Table des matières

1. Introduction 1
1.1 Contexte 1
1.2 Objectifs 1
1.3 Cahier des charges 1
2. Modèle de calcul 2
3. Environnement et données constructeurs 3
3.1 Force de pesanteur 3
3.2 Forces aérodynamiques 4
3.3 Force de résistance au roulement 4
3.4 Force d'inertie 5
3.5 Force de traction 5
3.6 Couple 5
3.7 Puissance 5
4. Voiture électrique 6
4.1 Bloc moteur 6
4.1.1 Différentiel 6
4.1.2 Transmission 6
4.1.3 Moteur électrique 7
4.2 Convertisseur DC/AC 7
4.3 Batteries 7
4.3.1 12 V 7
4.3.2 400 V 7
4.4 Recharge 8
4.4.1 Prise AC 8
4.4.2 Convertisseur AC/DC 8
5. Cycle de conduite 9
5.1 Comparaison des cycles de conduites 9
5.2 Simulations 10
5.2.1 Conditions de simulation 10
5.2.2 NEDC vs NEDC avec pente 11
5.2.3 WLTP vs WLTP avec pente 12
5.2.4 NEDC vs WLTP 13
6. Importation de trajets routiers 14
6.1 Comparaison des services 14
6.1.1 Précision 14
6.1.2 Facilité d'accès aux données 14
6.1.3 Choix 14
6.2 Google Maps API 14
6.2.1 Définition d'un API 14
6.2.2 Google Maps Directions API 15
6.2.3 Google Maps Elevation API 15
6.2.4 Clé API 15
6.3 Protocole d'importation des profils géographiques 15
6.3.1 Fonction getItinerary 15
6.3.2 Fonction getElevations 16

6.3.3 Fonction principale 17
7. Création du profil de vitesse 19
7.1 Méthode pour déterminer la vitesse maximum dans un contour 19
7.1.1 Position 20
7.1.2 Vitesse 20
7.1.3 Accélération 20
7.1.4 Produit scalaire 21
7.2 Simulations 22
7.2.1 Itinéraire 1 22
7.2.2 Itinéraire 2 23
7.1 Anticipation pour le changement de vitesse 23
7.1.1 Simulation 1 24
7.1.2 Simulation 2 26
7.1.3 Conclusion 29
8. Simulation d'un conducteur 30
9. Tests et résultats 31
9.1 Itinéraire 1 31
9.1.1 Profil de vitesse réel 32
9.2 Itinéraire 2 34
9.2.1 Profil de vitesse réel 36
10. Limites de l'algorithme 37
10.1 Limites du véhicule et de l'environnement 37
10.2 Limites de l'itinéraire 37
10.2.1 Exemple 1 38
10.2.2 Exemple 2 39
11. Conclusion 41
11.1 Date et signature 41
12. Bibliographie 42
13. Logiciels 42
14. Annexes 42
15. Liste des figures et tableaux 42
15.1 Figures 42
15.2 Tableaux 44

1. Introduction

1.1 Contexte

Depuis quelques années déjà, les véhicules électriques envahissent le marché de l'automobile. Avec de nombreux atouts, ces véhicules théoriquement propres séduisent de plus en plus de consommateurs. Cependant, les technologies de stockage, de production ou encore de distribution d'électricité suscitent encore passablement de problèmes.

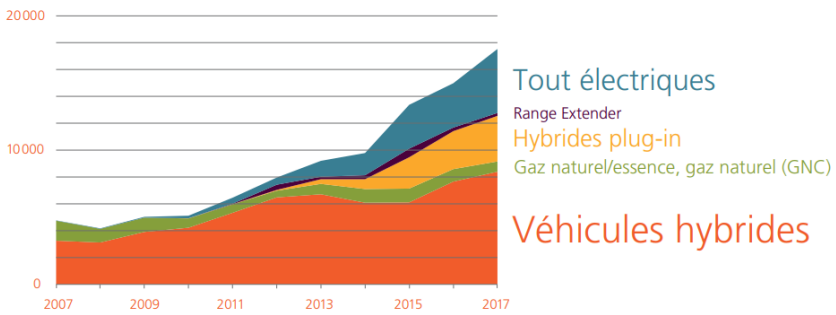

Figure 1 : Immatriculations de voitures de tourisme avec motorisation alternative 2007 – 2017[1]

Le stockage électrique se fait actuellement à l'aide de batteries. Ces batteries composées de matériaux lourds et dangereux pour l'environnement permettent le stockage d'une énergie nécessaire au déplacement d'un véhicule. Les constructeurs automobiles et autres laboratoires développent actuellement des batteries avec des autonomies devenant comparables aux véhicules classiques (moteur à essence) et tout ça avec un temps de recharge toujours plus court.

Malheureusement, ces autonomies ne reflètent pas toujours la réalité et particulièrement dans un pays comme la Suisse. La topographie irrégulière de nos régions implique des contraintes spécifiques sur les véhicules électriques, leur système d'entrainement et les batteries de stockage électrique. Les cycles de conduite utilisés par les constructeurs pour déterminer l'autonomie des voitures ne prennent pas en compte certains facteurs qui influencent de manière significative l'autonomie des véhicules.

1.2 Objectifs

Le but de ce travail de diplôme est de développer un système de simulation adapté à la mobilité électrique suisse. Ce modèle numérique doit permettre la caractérisation du comportement d'un véhicule et de ses composants sur des itinéraires helvétiques importés.

1.3 Cahier des charges

Le cahier des charges a été défini de la manière suivante :

- Développer un protocole simple et fiable d'importation de trajets routiers
- Programmer un algorithme de consommation sur de tels trajets
- Calibrer cet algorithme de manière fiable en fonction de données de consommation existantes

Il a été validé d'un commun accord entre le professeur et moi-même.

[1] *Véhicules à haute efficacité énergétique p.5, OFEN, Mofis. www.e-mobile.ch*

2. Modèle de calcul

Les principaux sujets qui influencent d'une quelconque manière la conduite d'un véhicule ont été divisés en 4 parties distinctes. Les sujets ainsi que leurs liens mutuels sont représentés ci-dessous.

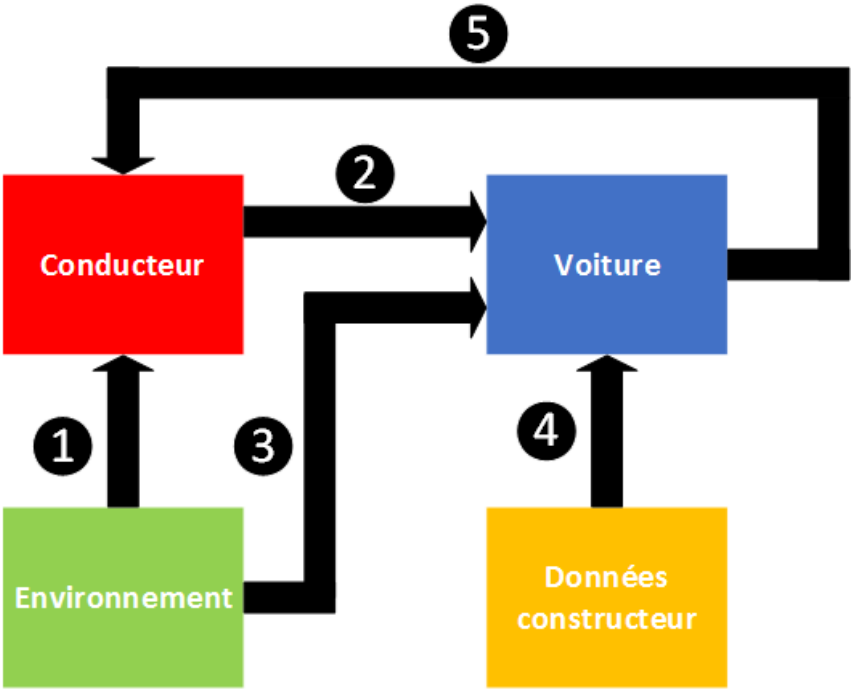

Figure 2 : Schéma bloc du modèle de calcul

1. L'environnement transmet au conducteur des informations sur le parcours. Il indique s'il doit ralentir, tourner ou encore accélérer. Il donne également des informations sur les conditions de la chaussée (mouillée, route en terre, etc.).
2. Le conducteur interagit avec le véhicule par le biais de la pédale d'accélérateur, de frein ainsi que par le volant.
3. L'environnement agit sur la voiture avec des facteurs tels que la pente de la route, les températures extérieures, le vent ou même l'état de la chaussée.
4. Les constructeurs définissent les paramètres d'un véhicule. Ces données sont importantes pour le calcul des forces agissant sur la voiture et permettent la comparaison entre plusieurs véhicules. Ces caractéristiques influencent également sur la consommation.
5. Le véhicule transmet des données telles que la vitesse, la consommation ou l'autonomie au conducteur à travers le tableau de bord par exemple.

Ce schéma bloc démontre que le modèle de calcul pour un véhicule traite passablement d'informations. D'autres facteurs pourraient encore s'ajouter sur ce modèle.

3. Environnement et données constructeurs

Lorsqu'un véhicule se déplace, plusieurs forces s'opposent à ce mouvement et demandent au moteur des efforts supplémentaires afin de conserver une vitesse ou bien d'accélérer. Les caractéristiques de la route ainsi que les données techniques du véhicule influencent grandement les forces s'appliquant au véhicule.

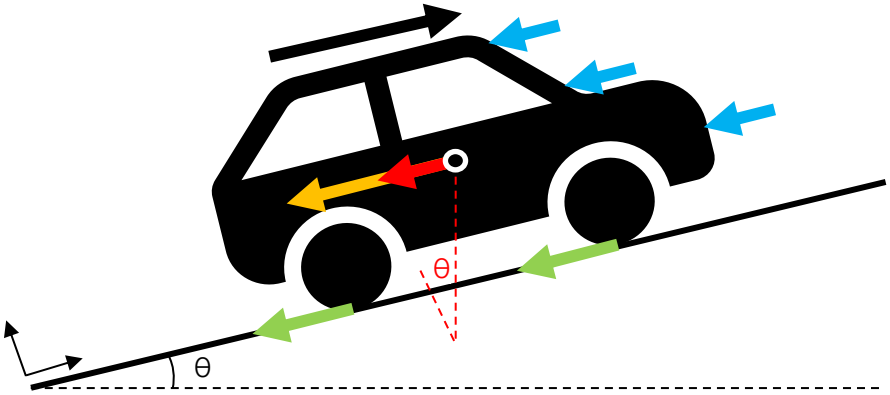

Figure 3 : Schéma des forces majeures agissant sur un véhicule en déplacement

- Force de pesanteur : F_p
- Force d'inertie : F_i
- Force aérodynamique : F_a
- Force de résistance au roulement : F_r
- Force de traction : F_t

3.1 Force de pesanteur

Le poids ou force de pesanteur est la force gravitationnelle exercée par la Terre sur un corps situé à sa surface et est exprimé selon l'équation suivante [1] :

$$F_p = m \cdot g \cdot \sin\theta$$

- F_p : force de pesanteur [N]
- m : masse du véhicule [kg]
- g : intensité de la pesanteur [m/s²]
- θ : inclinaison de la pente [°]

Lorsqu'un corps est posé à l'horizontale (θ = 0°), son poids est entièrement repris par le sol F_N (Loi de Newton : action = réaction) et n'influence donc pas le déplacement du corps. En revanche, lorsque celui-ci est posé dans une pente (0° < θ < 90°), le sol reprend uniquement la composante F_{py} de F_p et la composante F_{px} aura tendance à contrer ou à aider (-90° < θ < 0°) le déplacement du corps.

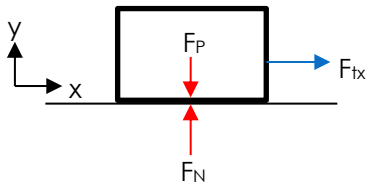

Figure 4 : θ = 0°

$$\begin{cases} F_x = F_{tx} \\ F_y = F_N - F_p = 0 \end{cases}$$

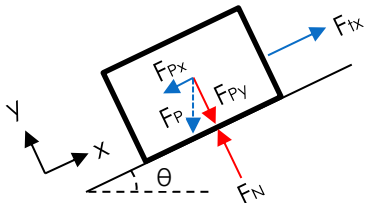

Figure 5 : 0 < θ < 90°

$$\begin{cases} F_x = F_{tx} - F_{px} \\ F_y = F_N - F_{py} = 0 \end{cases}$$

3.2 Forces aérodynamiques

Les forces aérodynamiques sont influencées par la géométrie ainsi que la vitesse de déplacement du véhicule. Elles sont décomposées par une force de trainée **F_a**, une force de portance **F_p** et d'une force de dérive **F_d**. **F** indique la force de traction du véhicule.

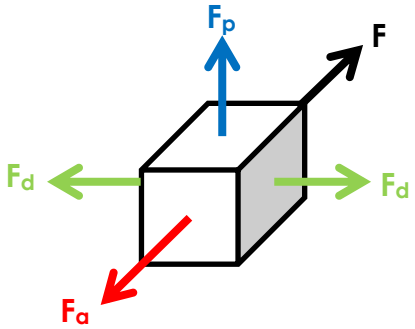

Figure 6 : Définition des forces aérodynamiques

La force de trainée est considérée comme la force qui s'oppose au déplacement du véhicule dans l'air. Les constructeurs automobiles y attachent une grande importance, car cette force va influencer la consommation du véhicule et également sa vitesse de pointe. La force de trainée est définie selon l'équation suivante [2] :

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V^2$$

- Fa : force de traînée [N]
- ρ : densité de l'air [kg/m³]
- C_x : coefficient de trainée [-]
- S : surface frontale [m²]
- V : vitesse du véhicule [m/s]

Le coefficient de trainée C_x est en général donné par le constructeur. Ce coefficient adimensionnel provient d'un « profilage aérodynamique » fait dans une soufflerie et représente la résistance du véhicule dans un fluide tel que l'air.

La surface frontale peut être estimée selon la formule dite de Paul Frère[2] :

$$S = l \cdot h \cdot k$$

- S : surface frontale [m²]
- l : largeur du véhicule [m]
- h : hauteur du véhicule [m]
- k : coefficient de remplissage [-]

Le coefficient k (~0.85) représente le pourcentage de surface utilisé par le véhicule dans la surface définie par la multiplication de la largeur et de la hauteur.

La force de portance ainsi que les forces de dérive ne sont pas prises en compte, car ces dernières ne s'opposent pas au déplacement du véhicule.

3.3 Force de résistance au roulement

La force de résistance au roulement recouvre des effets liés à la déformation des pneumatiques de la voiture et à des effets provenant de la mécanique du véhicule tels que le frottement des roulements, le travail de suspension ou encore les défauts d'alignements[2]. La force de résistance au roulement est définie selon l'équation suivante [3] :

[2] *http://www.ingveh.ulg.ac.be/uploads/education/meca-0004/notes/PCVPerfo3Forces_2016.pdf*

$$F_r = C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta$$

- F_r : force de résistance au roulement [N]
- C_{rr} : coefficient de résistance au roulement [-]
- m : masse du véhicule [kg]
- g : intensité de la pesanteur [m/s²]
- θ : inclinaison de la pente [°]

Le coefficient de résistance au roulement C_{rr} provient de la littérature [4]. Cependant, il peut tout de même varier en fonction de la pression du pneu ainsi que la surface et l'état de la route utilisée.

3.4 Force d'inertie

La force d'inertie est définie comme étant la résistance d'un corps à un déplacement. Selon la deuxième loi de Newton, dans un système fermé, la force d'inertie correspond à la somme des forces s'appliquant sur un corps [5].

$$F_i = m \cdot a = \sum F = F_t - F_p - F_a - F_r$$

3.5 Force de traction

La force de traction d'un véhicule sert à vaincre toutes les forces s'opposant au déplacement du véhicule et ainsi lui permet d'accélérer. Elle représente la force agissant entre le véhicule et la route.

$$F_t = F_i + F_p + F_a + F_r$$

3.6 Couple

Le couple d'un véhicule correspond au degré d'effort fourni pour pouvoir avancer [5].

$$M = F \cdot R_r$$

- M : couple [Nm]
- F : force [N]
- R_r : rayon de la roue [m]

Le rayon d'une roue peut être calculé avec les données techniques d'un pneu. Par exemple, un pneu portant les inscriptions **205/45 R17 :**

45% de 205 mm = 92.25 mm, 17 pouces = 431.8mm → Rr = 92.25 + 431.8/2 = 308.15mm

3.7 Puissance

La puissance est définie comme le travail fourni par une force par unité de temps [5].

$$P = F \cdot v = \omega \cdot M$$

- P : puissance [W]
- F : force [N]
- v : vitesse du véhicule [m/s]
- ω : vitesse de rotation [rad/s]
- M : couple [Nm]

Rapport-Gratuit.com

4. Voiture électrique

Toutes les voitures ne suivent peut-être pas la topologie ci-dessous.

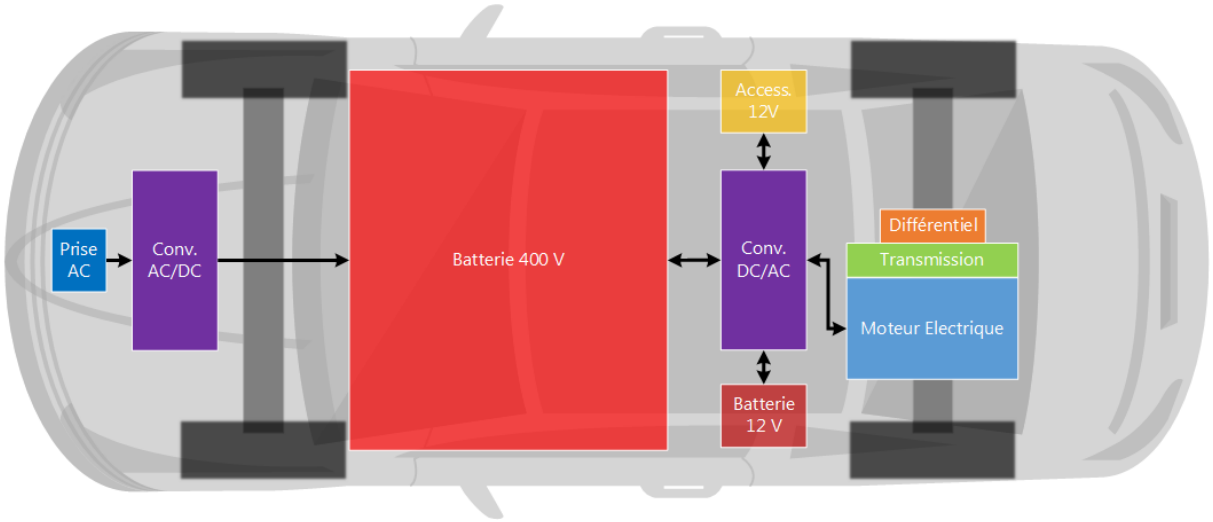

Figure 7 : Topologie d'un véhicule électrique

4.1 Bloc moteur

Le bloc moteur d'un véhicule électrique est composé majoritairement d'un différentiel, d'une transmission et d'un moteur électrique. L'emplacement et le nombre de blocs moteurs varient en fonction des constructeurs.

4.1.1 Différentiel

Un différentiel est un système mécanique qui a pour fonction de distribuer une vitesse de rotation par répartition de l'effort cinétique, de façon adaptative, immédiate et automatique [6]. Lorsqu'un véhicule prend un virage, la distance parcourue par la roue intérieure est moins élevée que la roue extérieure donc la vitesse entre les roues varie également. Le différentiel permet d'adapter la vitesse des roues tout en leur transmettant du couple, il permet donc de répartir la puissance sur les deux roues. Le différentiel possède un rendement unitaire.

4.1.2 Transmission

Dans un véhicule à essence, la boite à vitesses permet d'adapter le couple et la vitesse de rotation du moteur afin d'exploiter au mieux le rendement du véhicule. Dans un véhicule électrique, la plage de vitesse élevée et le couple disponible au démarrage ne nécessitent pas d'ajustement pour obtenir un rendement élevé, c'est pourquoi certaines voitures électriques possèdent qu'un seul rapport de réduction. Dans une transmission, de manière générale, on constate des pertes sur les roulements, des pertes par les joints d'arbres ou encore des pertes dues aux roues dentées. Ceci implique que la puissance de sortie n'est pas égale à la puissance d'entrée. Le rapport entre le couple moteur et le couple de traction est défini de la manière suivante [7].

$$M_m = \frac{M_t}{\eta_r \cdot r}$$

- M_m : couple à l'arbre du moteur [Nm]
- M_t : couple de traction aux roues [Nm]
- η_r : rendement de la transmission [-]
- r : rapport de réduction [-]

4.1.3 **Moteur électrique**

Le moteur électrique permet l'entrainement du véhicule, c'est lui qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Actuellement, le moteur synchrone qui offre le meilleur rendement est utilisé dans la plupart des voitures électriques (Toyota, Renault). Cependant, le moteur asynchrone reste encore utilisé pour son faible coût et sa fiabilité (Tesla). Le moteur DC a quant à lui été abandonné à cause de la problématique des charbons et de leur entretien.

$$P_m = \eta_m \cdot P_{el}$$

- P_m : puissance mécanique à l'arbre [W]
- P_{el}: puissance électrique [W]
- η_m : rendement du moteur [-]

Les pertes dans un moteur proviennent de pertes par effet Joule, des pertes fer et des pertes dues à la mécanique. Le rendement d'un moteur synchrone ou asynchrone est bien meilleur que le rendement d'un moteur thermique.

4.2 **Convertisseur DC/AC**

Le convertisseur DC/AC ou onduleur permet de transformer le courant continu en un courant triphasé alternatif. En fonction de la consigne donnée par la pédale d'accélérateur, l'onduleur modifie la fréquence du courant alternatif. Cette action a pour but de faire varier la vitesse de rotation du moteur électrique. Le couple du moteur varie en fonction de l'amplitude du courant. Ce dispositif est réversible, lors d'un freinage, le courant alternatif est converti en courant continu et permet de recharger la batterie. Le type de convertisseur est adapté en fonction du moteur utilisé.

$$P_{el} = \eta_c \cdot P_{dc}$$

- P_{el} : puissance électrique AC [W]
- P_{dc} : puissance électrique DC [W]
- η_c : rendement du convertisseur [-]

4.3 **Batteries**

Une batterie est un ensemble de plusieurs accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension continue [6].

4.3.1 **12 V**

La batterie basse tension permet de démarrer le système, ensuite, elle alimente les phares, l'autoradio et tous les équipements électroniques.

4.3.2 **400 V**

La batterie haute tension ou batterie de traction contient l'énergie du véhicule. C'est celle-ci qui va alimenter le moteur afin que le véhicule se déplace.

$$E = \int P_{dc}\, dt$$

- E : énergie nécessaire au moteur [Ws]
- P_{dc} : puissance électrique DC [W]
- dt : intervalle de temps [s]

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L'autonomie et la consommation de la batterie sont définies de la manière suivante :

$$Autonomie = \frac{x \cdot C_b}{E}$$

- Autonomie [m]
- x : distance parcourue [m]
- C_b : capacité de la batterie [kWh]
- E : énergie nécessaire au moteur [kWh]

$$Consommation = \frac{E \cdot 10^5}{x}$$

- Consommation [kWh/100km]
- x : distance parcourue [m]
- E : énergie nécessaire au moteur [kWh]

4.4 Recharge

À la maison ou dans des lieux publics, il existe des stations de recharge pour voiture électrique. Le système réversible des voitures électriques permet de recharger une partie de la voiture lorsque celle-ci est en mouvement, mais malheureusement, sur un même trajet aller-retour, l'énergie récupérée est toujours plus faible que celle consommée.

4.4.1 Prise AC

La source de tension alternative qui provient du réseau national d'électricité permet la recharge de la batterie.

4.4.2 Convertisseur AC/DC

Le convertisseur AC/DC permet de convertir la tension alternative du réseau en une tension continue qui permet de recharger la batterie.

5. Cycle de conduite

Un cycle de conduite est une simulation de trajet parcouru. Il est composé de phases d'accélération, de freinage et de temps d'arrêt afin de simuler au mieux le comportement d'un utilisateur de la route. Ces tests s'effectuent sur des bancs à rouleaux et permettent d'évaluer la consommation du véhicule (en électricité ou en essence) ainsi que les émissions de polluants (moteur à essence). Actuellement, en Europe, les constructeurs automobiles utilisent le cycle « nouveau cycle européen de conduite – NEDC [3] » datant de 1973. Ce cycle n'est vraiment pas représentatif du comportement d'un conducteur et l'autonomie des véhicules correspond très rarement à la réalité. À partir du 1er septembre 2018, tous les véhicules seront obligatoirement homologués par un nouveau cycle nommé « procédure d'essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers - WLTP [4] ». Ce cycle est mis au point par des experts du monde entier et se base sur des données réelles de conduite, il prend également en compte la consommation d'équipements optionnels et l'aérodynamisme du véhicule. Cette nouvelle norme engendrera une augmentation de la consommation des véhicules, même ceux à essence, et se rapprochera de la réalité.

5.1 Comparaison des cycles de conduites[5]

	NEDC	WLTP
DURÉE DU CYCLE	20 minutes	30 minutes
TEMPS D'ARRÊT	5 minutes (25 %)	3 minutes 45 secondes (13 %)
DISTANCE PARCOURUE	11 kilomètres	23.25 kilomètres
PHASE DE CONDUITE	2 phases fixes : 66 % mode urbain et 34 % mode extra-urbain	4 phases dynamiques : 52 % mode urbain et 48 % mode extra-urbain
VITESSE MOYENNE	34 km/h	46.5 km/h
VITESSE MAXIMUM	120 km/h	131 km/h

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des cycles NEDC et WLTP

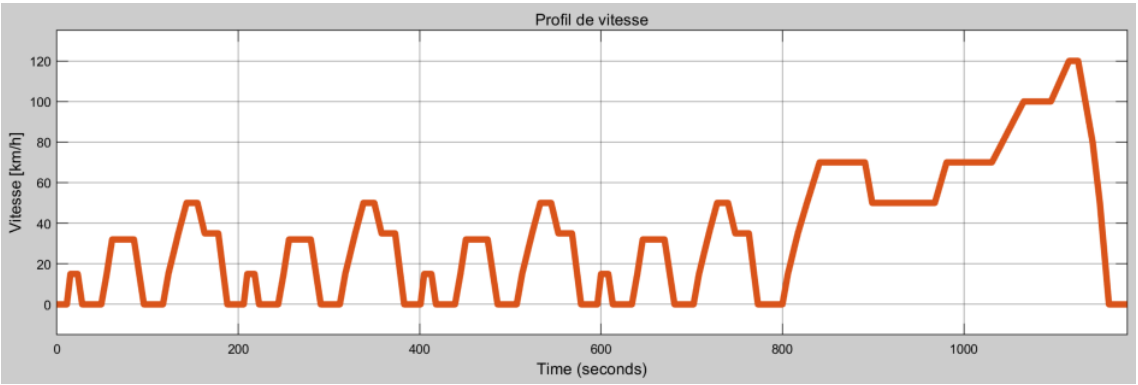

Figure 8 : Cycle de vitesse NEDC

[3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Nouveau_cycle_europ%C3%A9en_de_conduite

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9dure_d%27essai_mondiale_harmonis%C3%A9e_pour_les_voitures_particuli%C3%A8res_et_v%C3%A9hicules_utilitaires_l%C3%A9gers

[5] https://www.audi.ch/ch/web/fr/neuwagen/wltp.html#

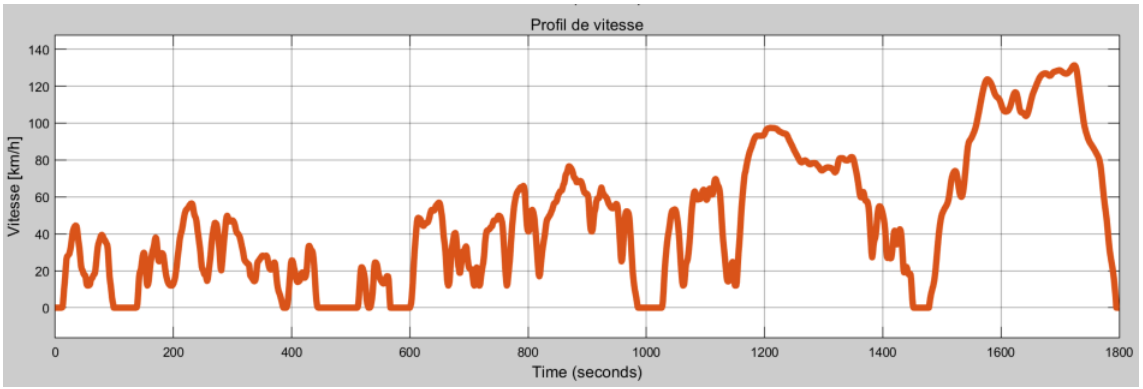

Figure 9 : Cycle de vitesse WLTP

5.2 Simulations

À l'aide des profils d'accélération et de vitesse, le modèle Simulink calcule en tout temps la force de traction nécessaire au véhicule pour avancer. À partir de cette force, il est possible de déterminer le couple, la puissance, l'énergie puis la consommation et l'autonomie d'un véhicule. Les cycles de conduites sont générés à l'aide d'un bloc créer par un utilisateur Matlab (Daniel Auger, 2018)[6]. Le modèle de simulation dans sa version complète se situe à l'annexe 1.

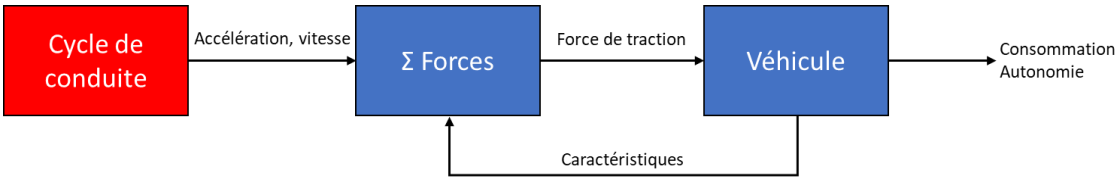

Figure 10 : Schéma bloc du système

5.2.1 Conditions de simulation

Afin de tester l'importance d'une déclivité sur un itinéraire et de comparer les cycles de conduite en vigueur, les caractéristiques de la route ainsi que celles du véhicule sont définies comme suit :

<u>Véhicule</u>

- Masse totale : m = 2250 [kg]
- Surface frontale : s = 1 [m²]
- Coefficient de trainée : cx = 0.5 [-]
- Coefficient de force de frottement : crr = 0.015 [-]
- Rayon de la roue : rr = 0.33 [m]
- Rapport de réduction : r = 9.73 [-]
- Rendement du réducteur : nr = 0.9 [-]
- Rendement du moteur : nm = 0.89 [-]
- Rendement du convertisseur : nc = 0.89 [-]
- Capacité de la batterie : cb = 98 [kWh]
- Densité de l'air : ρ = 1.225 [kg/m³]
- Accélération gravitationnelle : g = 9.81 [m/s²]
- Couple maximum : mlimit = 660 [Nm]

[6] *https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle-simulink-block*

Route

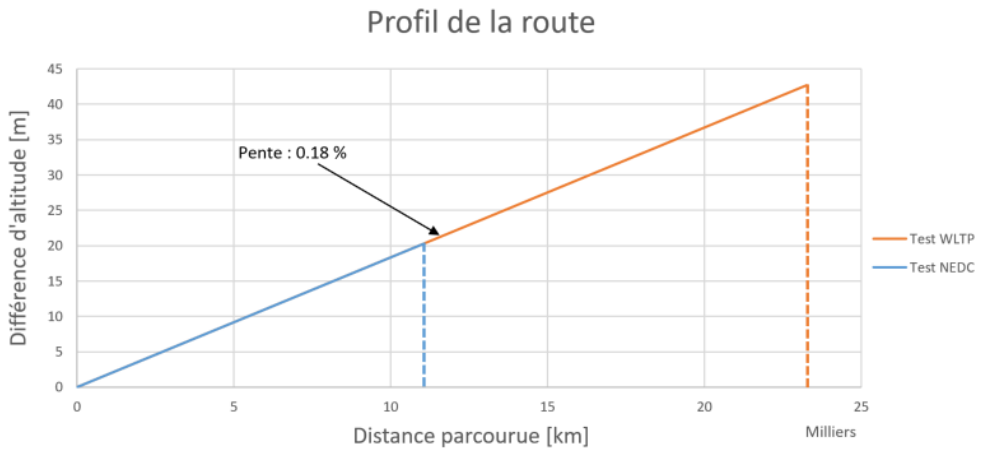

Figure 11 : Profil de la route avec déclivité

La différence d'altitude est choisie afin de représenter de manière approximative la pente de la route reliant Martigny à Sion.

5.2.2 **NEDC vs NEDC avec pente**

Dans cette simulation, un test NEDC classique est comparé au même test NEDC, mais sur une route possédant une pente.

Dans ce test, l'autonomie du véhicule et sa consommation sont comparées.

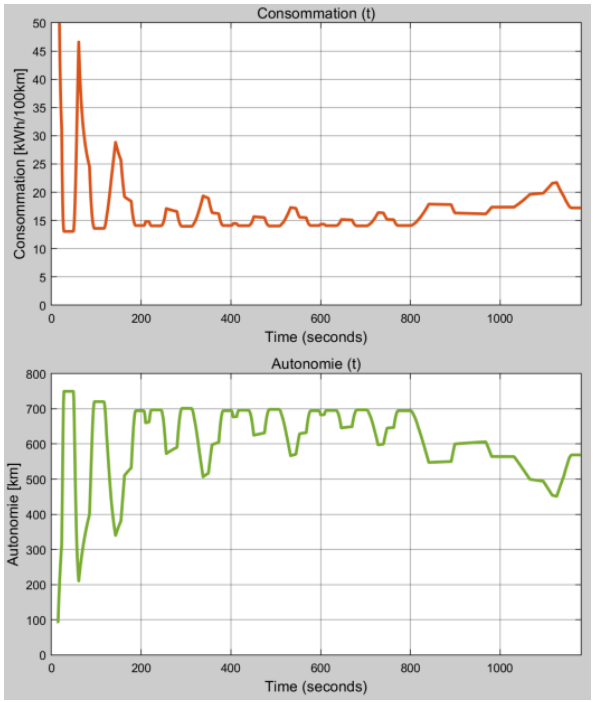

Figure 12 : Cycle NEDC sans pente

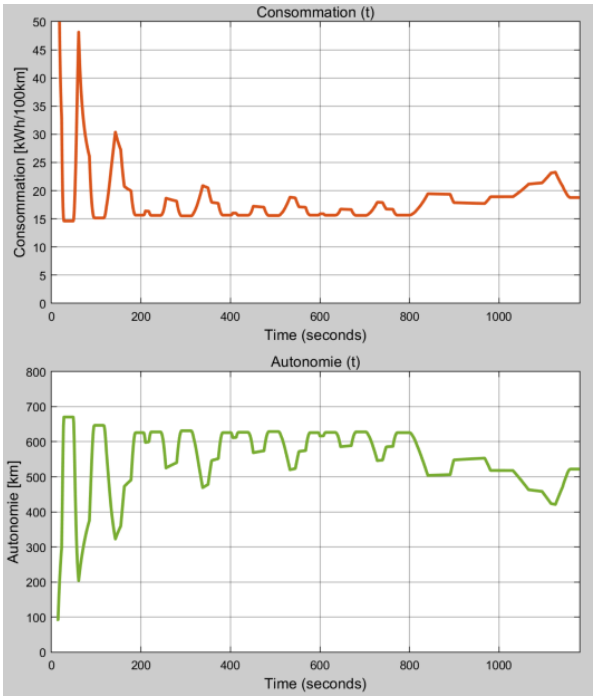

Figure 13 : Cycle NEDC avec pente

À la fin du cycle NEDC sans pente, il est constaté que le véhicule possède encore une autonomie de 569 kilomètres et il a une consommation de 17.2 kWh/100km. Le cycle NEDC avec pente a duré le même temps et a parcouru la même distance, la seule différence sur ce test c'est qu'une déclivité constante est ajoutée au parcours initial. Il est remarqué que le

véhicule termine le cycle avec une autonomie de 522 kilomètres, soit environ 47 kilomètres de différence avec le test initial. En plus de cela, le véhicule consomme 18.8 kWh/100km, soit environ 1.6 kWh/100km de plus.

Cette comparaison est effectuée dans le but de prouver que les caractéristiques vendues par les constructeurs automobiles ne sont pas adaptées aux routes suisses. L'autonomie du véhicule est diminuée de 8.3 % et sa consommation est augmentée de 9.3 % en ajoutant uniquement une faible pente.

5.2.3 **WLTP vs WLTP avec pente**

Dans cette simulation, un test WLTP classique et ce même test WLTP avec une pente constante sont comparés. Le profil de la route utilisé est celui de la Figure 11.

Dans ce test, l'autonomie du véhicule et sa consommation sont analysées.

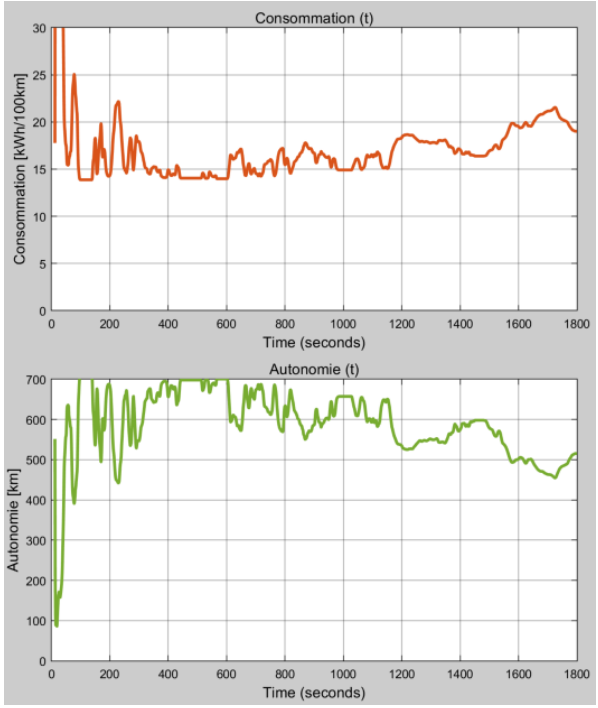

Figure 14 : Cycle WLTP sans pente

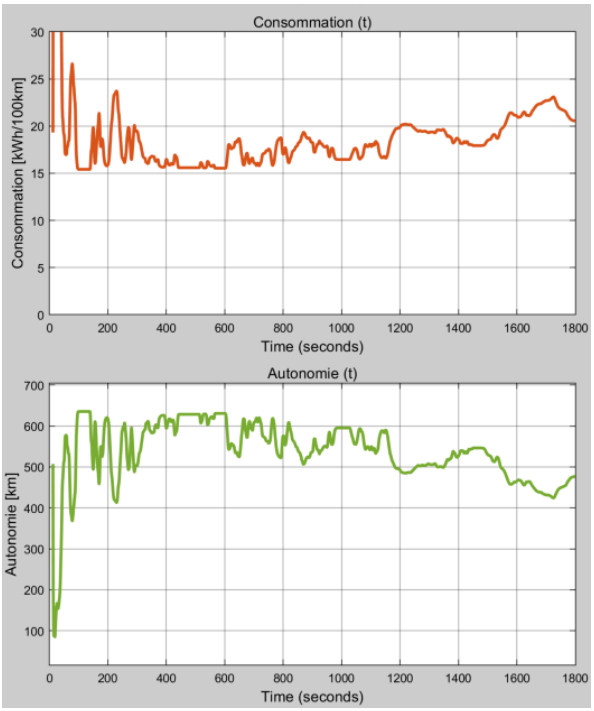

Figure 15 : Cycle WLTP avec pente

Lors du test sans pente, l'autonomie du véhicule est calculée à 515 kilomètres alors que pour le cycle avec pente, l'autonomie est de 476 kilomètres. Cela fait une diminution de l'autonomie de 7.5 %.

Quant à la consommation, elle s'élève à 19 kWh/100km sur une route plate tandis que la consommation du véhicule sur la route avec pente se chiffre à 20.5 kWh/100km. Cela constitue une augmentation de 7.9 %.

5.2.4 NEDC vs WLTP

Le résultat entre les deux cycles (sans pente) est significatif :

	AUTONOMIE	CONSOMMATION
CYCLE NEDC	569 km	17.2 kWh/100km
CYCLE WLTP	515 km	19 kWh/100km

Tableau 2 : Comparaison cycle NEDC et WLTP

Le cycle WLTP qui se veut plus proche de la réalité consomme 10 % de plus que le cycle NEDC. Au niveau de l'autonomie, c'est une perte de 9 % avec la nouvelle norme. Cette différence est principalement due au fait que le cycle NEDC possède plus de temps d'arrêt et pas assez de phases d'accélération. En plus de cela, le cycle WLTP prend en compte des équipements optionnels et possède une vitesse moyenne et maximum plus élevée que le cycle NEDC.

Il est difficile de connaître toutes les caractéristiques d'un véhicule, les constructeurs automobiles n'affichent que très rarement ces données en détail. Cependant, ces deux tests permettent de valider le modèle de véhicule implémenté, car les valeurs sont cohérentes. En cherchant un maximum de caractéristiques et en jouant de manière raisonnable sur le rendement de la chaine de traction, il est possible d'atteindre l'autonomie vendue par les constructeurs. Cette méthode est approximative, mais c'est la seule manière de pouvoir comparer les résultats calculés avec la réalité.

6. Importation de trajets routiers

Dans le but d'adapter l'algorithme à la topographie suisse, il est important de pouvoir accéder aux données géographiques de nos routes. Pour ce faire, une comparaison est effectuée entre le service Maps de Google et le service MapGeoAdmin de la Confédération suisse afin de déterminer la fiabilité des services et la facilité d'accès aux données.

6.1 Comparaison des services

6.1.1 Précision

MapGeo étant un service de la Confédération suisse, il est considéré comme fiable, précis et fera office de référence dans la comparaison.

Coordonnée GPS	Altitude sur MapGeo	Altitude sur Google Maps	Erreur relative
46.24032, 7.35874	560.7 m	561.7 m	0.17 %
46.10207, 7.06018	780.3 m	784.3 m	0.51 %
46.09766, 7.22115	1467.2 m	1469.4 m	0.15 %
46.38641, 6.85343	373.8 m	374.0 m	0.05 %
46.94811, 7.43994	541.7 m	542.4 m	0.13 %
47.36603, 8.54078	407.8m	407.7 m	0.02 %

Tableau 3 : Comparaison des services de données géographiques

L'erreur entre les deux services étant toujours plus petite que 1 %, les données de Google sont considérées comme correctes et recevables.

6.1.2 Facilité d'accès aux données

Les deux services possèdent des interfaces de programmation (API) ainsi qu'une documentation pour savoir comment les utiliser. Cependant, MapGeo ne possède pas d'API pour créer des itinéraires en voiture.

6.1.3 Choix

La solution choisie est d'utiliser l'interface de programmation de Google. Une grande quantité d'exemples, une précision correcte et surtout une possibilité d'obtenir des itinéraires routiers ainsi que leur limitation de vitesse ont été les arguments de ce choix.

6.2 Google Maps API

6.2.1 Définition d'un API[7]

Les API se définissent comme un ensemble de fonctions informatiques par lesquelles deux logiciels vont interagir sans intermédiation humaine. L'API est donc une abstraction définie par la description d'une interface et le comportement de l'interface.

[7] *https://medium.com/@mercier_remi/c-est-quoi-une-api-f37ae350cb9*

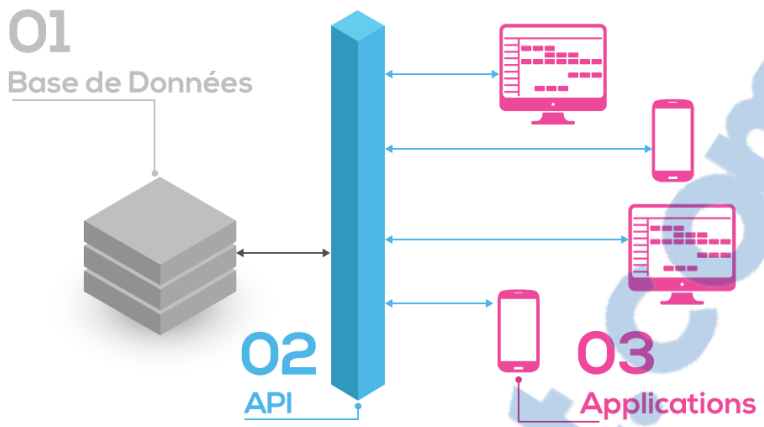

Figure 16 : Définition API

Les API sont donc utilisées par des programmes informatiques permettant leurs interactions sous des conditions déterminées et documentées.

6.2.2 Google Maps Directions API

L'API Directions permet à partir d'un lieu de départ et d'un lieu d'arrivée ou de deux coordonnées GPS de déterminer l'itinéraire à prendre avec une voiture. L'API s'adapte aux mises à jour, c'est-à-dire, si une route est déviée par des travaux le parcours est modifié en conséquence.

6.2.3 Google Maps Elevation API

L'API Elevation permet de connaitre l'altitude de n'importe quel endroit sur la Terre à partir d'une coordonnée GPS, même dans l'océan (valeur négative).

6.2.4 Clé API

Une clé d'interface de programmation d'application est un code utilisé par les programmes informatiques pour identifier le programme ainsi que son développeur ou son utilisateur. Elles contrôlent l'utilisation de l'API et permettent d'éviter des utilisations excessives.[8]

6.3 Protocole d'importation des profils géographiques

6.3.1 Fonction getItinerary

Cette fonction permet de déterminer un itinéraire entre deux lieux. Elle prend comme argument un lieu de départ, un lieu d'arrivée, ainsi que la clé API fournie par Google. La fonction s'instancie de la manière suivante et retourne un tableau de latitudes et de longitudes qui définissent un tracé complet.

```
[latitude, longitude] = getItinerary(depart, arrivee, keyAPI);
```

Afin de récupérer des données, la première étape est de construire une requête URL valide avec toutes les informations nécessaires. Ci-dessous un exemple de requête :

```
https://maps.googleapis.com/maps/api/directions/xml?origin=depart&destination=arrivee&key=keyAPI
```

[8] https://fr.support.telematics.tomtom.com/app/answers/detail/a_id/1880/~/quest-ce-quune-cl%C3%A9-api-%3F

Rapport-Gratuit.com

Une fois la requête envoyée, il faut lire la réponse et traiter les résultats. Le format de réponse choisi est le XML (Extensible Markup Language), car il est assez simple de séparer les résultats avec ces balises du style HTML. Une réponse de l'API au format XML se situe à l'annexe 2.

Dans la réponse reçue, la balise intéressante s'appelle <overview_polyline>. Elle contient toutes les coordonnées GPS cryptées du parcours.

Fonction decodeGooglePolyline

Google crypte ses coordonnées à l'aide d'un algorithme afin que toutes les informations soient stockées dans un texte au format ASCII. Les étapes afin de décoder ce genre de polyligne se trouvent à l'adresse suivante :

https://developers.google.com/maps/documentation/utilities/polylinealgorithm

Une fonction permettant de décoder ces polylignes a déjà été créée par un utilisateur Matlab (Chris Hinkle, July 2011)[9] et est utilisée telle quelle. Cet algorithme permet d'obtenir des latitudes et des longitudes au format décimal avec une précision de 5 chiffres après la virgule. Cette précision correspond à une erreur de plus ou moins 1 mètre en réalité.

Les points ne se situent pas à intervalle régulier, ils sont placés de manière à représenter le mieux possible la forme de la route. Le nombre de points varie en fonction de la longueur du trajet et de la complexité de sa forme.

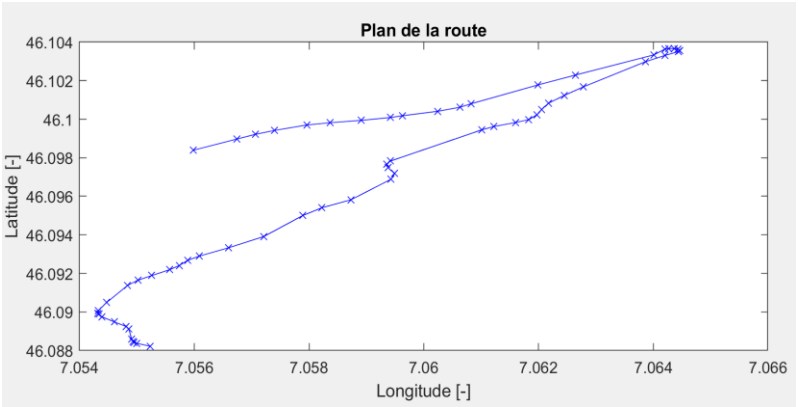

Figure 17 : Exemple d'un plan de route importé

6.3.2 **Fonction getElevations**

La fonction getElevations permet de déterminer l'altitude d'un point GPS. Elle prend en argument une latitude, une longitude ainsi que la clé API fournie par Google. Elle s'instancie de la façon suivante et retourne l'altitude de la coordonnée GPS.

```
[altitude] = getElevations(latitude, longitude, keyAPI);
```

Cette fonction a déjà été créée par un utilisateur Matlab (Jarek Tuszynski, Berkeley Software Distribution)[10]. Cependant, elle a dû être modifiée et adaptée aux besoins de l'algorithme d'importation d'un itinéraire.

[9] *https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32341-google-maps-api-polyline-decoder*
[10] *https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50704-getelevations-latitude-longitude-varargin*

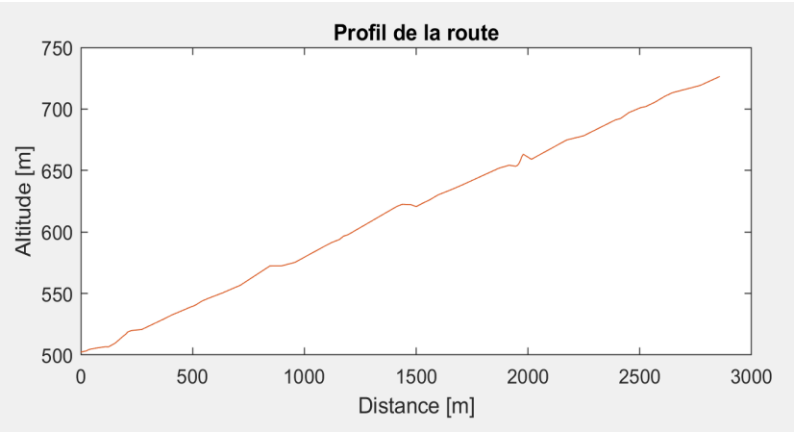

Figure 18 : Exemple d'un profil de route importé

6.3.3 Fonction principale

Dans cette partie, l'algorithme définit et ajuste aux besoins les données récupérées grâce aux deux fonctions précédentes.

Afin de calculer la distance entre deux coordonnées GPS, la formule suivante est utilisée, où 6'371'008 mètres est le rayon moyen volumétrique[11] de la terre.

```
distance = 6371008*acos(cos(lat1)*cos(lat2)*cos(lon2-lon1)+sin(lat1)*sin(lat2));
```

Dans cette formule, la terre est considérée comme une sphère parfaite et lisse, ce qui bien sûr n'est pas le cas. En revanche, la formule est tout de même utilisable, car les coordonnées GPS de nos itinéraires se situent à proximité et l'erreur induite par cette hypothèse reste faible.

Lat 1	Lon 1	Lat 2	Lon 2	Distance calculée	Distance MapGeo	Distance GoogleMap
46.11646	7.10275	46.13974	7.13967	3846.6 [m]	3850 [m]	3840 [m]
46.28003	6.96834	46.35105	6.92514	8565.7 [m]	8630 [m]	8550 [m]
46.18403	7.23384	46.18890	7.24301	889.7 [m]	888.01 [m]	887.99 [m]

Tableau 4 : Comparaison des distances calculées par rapport aux services de données géographiques

En comparant les distances entre deux coordonnées GPS, il est constaté que plus la distance est grande, plus l'erreur augmente. Mais, en déterminant l'erreur relative entre la distance calculée et la distance donnée par les services de données géographiques, il est remarqué que l'erreur est toujours inférieure à 1 %.

À partir de la différence d'altitude et de la distance entre deux coordonnées, l'algorithme définit l'inclinaison de la route. Cette pente est très importante, car elle représente une partie importante de la consommation.

En analysant les données calculées et les données reçues, le code détermine des informations telles que la distance totale d'un itinéraire, le dénivelé total, le dénivelé positif, le dénivelé négatif ainsi qu'au niveau de l'altitude, le point culminant et le point le plus bas situé sur le parcours.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

[11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre

Détecteur de tunnel

Après plusieurs simulations, les limites de l'API Elevation de Google ont été détectées. Lorsqu'un itinéraire passe par un tunnel, les valeurs récupérées sont aberrantes. Comme ci-dessous, pour le trajet Martigny-Ville à Bovernier.

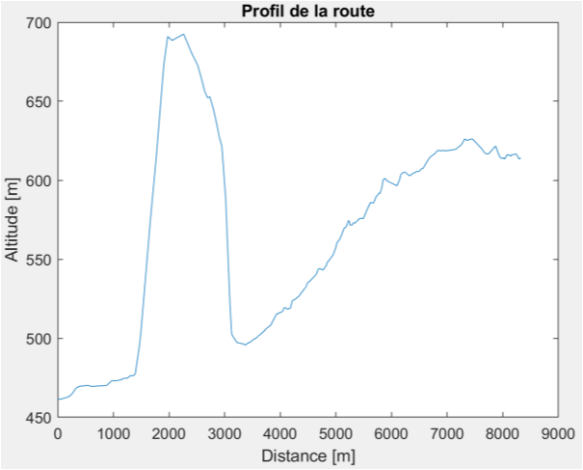

Figure 19 : Profil de route entre Martigny et Bovernier

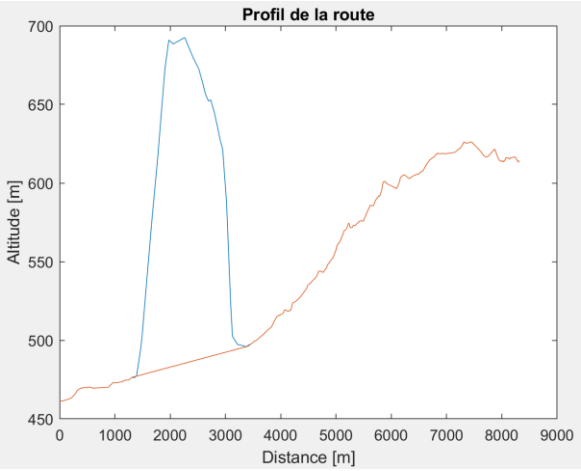

Figure 20 : Profil de route corrigé

Ce profil indique que la route monte de 210 mètres pour une distance d'environ 560 mètres, ce qui fait une pente de 37.5 %. Ces valeurs sont impossibles étant donné que les routes helvétiques n'excèdent que très rarement les 15 %. Ceci est simplement dû au fait que les points d'altitudes récupérés passent au-dessus du tunnel du Mont-Chemin.

La base de données Google fournit des données d'altitude à la surface du sol. Lorsqu'on passe dans un tunnel, il récupère les altitudes au-dessus tandis que lorsqu'on roule sur un viaduc, il donne l'altitude en dessous de la construction.

Afin de corriger ce problème, l'algorithme doit détecter l'entrée et la sortie du tunnel. Pour se faire, deux conditions, la première est que la pente entre deux points dépasse les 15 % et la deuxième, c'est que la différence d'altitude entre deux points doit être de plus de 25 mètres.

Une fois ces points détectés, il trace une droite entre l'entrée et la sortie du tunnel. Pour que cette opération soit optimale, il est nécessaire que la résolution du parcours soit élevée.

7. Création du profil de vitesse

Une fois le profil et le plan de la route récupérés, il reste un dernier paramètre à connaitre, la limitation de vitesse. Google possède un API qui permet de connaitre la limitation de vitesse selon une coordonnée GPS. Cependant, ce dernier est payant. Des tronçons routiers avec une seule limitation de vitesse sont utilisés afin d'éviter une utilisation payante et de compliquer pour celui qui pourrait reprendre le projet.

Malgré une certaine limitation de vitesse, parfois, la géométrie de la route ne permet pas toujours aux véhicules de respecter cette consigne. Le tronçon ci-dessous est limité à 80 km/h, il se situe sur la route de la Forclaz au lieu-dit « Sur le Scex » (Lat. 46.10360, Lon. 7.06444) :

Figure 21 : Épingle sur la route de la Forclaz[12]

Cette épingle est considérée comme un demi-cercle parfait de 5.5 mètres de rayon. L'accélération centrifuge due à la vitesse et au rayon du contour peut être calculée selon l'équation suivante :

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \frac{22.22^2}{11} = 44.89\ \frac{m}{s^2}$$

Une vitesse de 80 km/h (22 m/s) dans ce contour provoquerait une sortie de route. La force centrifuge « dépasserait » la force de pesanteur et la voiture se ferait éjecter du virage. Afin de fixer une valeur d'accélération centrifuge maximum pour que la conduite reste agréable, je suis allez sur place avec mon véhicule et j'ai passé le virage en conduisant de manière confortable et sûre. Ma vitesse dans la courbe se situait à 35 km/h.

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \frac{9.72^2}{11} = 8.59\ \frac{m}{s^2}$$

Cette valeur d'accélération fait office de référence et sera utilisée pour déterminer la vitesse maximum dans les contours de toutes les routes importées.

7.1 Méthode pour déterminer la vitesse maximum dans un contour

Afin de déterminer l'accélération centrifuge dans un virage depuis un vecteur position, il faut appliquer certains principes de physique et de mathématique. En faisant une dérivée discrète du vecteur position, le résultat correspond au vecteur vitesse. Puis, en faisant la deuxième dérivée discrète de ce même vecteur position, le vecteur accélération est obtenu. Il ne reste plus qu'à déterminer la composante « centrifuge » de l'accélération et vérifier qu'elle ne dépasse pas la valeur de référence définie ci-dessus.

[12] *https://map.geo.admin.ch*

7.1.1 **Position**

Le vecteur position est défini par des coordonnées x, y, z qui représentent la latitude la longitude et l'altitude d'un point géographique.

$$\vec{r} = (x, y, z)$$

7.1.2 **Vitesse**

Le vecteur vitesse est obtenu en dérivant le vecteur position par rapport au temps. Cependant, les coordonnées sont dérivées par rapport à la longueur du parcours entre deux coordonnées puis multipliées à la limitation de vitesse sur le tronçon routier.

$$\frac{dl}{dt} : Limitation\ de\ vitesse\ du\ tronçon\ routier$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{dx}{dl}, \frac{dy}{dl}, \frac{dz}{dl}\right)\frac{dl}{dt}$$

La dérivée des coordonnées de position par rapport au chemin parcouru s'effectue de la manière suivante :

$$\frac{dx}{dl} = \frac{x_{k+1} - x_k}{l_{k+1} - l_k} \qquad \frac{dy}{dl} = \frac{y_{k+1} - y_k}{l_{k+1} - l_k} \qquad \frac{dz}{dl} = \frac{z_{k+1} - z_k}{z_{k+1} - z_k}$$

N'ayant pas de fonction continue, pour obtenir le vecteur vitesse, il faut effectuer une dérivée discrète de la position par rapport à la distance parcourue entre ces deux positions. L'indice k représente la position dans le tableau des coordonnées.

Le module du vecteur vitesse est défini de la façon suivante :

$$|\vec{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dl}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dl}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dl}\right)^2} \cdot \frac{dl}{dt}$$

7.1.3 **Accélération**

Le vecteur accélération s'obtient soit en dérivant le vecteur vitesse par rapport au temps soit en faisant la deuxième dérivée du vecteur position par rapport au temps.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \left(\frac{d^2x}{dl^2}, \frac{d^2y}{dl^2}, \frac{d^2z}{dl^2}\right)\left(\frac{dl}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx}{dl}, \frac{dy}{dl}, \frac{dz}{dl}\right)\frac{d^2l}{dt^2}$$

Dans le but de déterminer l'accélération centripète qui est perpendiculaire au vecteur vitesse, le deuxième terme de l'accélération est négligé, car celui-ci est parallèle au vecteur vitesse et ne comporte donc aucune information.

La deuxième dérivée discrète d'une position se fait à l'aide de 3 coordonnées et de 3 longueurs.

$$\frac{d^2x}{dl^2} = \frac{x_{k+2} + x_k - 2 \cdot x_{k+1}}{(l_{k+2} - l_{k+1})(l_{k+1} - l_k)} \qquad \frac{d^2y}{dl^2} = \frac{y_{k+2} + y_k - 2 \cdot y_{k+1}}{(l_{k+2} - l_{k+1})(l_{k+1} - l_k)} \qquad \frac{d^2z}{dl^2} = \frac{z_{k+2} + z_k - 2 \cdot z_{k+1}}{(l_{k+2} - l_{k+1})(l_{k+1} - l_k)}$$

Le module du vecteur accélération (sans le terme négligé) est défini de la façon suivante :

$$|\vec{a}| = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dl^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dl^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dl^2}\right)^2} \cdot \left(\frac{dl}{dt}\right)^2$$

Le vecteur d'accélération peut être représenté par l'addition d'un vecteur accélération tangentiel $\vec{a}_t$ (parallèle au vecteur vitesse), d'un vecteur d'accélération normal $\vec{a}_n$ et d'un vecteur d'accélération dû à la pesanteur et aux variations d'altitude du parcours. C'est le vecteur d'accélération normal $\vec{a}_n$ qui est intéressant, car il va permettre de définir le confort et la sécurité de la conduite dans les virages.

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n + \vec{a}_g$$

7.1.4 **Produit scalaire**

En modifiant l'équation du produit scalaire, l'angle entre le vecteur vitesse et le vecteur accélération est obtenu.

$$\vec{a} \cdot \vec{v} = |\vec{a}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos\varphi$$

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{v}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{v}|}\right)$$

La norme du vecteur d'accélération normal est déterminée simplement grâce à de la trigonométrie (Figure 22).

$$|\vec{a}_n| = |\vec{a}| \cdot \sin\varphi$$

Sur l'image ci-dessous, le vecteur vitesse et le vecteur d'accélération tangentiel sont tangents au chemin parcouru représenté en un seul point par le vecteur position $\vec{r}$. Le vecteur accélération normale est toujours dirigé vers la partie concave de la trajectoire, c'est-à-dire à l'intérieur du contour.

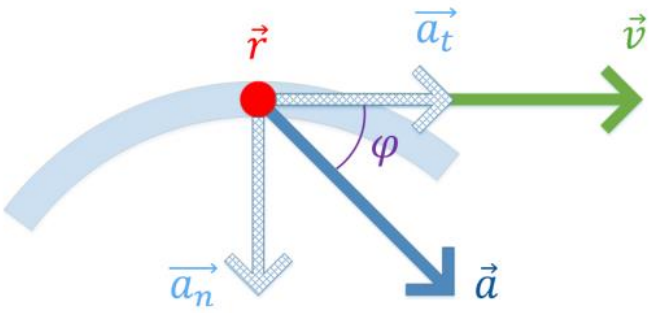

Figure 22 : Représentation graphique des vecteurs

Dans le cas où l'accélération normale (composante centrifuge) serait supérieure à limite de référence, l'algorithme diminue la limitation de vitesse à cette coordonnée jusqu'à ce que celle-ci ne provoque pas une accélération centrifuge trop élevée.

7.2 Simulations

Afin de déterminer si l'algorithme effectue correctement les opérations mathématiques et si les consignes de vitesses sont adaptées à la topologie de la route, plusieurs simulations sont effectuées. Dans le but de tester différentes caractéristiques de route, l'itinéraire 1 est une route extra-urbaine et l'itinéraire 2 est une route urbaine. Pour ne pas surcharger le rapport, d'autres simulations se trouvent à l'annexe 3.

7.2.1 Itinéraire 1

- Départ : Martigny-Croix (Lat. 46.088227, Lon. 7.055239)
- Arrivée : Sommet-des-Vignes (Lat. 46.098406, Lon. 7.055982)
- Limitation de vitesse : 80 km/h

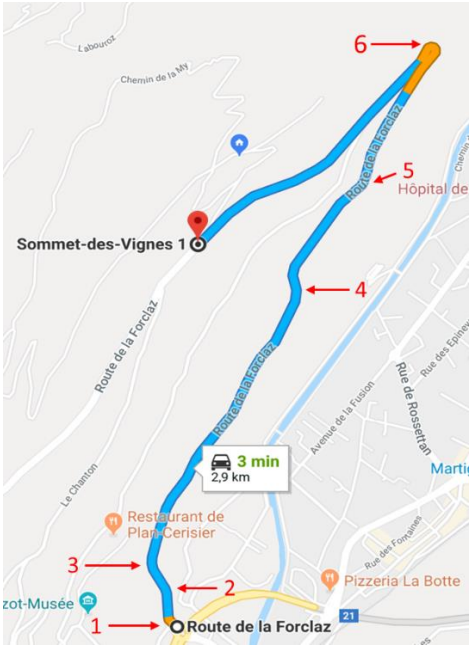

Figure 23 : Itinéraire Martigny Croix - Sommet des Vignes

Toutes les images représentant des itinéraires proviennent de Google Maps.

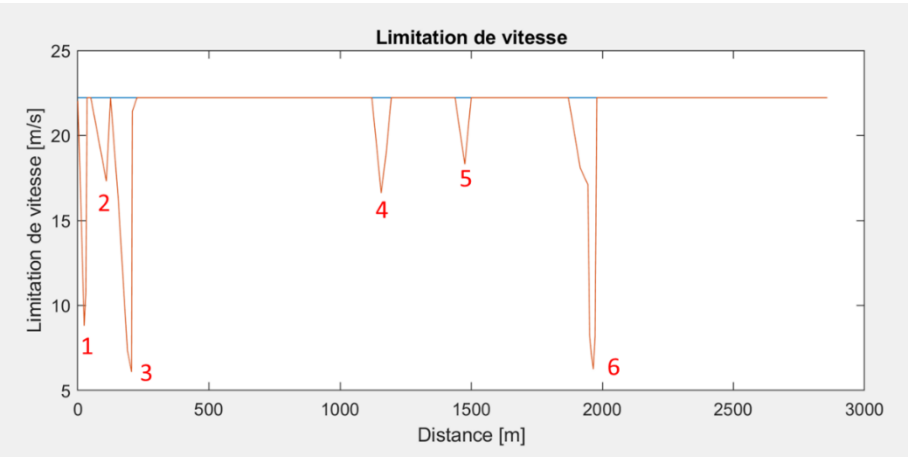

Figure 24 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire 1

Cet itinéraire est choisi, car c'est la route que j'emprunte pour rentrer à mon domicile. Cela me permet de déceler rapidement une quelconque erreur. Cependant, l'algorithme fonctionne et les virages sont correctement repérés.

7.2.2 **Itinéraire 2**

- Départ : Mont d'Orge (Lat. 46.235061, Lon. 7.341785)
- Arrivée : Ormône (Lat. 46.241477, Lon. 7.344949)
- Limitation de vitesse : 50 km/h

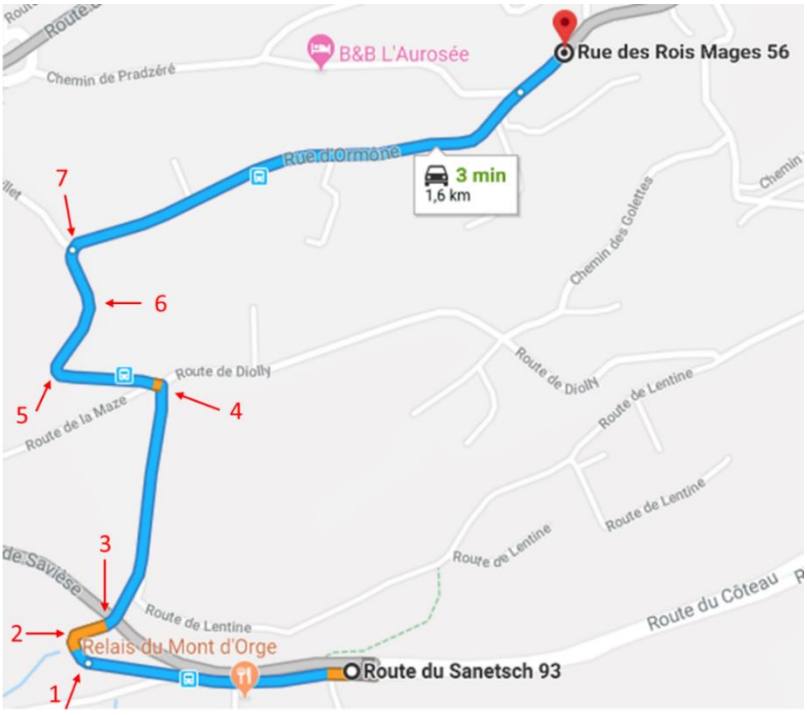

Figure 25 : Itinéraire Mont d'Orge – Ormône

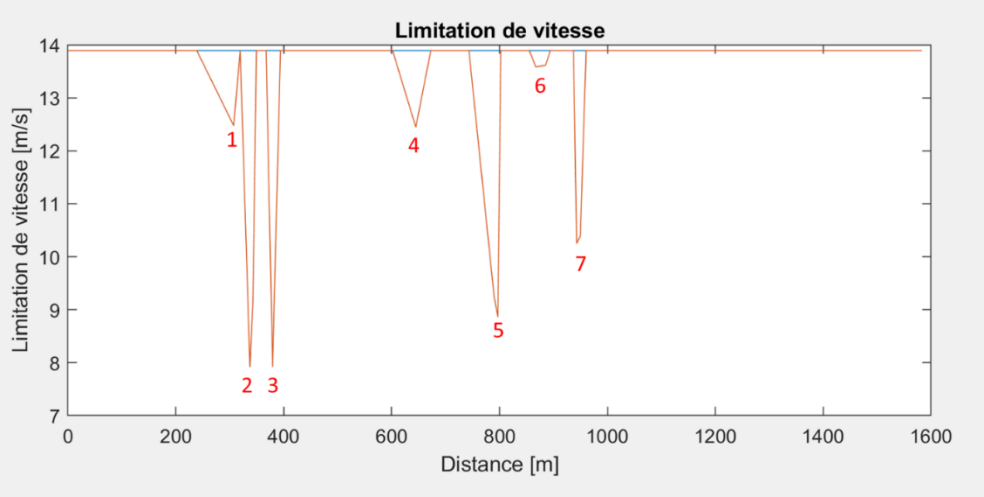

Figure 26 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire 2

Sur ce parcours également, l'algorithme détecte correctement les virages de l'itinéraire.

7.1 **Anticipation pour le changement de vitesse**

Les consignes de vitesse obtenues déterminent en tout point la vitesse maximum que le véhicule peut avoir. Cependant, le profil de vitesse obtenu peut être relativement haché et ne correspondrait pas au profil de vitesse d'un véhicule dans la réalité.

Pour éviter des accélérations et des freinages incessants, mais également pour que le véhicule ralentisse avant d'arriver dans un virage, l'algorithme anticipe à une certaine distance tel un conducteur qui regarde la route. Afin de déterminer à quelle distance l'algorithme doit anticiper, des tests sont effectués sur deux itinéraires sinueux dans le but de comparer le temps du parcours, la consommation et le nombre d'accélérations ou freinages avec une intensité de ±2 m/s².

Afin de déterminer le temps nécessaire et la consommation pour chaque itinéraire, le conducteur virtuel du Chapitre 8 et les caractéristiques du véhicule du Chapitre 5.2.1 sont utilisés.

7.1.1 **Simulation 1**

Le premier itinéraire choisi est la route cantonale reliant Le Châble (899m) à Verbier (1362m). La distance à parcourir est de 5.7 kilomètres. La vitesse sur ce tronçon routier est limitée à 80 km/h. Selon le service Google Maps, le temps du trajet est estimé à 7 minutes et 54 secondes.

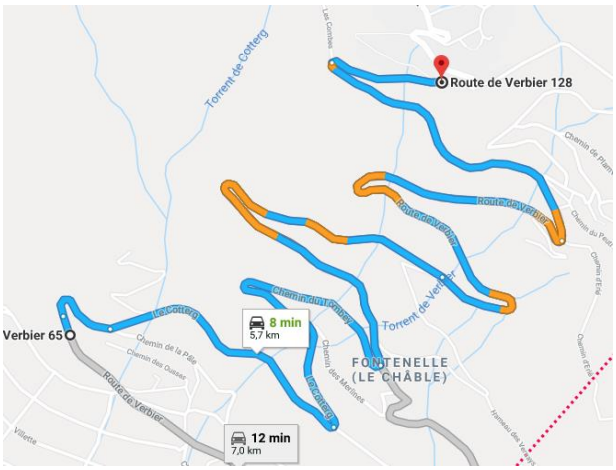

Figure 27 : Itinéraire le Châble - Verbier

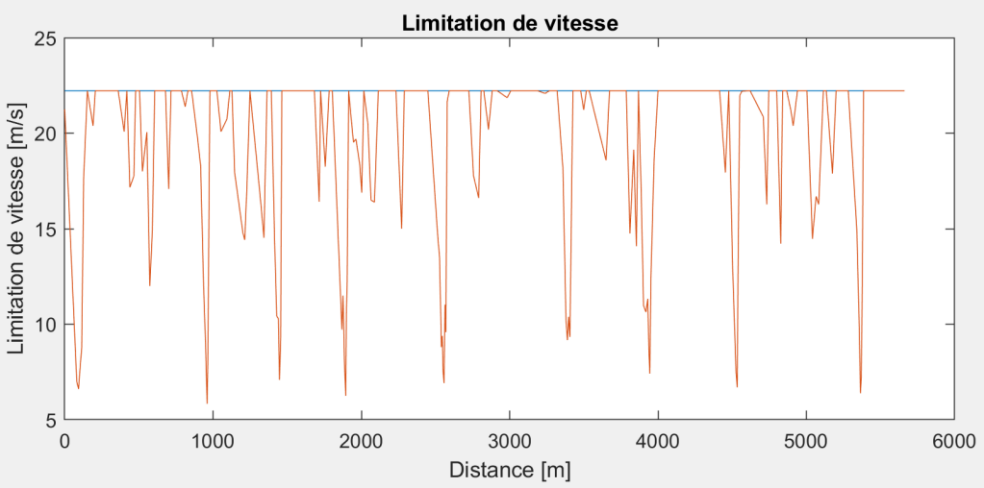

Figure 28 : Profil de vitesse généré après analyse

On constate que l'itinéraire comporte une multitude de changements de vitesse.

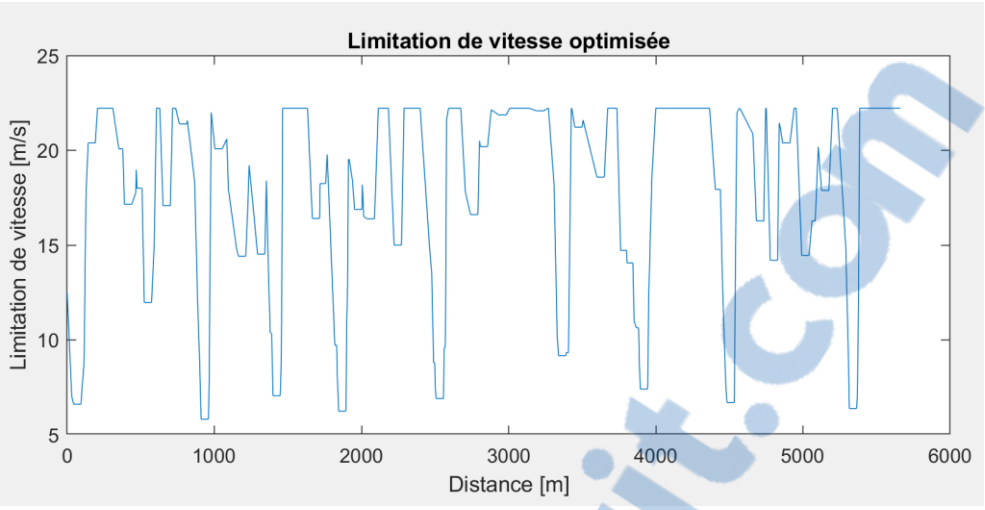

Figure 29 : Profil de vitesse avec anticipation de 50m

Avec une anticipation de 50 mètres, ce trajet est effectué en 5 minutes et 57 secondes et le véhicule aurait une consommation de 103 kWh/100km. La consigne de vitesse est considérée « sportive », elle est composée de 23 accélérations et 20 freinages.

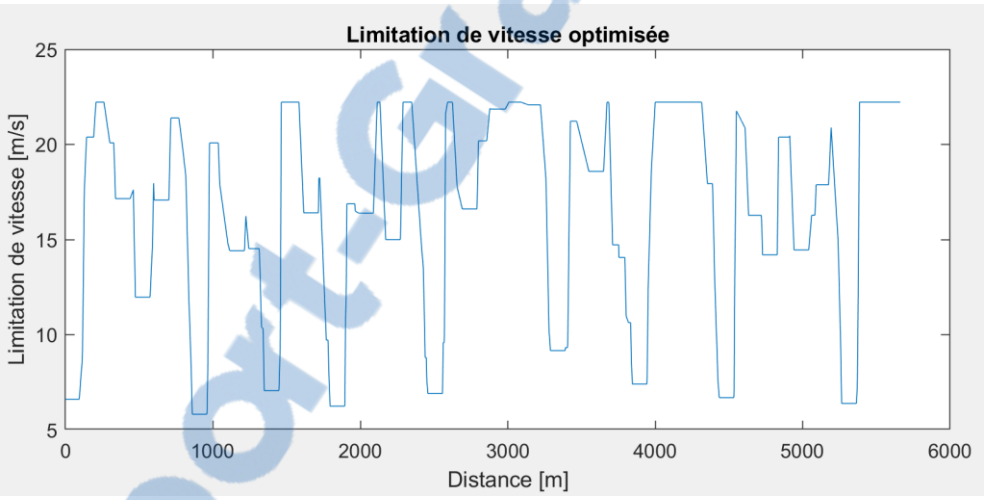

Figure 30 : Profil de vitesse avec anticipation de 100m

Avec une anticipation de 100 mètres, le temps pour parcourir cet itinéraire est de 6 minutes et 48 secondes et la consommation du véhicule est de 100 kWh/100km. Cette fois-ci, le nombre d'accélérations est de 18 et le nombre de freinages est de 19.

Rapport-Gratuit.com

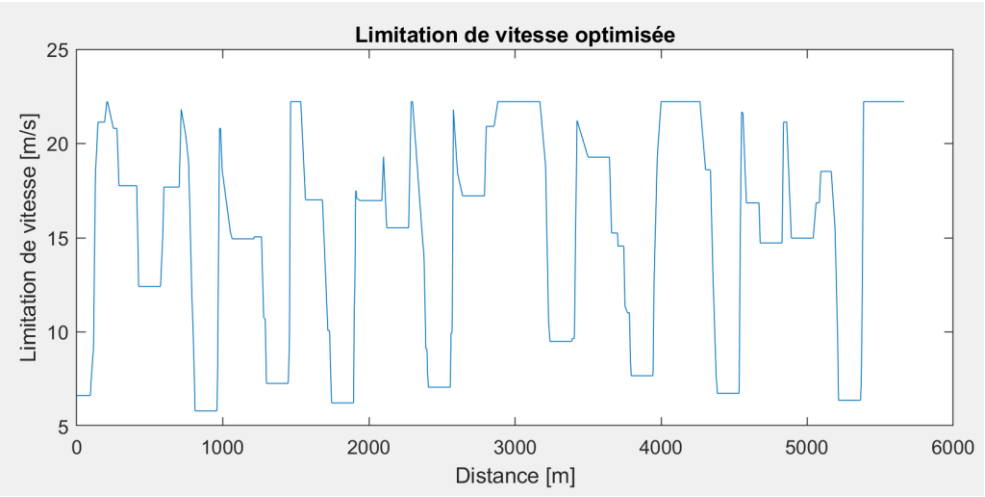

Figure 31 : Profil de vitesse avec anticipation de 150m

Avec une anticipation de 150 mètres, le temps pour parcourir ce trajet est de 7 minutes et 32 secondes et la consommation du véhicule serait de 96 kWh/100km. Ce parcours est caractérisé par 16 accélérations et 17 freinages.

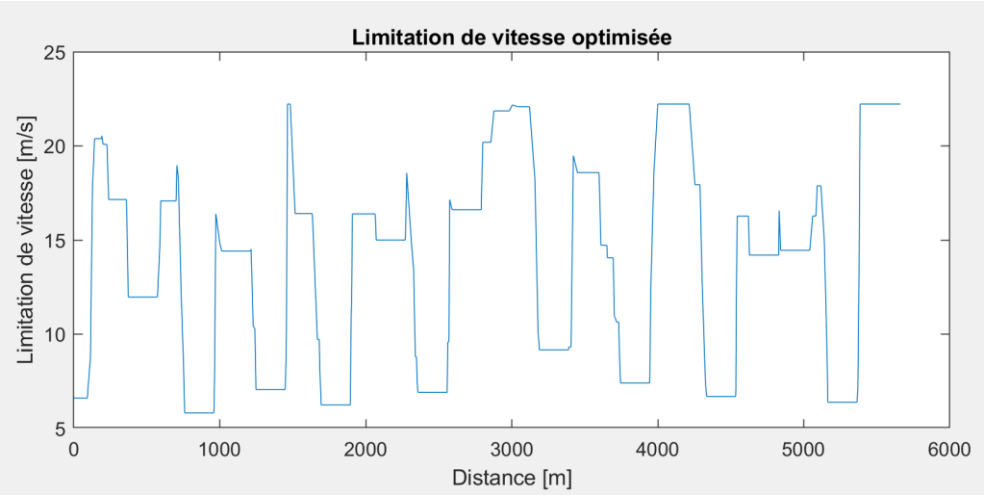

Figure 32 : Profil de vitesse avec anticipation de 200m

Avec une anticipation de 200 mètres, la consigne est vraiment lente, le temps de parcours est de 8 minutes et 15 secondes et la consommation est de 96 kWh/100km. On remarque que la limitation de vitesse initiale (80 km/h) n'est quasiment jamais atteinte. Avec un total de 15 accélérations et de 13 freinages, ce type de conduite permet de diminuer la consommation, mais n'est pas suffisamment significative de la majorité des conducteurs.

7.1.2 **Simulation 2**

Le deuxième itinéraire est la route cantonale reliant Sion (573m) à Champlan (711m) et la distance à parcourir est de 1800 mètres. La vitesse sur ce tronçon routier est limitée à 50 km/h. Selon le service Google Maps, la durée du trajet est estimée à 3 minutes et 8 secondes

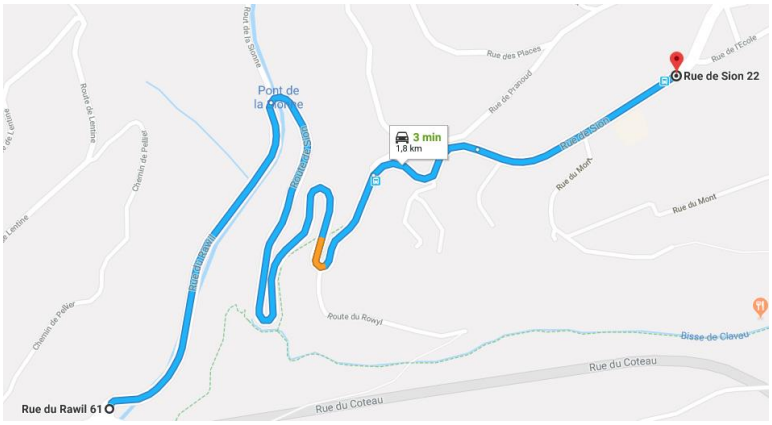

Figure 33 : Itinéraire Sion – Champlan

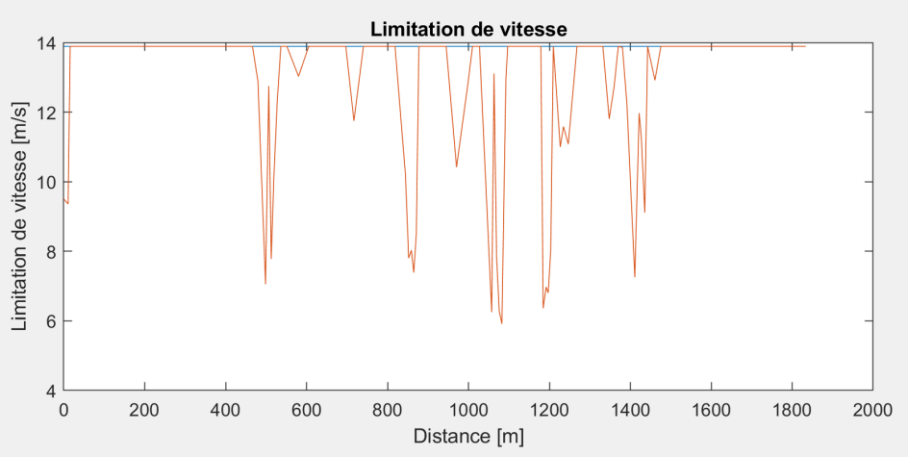

Figure 34 : Profil de vitesse généré après analyse

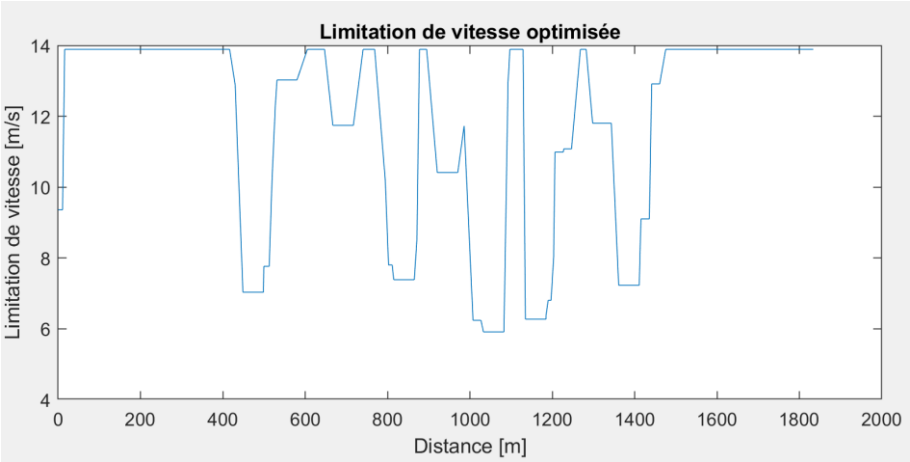

Figure 35 : Profil de vitesse avec anticipation de 50m

Avec une anticipation de 50 mètres, le temps de parcours est de 2 minutes et 49 secondes et la consommation du véhicule est de 80 kWh/100km. Le véhicule accélère à 7 reprises et freine également 7 fois.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

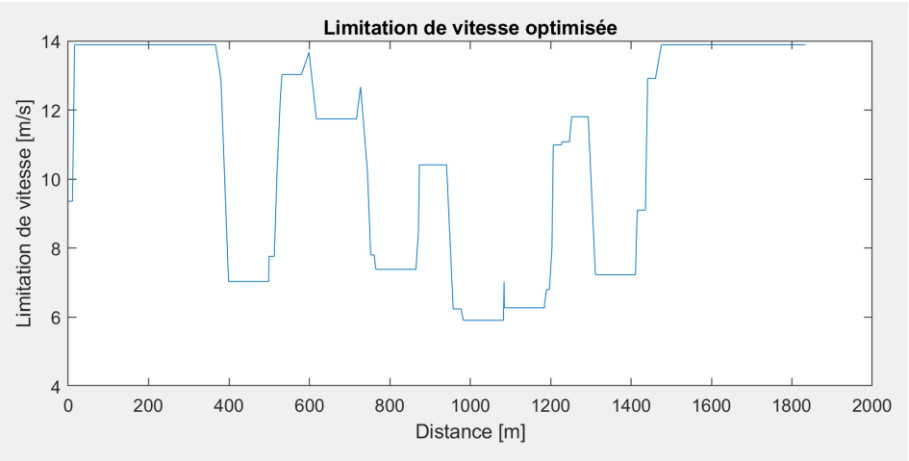

Figure 36 : Profil de vitesse avec anticipation de 100m

Avec une anticipation à 100 mètres, le temps de parcours est de 3 minutes et 9 secondes et la consommation du véhicule est de 79 kWh/100km. Afin de parcourir cet itinéraire, 6 accélérations et 6 freinages sont nécessaires.

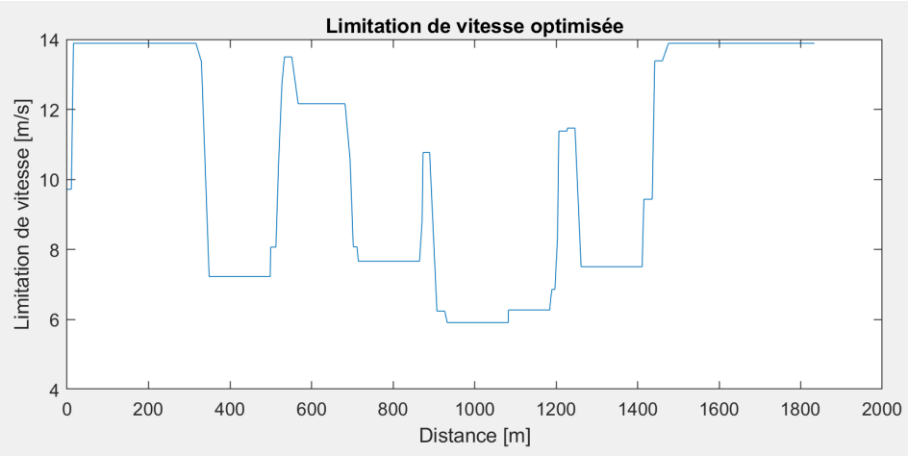

Figure 37 : Profil de vitesse avec anticipation de 150m

Avec une anticipation de 150 mètres, le temps de parcours est de 3 minutes et 21 secondes et la consommation du véhicule est de 79 kWh/100km. Le véhicule accélère à 5 reprises et freine uniquement 4 fois.

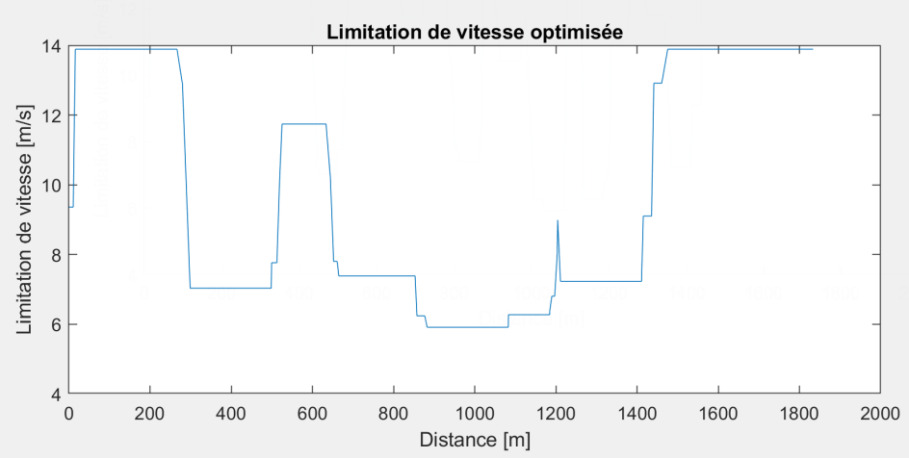

Figure 38 : Profil de vitesse avec anticipation de 200m

Avec une anticipation de 200 mètres, le temps de parcours est de 3 minutes et 33 secondes et le véhicule consomme 78 kWh/100km. Le conducteur accélère uniquement 3 fois et freine également à 3 reprises.

7.1.3 Conclusion

L'importance de l'anticipation peut être observée sur la comparaison ci-dessous. L'anticipation à 50 mètres est considérée comme une conduite sportive. La vitesse est maximum quasiment tout le parcours et cette anticipation tardive provoque beaucoup de freinages et d'accélérations. L'anticipation à 100 mètres s'apparente à une conduite dynamique et reflète bien la majorité des conducteurs. L'anticipation à 150 mètres est aussi une conduite dynamique, le nombre d'accélérations et de freinages est raisonnable. Pour finir, l'anticipation à 200 mètres est vraiment trop tardive, elle n'atteint que rarement la vitesse de consigne et le nombre accélérations ou décélérations ne sont pas vraiment le reflet de la majorité des conducteurs. Cependant, elle représenterait la conduite d'une personne prudente.

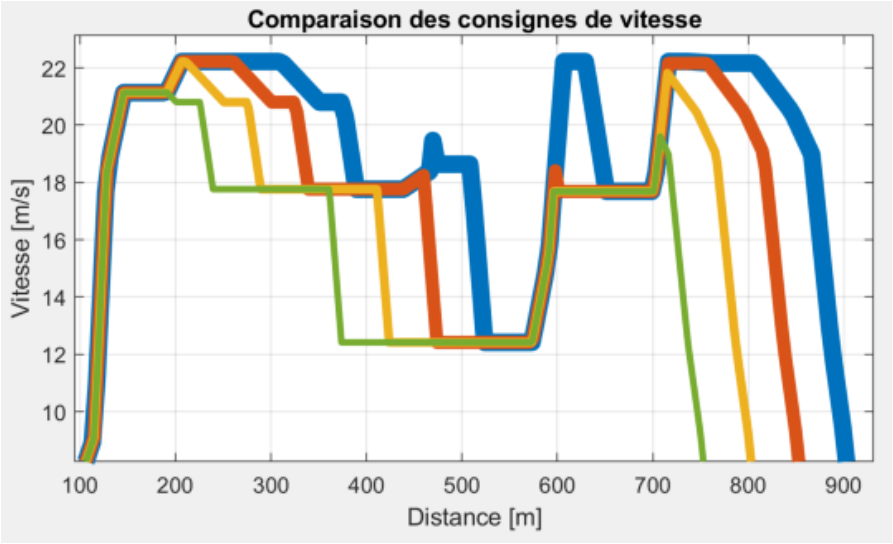

Figure 39 : Comparaison d'une partie de l'itinéraire 1

Hormis la rapidité pour effectuer le trajet, les 4 anticipations ont un effet sur la consommation d'un véhicule. Sur le trajet le Châble – Verbier, la consommation d'un véhicule aux 100 kilomètres entre une anticipation de 50 mètres et 200 mètres augmente d'environ 7 %.

Ces anticipations pourraient devenir un paramètre supplémentaire dans l'algorithme. Elles représenteraient plusieurs profils de conducteur ce qui influencerait le temps pour parcourir des trajets et la consommation du véhicule.

En conséquence, deux solutions raisonnables ressortent de cette analyse. Une anticipation à 50 mètres est trop rapide et une anticipation à 200 mètres est trop lente, il reste le choix entre une anticipation à 100 mètres ou 150 mètres. Les routes valaisannes sont parfois sinueuses et la distance entre deux épingles peut être courte, le choix d'une anticipation à 100 mètres est conservé.

8. Simulation d'un conducteur

En réalité, la consigne de vitesse est adaptée en temps réel grâce à la vue du conducteur. En fonction de ce que le chauffeur observe à l'extérieur et du compteur de vitesse, le conducteur va agir sur l'accélérateur ou sur le frein. Le conducteur est comparable à un régulateur. Si la vitesse du véhicule est trop élevée et qu'il observe un virage, il va ralentir et inversement, s'il roule doucement alors que la route est droite et offre une bonne visibilité, il accélère.

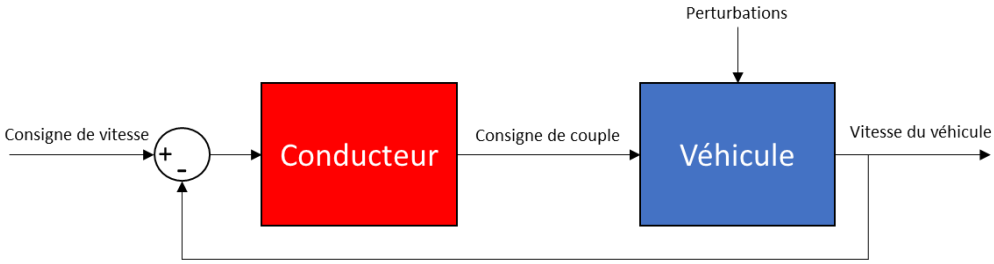

Figure 40 : Boucle de régulation de vitesse

La modélisation comportementale du conducteur est un modèle continu de type régulateur PID. Le régulateur va permettre de donner une consigne de couple à la voiture en fonction de l'erreur de vitesse calculée. La consigne de couple peut être comparée à un conducteur appuyant sur la pédale d'accélération ou de frein.

Des perturbations agissent également sur le véhicule. Ces perturbations sont les forces extérieures qui s'appliquent sur le véhicule, elles sont principalement dues à la pesanteur, l'aérodynamisme et aux frottements dans le système (Chapitre 3).

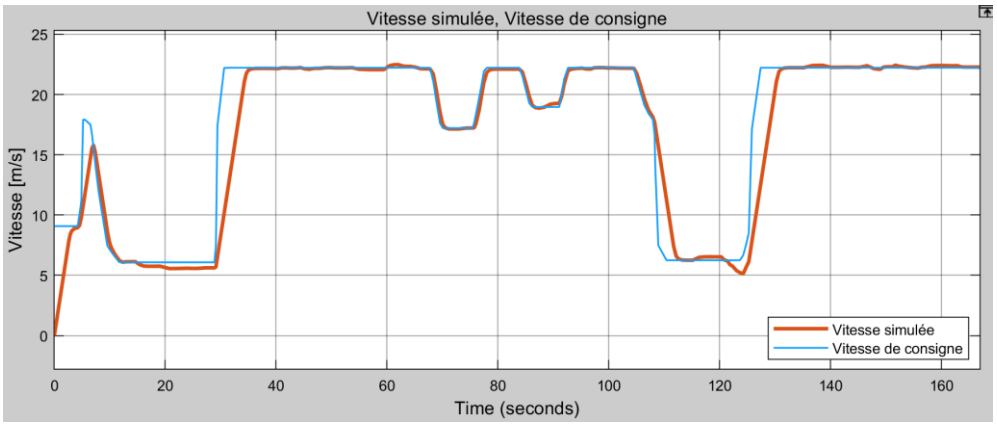

Figure 41 : Exemple d'une simulation d'un conducteur

Avec un régulateur PID, la vitesse réelle peut changer rapidement. Afin de respecter les limites du véhicule, une saturation est ajoutée sur la consigne de couple et sur l'accélération. Cependant, pour l'accélération, la saturation n'est pas dépendante des capacités du véhicule. Elle se base sur un confort de conduite et non sur les performances, l'accélération maximum est établie à 3 m/s^2. Les paramètres du régulateur sont définis par tâtonnement, il était impossible de définir une fonction de transfert pour le système en boucle fermée.

- Kp = 2000
- Ki = 10
- Kd = 0

Le régulateur PID est en fait un régulateur PI, l'action de dérivée n'est pas utile dans ce cas, car le système est stable et ne nécessite pas plus de rapidité.

9. Tests et résultats

Dans le but de tester l'algorithme et le modèle de simulation, les itinéraires du Chapitre 7.2 sont utilisés et analysés en détail. Dans ces tests, la position, la vitesse ainsi que l'accélération en fonction du temps sont analysées. Puis, grâce au modèle de véhicule avec simulateur de conduite, il est possible d'analyser la consommation en énergie du véhicule, sa consommation moyenne et son autonomie. Le modèle dans sa version complète se situe à l'annexe 4.

9.1 Itinéraire 1

- Départ : Martigny-Croix (Lat. 46.088227, Lon. 7.055239)
- Arrivée : Sommet-des-Vignes (Lat. 46.098406, Lon. 7.055982)
- Limitation de vitesse : 80 km/h

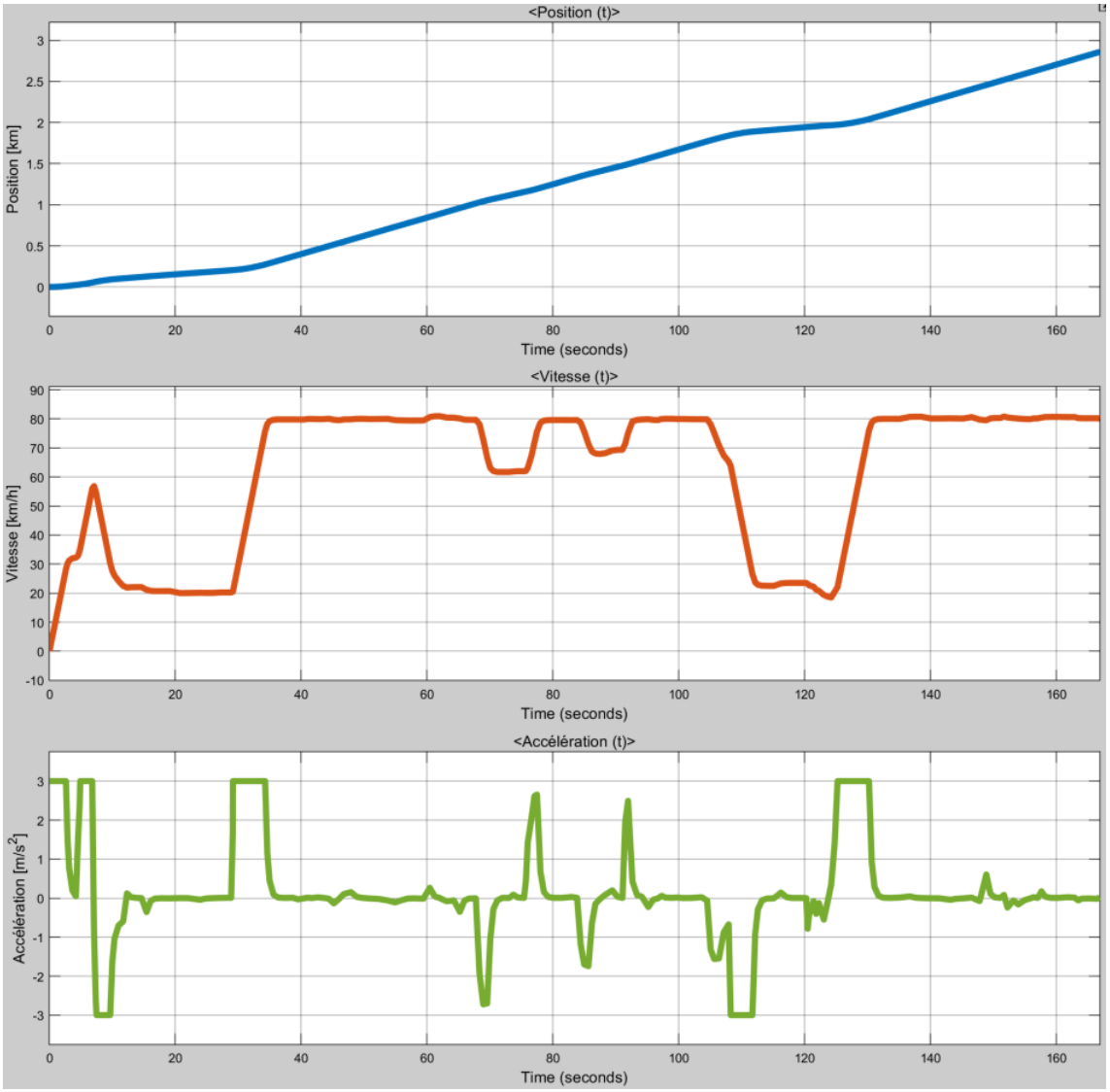

Figure 42 : Profil de position, vitesse et accélération en fonction du temps

Cet itinéraire a une distance de 2'858 mètres et le dénivelé total est de 224 mètres. Pour parcourir ce trajet, le véhicule fait 2 minutes et 46 secondes.

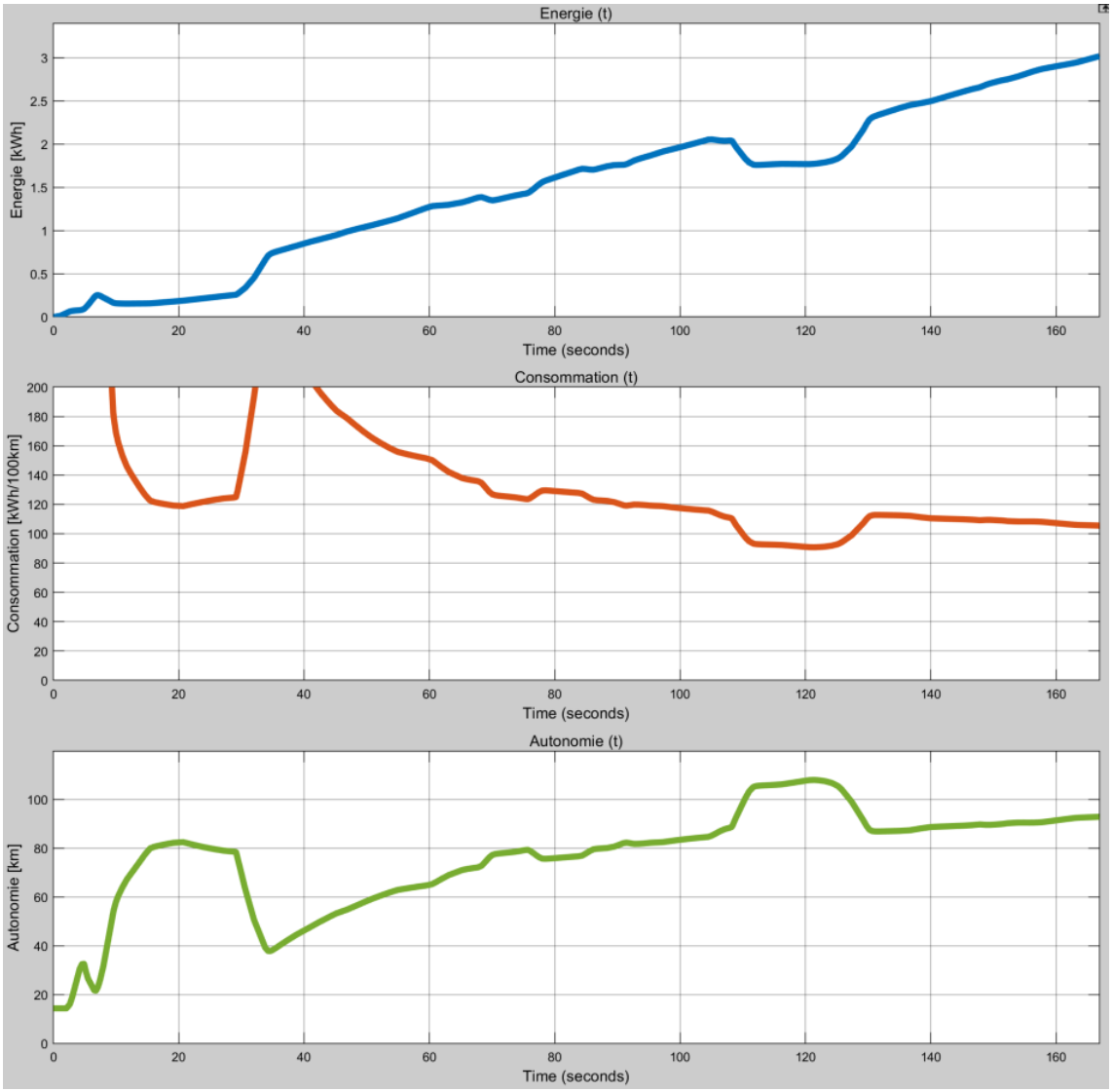

Figure 43 : Énergie consommée, consommation, et autonomie en fonction du temps

En utilisant les caractéristiques de la voiture du Chapitre 5.2.1, l'énergie consommée à la fin du parcours est de 3 kWh, ce qui représente une consommation de 105 kWh/100km et donc une autonomie de 93 km.

Si le parcours était effectué dans l'autre sens, c'est-à-dire du Sommet-des-Vignes à Martigny-Croix, le véhicule n'aurait pas consommé de l'énergie, mais il en aurait récupéré 0.8 kWh. Faire un aller-retour sur cette route reviendrait donc a consommé une énergie de 2.2 kWh.

9.1.1 **Profil de vitesse réel**

Grâce à une caméra GoPro installée dans le véhicule, la vitesse est récupérée en fonction du temps et permet ainsi de tracer un profil de vitesse et de le comparer avec celui généré par l'algorithme

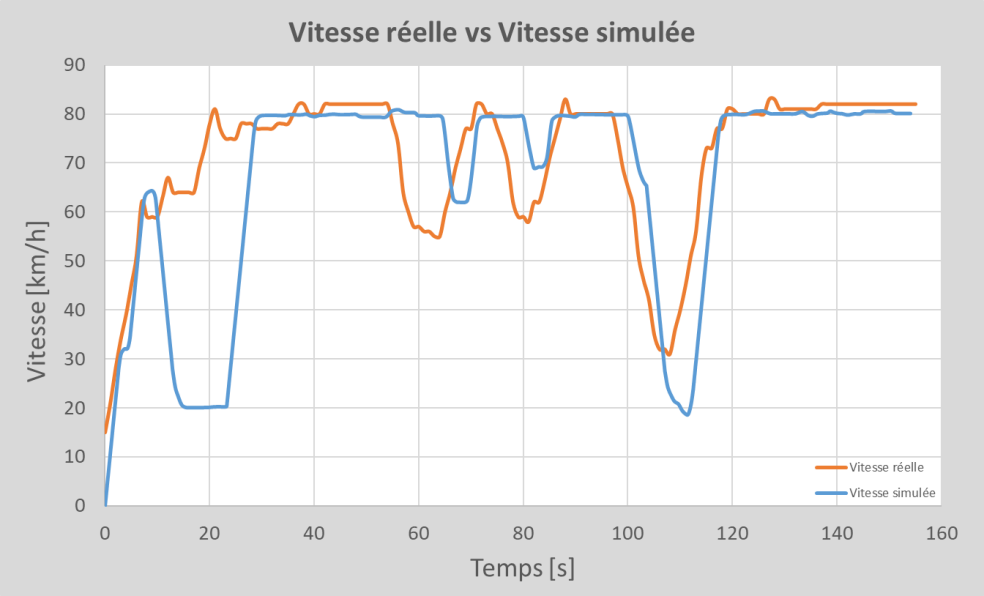

Figure 44 : Comparaison vitesse réelle et vitesse simulée

Hormis les écarts au niveau du temps, les deux courbes se ressemblent passablement. La différence lors des décélérations est uniquement due au fait que dans le véhicule il est difficile de connaitre précisément l'accélération centrifuge subie.

Une erreur est tout de même à souligner au temps = 20 secondes. Le logiciel simule un virage qui selon la réalité ne nécessite pas un aussi grand ralentissement. Afin de comprendre cette diminution de vitesse, les données géographiques sont analysées :

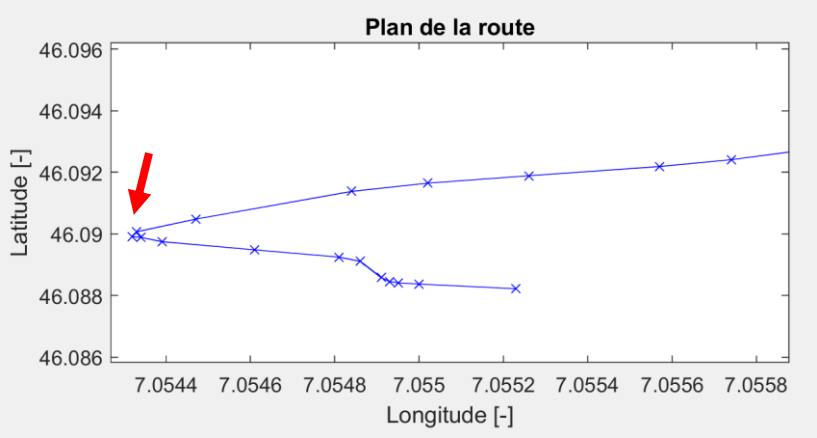

Figure 45 : Analyse itinéraire 1

Il est constaté que l'itinéraire importé recense une épingle à cet endroit alors qu'il n'y en a pas. Cette erreur est donc due à l'importation des données. Sans la comparaison avec la réalité, cette erreur aurait été difficilement détectable.

9.2 Itinéraire 2

- Départ : Mont d'Orge (Lat. 46.235061, Lon. 7.341785)
- Arrivée : Ormône (Lat. 46.241477, Lon. 7.344949)
- Limitation de vitesse : 50 km/h

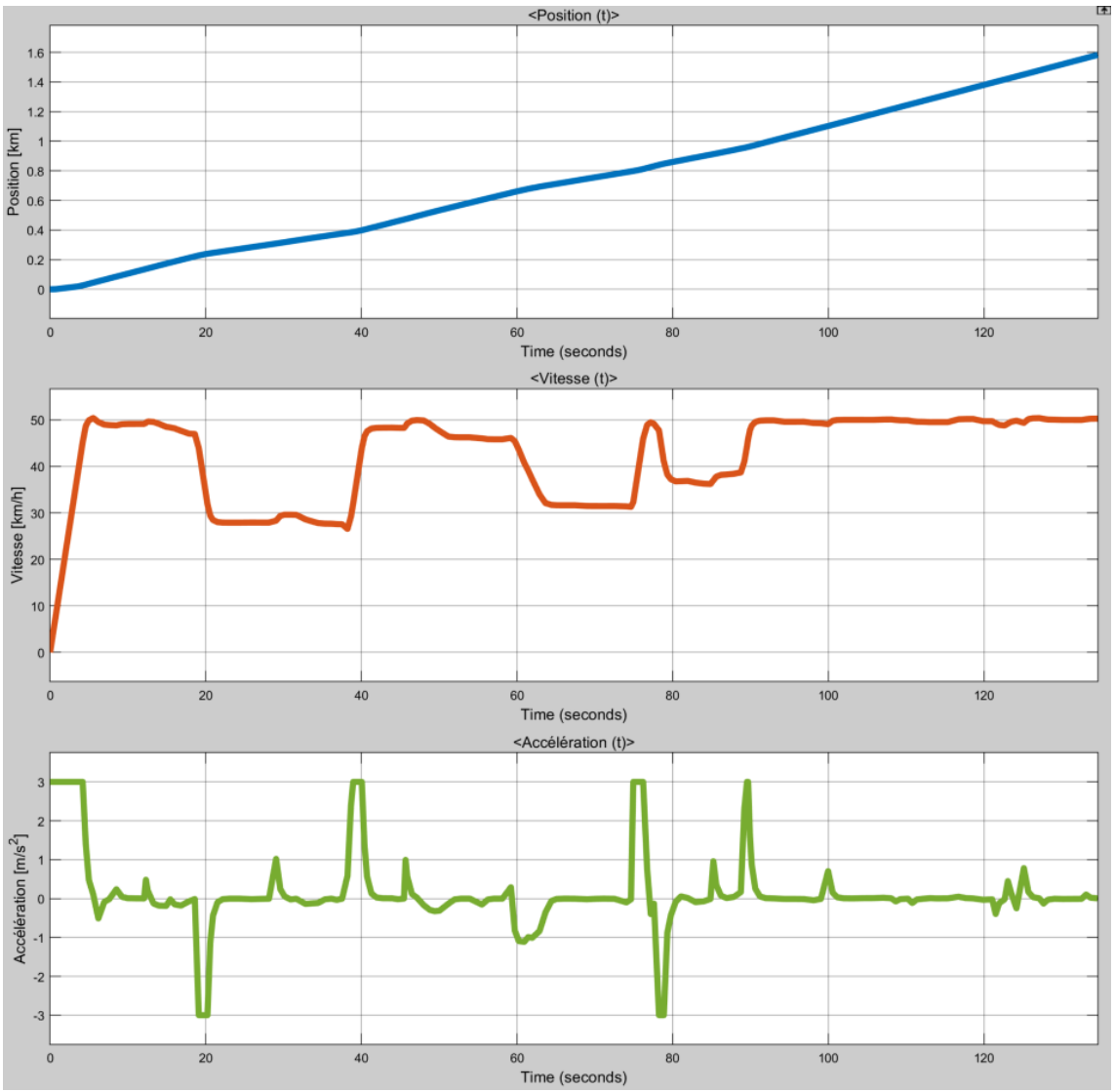

Figure 46 : Profil de position, vitesse et accélération en fonction du temps

La distance parcourue sur cet itinéraire est de 1'582 mètres et le dénivelé total est de 109 mètres. Pour parcourir ce trajet, le véhicule fait 2 minutes et 14 secondes.

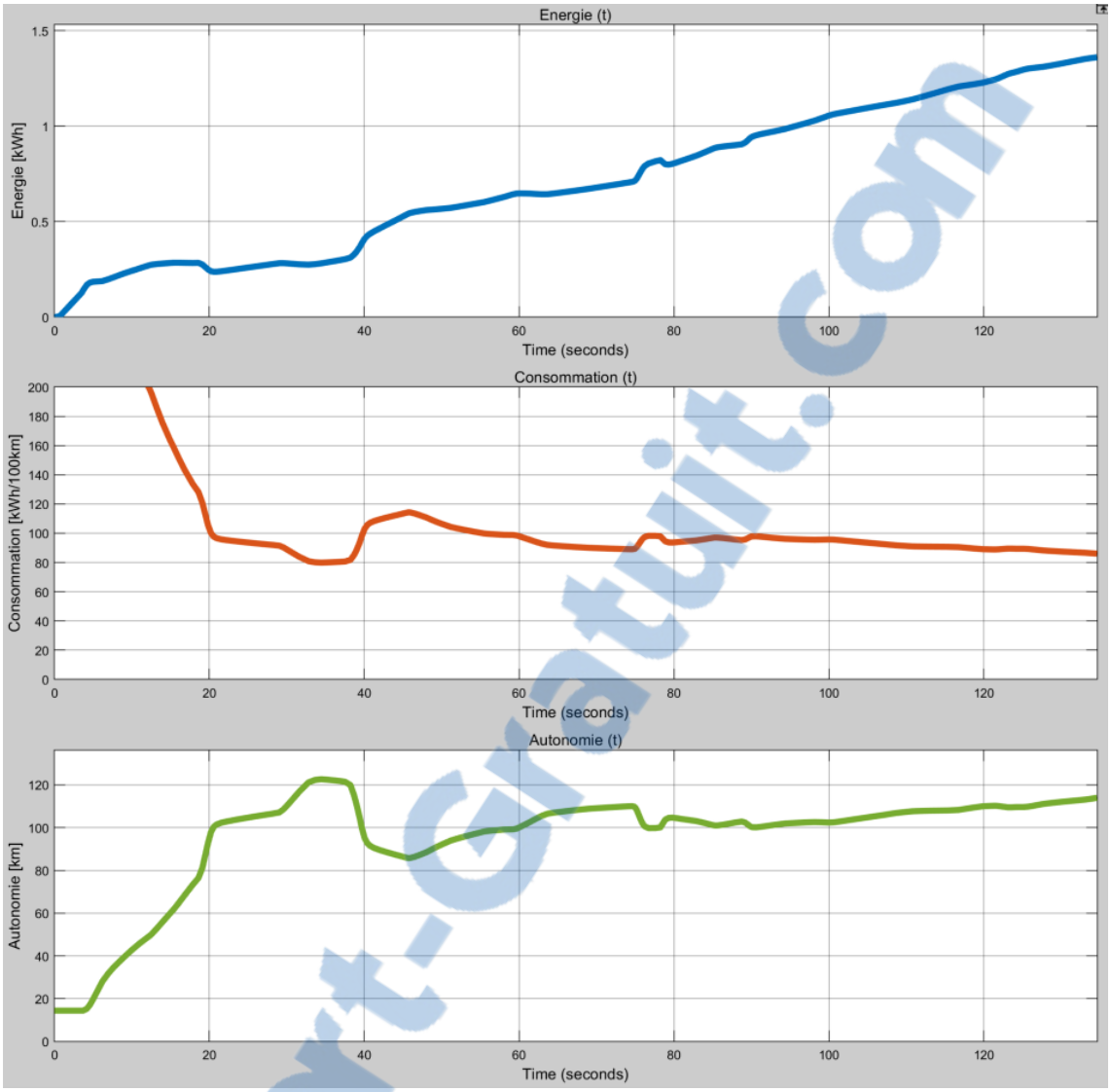

Figure 47 : Énergie consommée, consommation, et autonomie en fonction du temps

Toujours avec les caractéristiques du véhicule du Chapitre 5.2.1, l'énergie consommée sur ce parcours est de 1.3 kWh. Sur une distance de 1'582 mètres, cela représente une consommation de 86 kWh/100km et une autonomie 114 kilomètres.

En inversant le départ et l'arrivée, la batterie aurait récupéré 0.4 kWh. Du coup, en effectuant un aller-retour, le véhicule aurait consommé 0.9 kWh.

Rapport-Gratuit.com

9.2.1 Profil de vitesse réel

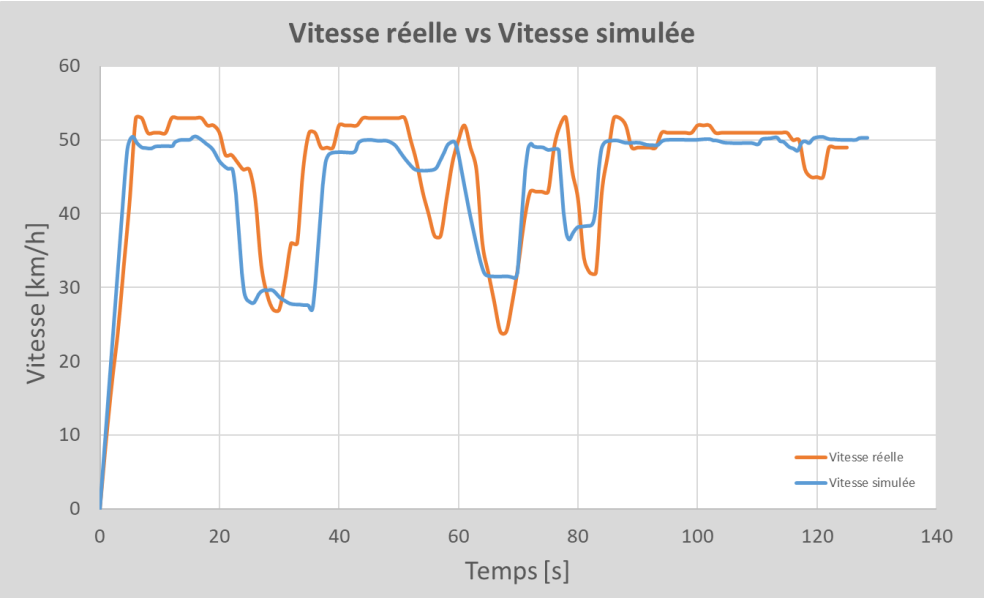

Figure 48 : Comparaison entre la vitesse réelle et la vitesse simulée

Sur cette comparaison, la vitesse réelle est très proche de la vitesse simulée. Le temps pour parcourir le trajet est légèrement plus court en réalité. Ceci est dû au fait qu'il est difficile de maintenir une vitesse constante et également parce que l'anticipation est plus courte que celle utilisée lors de la simulation.

10. Limites de l'algorithme

Dans cet algorithme, plusieurs paramètres qui peuvent influencer la consommation ne sont pas pris en compte. Ces paramètres pourraient être rajoutés dans une éventuelle suite du projet.

10.1 Limites du véhicule et de l'environnement

Chaque itinéraire simulé utilise un véhicule avec une batterie chargée au maximum. L'âge et les températures de fonctionnement d'une batterie sont des facteurs qui pourraient faire diminuer les capacités de la batterie.

Les forces aérodynamiques pourraient augmenter si un vent venait face à la voiture ou si des éléments tels qu'un porte-ski ou un coffre de toit étaient installés. Elles pourraient au contraire diminuer si le vent venait de dos ou encore si le véhicule succédait de près un autre véhicule, il pourrait profiter de son aspiration.

D'autres facteurs tels que la densité de l'air en fonction de l'altitude, les températures extérieures, la pression atmosphérique et l'humidité de l'air pourraient agir sur le véhicule, mais ces données supplémentaires n'influenceraient que de très peu la consommation.

Dans ces simulations, la climatisation, l'autoradio ou tout autre équipement consommant de l'énergie ne sont pas comptabilisés.

Un moteur électrique possède un rendement optimal lorsqu'il est proche du point de fonctionnement prévu lors de sa conception. En fonction de la vitesse et du couple, le moteur pourrait voir son point de fonctionnement s'éloigner de celui prévu et ainsi perdre en rendement.

10.2 Limites de l'itinéraire

Les parcours simulés ne prennent pas en compte des ralentissements ou des arrêts dus à une surcharge du trafic routier, des feux de signalisation, des passages piétons ou encore des panneaux de signalisation routière.

Lors d'un long trajet, les données transmises par Google seront moins précises particulièrement si le trajet est sinueux.

Le service Elevation de Google renvoie l'altitude d'une coordonnée GPS. Cette altitude est prise au sol et donc ne considère par les tunnels ou les ponts. Malgré la fonction dédiée pour corriger ce problème, il arrive que quelques tunnels ou ponts ne soient pas détectés à cause de la résolution des données.

L'exemple 1, ci-dessous, démontre une erreur entre les données d'un trajet dans un sens puis ce même trajet dans le sens inverse. Tandis que l'exemple 2 démontre le manque de données reçues pour un trajet composé de plusieurs lignes droites.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

10.2.1 Exemple 1

- Départ : Vétroz (Lat. 46.224901, Lon. 7.275373)
- Arrivée : Conthey (Lat. 46.224475, Lon. 7.306879)
- Limitation de vitesse : 50 km/h

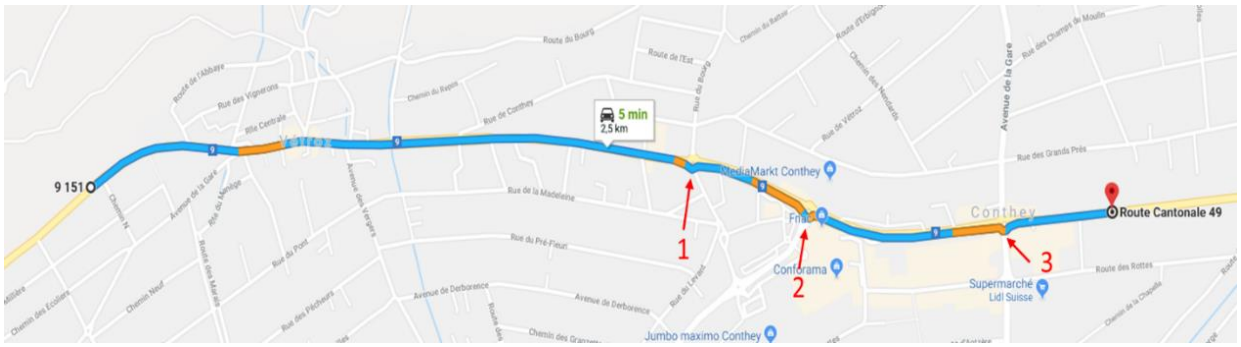

Figure 49 : Itinéraire Vétroz – Conthey

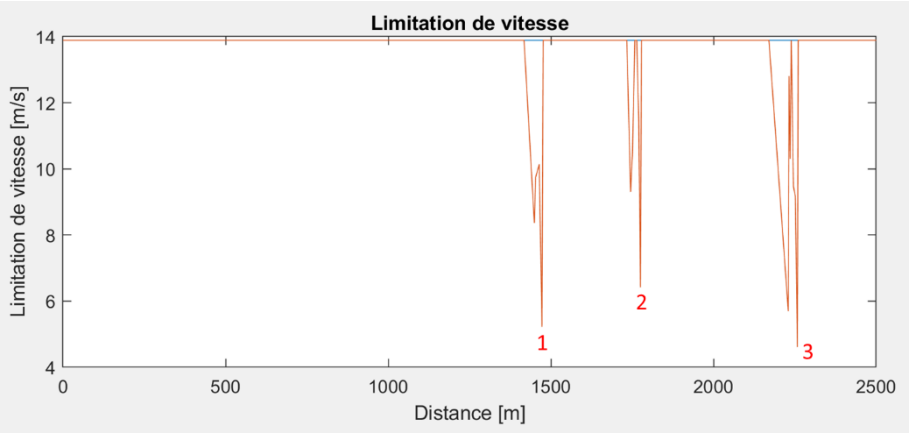

Figure 50 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire de l'exemple 1

Sur cette route cantonale qui est relativement droite, l'algorithme détecte les 3 ronds-points situés sur le parcours.

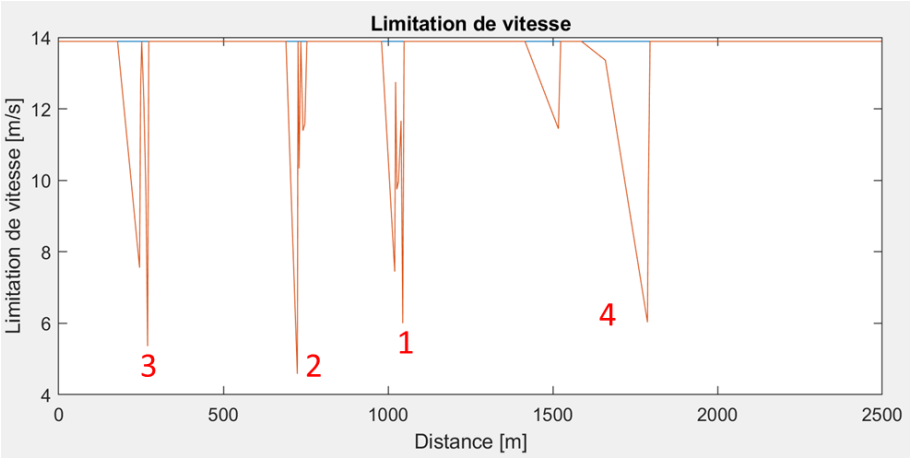

Figure 51 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire de l'exemple 1 inverse

Et dans le sens inverse, il détecte un ralentissement supplémentaire (4). La raison est définie ci-dessous.

Figure 52 : Itinéraire de l'exemple 1

Figure 53 : Itinéraire de l'exemple 1 inverse

À cause de la voie centrale, l'itinéraire est légèrement dévié. Cependant, il est modifié de manière plus conséquente sur la Figure 53 et cela se répercute sur l'acquisition de données.

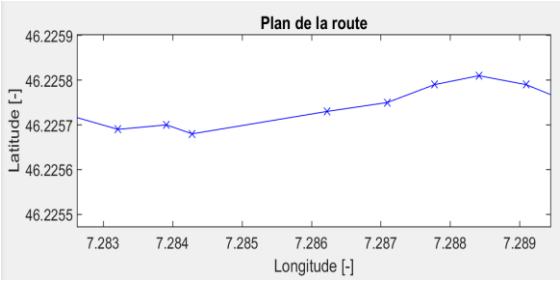

Figure 54 : Itinéraire de l'exemple 1

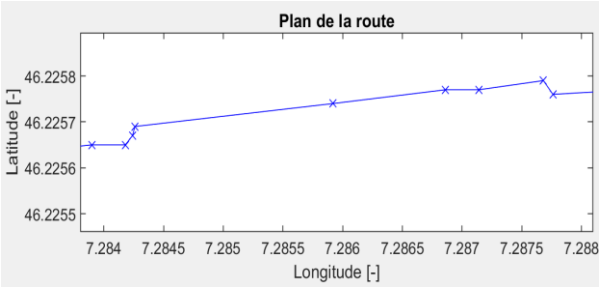

Figure 55 : Itinéraire de l'exemple 1 inverse

Les données GPS récupérées indiquent bien d'où provient le ralentissement supplémentaire. Sur la Figure 54, le tracé ne montre aucun virage qui nécessiterait un freinage. Tandis que sur la Figure 55, le contour est bien marqué.

10.2.2 Exemple 2

- Départ : Sion (Lat. 46.221898, Lon. 7.348840)
- Arrivée : Sion (Lat. 46.226060, Lon. 7.351906)
- Limitation de vitesse : 50 km/h

Figure 56 : Itinéraire Sion - Sion

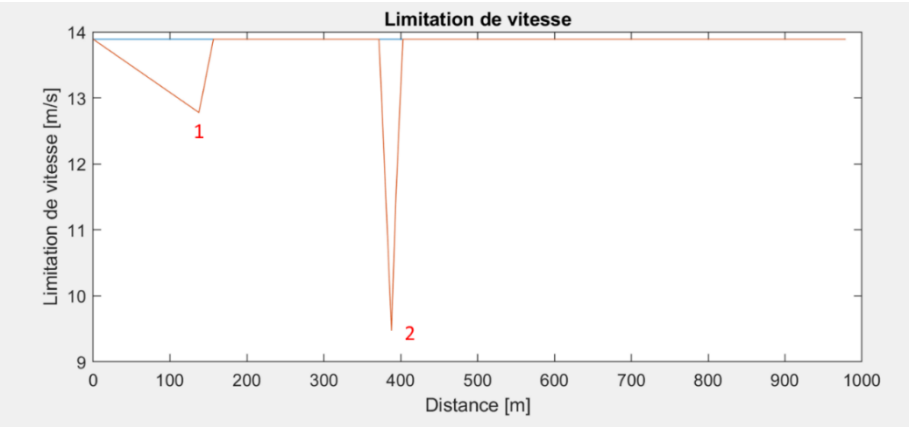

Figure 57 : Consigne de vitesse adaptée à l'exemple 2

Sur cet itinéraire, le logiciel ne détecte pas 3 virages sur 5. Après analyse des données Google récupérées, il est constaté que les virages qui ne sont pas repérés sont définis par un seul point GPS contrairement aux autres virages simulés.

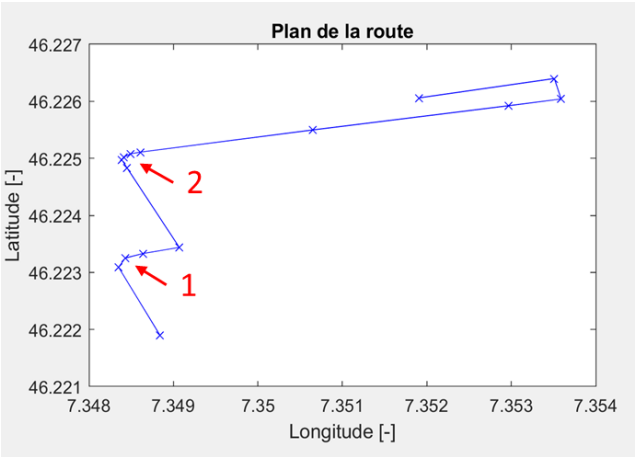

Figure 58 : Représentation des points importés depuis Google

11. Conclusion

Avec l'augmentation de véhicules électriques dans le parc automobile Suisse, un bon nombre de nouvelles questions concernant la consommation et l'autonomie reviennent fréquemment.

Les cycles de conduite utilisés par les constructeurs afin de définir la consommation et l'autonomie des véhicules ne sont pas adaptés à la topographie suisse. Les routes helvétiques et plus particulièrement valaisannes possèdent des caractéristiques que les procédures normalisées ne prennent pas en compte et qui influencent grandement sur la consommation d'un véhicule électrique.

Ce travail de diplôme propose un outil permettant de calculer la consommation d'un véhicule électrique sur un itinéraire numérique. L'importation des données géographiques depuis Google s'est révélée en partie satisfaisante. En effectuant plusieurs tests, certains itinéraires ont montré quand même quelques failles. La résolution et la précision des données ne sont pas toujours suffisantes et le fait qu'elles ne soient pas disposées à intervalle régulier handicape parfois les résultats.

En simulation, l'anticipation sur une distance fixe donnait des résultats prometteurs sur des routes cantonales. La comparaison avec le profil de vitesse réel a révélé quelques inexactitudes. Après analyse, la distance d'anticipation doit s'adapter à la vitesse actuelle du véhicule dans le but d'être encore plus proche de la réalité.

Les modèles de véhicule implémentés permettent d'analyser les contraintes sur la chaine de traction en fonction du temps. Du couple moteur à la puissance fournie par la batterie, le véhicule peut être simulé et permet de définir la consommation et l'autonomie d'un véhicule sur un certain itinéraire ou selon un cycle de conduite. Pour des recherches approfondies, il serait nécessaire de posséder un véhicule permettant de prendre des mesures en temps réels. Ces données pourraient être comparées à celle du simulateur et ainsi valider de manière fiable les modèles implémentés.

Sur les parcours simulés, les résultats sont concluants. Le profil de vitesse simulé est proche de celui relevé en réalité. L'énergie utilisée sur ces parcours démontre qu'une voiture électrique ne pourra pas respecter l'autonomie indiquée par les constructeurs.

À l'avenir, si ce projet est continué, je pense que les limites de l'algorithme font office d'améliorations futures.

11.1 Date et signature

Sion, le 17 août 2018 Thomas Moser

12. Bibliographie

[1] Mécanique, Script de physique HES-SO, p.20

[2] Jean-Pierre Brossard, Dynamique du véhicule : Modélisation des systèmes complexes, p. 235-239

[3] Pierre Duysinx, « Performances du véhicule » , Université de Liège, p.64

[4] T.D Gillespie, Fundamentals of vehicle dynamics p.117

[5] Richard Taillet, Loïc Villain, Pascal Febvre, Dictionnaire de physique, page 235

[6] Centre national de ressources textuelles et lexicales, Définitions lexicographiques et étymologiques de « Différentiel »

[7] S. Chevailler, J.Moerschell, P. Poffet, MCT1-Electromécanique 2014, p.20

13. Logiciels

Algorithme et simulation : Matlab r2018 & Simulink

Rapport et présentation : Microsoft Office Word, Excel et PowerPoint

14. Annexes

Annexe 1 : Modèle véhicule pour cycle de conduite

Annexe 2 : Réponse de l'API Google

Annexe 3 : Itinéraires supplémentaires

Annexe 4 : Modèle véhicule pour conducteur simulé

15. Liste des figures et tableaux

15.1 Figures

Figure 1 : Immatriculations de voitures de tourisme avec motorisation alternative 2007 – 2017.1

Figure 2 : Schéma bloc du modèle de calcul 2

Figure 3 : Schéma des forces majeures agissant sur un véhicule en déplacement 3

Figure 4 : θ = 0° 3

Figure 5 : 0 < θ < 90° 3

Figure 6 : Définition des forces aérodynamiques 4

Figure 7 : Topologie d'un véhicule électrique 6

Figure 8 : Cycle de vitesse NEDC 9

Figure 9 : Cycle de vitesse WLTP 10

Figure 10 : Schéma bloc du système 10

Figure 11 : Profil de la route avec déclivité 11

Figure 12 : Cycle NEDC sans pente 11

Figure 13 : Cycle NEDC avec pente 11
Figure 14 : Cycle WLTP sans pente 12
Figure 15 : Cycle WLTP avec pente 12
Figure 16 : Définition API 15
Figure 17 : Exemple d'un plan de route importé 16
Figure 18 : Exemple d'un profil de route importé 17
Figure 19 : Profil de route entre Martigny et Bovernier 18
Figure 20 : Profil de route corrigé 18
Figure 21 : Épingle sur la route de la Forclaz 19
Figure 22 : Représentation graphique des vecteurs 21
Figure 23 : Itinéraire Martigny Croix - Sommet des Vignes 22
Figure 24 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire 1 22
Figure 25 : Itinéraire Mont d'Orge – Ormône 23
Figure 26 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire 2 23
Figure 27 : Itinéraire le Châble - Verbier 24
Figure 28 : Profil de vitesse généré après analyse 24
Figure 29 : Profil de vitesse avec anticipation de 50m 25
Figure 30 : Profil de vitesse avec anticipation de 100m 25
Figure 31 : Profil de vitesse avec anticipation de 150m 26
Figure 32 : Profil de vitesse avec anticipation de 200m 26
Figure 33 : Itinéraire Sion – Champlan 27
Figure 34 : Profil de vitesse généré après analyse 27
Figure 35 : Profil de vitesse avec anticipation de 50m 27
Figure 36 : Profil de vitesse avec anticipation de 100m 28
Figure 37 : Profil de vitesse avec anticipation de 150m 28
Figure 38 : Profil de vitesse avec anticipation de 200m 28
Figure 39 : Comparaison d'une partie de l'itinéraire 1 29
Figure 40 : Boucle de régulation de vitesse 30
Figure 41 : Exemple d'une simulation d'un conducteur 30
Figure 42 : Profil de position, vitesse et accélération en fonction du temps 31
Figure 43 : Énergie consommée, consommation, et autonomie en fonction du temps 32
Figure 44 : Comparaison vitesse réelle et vitesse simulée 33
Figure 45 : Analyse itinéraire 1 33
Figure 46 : Profil de position, vitesse et accélération en fonction du temps 34
Figure 47 : Énergie consommée, consommation, et autonomie en fonction du temps 35
Figure 48 : Comparaison entre la vitesse réelle et la vitesse simulée 36

Figure 49 : Itinéraire Vétroz – Conthey 38
Figure 50 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire de l'exemple 1 38
Figure 51 : Consigne de vitesse adaptée à l'itinéraire de l'exemple 1 inverse 38
Figure 52 : Itinéraire de l'exemple 1 39
Figure 53 : Itinéraire de l'exemple 1 inverse 39
Figure 54 : Itinéraire de l'exemple 1 39
Figure 55 : Itinéraire de l'exemple 1 inverse 39
Figure 56 : Itinéraire Sion - Sion 39
Figure 57 : Consigne de vitesse adaptée à l'exemple 2 40
Figure 58 : Représentation des points importés depuis Google 40

15.2 Tableaux

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des cycles NEDC et WLTP 9
Tableau 2 : Comparaison cycle NEDC et WLTP 13
Tableau 3 : Comparaison des services de données géographiques 14
Tableau 4 : Comparaison des distances calculées par rapport aux services de données géographiques 17