 4 obtenu à la simulation tl_2025_3a, où tous les bus sont à batteries.

Pour la compréhension des graphiques tension, il faut noter que les valeurs sont tracées en fonction de la distance à partir d'un seul terminus. Aux Figure 9 et 10 les bus de la direction Pully -> Couderai (rouges) partent depuis la gauche, tandis que ceux de la direction Couderai -> Pully partent de la droite. Les différences de tensions sont limitées entre les deux directions grâce au pontage fréquent (tous les 300m) entre les lignes aériennes.

Dans l'ensemble des graphiques tension sont représenté par trois lignes horizontales qui signifient :

- 580 V : limite en dessous de laquelle les batteries ne sont plus chargés
- 480 v : limite en dessous de laquelle commence la limitation de la puissance de traction
- 400 V : limite en dessous de laquelle la puissance de traction est égale à zéro, mais les auxiliaires sont toujours alimentés

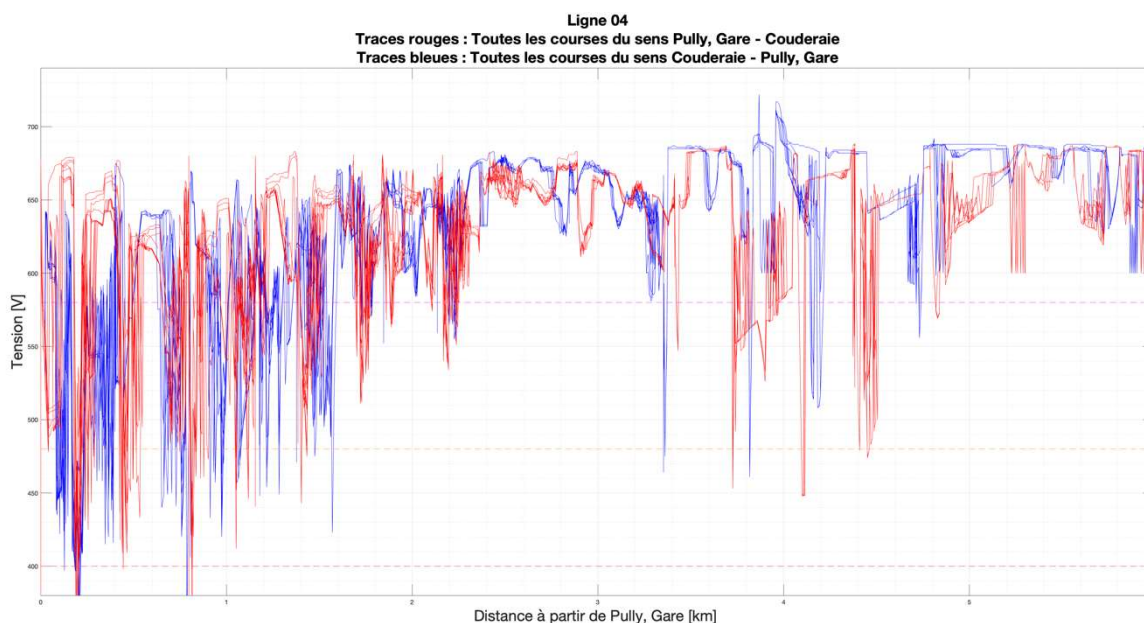


Figure 9 Profil de tension le long de la ligne 4, simulation tl_2025_2

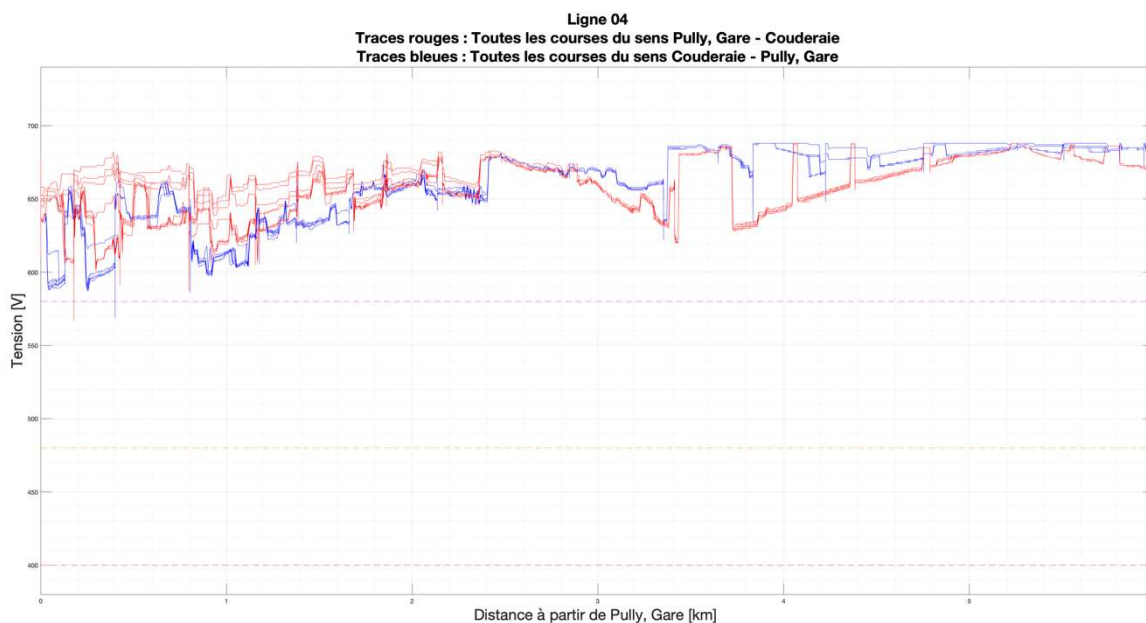


Figure 10 Profil de tension le long de la ligne 4, simulation tl_2025_3a

Une explication doit être ajoutée au sujet des oscillations de la tension plus ou moins fortes que l'on peut constater dans certains graphiques de la tension, par exemple à la Figure 9. Ces oscillations sont dues à la réduction de la puissance en fonction de la tension. L'on peut imaginer que si dans un cycle la tension chute, cela provoque une réduction de la puissance. La réduction de la puissance a pour conséquence que la tension monte de nouveau, le véhicule sort de la limitation de puissance et ainsi de suite. Dans la simulation, ce phénomène est très prononcé à cause de l'échantillonnage (sampling) à 1 seconde. Dans la réalité, de telles oscillations présentent en général des amplitudes beaucoup moins importantes grâce aux temps de cycles beaucoup plus courts de l'électronique et de ses réglages. En conclusion, si l'on constate de telles oscillations dans une simulation, cela n'est donc pas la même amplitude en réalité, mais impacte les performances du véhicule qui circulera avec une limitation de puissance, donc à performance réduite. L'impact sur l'horaire de trajet devra être vérifié si l'on désire exploiter le système régulièrement de cette façon.

La qualité de tension extraordinairement bonne de la simulation 3a peut être observée sur toutes les lignes ; dans le cas de la simulation 3b le même effet est également visible pour les lignes à majorité de véhicules à batteries. Si tous les véhicules sont équipés de batteries, il n'est pas nécessaire de procéder à des investissements dans l'infrastructure à l'horizon de l'offre 2025. Dans le cas des autres scénarios, il faudrait analyser les résultats encore plus en détail.

Bien qu'un profil de tension type Figure 9 engendre quelques limitations de la puissance, celles-ci sont de courte durée et n'ont quasiment pas d'effet mesurable sur les temps de parcours. Ceci est en partie dû aux vitesses maximales imposées dans les simulations, qui souvent ne dépassent pas les 35 km/h. Sur des parcours où des vitesses de 50 ou même 60 km/h pourraient être atteints, des limitations de puissances auraient des effets plus perceptibles, plus particulièrement sur les trajets en montée. Cela s'applique également aux situations qui ne peuvent pas être représentées dans les simulations, comme par exemple une forte accélération souhaitable lors du dépassement d'un cycliste.

En outre, il faut tenir compte de ce qui suit : si un scénario atteint souvent la limite de puissance pendant l'alimentation normale du réseau, ce serait encore beaucoup plus le cas si une sous-station électrique n'était pas disponible. Un trolleybus équipé de batteries pourrait également fonctionner dans une telle situation sans perte de puissance.

Les lignes qui prévoient une augmentation du trafic et qui ont également un profil de tension relativement faible bénéficieraient d'un apport d'énergie avec l'utilisation de véhicules équipés de batteries, en particulier si les vitesses de déplacement sont augmentées ou lors d'extension des lignes commerciales.

- Ligne 4 & 25, près de Pully, Gare. Étant donné qu'il est très proche de SST Panchaudaz, une étude de faisabilité pour connecter ce secteur de ligne pourrait être entreprise.

- Lignes 2 et 21, près de Boisy. Il y a une pente ascendante importante ici, ainsi qu'une sous-station à proximité pour la ligne 4 (SS Mont-Goulin). Une étude de faisabilité de mettre en parallèle le secteur entre le SST Mont-Goulin et le SST Beaulieu pourrait être entreprise.

- Ligne 9, près de Prilly, Eglise. Il y a ici une petite pente ascendante qui influence les performances en bout de ligne. L'emplacement des véhicules à déterminer améliore cette situation.

- Les chutes de tension les plus importantes sur la ligne 8 se produisent sur le tronçon en montant près de l'arrêt Côtes, mais il y a déjà un poste très proche (SST Farandole). Cela doit être étudié pour comprendre la cause exacte de cette limitation.

4.3. CHARGE DES SOUS-STATIONS

L'exemple de l'évaluation des puissances est ici démonté pour la sous-station de Beaulieu, les mêmes graphiques pour toutes les autres sous-stations se trouvent en l'annexe. La Figure 11 montre la durée de charge pondérée dans le temps et l'évolution de la puissance en fonction du temps. Ce sont les valeurs que l'on pourrait lire sur un enregistrement.

Cependant, pour l'analyse des résultats, la ligne de durée de charge pondérée dans le temps (LDCPT = « *TRLPC : Time Rated Load Period Curve* ») représenté ci-dessous est nettement plus significative. Plus cette ligne s'approche de l'horizontale, plus on a une charge équilibrée dans le temps. En revanche, une ligne oblique indique une forte variation avec le temps. Il est très significative avec le cas d'une flotte des bus à batteries (2025_Sim3a) permettant la meilleure utilisation de la puissance installée dans la sous-station. L'observation des autres graphiques à l'annexe permet de faire le même constat pour les autres sous-stations.

La ligne pointillée rouge représente la limite de la sous-station. Elle respecte la puissance nominale de la sous-station et la capacité de surcharge selon la norme EN 50328, classe V (200% pendant 1 minute, 150% jusqu'à 2 heures). En appliquant ces principes, l'on peut constater que pour toutes les simulations il n'y a aucun cas de surcharge et que la situation tl_2025_3a présente la plus grande réserve.

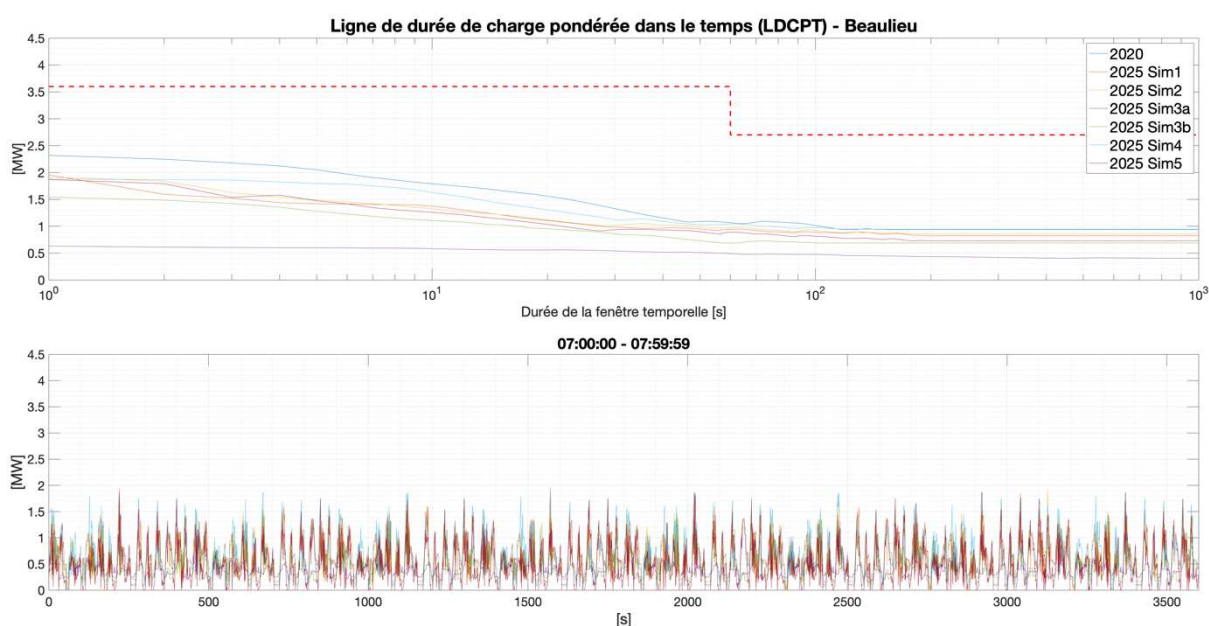


Figure 11 Puissances appelées à la sous-station de Beaulieu. En haut ligne de durée de charge pondérée dans le temps (LDCPT), en bas, la puissance en fonction du temps.

5. Analyse du potentiel d'Economie d'énergie

Le potentiel d'économie d'énergie peut, tous scénarios confondus, paraître bas à première vue, en particulier pour un réseau qui présente des déclivités importantes comme à Lausanne. Afin de vérifier ce constat, une simulation supplémentaire fut exécutée comme suit :

Toutes les courses de l'horaire 2025 sont simulées, sans le réseau électrique d'alimentation et il est supposé que dans ce cadre l'utilisation de mêmes caractéristiques véhicules (plage effort-vitesse) et ainsi toute l'énergie générée lors des freinages puisse être récupérée à 100%. On néglige :

- Toutes pertes dans les lignes
- Toutes pertes dans les batteries
- Toutes les limitations de la récupération à cause d'une tension ligne trop élevée.

Cette simulation révèle un potentiel de récupération de 19.1% de l'énergie à fournir. Cette valeur forme la limite supérieure absolue de la régénération de l'énergie de freinage. Toutes simulations prenant en compte les pertes et limitations citées ci-dessus, donnent un résultat d'un taux de récupération plus basse.

Il est à noter que si la puissance des auxiliaires est augmentée à 25 kW pour les TBA et 30 kW pour les TBD (au lieu des 0.6 kW/t citées précédemment, ce qui l'équivalent à 12 kW pour un TBA et à 16 kW pour un TBD), ce pourcentage de récupération descend à 12.8% (au lieu de 19.1%).

Les paramètres suivants utilisés dans toutes les simulations pourraient être considéré comme pessimistes, mais ils ont été vérifiés avec le constructeur des trolleybus lors de l'étude [1] :

- Les paramètres de la formule pour résistance à l'avancement (1)
- Les valeurs de l'efficacité du convertisseur de ligne et surtout de la chaîne de traction (Figure 4)
- La résistance électrique de la batterie (Figure 4)
- Le besoin en énergie auxiliaire

Avec une adaptation de ces paramètres optimisée, l'on pourra que constater une amélioration des systèmes concernés et de ce fait apporter une réduction des pertes d'énergie.

Il convient également de noter que dans le cas des véhicules à batteries, la stratégie de charge et décharge de la batterie peut sensiblement influencer les résultats.

Par exemple, la simulation 3a a été réalisé avec différentes stratégies de charge. L'énergie delta requise à la fin de la fenêtre d'évaluation était de :

250A @ 25% SOC ¹ ou moins, réduction linéaire à 0A @ 85% SOC	→ 1575 kWh
250A @ 50% SOC ou moins, réduction linéaire à 0A @ 85% SOC	→ 1240 kWh
300A @ 50% SOC ou moins, réduction linéaire à 0A @ 85% SOC	→ 1120 kWh

Ces chiffres sont à titre d'exemple et ne peuvent pas être directement comparés avec ceux du chapitre 4.1, car d'autres paramètres comme la puissance des auxiliaires diffère.

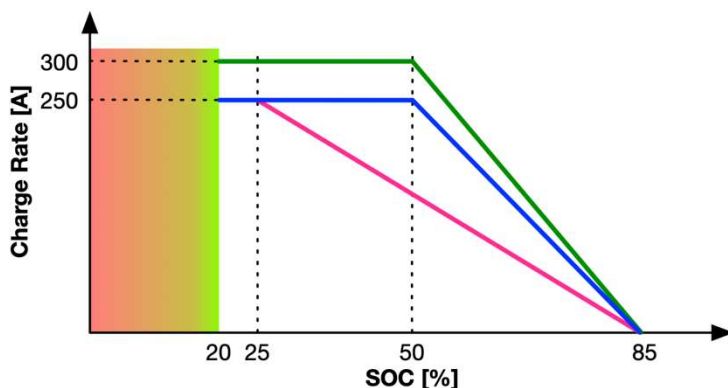


Figure 12. Stratégies de charge

¹ SOC = state of charge, état de charge (de la batterie)

Pour le cas de la récupération dans le réseau (simulations tl_2025_2 et tl_2025_4), l'amélioration de la performance énergétique semble très faible. Ceci est peu surprenant au vu de la faible tension nominale du système (600 V) et de la résistance des lignes aériennes relativement élevée (dans le cas des chemins de fer à courant continu, la résistance du circuit de retour est beaucoup plus basse grâce à la faible résistance des rails, et même dans le circuit d'alimentation il y a normalement un câble porteur et souvent des feeders qui réduisent cette résistance). Une certaine amélioration pourrait éventuellement être obtenue en optimisant la courbe de limitation de la puissance de récupération en fonction de la tension ligne², et peut-être en élevant un peu la tension maximale admissible. Cependant, ces mesures pouvant impacter tout le système existant (aussi bien sur les véhicules que dans l'infrastructure), une démarche prudente serait nécessaire avec le constructeur des trolleybus.

Une autre possibilité, beaucoup plus fructueuse, serait de rendre les sous-stations bidirectionnelles, ce qui nécessite cependant un investissement important. Il est à noter que la simulation correspondante (tl_2025_5), est la meilleure de toutes au niveau énergétique. Dans cette simulation, toutes les sous-stations sont réversibles. Un premier aperçu basé sur les simulations montre que dans le cas du réseau tl, l'équipement de trois sous-stations réversibles pourrait probablement être déjà significative ; cependant, cela devrait être examiné plus en détail.

Même si cette solution est la meilleure au niveau économie d'énergie, elle ne l'est guère au niveau financier, parce qu'il est peu probable qu'un kWh puisse être revendu dans le réseau triphasé au même prix qui doit être payé pour l'achat de l'énergie. Des négociations avec le fournisseur de l'énergie et avec l'opérateur du réseau électrique (GRD) seraient en tout cas nécessaires.

Revenant sur les batteries, les résultats des simulations montrent qu'outre la réduction des pertes énergétiques, cette technologie permet de sensiblement d'améliorer les profils de tension le long des lignes, et d'assurer des charges des sous-station beaucoup plus équilibrées dans le temps. Il est certain que dans le cas de l'équipement de tous les bus en batteries (simulation tl_2025_3a), des investissements dans ces infrastructures ne seront pas nécessaires à l'horizon 2025 et au-delà. Si l'un des autres scénarios était choisi, cette question devrait être approfondie ; les simulations présentées peuvent y servir de base.

Pour conclure, Il nous semble judicieux de mentionner que les batteries présentent aussi quelques inconvénients, dont la quantification dépasserait le cadre de ce travail :

- Une longueur de vie limitée, mais difficile à estimer. Elles peuvent peut-être être revendues pour des tâches moins exigeantes à la fin de leur vie, mais il est difficile d'estimer les prix de revente ou de recyclages.
Au vu des progrès actuels de cette technologie, il est également très difficile d'estimer le prix d'un changement de batteries nécessaire dans quelques années.
- Une quantité d'énergie grise non négligeable pour la fabrication des batteries, et d'autres problèmes écologiques et sociaux liés à la l'extraction des matières primaires.
- Le comportement au feu.

² Pour les simulations présentées dans ce rapport, la puissance de récupération est limitée de façon linéaire entre 760 et 800 V.

6. Conclusions et recommandations

L'objectif d'amélioration de l'efficacité énergétique peut être atteint de plusieurs manières. Sur la base des simulations effectuées, on peut s'attendre aux économies suivantes par rapport à une situation initiale sans récupération de l'énergie de freinage :

- Généralisation de la récupération sur tous les véhicules sauf TBD, qui seront équipés de batteries : -3 à 4%
- Généralisation des batteries sur tous les véhicules : -13%
- Généralisation de la récupération sur tous les véhicules sauf TBD, qui sont équipés de batteries et modifications d'équipement de certaines sous-stations en mode réversible : -18%

Il est à noter que ces chiffres se basent sur une consommation des auxiliaires (y compris chauffage et climatisation) considéré avec une moyenne acceptable. Toute augmentation de la consommation auxiliaires (par exemple un fort changement de températures ambiantes très basses ou très élevées), ces valeurs ne pourront pas être atteintes. Dans le cas de la récupération (surtout sans sous-stations réversibles), les mêmes valeurs ne pourront pas être atteintes lors des heures creuses (car moins de possibilité d'absorber de l'énergie par d'autres véhicules).

Les batteries offrent un bon compromis entre une réduction tangible de la consommation d'énergie et d'autres avantages. En effet, le lissage de la consommation à partir de la ligne aérienne possible grâce aux batteries présente un double avantage d'améliorer la qualité de la tension le long de la ligne et de lisser la charge des sous-stations. Ceci permet également d'éviter, au moins à l'horizon de l'offre 2025, des investissements dans le système d'alimentation (sous-stations et lignes aériennes de contact).

Les auteurs sont d'avis que les TL puissent maintenant faire un choix de base concernant ces technologies. En fonction de ce choix, certaines enquêtes complémentaires sont alors recommandées:

Dans le cas des solutions de batteries, optimisation de certains paramètres pour la stratégie de charge / décharge.

Dans le cas où la récupération devait être retenue pour une plus ou moins grande partie de la flotte, il restera à déterminer quelles extensions de l'infrastructure, telles que des sous-stations supplémentaires, des sous-stations réversibles, ou des renforcements des lignes, doivent être nécessaire. Dans ce cas, une vérification sur quelles lignes les véhicules à batterie et récupération seront déployés semble judicieuse.

Pour le scénario 2025, les sous-stations électriques ne seront pas surchargées. Cependant, certains points faibles du réseau de la ligne aérienne de contact ont été identifiés et devraient être étudiés pour déterminer si les performances peuvent être améliorées en modifiant la configuration de puissance et / ou en mettant en œuvre des véhicules alimentés par batterie. Des secteurs tel que Pully Gare (terminus L4 et L25), Boisy (L2 et L21), Pully, Eglise (L9) et Côtes (L8) sont identifiés comme des points faibles du réseau. Des considérations sur les futurs plans d'extension du réseau devraient également être prises en compte dans les études.

Liste des symboles et abréviations

LDCPT	Ligne de durée de charge pondérée dans le temps
TBA	Trolleybus articulé (une articulation)
TBD	Trolleybus à double articulation
TBR	Trolleybus à remorque

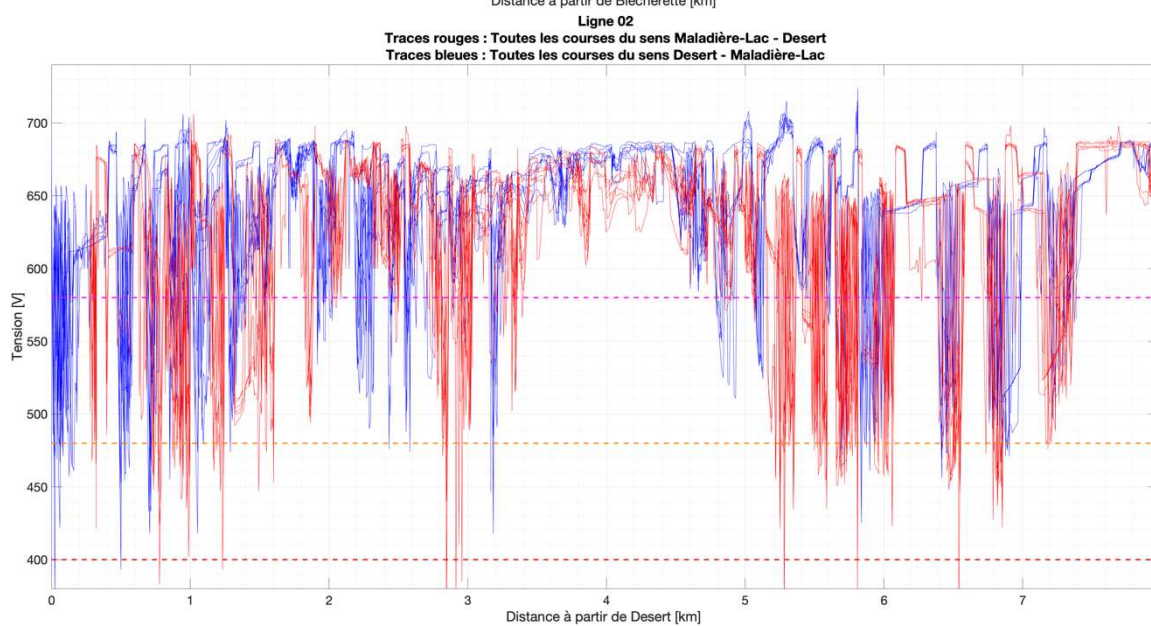
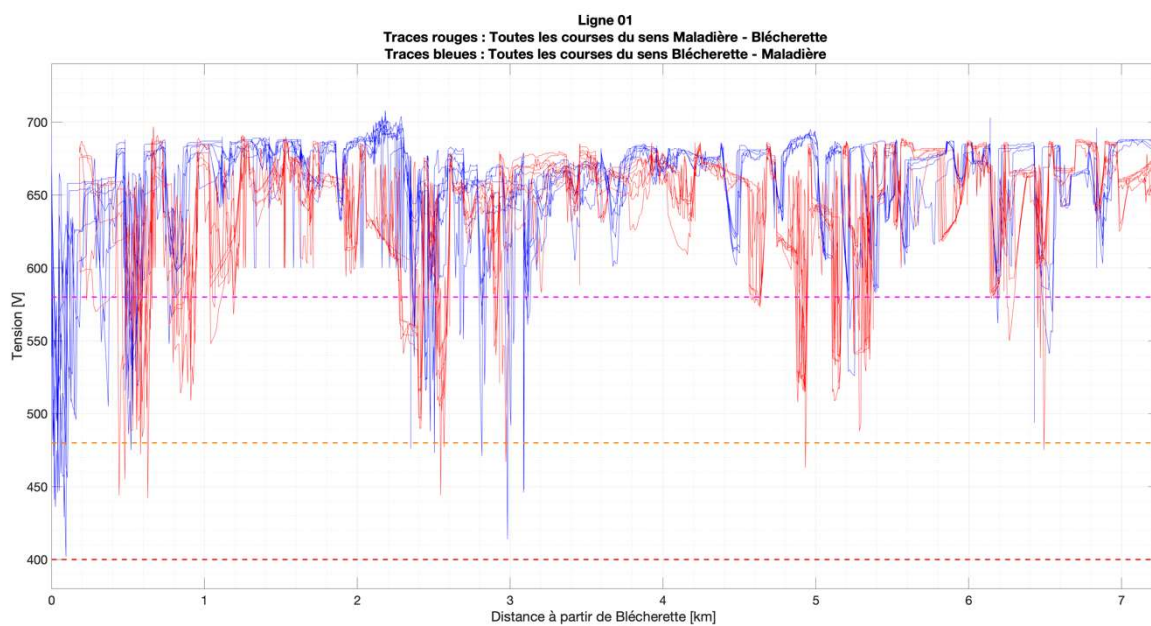
Références

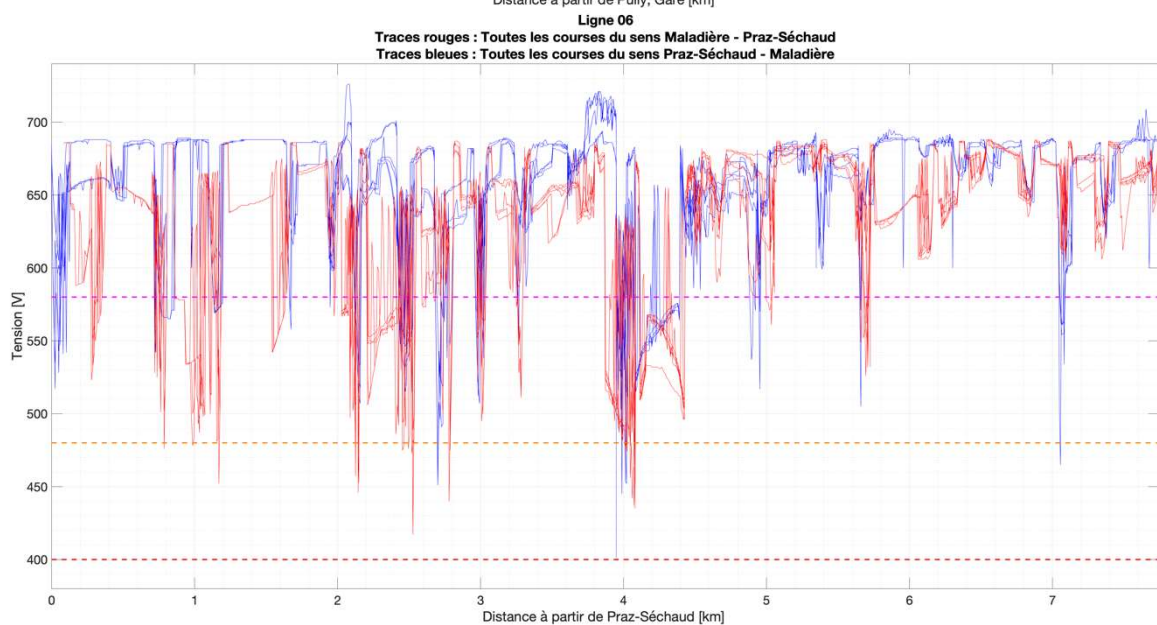
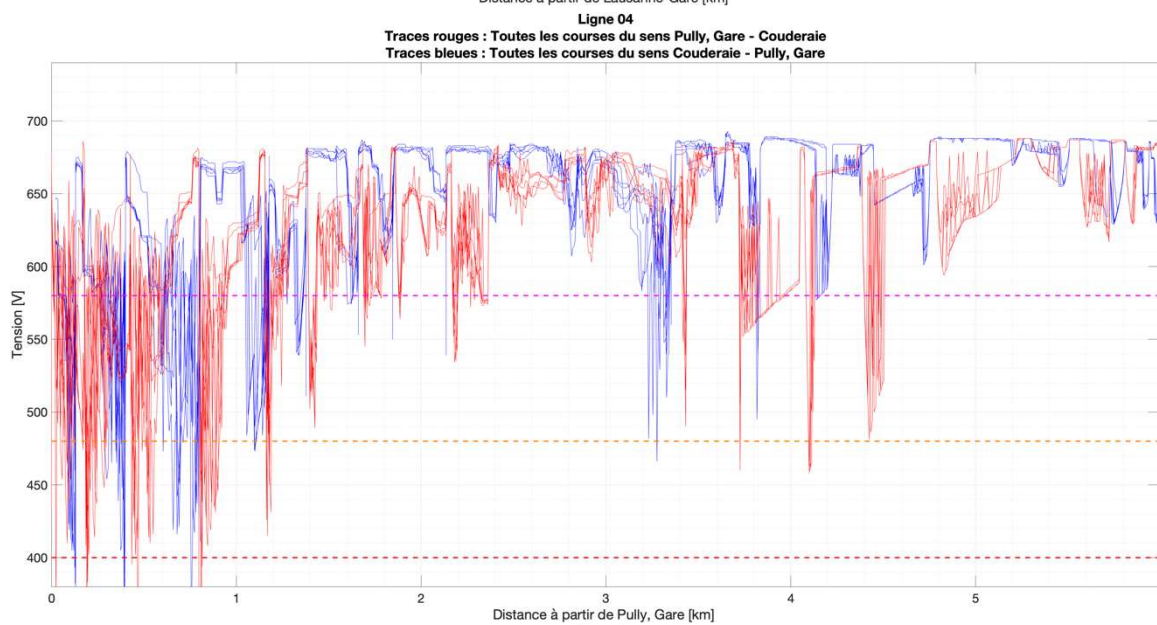
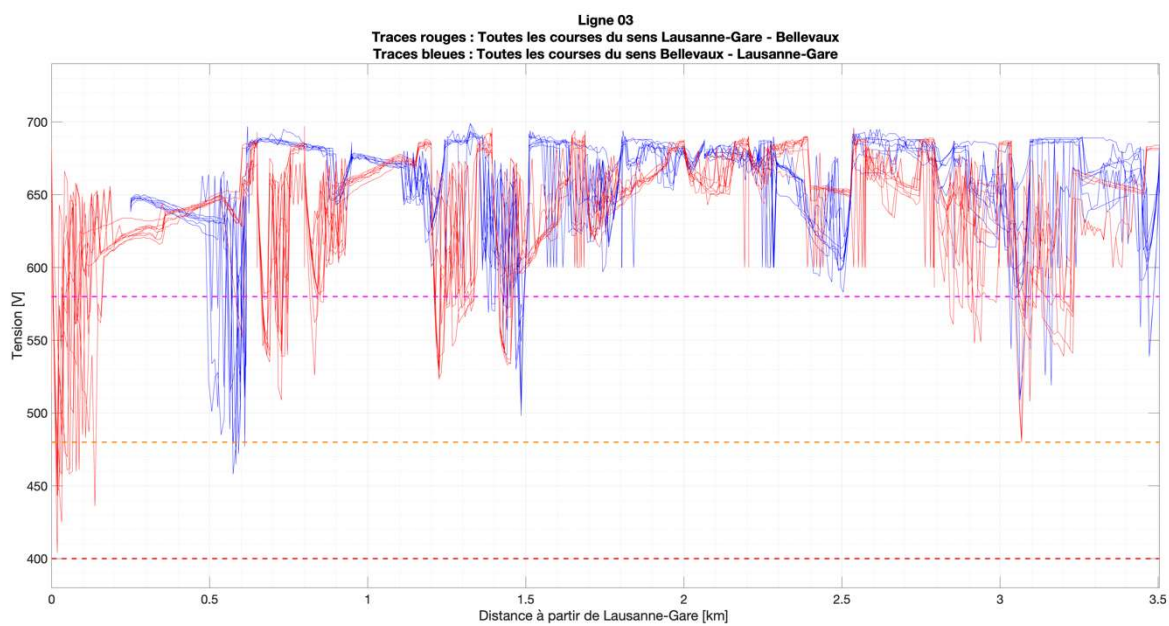
- [1] tl Trolleybus, Simulation d'un système trolleybus avec support par batteries embarquées. Rapport Railectric 19-002 du 11.3.2019

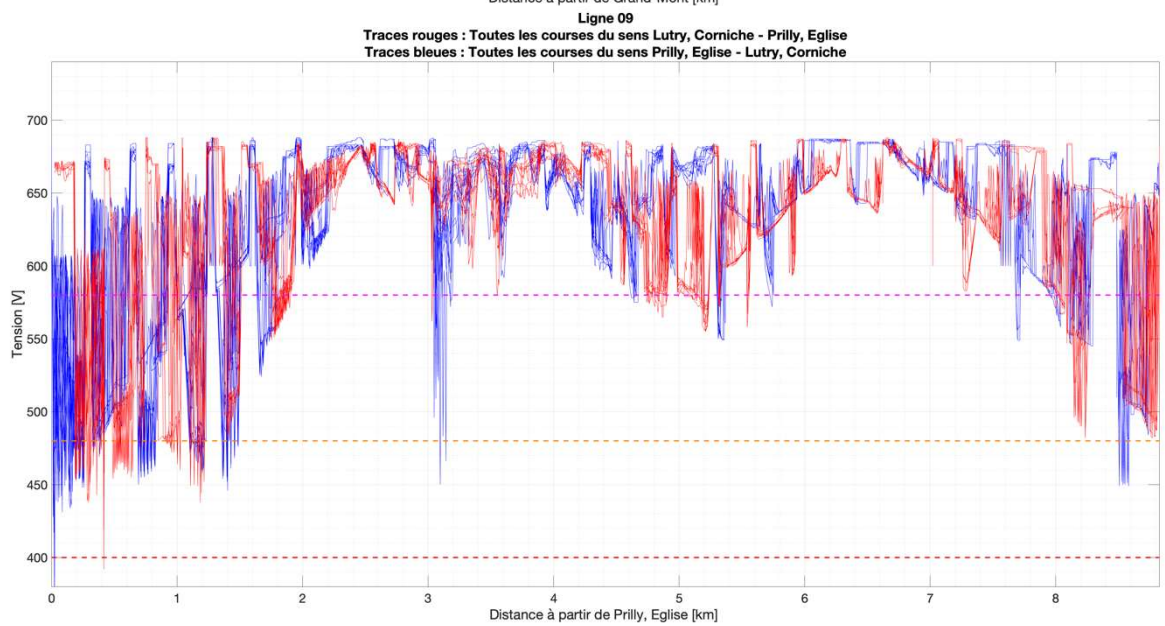
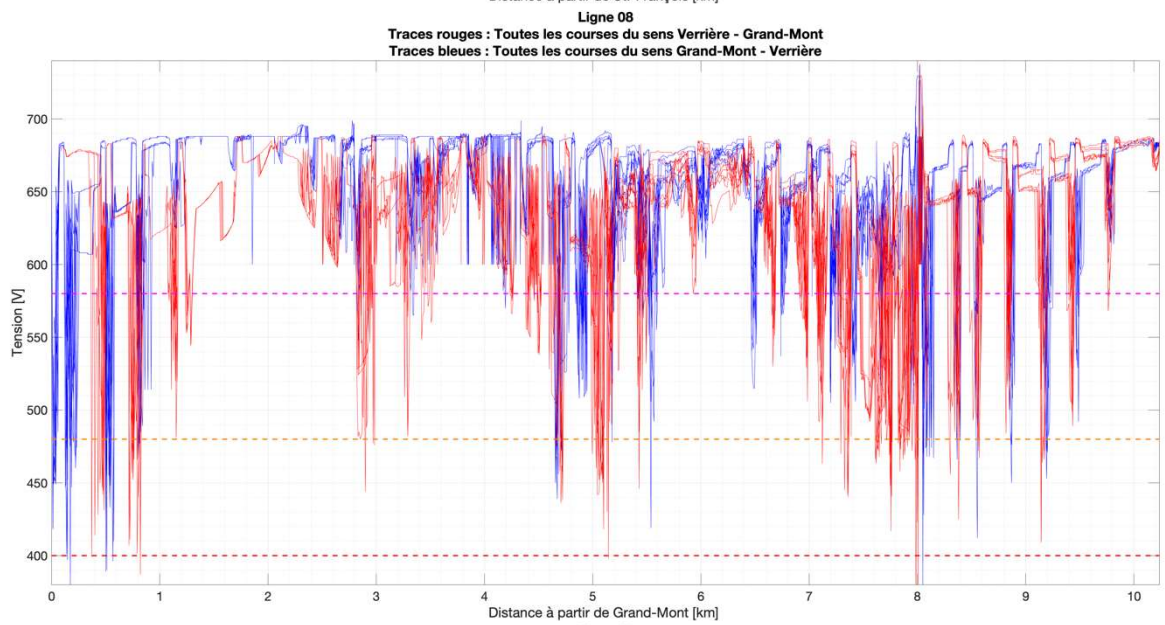
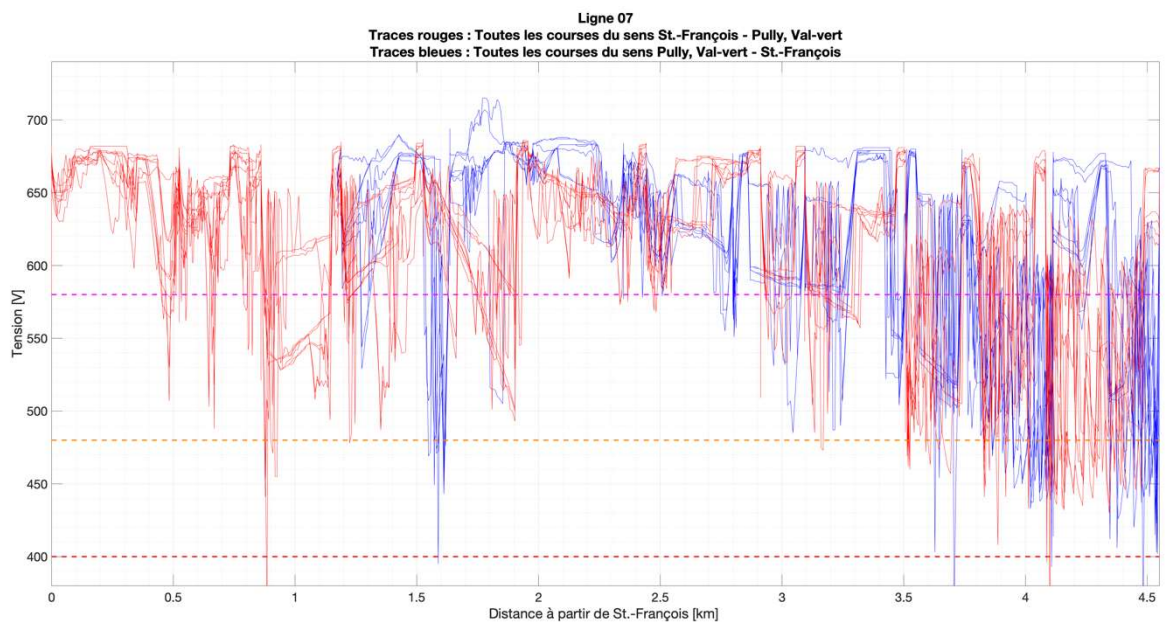
Annexes

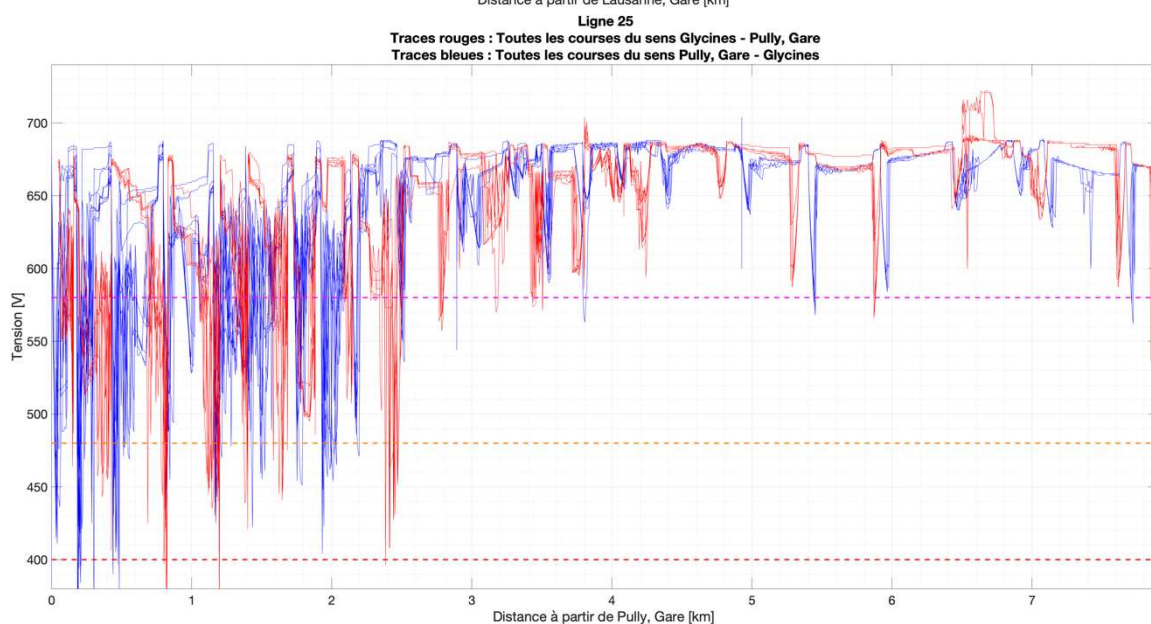
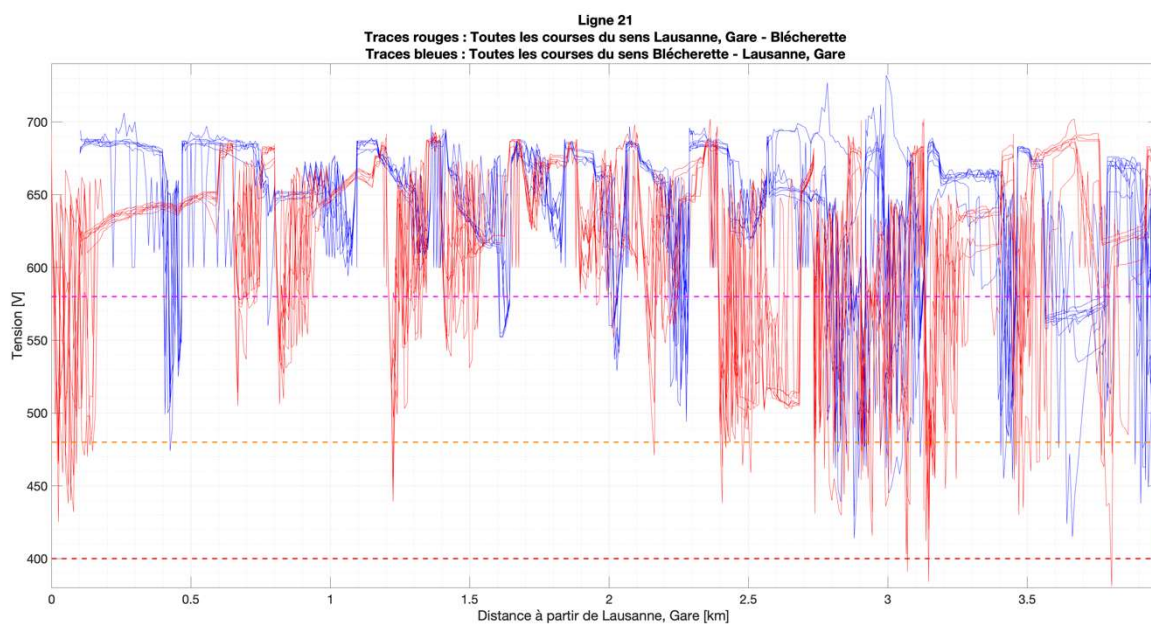
PROFILES DE TENSION

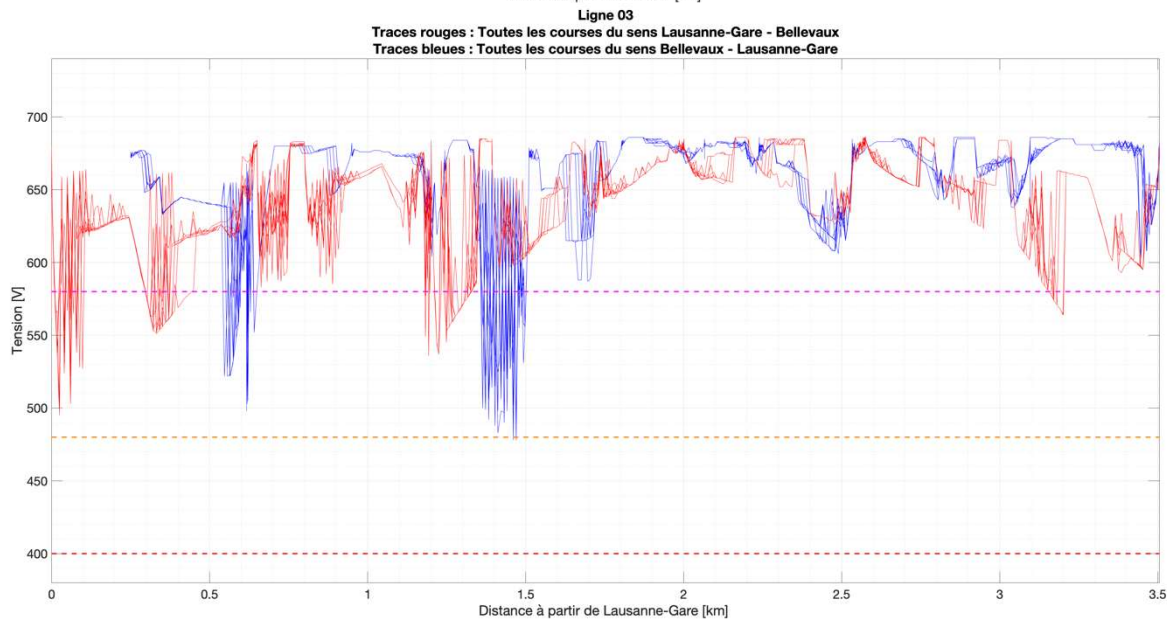
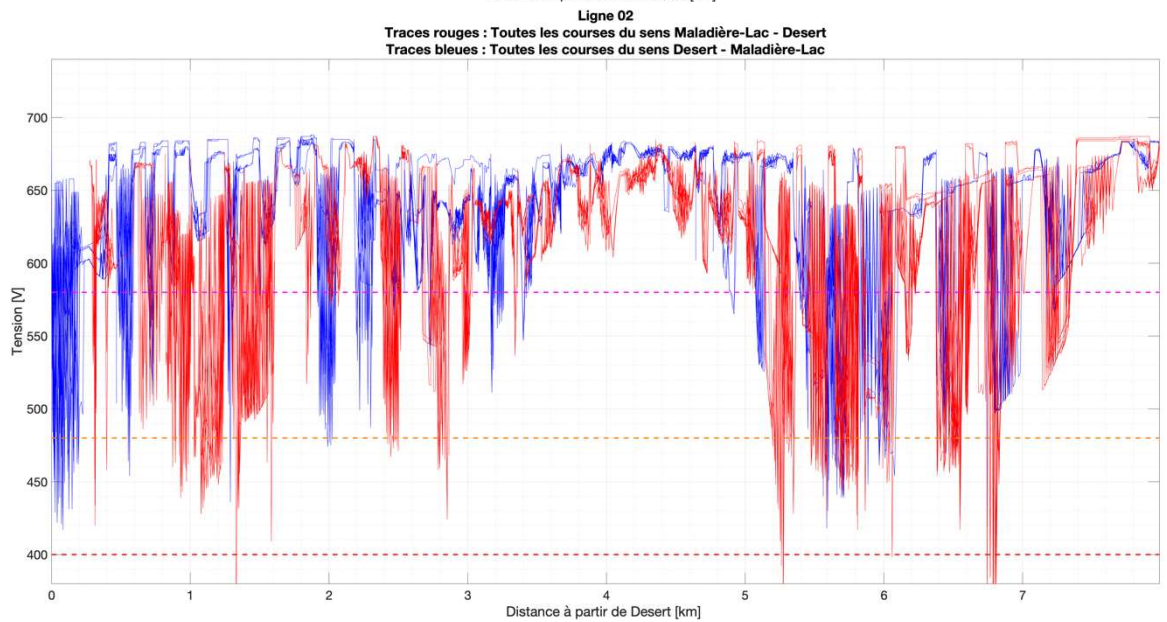
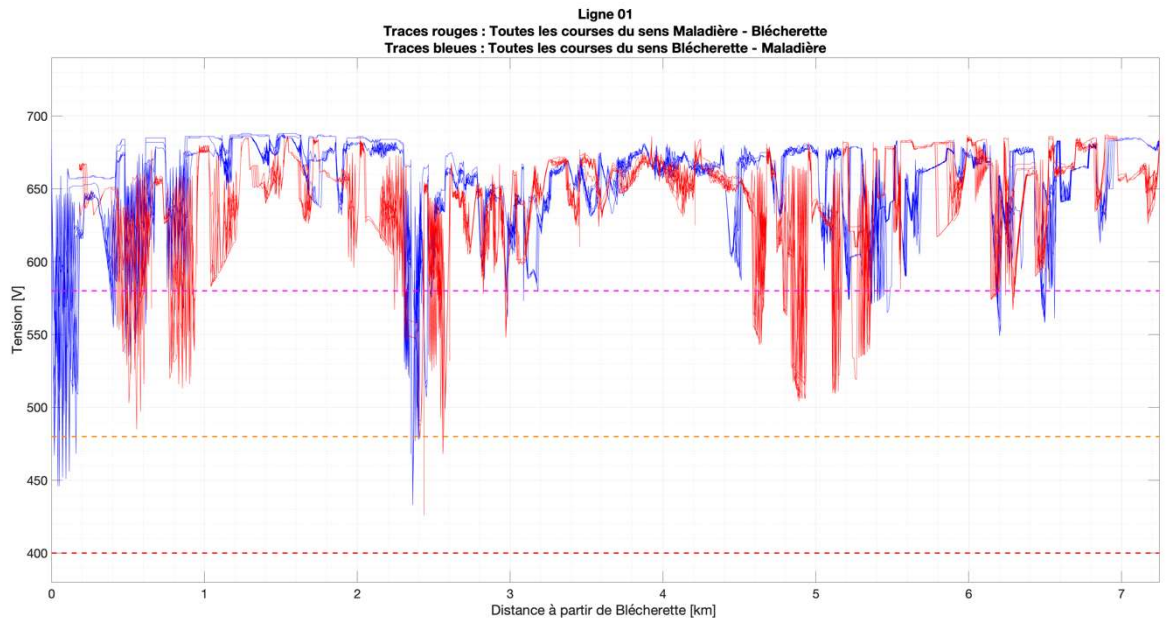
2020

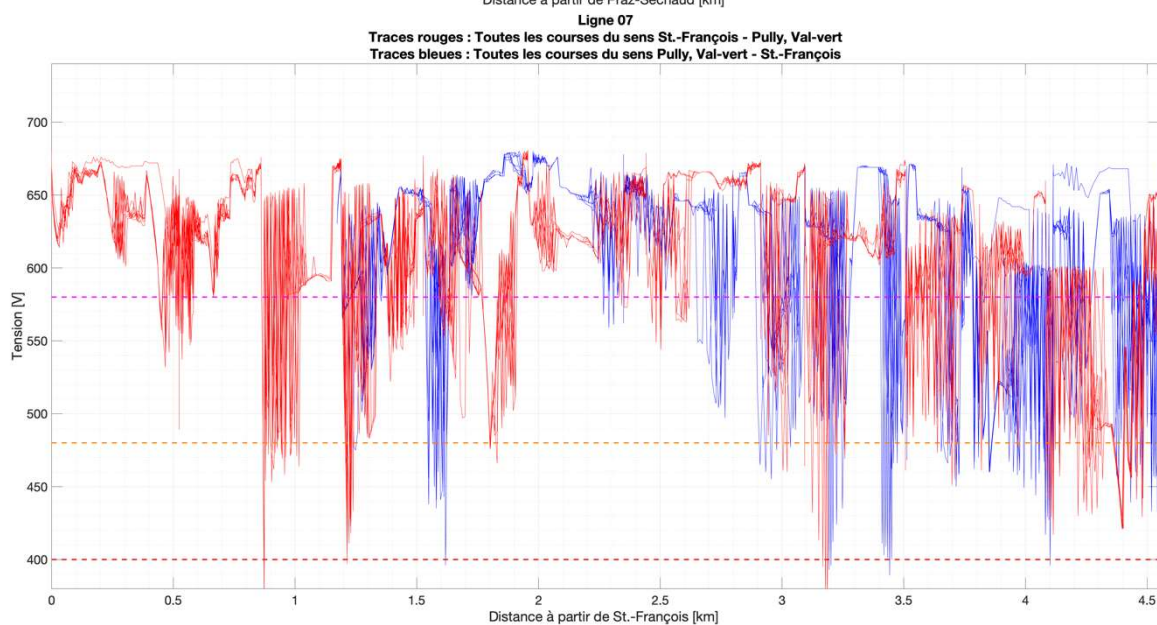
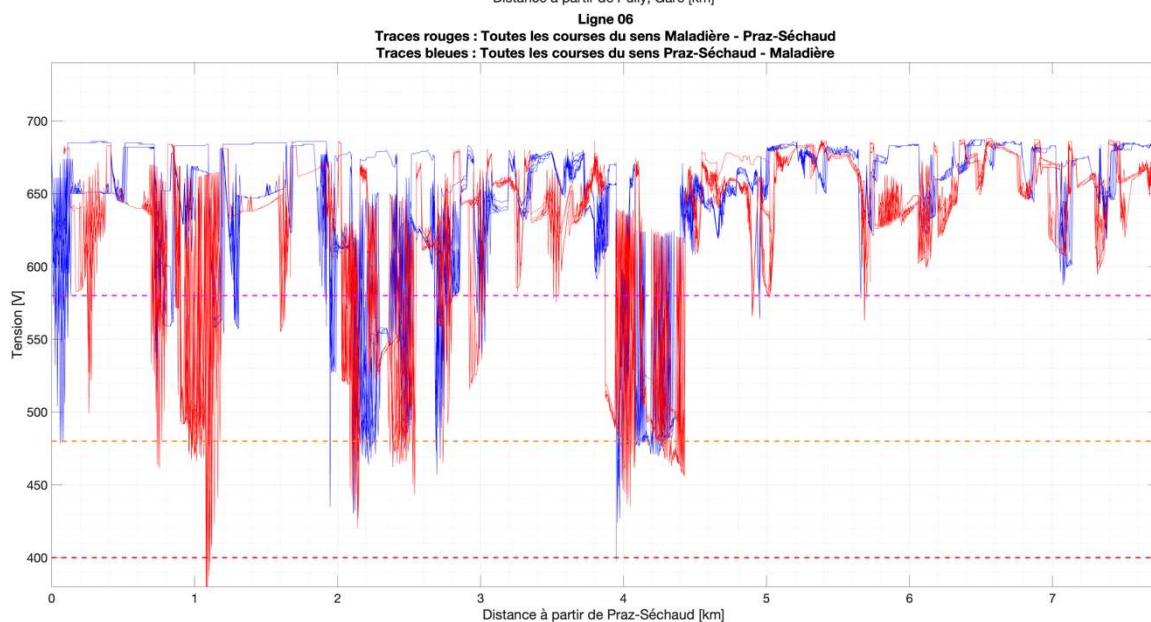
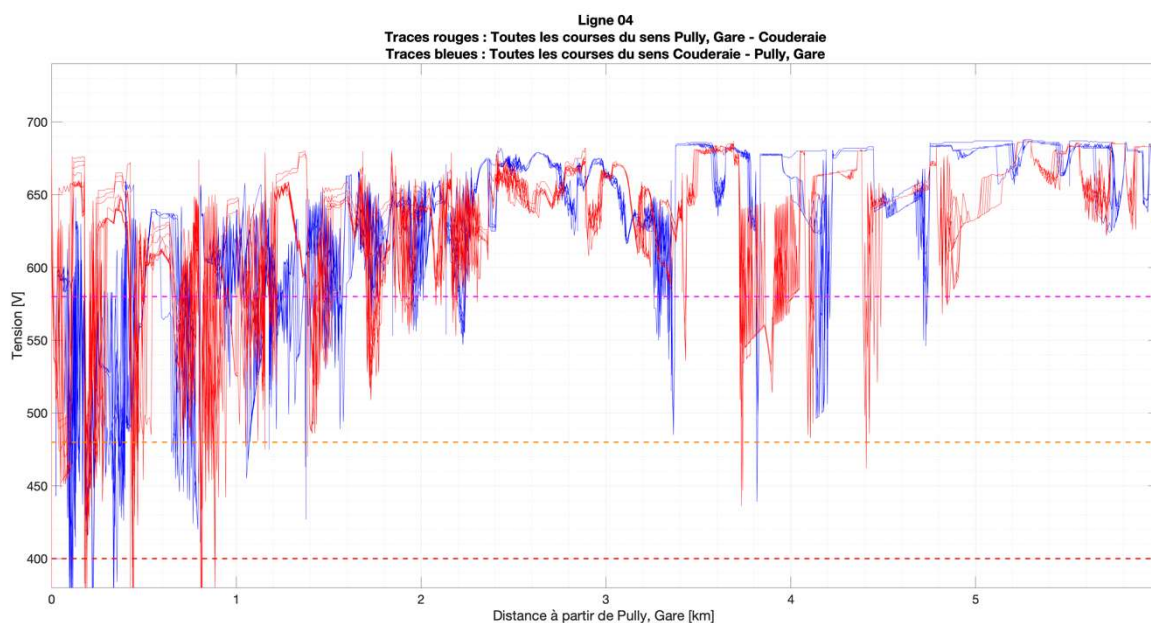


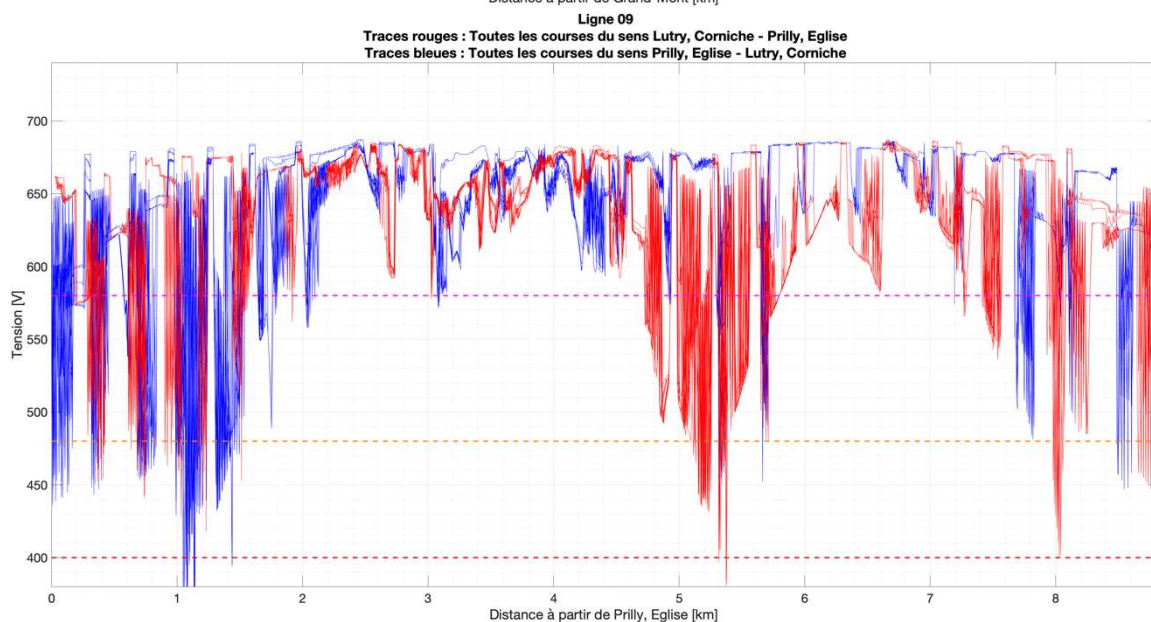
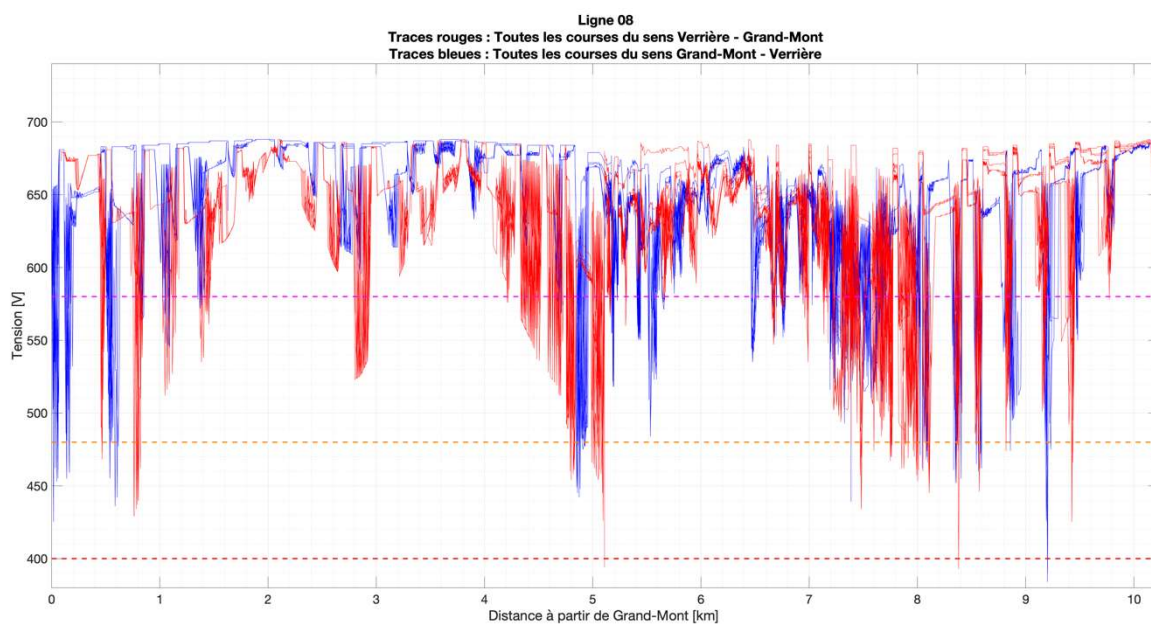


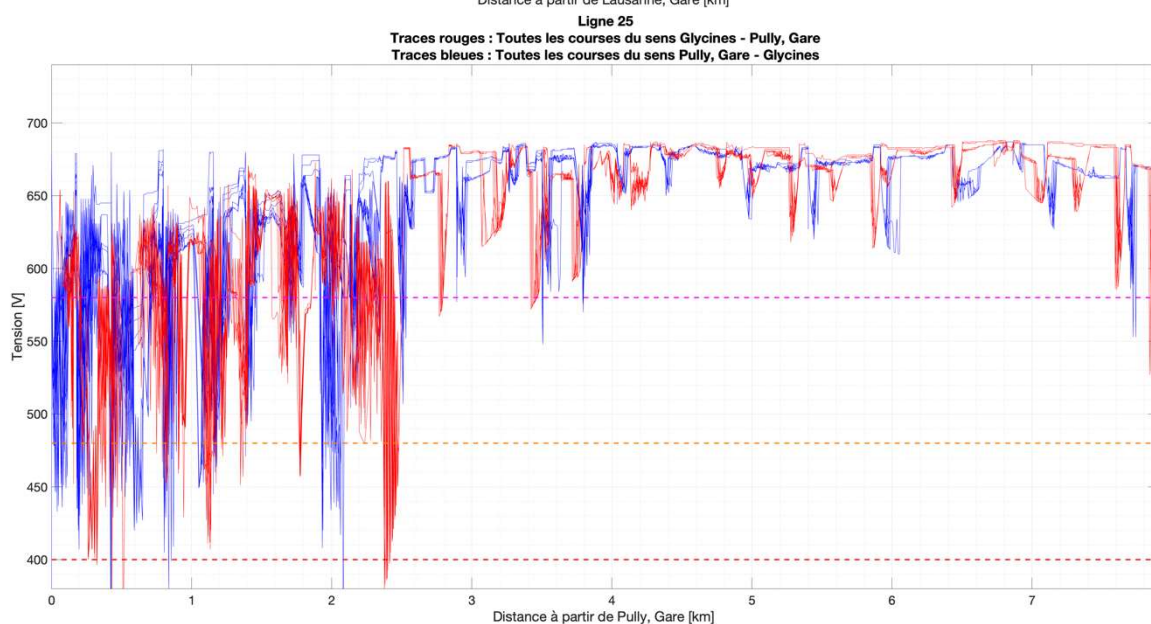
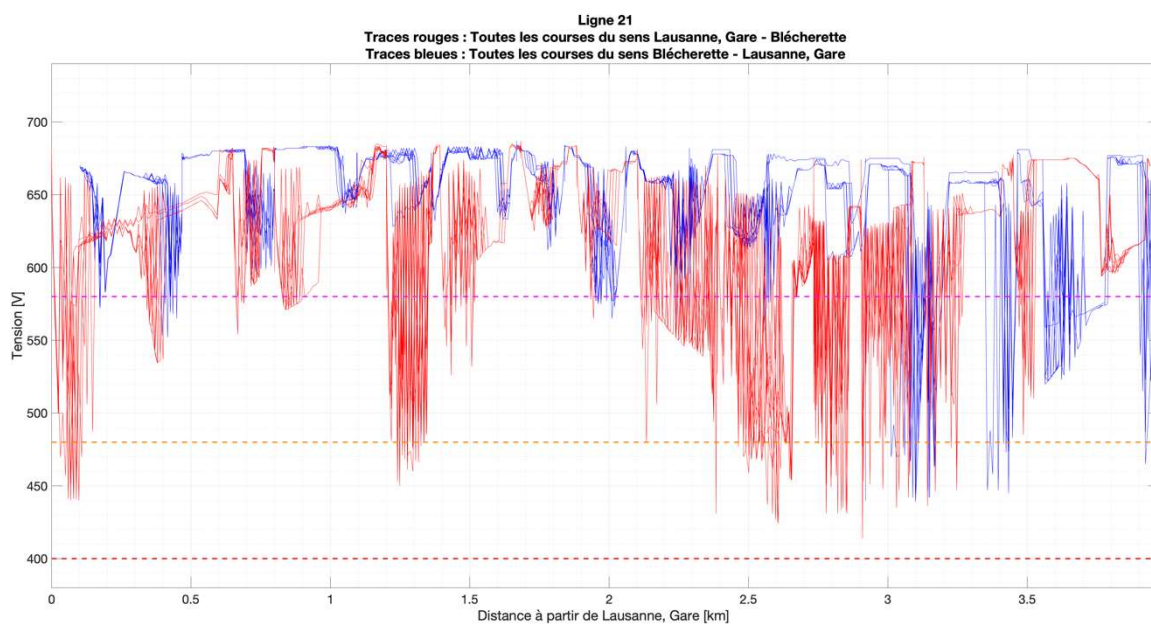


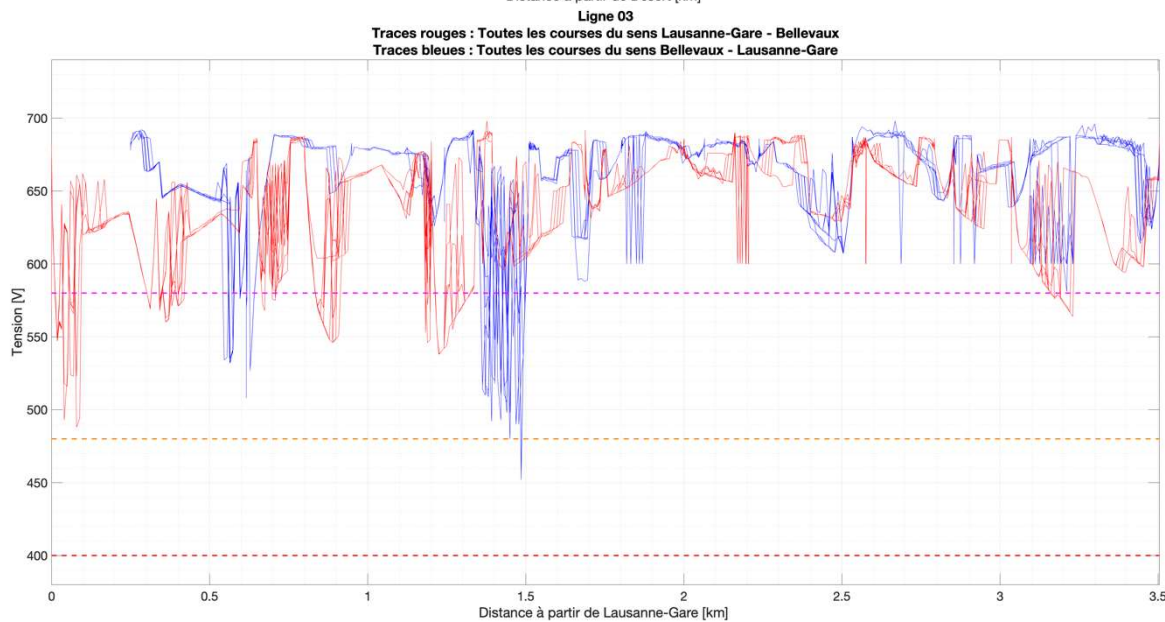
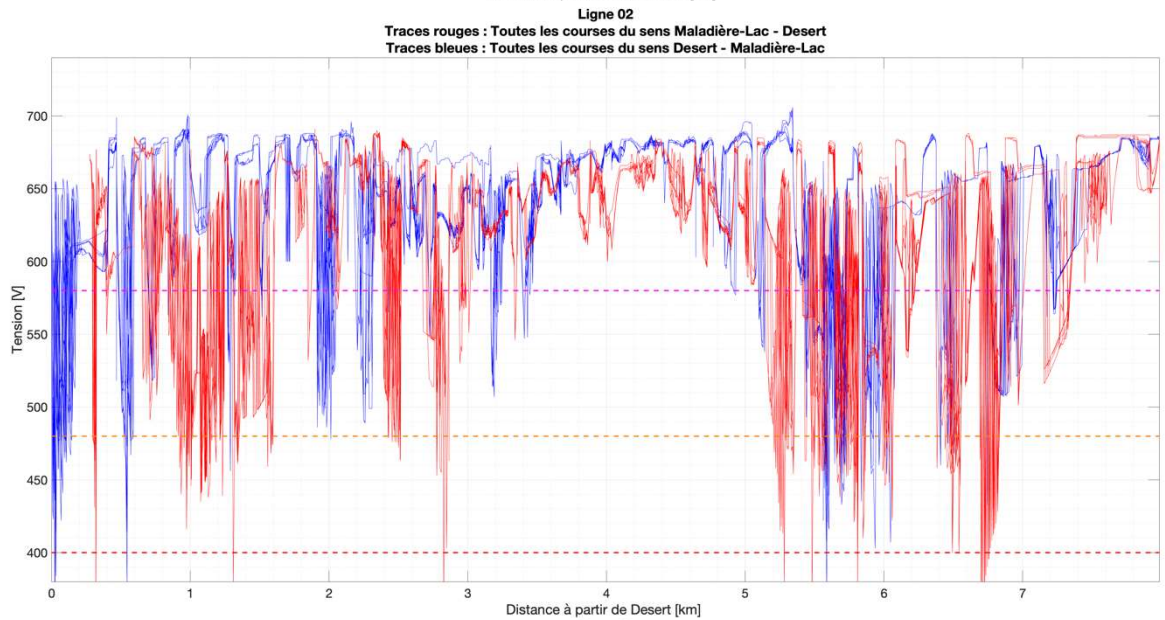
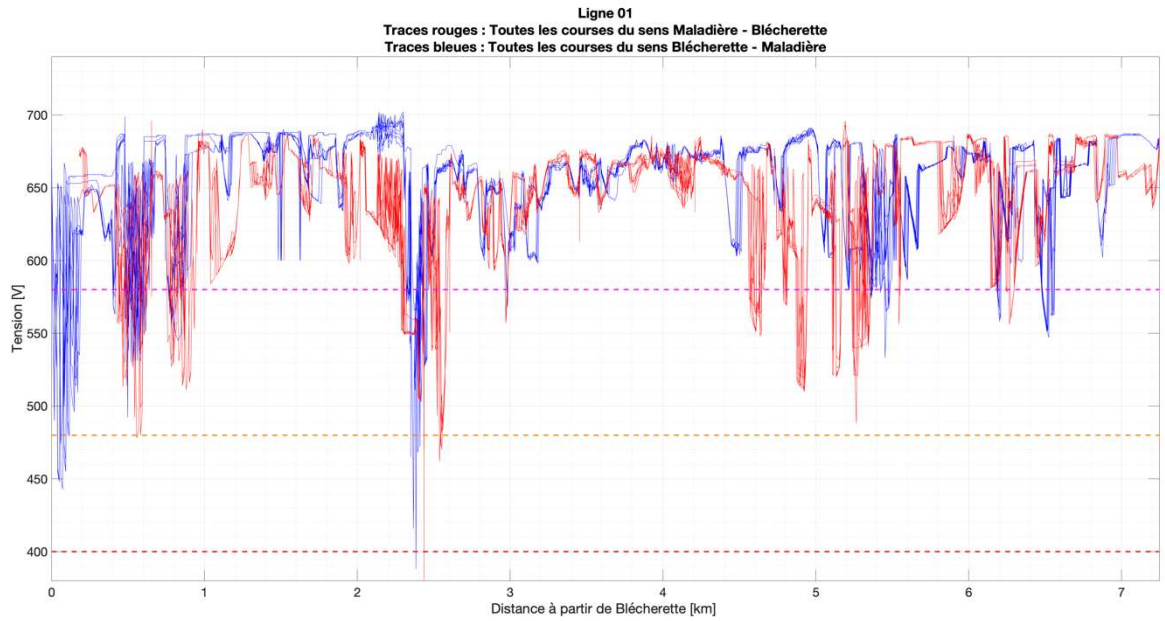


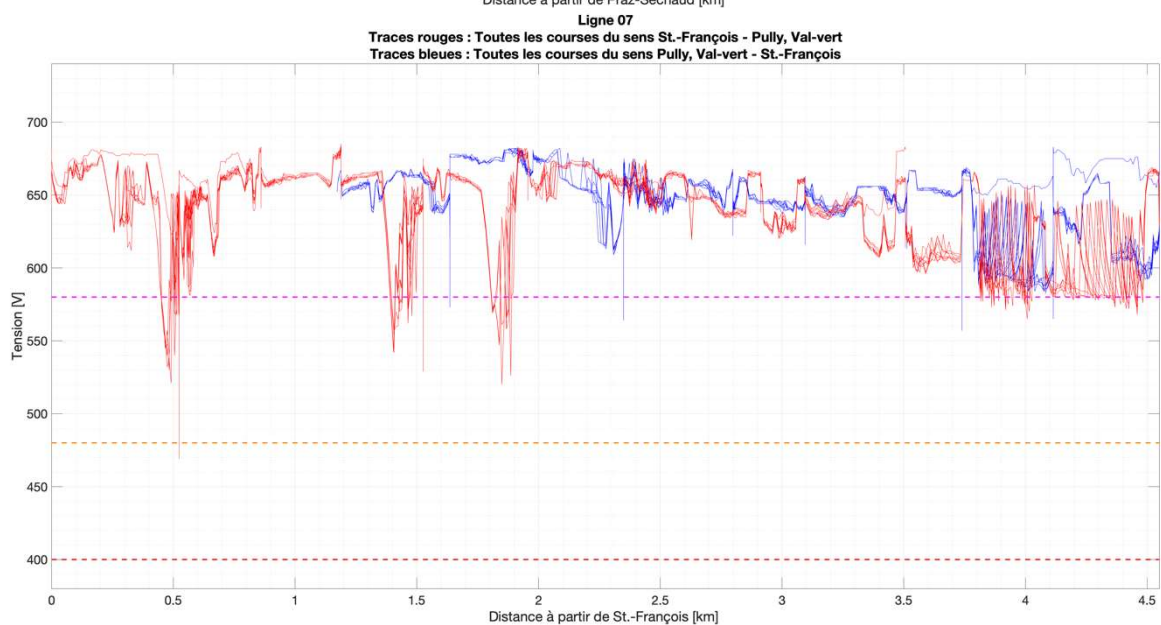
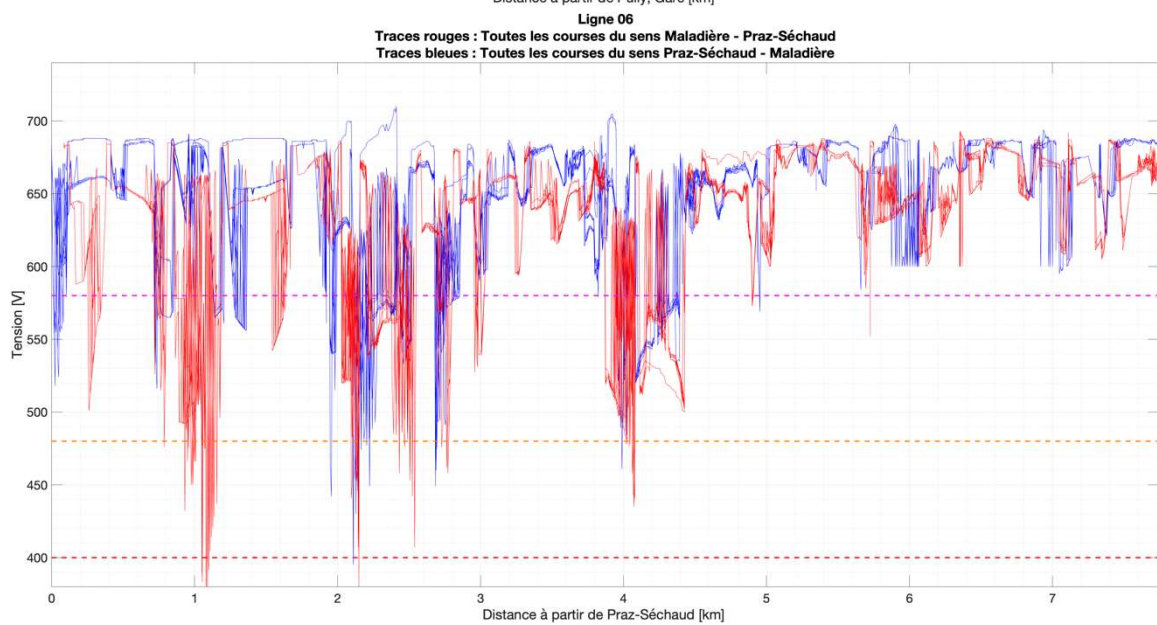
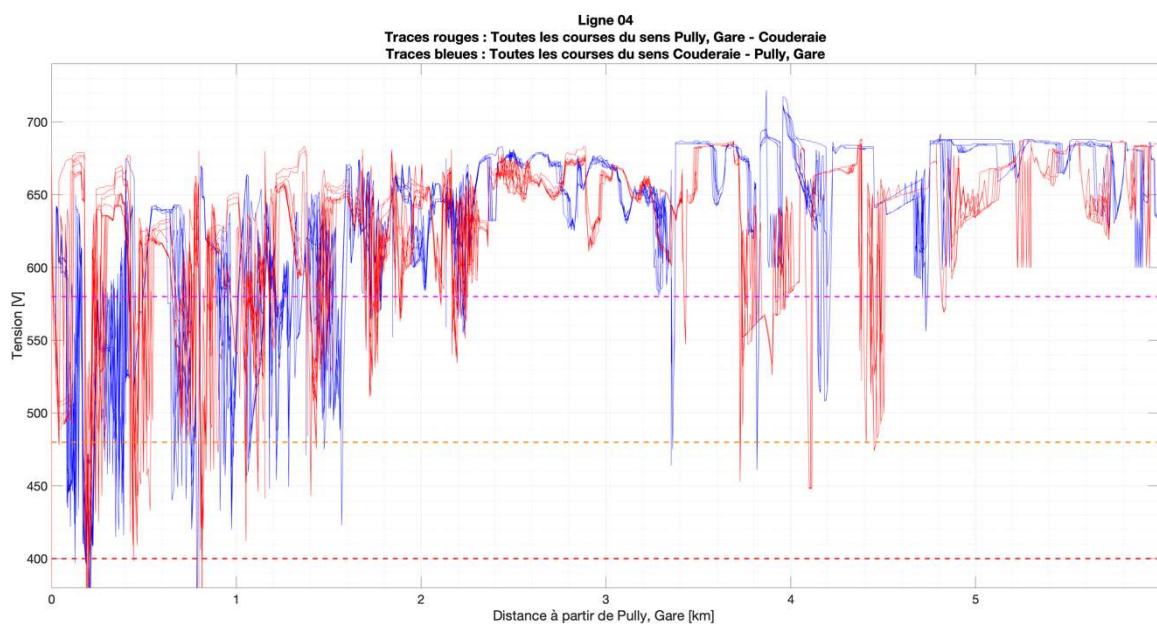


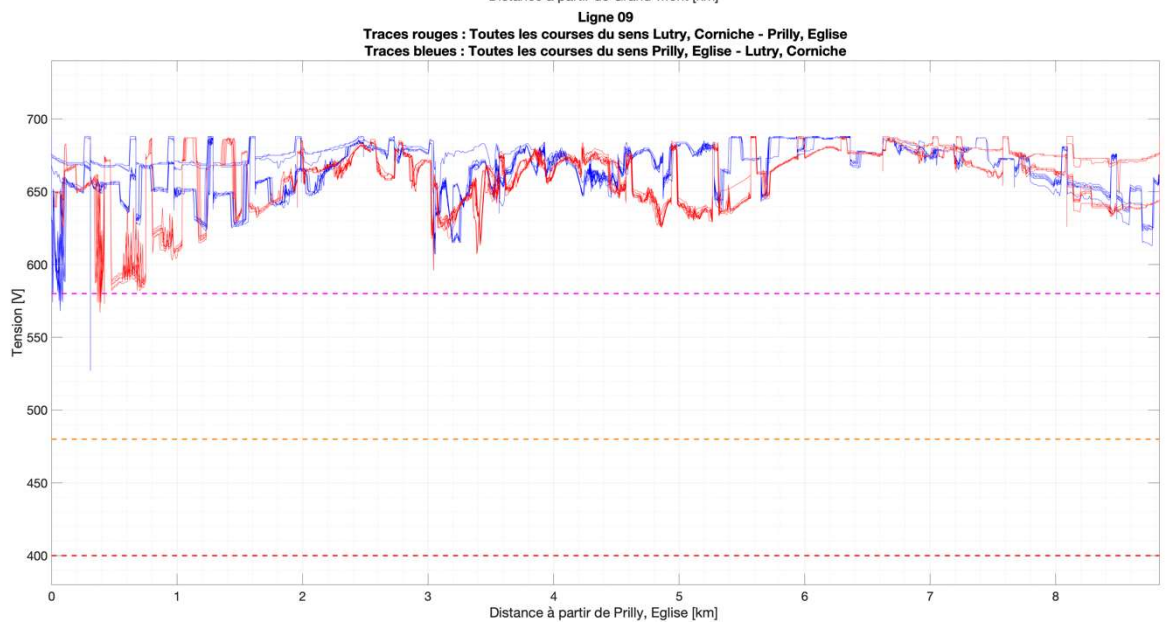
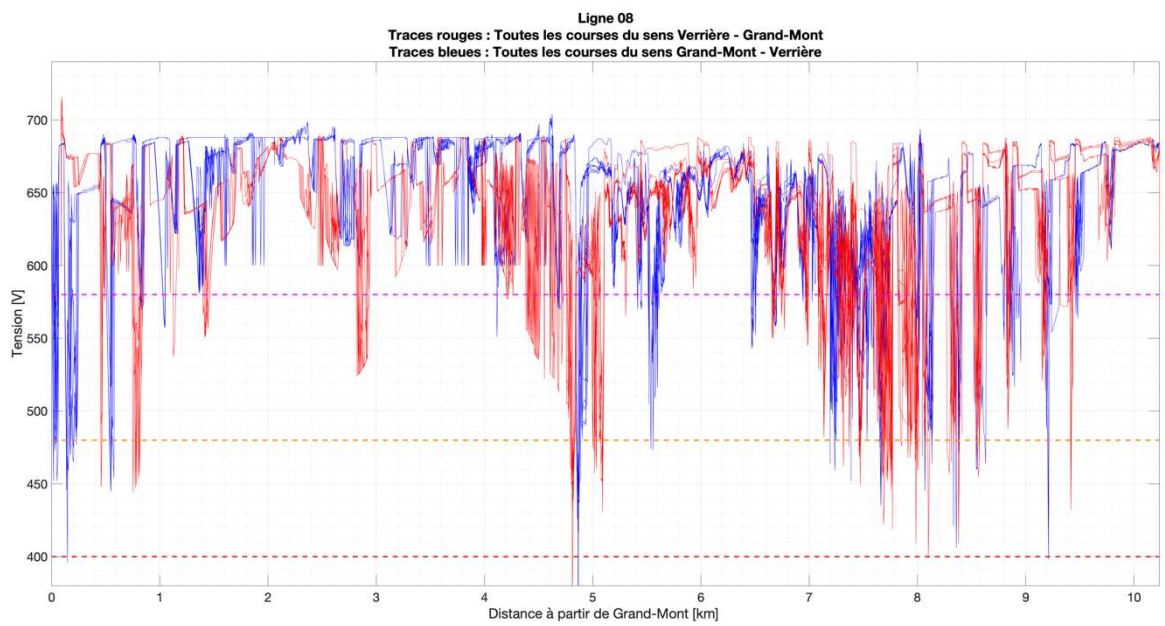


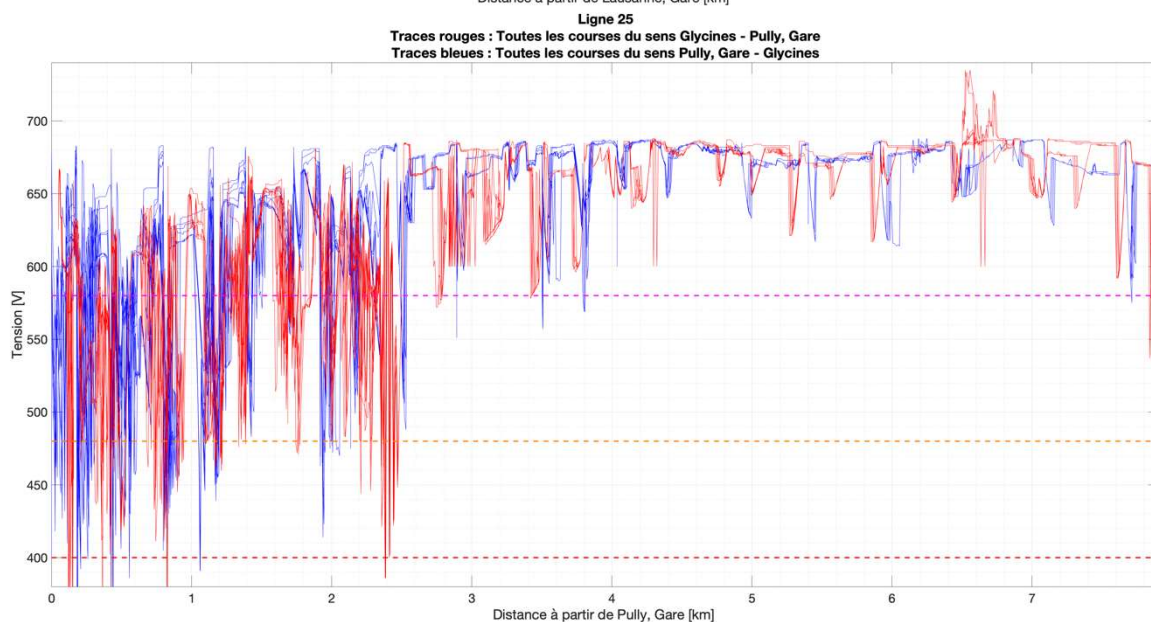
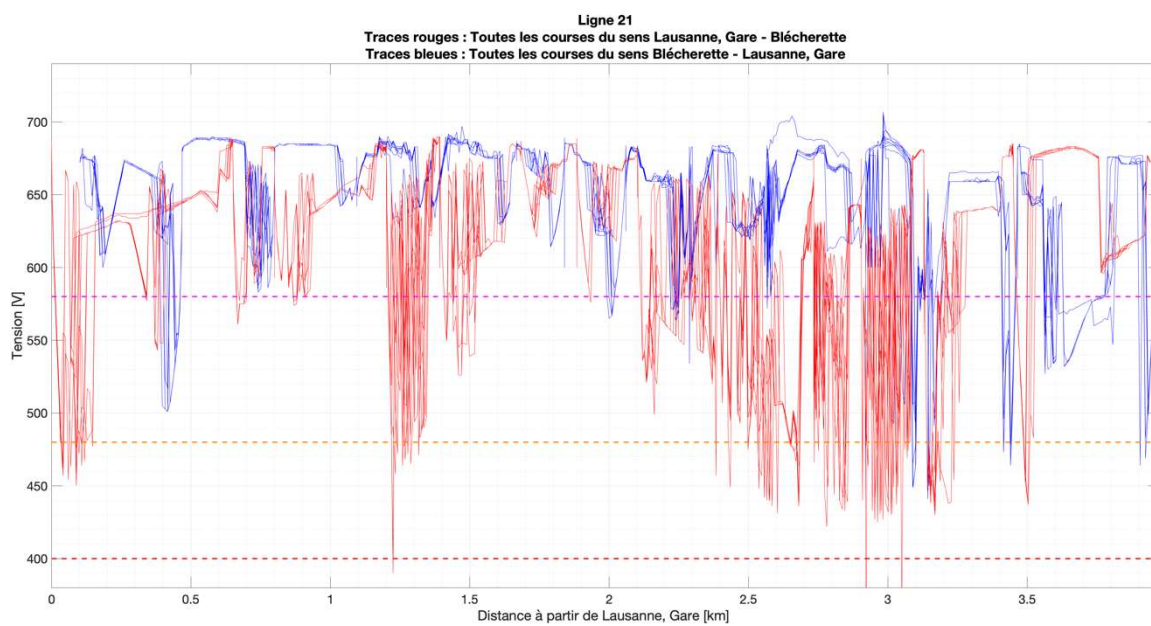


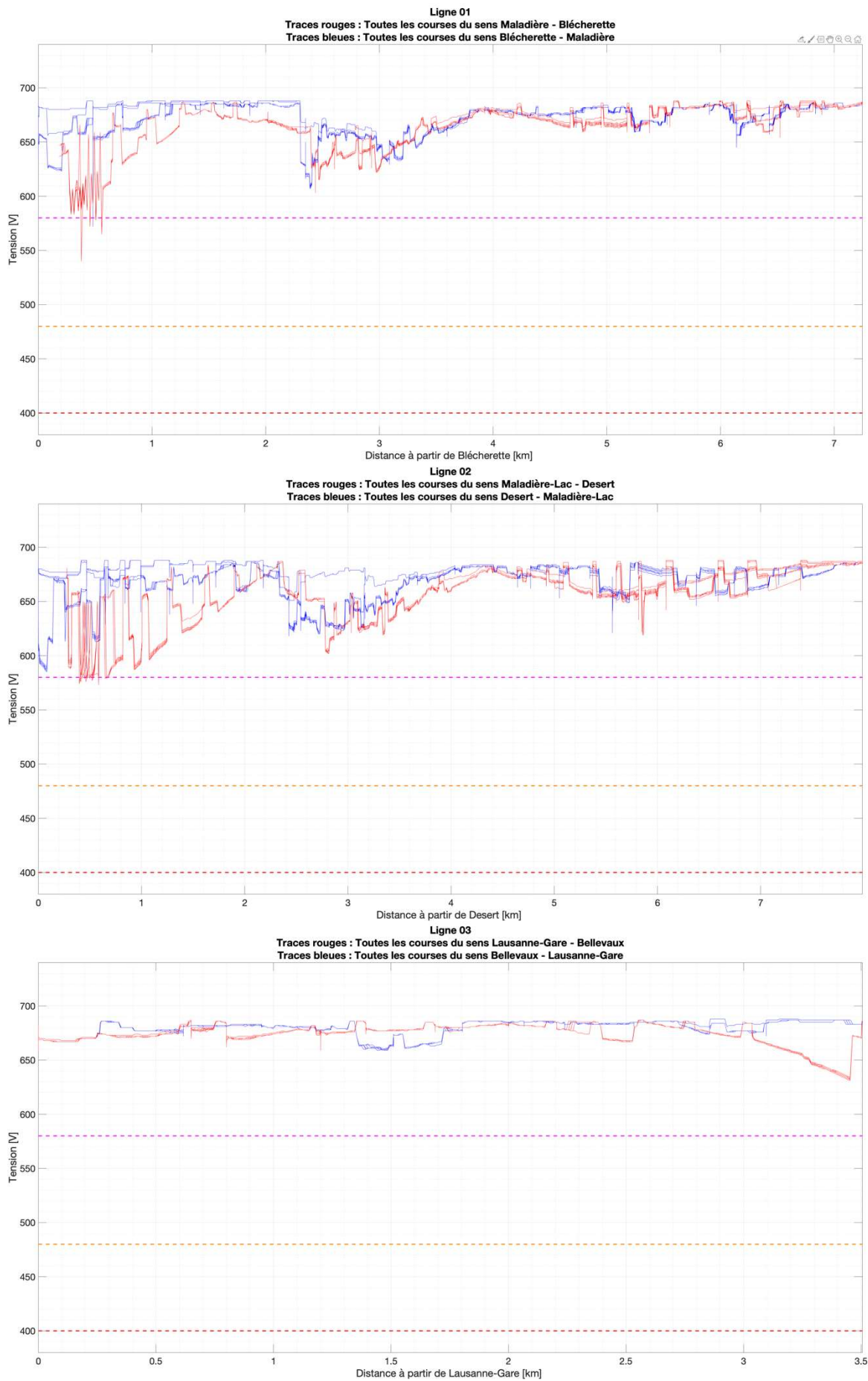


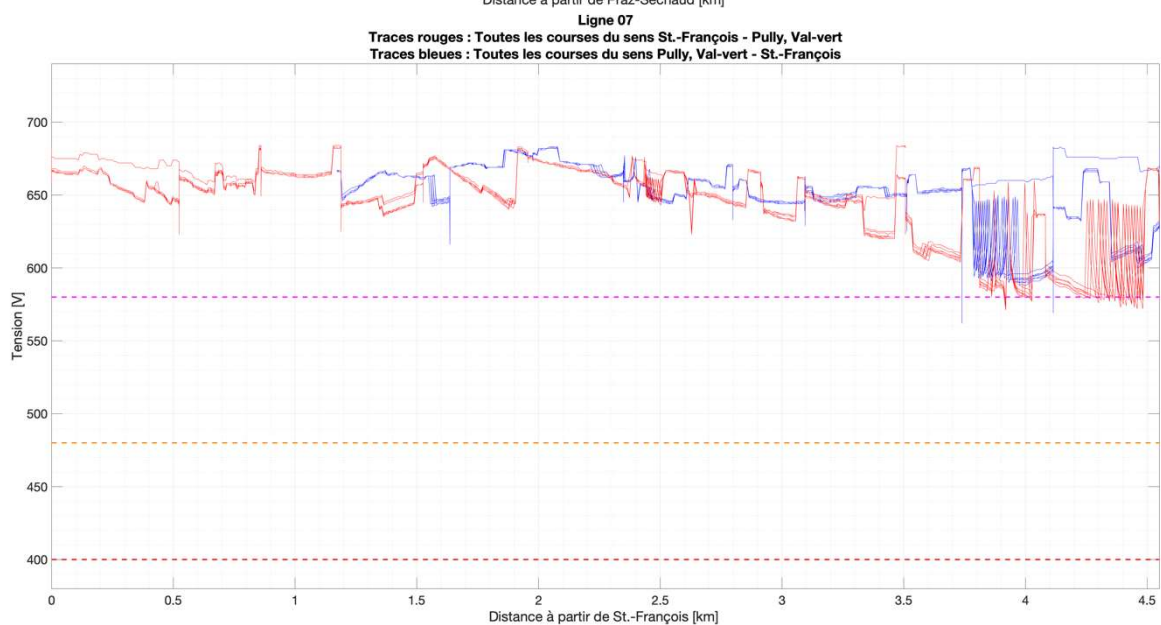
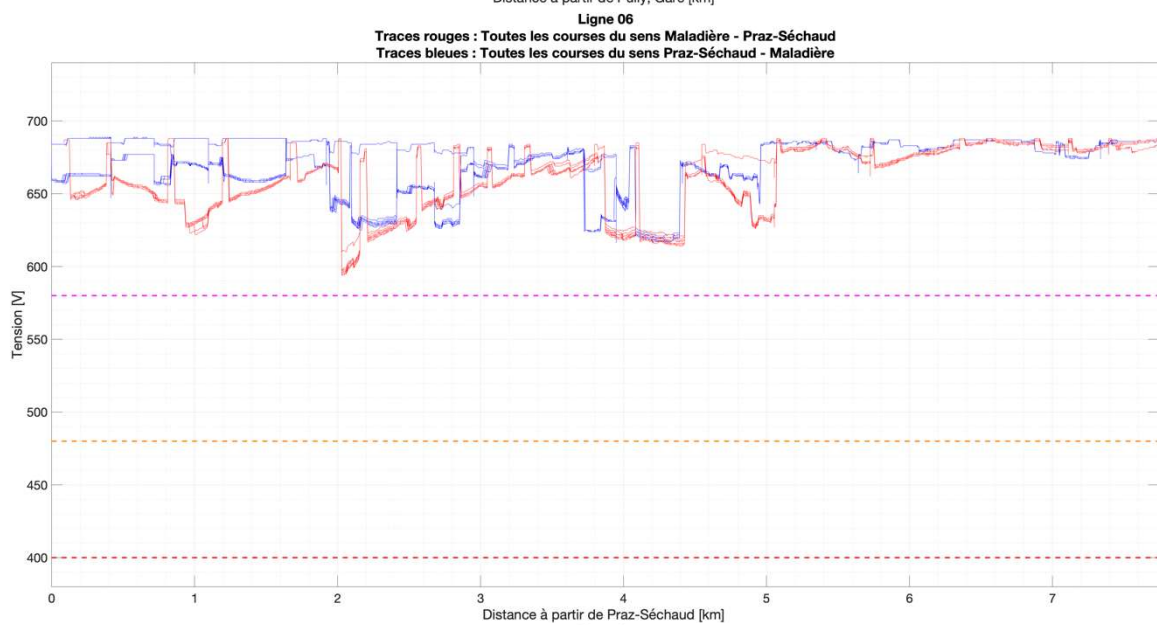
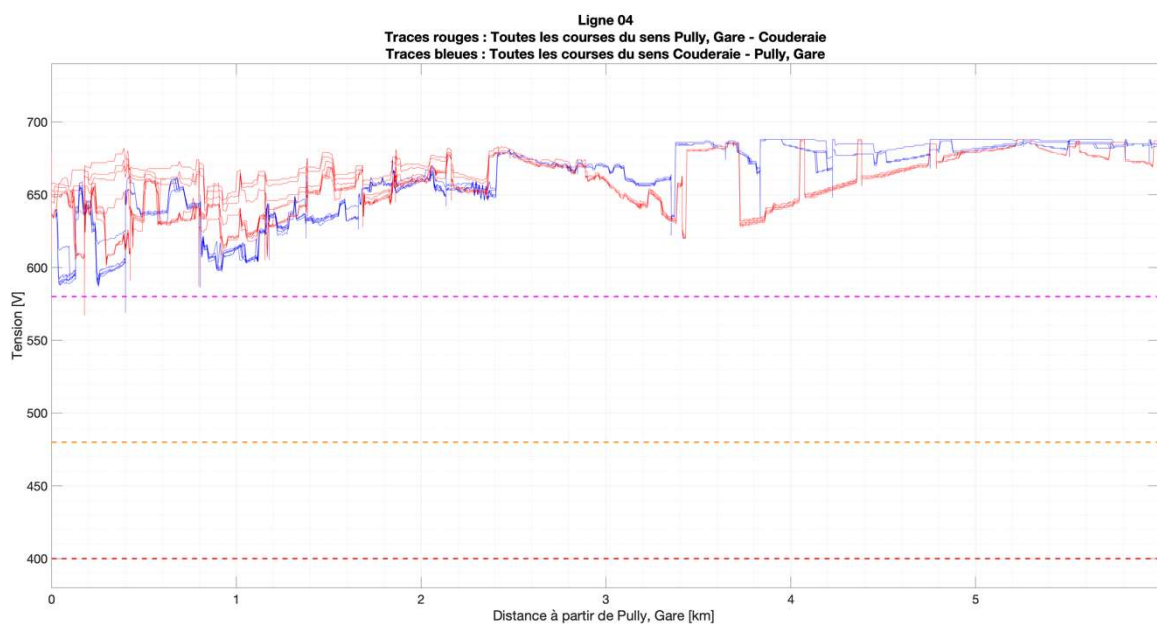


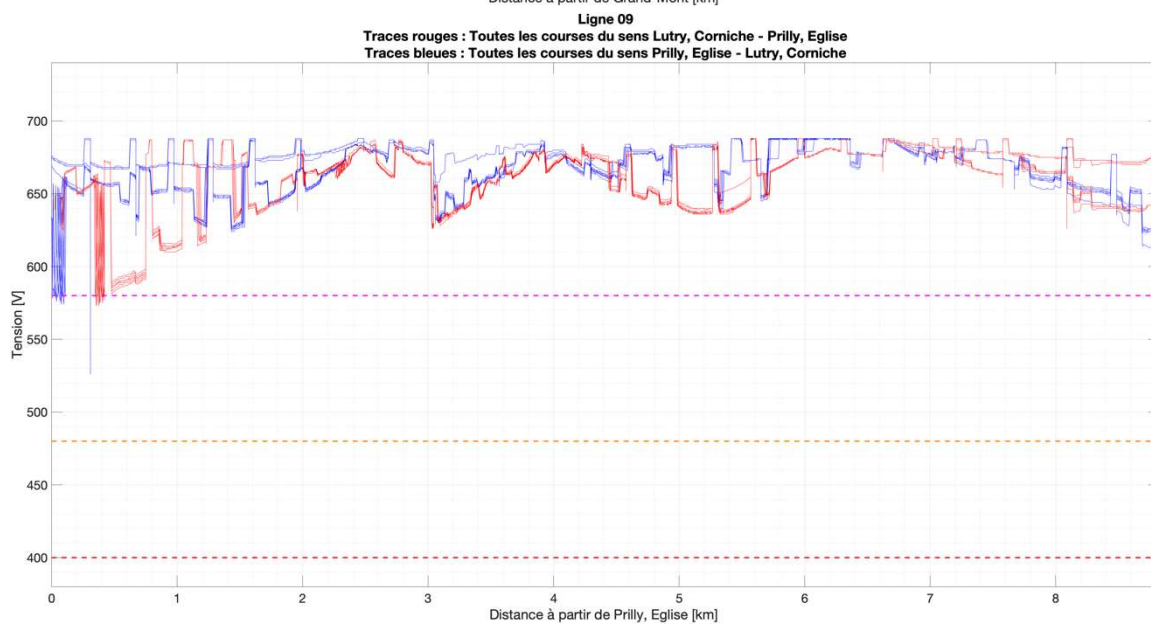
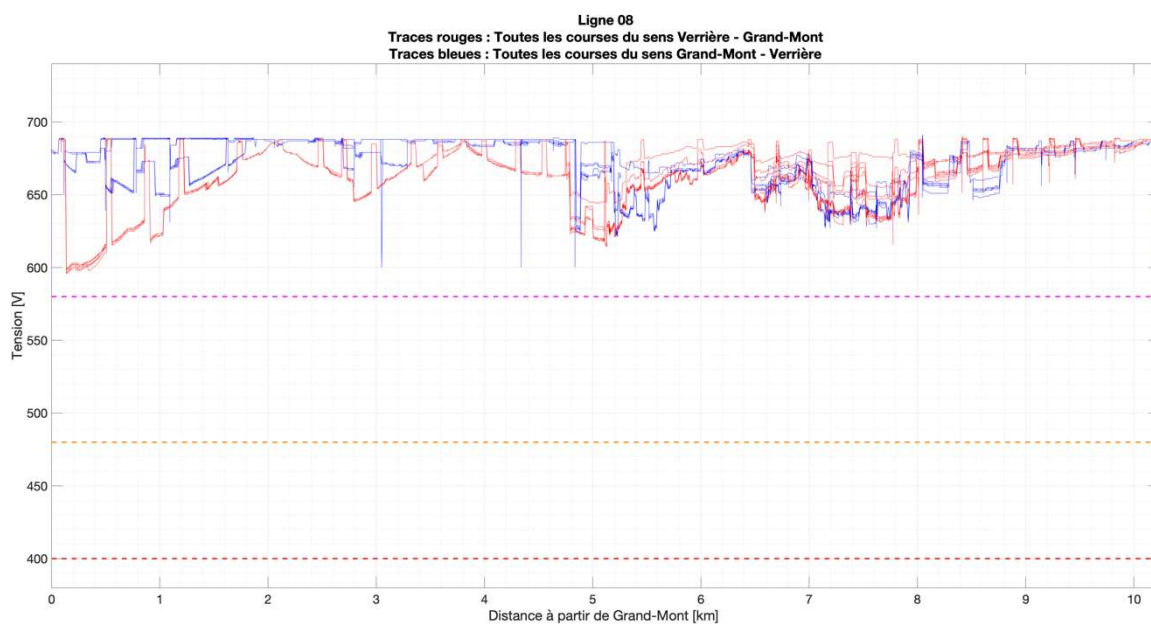


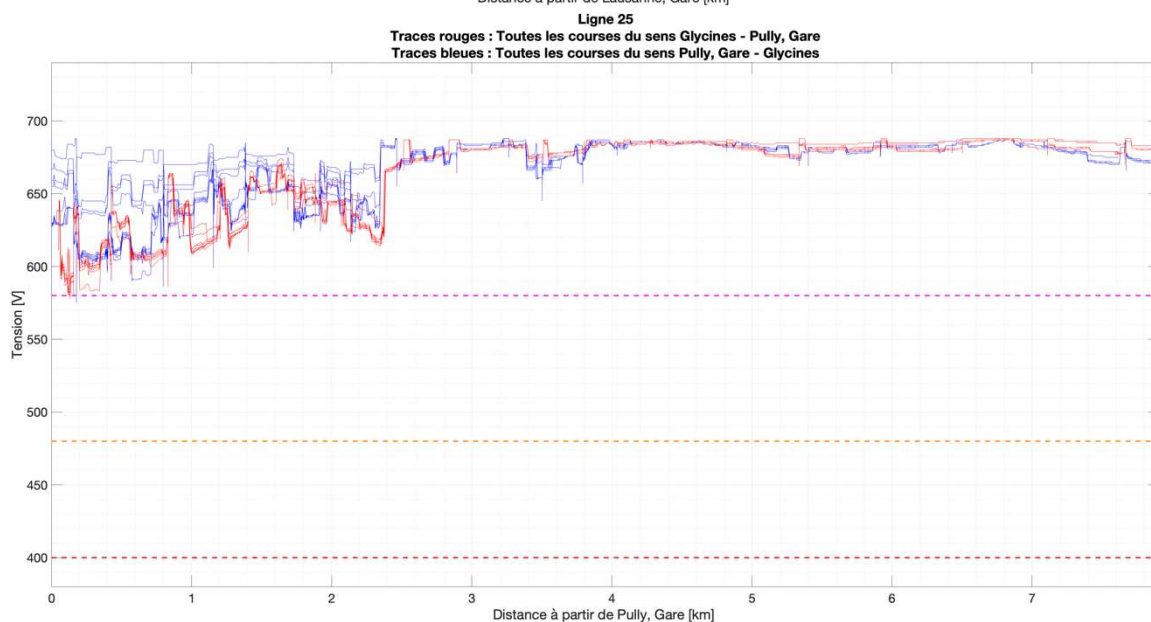
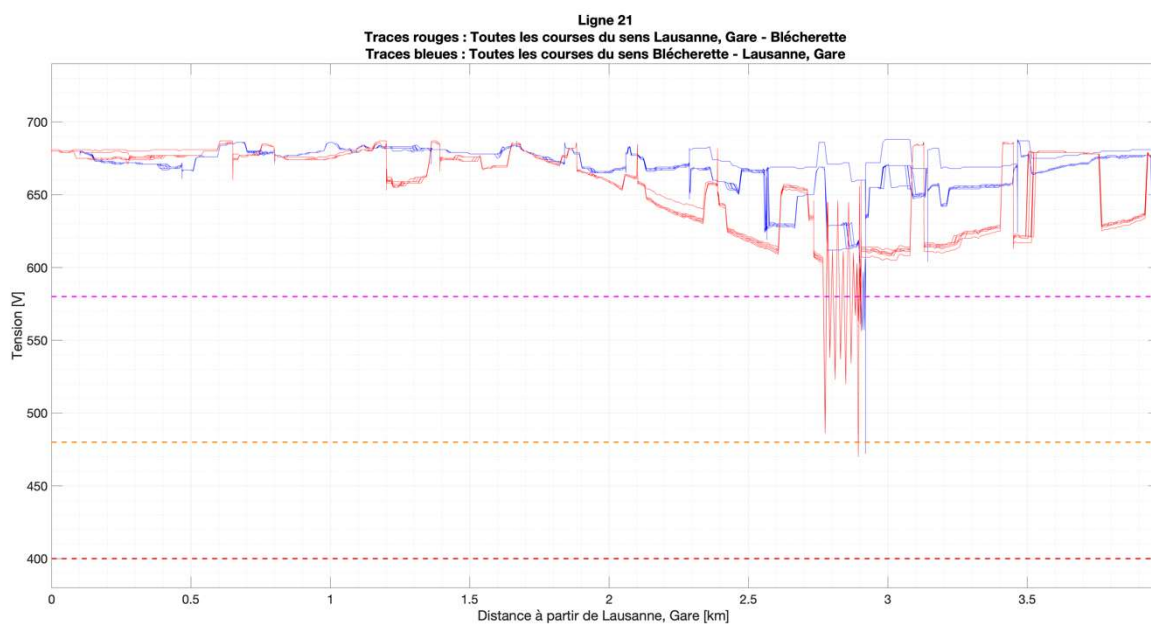


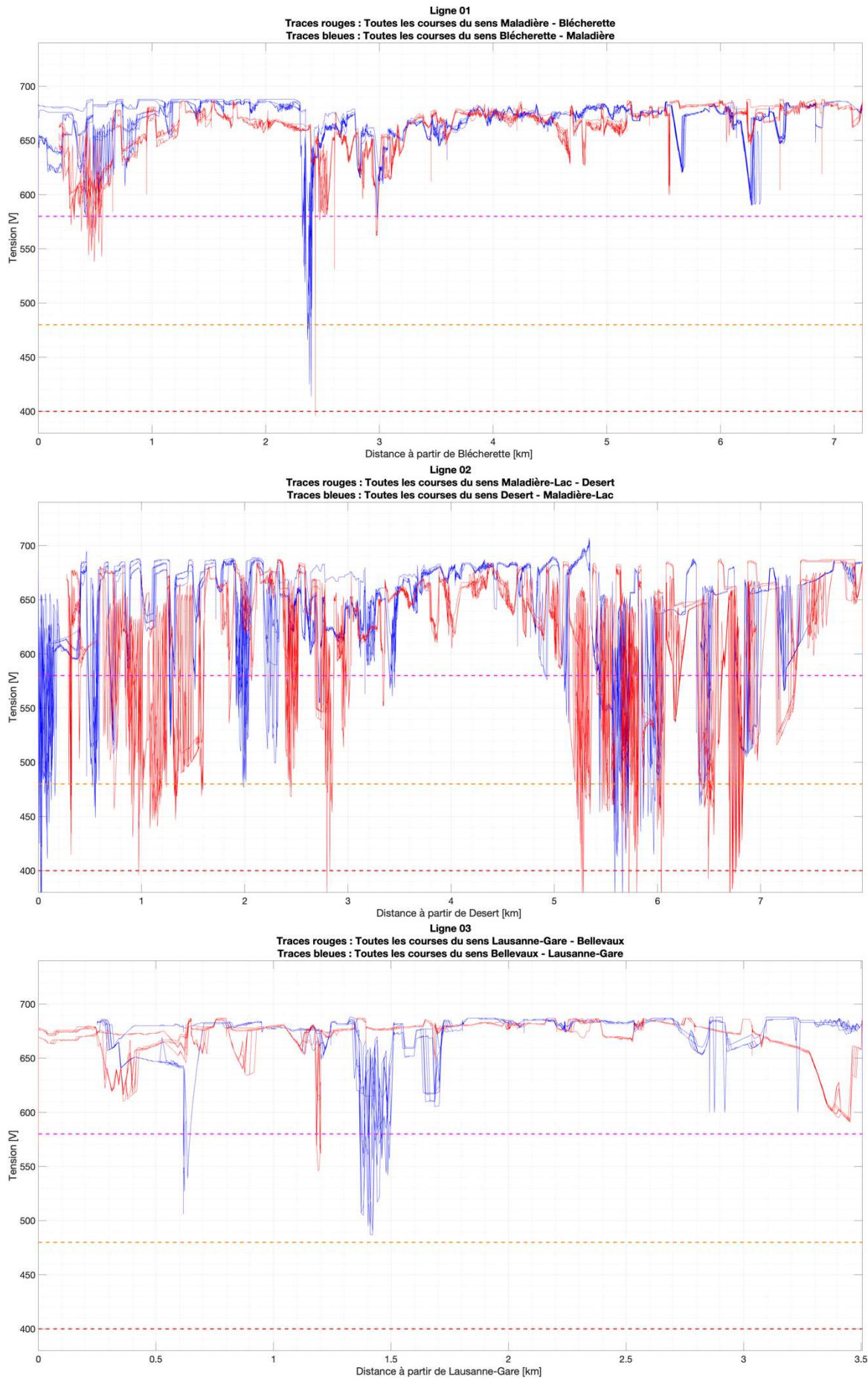


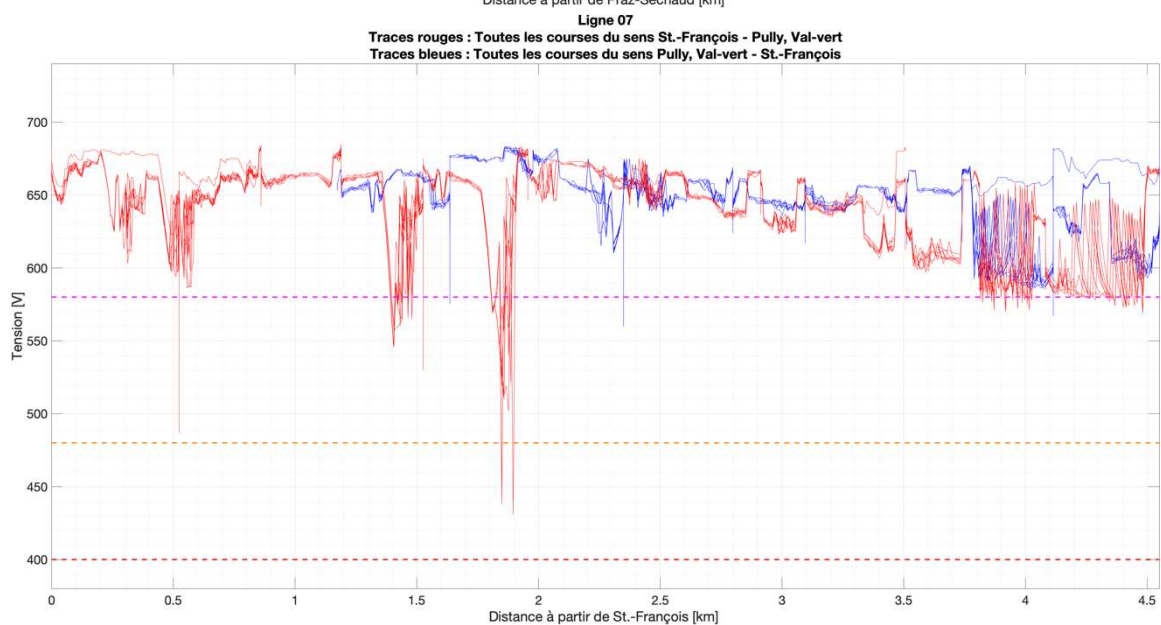
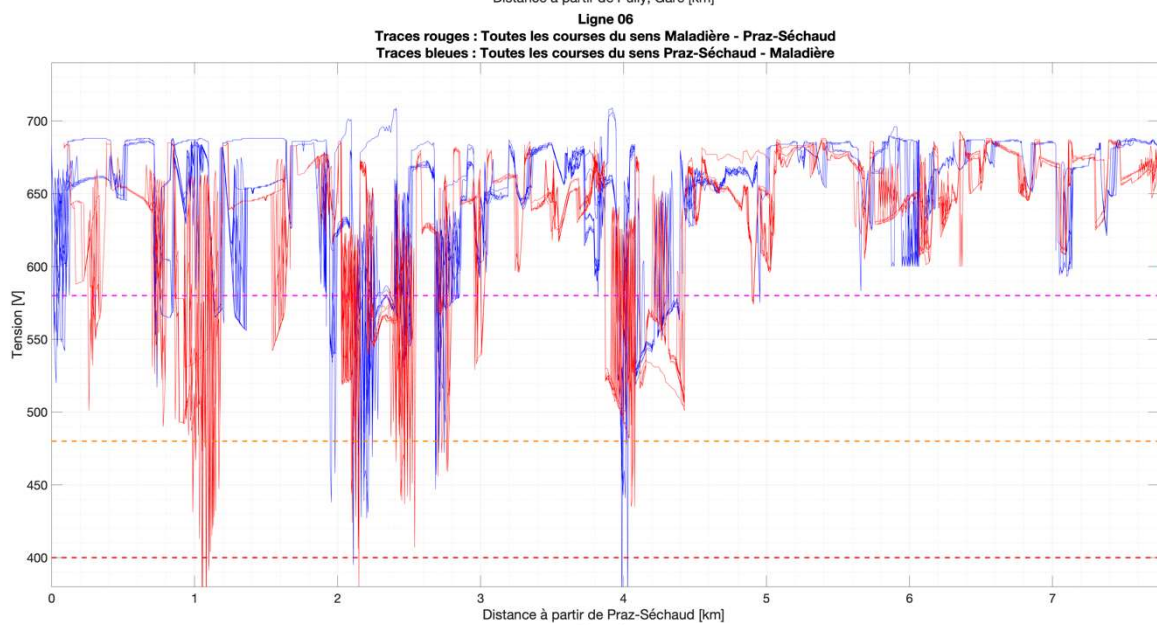
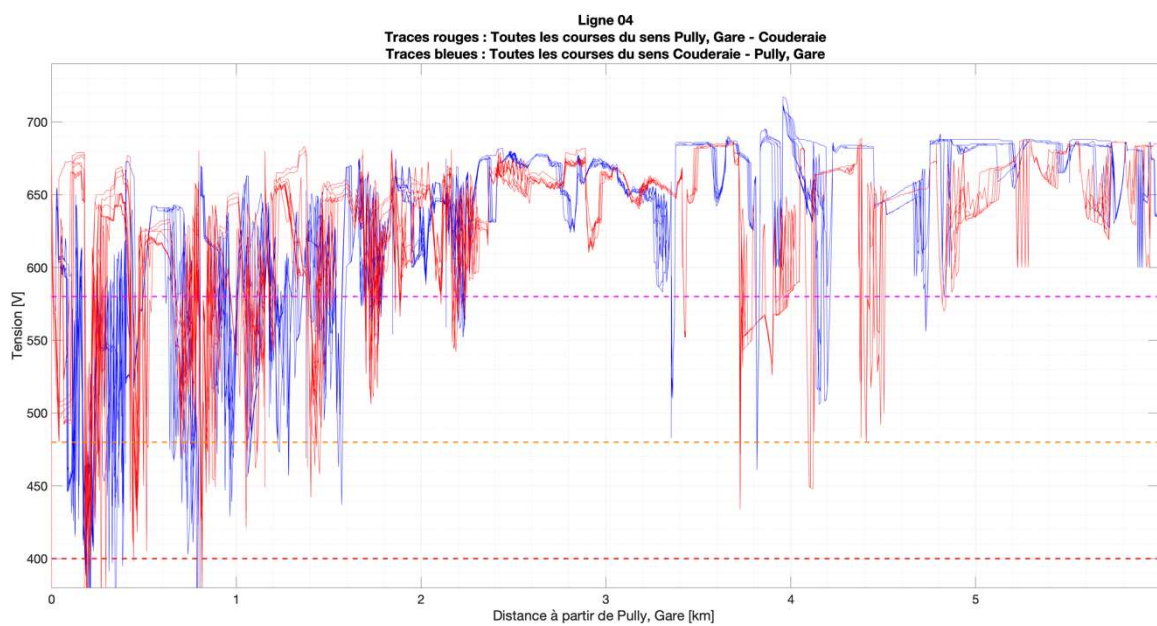


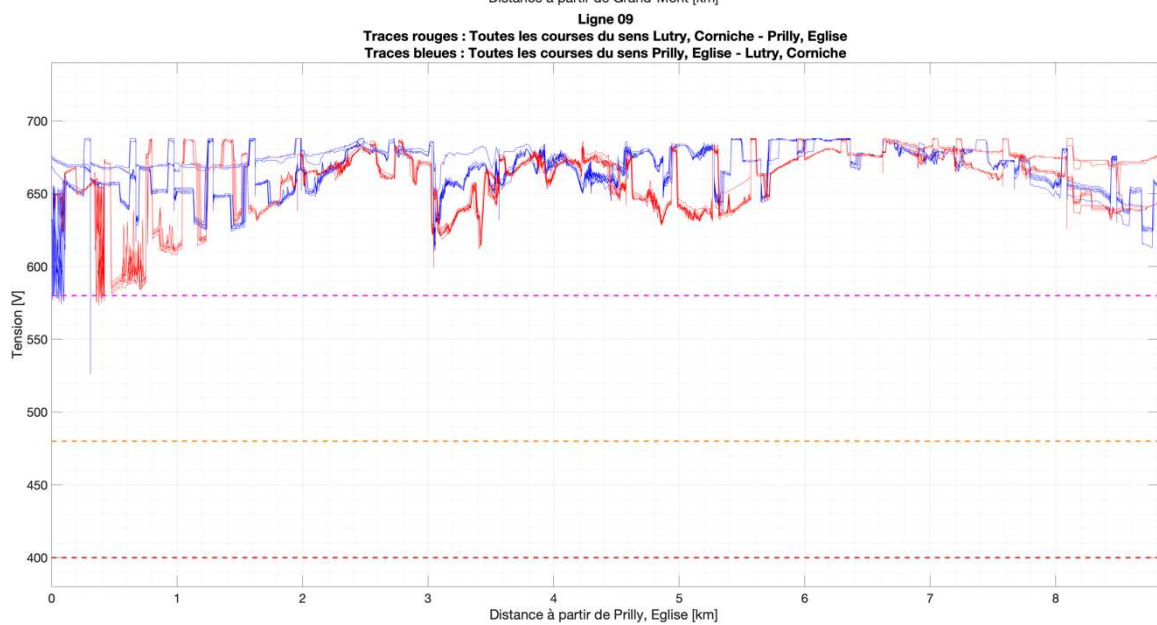
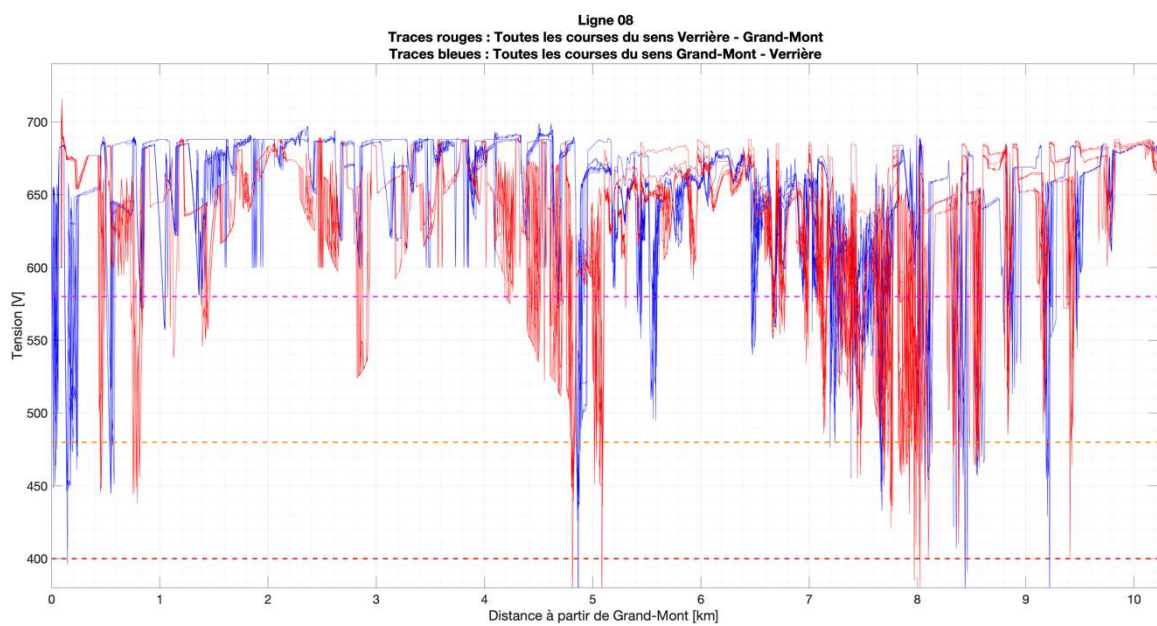


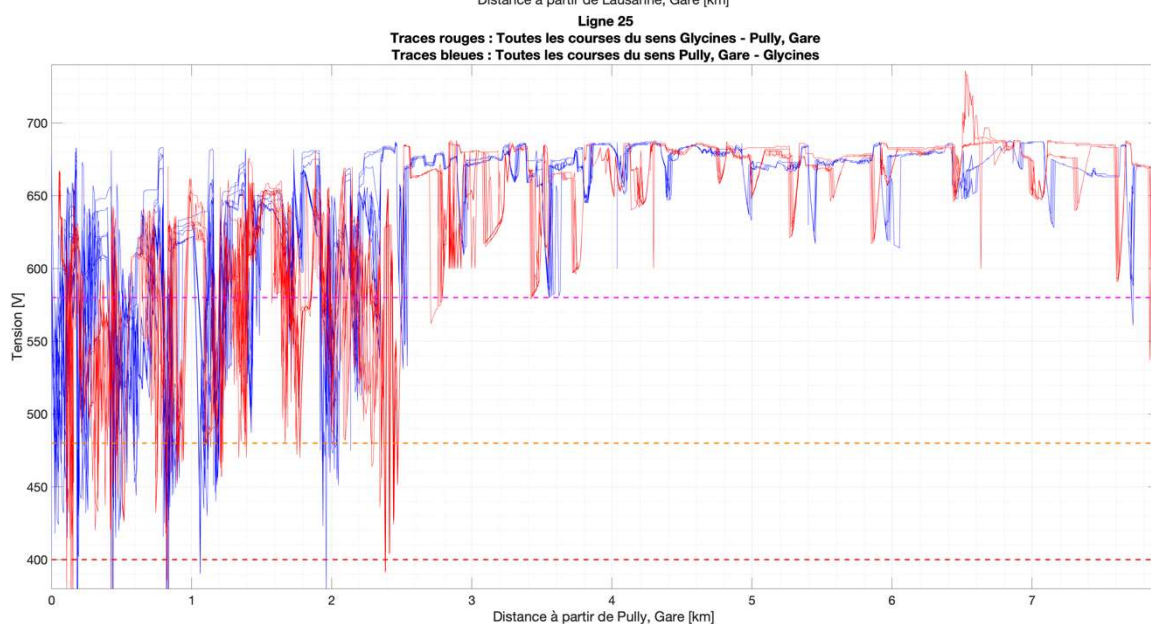
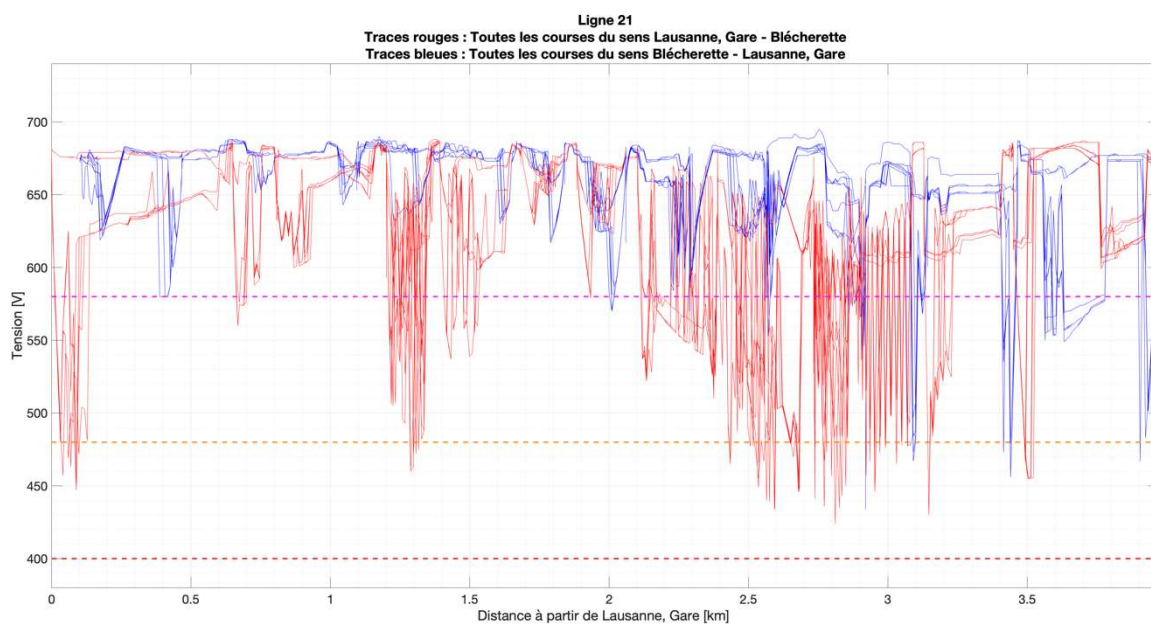


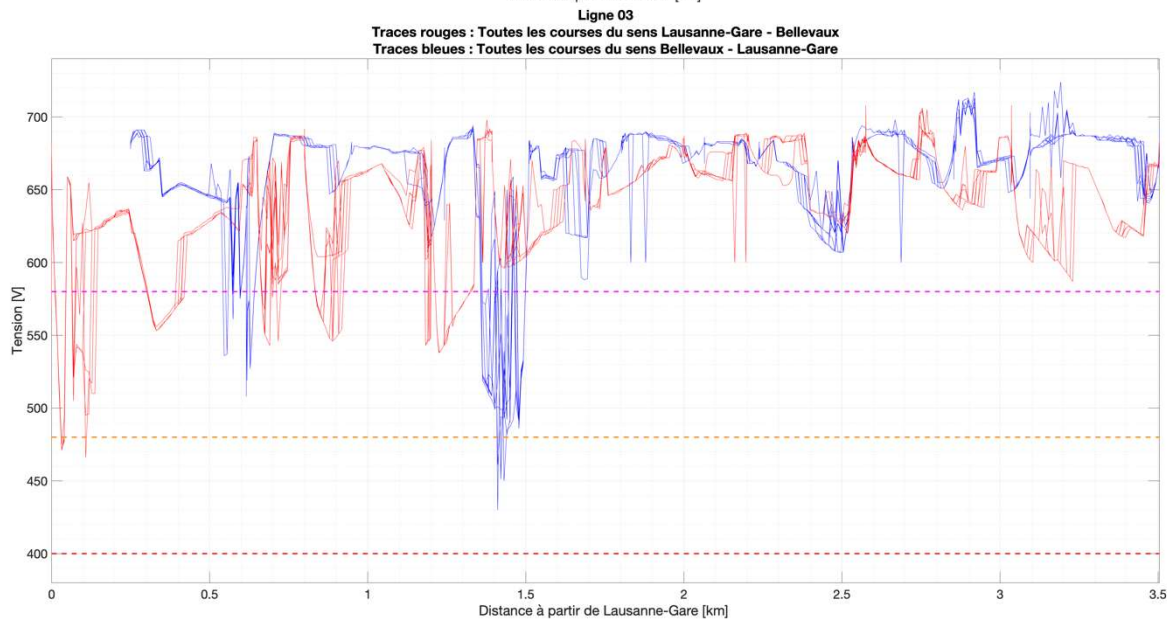
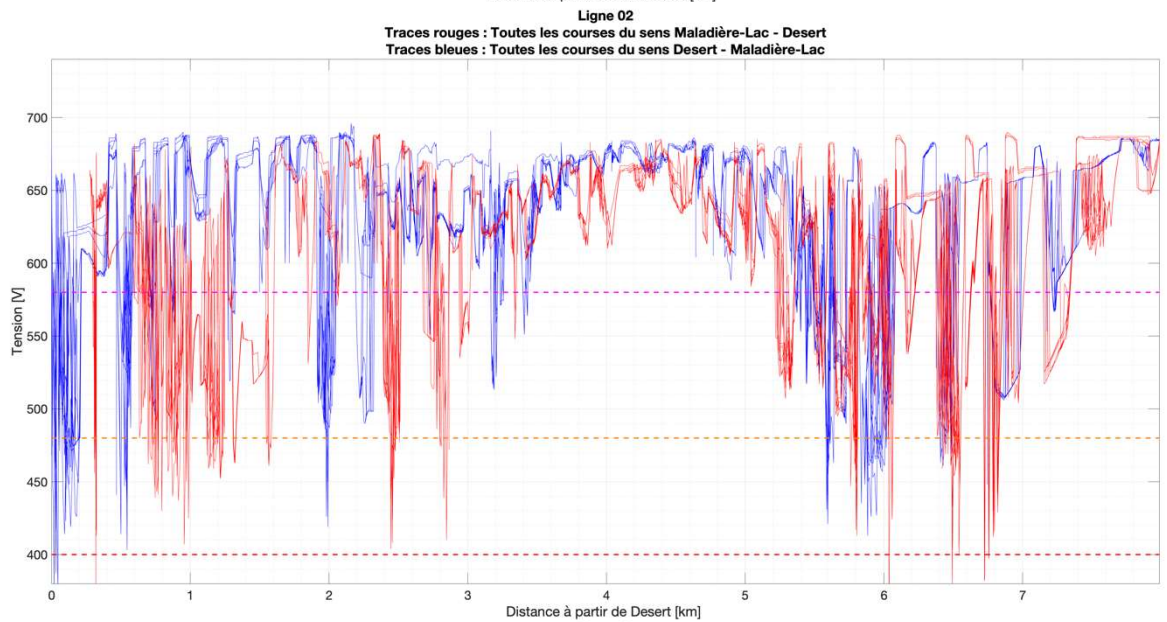
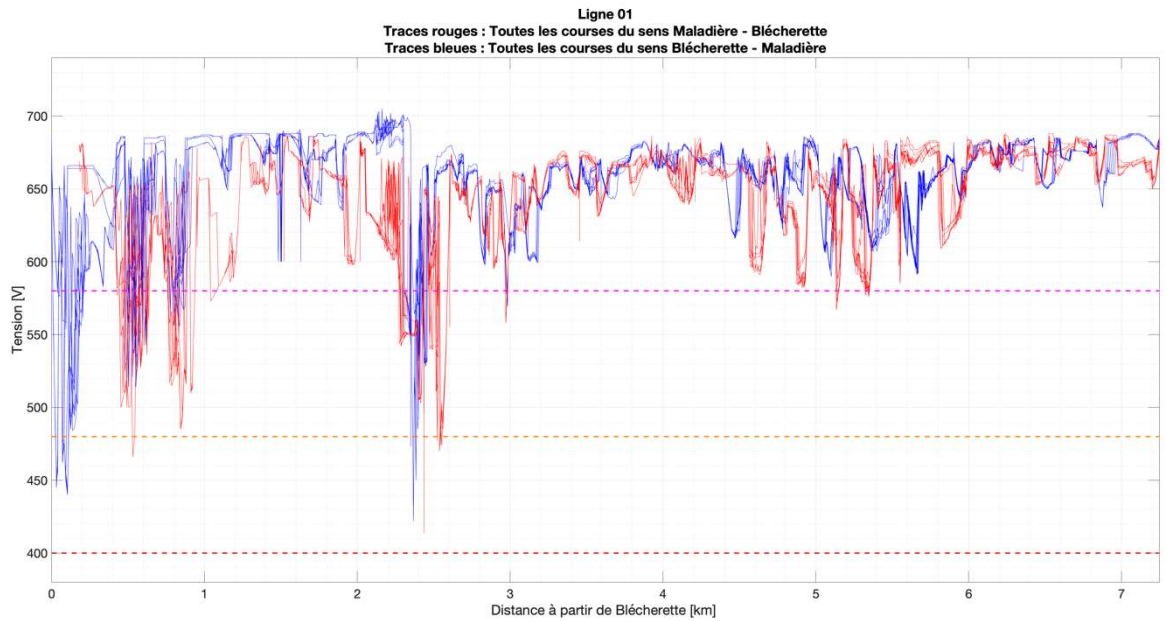


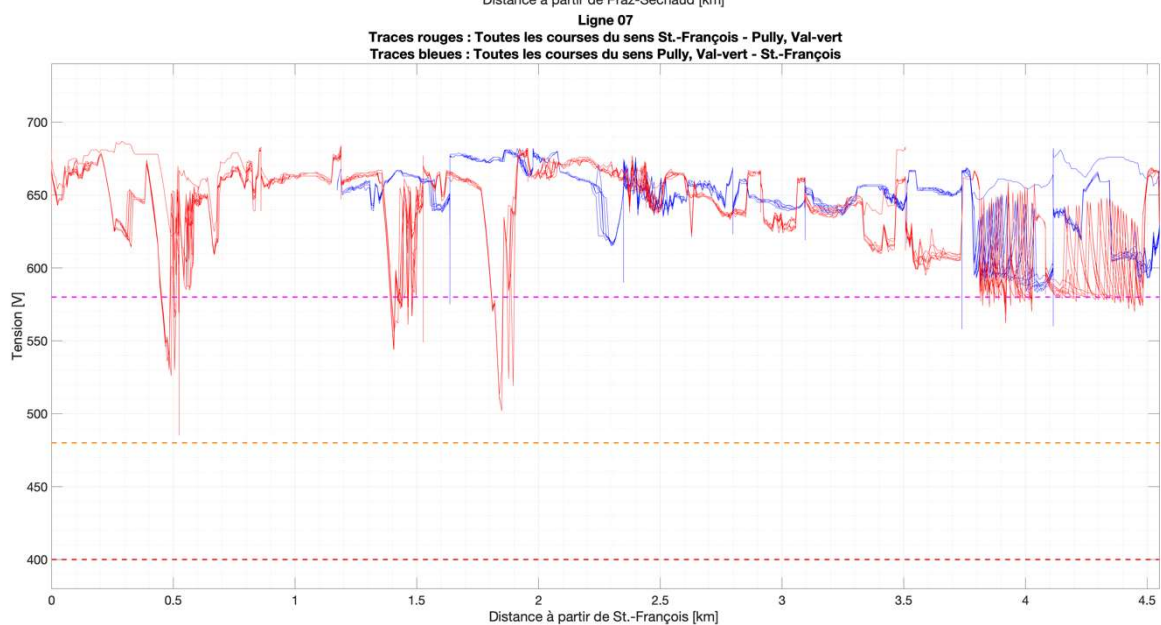
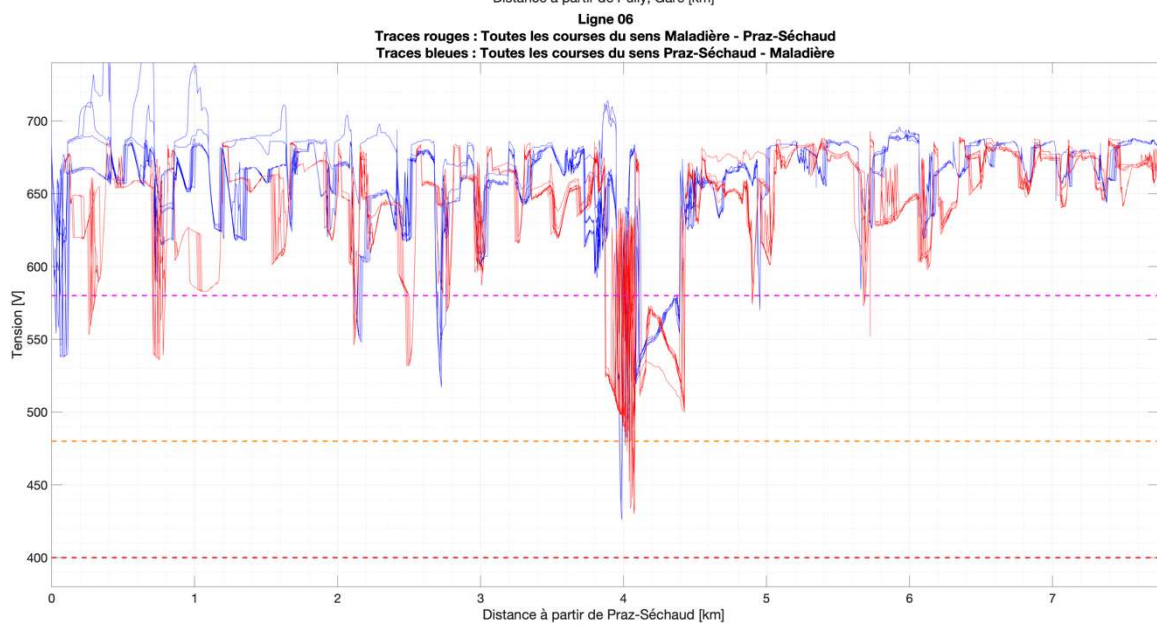
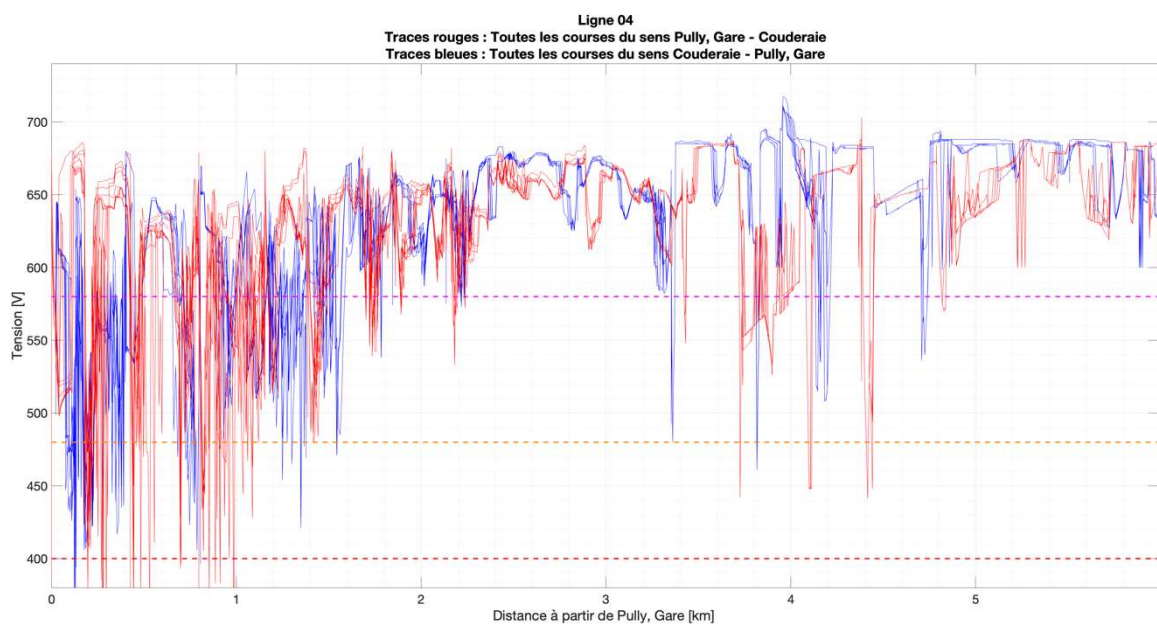


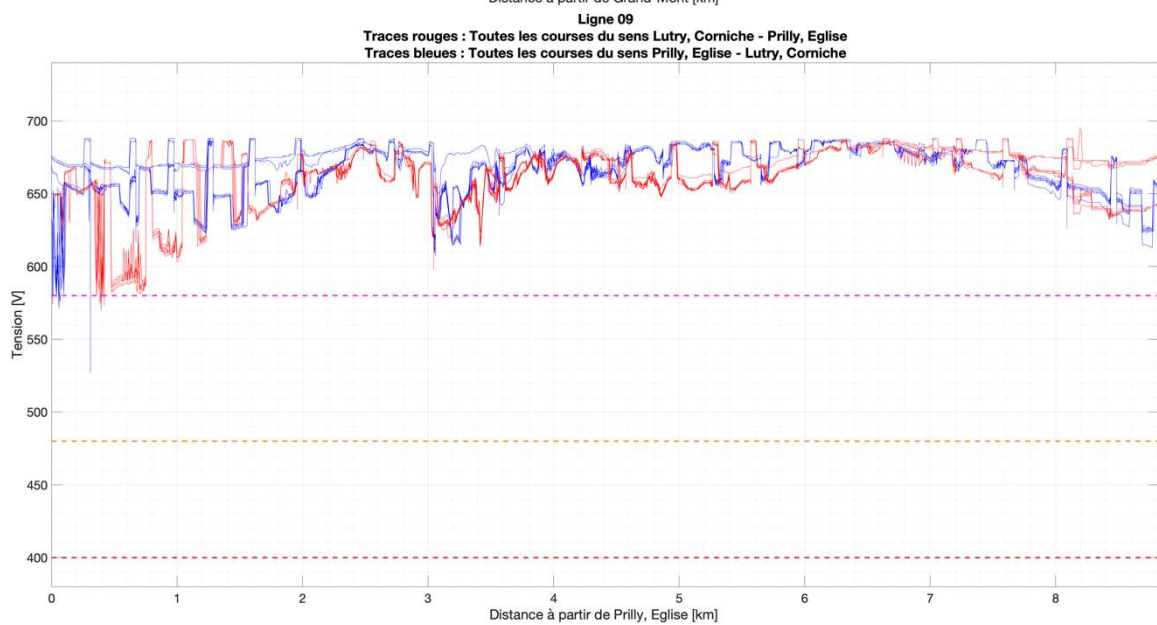
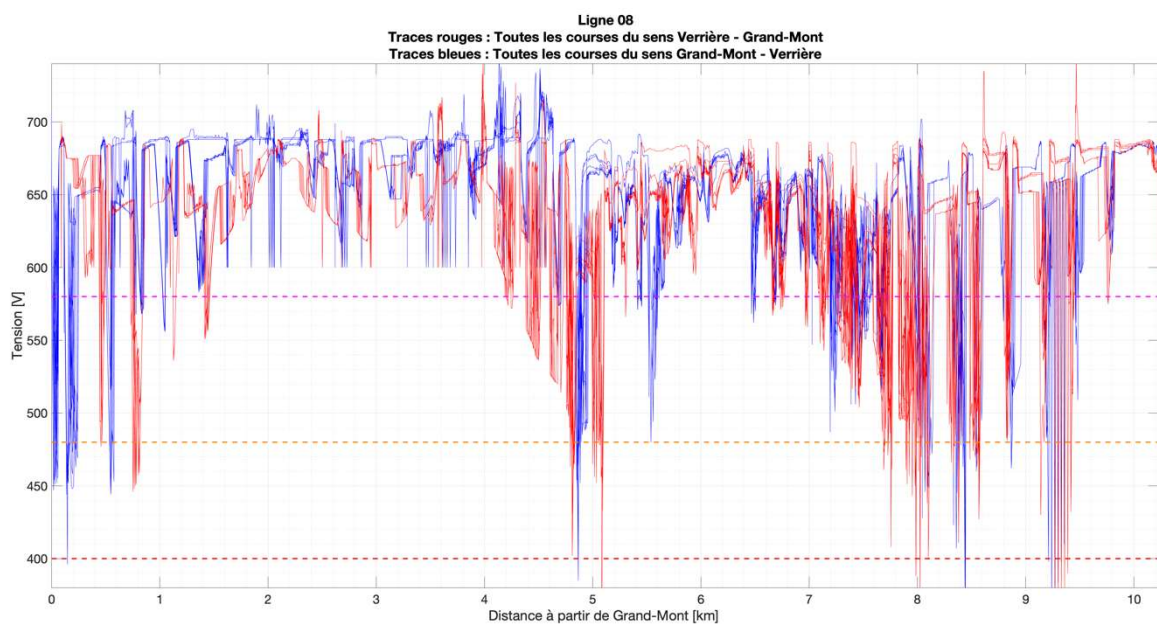


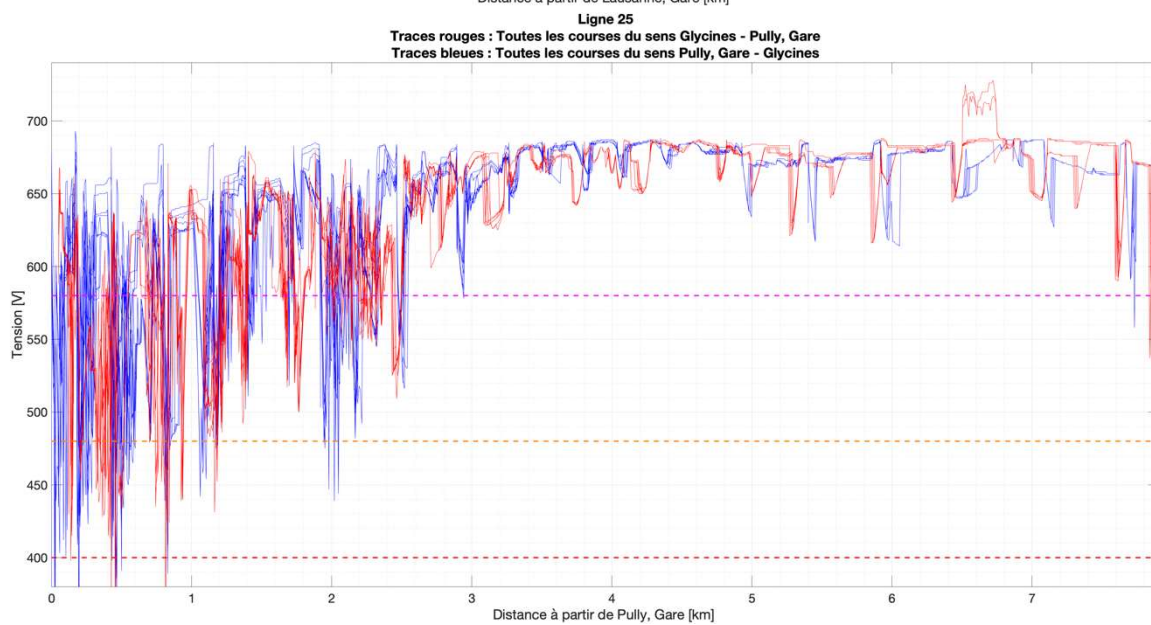
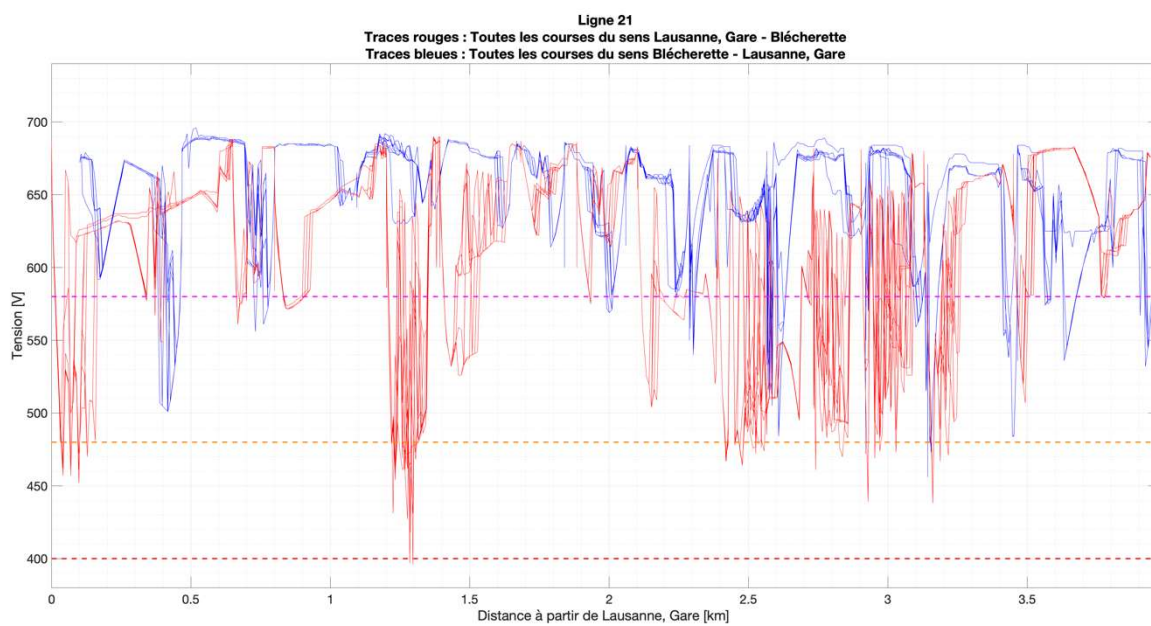


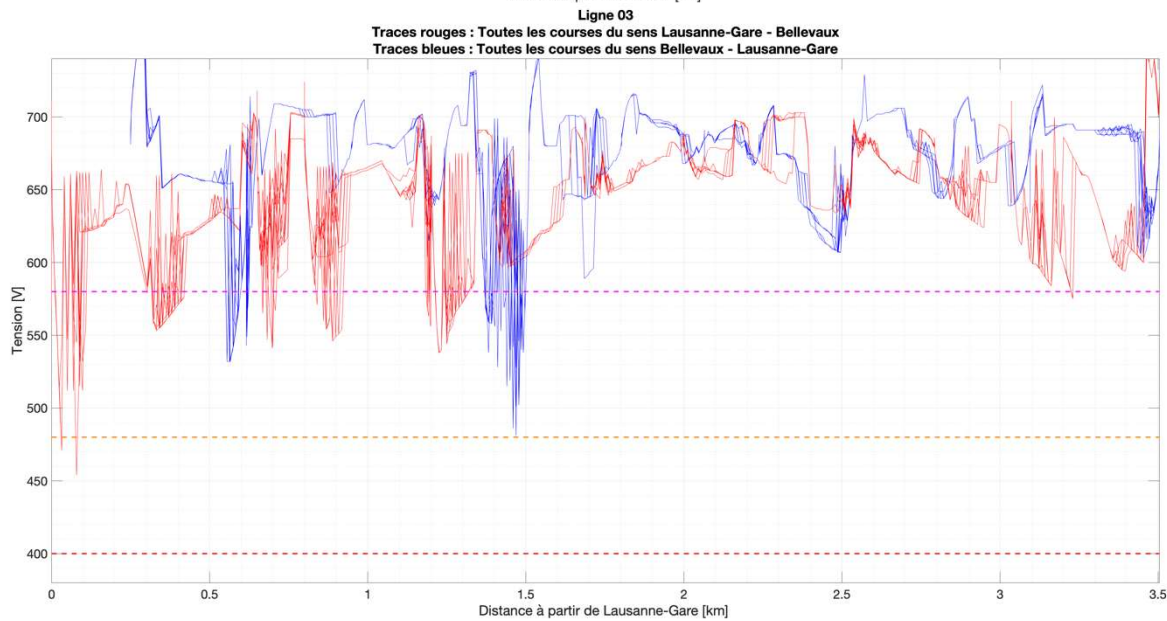
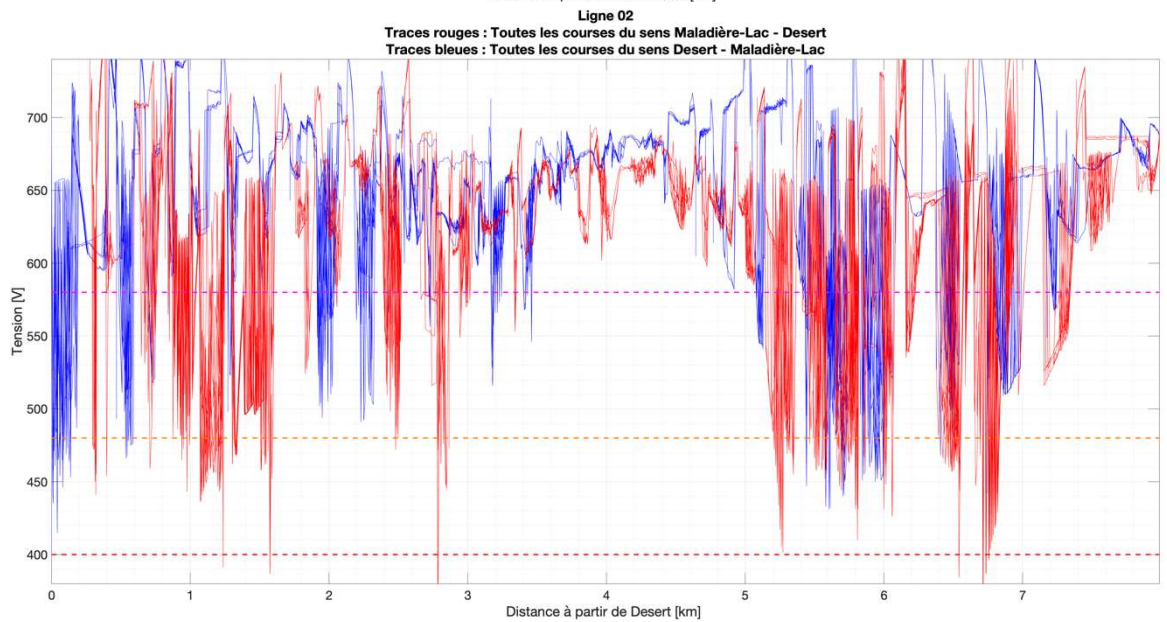
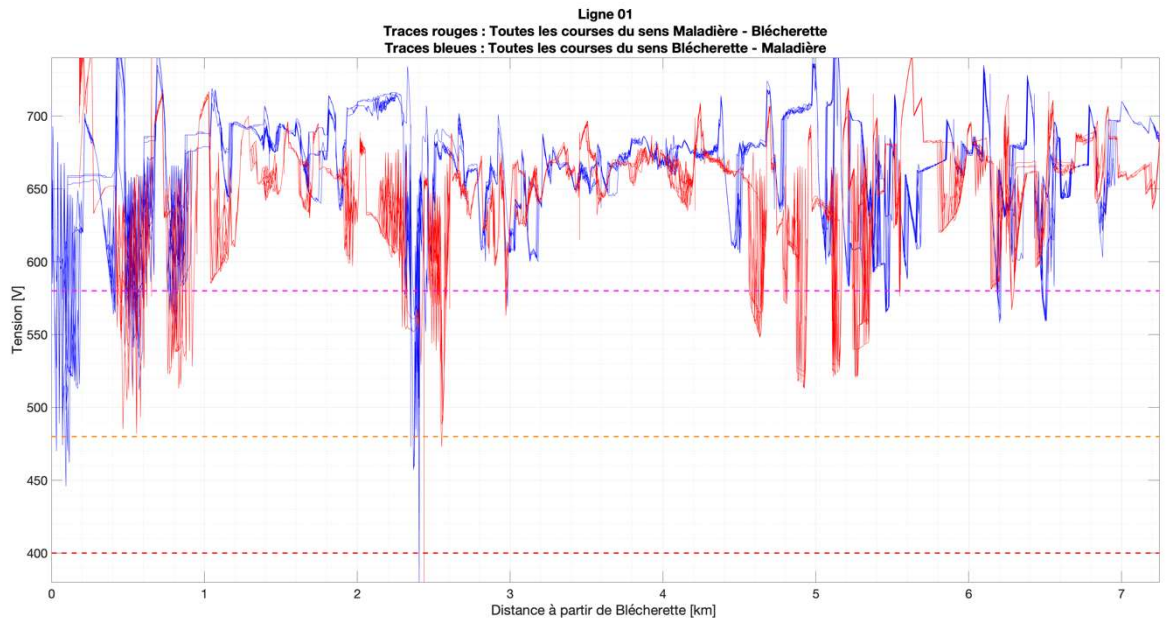


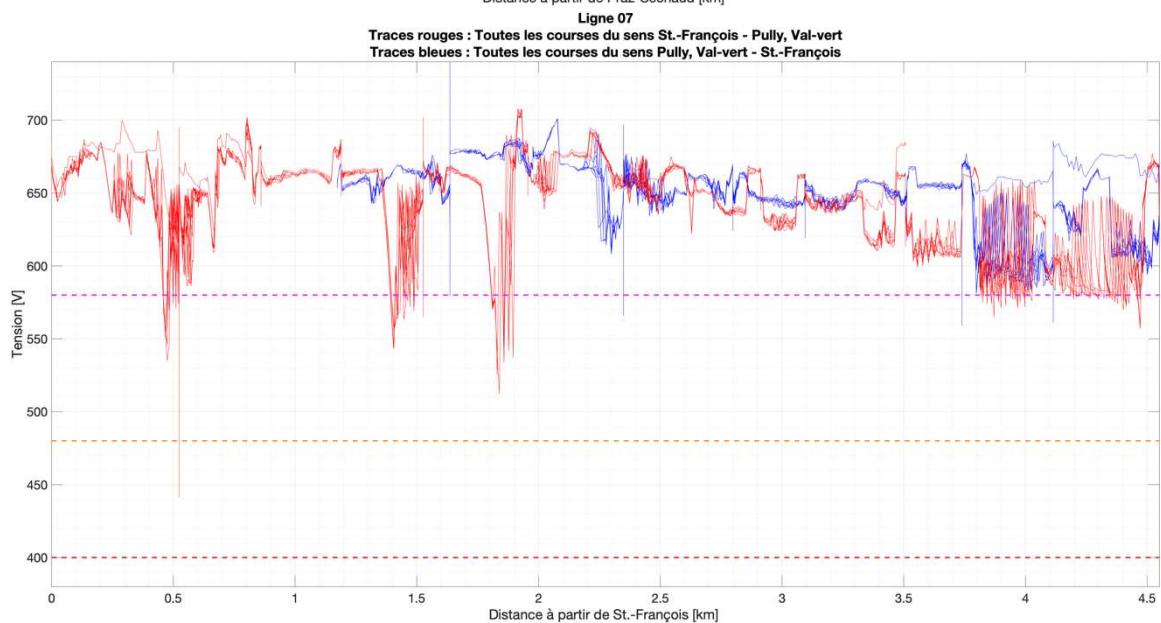
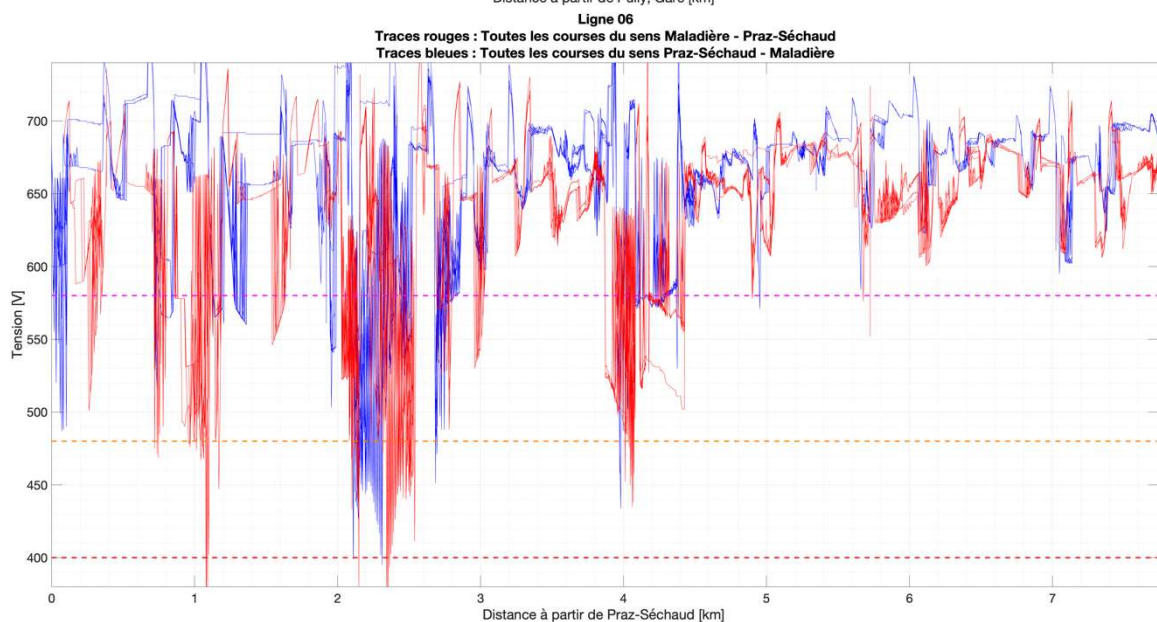
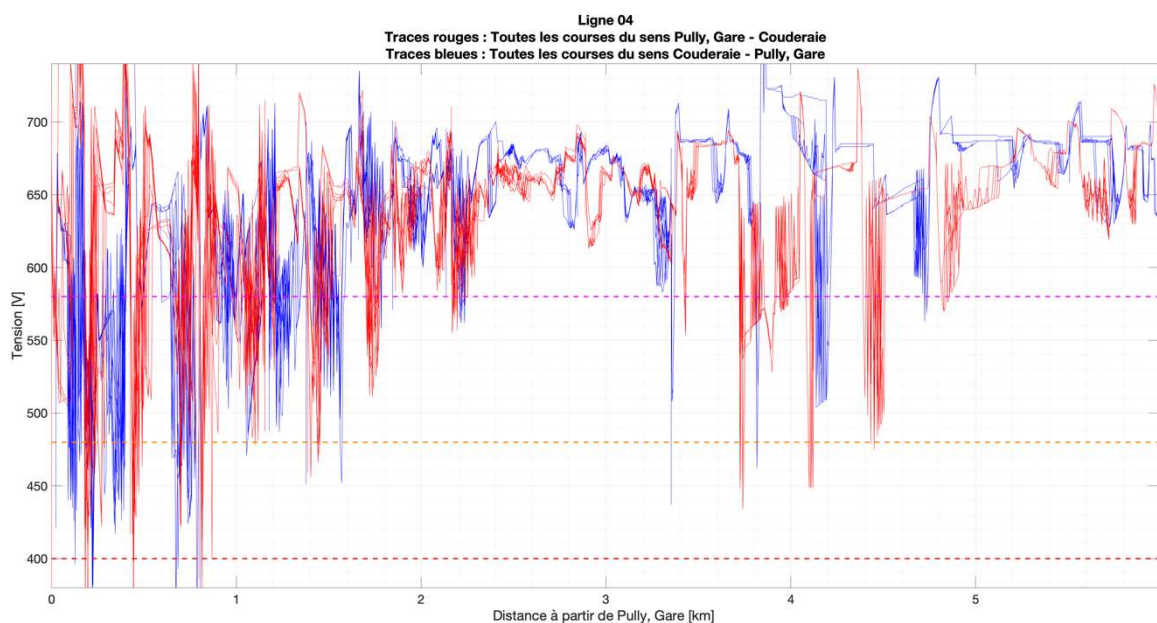


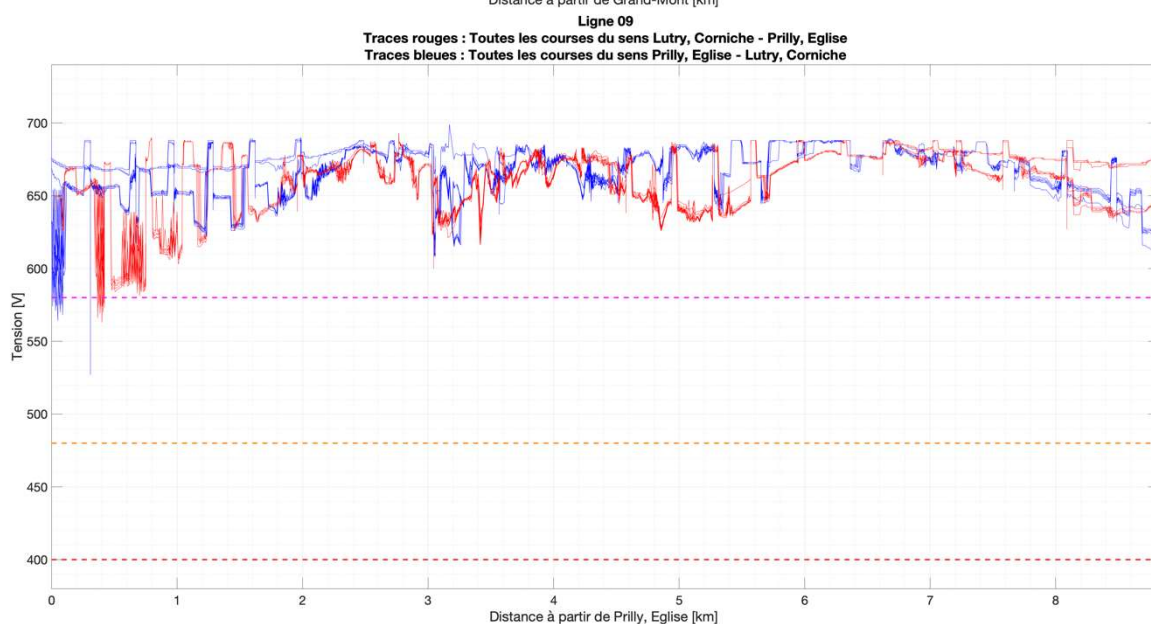
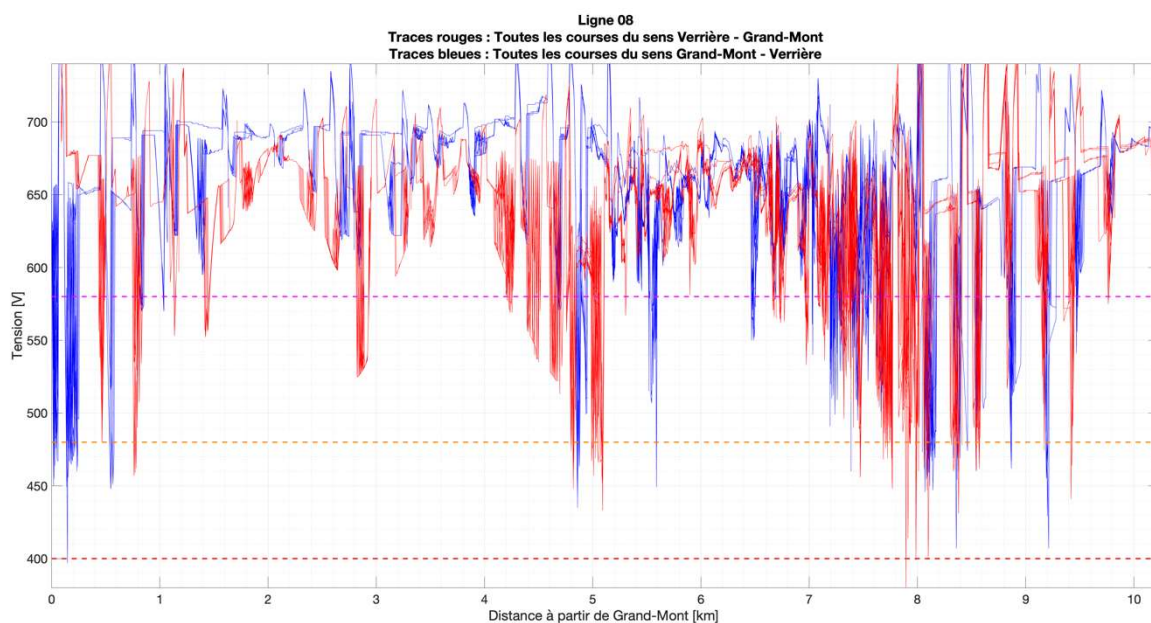


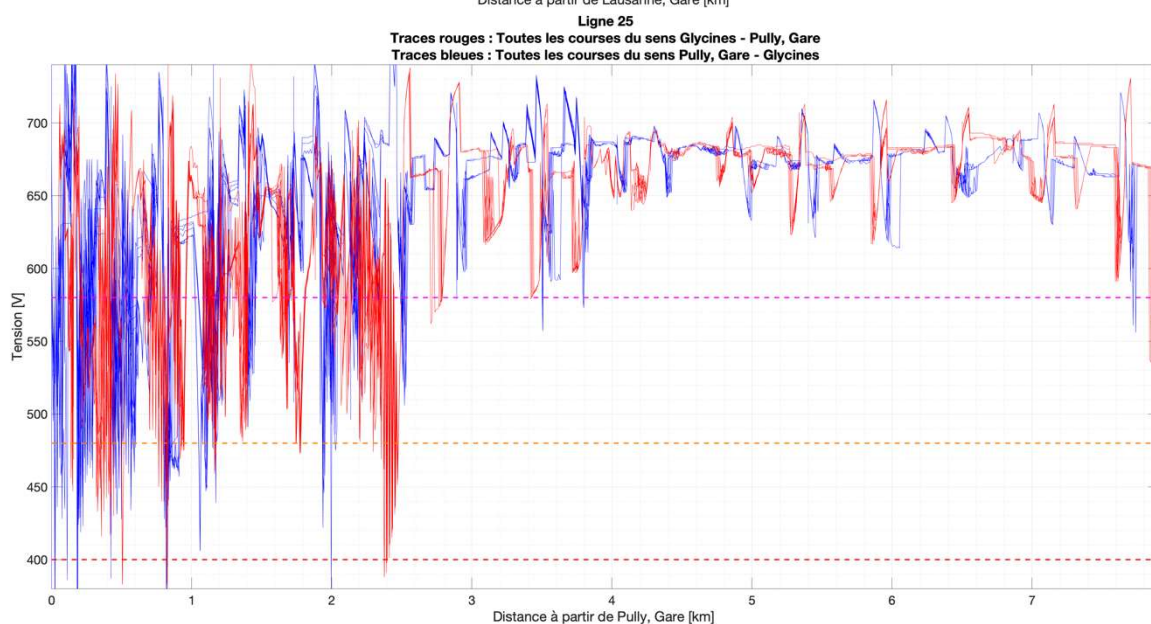
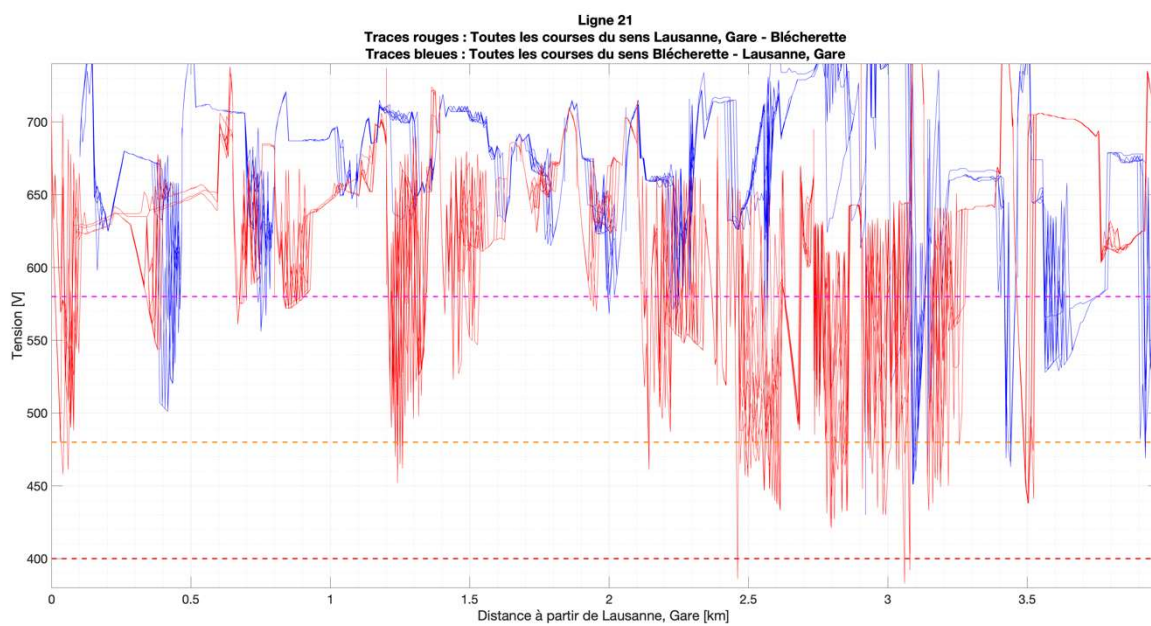












CHARGE DES SOUS-STATIONS

