

RAPPORTS

CETE du Sud-Ouest
DDAT / ESAD-ZELT

Août 2012

Consommation des véhicules en fonction de l'infrastructure

Opérations de recherche SERRES

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et réseaux

Présent
pour
l'avenir



Centre d'Études Techniques de l'Équipement
du Sud-Ouest

www-cete-sud-ouest.developpement-durable.gouv.fr

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1.0	Août 2012	Version 1

Affaire suivie par

Sébastien ROMON - DDAT/ESAD-ZELT
<i>Tél. : 05 62 25 97 56 / Fax : 05 62 25 97 99</i>
<i>Courriel : sebastien.romon@developpement-durable.gouv.fr</i>

Rédacteur

Sébastien ROMON - DDAT/ESAD-ZELT

Rellecteur

Catherine BARTHE - DDAT/ESAD-ZELT

SOMMAIRE

1 - PRÉAMBULE.....	8
2 - RÈGLES D'ÉCO-CONDUITE.....	9
3 - LE PROJET GERICO.....	9
3.1 - Le parcours.....	11
4 - LES DONNÉES RECUEILLIES.....	12
4.1 - Les données GERICO.....	12
4.2 - Données VANI.....	13
5 - LOCALISATION DES ENREGISTREMENTS.....	14
6 - ÉTUDE DU VÉHICULE ET DU MOTEUR	15
6.1 - Boîte de vitesses.....	15
6.2 - Consommation et vitesse.....	20
6.3 - Phase d'accélération.....	21
7 - CONSOMMATION SUR L'ENSEMBLE DU TRAJET.....	22
7.1 - Approche classique.....	22
7.2 - Approche GEE.....	23
7.2.1 - Comparaison mode neutre et mode éco-conduite.....	23
7.2.2 - Comparaison mode neutre et mode gérico.....	24
8 - CONSOMMATION PAR TYPE D'INFRASTRUCTURE.....	24
8.1 - Approche classique.....	24
8.2 - Approche GEE.....	25
9 - MÉTHODOLOGIE.....	25
9.1 - Lissage des données de consommation et de vitesse.....	25
9.1.1 - Estimation et lissage des données de vitesse.....	26
9.1.1.a - Régression par polynômes locaux.....	26
9.1.2 - Lissage des données de consommation.....	26
9.1.3 - Estimation de la consommation sur une section.....	28
9.1.3.a - Estimation de la consommation sur une section pour un conducteur.....	28
9.1.3.b - Estimation de la consommation sur une section pour un ensemble d'expérimentateurs.....	28
9.2 - Analyse en composantes principales.....	28
9.2.1 - Réduction des variables.....	28
9.3 - Modèles d'accélération et décélération Akçelik.....	30
9.4 - Classification des trajectoires.....	30
9.5 - Régression par polynômes locaux.....	30

9.5.1 -Principe de la régression par polynômes locaux.....	30
9.5.2 -Choix des paramètres de la régression par polynômes locaux.....	31
10 - PROFIL DE CONSOMMATION.....	32
10.1 - Méthodologie.....	32
10.1.1 -Profil de consommation par trajet.....	32
10.1.2 -Profil de consommation médian.....	32
10.2 - Profil 2D.....	32
10.2.1 -Départementale D817.....	32
10.2.2 -Traversée de Pinsaguel.....	33
10.2.2.a - Section résidentielle.....	33
10.2.2.b - Section centre-village.....	35
10.2.3 -Sortie et entrée sur l'autoroute.....	36
10.3 - Profils 3D.....	36
11 - INDICATEURS.....	38
12 - ANALYSE GLOBALE EN COMPOSANTES PRINCIPALES.....	41
12.1 - Réduction des variables.....	42
12.1.1 -Représentation des variables et axes principaux.....	44
12.2 - Représentation des individus.....	46
12.3 - Valeurs propres de l'ACP.....	47
12.3.1 -Classification ascendante des individus.....	47
12.3.2 -Modélisation de la consommation.....	49
12.3.3 -Prédiction de la consommation moyenne.....	50
13 - ANALYSE PAR TYPE D'INFRASTRUCTURE.....	53
13.1 - Milieu urbain.....	53
13.1.1 -Utilisation du frein moteur.....	53
13.1.2 -ACP.....	53
13.1.2.a - Réduction des variables.....	53
13.1.2.a - Graphe des variables.....	55
13.1.2.b - Graphe des individus.....	57
13.1.3 -Classification ascendante des individus.....	58
13.1.4 -Modélisation de la consommation.....	58
13.1.4.a - Modélisation en fonction du pke et du nombre d'arrêts.....	58

13.1.4.b - Modélisation de la consommation en fonction du pke et de la vitesse moyenne.....	59
13.2 - Infrastructure autoroute.....	59
13.2.1 -Réduction des variables.....	59
13.2.2 -Classification ascendante des individus.....	63
13.2.3 -Classification en 3 groupes.....	64
13.3 - Modélisation de la consommation.....	65
13.3.1 -Modélisation pour des sections de 500 mètres.....	66
13.3.2 -Modélisation pour des sections de 1000 mètres.....	67
13.4 - Voies rapides.....	68
13.5 - Les montées.....	69
13.5.1 -Aspect théorique.....	69
13.5.2 -ACP sur les montées.....	71
13.5.2.a - Classification des variables.....	71
13.5.2.b - Graphe des variables.....	73
13.5.2.c - Graphe des individus.....	74
13.5.3 -Tirage aléatoire de sections de 200 mètres.....	74
13.5.3.a - Modélisation de la consommation.....	75
13.6 - Les descentes.....	76
13.6.1 -Analyse du rapport de boîte et des états du système.....	77
13.6.2 -ACP.....	78
13.6.2.a - Classification des variables.....	78
13.6.2.b - Graphe des variables.....	79
13.6.2.c - Graphe des individus.....	80
14 - ANALYSE DES SÉQUENCES D'ÉTATS.....	80
14.1 - Traversée de Pinsaguel.....	80
14.1.1 -Rapports de boîte.....	80
14.1.1.a - Modes de conduite.....	81
14.1.1.b - Classification des séquences.....	81
14.1.2 -Régime moteur.....	85
14.1.2.a - Modes de conduite.....	85
14.1.2.b - Classification des séquences.....	86
14.2 - Décélération au péage.....	91
14.2.1 -Influence du mode de conduite.....	92
14.2.2 -Classification des trajectoires.....	93

14.3 - Accélération après péage.....	96
14.3.1.a - Modes de conduite.....	97
14.3.1.b - Classification des séquences d'états.....	98
15 - APPROCHE MICROSCOPIQUE.....	100
15.1 - Le péage.....	100
15.1.1 -Coût en carburant au péage.....	100
15.1.2 -Estimation des profils de vitesse par polynômes locaux.....	101
15.1.3 -Phase d'accélération.....	102
15.1.3.a - Classification des profils de vitesse.....	103
15.1.3.b - Classification en 2 groupes.....	104
15.1.3.c - Classification 3 groupes.....	105
15.1.4 -Estimation par polynômes locaux des profils de vitesse.....	105
15.1.5 -Estimation par polynômes locaux des profils de consommation cumulée.....	106
15.1.6 -Comparaison avec le modèle d'accélération Akçelik.....	107
15.1.6.a - Phase d'accélération.....	107
15.1.6.b - Phase de décélération.....	109
15.1.7 -Modélisation de la consommation.....	110
15.2 - Les feux tricolores.....	111
15.2.1 -Feu Lacroix-Falgarde.....	111
15.2.2 -Coût en carburant de l'arrêt aux feux.....	114
15.2.3 -Feu Pinsaguel (centre-ville).....	114
15.2.4 -Feu Portet-sur-Garonne.....	116
15.2.5 -Modélisation des phases d'accélération et de décélération lors de l'arrêt au feu.....	119
15.2.6 -Comparaison du profil de vitesse avec les modèles d'Akçelik.....	120
15.2.6.a - Phase de décélération.....	122
15.2.6.b - Phase d'accélération.....	122
15.3 - Arrêt au stop.....	124
15.3.1.a - Classification des trajectoires.....	124
15.3.1.b - Modélisation des profils de vitesse.....	125
15.3.1.c - Comparaison avec le modèle d'Akçelik.....	127
15.3.2 -Estimation de la consommation cumulée.....	128
15.4 - Ronds-points Axe D817.....	128
15.4.1 -Analyse de l'accélération.....	129
15.4.2 -Profil de vitesse et de consommation.....	132

15.4.3 -Consommation moyenne des usagers à proximité des ronds-points.....	133
15.4.4 -Consommation moyenne hors zone d'influence des ronds-points.....	133
15.4.5 -Coût en carburant d'un rond-point en péri-urbain.....	133
15.4.6 -Estimation de la consommation cumulée sur l'ensemble de l'axe.....	133
15.5 - Étude la section située entre les ronds-points 4 et 5.....	134
15.5.1 -Modélisation de la consommation de la phase d'accélération.....	135
15.5.2 -Modélisation de la consommation en vitesse de croisière.....	136
15.5.3 -Modélisation de la consommation de la phase de décélération.....	137
16 - SYNTHÈSE.....	139
16.1 - Analyse globale.....	139
16.2 - Analyse par type d'infrastructure.....	139
16.3 - Synthèse de la modélisation.....	140
16.4 - Analyse microscopique.....	140
16.5 - L'éco-conduite.....	141
17 - RÉFÉRENCES.....	141

1 - Préambule

Dans le présent document, nous analysons la consommation des véhicules en fonction de l'infrastructure. Nous utilisons les données du projet GERICO où 40 expérimentateurs ont parcouru deux fois un parcours varié long de 70 km au sud de Toulouse.

Nous analysons la consommation selon 3 approches :

- approche globale ;
- approche mésoscopique ;
- approche microscopique.

Dans l'approche globale, nous analysons la consommation au niveau du trajet. Nous calculons un certain nombre d'indicateurs et nous regardons lesquels sont liés à l'écoconduite.

Dans l'approche mésoscopique, nous analysons la consommation en fonction du type d'infrastructure : milieu urbain, autoroute, en montée, en descente,...

Enfin, dans l'approche microscopique, nous analysons la vitesse et la consommation sur des infrastructures « ponctuelles » telles que le franchissement d'un carrefour à feux, d'un rond-point ou d'un péage.

2 - Règles d'éco-conduite

Nous rappelons ici les règles qu'il faut appliquer pour réaliser des économies de carburant :

- changer de rapports de boîte le plus rapidement possible ;
- changer de rapport de boîte lorsque c'est approprié ;
- utiliser le plus haut rapport de boîte ;
- maintenir une vitesse stable dans la plage optimale de régime moteur ;
- éviter les brusques accélérations et freinages ;
- regarder le plus loin possible afin d'anticiper les conditions de trafic ;
- minimiser les temps d'arrêt ;
- utiliser frein moteur aux feux et aux intersections lorsque freiner n'est pas nécessaire ;
- vérifier régulièrement la pression des pneus ;
- maximiser l'aérodynamisme du véhicule et minimiser la charge du véhicule ;
- utiliser intelligemment les équipements du véhicule tel que la climatisation.

Dans la suite, nous nous référerons à ces règles d'éco-conduite.

3 - Le projet GERICO

Le projet GERICO « Gestion globale de l'Energie véhicule et Interface pour une Conduite citoyenne », financé par l'ADEME et soutenu par le FEDER et la Sécurité Routière, s'inscrit dans cette logique, en impliquant le conducteur comme acteur des économies d'énergie. Le projet a été initié par SIEMENS-VDO en 2003 et s'est terminé en 2006.

Durant le projet a été développé un système embarqué d'aide à l'éco-conduite utilisant les données véhicules, les données GPS et des données cartographiques.

Le système GERICO optimise la consommation en fournissant :

- une vitesse optimale à adopter selon le type de route empruntée ;
- un rapport de boîte optimale en fonction de la vitesse ;
- une prévision de la consommation pour le trajet ;
- des messages d'assistance et d'alerte.

L'expérimentation GERICO s'est déroulée selon trois phases :

- **La phase TSG** (trajets sans système GERICO)

Le système est inactif. Les conducteurs n'ont pas accès aux données GERICO et n'avaient pas suivi au préalable de formation. Les conducteurs sont soumis aux contraintes de circulation et respectent les limitations de vitesses.

- **La phase TF** (trajets après formation)

Les conducteurs ont suivi au préalable une formation sur les économies d'énergie. Ils appliquent leurs connaissances sur le parcours-test.

- **La phase TAG** (trajets avec GERICO)

Le système GERICO est actif. Les conducteurs connaissent, via les indications présentes sur le tableau de bord, le rapport et la vitesse optimaux sur les différentes portions du trajet et réduisent en conséquence leur vitesse de conduite. Si le conducteur ne respecte pas les consignes GERICO, des messages d'abord visuels puis sonores sont émis.

Le véhicule utilisé lors des tests est un « Renault Scenic » équipé du système embarqué GERICO et d'une interface IHM (remplaçant le tableau

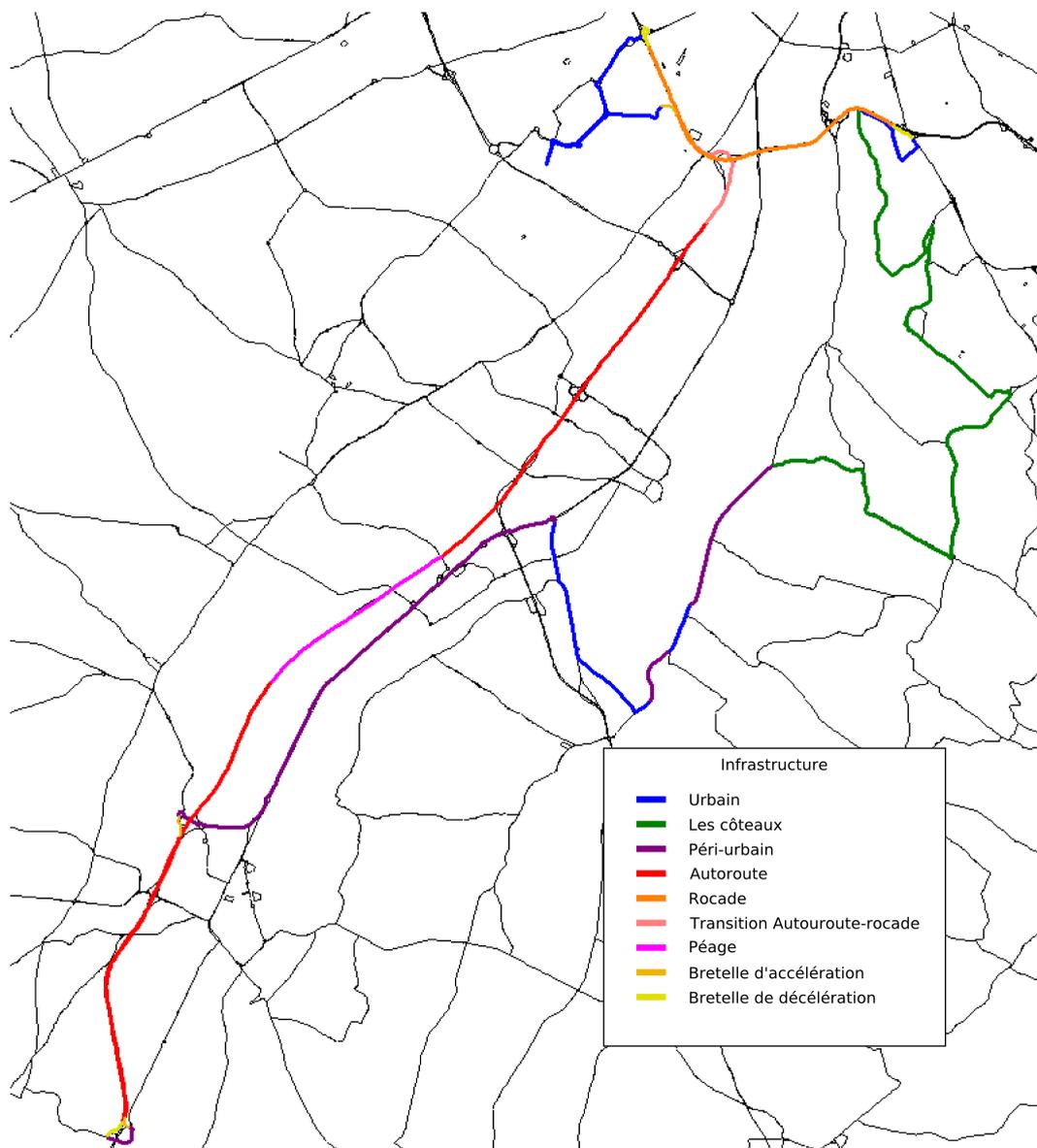
de bord ordinaire) spécialement développé pour l'expérimentation.

Le véhicule se différencie d'un véhicule ordinaire par la présence d'une boîte séquentielle à 4 rapports.

Les tests se sont déroulés pendant les heures creuses de la journée, en semaine, à raison de deux tests par jour : (9h-11h) et (14h-16h).

3.1 - Le parcours

Le parcours est long de près de 70 km. Ce parcours emprunte différents types d'infrastructure comme le montre la carte ci-dessous.



Infrastructure	Longueur (km)	%
Autoroute	18.6	26.8%
Les coteaux	14.6	20.9%
Péri-urbain	12.4	17.7%
Urbain	11.6	16.6%
Rocade	5.7	8.2%
Péage	3.2	4.6%
Transition Autoroute Rocade	1.7	2.4%
Bretelle de décélération	1.1	1.5%
Bretelle d'accélération	0.8	1.2%
Longueur totale	69.6	

D'après le tableau ci-dessus, nous notons que près de 45 % du parcours est constitué de voies rapides urbaines ou autoroutières.

Les coteaux ont été découpés en 3 catégories d'infrastructure :

- les montées à fort dénivelé
- les descentes à fort dénivelé
- les dénivelés faibles ou tronçons plats

Nous dénombrons 3 montées à fort dénivelé (la montée vers la base de loisirs de Pech-David, la montée vers Pouvoirville et la montée vers Pechbusque) et 3 descentes à fort dénivelé : (la descente depuis la base de loisirs de Pech-David vers le lycée Bellevue, la descente de Pouvoirville vers Ramonville, la descente de Vieille Toulouse vers la Garonne).

En dehors des montées et des descentes à fort dénivelé, nous classons le reste du parcours en parcours vallonné.

4 - Les données recueillies

4.1 - Les données GERICO

Les données GERICO ont été enregistrées toutes les 100 ms. Les données ne sont pas horodatées. Les données recueillies et exploitées sont les suivantes :

Données	Type et unité	Commentaires
odomètre	Entier (en mètres)	Distance parcourue
Vitesse	Entier (km/h)	
Rapport de boîte	Entier	Valeurs possibles : 1, 2, 3 ou 4
Enfoncement de la pédale d'accélération	Entier	Entre 0 et 100

Régime moteur	Entier (tours par minute)	
Longitude / latitude	Flottant (système de coordonnées WGS84)	
Consommation	Entier (en mm ³)	Précision : 80 mm ³

A partir de ces données nous ajoutons d'autre variables qui sont décrites ci-après

- le type d'infrastructure ;
- la consommation locale (exprimée en l/100 km) ;
- l'abscisse curviligne du véhicule le long du trajet ;
- l'accélération (exprimé en m.s⁻²).

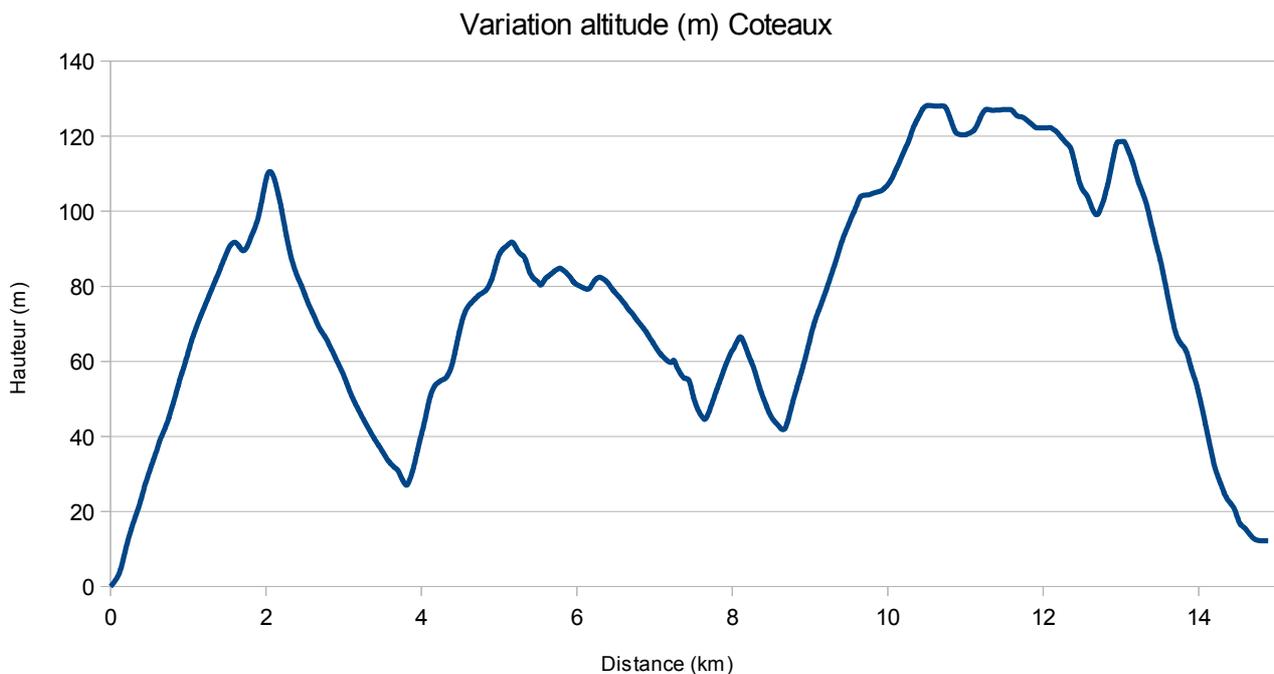
4.2 - Données VANI

Le véhicule VANI (Vehicule d'ANalyse d'Itineraire) est un véhicule instrumentée permettant de réaliser des mesures très précises sur les caractéristiques de l'infrastructure.

Tous les mètres sont mesurées la pente, le dévers et l'adhérence de la route.

Le véhicule VANI est équipé d'un GPS différentiel permettant de délivrer très précisément les positions du véhicule.

Comme le véhicule ne peut rouler à plus de 50 km/h, il n'a pas pu emprunter les portions de voies rapides et d'autoroute du parcours Gerico. Chaque position GPS est projetée sur le trajet du véhicule.



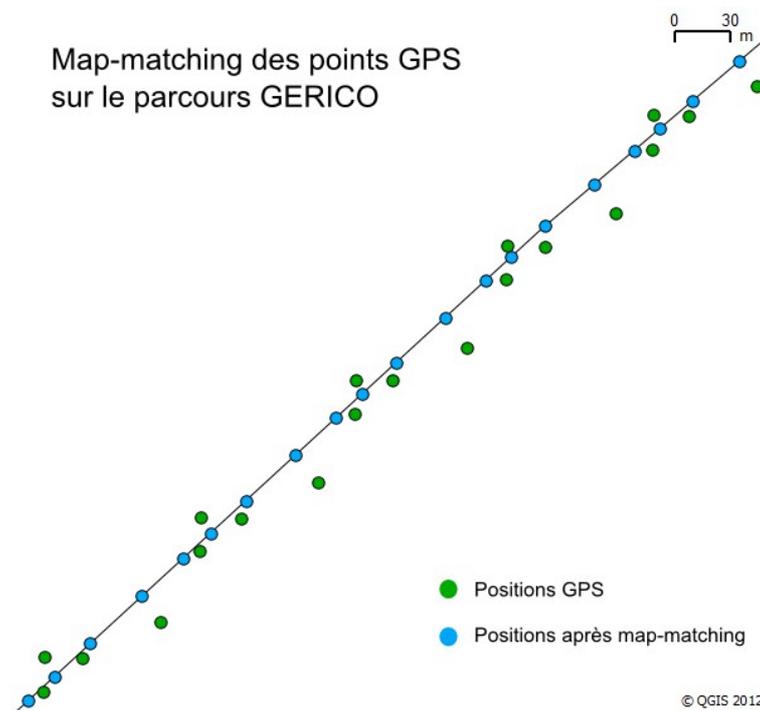
5 - Localisation des enregistrements

Pour localiser les enregistrements, nous utilisons une cartographie des routes de l'agglomération toulousaine sur laquelle nous projetons les données GPS associées aux enregistrements sur le parcours emprunté par les expérimentateurs.

L'algorithme de mapmatching permet d'associer à chaque enregistrement, un arc topologique, un sens de parcours de l'arc et une abscisse curviligne le long du trajet.

Nous utilisons un algorithme de mapmatching développé en interne qui permet de traiter en temps différé la localisation des enregistrements provenant de véhicules traceurs.

Comme les données de localisation sont bruitées, l'algorithme ne localise pas l'ensemble des données sur le parcours. Nous avons dû adapter notre algorithme aux données GERICO. Tout d'abord, nous utilisons notre algorithme de mapmatching sur les données afin de déterminer et de récupérer les arcs topologiques (ainsi que leur sens de parcours) constituant le parcours Gerico. Ensuite, nous réutilisons notre algorithme non plus sur l'ensemble des arcs de l'agglomération toulousaine mais uniquement sur les arcs constituant le parcours Gerico afin d'éviter les erreurs de mapmatching.



L'algorithme de mapmatching procède en deux étapes :

- localisation des enregistrements sur le parcours GERICO (projection du point sur l'arc le plus proche);
- calcul de l'abscisse curviligne du véhicule le long du parcours en fonction de la vitesse du véhicule et de la position GPS projetée sur le parcours.

6 - Étude du véhicule et du moteur

Le véhicule utilisé pour l'expérimentation est un Renault Scénic. Il est équipé d'une boîte de vitesses séquentielle à 4 rapports.

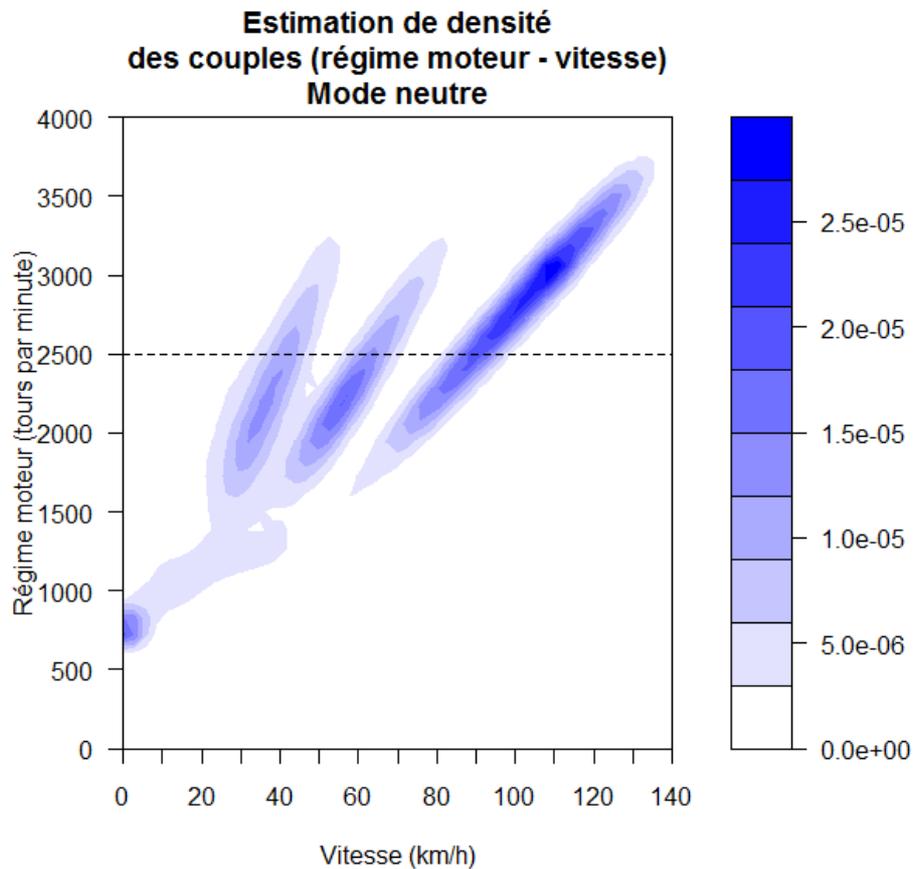


Véhicule Gerico

Pour l'expérimentation, il a été développé une IHM affichant la vitesse et le rapport de boîte conseillés. De plus, le système Gerico émet des messages d'alerte afin de permettre au conducteur d'anticiper certaines situations (tourne-à-droite, intersections,...) et d'adapter son allure en conséquence.

6.1 - Boîte de vitesses

Le véhicule GERICO est équipé d'une boîte de vitesses séquentielle à 4 rapports. Comme les boîtes de vitesses manuelles comptent généralement 5 ou 6 vitesses, nous étudions le fonctionnement du moteur afin de lier le rapport de boîte avec des plages de vitesse.



Sur la figure ci-dessus, nous avons représenté une estimation de densité des couples de points (régime moteur – vitesse).

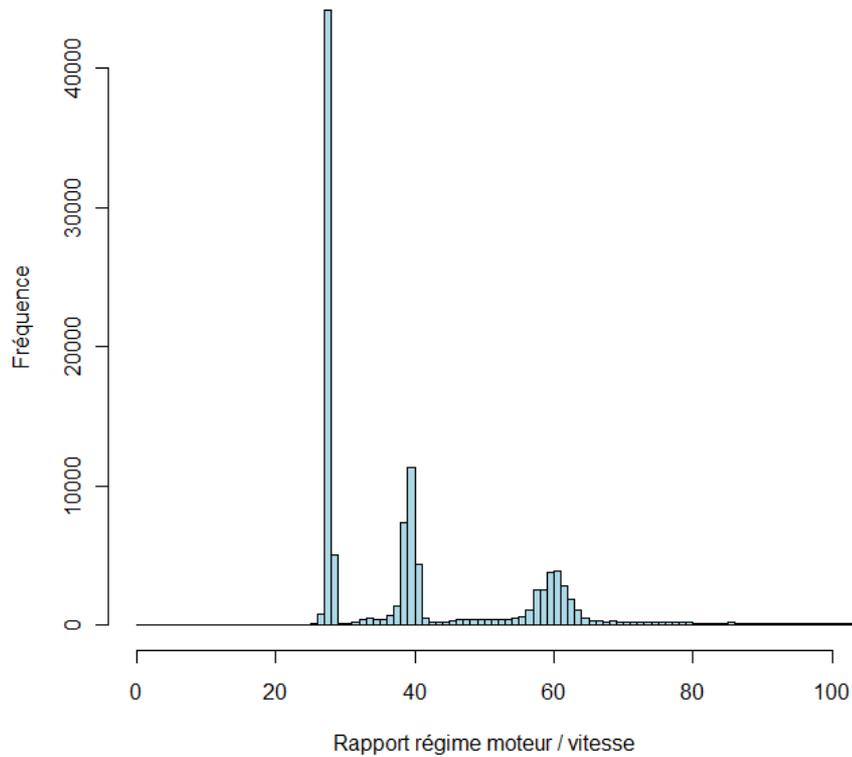
Sur le graphique apparaissent 4 nuages de points :

- le premier nuage correspondant à l'arrêt du véhicule. Il s'agit du point mort.
- le deuxième nuage où le véhicule se trouve en seconde. La vitesse varie entre 20 et 50 km/h.
- le troisième nuage où le véhicule se trouve en 3ème. La vitesse varie entre 30 et 80 km/h
- le 4ème nuage correspond au rapport 4.

Nous notons que le nuage correspondant au 1^{er} rapport n'apparaît pas puisque le temps passé en première hors arrêt est faible.

Pour un rapport donné, le régime moteur est proportionnel à la vitesse. Nous pouvons estimer ce coefficient en traçant l'histogramme du rapport entre le régime moteur et la vitesse (la régression linéaire nous fournit des résultats erronés en raison de données bruitées).

Histogramme Régime moteur / vitesse



Les 3 modes de la distribution des rapports régime moteur / vitesse correspondent aux rapports 2, 3 et 4.

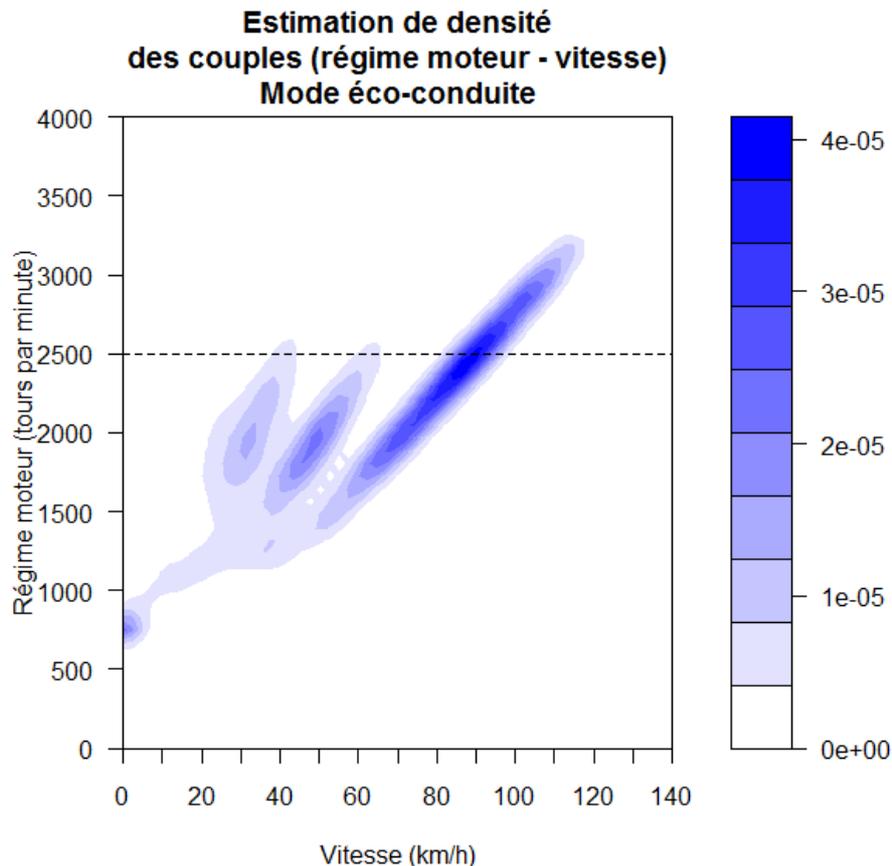
Dans le tableau ci-dessous nous donnons pour chaque rapport de boîte le coefficient k correspondant au rapport entre le régime moteur et la vitesse. Nous donnons aussi la vitesse associée au régime moteur 2000 tours.min⁻¹ et 2500 tours.min⁻¹.

Rapport de boîte	Coefficient	Vitesse (rpm = 2000)	Vitesse (rpm = 2500)
1	122	16 km/h	20 km/h
2	60.5	33 km/h	41 km/h
3	39.5	51 km/h	63 km/h
4	28	71 km/h	89 km/h

Pour un moteur essence, il est conseillé de passer au rapport plus élevé lorsque le régime moteur est supérieur 2500 tours.min⁻¹ (2000 tours.min⁻¹ pour les moteurs diesel). D'après le tableau ci-dessus, pour le véhicule Gerico, il est conseillé de passer la 3ème vitesse lorsque la vitesse est supérieure à

33 km/h et de passer à la quatrième lorsque la vitesse est supérieure à 51 km/h.

Pour le mode éco-conduite, nous obtenons le graphique suivant.

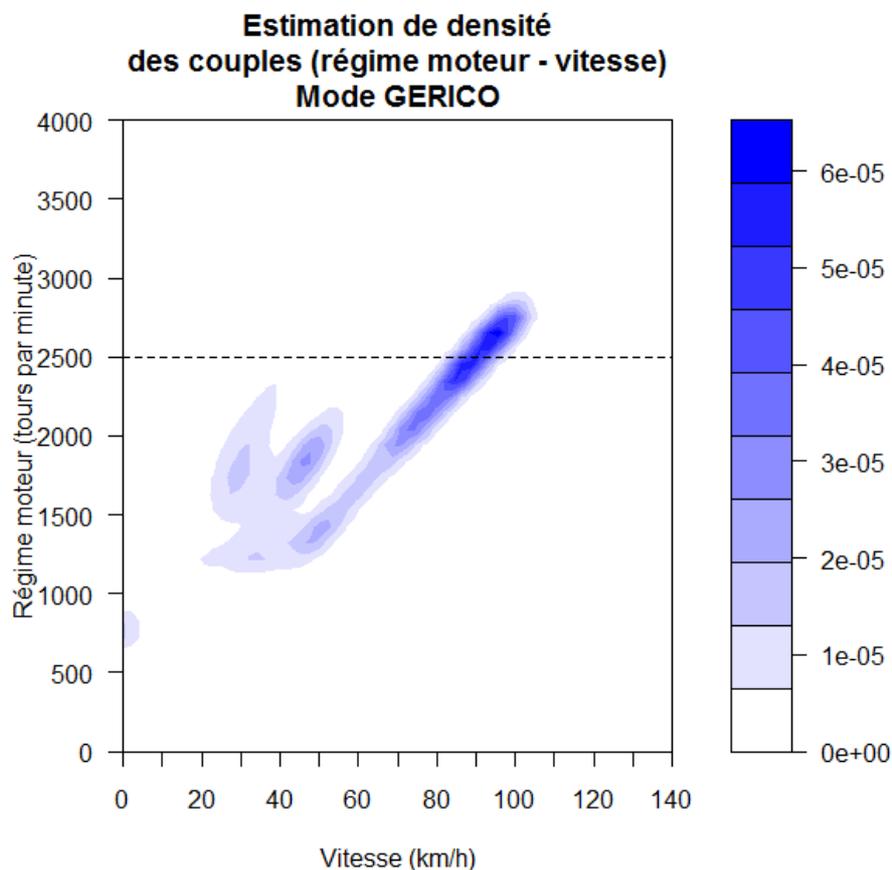


Nous nous apercevons qu'en mode « Eco-conduite » les expérimentateurs appliquent bien la règle d'éco-conduite consistant à utiliser le rapport de boîte le plus haut possible.

Rapport	% temps Régime moteur			
	> 2000 tr/min		> 2500 tr/min	
	Neutre	Eco-conduite	Neutre	Eco-conduite
Rapport 2	62.06%	40.35%	29.84%	7.51%
Rapport 3	73.18%	39.91%	32.74%	5.41%
Rapport 2 et 3	67.44%	40.11%	31.24%	6.35%

D'après le tableau ci-dessus, pour les rapports 2 et 3, le temps passé où le régime moteur est supérieur à 2000 tr/min est de 6.4 % en mode « Eco-conduite » contre 31.24 % en mode neutre. Nous notons aussi une très forte diminution des temps passés où le régime moteur est supérieur à 2000 tr/min. Pour les rapport 2 et 3, en mode « Eco-conduite », le pourcentage de temps passé où le régime est supérieur à 2000 tr/min est de 40.1 % contre 67.4% en mode neutre.

Pour le mode Gerico, nous obtenons le graphe suivant :



Nous notons que pour le mode Gerico, pour des vitesses inférieures à 70 km/h, le régime moteur varie entre 1000 et 2000 tours/min. Le mode Gerico incite donc fortement les expérimentateurs à rouler à bas-régime.

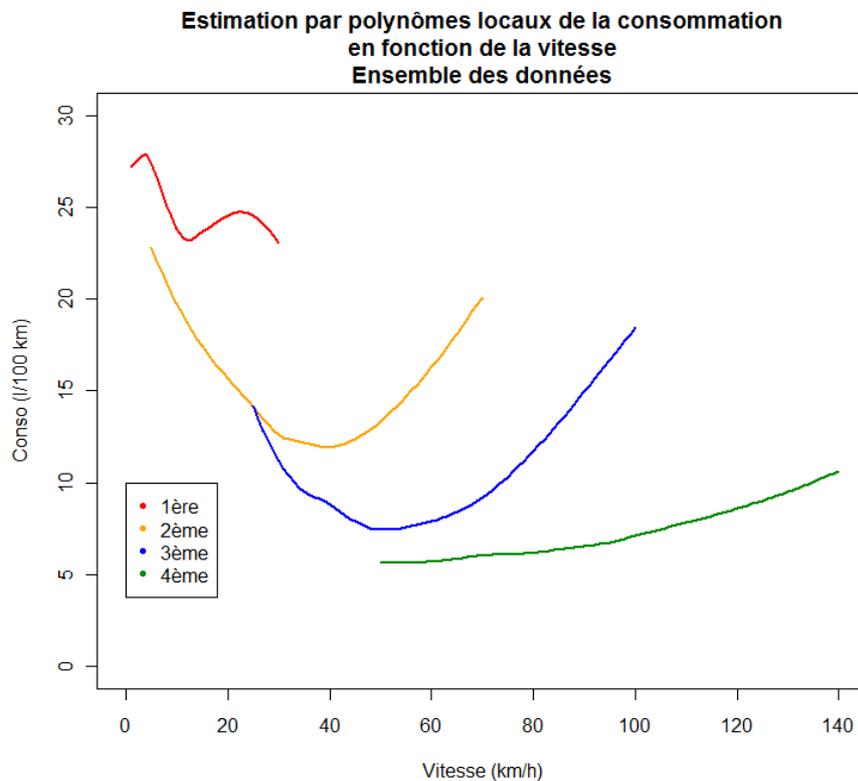
Rapport	% temps Régime moteur			
	> 2000 tr/min		> 2500 tr/min	
	Neutre	Gerico	Neutre	Gerico
Rapport 2	62.06%	32.07%	29.84%	6.94%
Rapport 3	73.18%	20.53%	32.74%	3.04%
Rapport 2 et 3	67.44%	25.57%	31.24%	4.74%

D'après le tableau ci-dessus, pour les rapports 2 et 3, le temps passé où le régime moteur est supérieur à 2000 tr /min est de 25.57 % contre 67.44 % en mode neutre et 40.1 % en mode éco-conduite.

6.2 - Consommation et vitesse

Nous étudions la relation entre la consommation et la vitesse. Pour un rapport donné, la consommation est corrélée avec la pédale d'accélération.

Pour estimer la consommation en fonction de la vitesse, nous utilisons des estimateurs fondés sur des polynômes locaux. Pour obtenir des courbes assez régulières nous utilisons des polynômes de degré 2 et la taille du voisinage pour l'estimation inclut 50 % des données de l'échantillon. Nous obtenons alors le graphique suivant :



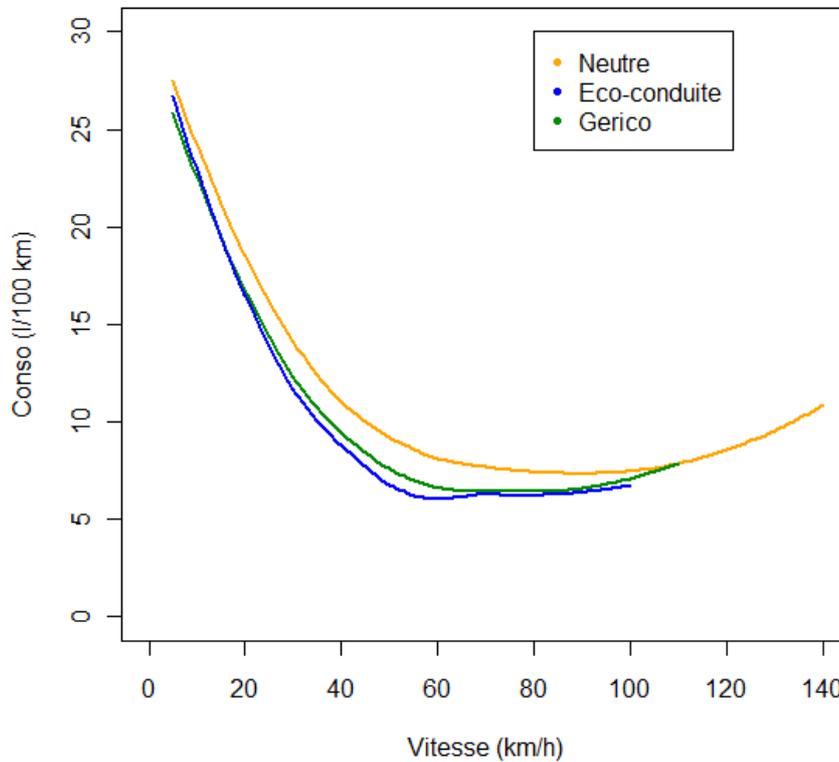
Nous notons que la consommation est très élevée en première. Elle est très nettement supérieure à 20 l/100 km.

En 2ème, la consommation est optimale lorsque la vitesse du véhicule se situe entre 30 et 50 km/h.

En 3ème, la consommation est optimale entre 40 et 60 km/h.

Nous procédons au même exercice que précédemment mais sans prendre en compte le rapport de boîte et en dissociant les modes de conduite.

Estimation par polynômes locaux de la consommation en fonction de la vitesse



Nous retrouvons la courbe classique consommation-vitesse que nous trouvons dans la littérature.

La consommation est faible pour des vitesses comprises entre 50 et 90 km/h.

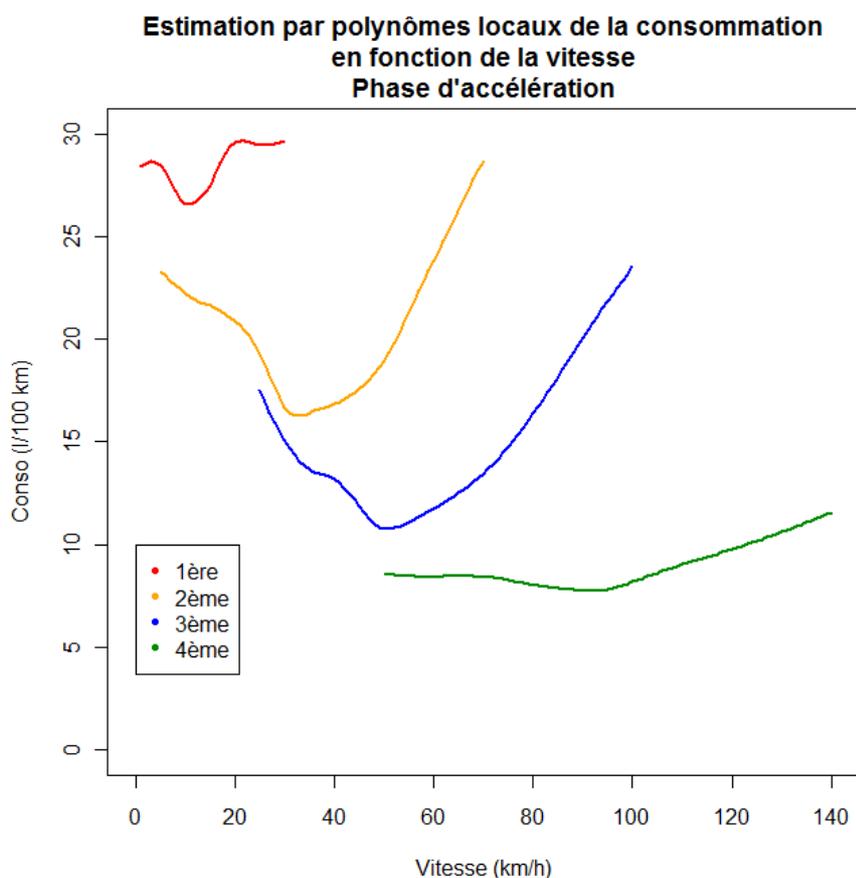
En dessous de 50 km/h, la consommation décroît avec la vitesse. Au delà de 90 km/h, la consommation croît en fonction de la vitesse.

La consommation est plus faible pour les deux modes Eco-conduite et le mode Gerico puisque d'une part les expérimentateurs sont incités à utiliser le rapport de boîte le plus haut possible et d'autre part ils adoptent une conduite beaucoup plus souple que dans le mode neutre.

Nous notons que la vitesse pour laquelle on obtient le minimum de consommation diffère selon le mode de conduite. En effet, en théorie le minimum de consommation est observé sur le rapport le plus élevé à des régimes moteur faibles.

6.3 - Phase d'accélération

Nous traçons les courbes consommation vitesse lorsque l'accélération est positive. L'idée est de déterminer quelles sont les plages de vitesse optimales pour changer de rapport lors des phases d'accélération.



D'après le graphique ci-dessus, pour optimiser sa consommation de carburant, en phase d'accélération, pour le véhicule Gerico, il faut passer la troisième lorsque la vitesse est supérieure à 30 km/h et la quatrième lorsque la vitesse est supérieure à 50 km/h.

7 - Consommation sur l'ensemble du trajet

7.1 - Approche classique

Mode	Consommation (l/100 km)	
	Moyenne	Écart-type
Neutre	9.1	0.4
Eco-conduite	8.0	0.4
GERICO	7.6	0.2
Ensemble	8.4	0.7

En moyenne, sur l'ensemble du trajet, la consommation moyenne est de 9.1 l/100 km avec un écart-type de 0.4 l/100km.

Après formation à l'éco-conduite, la consommation moyenne est de 8 l/100 km soit un gain de 12 %.

Avec le système GERICO, la consommation moyenne est de 7.6 l/100 km, soit un gain de 16 %.

Nous effectuons une ANOVA (analyse de variance) à un facteur sur les données de consommation. La p-valeur retournée par ce test est de 2.2e-16 (df = 2, F =109.5). Cette valeur très basse permet de dire que les 3 modes de conduite ont une influence sur la consommation.

7.2 - Approche GEE

Précédemment, nous avons considéré les échantillons « Neutre », « Eco-conduite » et « Gerico » comme indépendants. Dans cette partie, nous envisageons la consommation de carburant comme une série temporelle. Pour un conducteur ayant effectué deux trajets, l'un sans formation à l'éco-conduite » et le second après formation, la consommation à l'instant t_1 correspond à la consommation de carburant sans formation à l'éco-conduite, et la consommation à l'instant t_2 , la consommation de carburant après formation à l'éco-conduite. Cette approche permet de mesurer l'évolution de la consommation de carburant sur un même parcours avant et après

7.2.1 - Comparaison mode neutre et mode éco-conduite

Nous notons y_{ct} , la consommation de carburant moyenne du sujet c au temps t.

Le modèle de consommation s'écrit :

$$\begin{aligned} \mu_t &= \beta_0 \text{ si } t=1 \\ \mu_t &= \beta_0 + \beta_1 \text{ si } t=2 \end{aligned}$$

équivalent à $\mu_t = \beta_0 + \beta_1 t_1$ où $t_1 = 0$ pour le trajet effectué sans formation et $t_1 = 1$ pour le trajet effectué après formation à l'éco-conduite.

le paramètre β_0 correspond à la consommation moyenne sans formation à l'éco-conduite.

Le paramètre β_1 correspond à la variation de consommation due à la formation à l'éco-conduite.

Nous utilisons le pack « geepack » du logiciel R pour calculer les deux paramètres β_0 et β_1 .

Les modèles marginaux nécessitent la définition d'une matrice de corrélation.

Nous supposons que cette matrice de corrélation ne dépend que d'un seul paramètre α .

Paramètre	Estimation	Erreur standard	Wald	Pr(> W) (p-value)
β_0	9.06	0.12	5734.3	< 2e-16
β_1	-1.05	0.11	93.5	< 2e-16

7.2.2 - Comparaison mode neutre et mode gérico

Paramètre	Estimation	Erreur standard	Wald	Pr(> W) (p-value)
β_0	9.07	0.08	13812	< 2e-16
β_1	-1.46	0.1	195	< 2e-16

8 - Consommation par type d'infrastructure

8.1 - Approche classique

Pour chaque trajet et pour chaque type d'infrastructure, nous calculons la consommation moyenne exprimée en l/100 km. Nous calculons la consommation moyenne pour les 3 types de conduite. Nous réalisons une analyse de variance pour chaque type d'infrastructure afin d'avoir une première indication sur l'influence du mode de conduite sur la consommation pour chaque type d'infrastructure.

Infrastructure		Consommation (l/100km)							
		Neutre conso	Eco-conduite		Gérico		Anova		Ensemble conso
			conso	% gain	conso	% gain	F	P-valeur	
Urbain		10.3	9.2	11.1%	8.8	14.8%	35.6	1.5E-11	9.6
Péri-urbain		9.3	8.2	11.5%	7.7	17.5%	69.0	1.2E-17	8.6
Autoroute + VRU	Voies rapides	6.9	6.3	9.1%	6.1	12.3%	22.6	2.2E-08	6.6
	Autoroute	8.3	7.1	13.9%	6.6	20.4%	81.5	2.0E-19	7.6
	Transition	5.8	5.2	9.7%	4.7	18.0%	17.0	8.1E-07	5.4
	Voies décélération	5.0	4.1	18.6%	4.3	14.4%	2.8	6.9E-02	4.6
	Voies accélération	17.7	14.2	19.7%	13.8	21.6%	45.5	1.3E-13	15.9
Péage	Accélération péage	13.3	10.3	22.2%	9.5	28.0%	59.2	4.4E-16	11.6
	Décélération péage	5.4	4.9	8.7%	5.0	7.4%	5.0	9.0E-03	5.1
Les côteaux	Descentes	4.1	3.5	14.2%	3.4	16.4%	14.1	6.4E-06	3.8
	Légèrement vallonnée	8.8	7.8	11.6%	7.4	15.6%	45.8	1.1E-13	8.2
	Montées	16.3	15.6	4.3%	15.2	6.6%	22.0	3.3E-08	15.9

Nous observons des gains positifs quel que soit le type d'infrastructure.

En milieu urbain la consommation moyenne est de 10.3 l/100. Le gain en mode éco-conduite est de 11 % et de près de 15 % en mode Gérico.

En milieu péri-urbain, la consommation est un peu plus faible qu'en milieu urbain. Elle est de 9.3 l/100 km en mode neutre et respectivement 8.2 l/100 km et 7.7 l/100 km dans les modes éco-conduite et Gérico.

Sur autoroute et voies rapides urbaines, la consommation est plutôt faible. Les expérimentateurs ayant circulé pendant les heures creuses, ils n'ont pas subi de congestion ou d'importants ralentissements sur voies rapides.

Nous notons que les gains de carburant les plus élevés sont réalisés pour les phases d'accélération

« voie d'accélération » et accélération après péage. Pour la phase d'accélération après péage, le gains sont de 22 % pour le mode éco-conduite et de 28 % pour le mode Gerico. Ces gains importants s'expliquent par une optimisation de la consommation de carburant (passage à un rapport élevé et conduite plus souple) et une vitesse finale moins élevée.

Concernant les coteaux, en montée les gains sont relativement faibles puisqu'une partie de l'énergie fournie par le moteur est utilisée pour monter.

Nous notons que les p-valeurs retournées par l'analyse de la variance sont plus élevées mais sont néanmoins faibles pour les infrastructures de type phase de décélération ainsi que les descentes des coteaux.

Dans la suite du document, nous essaierons de déterminer quelles sont les raisons principales du gain de consommation. Est-ce dû à des vitesses moins élevées, à l'utilisation d'un rapport de boîte plus approprié ou à des anticipations des conditions de trafic ?

8.2 - Approche GEE

Infrastructure	Paramètre β_0			Paramètre β_1			Paramètre de corrélation		
	Estimation	Erreur standard	P-value	Estimation	Erreur standard	P-value	Estimation	Erreur standard	
Urbain	10.06	0.13	<2e-16	-0.9	0.18	4.80E-7	0.47	0.07	
Péri-urbain	9.31	0.18	<2e-16	-1.09	0.18	9.30E-10	0.22	0.22	
Autoroute + VRU	Voies rapides	6.92	0.13	<2e-16	-0.62	0.14	1.40E-5	0.14	0.22
	Autoroute	8.36	0.15	<2e-16	-1.26	0.21	1.10E-9	-0.09	0.26
	Transition	5.71	0.18	<2e-16	-0.5	0.22	2.20E-2	0.19	0.16
	Voies accélération	17.92	0.45	<2e-16	-3.73	0.43	<2e-16	0.46	0.14
	Voies de décélération	4.87	0.25	<2e-16	-0.78	0.26	2.30E-3	0.44	0.2
Péage	Décélération péage	5.44	0.16	<2e-16	-0.56	0.17	1.00E-3	0.33	0.22
	Accélération péage	13.3	0.46	<2e-16	-3	0.52	6.90E-9	0.03	0.17
Les coteaux	Montées	16.33	0.19	<2e-16	-0.73	0.18	4.00E-5	0.49	0.28
	Légèrement vallonnée	8.91	0.18	<2e-16	-1.15	0.2	7.50E-9	0.03	0.26
	Descentes	4.15	0.16	<2e-16	-0.67	0.19	3.30E-4	0.08	0.17

Nous ne commentons pas les résultats obtenus puisqu'ils ressemblent fortement à ceux obtenus avec l'approche classique.

9 - Méthodologie

9.1 - Lissage des données de consommation et de vitesse

Les données de consommation sont données avec une précision de 80 mm³ par unité de temps. Nous souhaitons calculer en chaque point d'un trajet, une consommation locale exprimée en l / 100 km.

9.1.1 - Estimation et lissage des données de vitesse

9.1.1.a - Régression par polynômes locaux

Nous utilisons l'estimateur de Nadaraya-Watson afin de lisser les données de vitesse. La vitesse est calculée par la formule suivante :

$$V(x) = \frac{\sum K\left(\frac{x_i - x}{h(x)}\right) v(x_i)}{\sum K\left(\frac{x_i - x}{h(x)}\right)}$$

avec $K(u) = e^{-\frac{u^2}{2}}$, un noyau gaussien et $h(x)$, le paramètre de lissage qui varie en fonction de la vitesse du véhicule.

$h(x) = \begin{cases} v(x) dt & \text{si } v(x) \geq 10 \text{ m.s}^{-1} \\ 10 & \text{si } v(x) < 10 \text{ m.s}^{-1} \end{cases}$ Avec $dt = 1$ seconde et $v(x)$ la vitesse de l'enregistrement de la position x .

9.1.2 - Lissage des données de consommation

La consommation d'un véhicule exprimée en l/100 km et donnée par la formule :

$$C_{\text{moy}}(\text{section}) = \frac{\int_0^T c(t) dt}{D} \quad \text{où } c(t) \text{ est la consommation instantanée du véhicule, } T \text{ est le temps de}$$

parcours de la section et D la longueur de la section.

Dans le cas discret, la relation précédente devient :

$$C_{\text{moy}}(\text{section}) = \frac{\sum \Delta c(t_i)}{\sum \Delta d(t_i)}$$

où :

- $\Delta c(t_i)$ est la quantité de carburant consommée entre les instants t_{i-1} et t_i ;
- $\Delta d(t_i)$ est la distance parcourue entre les instants t_{i-1} et t_i ;
- $T = t_0, \dots, t_n$ correspond aux instants où le véhicule circule sur la section.

Nous désirons connaître la consommation (exprimée en l/100km) d'un véhicule en tous points du trajet. La consommation délivrée par un système de mesure est généralement une quantité de carburant consommée sur un intervalle de temps. Nous pouvons calculer la consommation instantanée en divisant cette quantité de carburant par la distance parcourue entre deux instants. Mais ce calcul de la consommation instantanée pose des problèmes lorsque le véhicule circule à des vitesses faibles ou lorsqu'il est à l'arrêt (la consommation instantanée exprimée en l/100 km tend

vers l'infini lorsque la vitesse du véhicule tend vers 0).

Dans la suite du document, nous cherchons à estimer une consommation locale à l'aide d'estimateurs basés sur des noyaux.

Pour estimer la consommation, nous choisissons d'utiliser une version modifiée de l'estimateur de Nadaraya-Watson.

L'estimateur de Nadaraya-Watson est donné par la formule suivante :

$$C(x) = \frac{\sum K\left(\frac{x_i - x}{h(x)}\right) c(x_i)}{\sum K\left(\frac{x_i - x}{h(x)}\right) d(x_i)}$$

où $c(x_i)$ est la consommation instantanée du véhicule exprimée en l/100 km à la position x_i et K est une fonction noyau et h le paramètre de lissage. Cette formule ne peut être utilisée en l'état puisque la consommation instantanée (si elle est exprimée en l/100 km) tend vers plus l'infini lorsque la vitesse du véhicule tend vers 0.

C'est pourquoi nous préférons utiliser la formule suivante qui correspond au rapport de deux estimateurs de Nadaraya-Watson.

$$C(x) = \frac{\sum K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \Delta c(x_i)}{\sum K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \Delta d(x_i)}$$

où

$\Delta c(x_i)$ est la quantité de carburant consommé entre les instants t_{i-1} et t_i et

$\Delta d(x_i)$ est la distance parcourue entre les instants t_{i-1} et t_i .

Nous utilisons comme noyau, le noyau gaussien :

$$K(u) = \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)$$

Nous choisissons comme paramètre h une fonction dépendant de la vitesse du véhicule.

$$h(x) = \begin{cases} v(x) dt & \text{si } v(x) \geq 10 \text{ m.s}^{-1} \\ 10 & \text{si } v(x) < 10 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad \text{avec } dt = 1 \text{ seconde et } v(x) \text{ la vitesse de l'enregistrement de la position } x.$$

Nous avons choisi comme valeur minimale de h 10 mètres afin d'éviter que la consommation instantanée ne soit trop élevée lorsque le véhicule est à l'arrêt ou circule à vitesse faible.

9.1.3 - Estimation de la consommation sur une section

9.1.3.a - Estimation de la consommation sur une section pour un conducteur

Pour estimer la consommation sur une section, comme les consommations instantanées sont très variables, nous travaillons sur la consommation cumulée du véhicule le long de la section que nous lisons en utilisant un estimateur fondé sur des polynômes locaux de degré 1. Nous calculons ensuite la consommation sur une section par différence des estimations de la consommation cumulée en fin et début de section.

$$conso_{section} = \frac{predict(conso_{cumulée}, x_2) - predict(conso_{cumulée}, x_1)}{x_2 - x_1}$$

9.1.3.b - Estimation de la consommation sur une section pour un ensemble d'expérimentateurs

Pour estimer la consommation sur une section pour un ensemble d'expérimentateurs, nous procédons comme suit. Pour chaque usager, nous estimons la consommation cumulée en utilisant des polynômes locaux de degré 1 sur la section étudiée puis nous calculons une consommation cumulée sur la section pour chaque mètre parcouru par le véhicule.

A partir des consommations cumulées calculées tous les mètres, nous déterminons à l'aide du critère de validation croisée, les paramètres optimaux (degré des polynômes et paramètre de lissage) pour estimer la consommation cumulée à partir d'une régression par polynômes locaux. A partir du modèle de consommation cumulée, nous déduisons la consommation des expérimentateurs sur la section en utilisant la formule précédente (différence des estimations de consommation cumulée divisée par la longueur de la section).

9.2 - Analyse en composantes principales

9.2.1 - Réduction des variables

Avant d'effectuer une Analyse en Composantes Principales, il est parfois nécessaire de réduire le nombre de variables ou indicateurs. En effet, lorsque le tableau contient des variables fortement corrélées, cette corrélation influence grandement la construction des axes de l'ACP.

La réduction des variables permet de regrouper un ensemble de variables en clusters. Pour chaque cluster, il faut choisir la variable la plus représentative du cluster. Cette variable peut être choisie manuellement ou automatiquement dépendant des « distances » des variables avec les autres clusters.

Pour réduire le nombre d'indicateurs ou de variables, nous procédons à une classification ascendante hiérarchique des variables. Le logiciel R dispose de packages et de fonctions permettant d'effectuer une CAH sur les variables.

Concernant les variables non sélectionnées, nous pouvons les considérer comme variables

supplémentaires, c'est à dire qu'elles n'interviennent pas dans l'élaboration des axes principaux mais sont tout de même représentées dans le plan des variables de l'ACP.

Dans ce chapitre, nous ne décrivons pas comment fonctionne la classification hiérarchique des variables.

Une CAH nécessite de définir une métrique entre clusters.

Dans le cas d'une matrice de dissimilarité, les plus utilisées sont :

- le saut minimum (single linkage) $d(A, B) = \min_{i \in A, j \in B} (d_{i,j})$
- le saut maximum (complete linkage) $d(A, B) = \max_{i \in A, j \in B} (d_{i,j})$
- le saut moyen (group average linkage) $d(A, B) = \frac{1}{\text{Card}(A)\text{Card}(B)} \sum_{i \in A, j \in B} d_{i,j}$

Pour réaliser une classification des variables, nous utilisons comme matrice de dissimilarité $d = 1-r^2$ avec r la matrice de corrélation et comme métrique entre clusters le saut moyen.

Pour choisir la variable la plus représentative d'un cluster, nous calculons pour chaque variable l'indice silhouette [Rousseeuw, 1987] défini par la formule :

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))}$$

avec $a(i) = \frac{1}{\text{Card}(C)} \sum_{j \in C, j \neq i} d(i, j)$, moyenne des dissimilarités entre i et les éléments du cluster

C contenant i

et $b(i) = \min_c (d(i, C))$, la distance minimale entre la variable i et les autres clusters.

9.3 - Modèles d'accélération et décélération Akçelik

Le modèle polynomial des profils d'accélération et de décélération écrit par Akçelik et Biggs (1987) s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned}a(t) &= r a_m \theta (1 - \theta^m)^2 \\v(t) &= v_i + 3.6 r a_m t_{a/d} \theta^2 [0.5 - 2\theta^m / (m+2) + \theta^{2m} / (2m+2)] \\L(t) &= v_i t / 3.6 + r a_m t_{a/d}^2 \theta^3 [1/6 - 2\theta^m / ((m+2)(m+3)) + \theta^{2m} / ((2m+2)(2m+3))]\end{aligned}$$

Les paramètres des modèle peuvent être calculés à partir des 4 données : vitesse initiale, vitesse finale, temps d'accélération ou de décélération et distance d'accélération ou de décélération.

Par la suite nous comparerons les estimations des profils de vitesse avec les modèles d'Akçelik. Nous ne cherchons pas à modéliser l'accélération et la décélération avec le modèle décrit ci-dessus. Nous nous contenterons de comparer nos résultats de modélisation de profils de vitesse avec les modèles d'Akçelik.

9.4 - Classification des trajectoires

Pour classifier les trajectoires de vitesses ou de consommations, nous utilisons l'algorithme k-means de classification de données appliqué aux trajectoires. Il est implémenté dans le package « kml » du logiciel R.

Nous utilisons comme distance entre 2 trajectoires T_i et T_j la distance euclidienne définie par :

$$D(T_i, T_j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_{ik} - y_{jk})^2}$$

Nous utilisons le package kml (k-means for longitudinal data) du logiciel R. Ce package utilise le critère de Calinski-Harabasz afin d'obtenir le nombre de clusters optimal.

9.5 - Régression par polynômes locaux

9.5.1 - Principe de la régression par polynômes locaux

Soit un échantillon statistique $(y_i, x_i)_{i=1, \dots, n}$ de n vitesses échantillonnées dans l'espace. Considérons le modèle suivant : $y_i = \mu(x_i) + \varepsilon_i$ avec μ l'estimateur recherché et ε_i les résidus i.i.d. (indépendant et identiquement distribués) centrés et réduits de variance constante σ^2 .

En un point x , nous définissons une taille de voisinage $h(x)$ et une fenêtre de lissage $(x-h(x), x+h(x))$. Pour estimer $\mu(x)$, nous n'utilisons que les données situées dans la fenêtre de lissage que nous pondérons par une fonction poids en fonction de la distance entre l'observation et le point

x.

$$w_i(x) = K\left(\frac{x_i - x}{h(x)}\right)$$

Localement, au voisinage de x, nous approximations $\mu(x)$ par un polynôme de degré p.

$$\mu(x) \approx \sum_{i=0}^p \beta_i (x - x_0)^i$$

où les coefficients $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$ sont obtenus par minimisation du critère des moindres carrés.

$\min_{\beta} \sum_{i=1}^n w_i(x) (y_i - \sum_{j=1}^n \beta_j (x_i - x)^j)^2$ avec $w_i(x) = K\left(\frac{x_i - x}{h(x)}\right)$ et K est une fonction de pondération et h est le paramètre d'échelle.

9.5.2 - Choix des paramètres de la régression par polynômes locaux

La régression par polynômes dépend de 3 paramètres :

- le degré p des polynômes locaux ;
- le paramètre de lissage h(x) ;
- la fonction de pondération W

Nous utilisons comme fonction de pondération la fonction classique tri-cube définie ci-dessous :

$$K(x) = \begin{cases} (1 - |x|^3)^3 & \text{pour } |x| < 1 \\ 0 & \text{pour } |x| \geq 1 \end{cases}$$

Le paramètre h(x) est choisi de manière à ce que la fenêtre de lissage contienne un nombre fixe de points.

Pour déterminer le degré des polynômes et le paramètre h, nous utilisons le critère de validation croisée suivant :

$$GCV(\mu) = n \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \mu(x_i))^2}{(n - \nu_1)^2}$$

où $\nu_1 = \text{tr}(H)$ correspond à la trace de la matrice chapeau et aux degrés de liberté de l'estimateur.

10 - Profil de consommation

10.1 - Méthodologie

10.1.1 - Profil de consommation par trajet

Pour estimer la consommation en une abscisse du trajet, nous calculons pour chaque trajet et pour chaque mètre parcouru, la consommation locale dont le calcul est décrit précédemment.

10.1.2 - Profil de consommation médian

En chaque point du trajet Gerico, nous choisissons comme consommation représentative de chaque mode de conduite la médiane des consommations.

La médiane nous a semblé un meilleur indicateur que la moyenne puisque lorsque la vitesse du véhicule est nulle ou faible, nous obtenons des consommations excessives.

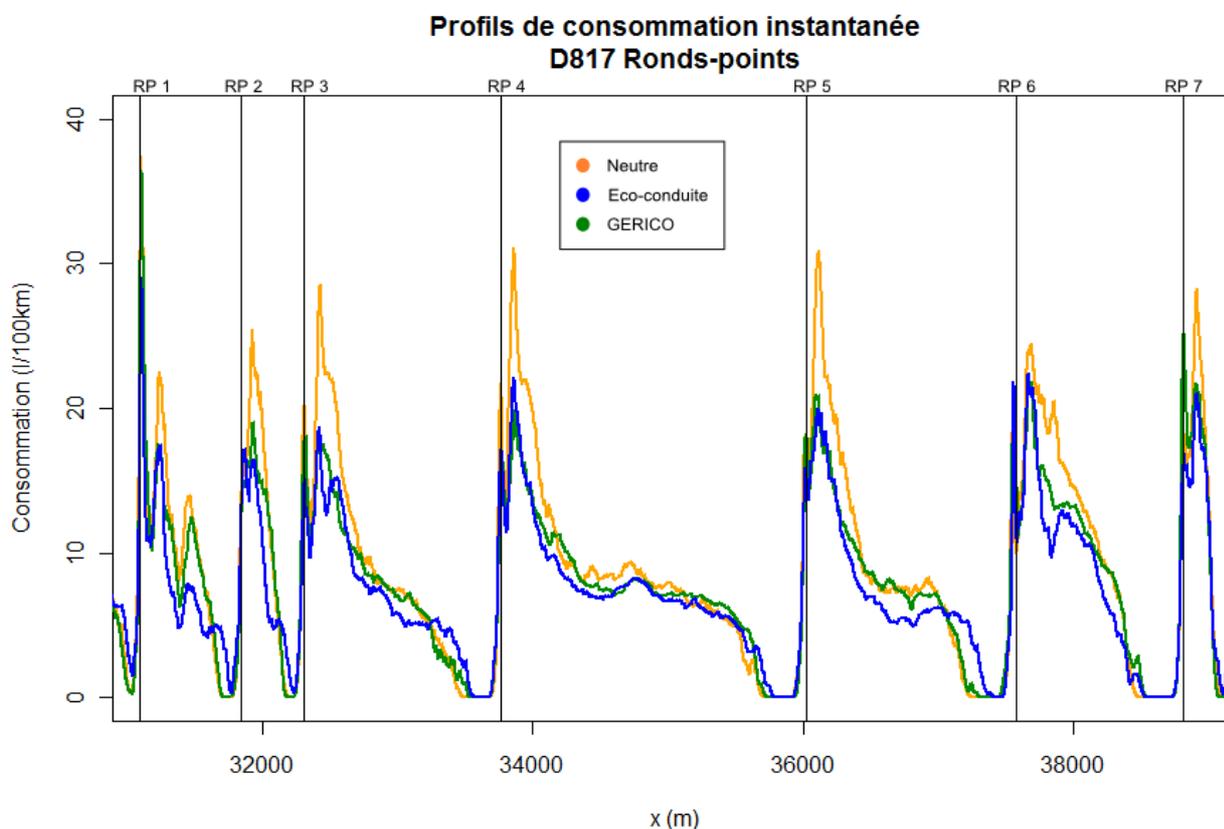
L'avantage de l'indicateur médiane est de pouvoir filtrer des situations ou événements extérieurs.

L'inconvénient de la médiane est de ne pas prendre en compte tous les expérimentateurs, mais de prendre la consommation médiane pour chaque point du trajet. Par exemple au niveau d'un feu si 60 % des expérimentateurs s'arrêtent, le profil de consommation médian correspondra à l'arrêt du véhicule au feu. Sinon le profil de consommation médian correspondra au passage au vert.

10.2 - Profil 2D

10.2.1 - Départementale D817

La section de départementale D817 du parcours GERICO est une route à 2x2 voies à chaussées séparées où la vitesse réglementaire varie entre les valeurs 70, 90 et 110 km/h dépendant de l'environnement.



Le rond-point 1 correspond au rond-point d'où les véhicules accèdent à la départementale D120. Entre le rond-point RP1 et le rond-point RP2 se trouve un passage à niveau ce qui explique le léger saut de consommation dû au ralentissement des véhicules au passage à niveau. En approche de ronds-points nous notons une diminution de la consommation liée au relâchement de la pédale d'accélération et l'utilisation des freins ou du frein-moteur.

Lors du franchissement du rond-point, le profil de consommation présente deux pics de consommation, le premier correspondant à l'insertion du véhicule sur le rond-point, le deuxième à la sortie du véhicule du rond-point. Entre deux ronds-points, la consommation des usagers varie entre 6 et 8 litres.

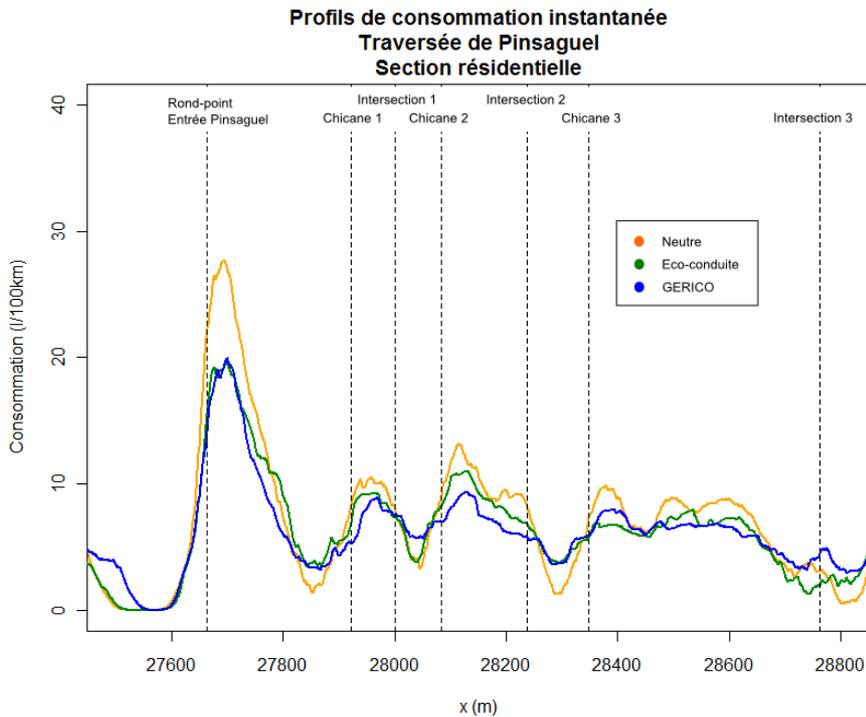
Nous notons que la formation à l'éco-conduite ou l'utilisation de l'aide à l'éco-conduite permet d'économiser du carburant notamment lors des phases d'accélération où la consommation instantanée est moins élevée.

Dans la suite du document, nous évaluerons la surconsommation des véhicules et nous étudierons plus en détail la consommation des véhicules au niveau d'un rond-point dans un environnement péri-urbain.

10.2.2 - Traversée de Pinsaguel

10.2.2.a - Section résidentielle

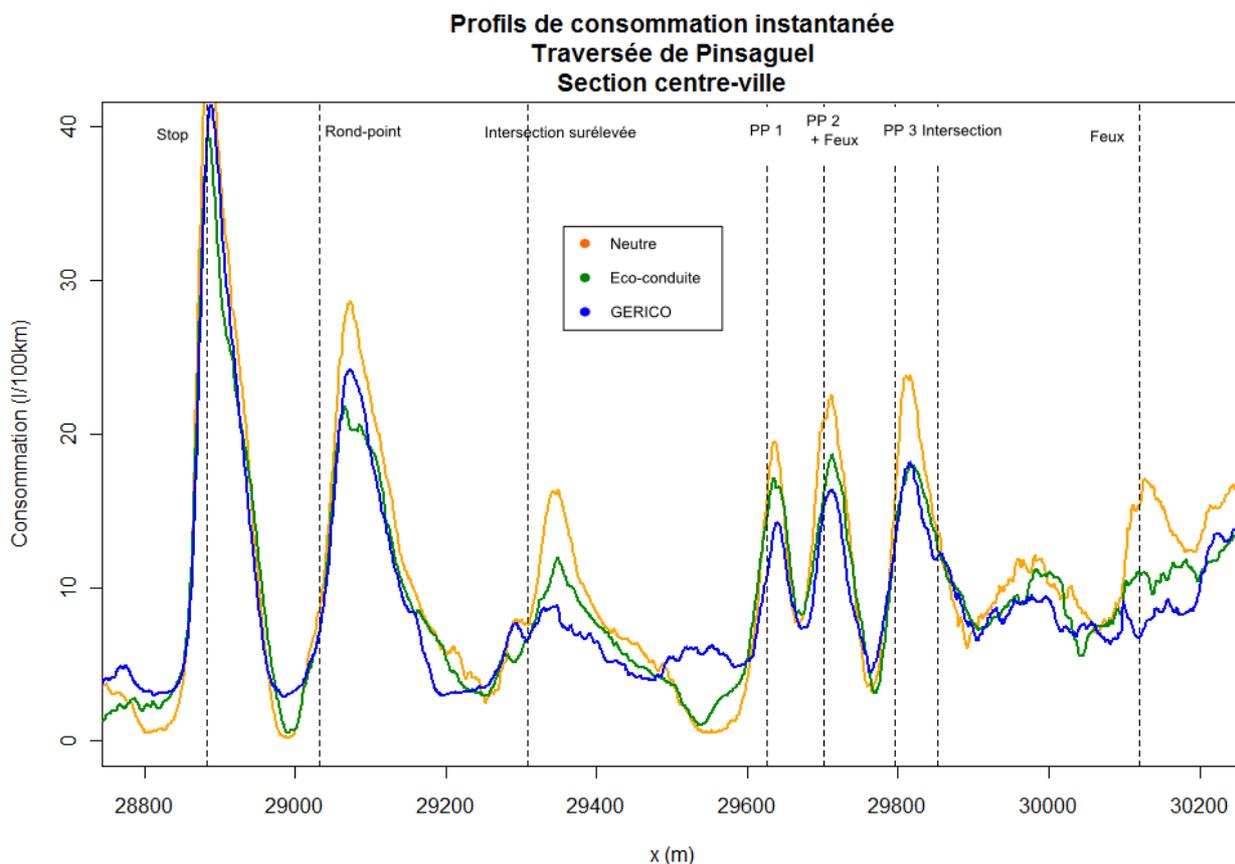
Sur cette section, sont positionnées des chicanes dont le rôle est de ralentir les usagers.



*Chicane
Pinsaguel*

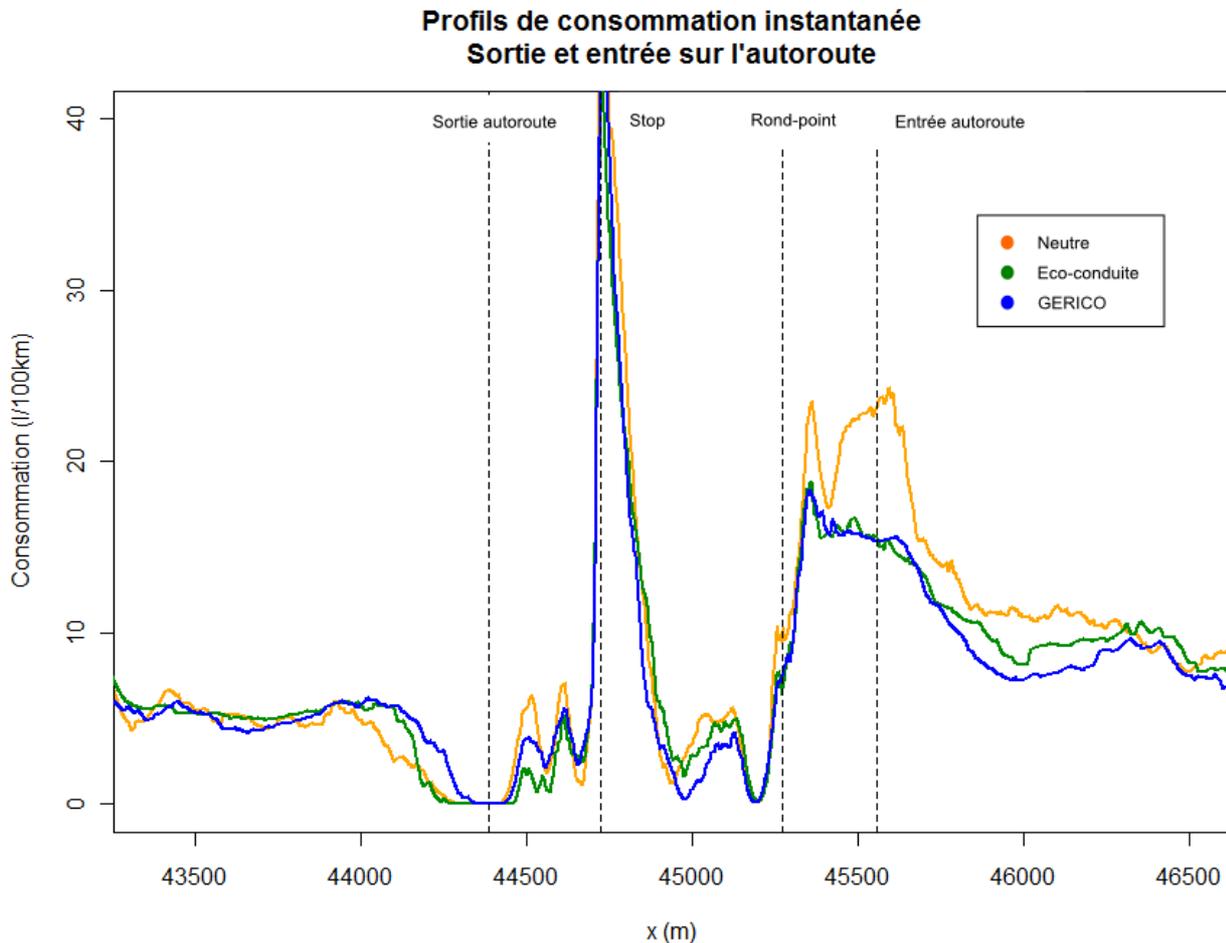
A l'approche de chicanes, les véhicules sont obligés de ralentir voire de s'arrêter puisqu'ils n'ont pas la priorité sur le flux de véhicules antagoniste. Comme la section étudiée est en partie rectiligne, favorisant la vitesse, et est située en zone résidentielle. Les chicanes permettent de « casser » la vitesse des usagers, mais cela génère des surconsommations de carburant même si les véhicules ne s'arrêtent pas pour franchir les obstacles.

10.2.2.b - Section centre-village



Comme pour la section précédente, nous observons des surconsommations de carburant lors de franchissement d'éléments d'infrastructures tels que l'arrêt à un stop, le franchissement d'un rond-point, le franchissement d'un passage piéton surélevé ou la traversée d'une intersection à feux. C'est au niveau du stop que la surconsommation est la plus élevée puisque tous les véhicules sont obligés de s'arrêter et c'est aux vitesses faibles dans la phase d'accélération que la consommation est la plus élevée.

10.2.3 - Sortie et entrée sur l'autoroute



Sur le graphique ci-dessus, nous avons représenté la consommation instantanée de carburant lors de l'utilisation de l'échangeur Muret-sud pour effectuer un demi-tour.

En fin de bretelle de sortie de l'autoroute est positionné un stop. Nous observons une consommation excessive puisque les véhicules doivent marquer un temps d'arrêt et qu'il s'agit d'un tourne à gauche. Concernant l'insertion sur l'autoroute, l'accélération est progressive et nous n'observons pas de pic de consommation semblable à ceux observés en milieu urbain.

10.3 - Profils 3D

Nous sectionnons le parcours en sections de 10 mètres. Pour chaque section, nous calculons une consommation moyenne, médiane des consommations de l'ensemble sur cette section.

Nous représentons la consommation moyenne selon l'axe z que nous visualisons sous Google Earth.

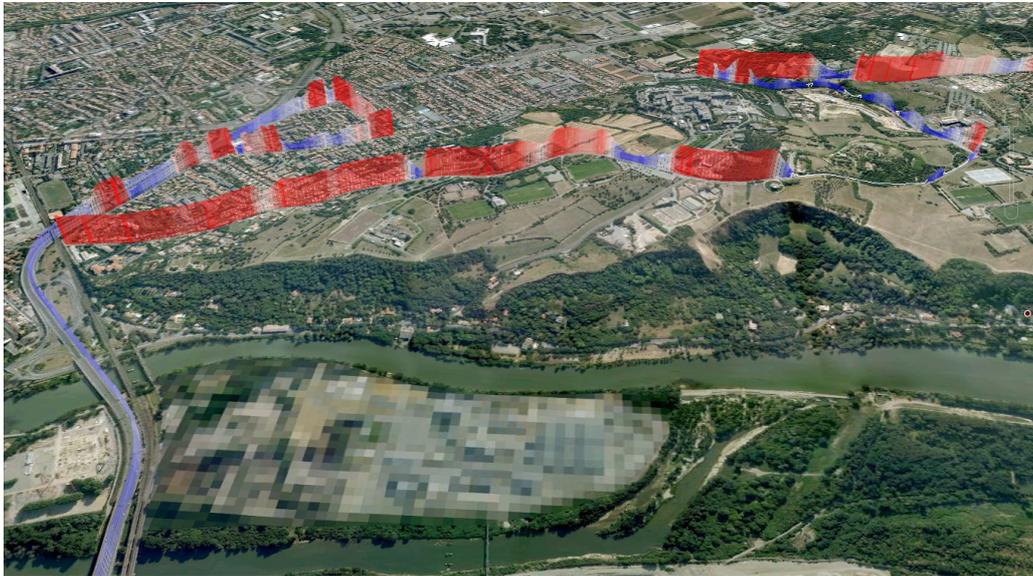


Illustration 1: Coteaux de Pech-David

Sur le graphique ci-dessus, à gauche (franchissement de la Garonne), nous observons que la consommation est faible sur la rocade. Au premier plan, nous pouvons visualiser la consommation de carburant lors de la montée des coteaux de Pech-David (consommation très élevée) et de la descente vers l'hôpital de Ranguel (consommation faible voire nulle sur certaines sections de la descente).



Illustration 2: Ronds-points

Sur le graphique ci-dessus, au premier plan, nous visualisons la consommation des

expérimentateurs sur la départementale RD817 menant à Muret où se trouvent des ronds-points. Nous pouvons voir les surconsommations de carburant pendant la traversée des ronds-points puis durant la phase d'accélération les suivant. Au second plan figure l'autoroute avec notamment la présence du péage. Nous pouvons visualiser l'évolution de la consommation de carburant durant les phases de décélération et d'accélération avant et après le péage.



Illustration 3: Traversée de Lacroix-Falgarde et de Pinsaguel

Sur le graphique ci-dessus, nous visualisons l'évolution de la consommation lors de la traversée de Lacroix-Falgarde (arrière plan) et de Pinsaguel. Les surconsommations observées correspondent au franchissement d'éléments tel que le stop, les feux tricolores, les passages piétons surélevés, les ronds-points,...

11 - Indicateurs

Dans le tableau ci-dessous, nous renseignons l'ensemble des paramètres calculés pour chaque trajet et pour chaque type d'infrastructure. Ces indicateurs seront utilisés par la suite lorsque nous effectuerons des analyses en composantes principales des trajets des expérimentateurs.

Nom	Statistique	Description	Commentaire
Consommation	Moyenne	Consommation	Exprimée en l/100 km
Durée		Durée du trajet	Exprimé en secondes
PKE (Positive Kinetic Energy)			cf. formule ci-dessous
RPA		Relative Positive Acceleration	cf. formule ci-dessous

nbstops		Nombre de stops par kilomètres	
Vitesses	Moyenne, écart-type, 1 ^{er} quartile, médiane, 3 ^{ème} quartile, 85 ^{ème} percentile	Statistiques distribution des vitesses	Les vitesses sont exprimées en km/h
Vitesses relatives (écart entre la vitesse et la vitesse réglementaire)	Moyenne, écart-type, 1 ^{er} quartile, médiane, 3 ^{ème} quartile, 85 ^{ème} percentile		Nous ne gardons que les vitesses supérieures à 10 km/h
Accélération	Moyenne, écart-type, 1 ^{er} quartile, médiane, 3 ^{ème} quartile, 85 ^{ème} percentile		Les accélérations sont exprimées en m.s-2
rpm	Moyenne, écart-type, 1 ^{er} quartile, médiane, 3 ^{ème} quartile, 85 ^{ème} percentile	Régime moteur	
tbrake		% temps freinage	% temps où la pédale de frein est enfoncé
tgearbrake		% temps frein moteur	% temps où le conducteur n'appuie ni sur la pédale d'accélération, ni sur la pédale de frein
tacc		% temps pédale d'accélération enfoncé	
pacc	Moyenne, écart-type, 1 ^{er} quartile, médiane, 3 ^{ème} quartile, 85 ^{ème} percentile	Enfoncement de la pédale d'	Varie de 0 à 100
NbChgtRpt	Moyenne	Nombre de changement de rapports de boîte par km parcouru	
rpm_plus	Moyenne	Régime moteur moyen passage au rapport supérieur	
rpm_minus	Moyenne	Régime moteur moyen au passage au rapport inférieur	
rpm_12		Régime moteur moyen. Passage du rapport 1 au rapport 2	
rpm_23		Régime moteur moyen. Passage du rapport 2 au rapport 3	

rpm_34		Régime moteur moyen. Passage du rapport 3 au rapport 4	
rpm_21		Régime moteur moyen. Passage du rapport 2 au rapport 1	
rpm_32		Régime moteur moyen. Passage du rapport 3 au rapport 2	
rpm_43		Régime moteur moyen. Passage du rapport 4 au rapport 3	
Arrêt	%	% de temps passé à l'arrêt	
timeg1	%	Pourcentage de temps passé en 1ère	
timeg1plus		Pourcentage de temps passé en 1ère hors arrêt	
timeg2	%	Pourcentage de temps passé en 2ème	
timeg3	%	Pourcentage de temps passé en 3ème	
timeg4	%	Pourcentage de temps passé en 4ème	
index_gear_rpm		Moyenne des régimes moteur pondérée	cf. formule ci-dessous

L'indice PKE

L'indicateur PKE (positive kinetic energy) est donné par la formule suivante :

$$PKE = \sum_0^T (v_f^2 - v_s^2) / x$$

Cet indicateur est lié à l'énergie cinétique du véhicule ($E_c = \frac{1}{2} m v^2$). Nous sommes l'énergie cinétique nécessaire pour un véhicule pour passer d'une vitesse v_s à une vitesse v_f .

L'indice RPA

L'indice RPA (relative positive acceleration) est donné par la formule suivante :

$$RPA = \frac{1}{x} \int_0^T v a + dt$$

où T durée totale du trajet et x la distance parcourue

Avec a+ l'accélération positive $a^+ = \max(0;a)$

Dans le cas discret, la formule devient :

$$RPA = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n v_i \times \max(0; (v_i - v_{i-1}))$$

Nous remarquons que la formule ci-dessus est très semblable à celle du calcul de l'indice PKE

L'indice « régime moteur »

L'indice « index_gear_rpm » est donné par la formule suivante :

$$indexGearRPM = \frac{1}{T} \frac{\sum t_i rpmAvg_i}{3500}$$

avec t_i le temps passé avec le rapport i

et rpmAvg_i, la moyenne des régimes moteur avec le rapport i

et T : le temps de parcours du trajet

12 - Analyse globale en composantes principales

Nous effectuons une analyse en composantes principales sur les indicateurs de consommation calculés précédemment. L'analyse est effectuée avec le logiciel R en utilisant le package FactoMineR.

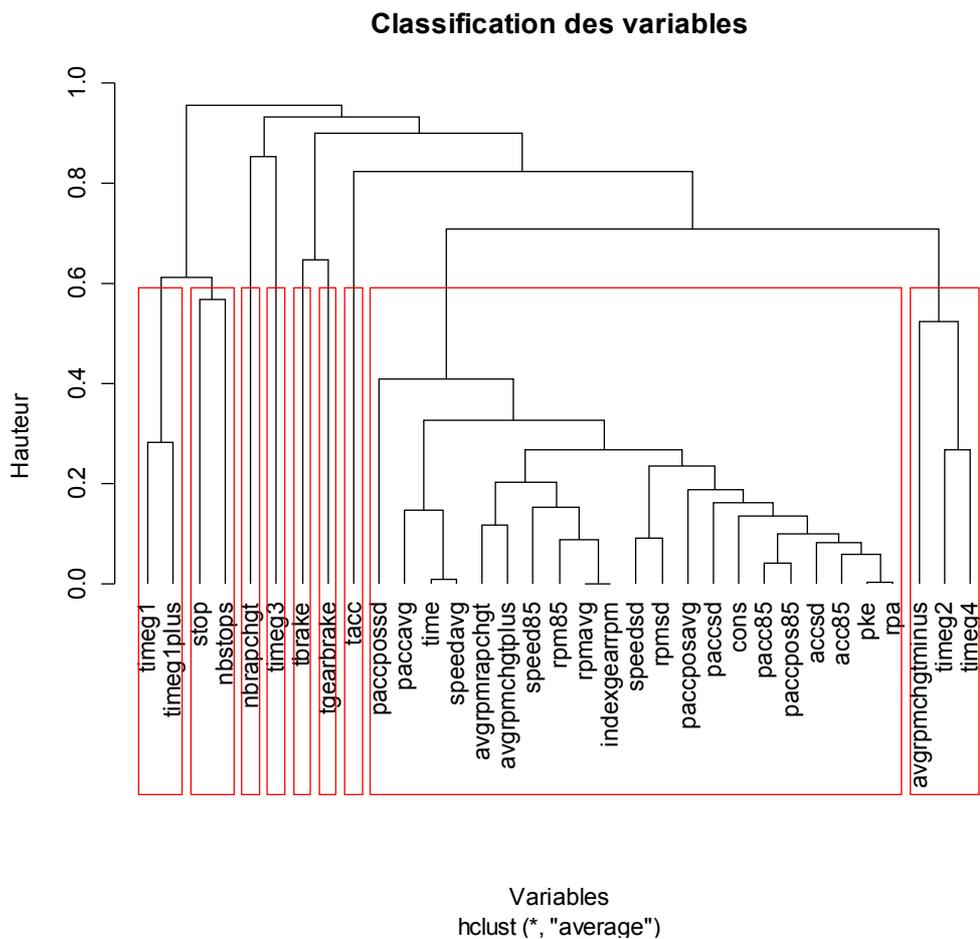
Les lignes du tableau correspondent aux trajets effectués par les expérimentateurs et les colonnes correspondent aux variables et indicateurs cités précédemment. Comme un certain nombre de variables et indicateurs sont fortement corrélés, nous réalisons au préalable une réduction du nombre des variables pour d'une part limiter le nombre de variables utilisé pour l'ACP, et d'autre part éviter que des variables fortement corrélées jouent un rôle trop important dans la détermination des axes de l'ACP.

La variable à expliquer étant la consommation moyenne des véhicules, nous ne la prenons pas en compte dans l'ACP. La consommation est une variable illustrative que nous représenterons dans le graphe des variables et que nous projeterons sur les axes des l'ACP.

Le tableau de données contient 2 variables quantitatives supplémentaires : le type d'infrastructure et le mode de conduite.

12.1 - Réduction des variables

Nous utilisons la fonction `varclus` du package `Hmisc` du logiciel R pour effectuer une Classification Ascendique hiérarchique des variables.



Nous choisissons de classer nos variables en 9 catégories comme indiqué sur le diagramme ci-dessus.

Le regroupement des variables est cohérent mis à part pour le dernier cluster dans lequel sont regroupées les variables : moyenne des régimes moteur lors d'un passage de boîte inférieur, temps passé en seconde et temps passé en 4ème.

Groupe 1

Groupe	Variable	Largeur silhouette
1	pacc85	0.741
	accsd	0.738
	pke	0.722
	rpa	0.721
	paccpos85	0.712
	rpm85	0.692
	cons	0.687
	speed85	0.665
	acc85	0.664
	paccavg	0.636
	paccsd	0.634
	time	0.603
	speedavg	0.593
	speedsd	0.579
	rpmavg	0.545
	indexgearrpm	0.545
	rpmsd	0.540
	avgrpmchgplus	0.520
	paccposavg	0.513
	paccpossd	0.453
	avgrpmrapchgt	0.224

Dans le premier cluster sont regroupées 21 variables (64 % des variables) que nous avons classifiées selon la largeur de leur silhouette. Dans ce cluster, figure la variable consommation. Nous avons donc dans ce groupe les variables corrélées (positivement ou négativement) à la consommation. Nous trouvons dans ce groupe les deux indicateurs PKE et RPA, les indicateurs liés à l'enfoncement de la pédale d'accélération (85ème centile, écart-type), les indicateurs de régime moteur, le temps de parcours (corrélé négativement), les indicateurs liés à la vitesse (vitesse moyenne, 85^{ème} centile des vitesse et l'écart type).

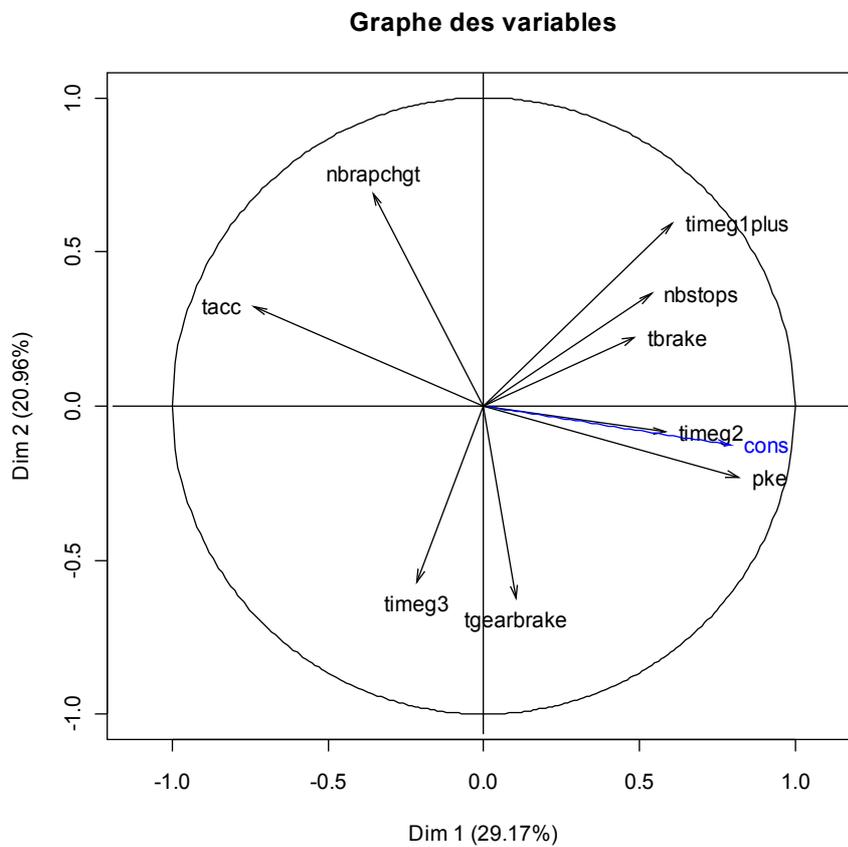
Pour le premier cluster il est difficile de choisir la variable la plus représentative du cluster. D'après la classification des variables selon la largeur de la silhouette, la variable candidate est le 85ème centile de la pédale d'accélération. Nous préférons cependant prendre l'indicateur PKE comme variable représentative du premier groupe puisqu'il s'agit d'un indicateur d'éco-conduite fondé sur la vitesse, très utilisé. L'indicateur PKE est simple à calculer et ne nécessite pas d'instrumentation lourde : un simple GPS suffit.

Autres groupes

Groupe	Variable	Largeur silhouette
2	nbstops	0.106
	stop	0.035
3	tbrake	0.000
4	tgearbrake	0.000
5	tacc	0.000
6	nbrapchgt	0.000
7	timeg2	0.515
	avgrpmchgtminus	0.322
	timeg4	0.312
8	timeg1plus	0.638
	timeg1	0.339
9	timeg3	0.000

Pour les autres groupes, nous choisissons la variable ayant la largeur de silhouette la plus élevée.

12.1.1 - Représentation des variables et axes principaux



1^{er} axe

Variable	Corrélation	P-valeur
pke	0.82	2.7E-17
cons	0.79	1.2E-15
timeg1plus	0.61	5.5E-8
timeg2	0.58	2.2E-7
nbstops	0.54	2.6E-6
tbrake	0.48	3.3E-5
nbrapchgt	-0.35	3.2E-3
tacc	-0.74	1.3E-12

D'après le graphique ci-dessus, nous notons que le premier axe est corrélé avec la consommation. Les variables corrélées positivement avec le premier axe sont :

- l'indice PKE ($r=0.82$);
- la consommation ($r=0.79$) ;
- le temps passé en première hors arrêt du véhicule ($r=0.61$);
- le temps passé en seconde ($r=0.58$) ;
- le nombre d'arrêts au kilomètre ($r=0.54$).

Nous notons que le temps passé avec la pédale d'accélération est corrélé négativement avec la consommation ($r=-0.74$). Cela est dû à la configuration du parcours dont une grande partie est parcouru sur autoroute et voies rapide urbaines.

Nous remarquons que le temps passé en utilisant le frein moteur est peu lié à la consommation.

2^{ème} axe

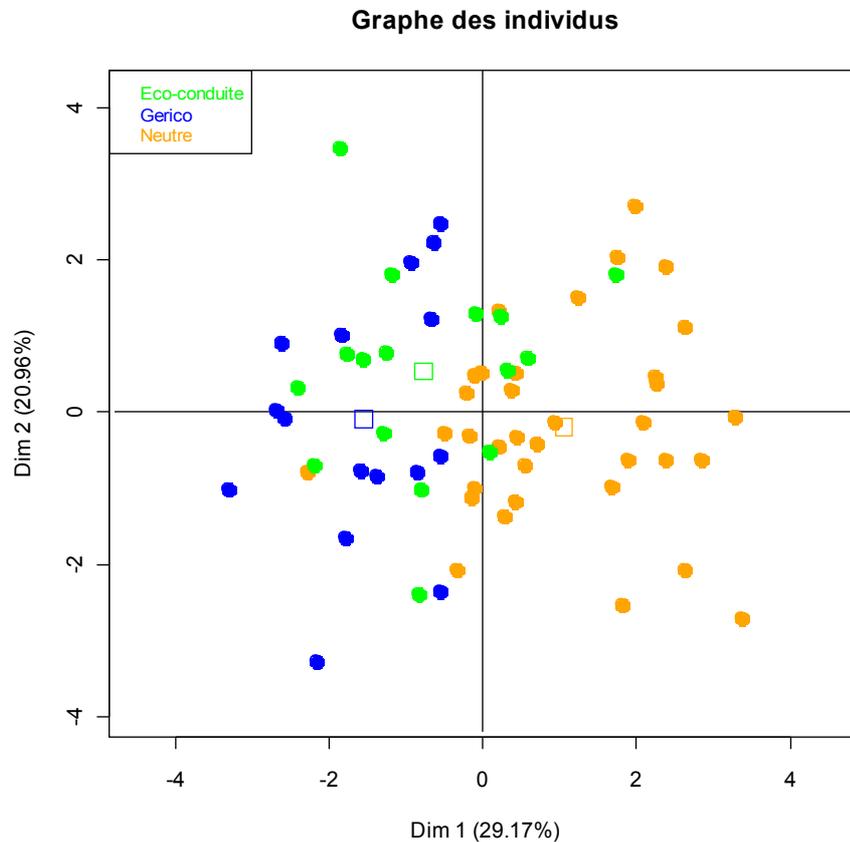
Variable	Corrélation	P-valeur
nbrapchgt	0.69	1.1E-10
timeg1plus	0.59	1.3E-7
nbstops	0.36	2.5E-3
tacc	0.32	8.0E-3
timeg3	-0.57	4.7E-7
tgearbrake	-0.62	1.8E-8

Les variables très corrélées positivement avec le second axe sont le nombre de changements de boîte et le temps passé en première hors arrêt.

Les deux variables corrélées négativement avec le second axe sont le temps passé en frein moteur ($r=-0.62$) et le temps passé en 3^{ème} ($r=-0.57$).

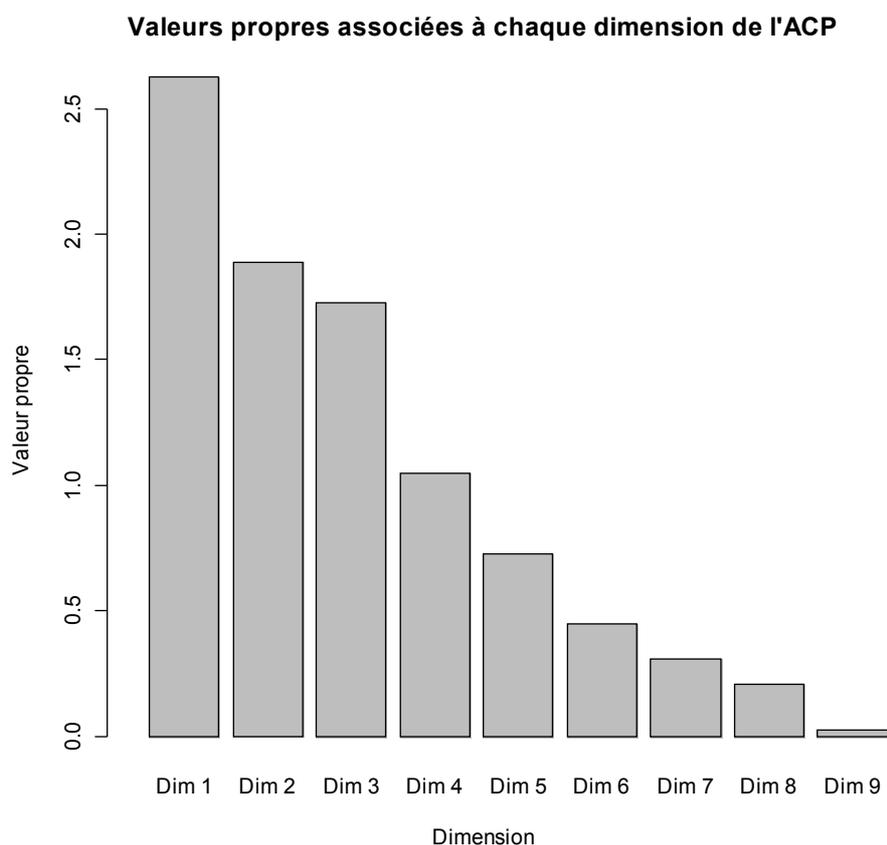
Il semble que cet axe soit lié à de la congestion ou à une circulation difficile en milieu urbain. Une circulation difficile augmente le temps passé en première et le nombre de changements de rapports et diminue le temps passé en 3^{ème} en urbain. Mais cela n'explique pas pourquoi le deuxième axe est corrélé négativement avec le temps passé en frein moteur.

12.2 - Représentation des individus



Lorsque nous représentons les individus dans le plan factoriel, nous notons que les trajets réalisés en mode neutre présentent des consommations plus élevées que dans les deux autres modes de conduites (projection des barycentres des groupes sur le premier axe de l'ACP). Notons aussi que le deuxième axe est lié au mode de conduite.

12.3 - Valeurs propres de l'ACP



D'après le graphique ci-dessus, nous observons une cassure entre la 3ème et la 4ème dimension. Nous retenons donc les 3 premiers axes qui représentent 69 % de l'inertie totale.

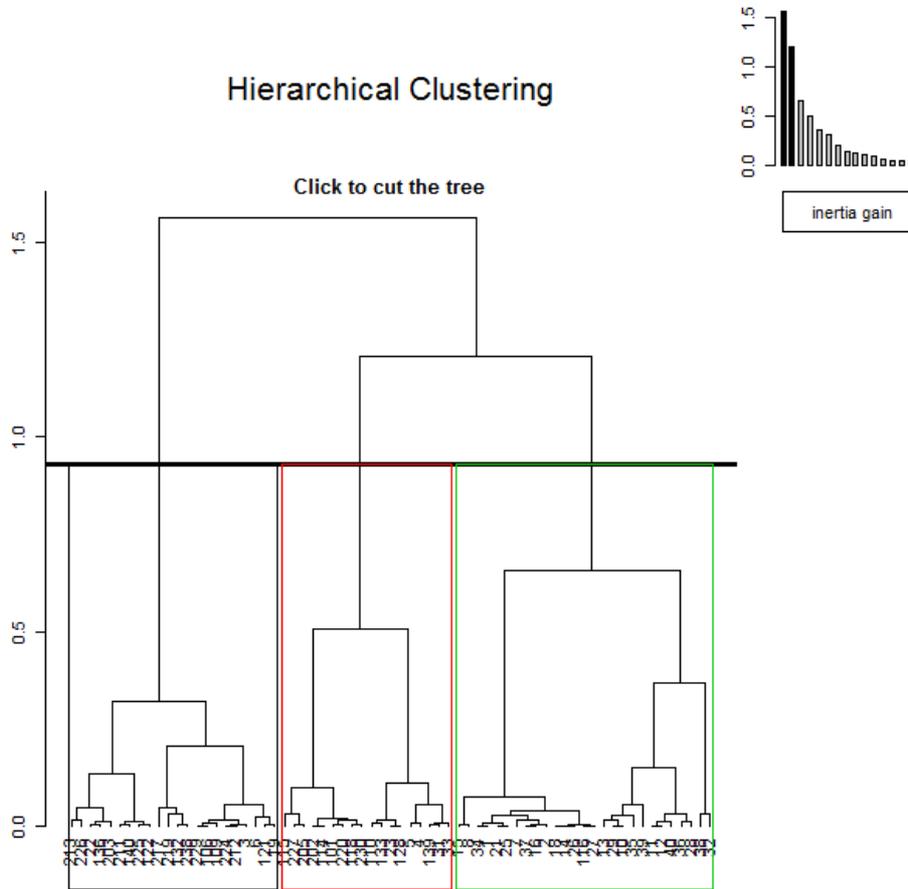
Axe	Valeur propre	% inertie	% cumulé inertie
1	2.63	29.17	29.17
2	1.89	20.96	50.13
3	1.73	19.19	69.33
4	1.05	11.66	80.99
5	0.72	8.05	89.04

12.3.1 - Classification ascendante des individus

Nous effectuons une classification hiérarchique ascendante sur les 3 premiers axes de l'ACP. Nous utilisons la fonction HCPC (classification hiérarchique sur composantes principales) du package

FactomineR.

Nous découpons l'arbre de classification en 3 groupes comme suggéré par la classification.



Mode	Nombre de trajets	Groupe		
		1	2	3
Neutre	35	6%	17%	77%
Eco-conduite	16	56%	38%	6%
Gerico	16	75%	25%	0%

Dans le premier groupe, nous trouvons 75 % des trajets effectués en mode Gerico et 56 % des trajets réalisés en mode éco-conduite. La consommation moyenne pour ce groupe est de 7.7 l/100 km.

Dans le groupe 3, nous retrouvons 77 % des trajets effectués en mode neutre et un trajet (6%) dans le mode éco-conduite où la consommation est assez élevée : 9.1 l/100 km.

Le groupe 2 est un groupe intermédiaire dont la consommation moyenne sur le trajet est de 8.2 l/100 km.

Groupe	Nombre de trajets	Consommation (l/100 km)	
		Moyenne	Écart-type
1	23	7.74	0.32
2	16	8.24	0.60
3	28	9.13	0.45

12.3.2 - Modélisation de la consommation

Comme les variables PKE et la consommation sont très corrélées ($r = 0.95$), nous choisissons le modèle très simple suivant pour estimer la consommation en fonction de la variable pke sur l'itinéraire GERICO :

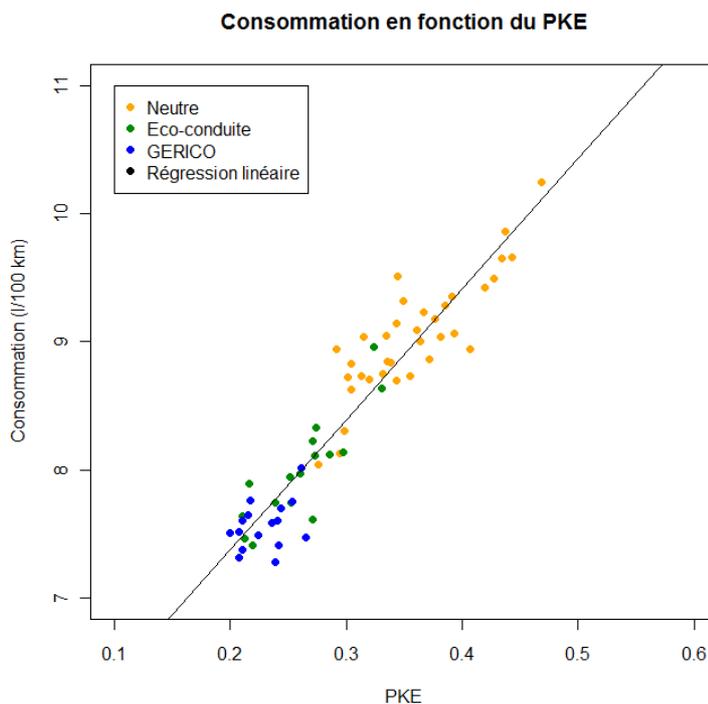
$$\text{conso} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke}$$

Les coefficients de ce modèle dépendent très fortement de la géométrie du parcours.

La régression linéaire sur les 77 conducteurs nous fournit les estimations suivantes des coefficients du modèle :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0	5.34	0.14	38.57	<2e-16
β_1	10.17	0.44	22.91	<2e-16

Le coefficient de détermination vaut $R^2 = 0.89$. Le modèle est donc bien adapté à notre échantillon. Cependant, il ne peut être généralisé à d'autres itinéraires.



Le modèle proposé permet d'estimer la consommation sur un trajet à partir de données vitesse. Nous pouvons imaginer une application d'éco-conduite prenant en entrée les coefficients de notre modèle qui estime la consommation moyenne en temps réel ou en fin de trajet. Cela permet à un volontaire ou expérimentateur de mesurer les effets bénéfiques d'une conduite économe sur leur consommation pour des trajets réguliers de type « domicile-travail ».

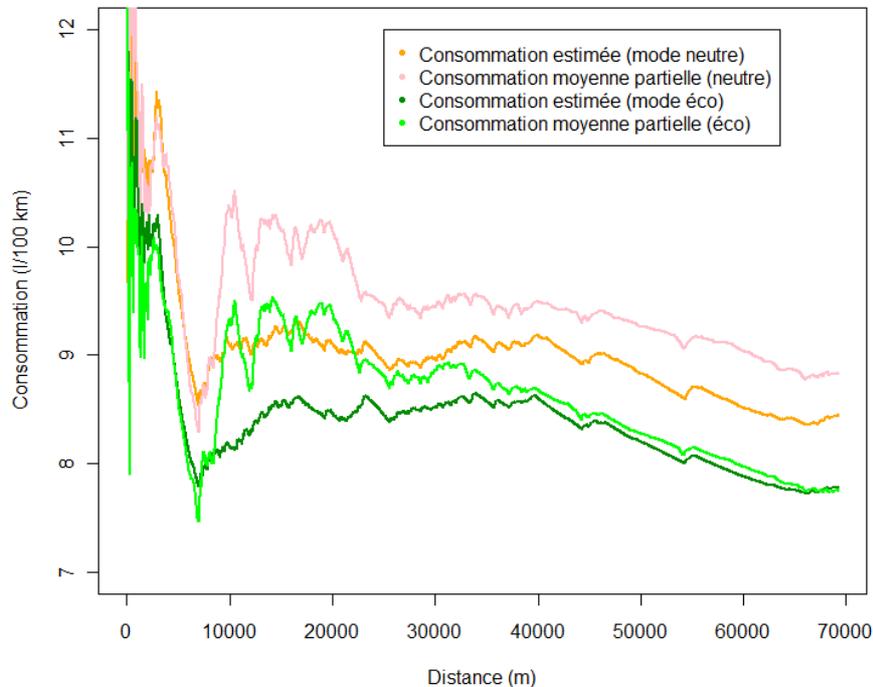
12.3.3 - Prédiction de la consommation moyenne

Dans la partie précédente, nous avons tenté de modéliser la consommation moyenne en fonction de l'indice pke. Ici, nous essayons de voir s'il est possible à partir du modèle précédent de prédire en un point du trajet la consommation moyenne du trajet. En chaque point du parcours, nous calculons l'indice pke fondé sur les vitesses instantanées du véhicule depuis le début du trajet puis nous estimons la consommation avec le modèle de consommation précédent. Nous comparons aussi la consommation estimée avec la consommation moyenne réelle du véhicule depuis le début du parcours.

Le modèle estimé n'utilise que l'indicateur PKE fondé sur les variations de vitesses au cours du trajet. Il ne prend pas en compte les temps d'arrêts, les surconsommations liées à la congestion ou à des conditions de trafic difficiles. Il en résulte que l'estimation de la consommation ne peut correspondre à la consommation réelle du véhicule. Cependant, il en fournit une bonne approximation de la consommation .

Sur les graphiques qui suivent, nous avons comparé les consommations estimées à partir de notre modèle avec la consommation moyenne calculée à partir des données du bus CAN. Nous avons choisi de représenter les consommations estimées et partielles des deux premiers conducteurs (nous n'avons pas choisi les conducteurs pour lesquels les écarts entre la consommation moyenne réelle et prédite sont les plus faibles).

Comparaison des consommations estimées et réelles

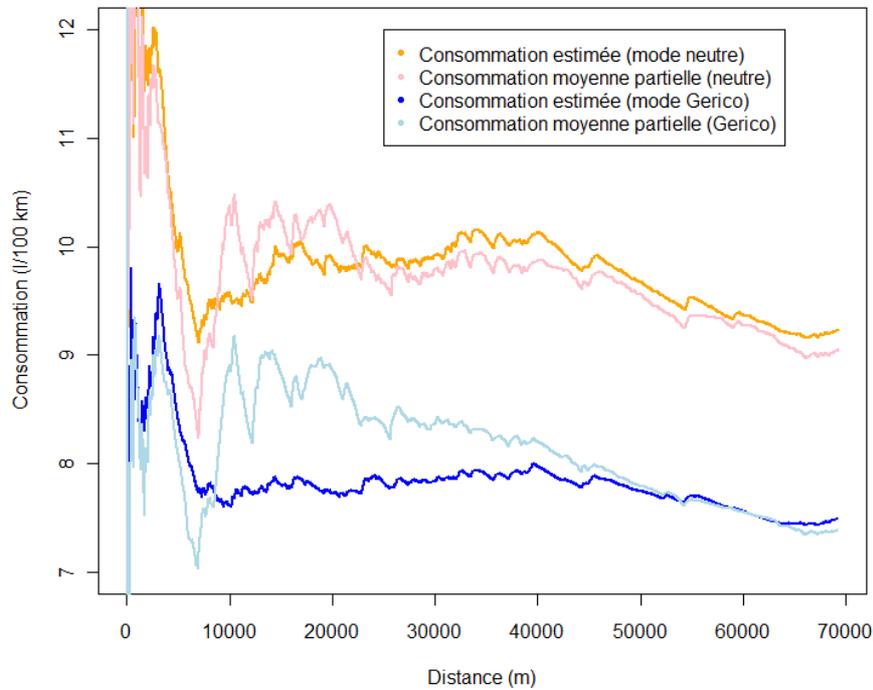


Sur les premiers kilomètres la consommation moyenne est élevée puisque le véhicule circule en milieu urbain. La consommation chute lorsque le véhicule circule sur VRU en heures creuses entre les kilomètres 3 et 7. La consommation augmente et varie fortement lors de la traversée des coteaux entre les kilomètres 9 et 23. Elle reste élevée lors de la traversée de Lacroix-Falgarde au kilomètre 26 et de Pinsaguel entre les kilomètres 27 et 31. Entre les kilomètres 32 et 39, la consommation est stable lorsque le véhicule est en environnement péri-urbain. Les faibles variations de consommation sur cette section correspondent aux traversées des ronds-points de la départementale D120. A partir du kilomètre 40, la consommation moyenne baisse de manière régulière lors du parcours sur autoroute. La consommation repart à la hausse en fin de parcours lorsque le véhicule circule à nouveau en milieu urbain.

D'après le graphique ci-dessous, en mode neutre pour le premier conducteur, nous observons une sous-estimation de 0.4 l/100km par rapport à la consommation moyenne réelle. Globalement, nous notons que la consommation estimée varie beaucoup moins que la consommation moyenne calculée depuis le début du trajet. La consommation estimée est très sensible à l'infrastructure. Au début du trajet en milieu urbain la consommation estimée est assez élevée et proche de la consommation réelle.

Nous notons que la consommation estimée varie peu lors de la traversée des coteaux puisque son calcul ne prend pas en compte le dénivelé du parcours.

Comparaison des consommations estimées et réelles



En mode Gerico, nous notons que les variations de la consommation estimée à partir du modèle sont beaucoup plus faibles qu'en mode neutre. Sur voies rapides et autoroutières ainsi qu'en milieu péri-urbain, la vitesse préconisée par la système Gerico est inférieure à la vitesse limite légale, ce qui a pour conséquence des variations de la vitesse quadratique lors des phases d'accélération et aussi lorsque la vitesse est stabilisée.

Globalement, même si la consommation estimée à partir du pke ne permet pas de restituer fidèlement la consommation, il s'agit néanmoins d'un bon indicateur de consommation. L'indice pke reflète bien le comportement de l'usager. Si en début de trajet, son indice pke est élevé, nous nous attendons à ce qu'il reste élevé tout le long du trajet.

13 - Analyse par type d'infrastructure

Comme nous l'avons dit précédemment, nous avons découpé le parcours en sections selon le type d'infrastructure : urbain, péri-urbain, autoroute, voies rapides (rocade),...

Pour chaque type d'infrastructure et pour chaque usager, nous calculons les indicateurs précédemment définis. L'indicateur est calculé sur l'ensemble des sections.

13.1 - Milieu urbain

13.1.1 - Utilisation du frein moteur

Nous appelons l'état « frein moteur » l'état du système « véhicule-conducteur » où l'utilisateur n'appuie ni sur la pédale d'accélération, ni sur la pédale de frein.

Mode	Consommation (l /100 km)	% de temps		
		Utilisation des freins	Frein moteur	pédale d'acc. enfoncée
Neutre	10.3	19.7%	18.2%	62.1%
Eco	9.3	15.2%	20.7%	64.2%
Gerico	8.9	14.5%	20.6%	64.9%

D'après le tableau ci-dessus, en milieu urbain, nous notons une nette diminution de l'utilisation des freins en mode « éco-conduite » et mode « Gerico ». L'utilisation des freins passe de près de 20 % en mode neutre à 15.2 % (-4.5 points) et 14.5% (-5.2 points) en mode Gerico. L'énergie perdue en freinant est donc moins importante dans les mode éco-conduite et Gerico.

Concernant l'utilisation du frein moteur, nous nous attendions à observer une nette augmentation de l'utilisation du frein moteur entre le mode neutre et les modes éco-conduite et Gerico. L'augmentation de temps utilisant le frein moteur n'est que de 2.5 points en mode éco-conduite et de 2.4 points en mode Gerico.

13.1.2 - ACP

13.1.2.a - Réduction des variables

Nous réalisons une classification hiérarchique des variables.

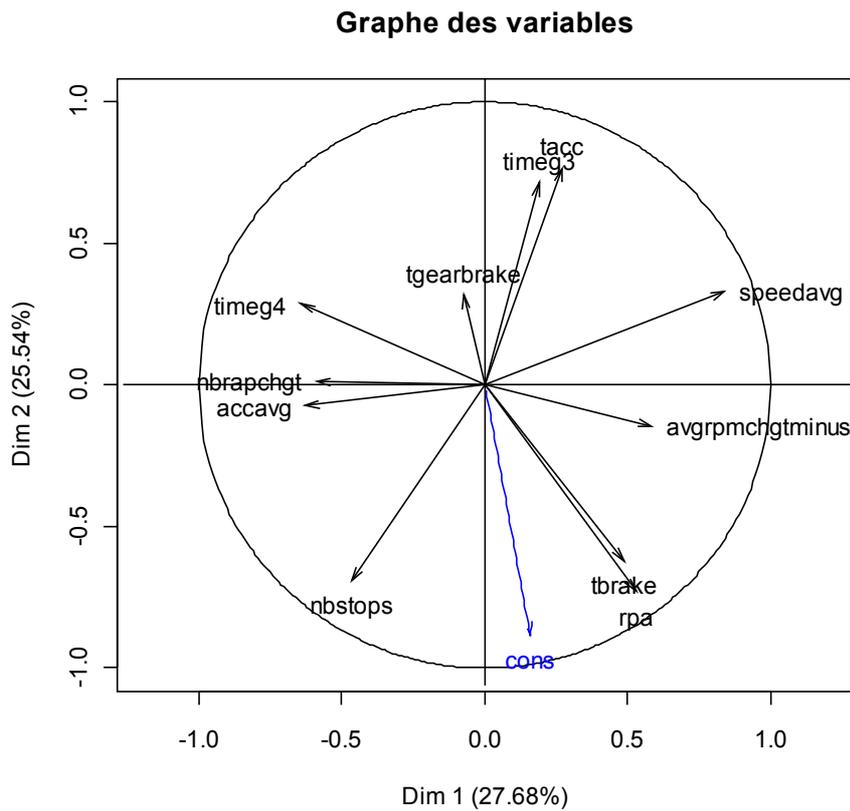
Groupe	Variable	Largeur silhouette
1	paccsd	0.525
	paccpos85	0.507
	avgrpmchgt23	0.467
	rpa	0.451
	accsd	0.451
	avgrpmchgtplus	0.446
	rpm85	0.437
	pke	0.435
	acc85	0.412
	rpmsd	0.386
	avgrpmchgt12	0.362
	paccposavg	0.361
	cons	0.339
	pacc85	0.339
	paccpossd	0.318
	speed85	0.122
	avgrpmrapchgt	0.117
	rpmavg	-0.119
	indexgearrpm	-0.119
	speedsd	-0.149

Dans le premier groupe, nous retrouvons les variables corrélées avec la consommation. Nous choisissons comme variable représentative du groupe la variable RPA qui peut se calculer à partir des données vitesses.

Groupe	Variable	Largeur silhouette
2	speedavg	0.771
	time	0.766
	paccavg	0.554
3	nbstops	0.297
	stop	0.221
	timeg1	0.153
4	accavg	0.000
5	tbrake	0.000
6	tgearbrake	0.000
7	tacc	0.000
8	nbrapchgt	0.000
9	avgrpmchgtminus	0.871
	avgrpmchgt32	0.847
10	timeg3	0.293
	timeg1plus	0.178
11	timeg4	0.376
	timeg2	0.262

Pour les autres groupes, nous choisissons la variable ayant la largeur de silhouette la plus élevée.

13.1.2.a - Graphe des variables



1ère axe

Variable	Corrélation	P-valeur
speedavg	0.839	7.20E-19
avgrpmchgtminus	0.584	2.08E-7
rpa	0.530	4.04E-6
tbrake	0.489	2.73E-5
tacc	0.273	2.53E-2
nbstops	-0.463	7.95E-5
nbrapchgt	-0.587	1.81E-7
accavg	-0.626	1.44E-8
timeg4	-0.642	4.93E-9

D'après le tableau ci-dessus, le premier axe est très lié à la vitesse moyenne et donc au temps de

parcours. Il est corrélé négativement avec le temps passé en 4^{ème} ($r=-0.64$), l'accélération moyenne ($r = -0.63$) et le nombre de changements de rapport de boîte ($r=-0.59$).

Nous notons que la projection de la variable « consommation » sur cette axe est faible. Il semble donc que dans le cadre de l'expérimentation GERICO, la consommation est peu liée à la vitesse de parcours et donc du temps de parcours.

Sur l'ensemble des trajets effectués en milieu urbain, les variables consommation et vitesse moyenne sont corrélées négativement. Le coefficient de corrélation est faible et vaut -0.11.

Normalement, dans un environnement urbain, plus la vitesse moyenne de parcours augmente, moins nous consommons. Si notre vitesse moyenne est de 40 km/h, cela signifie que la circulation est fluide et que nous n'avons pas rencontré d'éléments ou d'événements nous contraignant à ralentir. Si notre vitesse moyenne est faible, par exemple 10 km/h, cela signifie que nous avons subi la congestion et notre consommation sera alors élevée.

En mode éco-conduire et Gerico, nous observons une réduction de la vitesse moyenne mais aussi une réduction de consommation : rapport de boîte approprié à la vitesse, conduite plus souple, meilleure anticipation de l'environnement,...

En calculant des coefficients de corrélation entre les deux variables consommation et vitesse moyenne de parcours pour chaque mode de conduite, d'après le tableau ci-dessous, nous notons que pour les modes « éco-conduite » et le mode « Gerico », le coefficient est assez élevé (proche de 0.8) alors que sur l'ensemble des données, la consommation et la vitesse sont très peu corrélées puisque probablement en mode neutre, les expérimentateurs n'optimisent pas leur consommation de carburant.

	Ensemble	Mode Neutre	Mode Eco-conduite	Mode Gerico
Coefficient de corrélation	-0.11	-0.37	-0.77	-0.76

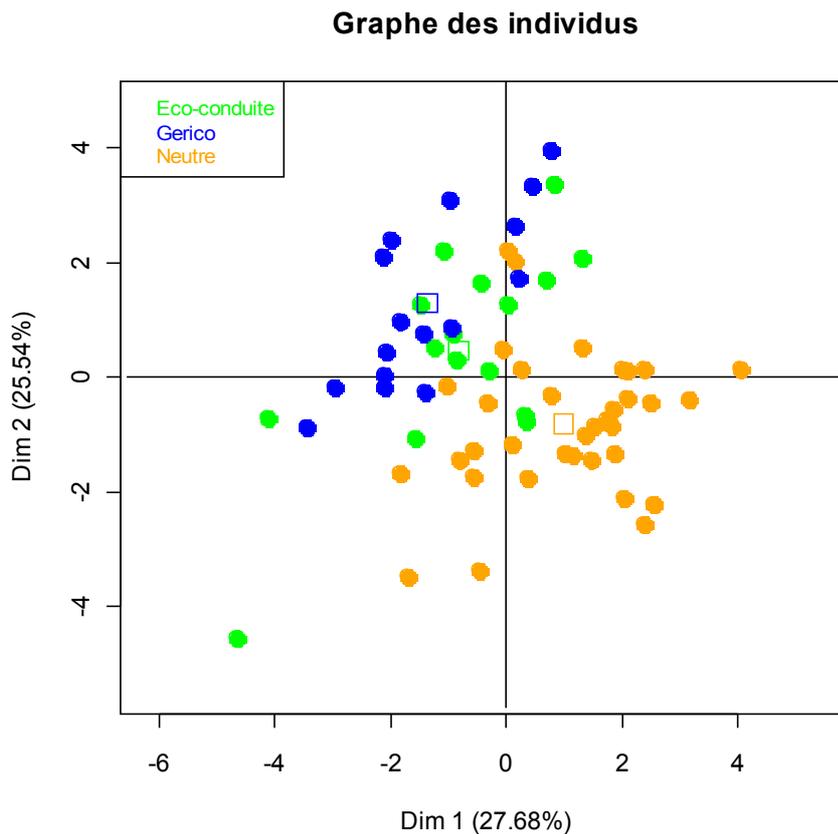
2ème axe

Variable	Corrélation	P-valeur
tacc	0.765	4.69E-14
timeg3	0.714	1.17E-11
speedavg	0.331	6.22E-3
tgearbrake	0.318	8.66E-3
timeg4	0.286	1.91E-2
tbrake	-0.620	2.26E-8
nbstops	-0.691	9.73E-11
rpa	-0.730	2.32E-12
cons	-0.885	2.73E-23

Le deuxième axe est très lié à la variable « consommation » (corrélation de -0.885) alors que nous ne l'avons pas pris en compte dans l'analyse (la consommation est une variable illustrative). Outre la variable consommation, le deuxième axe est lié au temps passé la pédale d'accélération enfoncée ($r = 0.765$), l'indice RPA ($r = 0.73$), puis le temps passé en 3^{ème} ($r = 0.71$) et le nombre d'arrêts par

kilomètre ($r = -0.691$).

13.1.2.b - Graphe des individus



Nous notons qu'un expérimentateur est isolé (point situé en bas à gauche). La consommation pour cet individu est particulièrement élevée (plus de 12 l / 100 km) et possède une des valeurs pour la variable (nbstops) et pke. Il semble donc que cet expérimentateur ait subi des conditions de circulation différentes des autres.

D'après le graphique ci-dessus, les trajets effectués en mode neutre se caractérisent par une consommation importante et une vitesse moyenne plus élevée (nuage de points situé en bas à droite du plan factoriel). Les deux autres groupes « éco-conduite » et « Gerico » ont globalement des consommations et des vitesses de parcours plus faibles (points situés en majorité dans la partie en haut à gauche du plan factoriel), notamment le groupe composé des trajets dans le mode GERICO, avec une vitesse de parcours et une consommation plus faibles.

13.1.3 - Classification ascendante des individus

Nous réalisons une classification ascendante hiérarchique sur les deux axes principaux de l'ACP. Nous classifions les individus en 3 groupes.

Mode	Nombre de trajets	Groupe		
		1	2	3
Neutre	35	23%	9%	69%
Eco-conduite	16	19%	69%	13%
Gerico	16	38%	63%	0%

Dans le groupe 1, nous retrouvons le trajets pour lesquels la vitesse de parcours est faible avec une consommation élevée.

Dans le groupe 2, nous retrouvons 63 % des trajets effectués en mode « Gerico » et 69 % des trajets réalisés en mode « Eco-conduite ». Ce groupe correspond aux trajets pour lesquels la consommation est faible.

Dans le groupe 3, nous trouvons 69 % des trajets réalisés en mode neutre. Il s'agit du groupe pour lequel la vitesse moyenne et la consommation sont élevées.

Groupe	Nombre de trajets	Consommation (l/100 km)		Vitesse de parcours (km/h)	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
1	17	10.23	0.98	30.46	2.17
2	24	8.81	0.48	35.66	2.53
3	26	10.25	0.59	37.56	2.12
Ensemble	67	9.73	0.96	35.08	3.62

13.1.4 - Modélisation de la consommation

13.1.4.a - Modélisation en fonction du pke et du nombre d'arrêts

D'après l'analyse en composantes principales, la consommation est fortement liée aux 4 variables peu corrélés entre elles : l'indice RPA, le temps passé à accélérer, le nombre de stops par kilomètre et le temps passé en 3ème.

Nous choisissons de modéliser la consommation en fonction des deux variables : l'indice PKE (variable figurant dans le même groupe que l'indice RPA) et le nombre d'arrêts par kilomètre car ce sont des variables qui peuvent être facilement calculées à partir de données vitesse (pas besoin d'instrumentation lourde, un simple GPS suffit).

Nous proposons le modèle suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke} + \beta_2 \text{nbstops}$$

le terme $\beta_2 \text{nbstops}$ correspond à une surconsommation liée à l'arrêt du véhicule.

le terme $\beta_1 \text{pke}$ correspond à l'énergie fournie au véhicule pour accélérer

La régression linéaire sur les sections de trajets réalisés en milieu urbain nous fournit une estimation des 3 paramètres du modèle :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	5.65	0.21	26.75	<2e-16
β_1 (pke)	7.75	0.49	15.76	<2e-16
β_2 (nbstops)	2.03	0.22	9.13	3.39e-13

Le coefficient de détermination ajusté vaut $R^2 = 0.87$. Notre modèle est donc bien adapté à nos données.

13.1.4.b - Modélisation de la consommation en fonction du pke et de la vitesse moyenne

Précédemment, nous avons choisi de modéliser la consommation en fonction des variables pke et nbstops puisqu'elles étaient très corrélées avec la consommation.

Une autre approche consiste à modéliser en fonction des variables les plus corrélées avec les deux premiers axes de l'ACP, c'est à dire la vitesse moyenne de parcours pour le premier axe et l'indice PKE pour le deuxième axe.

Le modèle proposé s'écrit :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke} + \beta_2 \text{speedavg}$$

La régression linéaire sur les sections de trajets réalisés en milieu urbain nous fournit une estimation des 3 paramètres du modèle :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	9.40	0.41	22.722	<2e-16
β_1 (pke)	10.46	0.49	21.276	<2e-15
β_2 (speedavg)	-1.18E-1	1.23E-2	-9.614	4.85e-14

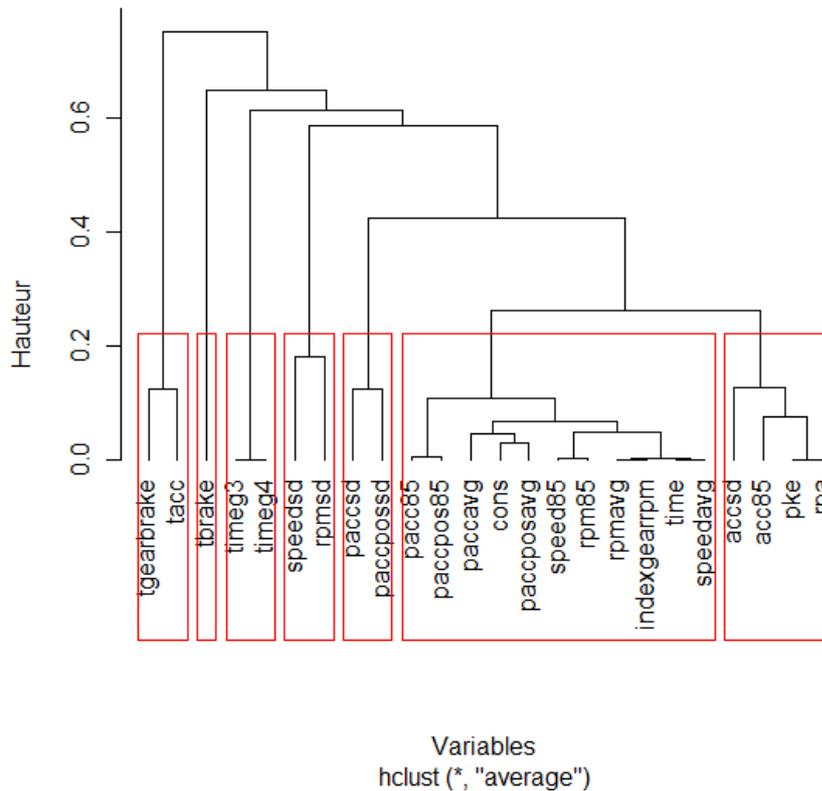
Le coefficient de détermination ajusté de modèle vaut $R^2 = 0.87$. Notre modèle est donc bien adapté à nos données.

13.2 - Infrastructure autoroute

13.2.1 - Réduction des variables

Les variables sélectionnées pour l'infrastructure autoroutière sont les suivantes :

Classification des variables Infrastructure autoroute



Nous choisissons de regrouper les variables en 7 groupes. Nous notons que nous coupons le dendrogramme à une hauteur faible.

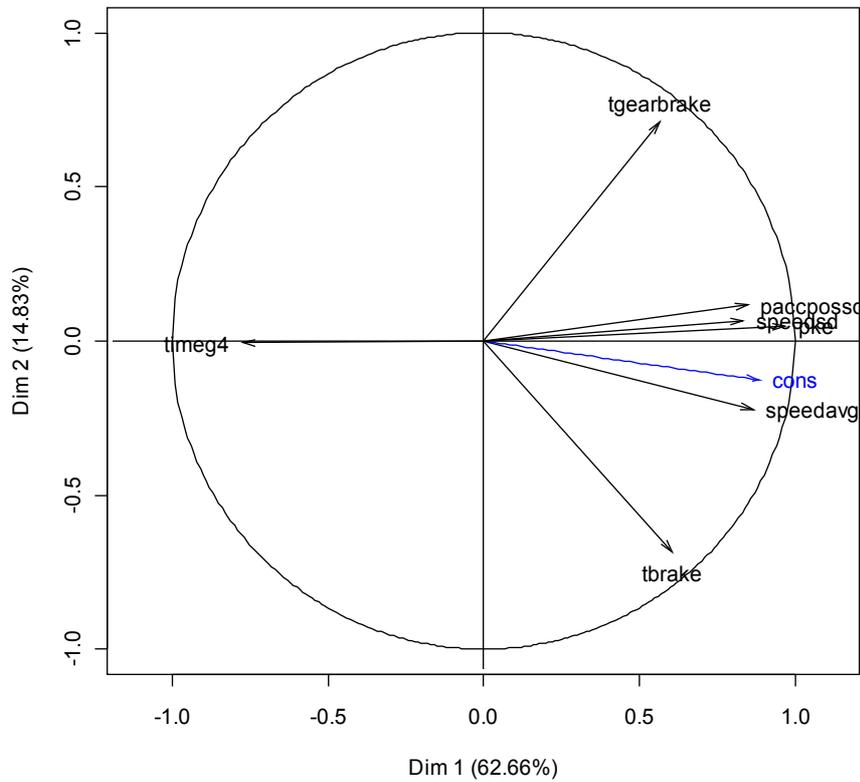
Pour chaque groupe, nous calculons les largeurs des silhouettes afin de déterminer la variable la plus représentative du groupe.

Groupe	Variable	Indice silhouette
1	rpmavg	0.834
	indexgearrpm	0.834
	speedavg	0.827
	time	0.825
	paccposavg	0.761
	cons	0.742
	paccavg	0.740
	speed85	0.739
	rpm85	0.738
	pacc85	0.390
	paccpos85	0.338
	2	rpa
pke		0.769
acc85		0.648
accsd		0.456
3	rpmsd	0.683
	speedsd	0.628
4	tbrake	0.000
5	tgearbrake	0.816
	tacc	0.765
6	paccpossd	0.685
	paccsd	0.483
7	timeg3	0.996
	timeg4	0.996

Pour le premier groupe, dans lequel nous retrouvons la variable consommation, nous choisissons la variable « moyenne des vitesses » comme variable représentative du groupe.

Pour le 2ème groupe, nous choisissons la variable PKE au détriment de la variable RPA et pour les autres groupes nous choisissons la variable ayant l'indice silhouette le plus élevé.

Graphe des variables



D'après le graphe ci-dessus, les variables sont très liées au premier axe qui représente près de 63 % de l'inertie totale.

1^{er} axe

Variable	Corrélation	P-valeur
pke	0.97	2.22E-40
cons	0.88	2.93E-23
speedavg	0.87	3.27E-21
paccpossd	0.85	1.27E-19
speedsd	0.83	2.60E-18
tbrake	0.61	5.38E-08
tgearbrake	0.57	5.88E-07
timeg4	-0.77	1.43E-14

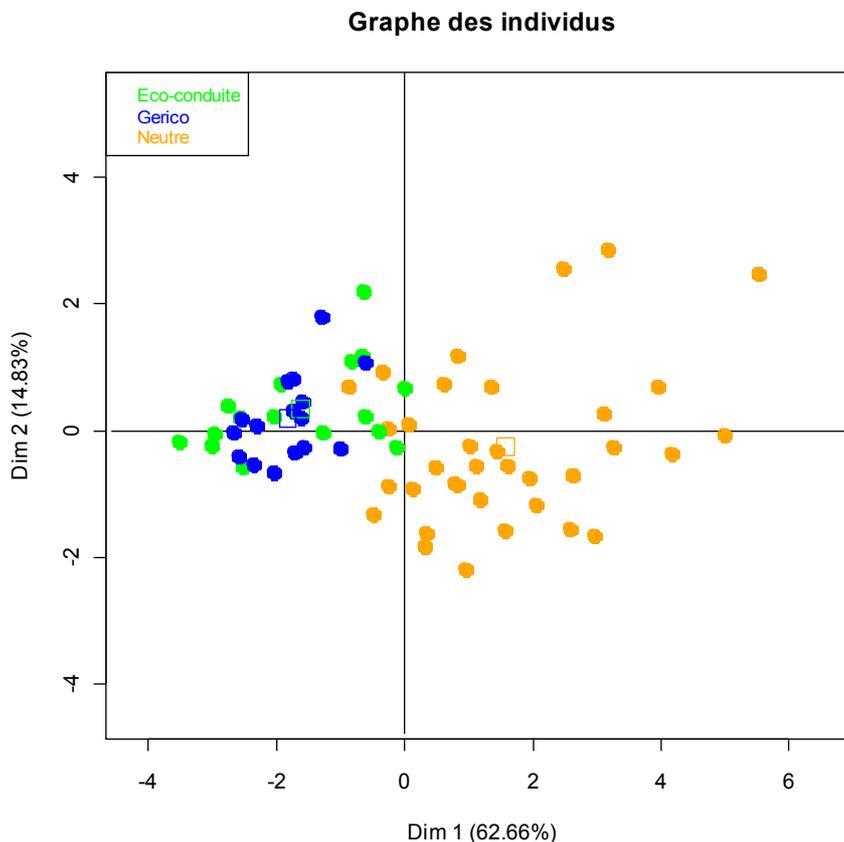
Le premier axe de l'ACP est très fortement lié à l'indice PKE ($r=0.97$), la consommation moyenne ($r=0.88$), la vitesse moyenne de parcours ($r=0.87$), l'écart-type de l'enfoncement de la pédale d'accélération lorsque cette dernière est enfoncée ($r=0.85$) et l'écart-type de la vitesse ($r=0.83$).

On note donc que pour minimiser la consommation de carburant sur autoroute, il faut d'une part minimiser les variations de vitesse en gardant une pression constante sur la pédale d'accélération et d'autre part rouler à une vitesse modérée. IL semble donc que l'utilisation d'un régulateur et d'un limiteur de vitesse sur terrain plat permette d'économiser du carburant.

Nous remarquons que le temps passé en frein moteur et le temps passé à freiner sont corrélés positivement avec la consommation. En effet, le fait de décélérer puis d'accélérer entraîne des surconsommations de carburant.

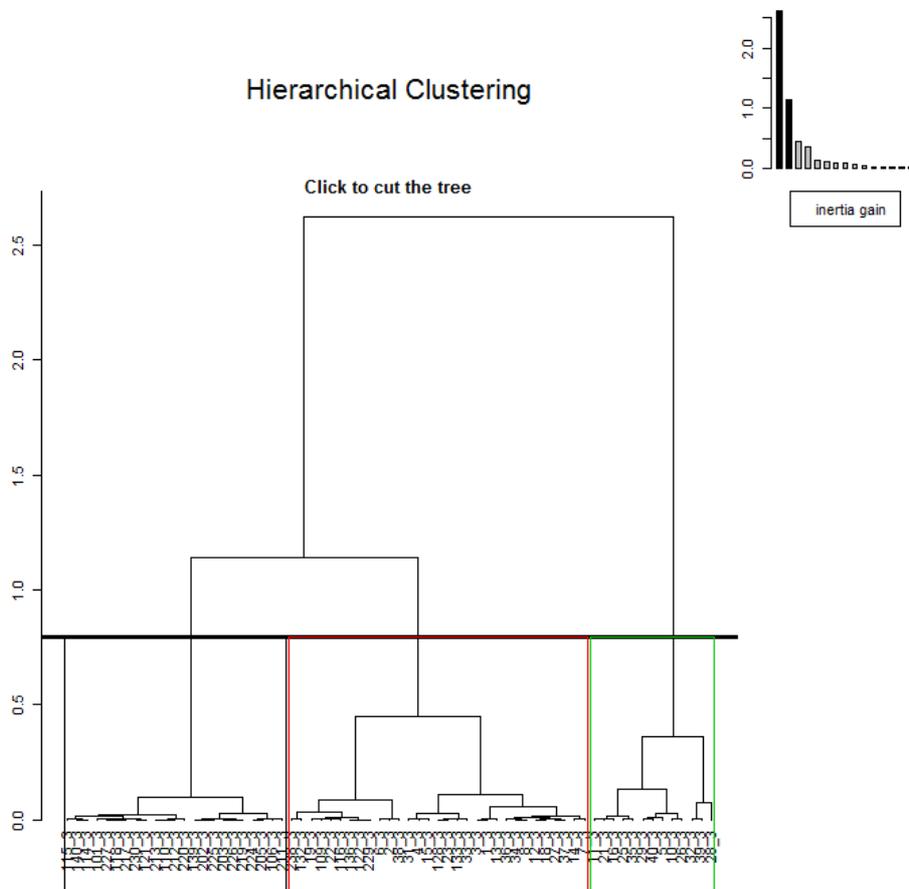
Le deuxième axe est corrélé avec le temps passé en frein moteur ($r=0.71$) et le temps passé à freiner ($r=-0.68$).

13.2.2 - Classification ascendante des individus



D'après la représentation des individus dans le plan factoriel, les trajets réalisés en mode neutre sont distincts des trajets réalisés en mode éco-conduite et Gerico.

Nous effectuons une classification ascendante des individus.



D'après la classification, le nombre de groupes optimal est 3.

13.2.3 - Classification en 3 groupes

Mode	Nombre de trajets	Groupe		
		1	2	3
Neutre	35	6%	71%	23%
Eco-conduite	16	88%	13%	0%
Gerico	16	100%	0%	0%

Dans le premier groupe nous retrouvons l'ensemble des trajets Gerico et 88 % des trajets « éco-conduite ». La consommation moyenne pour ce groupe est de 7 l/100 km.

Dans le second groupe, nous retrouvons essentiellement des trajets réalisés en mode neutre. La consommation moyenne pour ce groupe est de 8.5 l/100km.

Dans le troisième groupe constitué de 8 trajets, nous ne trouvons que des trajets réalisés en mode neutre. Il s'agit de trajets pour lesquels la consommation (9.6 l/100 km) et la vitesse moyenne est

élevées.

Groupe	Nombre de trajets	Consommation (l/100 km)	
		Moyenne	Ecart-type
1	32	7.00	0.55
2	27	8.49	0.63
3	8	9.56	0.69

13.3 - Modélisation de la consommation

Dans ce paragraphe, nous cherchons à modéliser la consommation sur autoroute. L'analyse en composantes principales après réduction des variables nous a montré que la consommation est fortement liée à la vitesse moyenne de parcours et à l'indice PKE. Nous choisissons donc de modéliser la consommation en utilisant le modèle suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 V^2 + \beta_2 \text{pke}$$

où V correspond à la vitesse moyenne de parcours.

Il s'agit d'un modèle que nous retrouvons dans la littérature.

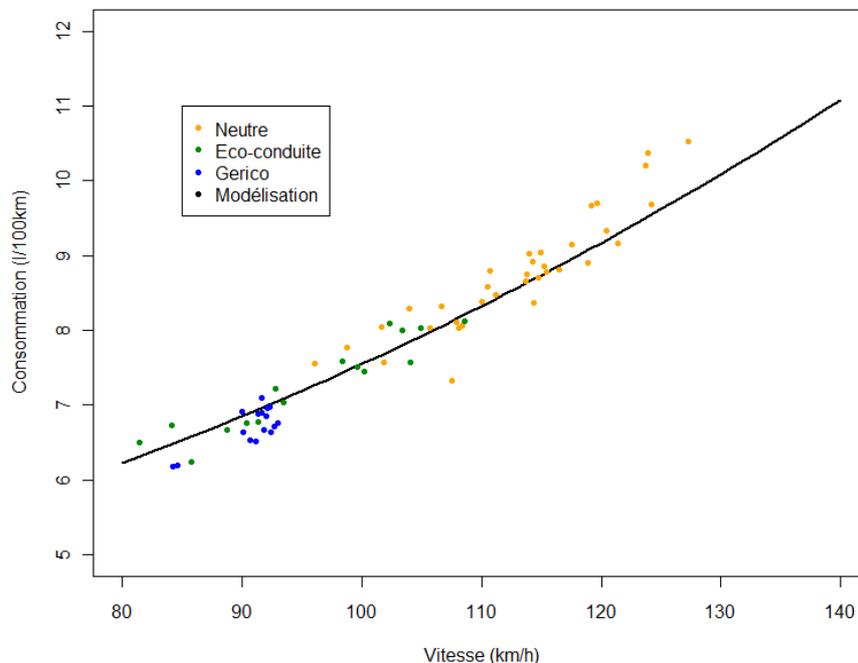
Les premiers termes du modèle correspondent à l'énergie nécessaire à fournir pour maintenir le véhicule à une vitesse constante V, la vitesse moyenne du trajet sur autoroute.

Le terme $\beta_2 \text{pke}$ correspond à la variation d'énergie à apporter au véhicule pour accélérer.

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	3.45	0.14	23.83	<2e-16
β_1 (V ²)	3.67E-4	2.32E-5	15.86	<2e-16
β_2 (pke)	3.02	1.03	2.92	0.005

Le coefficient de détermination du modèle vaut $R^2=0.95$. Il montre que le modèle est bien adapté à nos données.

Consommation en fonction de la vitesse de parcours sur autoroute



Comme nous l'avons dit précédemment, les coefficients calculés dépendent de l'itinéraire parcouru. Par la suite nous cherchons à calculer des coefficients indépendants de l'itinéraire.

Nous procédons à des tirages aléatoires de sections d'autoroute. Nous choisissons deux longueurs de sections : 500 mètres et 1km.

Une section de 500 mètres est relativement courte puisqu'à 130 km/h, elle est parcourue en 13 secondes.

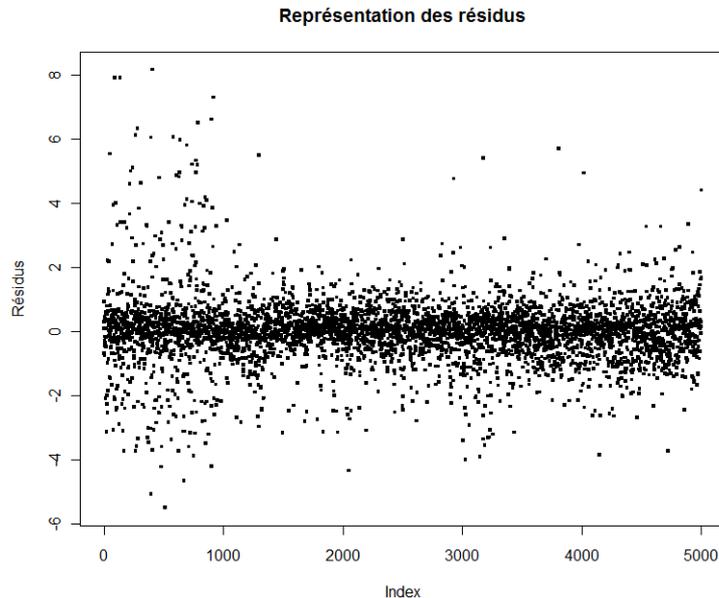
Nous tirons aléatoirement 5000 sections d'autoroute. Pour chaque section, nous calculons la consommation moyenne aux 100 km, la variable PKE ainsi que la vitesse moyenne de parcours.

13.3.1 - Modélisation pour des sections de 500 mètres

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	3.52	0.09	39.84	<2e-16
β_1 (V ²)	3.48E-4	7.66E-6	45.45	<2e-16
β_2 (pke)	8.74	0.17	50.47	<2e-16

Le coefficient de détermination ajusté du modèle est $R^2=0.51$. Il est faible. Nous analysons les résidus.

Nous trions tout d'abord les résidus selon la variable PKE. Nous obtenons le graphe suivant des résidus :



D'après le graphique ci-dessus, nous notons une forte variabilité des résidus du modèle pour les 1000 premières sections d'autoroute pour lesquelles le pke est nul.

Nous choisissons donc de retirer de notre échantillon les sections d'autoroute pour lesquels le PKE est nul.

On retire ainsi 947 sections d'autoroute soit 18.9 % de l'échantillon.

Nous obtenons alors les coefficients suivants :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	3.53	0.08	45.08	<2e-16
β_1 (V^2)	3.39E-4	6.78E-6	49.94	<2e-16
β_2 (pke)	9.09	0.15	60.64	<2e-16

Le coefficient de détermination ajusté du modèle est $R^2=0.63$. Il est très nettement supérieur au précédent.

13.3.2 - Modélisation pour des sections de 1000 mètres

Pour les sections de 1000 mètres, la dispersion des consommations sur des sections de 1000 mètres est beaucoup plus faible que celles des sections de 500 mètres. Nous nous attendons donc à ce que le coefficient de détermination des sections de 1000 mètres soit meilleur que pour les sections de 500 mètres.

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	3.48	0.05	68.09	<2e-16
β_1 (V^2)	3.20E-4	4.50E-6	71.07	<2e-16
β_2 (pke)	7.91	0.13	58.79	<2e-16

coefficient de détermination $R^2=0.68$

Comme précédemment, nous choisissons de garder uniquement les sections pour lesquelles le pke est strictement positif.

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	3.48	0.05	68.94	<2e-16
β_1 (V^2)	3.20E-4	4.44E-6	72.06	<2e-16
β_2 (pke)	7.89	0.13	59.13	<2e-16

Le coefficient de détermination ajusté du modèle vaut $R^2=0.69$.

13.4 - Voies rapides

Pour le réseau de voies rapides, comme les usagers ont circulé durant les heures creuses et comme la vitesse réglementaire était de 110 km/h en 2006, nous devrions utiliser le même modèle de consommation que sur autoroute.

Pour modéliser la consommation en fonction de la vitesse moyenne de parcours et de l'indice PKE, nous utilisons le modèle suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 V^2 + \beta_2 \text{pke}$$

Contrairement au modèle de consommation sur autoroute, ne figure pas le terme associé à la vitesse moyenne V. En effet, l'introduction de ce terme fournissait des estimations avec des erreurs trop importantes.

Le modèle choisi dépend de la vitesse de parcours et de l'indice pke. Les termes liés à la vitesse correspondent à l'énergie fournie au véhicule pour maintenir sa vitesse et le terme lié au pke l'énergie à fournir au véhicule pour accélérer.

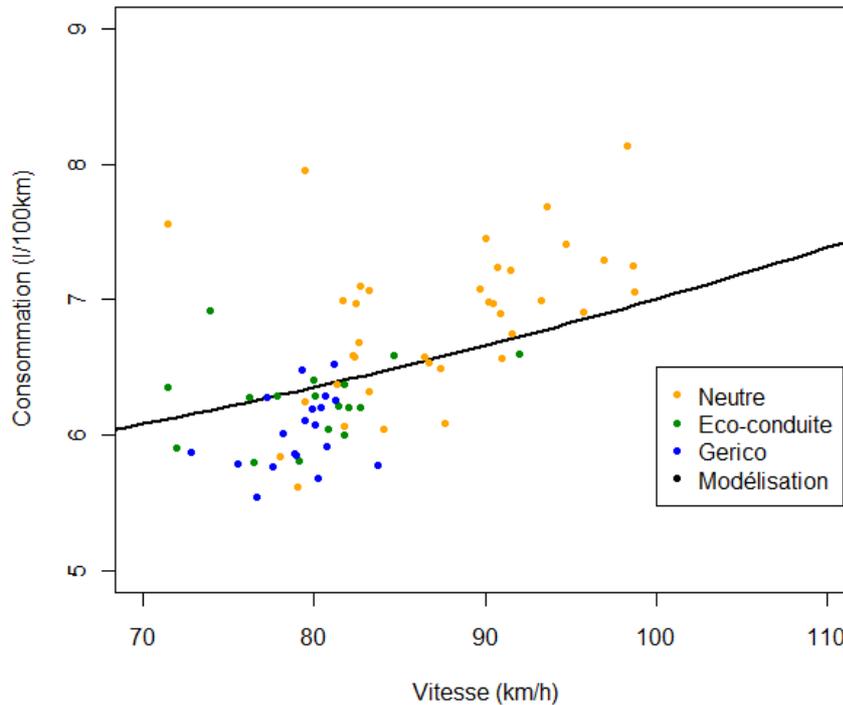
De notre échantillon, nous excluons 4 trajets sur 77 afin de ne garder que les trajets dont la vitesse moyenne de parcours est supérieure à 70 km/h. En dessous de 70 km/h, nous estimons que notre modèle n'est pas adapté à ces trajets.

La régression linéaire fournit les estimations des paramètres suivants :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	Pr(> t)
β_0 (Intercept)	4.17	0.25	16.46	<
β_1 (speedavg^2)	1.813E-4	4.015E-5	4.52	2.49e-05
β_2 (pke)	5.58	0.76	7.37	2.59e-10

le coefficient de détermination ajustée vaut $R^2 = 0.65$. Il est plutôt faible en raison de conditions de circulation qui sont différentes de celles observées sur autoroute.

Consommation en fonction de la vitesse de parcours sur VRU



Sur le graphique ci-dessus, le résultat de la modélisation a été représenté en fixant comme valeur de PKE, la médiane des PKE de l'ensemble des trajets.

13.5 - Les montées

13.5.1 - Aspect théorique

L'énergie d'un véhicule correspond à la somme de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle de pesanteur E_p . $E = E_c + E_p$

avec $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ et $E_p = mgh$

L'énergie potentielle est une énergie conservative, elle n'est pas perdue et sera utilisée en descente.

Supposons que le véhicule accélère en montée et négligeons les forces de frottement sur une distance x .

L'énergie à fournir au véhicule par unité de distance est :

$$\frac{\Delta E}{x} = \frac{(\Delta E_c + \Delta E_p)}{x} = \frac{1}{2} m p k e + m g \frac{\Delta h}{x}$$

Lorsque la pente est faible, nous pouvons approximer que le rapport entre la variation d'altitude et la distance parcourue est à peu près égale à la pente de la montée : $p \approx \frac{\Delta h}{x}$.

Nous avons donc la relation suivante lorsque le véhicule accélère en montée, en supposant que les forces de frottement sont nulles :

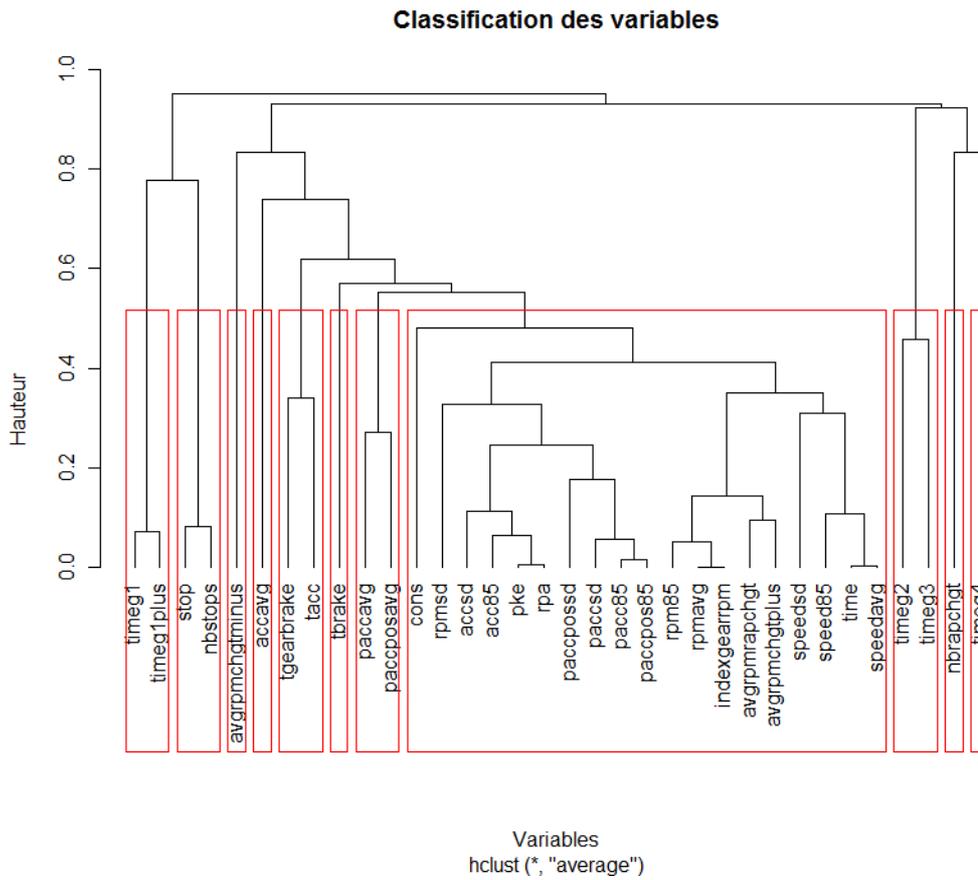
$$\frac{\Delta E}{x} = \frac{1}{2} m (p k e + 2 g p)$$

Nous en déduisons qu'en montée, pour estimer la consommation, il faut ajouter un terme supplémentaire à nos modèles de consommation de la forme $\beta_i p$ où p est la pente de la section considérée.

Enfin, d'après la formule précédente, on pourra vérifier que le rapport entre les coefficients p et $p k e$ des modèles de consommation en montée est de l'ordre de $2g$.

13.5.2 - ACP sur les montées

13.5.2.a - Classification des variables



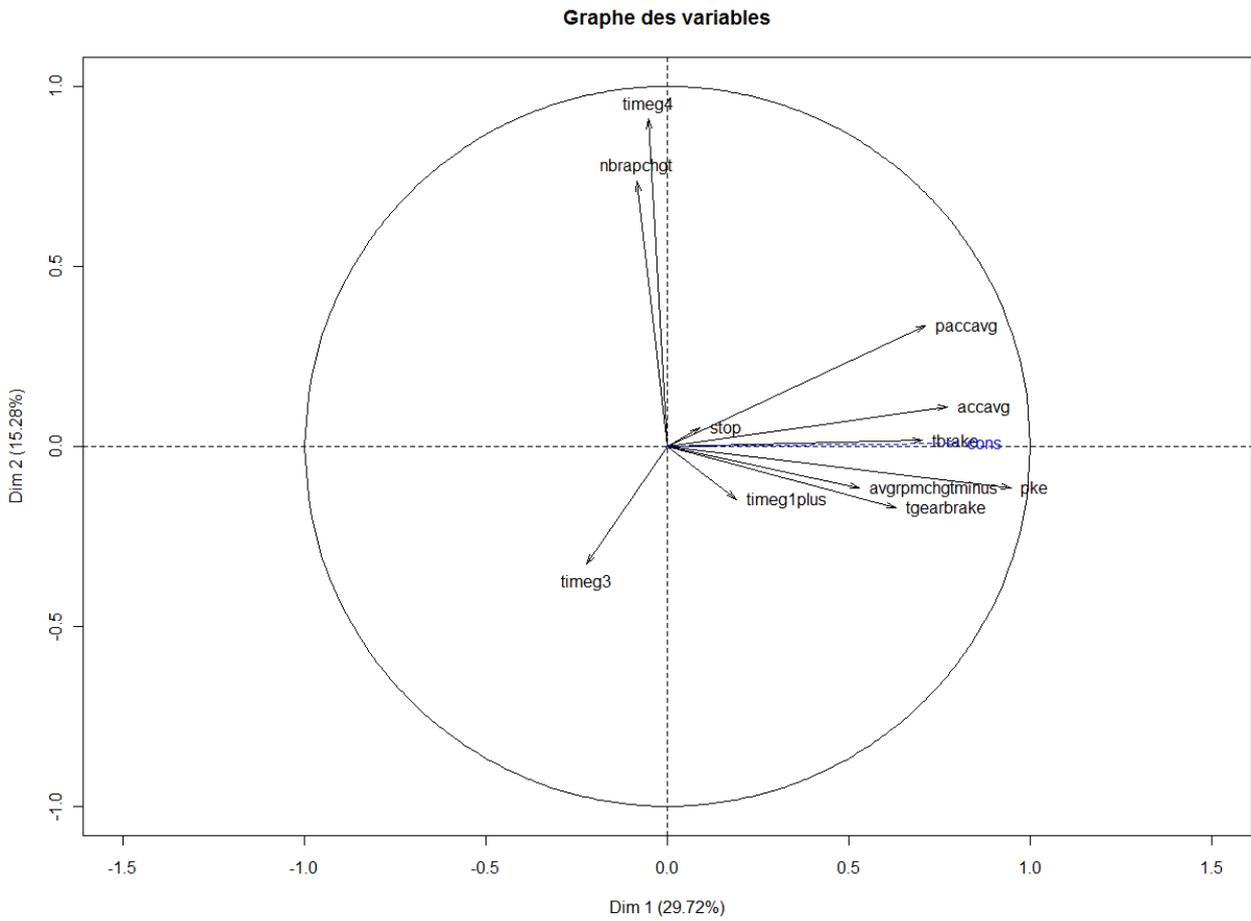
Nous avons choisi de regrouper les variables en 11 groupes.

Groupe	Variable	Largeur silhouette
1	rpa	0.5
	pke	0.5
	acc85	0.47
	rpm85	0.47
	rpmavg	0.46
	indexgearrpm	0.46
	avgrpmrapchgt	0.46
	avgrpmchgtplus	0.44
	accsd	0.27
	speedsd	0.25
	rpsd	0.21
	paccsd	0.19
	cons	0.16
	paccposd	0.15
	speed85	0.15
	pacc15	0.09
	paccpos85	0
	pacc85	-0.01
	time	-0.03
	speedavg	-0.04
tacc	-0.3	
2	stop	0.9
	nbstops	0.89
3	accavg	0
4	tbrake	0
5	tgearbrake	0
6	paccavg	0.6
6	paccposavg	0.39
7	nbrapchgt	0
8	avgrpmchgtminus	0
9	timeg1plus	0.92
	timeg1	0.9
10	timeg3	0.51
	timeg2	0.4
11	timeg4	0

Nous notons que la classification observée ressemble beaucoup à celle obtenue sur l'ensemble des trajets sans prise en compte de l'infrastructure.

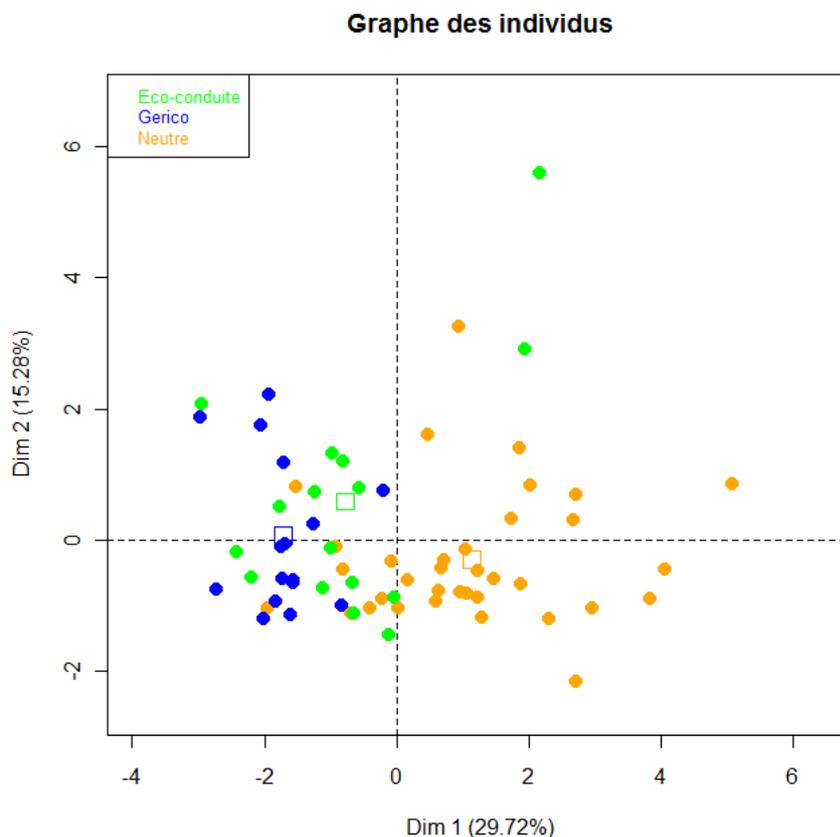
Les variables figurant en jaune ont été choisies pour représenter leur groupe.

13.5.2.b - Graphe des variables



D'après le graphique ci-dessus, le premier axe de l'ACP est fortement lié à la consommation .
Le deuxième axe de l'ACP est lié au temps passé en 4^{ème}

13.5.2.c - Graphe des individus



Mode	Rapport de boîte			
	1	2	3	4
Neutre	2.6%	40.0%	52.3%	5.0%
Eco-conduite	1.6%	30.5%	54.3%	13.5%
Gerico	1.1%	23.4%	65.8%	9.7%

En montée nous nous apercevons qu'il faut appliquer les mêmes règles d'éco-conduite que sur terrain plat. La différence en montée par rapport au terrain plat est le fait qu'il faut fournir davantage d'énergie au moteur puisqu'une partie de l'énergie est transformée en énergie potentielle.

13.5.3 - Tirage aléatoire de sections de 200 mètres

Nous tirons aléatoirement des sections de 200 mètres sur l'ensemble des conducteurs et des montées sur lesquelles nous calculons la consommation moyenne, la vitesse moyenne, l'indice PKE et la pente.

Ce tirage s'effectue sur les sections suivantes :

Section	Longueur (m)	Δ hauteur (m)	Pente %
Montée Pech-David (S1)	1593	92	5.75%
S2	329	21	6.38%
Montée Pouvoirville (S3)	1350	65	4.80%
S4	241	2	0.86%
S5	452	0	4.86%
Montée Pechbusque (S6)	1853	22	4.66%
S7	272	86	2.49%
S8	274	7	7.09%
Ensemble	6364	295	4.63%

Ces sections ont des pentes différentes. On retrouve même du faux plat. En tirant aléatoirement des tronçons sur ces sections, nous obtenons des tronçons de pente variable.

13.5.3.a - Modélisation de la consommation

Nous proposons le modèle de consommation suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 p_{ke} + \beta_2 p$$

où p correspond à la pente de la section et cons est la consommation sur la section exprimée en l/100km.

Ce modèle est choisi par analogie avec la formule de l'énergie mécanique :

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

Le terme $\beta_2 p$ correspond à l'énergie potentielle moyenne emmagasinée par le véhicule.

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	6.43	0.16	40.92	<2e-16
β_1 (pke)	8.75	0.23	37.84	<2e-16
β_2 (p)	141.79	2.52	56.36	<2e-16

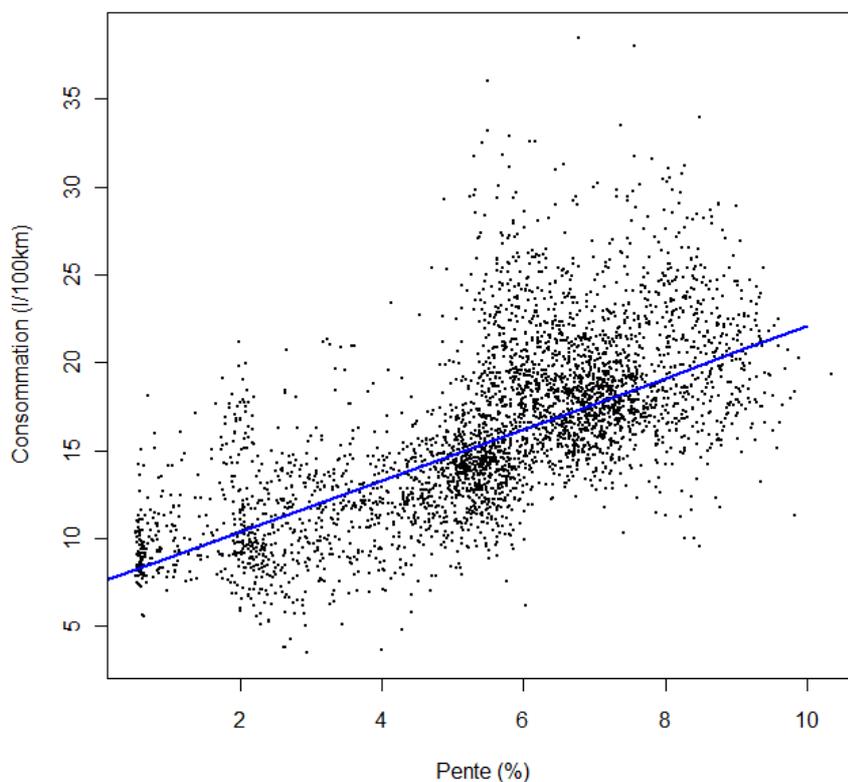
Le coefficient de détermination ajusté vaut $R^2=0.5$. Il est assez faible puisque nous avons choisi un modèle assez simple.

De l'échantillon, nous retirons les sections pour lesquelles l'indice pke est nul. Nous obtenons alors les coefficients suivants :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	5.38	0.13	40.04	<2e-16
β_1 (p)	145.95	2.16	67.7	<2e-16
β_2 (pke)	10.51	0.20	53.1	<2e-16

En retirant de notre échantillon, les sections pour lesquelles le pke est nul, le coefficient de corrélation est plus élevé. Il vaut maintenant $R^2 = 0.67$. Nous pouvons encore améliorer la qualité du modèle en neutralisant certaines zones de montées sur lesquelles figurent des éléments engendrant des surconsommations de carburant : rond-point, intersection,...

Consommation en fonction de la pente



Sur le graphique ci-dessus, nous avons représenté les couples de points (consommation, pente) des sections de 200 mètres pour lesquelles le pke est strictement positif. La droite représentée en bleu correspond au résultat de la régression linéaire en choisissant comme pke le pke médian de l'ensemble des sections.

13.6 - Les descentes

En descente, les stratégies à adopter afin de réaliser des économies de carburant sont différentes de celles à appliquer sur terrain plat. Pour maintenir sa vitesse ou accélérer, le véhicule dispose de

deux sources d'énergie en descente : la combustion de carburant et l'énergie potentielle. En descente, le choix du rapport est important. Le choix d'un rapport faible permettra de limiter la vitesse (frein moteur). La consommation est nulle lorsque le régime moteur est élevé. Si nous utilisons un rapport élevé, le véhicule accélérera et il faudra éventuellement avoir recours aux freins.

Nous rappelons enfin que l'utilisation du point mort en descente est à proscrire et n'aboutit pas à des économies de carburant. Sur les véhicules actuels, l'injection de carburant est coupée lorsque le moteur est entraîné par les roues.

13.6.1 - Analyse du rapport de boîte et des états du système

Mode	Consommation (l /100 km)	% de temps		
		Utilisation des freins	Frein moteur	pédale d'acc. enfoncée
Neutre	4.14	30.7%	34.5%	34.7%
Eco	3.51	26.5%	43.7%	29.9%
Gerico	3.38	33.9%	41.8%	24.4%

D'après les tableau ci-dessus, nous notons une très nette diminution du temps passé lorsque la pédale d'accélération est enfoncée au profit de l'utilisation du frein moteur. Le temps passé en frein moteur augmente de 9.2 points en mode éco-conduite et 7.3 points en mode Gerico. En mode Gerico, nous observons une augmentation du temps d'utilisation des freins de 3.7 points. Cela est certainement dû à un meilleur respect des limitations de vitesse .

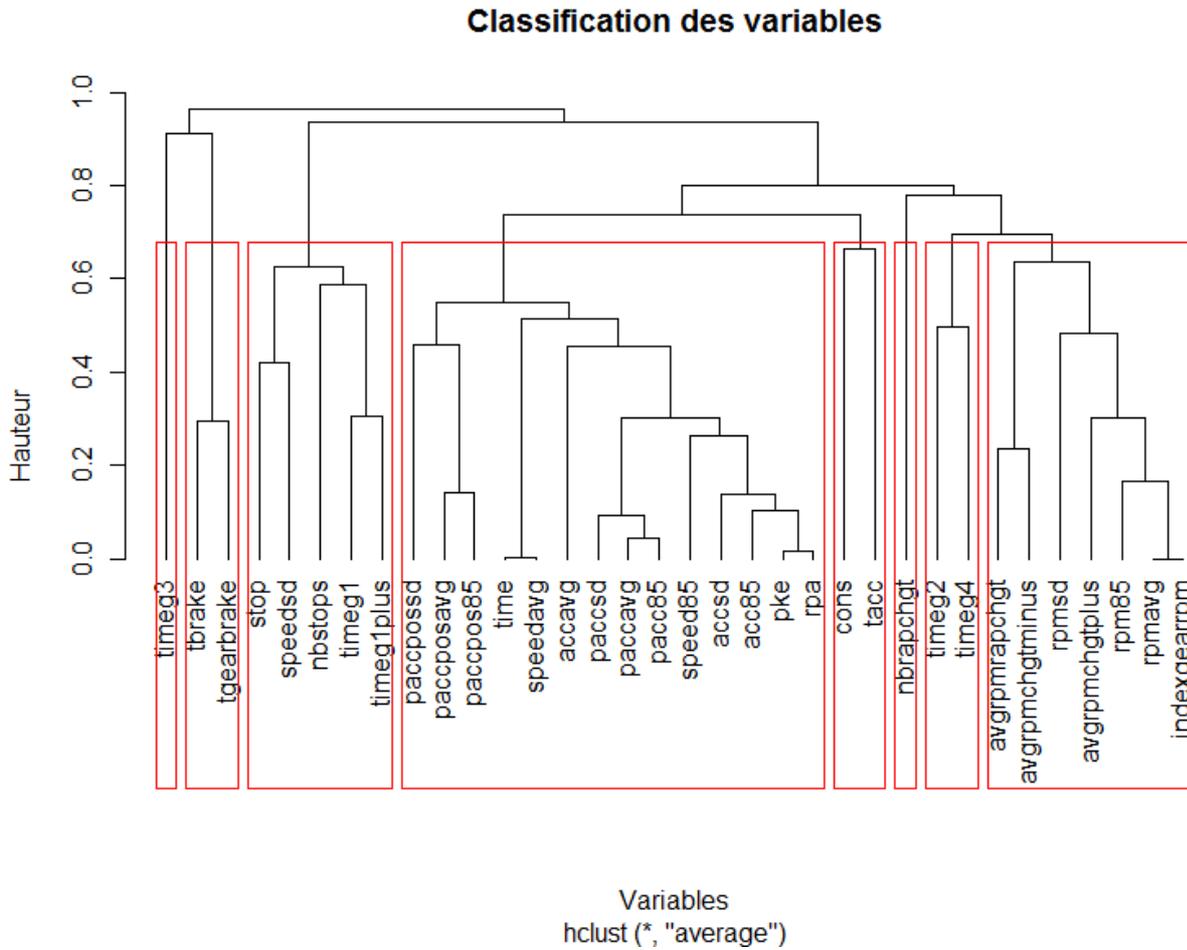
Mode	Rapport de boîte			
	1	2	3	4
Neutre	4.8%	41.5%	48.7%	4.9%
Eco	6.0%	28.9%	42.9%	22.2%
Gerico	4.3%	34.7%	51.4%	9.5%

D'après le tableau ci-dessus, nous observons qu'en mode éco-conduite, les utilisateurs choisissent d'utiliser des rapports plus élevés qu'en mode neutre. Le temps passé en 4ème est de 22.2 % en mode éco-conduite contre 4.9% en mode neutre.

En mode Gerico, les usagers utilisent peu le rapport 4. Cela est logique puisque le système propose un rapport associé à une vitesse. Comme la vitesse conseillée est de 50 km/h, le rapport 3 semble le meilleur compromis pour respecter les limitations et minimiser l'utilisation des freins.

13.6.2 - ACP

13.6.2.a - Classification des variables

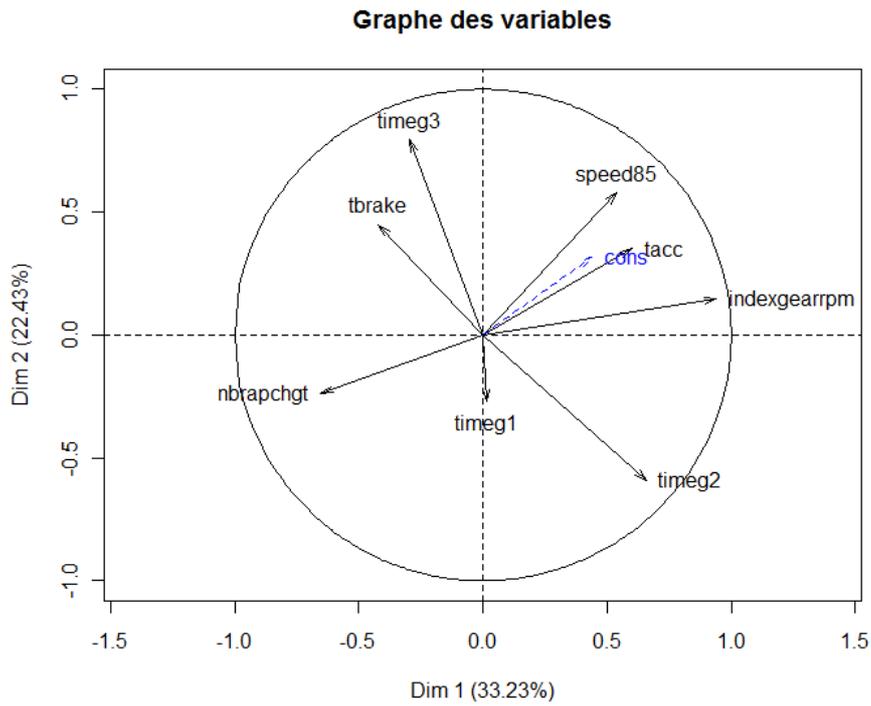


Nous regroupons les variables en 8 classes.

Nous observons que contrairement aux autres infrastructures, la variable consommation n'appartient pas au groupe où nous retrouvons les indicateurs classiques de consommation (pke, rpa, régime moteur, pédale d'accélération,...). Elle a été regroupée avec la variable temps passé avec la pédale d'accélération enfoncée. Ces deux variables sont corrélées positivement ($r = 0.6$).

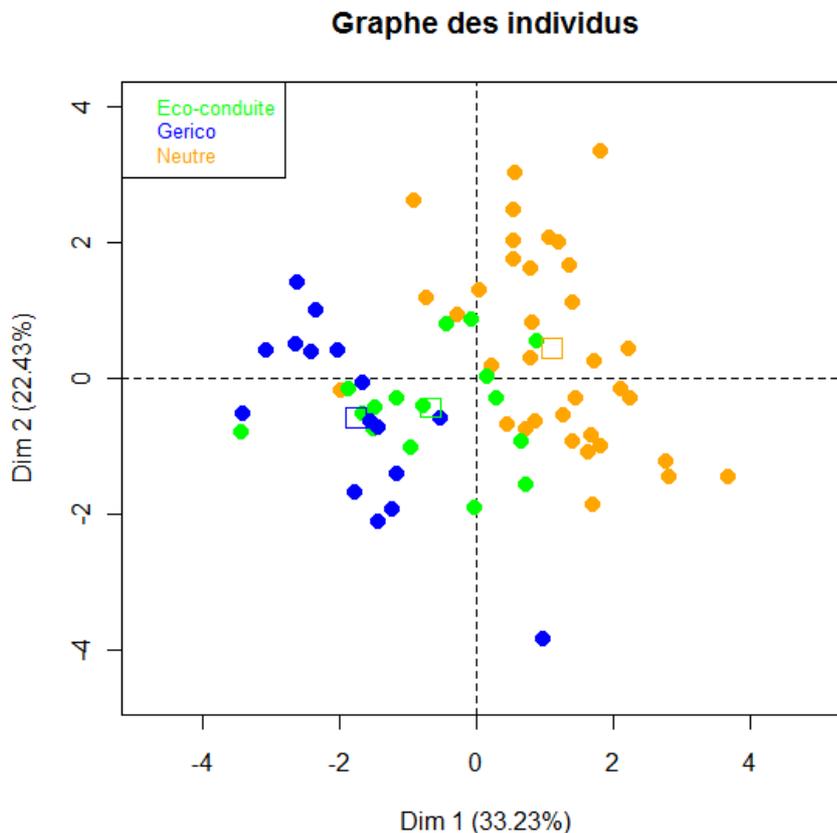
Il est cohérent que les variables relatives au régime moteur n'appartiennent pas au même groupe que la variable consommation puisqu'en descente ce n'est plus le moteur qui entraîne les roues mais les roues qui entraînent le moteur.

13.6.2.b - Graphe des variables



D'après le graphique ci-dessus, le premier axe est lié au régime moteur et le deuxième axe est lié aux rapports de boîte. La projection de la variable illustrative consommation sur ces deux axes est faible.

13.6.2.c - Graphe des individus



En représentant les individus dans le plan factoriel, nous notons que les trajets réalisés en mode « neutre » présentent des régimes moteur plutôt élevés.

14 - Analyse des séquences d'états

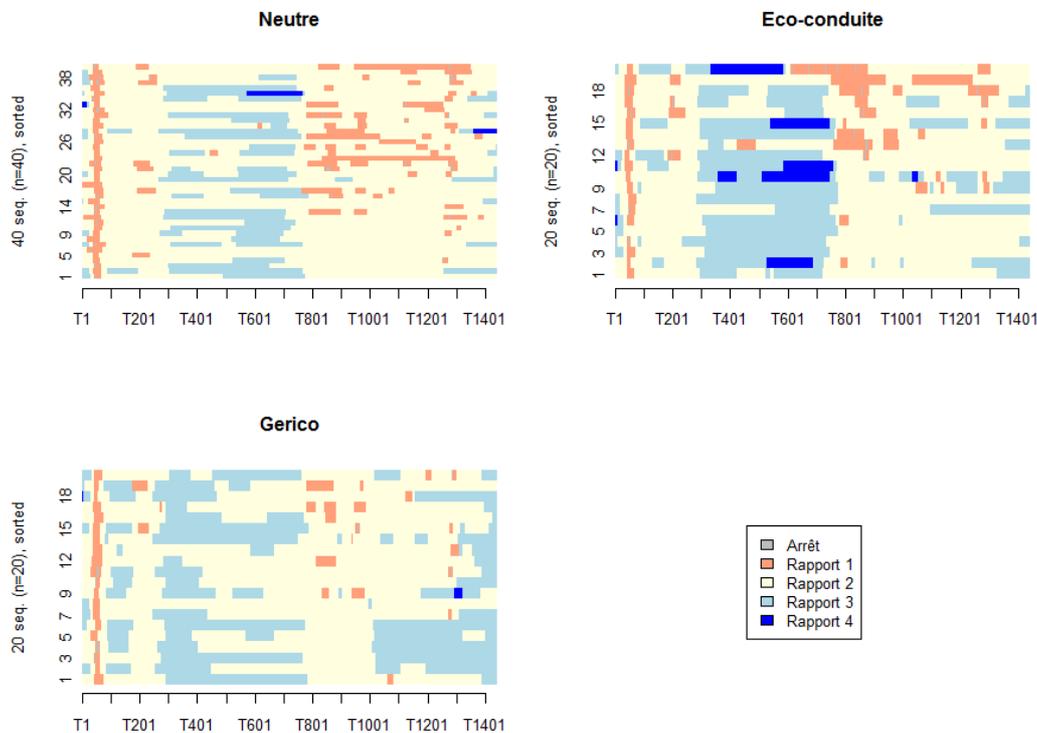
Dans cette partie, nous analysons les séquences d'états du système « conducteur-véhicule » sur des sections du parcours Gerico. Nous utilisons pour cela le package « TramineR » du logiciel R permettant l'analyse de séquences d'états de données longitudinales.

Pour chaque groupe de trajectoires, nous avons classé les séquences d'état en fonction de la consommation moyenne. La trajectoire présentant la consommation la plus élevée se trouve en haut des graphiques.

14.1 - Traversée de Pinsaguel

14.1.1 - Rapports de boîte

14.1.1.a - Modes de conduite



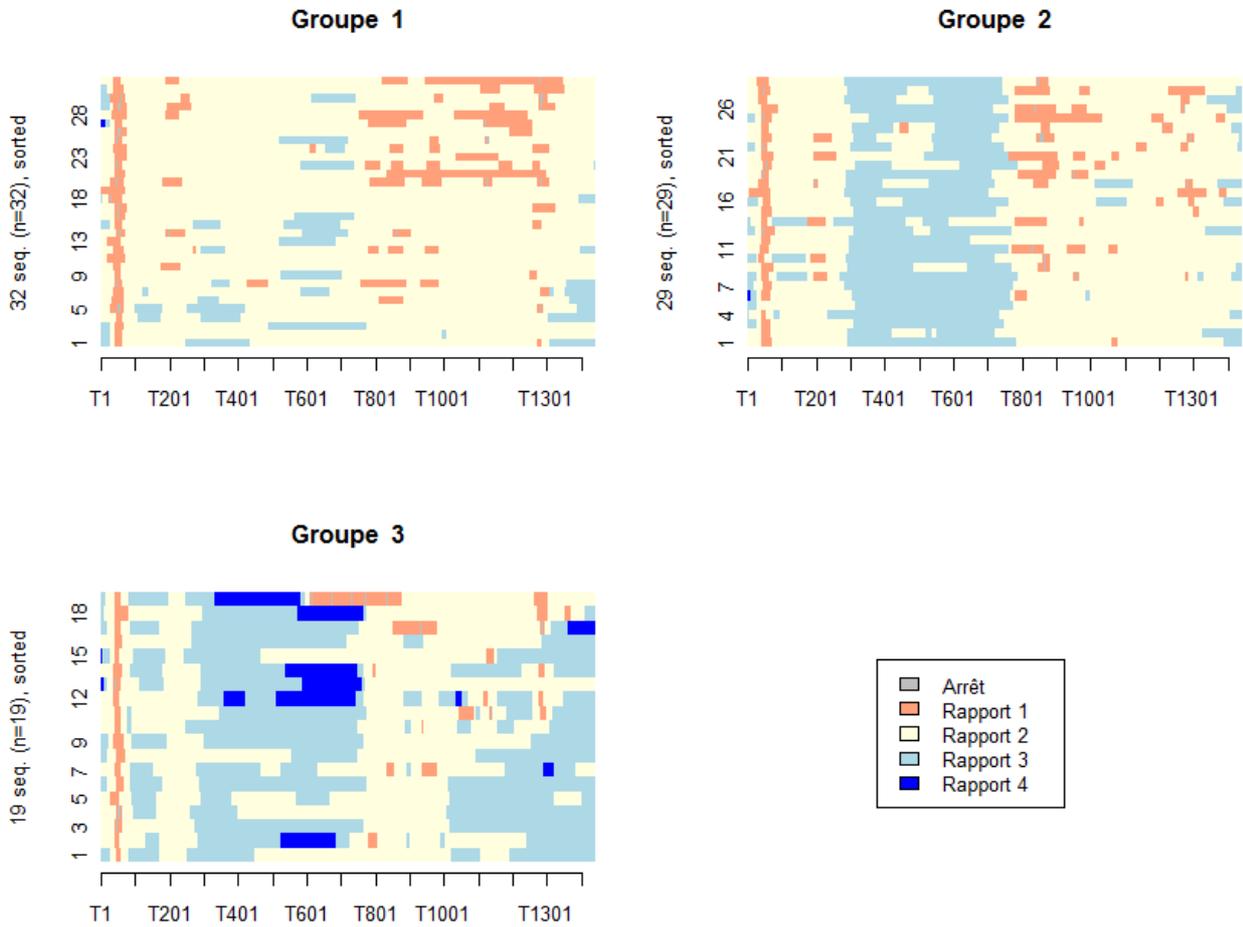
En mode neutre, en traçant les séquences d'états relatifs aux rapports de boîte, nous notons que les conducteurs roulent principalement en 1ère et deuxième.

En mode éco-conduite, les usagers utilisent des rapports plus élevés. Ils roulent en 3ème lorsque la situation le permet. Certains usagers n'hésitent pas utiliser le 4^{ème} rapport. Cependant, l'utilisation de la quatrième vitesse n'est pas synonyme de gain de carburant.

En mode Gerico nous nous attendions à ce que la distance parcourue en troisième soit très nettement supérieure à celle du mode éco-conduite puisque le système Gerico incite les usagers à rouler en bas régime.

14.1.1.b - Classification des séquences

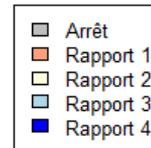
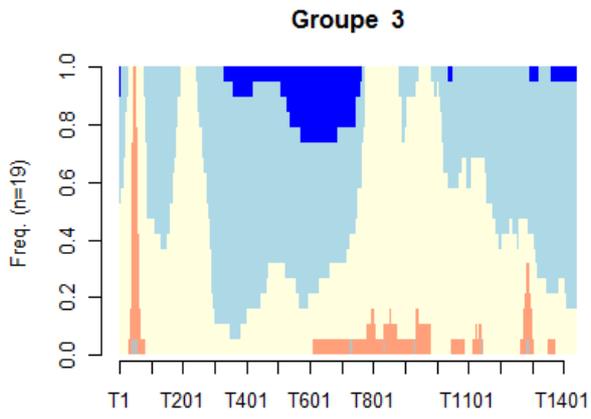
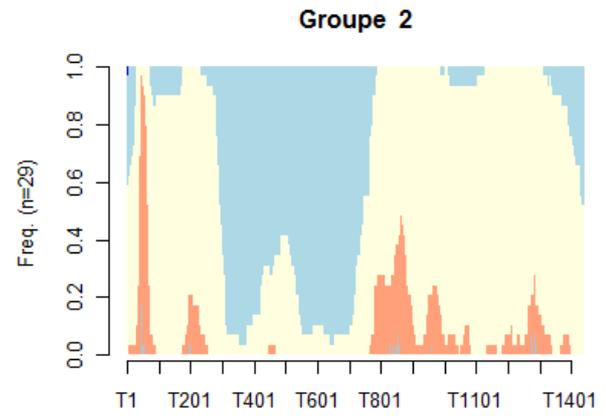
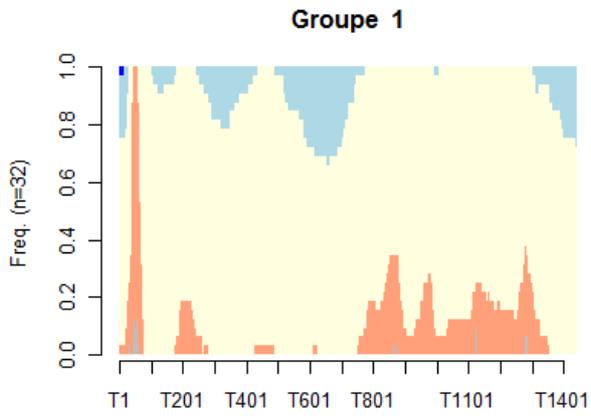
Nous réalisons une classification hiérarchique des séquences d'états en utilisant la distance de Ward entre trajectoires. Nous regroupons les trajectoires en 3 groupes.

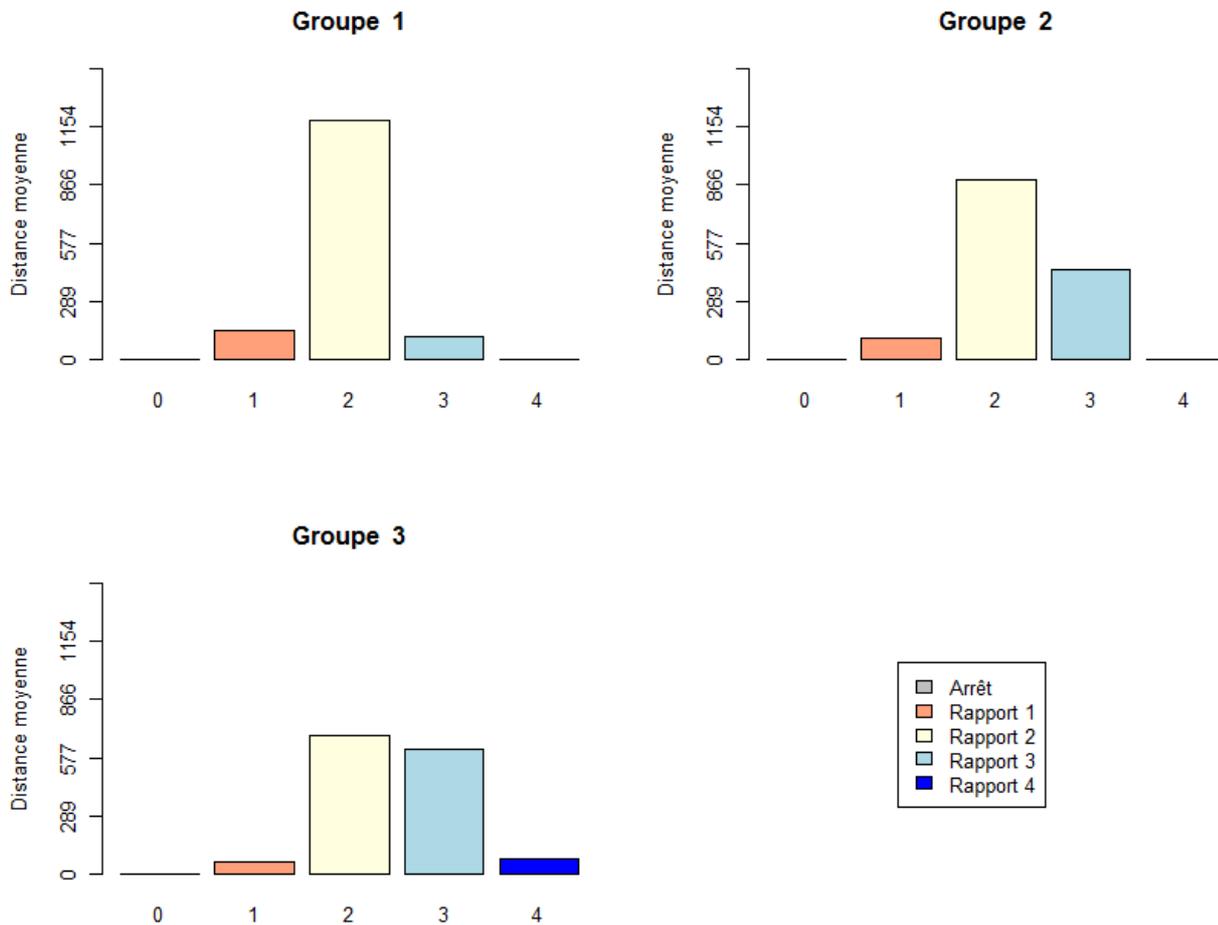


D'après le graphique ci-dessus, dans le groupe 1, nous retrouvons les trajectoires pour lesquelles l'utilisateur a utilisé principalement les rapports 1 et 2.

Dans le groupe 3, figurent les trajectoires où les utilisateurs ont privilégié les rapports 3 et 4.

Le groupe 2 est un groupe intermédiaire où les utilisateurs roulent en 3ème sur le secteur ne présentant pas d'obstacles et en deuxième dans le secteur centre-village de Pinsaguel.





Mode	Groupe		
	1	2	3
Neutre	55%	35%	10%
Eco-conduite	15%	50%	35%
Gerico	35%	25%	40%

Nous notons que dans le premier groupe se trouvent 55 % des trajectoires réalisées en mode neutre et 35 % des trajets réalisés en mode Gerico.

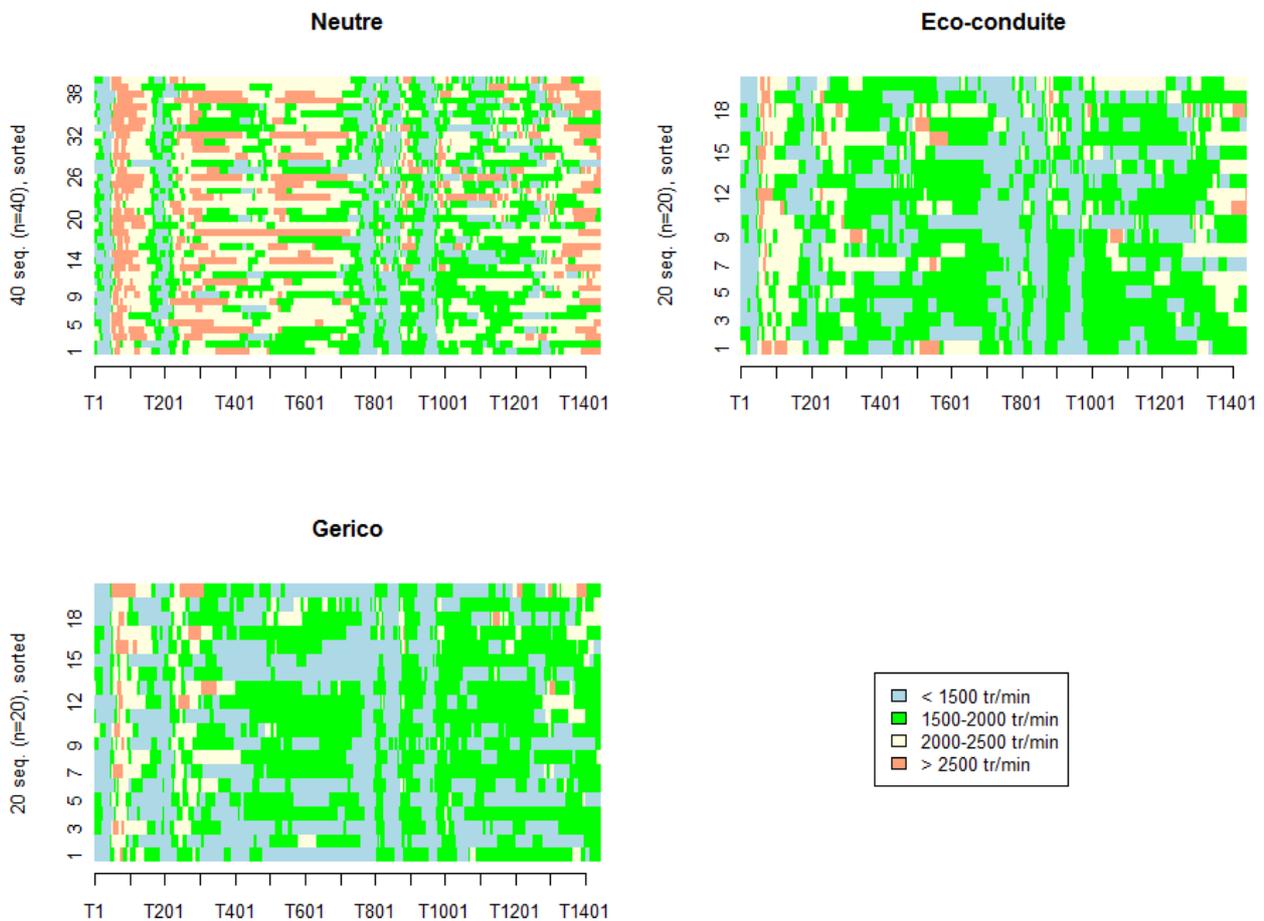
Dans le deuxième groupe, figurent 50 % des trajectoires réalisés en mode Eco-conduite.

Dans le dernier groupe, nous retrouvons 40 % des trajets réalisés en mode Gerico et 35 % des trajets réalisés en mode Eco-conduite.

14.1.2 - Régime moteur

Nous avons classifié l'état du moteur selon le régime moteur en 4 classes : inférieure à 1500tr/min, 1500-2500 tr/min, 2000-2500 tr/min et supérieure à 2500 tr/min.

14.1.2.a - Modes de conduite



Régime moteur	Mode		
	Neutre	Eco-conduite	Gerico
<1500	17.9%	30.0%	39.7%
1500-2000	31.1%	48.7%	48.2%
2000-2500	34.3%	18.7%	10.1%
> 2500	16.8%	2.6%	1.9%

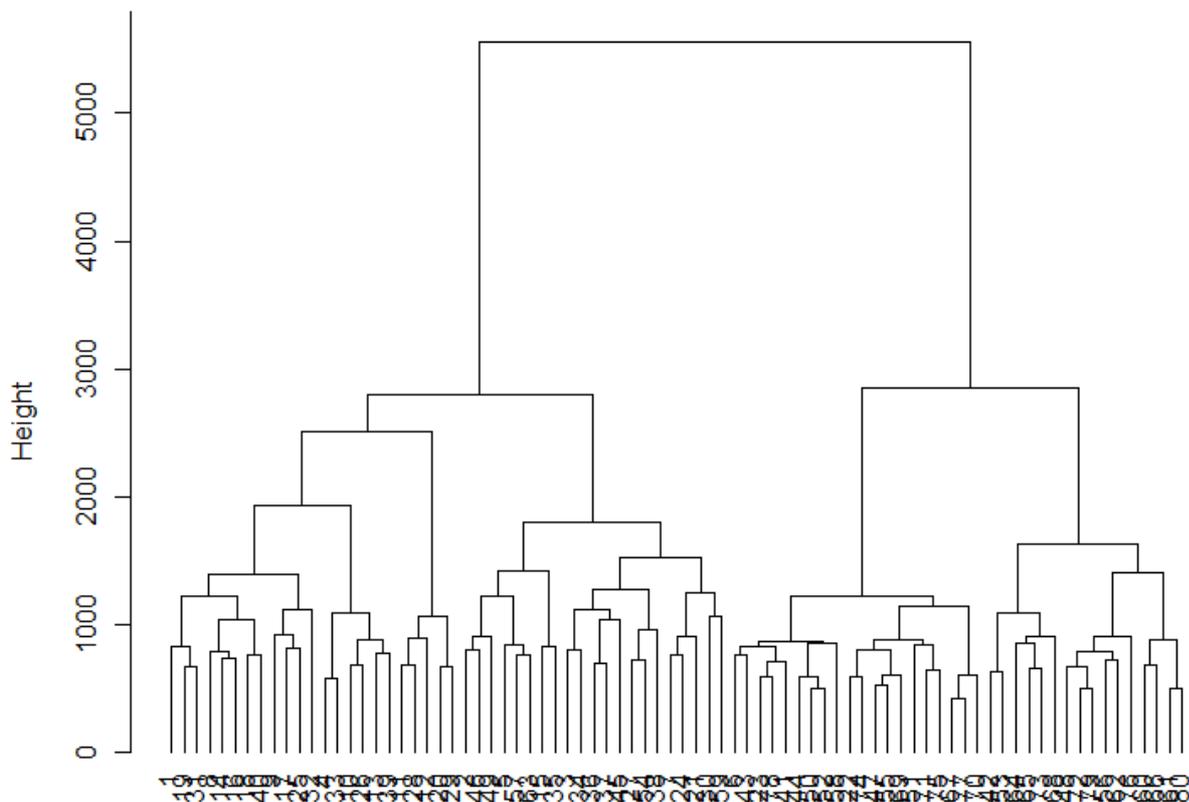
Nous notons que pour le mode neutre 16.8 % de la distance est parcourue en sur-régime (> 2500 tr/min) contre 2.6% en mode éco-conduite et 1.9 % en mode Gerico.

En mode éco-conduite, les bas-régimes sont privilégiés. En mode Gerico, 88 % de la distance est parcourue avec un régime moteur inférieur à 2000 tr/min contre 78.7 % en mode éco-conduite et 49 % en mode neutre.

14.1.2.b - Classification des séquences

Nous réalisons une classification hiérarchique des séquences d'états liés au régime moteur.

CAH des trajectoires selon leur régime moteur



Agglomerative Coefficient = 0.87

L'arbre hiérarchique divise l'ensemble des trajectoires en deux sous ensembles qui se divise aussi en deux parties presque au même niveau. Pour la première division, dans le premier groupe nous

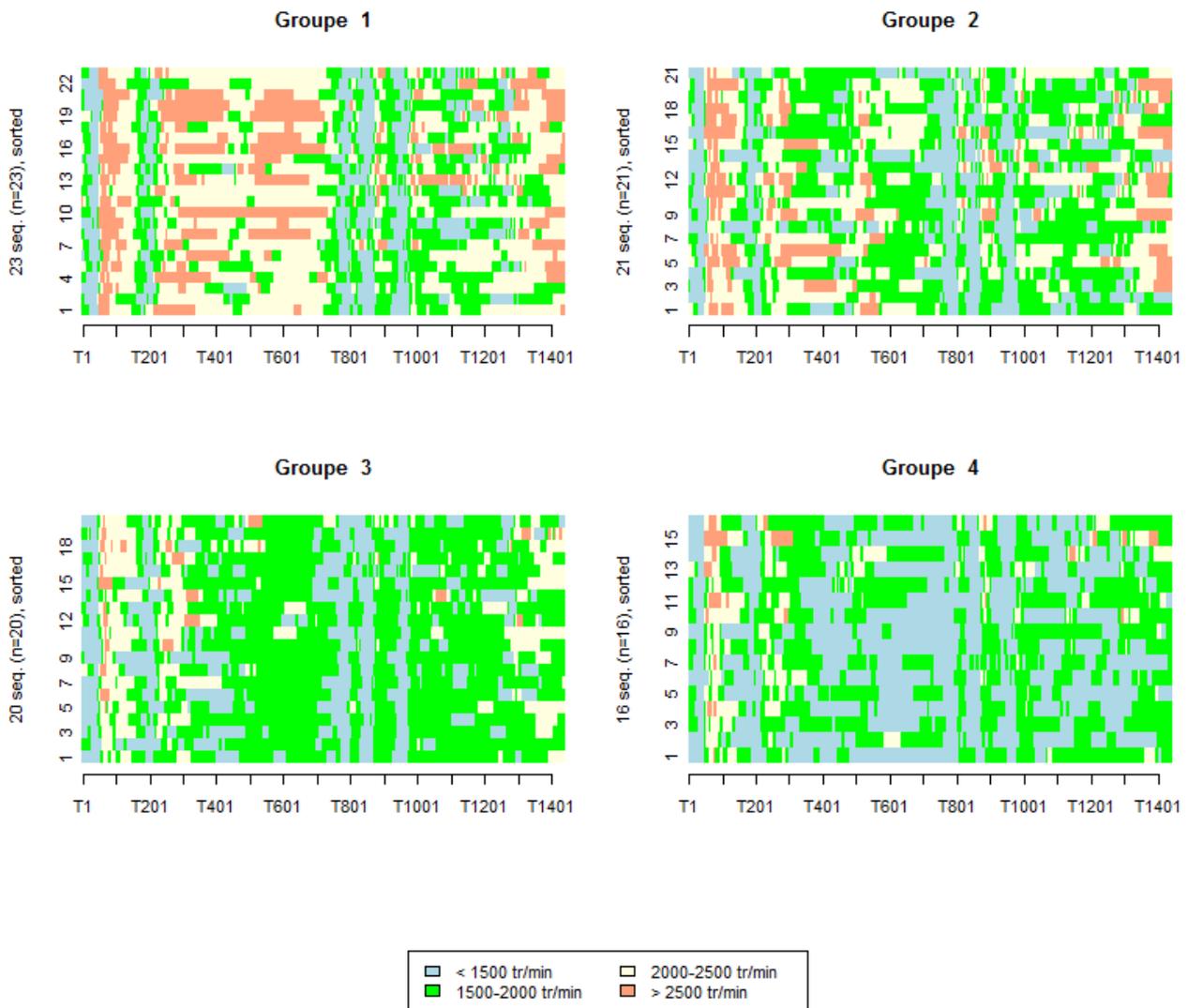
retrouvons 93 % des trajectoires réalisées en mode « neutre » et dans le second groupe respectivement 70 % et 95 % des trajectoires réalisées dans les modes « éco-conduite » et « Gerico ». Comme nous souhaitons dissocier les trajectoires du mode « éco-conduite » de celles du mode « Gerico », nous choisissons de couper l'arbre hiérarchique en 4 groupes.

Mode	Groupe			
	1	2	3	4
Neutre	58%	35%	8%	0%
Eco-conduite	0%	30%	45%	25%
Gerico	0%	5%	40%	55%

Dans le premier groupe, nous retrouvons uniquement des trajectoires réalisées en mode neutre.

Dans le groupe 3, nous retrouvons 45 % des trajectoires réalisées en mode « éco-conduite » et 40 % des trajectoires réalisés en mode Gerico.

Dans le dernier groupe nous retrouvons 55 % des trajectoires réalisées en mode Gerico.



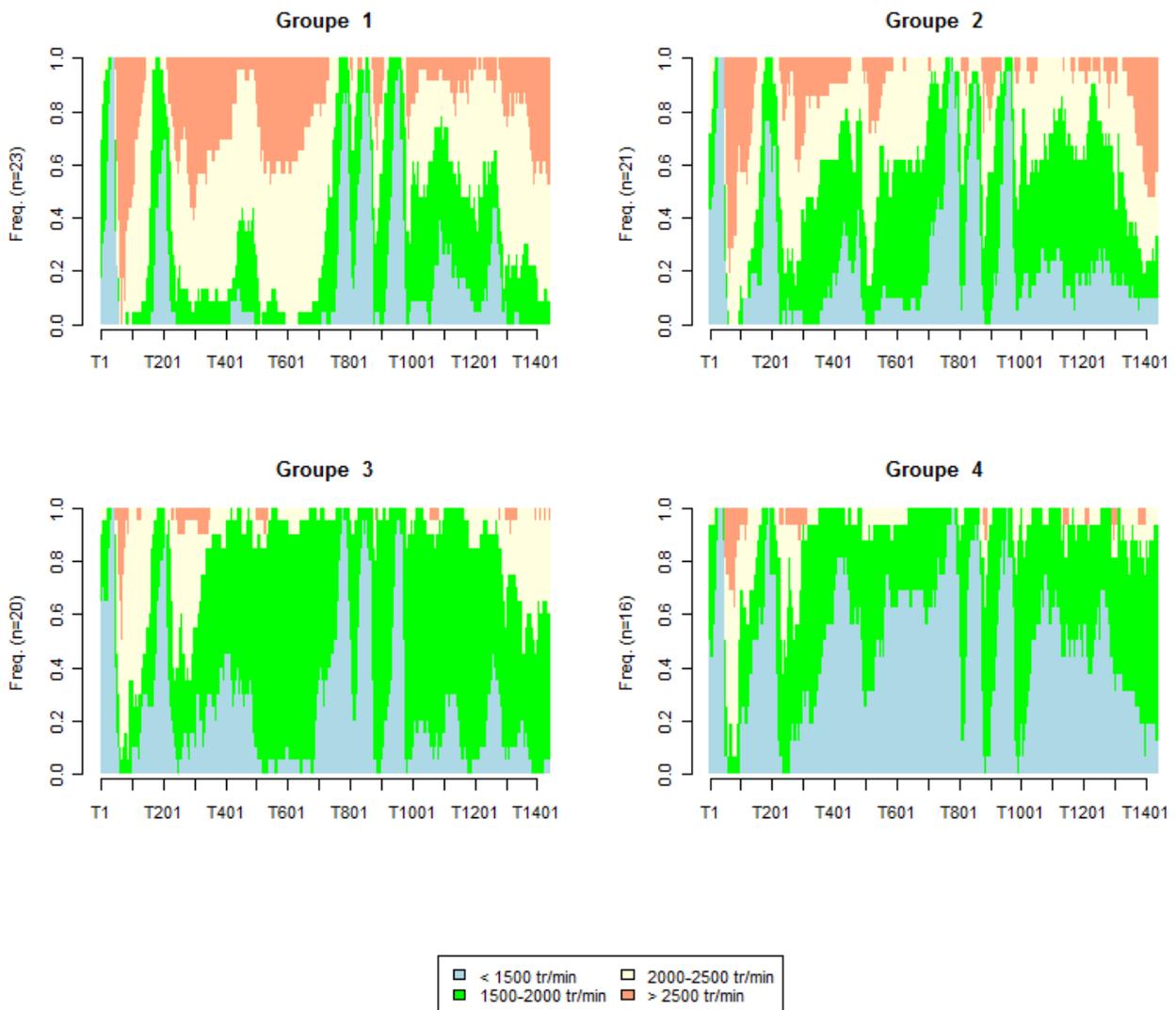
Régime moteur	Groupe			
	1	2	3	4
<1500	15.6%	22.8%	25.5%	47.7%
1500-2000	25.3%	37.8%	57.1%	41.7%
2000-2500	39.2%	28.4%	15.5%	8.8%
> 2500	20.0%	11.0%	1.9%	1.8%

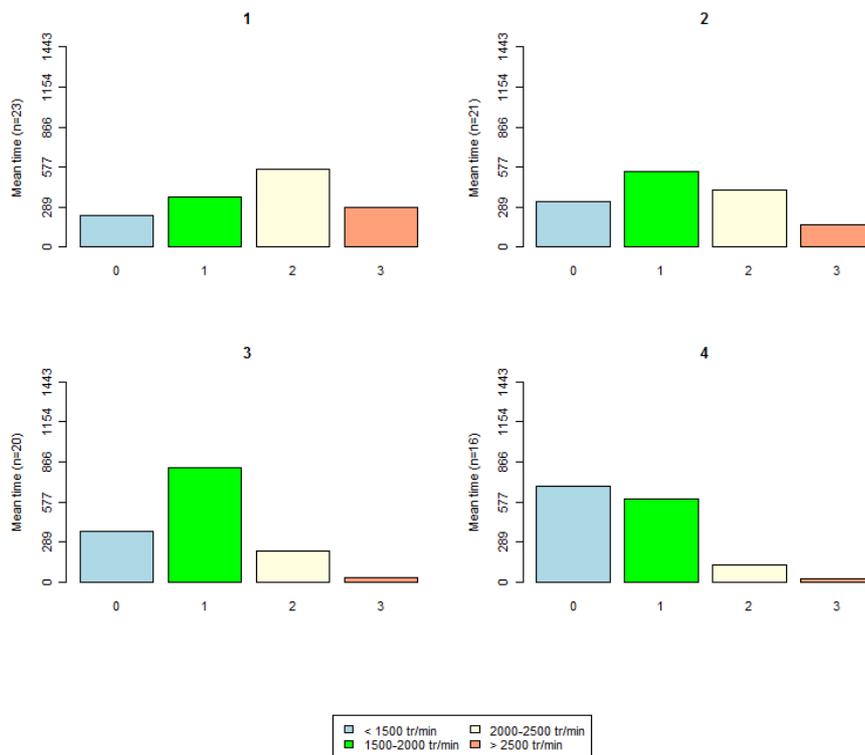
D'après le graphique et le tableau ci-dessus, dans les groupes 1 et 2 nous retrouvons les trajectoires pour lesquelles le pourcentage de distance parcourue avec un régime moteur élevé est important. Dans le groupe 1, 20 % de la distance est parcourue avec un régime moteur supérieur à 2500 tr.min⁻¹ contre 11 % dans le groupe 2 et seulement 1.9 % et 1.8 % pour les groupes 3 et 4.

59.2 % de la distance est parcourue avec un régime moteur supérieur à 2000 tr.min⁻¹ dans le groupe 1 contre 39.4 % dans le groupe 2 et seulement 17.4 % et 10.6 % dans les groupes 3 et 4.

Pour le groupe 3, une grande partie de la distance (57.1%) est parcourue avec un régime moteur compris entre 1500 et 2000 tour.min⁻¹.

Dans le groupe 4, nous retrouvons les trajectoires pour lesquelles la distance parcourue en sous régime est élevée (47.7 % de la distance parcourue).



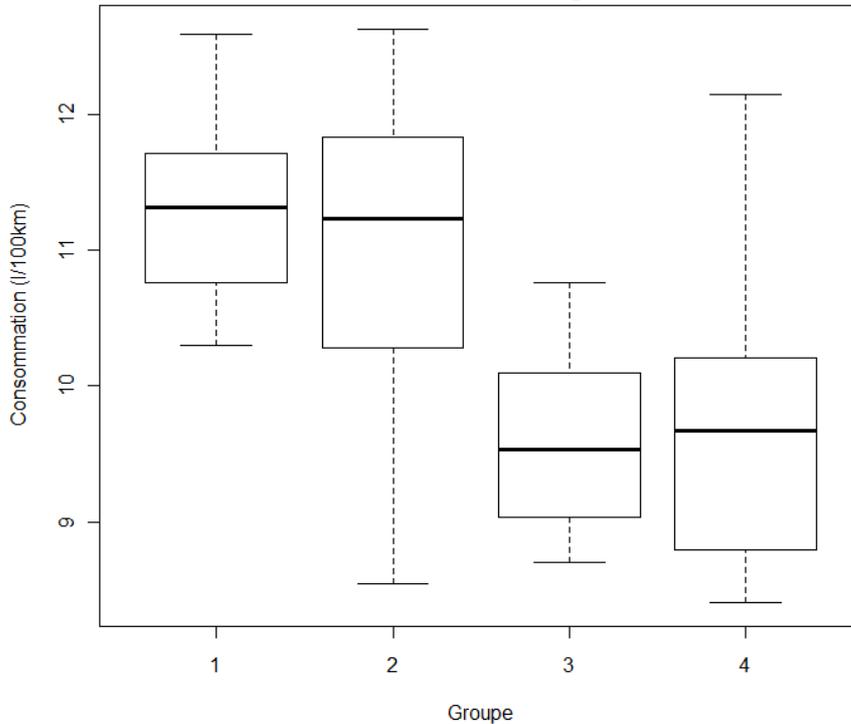


Comme le montrent les boîtes à moustaches suivantes où nous avons représenté la consommation moyenne des usagers, dans les deux premiers groupes, la consommation est relativement élevée. Les consommations moyennes sont respectivement de 11.3 l/100 km (avec un écart-type de 0.7) et 11 l/100 km (avec un écart-type de 1.1) pour les groupes 1 et 2.

Pour les groupes 3 et 4 où les usagers ont circulé avec des régimes moteurs peu élevés, les consommations moyennes sont très nettement inférieures aux consommations des deux premiers groupes. La consommation moyenne pour les deux groupes est de 9.6 l/100 km/h (réduction d'un peu moins de 14 % de consommation par rapport aux deux premiers groupes) avec des écarts-types respectifs de 0.7 et 1.

Groupe	Consommation (l/100 km)	
	Moyenne	Écart-type
1	11.29	0.68
2	10.99	1.07
3	9.61	0.65
4	9.64	1.00

Boîtes à moustaches des consommations
Classification des séquences d'états selon le régime moteur
Traversée de Pinsaguel

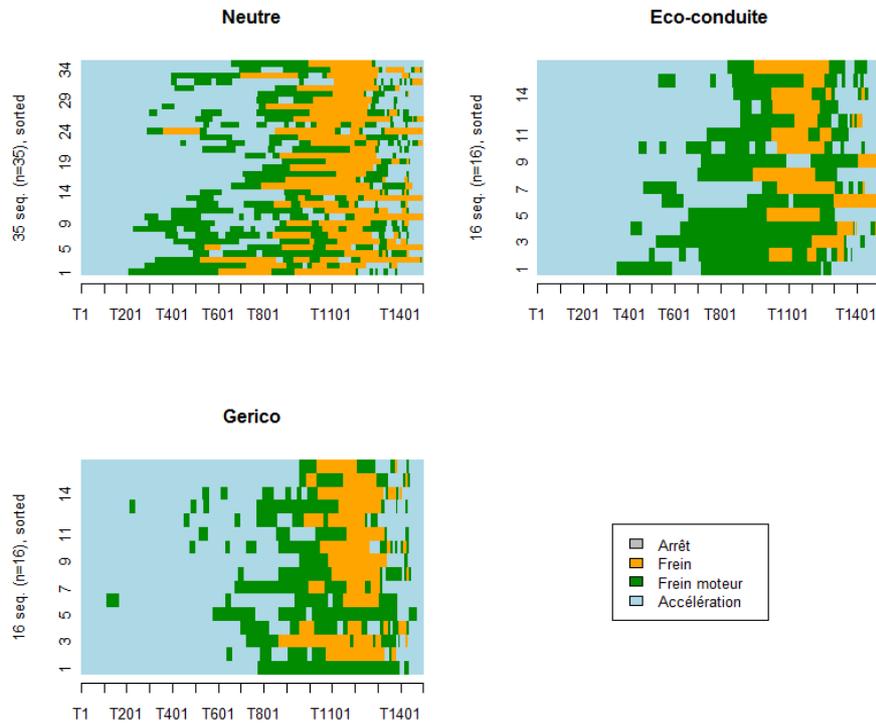


14.2 - Décélération au péage

Nous analysons les états du système lors de la phase de décélération sur 1500 mètres. Les états utilisés sont : accélération (pédale d'accélération enfoncée), frein (pédale de frein enfoncée) et frein moteur (pédales d'accélération et de frein relâchées).

Dans cette partie, nous étudions principalement l'utilisation du frein moteur en phase de décélération.

14.2.1 - Influence du mode de conduite



Etat	Mode		
	Neutre	Eco-conduite	Gerico
Frein	22.4%	12.0%	13.7%
Frein moteur	25.2%	30.2%	22.9%
Accélération	52.4%	57.8%	63.4%

D'après le tableau ci-dessus, nous notons une très nette diminution de la distance parcourue la pédale enfoncée en mode éco-conduite et Gerico par rapport au mode neutre. Le pourcentage de distance parcourue avec la pédale de frein enfoncée est de 12 % en mode « éco-conduite » et de 13.7 % en mode Gerico contre 22.4 % en mode neutre soit des réductions respectives de 10.4 et 8.7 points.

Nous remarquons une nette augmentation du temps passé en frein moteur entre les deux modes neutre et éco-conduite. Le pourcentage de distance parcourue en frein moteur est de 30.2 % en mode « éco-conduite » contre 25.2 % en mode neutre soit une augmentation de 5 points.

La distance parcourue avec la pédale d'accélération enfoncée augmente entre les modes éco-conduite et Gerico et le mode neutre. En effet, les expérimentateurs abordent la zone contenant le péage avec des vitesses beaucoup plus faibles dans les modes Eco-conduite et Gerico. A 1500 mètres en amont du péage les vitesses moyennes respectives sont de 102 et 98 km/h dans les modes

éco-conduite et Gerico contre 121 km/h en mode neutre.

14.2.2 - Classification des trajectoires

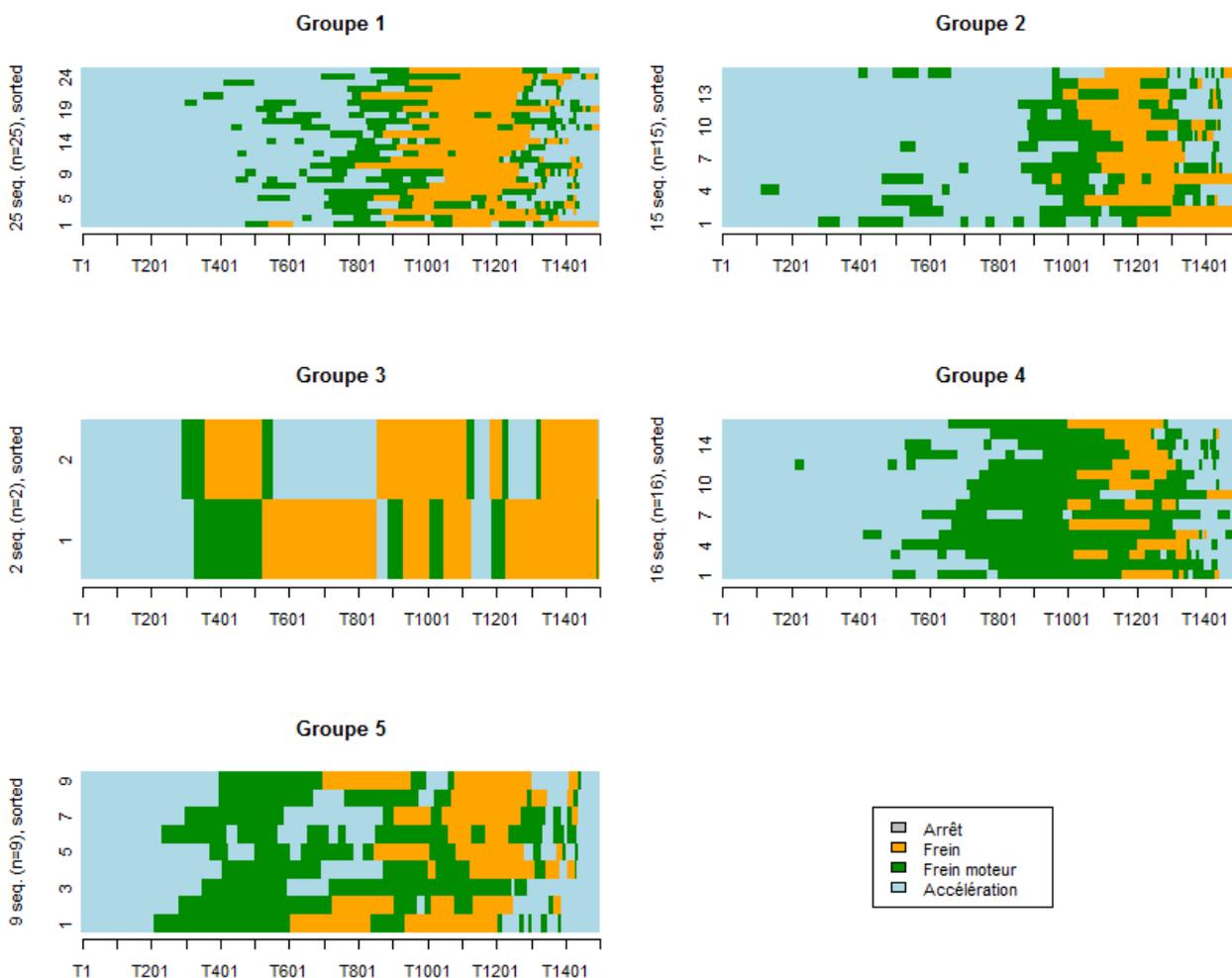
Nous regroupons les trajectoires en 5 classes après avoir réalisé une classification hiérarchique ascendante des trajectoires. Le nombre de classes choisi est élevé puisque nous souhaitons dissocier les trajectoires Gerico des trajectoires réalisées en mode neutre.

Mode	Groupe				
	1	2	3	4	5
Neutre	46%	11%	6%	14%	23%
Eco-conduite	19%	31%	0%	44%	6%
Gerico	38%	38%	0%	25%	0%

Dans le premier groupe, nous retrouvons 46 % des trajectoires réalisées en mode neutre et 38 % des trajectoires réalisés en mode Gerico. Ce groupe correspond aux conducteurs qui relâchent la pédale d'accélération tardivement. Nous retrouvons un pourcentage très élevé de trajectoires Gerico puisque le système Gerico incite les usagers à rouler à une vitesse comprise entre 90 et 100 km/h et par conséquent ils relâchent plus tardivement la pédale d'accélération.

Le groupe 3 est constitué de 2 trajectoires du mode neutre. Pour ce groupe, la distance parcourue en freinant est très élevée.

Dans le groupe 4, nous trouvons 44 % des trajectoires réalisées en mode « éco-conduite » et dans le dernier groupe figurent principalement des trajectoires réalisées en mode neutre.



Etat	Groupe				
	1	2	3	4	5
Frein	21.7%	15.0%	46.3%	9.4%	20.8%
Frein moteur	19.5%	19.4%	16.2%	35.9%	38.3%
Accélération	58.8%	65.6%	37.5%	54.7%	40.8%

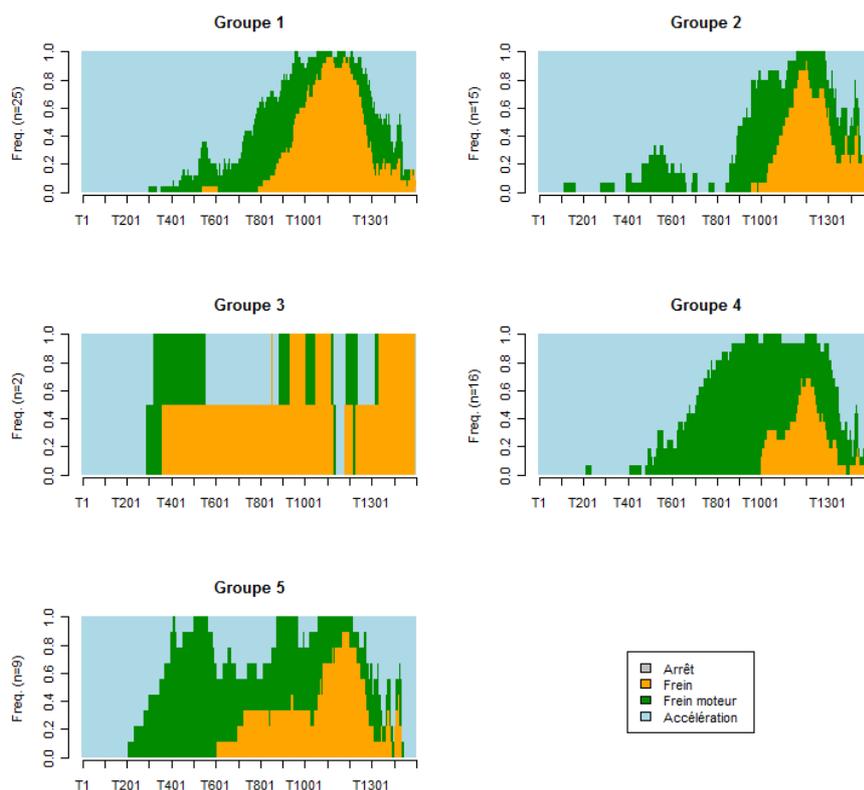
D'après le tableau ci-dessus, ce sont dans les groupes 4 et 5 que le frein moteur est le plus utilisé. Plus de 35 % de distance est parcourue, soit plus de 500 mètres, pour ces deux groupes contre moins de 20 % pour les groupes 1, 2 et 3.

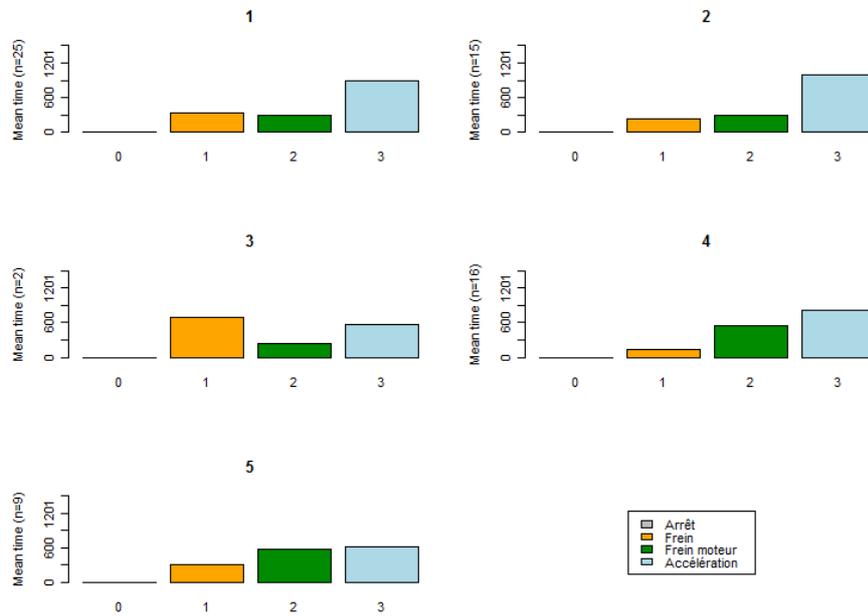
Groupe	Nombre trajectoires	Consommation (l/100km)	
		Moyenne	Écart-type
1	25	4.39	0.56
2	15	4.29	0.47
3	2	3.68	1.47
4	16	4.03	0.71
5	9	3.31	0.84

D'après le tableau ci-dessus, la consommation moyenne des groupes 1 et 2 est nettement plus élevée que les consommations moyennes des groupes 3, 4 et 5 puisque les usagers de ces groupes utilisent le frein-moteur ou appuie sur la pédale de frein qu'assez tardivement. Pour les trajets Gerico, la décélération tardive est due à une vitesse faible en entrée de zone d'influence du péage (vitesse moyenne inférieure à 100 km/h).

Pour le groupe 4, la consommation est faible en raison de l'utilisation du frein moteur.

Pour le groupe 5, la consommation est faible en raison d'une vitesse d'approche élevée couplée avec l'utilisation du frein moteur environ 1 kilomètre avant le péage.

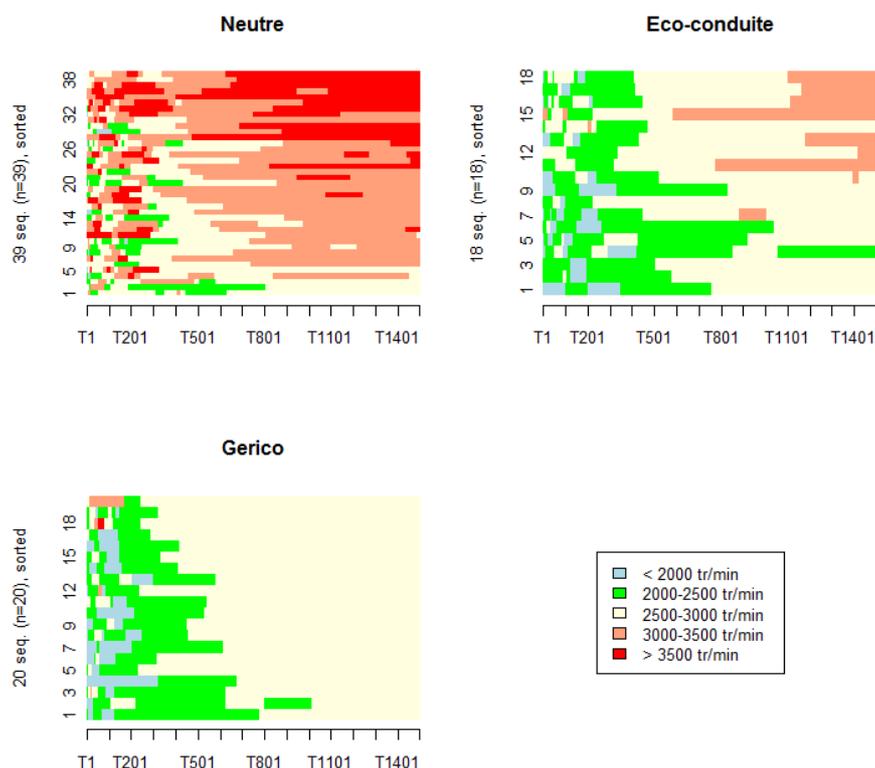




14.3 - Accélération après péage

Nous analysons les séquences d'états liées aux régimes moteur après franchissement du péage sur une distance de 1500 mètres. Les régimes moteur ont été regroupés en classes de largeur de 500 $\text{tour}\cdot\text{min}^{-1}$.

14.3.1.a - Modes de conduite



Pour chaque mode, les trajectoires étant ordonnées selon la consommation moyenne, nous voyons clairement que le régime moteur est très lié à la consommation et qu'en mode « éco-conduite » et « Gerico », les usagers changent rapidement de rapport de boîte (absence ou peu de distance parcourue avec un régime moteur supérieur à 2500 tour/min sur les 500 premiers mètres).

Pour lier la vitesse en fin de phase d'accélération avec le régime moteur, pour le véhicule Gerico, en 4ème, le régime moteur est supérieur à respectivement 2500, 3000 et 35000 tour/min dès que la vitesse est supérieure à respectivement 90, 107 et 125 km/h.

En mode neutre, une majorité des trajectoires ont des vitesses finales supérieures à 110 km/h et pour certaines supérieures à 125 km/h.

En mode « éco-conduite », peu d'expérimentateurs ont une vitesse finale supérieure à 110 km/h.

Pour le mode « Gerico », en fin d'accélération le régime moteur de l'ensemble des expérimentateurs est inférieur à 3000 tour.min⁻¹ puisque la vitesse conseillée par le système est comprise dans l'intervalle 90-100 km/h.

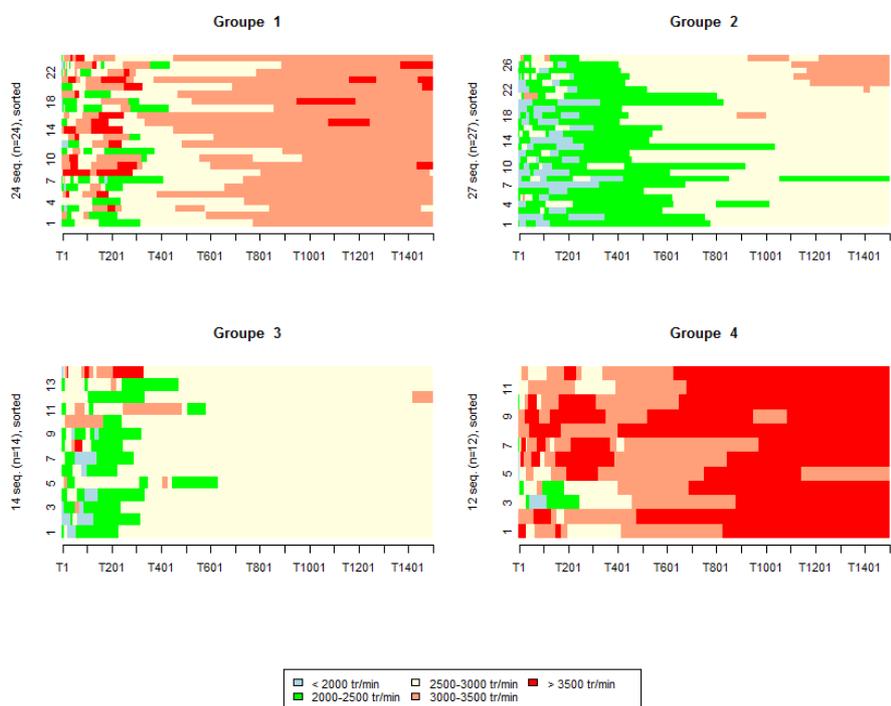
Classe Régime-moteur	Mode		
	Neutre	Eco-conduite	Gerico
< 2000 tr/min	0.3%	5.1%	5.8%
2000 - 2500	5.3%	28.1%	21.9%
2500 - 3000	25.9%	54.2%	71.5%
3000 - 3500	46.6%	12.5%	0.7%
> 3500 tr/min	21.9%	0.0%	0.1%

D'après le graphique et le tableau ci-dessus, en mode neutre nous notons que 22 % de la distance est parcourue avec un régime moteur supérieur à 3500 tour.min⁻¹. Ce taux inclut la distance parcourue par certains usagers avec une vitesse supérieure à 125 km/h.

Pour les modes éco-conduite et Gerico, la distance parcourue avec un régime moteur supérieur à 3000 tour.min⁻¹ est faible (12.5 % pour le mode éco-conduite et 0.8 % pour le mode Gerico).

14.3.1.b - Classification des séquences d'états

Nous regroupons les trajectoires en 3 classes après avoir réalisé une classification hiérarchique ascendante des trajectoires.



Mode	Groupe			
	1	2	3	4
Neutre	56%	5%	8%	31%
Eco-conduite	11%	72%	17%	0%
Gerico	0%	60%	40%	0%

Classe Régime-moteur	Groupe			
	1	2	3	4
< 2000 tr/min	0.2%	6.8%	1.7%	0.4%
2000 - 2500	5.6%	30.9%	11.8%	1.4%
2500 - 3000	26.5%	57.0%	82.2%	7.7%
3000 - 3500	61.9%	5.3%	3.4%	31.6%
> 3500 tr/min	5.7%	0.0%	0.9%	58.9%

D'après les tableaux et le graphique ci-dessus, une grande majorité des trajectoires du mode neutre se répartit dans les groupes 1 et 4.

Le groupe 4 constitué uniquement de trajectoires du mode neutre correspond aux trajets parcourus en sur-régime. Près de 59 % de la distance est parcourue en sur-régime avec un régime moteur supérieur à 3500 tr.min⁻¹.

Pour le groupe 1 où les régimes moteur sont plus faibles que le groupe 4 mais sont néanmoins assez élevés, 61.9 % de la distance est parcourue avec un régime moteur compris entre 3000 et 3500 tour/min.

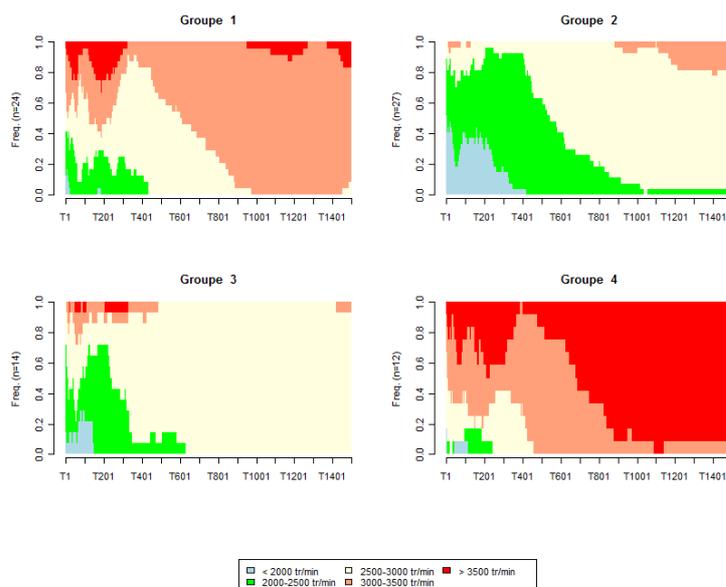
D'après le tableau ci-dessous, la consommation moyenne pour les trajectoires du groupe 4 est de plus de 15.3 l/100 km contre 12.7 l/100 km pour les trajectoires du groupe 1.

La majorité des trajets des modes « éco-conduite » et « Gerico » se répartissent dans les groupes 2 et 3. Pour les groupes 2 et 3, le pourcentage de distance parcourue avec un régime moteur supérieur à 3000 tour/min est faible. Il est de 5.3 % pour le groupe 2 et de 4.2 % pour le groupe 3.

Le groupe 2 se différencie du groupe 3 par la distance parcourue avec un régime moteur inférieur à 2500 tour/min. Ce taux est de 37.7 % pour le groupe 2 contre 13.5 % pour le groupe 3.

La consommation moyenne du groupe 2 est d'environ 10 l/ 100 km contre 10.4 l/100 km pour le groupe 3. Comme ces moyennes sont assez proches, nous réalisons le test de Wilcoxon afin de tester l'égalité des moyennes. La probabilité critique renvoyée par le test vaut 5.2e-2 (W = 188). Cette valeur est supérieure à 5 % et par conséquent les moyennes de consommation entre les deux groupes ne sont pas significativement différentes.

Groupe	Consommation (l/100km)	
	Moyenne	Écart-type
1	12.65	0.80
2	9.97	0.98
3	10.4	0.66
4	15.28	1.17



15 - Approche microscopique

Dans cette partie, nous analysons l'impact sur la consommation et la vitesse des véhicules d'éléments d'infrastructure tels que des ronds-points, des feux de circulation, le péage,...

15.1 - Le péage

Sur l'itinéraire parcouru par les expérimentateurs figure un péage. Il s'agit d'un élément d'infrastructure assez intéressant à étudier puisque c'est une section d'autoroute isolée où les conducteurs peuvent adapter leur allure. Comme il est annoncé très longtemps en amont, les usagers ont le temps d'anticiper le péage et donc d'adapter leur allure.

Dans cette partie, nous étudions la phase de décélération ainsi que la phase d'accélération.

Le péage étudié est situé sur une portion d'autoroute limitée à 130 km/h.

Les expérimentateurs sont équipés de badges de télépéage. Ils ne sont donc pas obligés de s'arrêter lors du franchissement du péage.

15.1.1 - Coût en carburant au péage

Pour évaluer le coût du péage, pour chaque conducteur, nous calculons la consommation sur une section de 4 kilomètres centrée sur le péage. Nous comparons cette consommation avec la section

précédente de même longueur. Nous avons choisi une section assez longue de 4 km (2 km pour la phase de décélération et 2 km pour la phase d'accélération afin de s'assurer que ces deux phases figurent en intégralité dans la section).

Nous obtenons les résultats suivants :

Mode	Section avant péage (l/100 km)	Section péage (l/100 km)	Variation		Phase de décélération (l/100 km)	Phase d'accélération (l/100 km)
			(l/100 km)	ml		
Neutre	8.62	8.85	0.23	8.64	5.85	11.79
Eco-conduite	7.08	7.33	0.26	9.29	5.14	9.50
GERICO	6.60	6.94	0.34	13.56	5.20	8.66
Ensemble	7.74	8.00	0.27	10.04	5.51	10.45

Sur l'ensemble des conducteurs, la consommation moyenne sur autoroute est de 7.7 l/100 km. Cette consommation est de 8 l/100 sur la section comportant le péage. Globalement, le coût du péage est de 10 ml de carburant. L'impact du péage est donc faible sur la consommation de carburant.

Dans le cadre de l'expérimentation GERICO, les expérimentateurs étaient munis de badge de télépéage, ne les obligeant pas à s'arrêter au péage. Le coût du péage est donc beaucoup plus élevé pour les usagers de l'autoroute devant s'arrêter pour s'acquitter des frais autoroutiers.

L'énergie dépensée pour atteindre la vitesse de croisière est compensée par la phase de décélération.

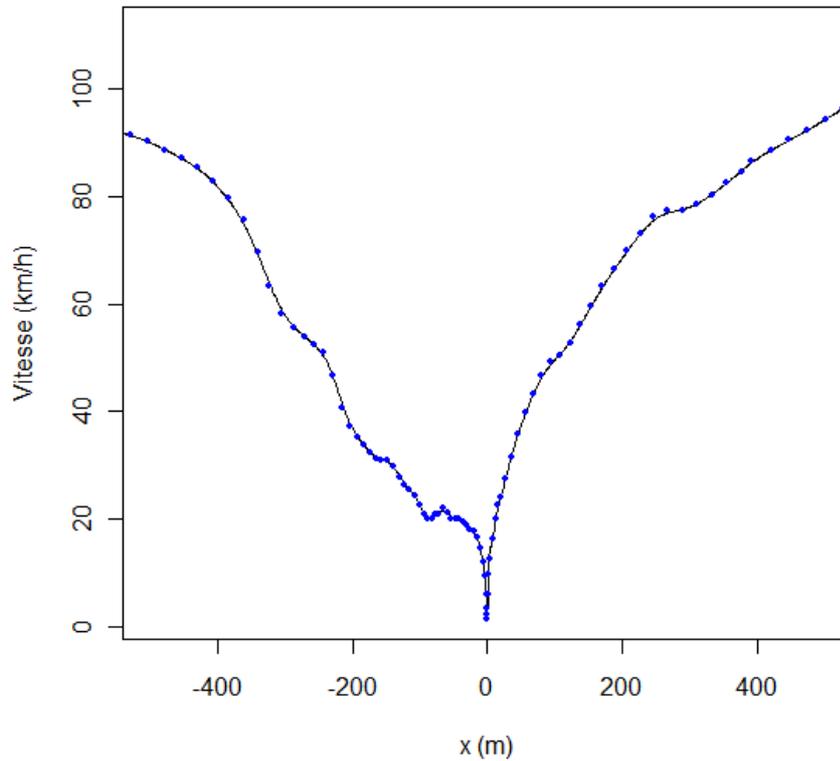
15.1.2 - Estimation des profils de vitesse par polynômes locaux

Nous disposons de données enregistrées toutes les secondes. Pour estimer le profil de vitesse, nous dissociions la phase de décélération de la phase d'accélération. En effet, lorsque le véhicule s'arrête au péage, le profil de vitesse en fonction de l'abscisse curviligne n'est pas « dérivable » et une estimation globale du profil de vitesse en utilisant des fonctions régulières ne fournirait pas la valeur nulle au niveau de l'abscisse où le véhicule s'arrête.

Nous estimons les profils de vitesse avant et après le péage en fonction de l'abscisse curviligne par régression par polynômes locaux de degré 1 .

Ci-dessous, un exemple d'estimation du profil de vitesse pour un expérimentateur s'arrêtant au péage.

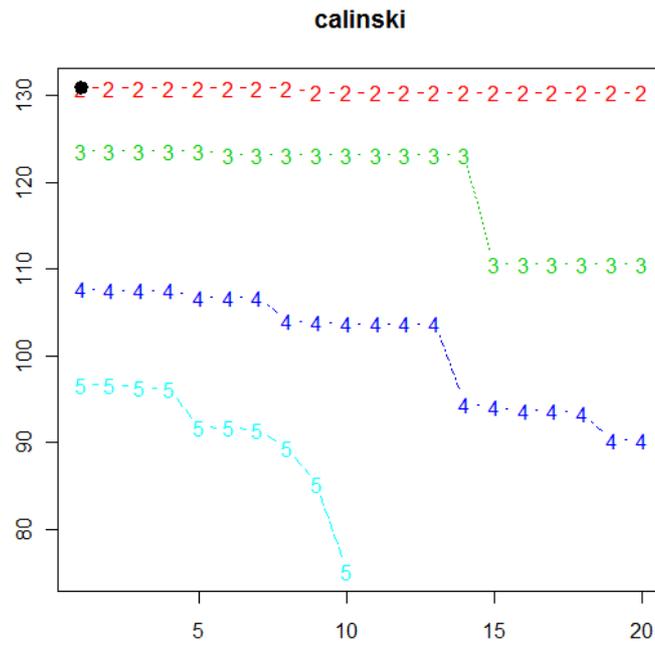
Estimation d'un profil de vitesse par régression par polynômes locaux



15.1.3 - Phase d'accélération

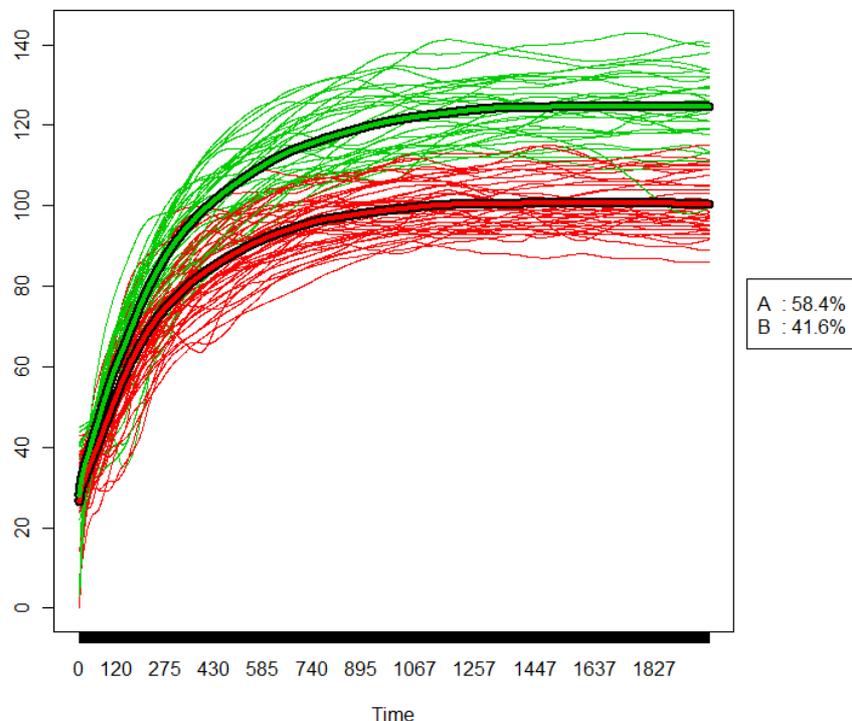
Dans cette partie, nous analysons les profils d'accélération et de vitesse des usagers durant la phase d'accélération leur permettant d'atteindre leur vitesse de croisière. Après avoir passé le péage, nous pouvons considérer que l'utilisateur est libre d'adapter son allure. De l'ensemble des profils des vitesses, nous ne gardons que ceux pour lesquels l'accélération est positive sur les premières centaines de mètres après franchissement du péage.

15.1.3.a - Classification des profils de vitesse



Nous utilisons le package `kml` pour classifier les profils en plusieurs groupes. D'après le graphique ci-dessus, le nombre de groupes optimal est de 2 en utilisant le critère de Kalinski.

15.1.3.b - Classification en 2 groupes



D'après le graphique ci-dessus, nous notons que la classification dépend très fortement de la vitesse de croisière atteinte par les expérimentateurs. Pour le groupe A (58.4 % des profils des vitesses), la vitesse finale atteinte par les usagers est inférieure à 110 km/h. Dans le groupe B (41.6 % des profils des vitesses), nous trouvons les profils de vitesse pour lesquels la vitesse finale varie entre 110 km/h et 140 km/h.

La répartition des trajectoires selon les groupes et les modes de conduite est la suivante :

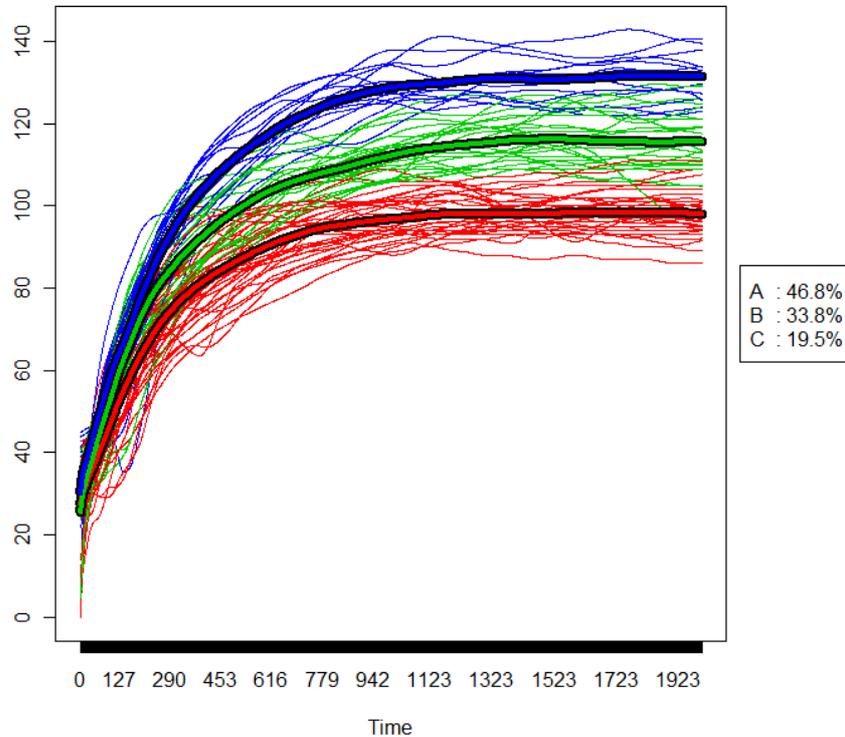
Mode	Groupe A		Groupe B	
	Nombre	% mode	Nombre	% mode
Neutre	8	20.5%	31	79.5%
Éco-conduite	17	94.4%	1	5.6%
GERICO	20	100.0%	0	0.0%

Dans le premier groupe correspondant aux vitesses les plus faibles, nous retrouvons l'ensemble des trajets Gerico, une grande majorité des profils de vitesse effectués en mode Eco-conduite et quelques trajets réalisés (20 %) en mode Neutre.

Dans le deuxième groupe, nous trouvons une grande partie (80 %) des profils de vitesse du mode neutre et un profil de vitesse du mode éco-conduite.

D'après le graphique représentant la classification des profils de vitesse, le principal critère est la vitesse de croisière atteinte par les expérimentateurs.

15.1.3.c - Classification 3 groupes



D'après le graphique ci-dessus, comme pour la classification en 2 groupes, le regroupement des profils de vitesse en 3 classes dépend très fortement de la vitesse de croisière atteinte par les expérimentateurs.

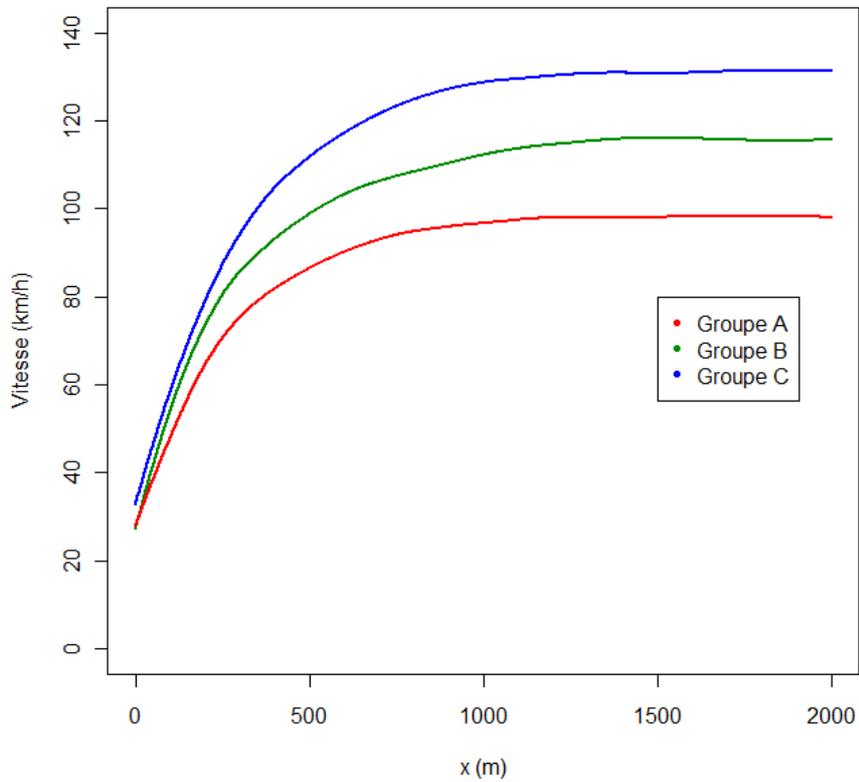
Mode	Groupe A		Groupe B		Groupe C	
	Nombre	% mode	Nombre	% mode	Nombre	% mode
Neutre	4	10.3%	20	51.3%	15	38.5%
Éco-conduite	12	66.7%	6	33.3%	0	0.0%
GERICO	20	100.0%	0	0.0%	0	0.0%

Dans le groupe A où une grande partie des trajectoires ont une vitesse finale inférieure à 100 km/h, nous retrouvons dans ce groupe l'ensemble des trajets effectués en mode Gerico où la vitesse optimale conseillée par le système d'aide à la conduite est comprise entre 90 et 100 km/h.

15.1.4 - Estimation par polynômes locaux des profils de vitesse

Pour chaque groupe, nous estimons le profil de vitesse après le péage en réalisant une régression par polynômes locaux de degré 2. Le paramètre de lissage h est choisi par minimisation du critère de validation croisée.

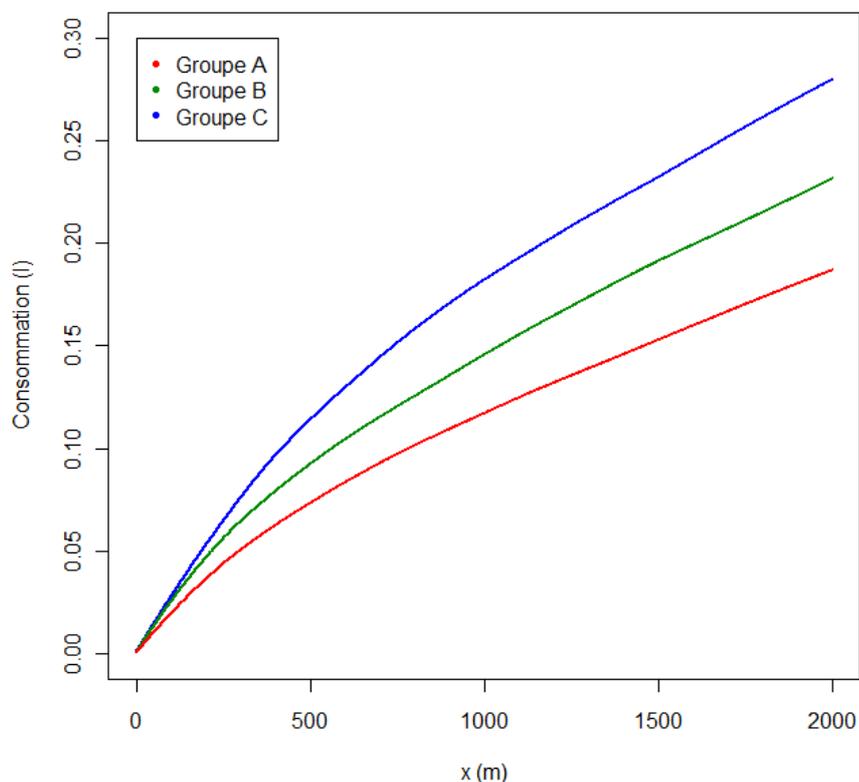
**Phase d'accélération après franchissement du péage
Estimation par polynômes locaux de profils de vitesse**



15.1.5 - Estimation par polynômes locaux des profils de consommation cumulée

Pour chaque groupe, nous estimons le profil de consommation après le péage en réalisant une régression par polynômes locaux de degré 2. Le paramètre de lissage h est choisi par minimisation du critère de validation croisée.

**Phase d'accélération après franchissement du péage
Estimation des profils de consommation cumulée**



15.1.6 - Comparaison avec le modèle d'accélération Akçelik

Les modélisations d'Akçelik sont des estimations de vitesse en fonction du temps.

A partir des profils de vitesse en fonction de la distance parcourue, nous obtenons les profils de vitesse et d'accélération en fonction du temps. Nous comparons ensuite ces profils de vitesse avec les modèles d'accélération d'Akçelik.

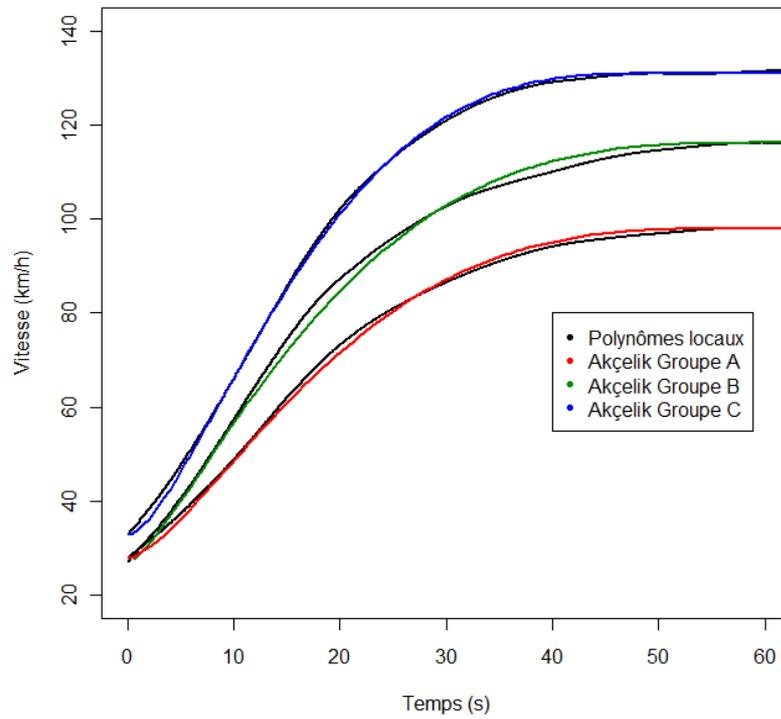
15.1.6.a - Phase d'accélération

Pour les 3 groupes nous utilisons les paramètres fournis dans le tableau suivant :

Variable	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Vitesse initiale	32.8 km/h	27.2 km/h	28 km/h
Vitesse finale	130.9 km/h	116.2 km/h	97.9 km/h
Temps d'accélération (s)	49.7 s	59.7 s	57.3 s
Distance accélération	1383 m	1504 m	1214 m

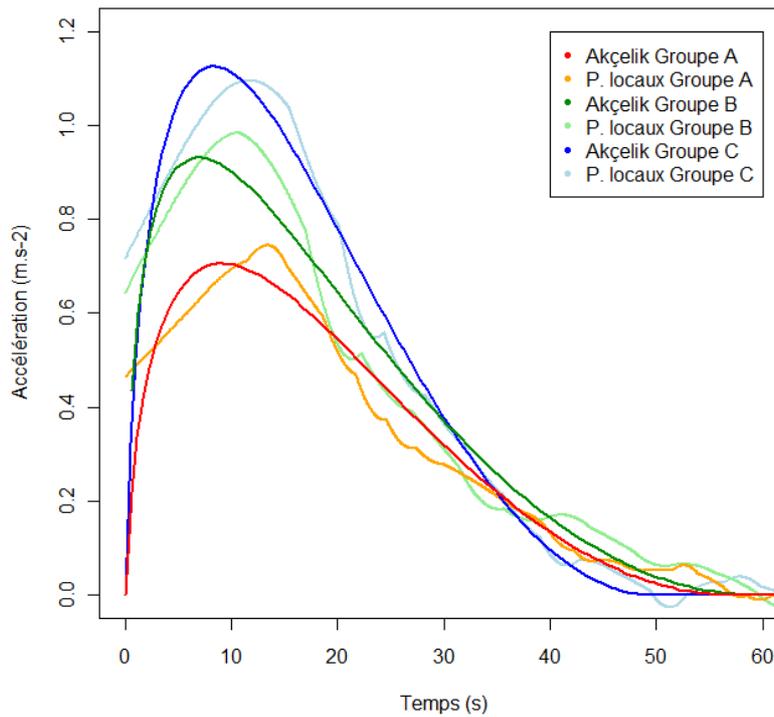
Ces paramètres ont été obtenus en utilisant l'estimation des profils de vitesse par polynômes locaux.

**Phase d'accélération après péage
Modélisation Akçelik**



Comparaison profils d'accélération

**Phase d'accélération après péage
Modélisation de l'accélération**

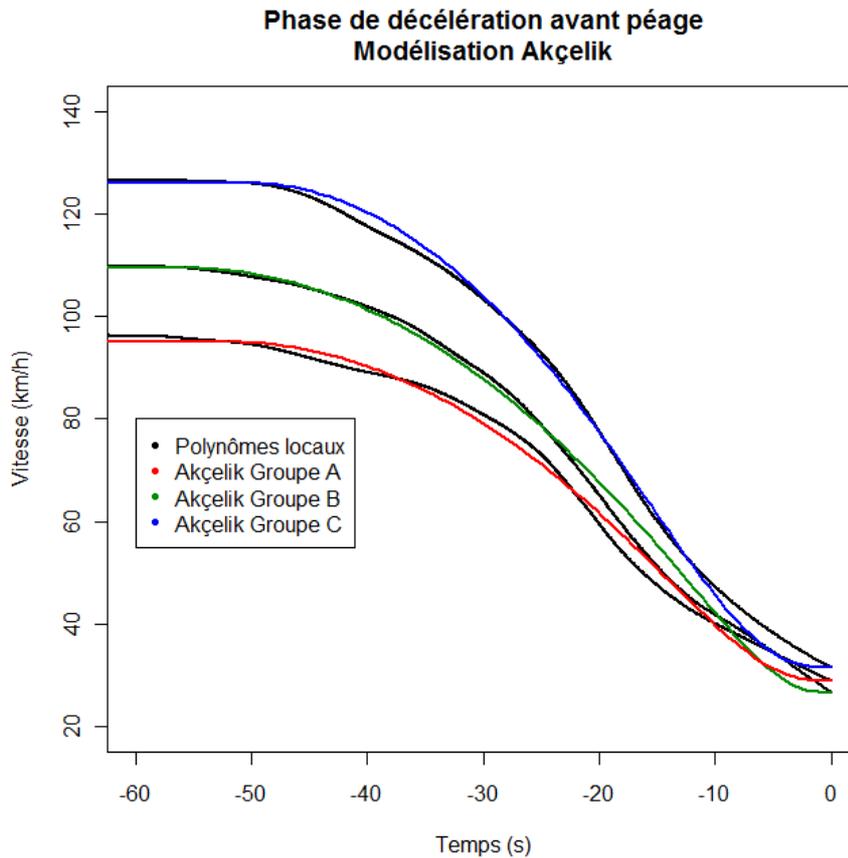


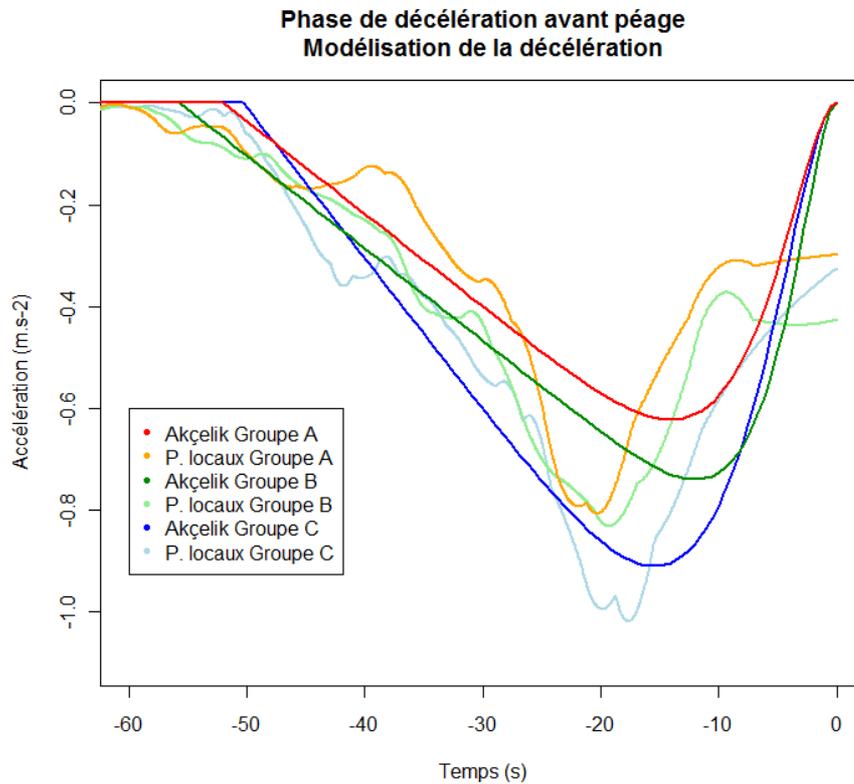
15.1.6.b - Phase de décélération

En utilisant le critère de Calinski, le nombre de groupes optimal est de 2. Cependant comme pour la phase de décélération, nous préférons regrouper nos trajectoires en 3 groupes.

Pour chaque groupe, nous estimons le profil de vitesse avant le péage en réalisant une régression par polynômes locaux de degré 2.

A partir des profils de vitesse en fonction de la distance parcourue, nous obtenons les profils de vitesse et de décélération en fonction du temps. Nous comparons ensuite ces profils de vitesse avec les modèles d'Akçelik de décélération.





15.1.7 - Modélisation de la consommation

Dans cette partie nous cherchons à modéliser la consommation du véhicule lors de la phase d'accélération après le péage. La longueur est de 1.5 km.

Nous utilisons le modèle suivant :

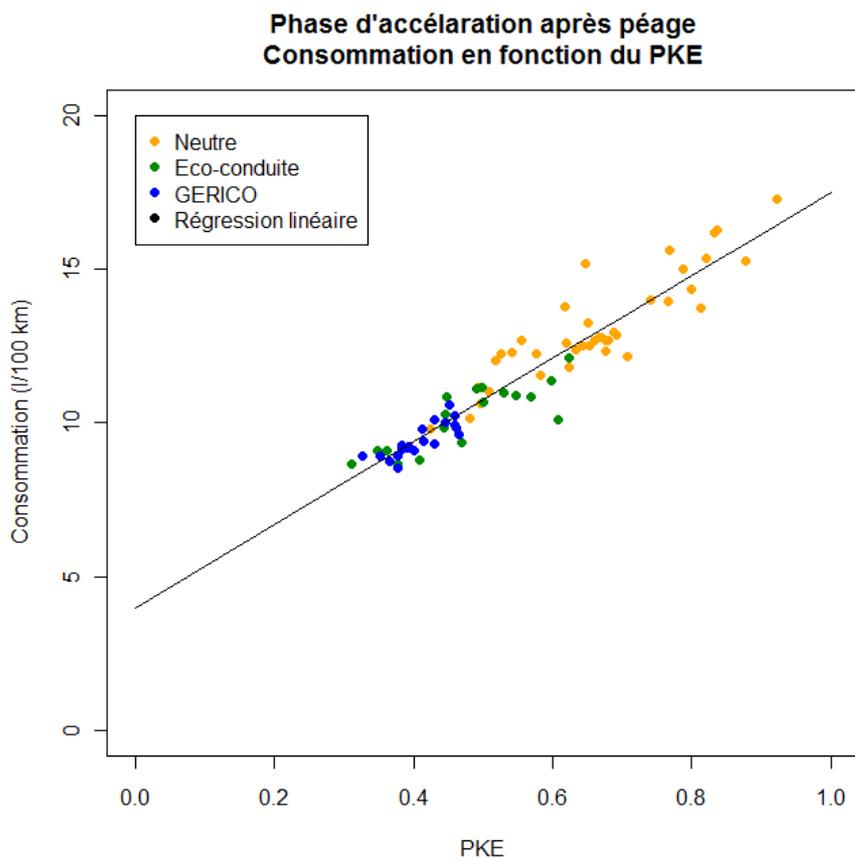
$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 pke$$

nous choisissons comme vitesse finale, la vitesse maximale du profil de vitesse.

$$V_{max} = \max_{x \in [0; 1500]} V$$

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0	4.00	0.30	13.19	<2e-16
β_1	13.50	0.53	25.56	<2e-16

Le coefficient de détermination ajusté vaut $R^2 = 0.9$.



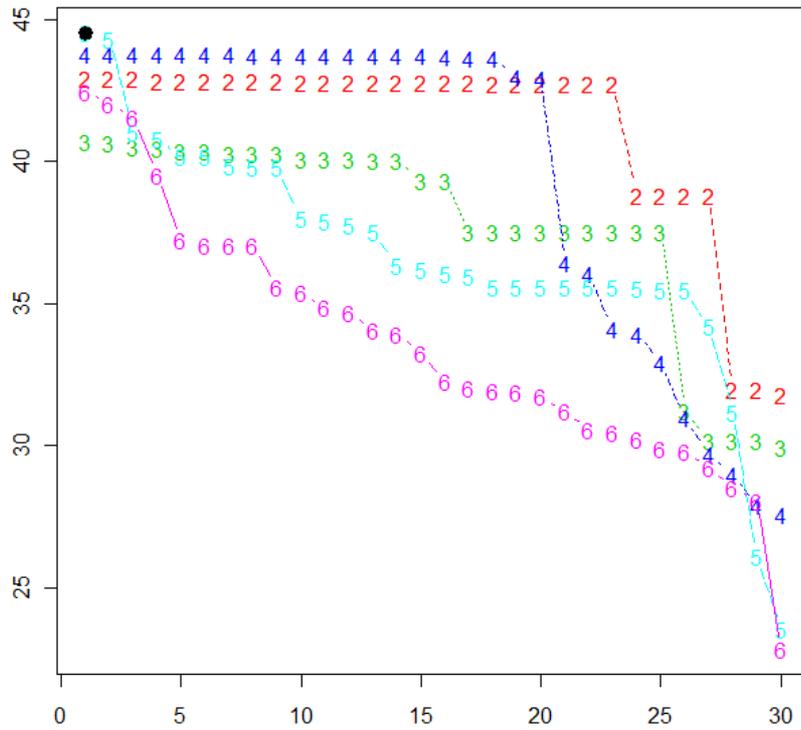
15.2 - Les feux tricolores

15.2.1 - Feu Lacroix-Falgarde

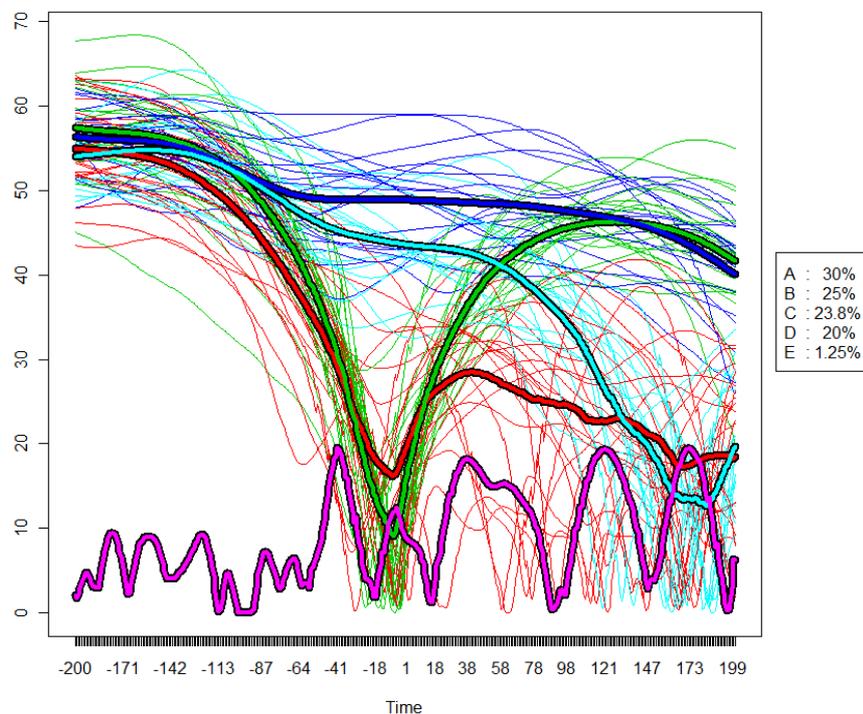
Le feu étudié est situé en entrée de la ville de Lacroix-Falgarde.
Nous utilisons le package kml afin de classer les trajectoires au niveau de l'intersection.

D'après le critère de Calinski, le nombre de groupes optimal est 5.

calinski



La classification réalisé par l'algorithmme est plutôt performant puisqu'il dissocie les trajectoires selon l'arrêt au feu et l'arrêt au niveau de la zone de travaux.



Classification des trajectoires

Groupe	Caractéristiques
A	2 arrêts
B	1 arrêt au feu
C	Pas d'arrêt
D	Arrêt travaux
E	Congestion

Les trajectoires qui nous intéressent sont celles des deux groupes B et C. Les trajectoires des groupes A et D subissent des conditions de circulation extérieures au feu tricolore.

15.2.2 - Coût en carburant de l'arrêt aux feux

Groupe	Temps de parcours (s)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation (l/ 100 km)		
			Traversée intersection	Phase décélération	Phase accélération
A	76.2	20.0	11.9	6.2	20.2
B	44.1	28.8	11.4	7.1	17.1
C	24.4	50.2	4.9	4.2	5.8
D	35.2	37.9	4.7	3.4	6.6
E	378.0	3.0	49.5	48.5	50.9

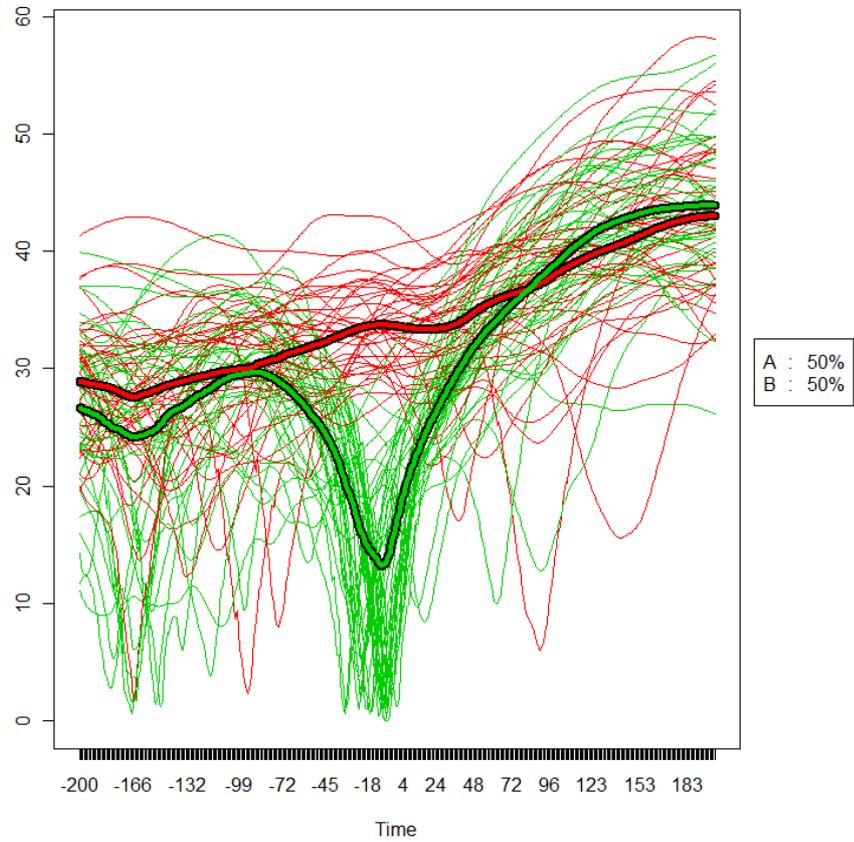
La variation de consommation entre les deux groupes B et C est de 6.5 l/100 km sur une longueur de 340 mètres (200 mètres de phase de décélération et 140 mètres de phase d'accélération), ce qui correspond à une consommation excédentaire de 21 ml dû à l'arrêt au feu.

15.2.3 - Feu Pinsaguel (centre-ville)

Le feu étudié est situé au centre du village de Pinsaguel. Comme le montre le graphique ci-dessous, nous observons des décélérations et des arrêts liés aux conditions de trafic et événements extérieurs.

Nous réalisons une classification des trajectoires en utilisant l'algorithme KML.

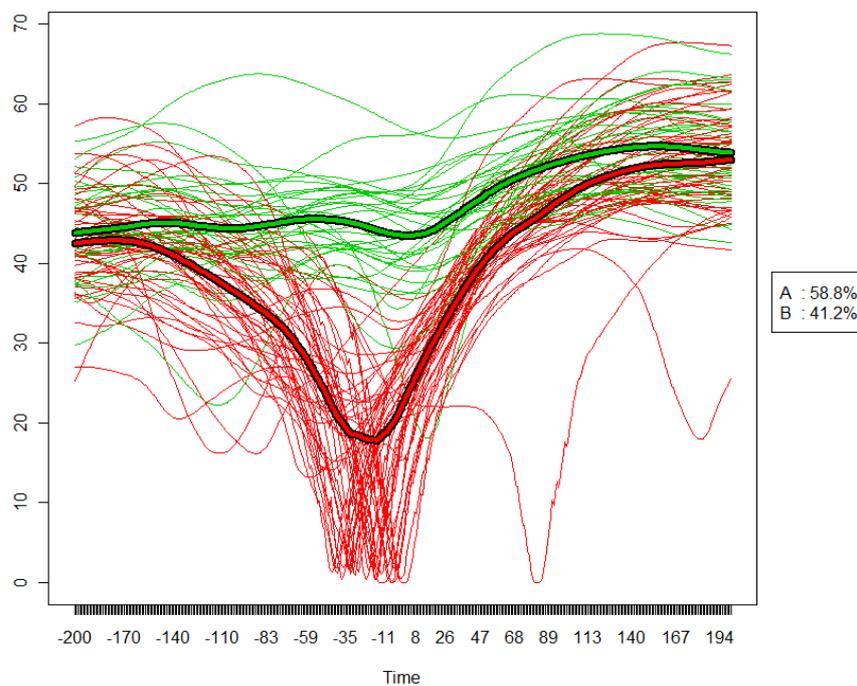
D'après le graphique ci-dessous, l'algorithme permet de classer les trajectoires des véhicules en deux groupes selon qu'il marque ou non un temps d'arrêt au feu tricolore.



Groupe	Temps de parcours (s)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation	
			ml	L /100 km
A	44.1	33.0	43.9	11.1
B	60.0	24.6	56.7	14.3

D'après la classification réalisée par l'algorithme kml, la consommation excédentaire est d'environ 13 ml avec un allongement de temps de parcours moyen de 16 secondes.

15.2.4 - Feu Portet-sur-Garonne



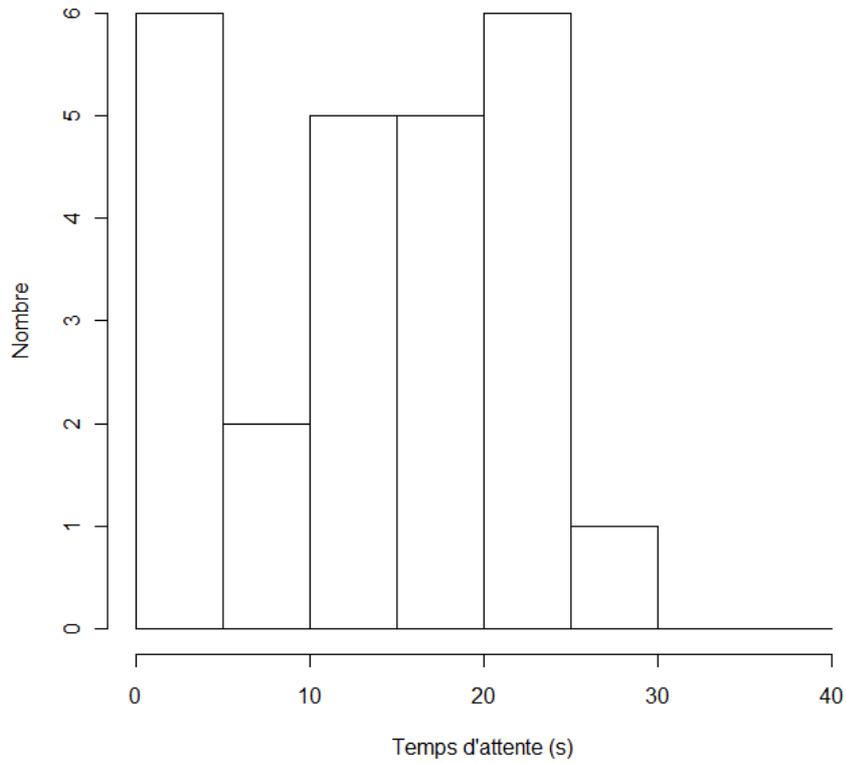
L'algorithme KML classe les trajectoires en deux groupes :

- le groupe A regroupant les trajectoires pour lesquelles le véhicule s'arrête à proximité de la ligne d'effet des feux
- le groupe B où les usagers ne marquent pas de temps d'arrêt.

Groupe	Temps de parcours (s)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation (l/ 100 km)		
			Traversée intersection	Phase décélération	Phase accélération
A	51.2	29.4	11.7	11.1	12.2
B	30.7	47.2	8.2	9.0	7.4

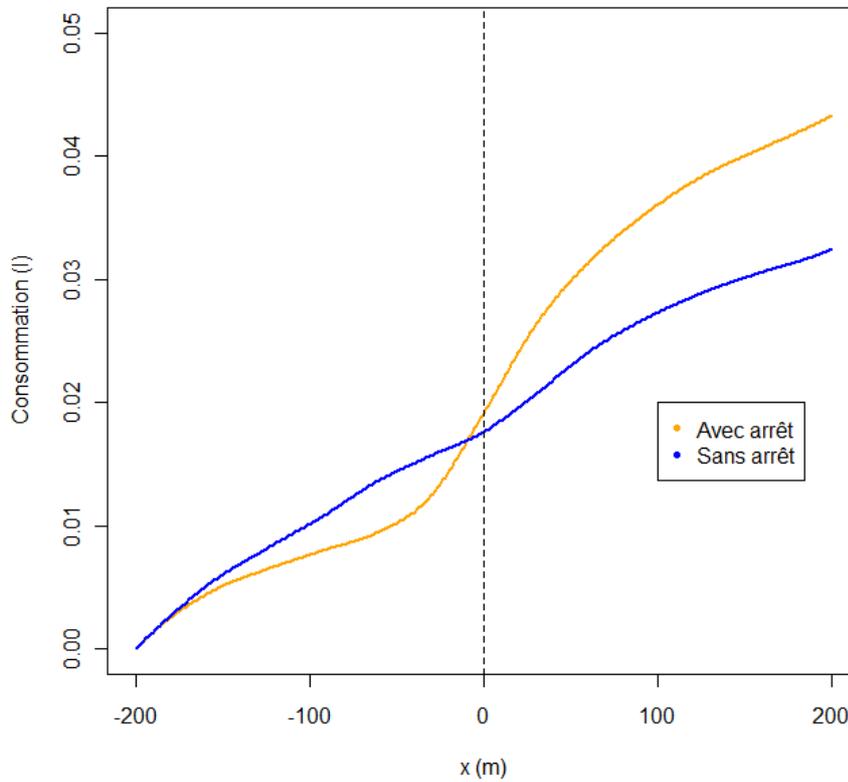
D'après le tableau ci-dessous, lorsque les expérimentateurs marquent l'arrêt au feu, la consommation moyenne excédentaire est de 14 ml et l'allongement de temps de parcours moyen est d'environ 20 secondes.

Distribution des temps d'attente au feu de Portet



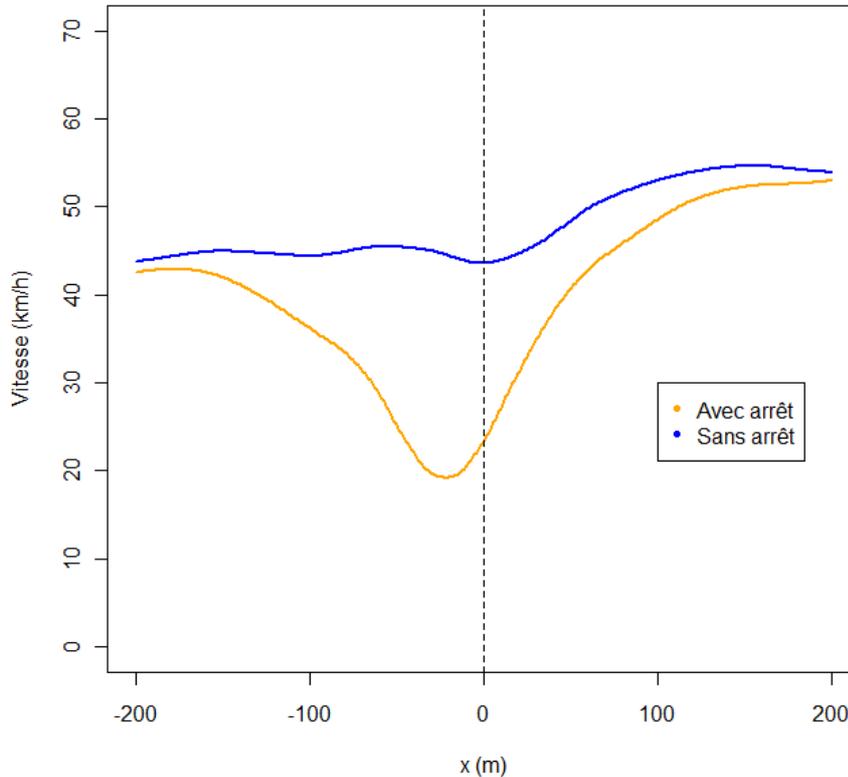
Le temps d'attente au feu varie de 0 à 30 secondes. Les véhicules ne s'arrêtent donc qu'une seule fois. Le temps d'attente moyen est de 14 secondes. Pour le véhicule Gerico, la consommation à l'arrêt est d'environ 0.336 ml /s. La consommation moyenne à l'arrêt est donc de 4.7 ml.

Franchissement du feu de Portet Estimation des profils de consommation cumulée



Sur le graphique nous n'avons pas pris en compte la consommation des véhicules à l'arrêt. Le graphique montre clairement que l'énergie économisée lors de la phase de décélération ne permet pas de compenser l'énergie fournie au véhicule durant la phase d'accélération.

Franchissement du feu de Portet Estimation des profils de vitesse



15.2.5 - Modélisation des phases d'accélération et de décélération lors de l'arrêt au feu

De l'ensemble des trajectoires, nous ne gardons que celles dont le minimum de vitesse est inférieur à 5 km/h (26 trajectoires). Nous retirons de cet ensemble deux trajectoires pour lesquelles les expérimentateurs ont dû ralentir durant la phase d'accélération.

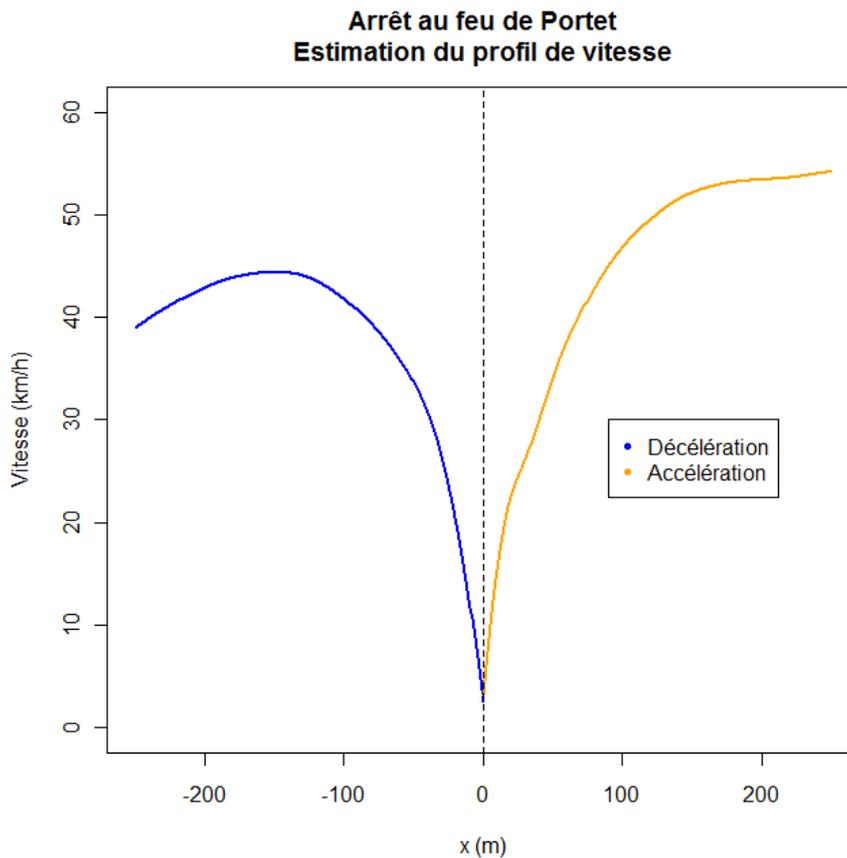
Nous filtrons les enregistrements correspondant à l'arrêt du véhicule pour éviter une sur-représentation des vitesses nulles lorsque le véhicule est à l'arrêt.

Nous découpons les trajectoires en deux sous-trajectoires, l'une correspondant à la phase de décélération, l'autre à la phase d'accélération. Pour chaque sous-trajectoire, nous recalculons l'abscisse curviligne de manière à ce que le véhicule s'arrête et redémarre à l'abscisse $x=0$.

Pour estimer une vitesse en chaque point, nous l'estimons à l'aide de polynômes locaux de degré 1 avec une taille de voisinage de 5 points. Nous calculons ainsi pour chaque profil de vitesse une vitesse tous les mètres.

Pour obtenir un profil de vitesse pour les deux phases de décélération et d'accélération, nous l'estimons par polynômes locaux de degré 2. La taille du voisinage utilisé est choisi par minimisation du critère de validation croisée.

Nous obtenons le profil de vitesse suivant :

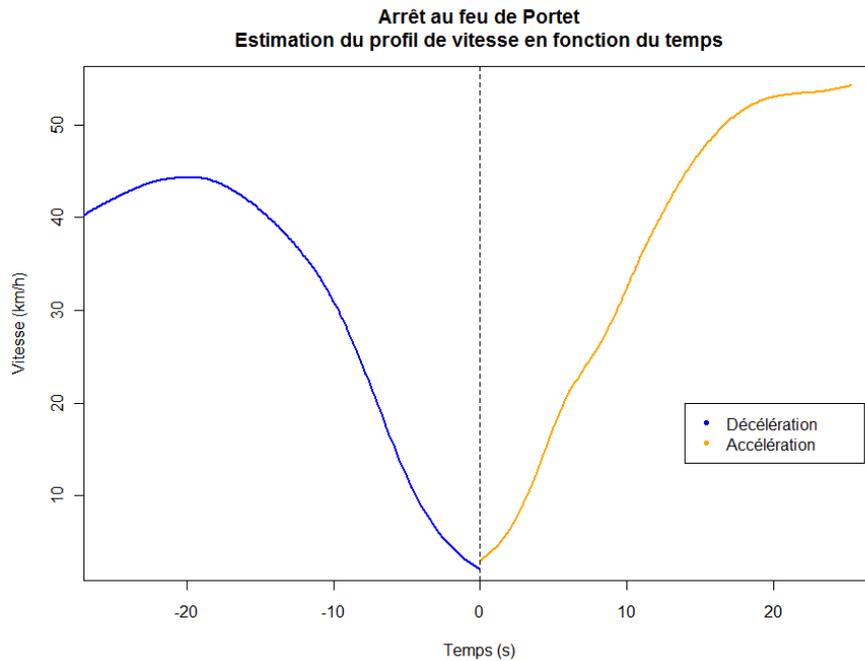


15.2.6 - Comparaison du profil de vitesse avec les modèles d'Akçelik

Les modèles d'accélération et de décélération dépendent du temps alors que le profil de vitesse obtenu est un profil en fonction de l'abscisse.

Nous transformons le profil de vitesse estimé par polynômes locaux en fonction de la distance en profil de vitesse en fonction du temps en utilisant la relation $v = \frac{dx}{dt}$.

Cette transformation aboutit au graphique suivant :



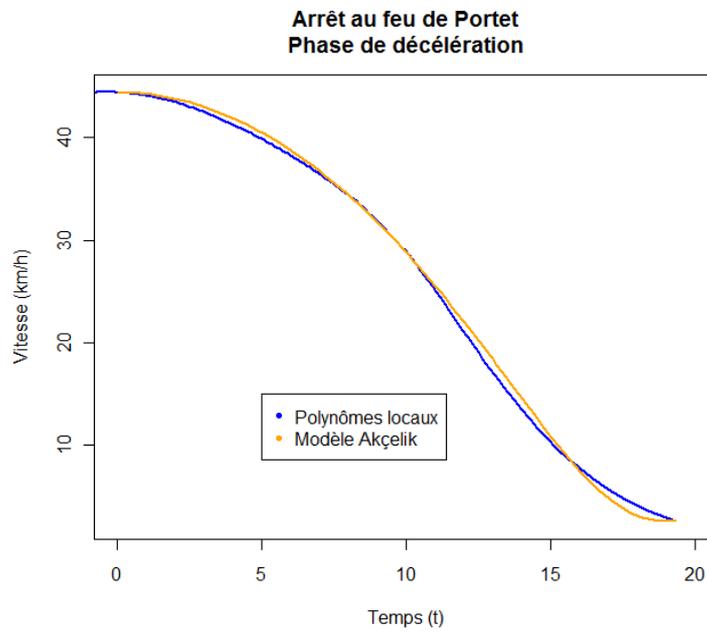
Sur le graphique ci-dessus, nous avons choisi comme origine des temps, l'arrêt au feu de Portet. Ceci explique pourquoi le temps est négatif pour la phase de décélération.

Nous comparons les profils de vitesses obtenus en réalisant des régressions par polynômes locaux avec les modèles d'accélération et de décélération d'Akçelik.

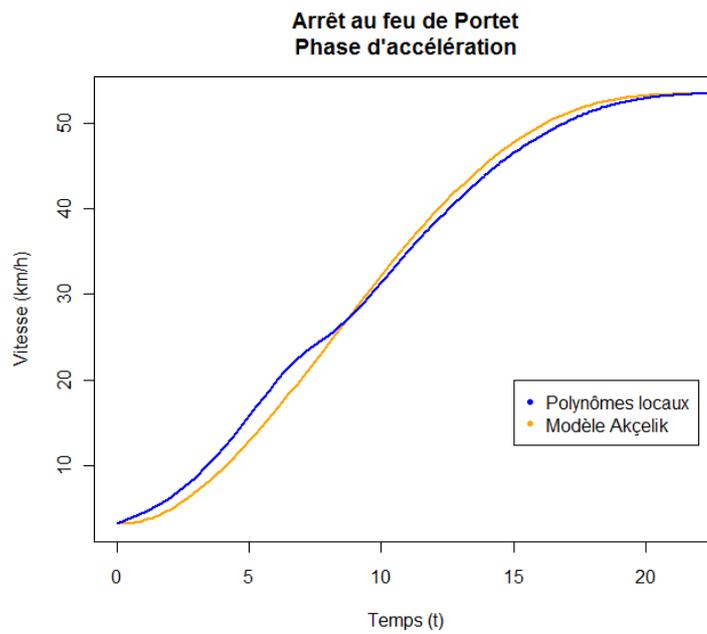
Les paramètres des modèles d'Akçelik sont calculés en fonction de l'estimation du profil de vitesse à partir de polynômes locaux.

Paramètres	Phase	
	décélération	accélération
Vitesse initiale (km/h)	44.4	3.2
Vitesse finale (km/h)	2.6	53.4
distance acc. / dec. (m)	143.0	196.0
Temps acc. / dec. (s)	19.3	21.9

15.2.6.a - Phase de décélération



15.2.6.b - Phase d'accélération



D'après le graphique ci-dessus, nous notons un très net décalage entre le modèle d'Akçelik et notre estimation du profil de vitesse fondé sur des polynômes locaux. Comme le montre le graphique qui suit le profil de l'accélération comporte deux modes contre seulement un seul pour le modèle d'Akçelik.

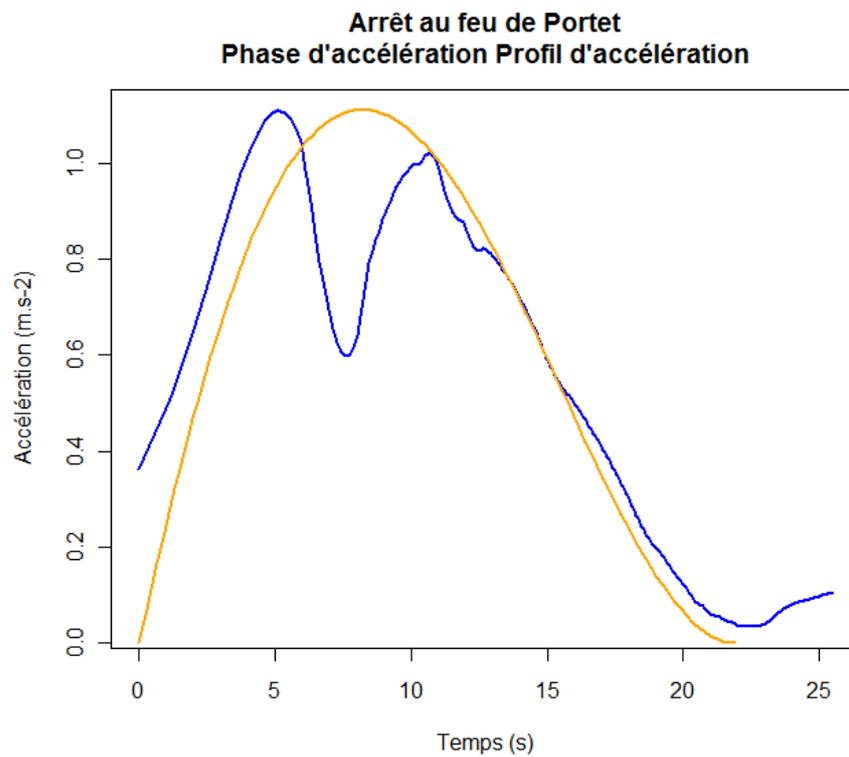




Illustration 4: Feu Portet-sur-Garonne

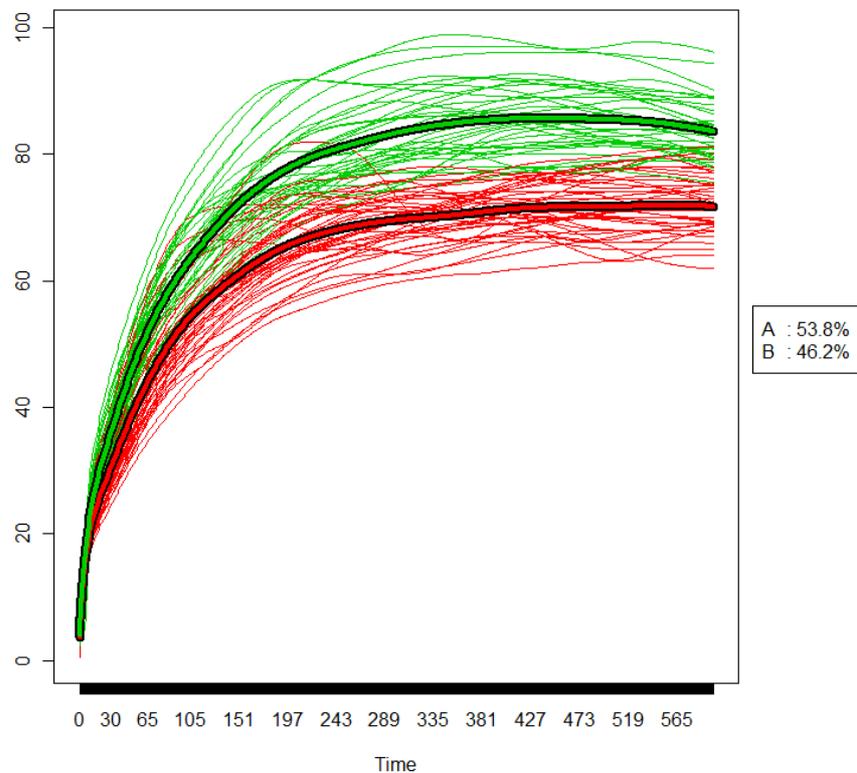
Comme le montre l'image ci-dessus, le feu où les usagers doivent marquer l'arrêt est situé à une vingtaine de mètres de l'intersection et ils ont une faible visibilité des autres flux transversaux. Nous supposons donc que l'accélération s'effectue en 3 temps : une première accélération franche pour atteindre l'intersection, une accélération plus souple du franchissement de l'intersection et à nouveau une forte accélération en sortie d'intersection.

15.3 - Arrêt au stop

Dans cette partie nous étudions les profils de vitesse et de consommation au franchissement d'un stop. Le stop étudié se trouve sur une route perpendiculaire à la départementale D4 (chemin des Etroits) dont la vitesse réglementaire est de 90 km/h. Nous étudions uniquement la phase d'accélération puisque les expérimentateurs

15.3.1.a - Classification des trajectoires

L'algorithme kml classe en deux groupes les trajectoires comme le montre le graphique ci-dessous.



Mode	Groupe	
	A	B
Neutre	33%	68%
Eco-conduite	90%	10%
Gerico	60%	40%

Dans le groupe A constitué de 43 trajectoires, nous retrouvons 90 % des trajectoires réalisées en mode éco-conduite et 60 % des trajectoires réalisées en mode « Gerico ».

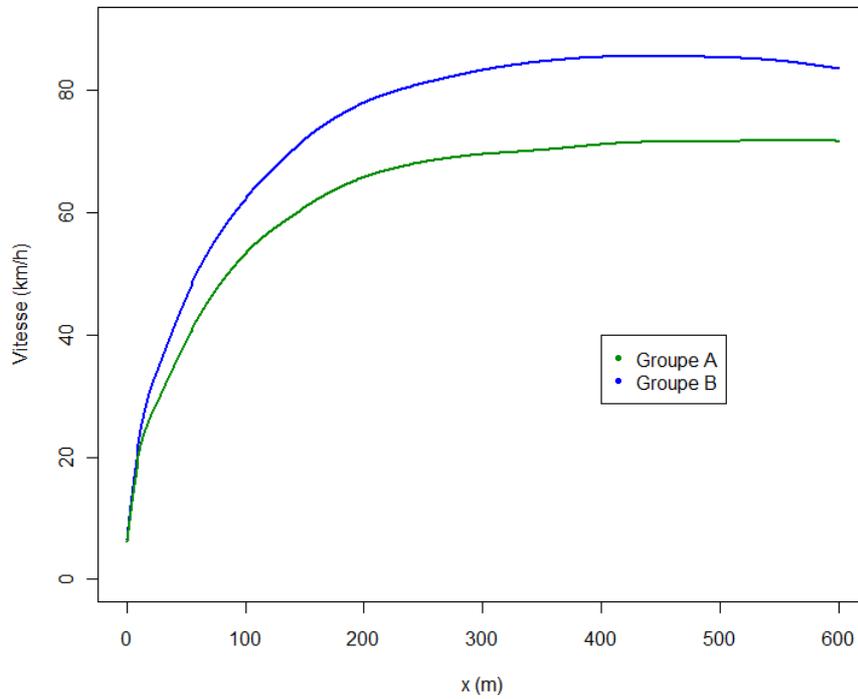
Dans le groupe B (37 trajectoires), nous retrouvons 68 % des trajectoires réalisés en mode neutre.

15.3.1.b - Modélisation des profils de vitesse

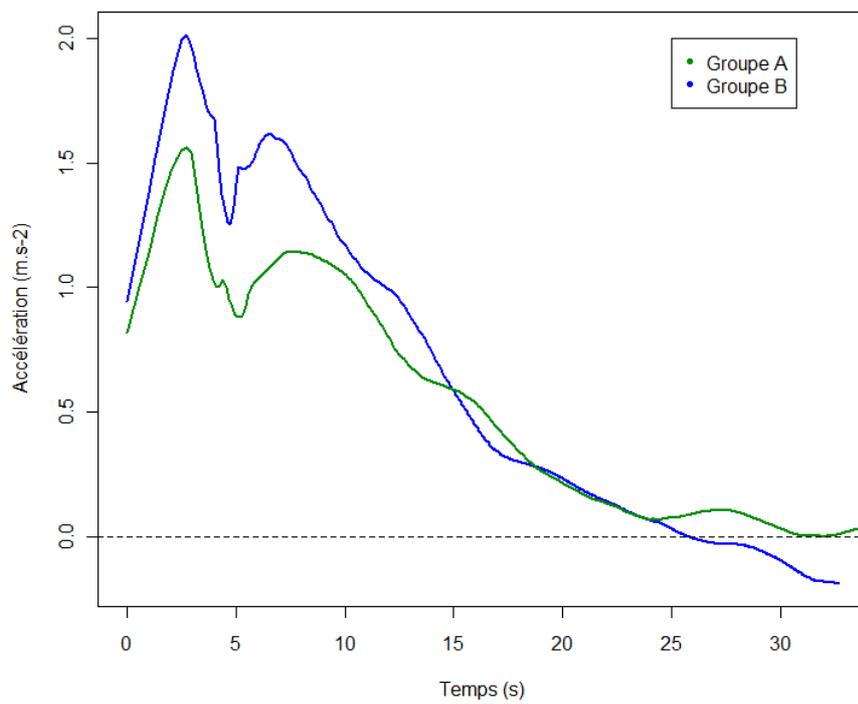
Pour chaque groupe, nous estimons le profil de vitesse après franchissement de la ligne d'effet du stop en réalisant une régression par polynômes locaux de degré 2.

A partir des profils de vitesse en fonction de la distance parcourue, nous obtenons les profils de vitesse et d'accélération en fonction du temps.

**Profils de vitesse après franchissement du stop
Estimation par polynômes locaux**



Profils d'accélération après franchissement du stop

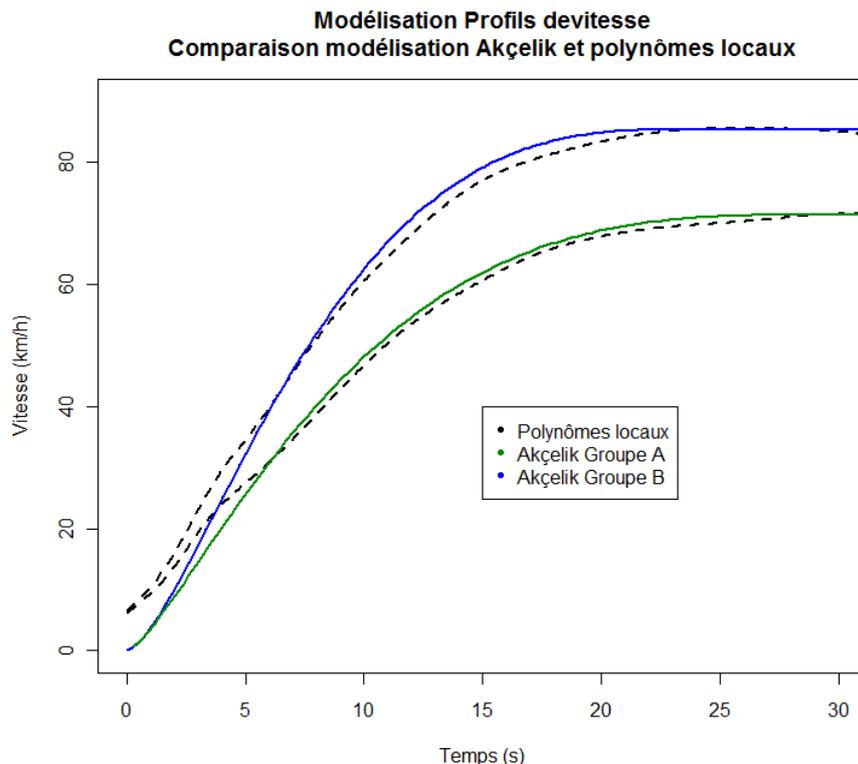


D'après le graphique précédent, les deux profils d'accélération comportent deux pics : le premier correspond au franchissement de l'intersection et le deuxième correspond à la phase d'accélération du véhicule afin d'atteindre sa vitesse de croisière. Au démarrage au stop, les expérimentateurs sont contraints de fortement accélérer afin de s'insérer en toute sécurité sur la départementale D4 limitée à 90 km/h. Pour les trajectoires du groupe A, le maximum de l'accélération est supérieur à 2m.s^{-2} alors qu'elle est de 1.5m.s^{-2} pour les trajectoires du groupe B.

15.3.1.c - Comparaison avec le modèle d'Akçelik

Le modèle d'accélération d'Akçelik dépend de 4 paramètres fournis dans le tableau ci-dessous que nous calculons à partir des modèles calculés précédemment fondés sur des polynômes locaux.

Paramètres	Groupe	
	A	B
Vitesse initiale (km/h)	0	0
Vitesse finale (km/h)	71	85
Temps d'accélération (s)	29	24
Distance d'accélération (m)	420	395

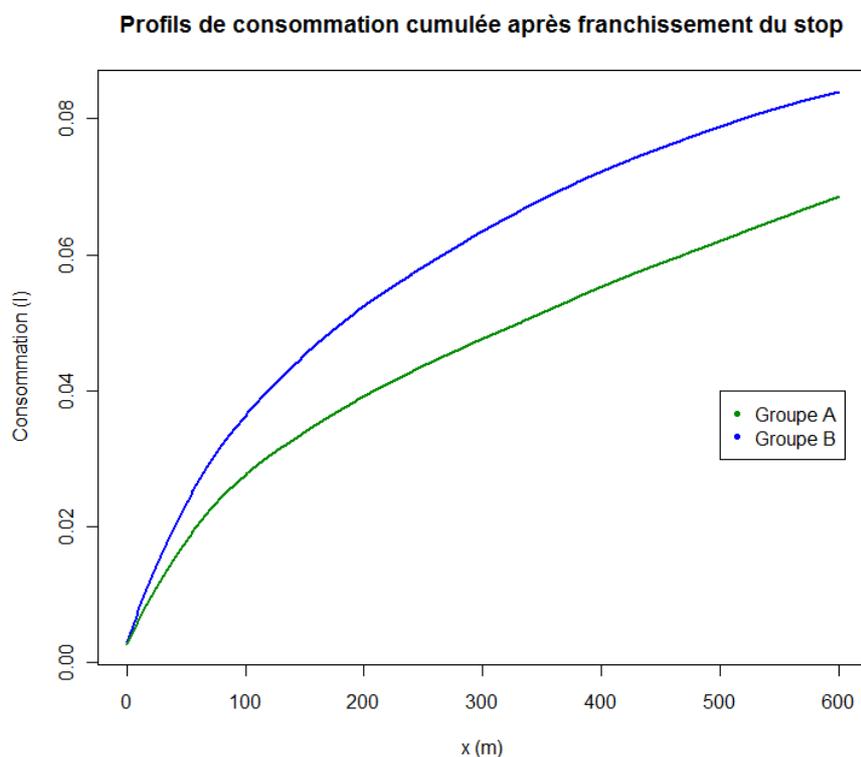


Nous notons un très net décalage entre le modèle d'Akçelik et notre estimation fondée sur des polynômes locaux. Pour nos deux estimations des deux groupes A et B, la vitesse en début d'accélération n'est pas nulle alors que nous avons pris soin pour chaque trajectoire de dissocier les

phases d'accélération et de décélération en prenant pour chaque trajectoire comme origine pour l'abscisse curviligne le point où la vitesse est minimale.

15.3.2 - Estimation de la consommation cumulée

Comme précédemment, nous réalisons une régression par polynômes locaux pour obtenir une estimation des profils de consommation cumulée.



Pour le groupe B, la consommation moyenne sur les 500 mètres suivant le franchissement de la ligne d'effet du stop est de 15.2 l/100 km contre 11.9 l/100 km pour le groupe A. Sur une distance de 500 mètres, nous observons une surconsommation de 16.5 ml pour les trajectoires du groupe B par rapport au groupe A.

15.4 - Ronds-points Axe D817

Dans cette partie nous étudions la consommation et la vitesse sur les sections de la départementale D817 parcourues par les expérimentateurs comprenant des ronds-points.

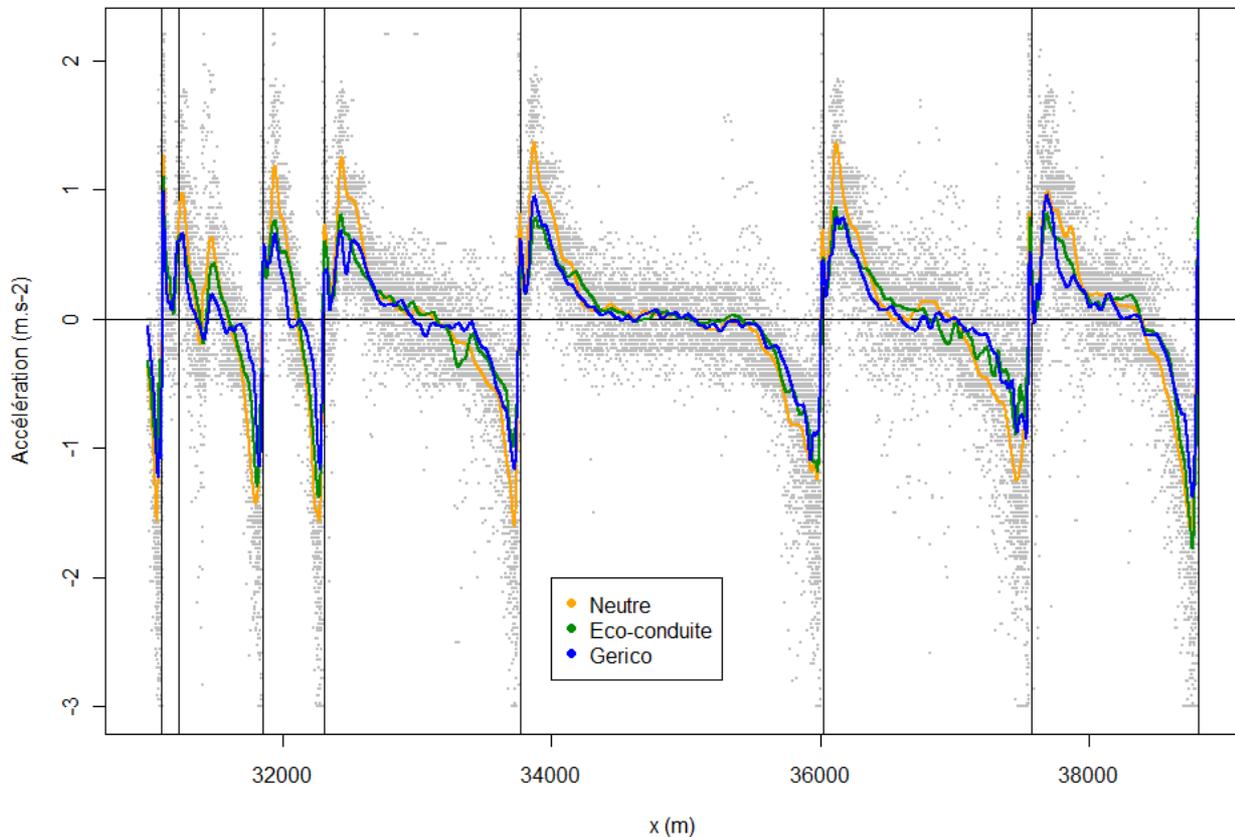


15.4.1 - Analyse de l'accélération

Nous estimons le profil de l'accélération par régression par polynômes locaux. La taille du voisinage est choisi par minimisation du critère de validation croisée.

Nous obtenons une estimation du profil d'accélération suivant :

Estimation de l'accélération

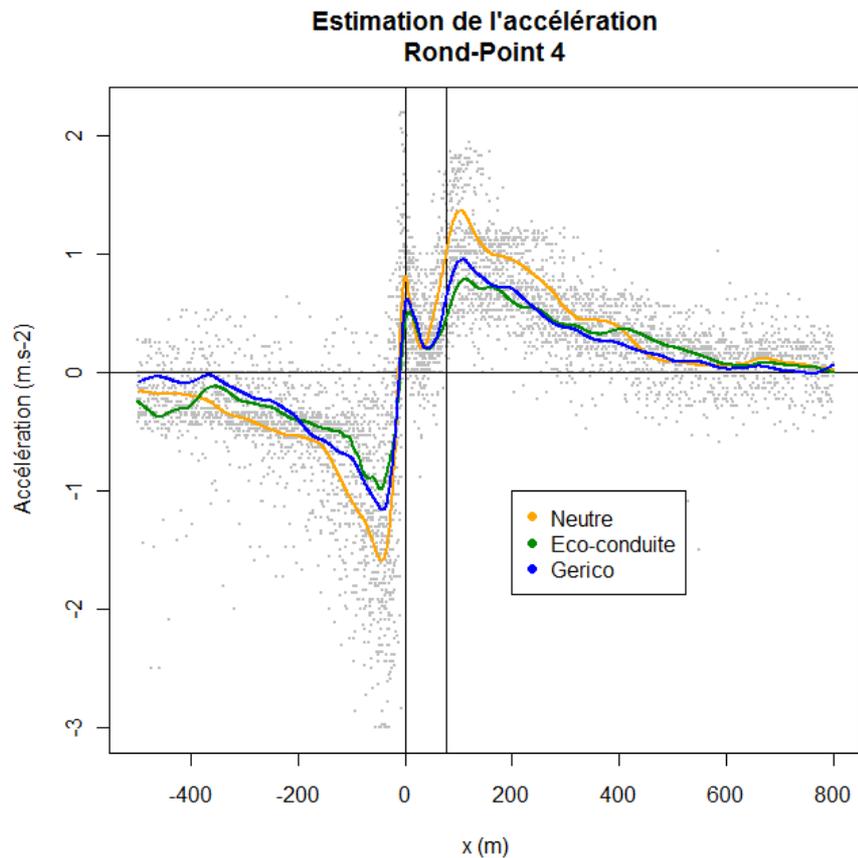


Comme les ronds-points sont très rapprochés, les véhicules ne peuvent atteindre leur vitesse de croisière.

Nous notons qu'en mode neutre, la conduite est beaucoup plus « agressive » (accélération plus élevée en entrée et en sortie des ronds-points et décélération plus élevée en approche des ronds-points) par rapport aux deux autres modes où la conduite est beaucoup plus souple.

Nous remarquons aussi que les courbes des profils d'accélération ont les mêmes allures que les courbes d'estimation de la consommation instantanée.

Accélération au niveau d'un rond-point

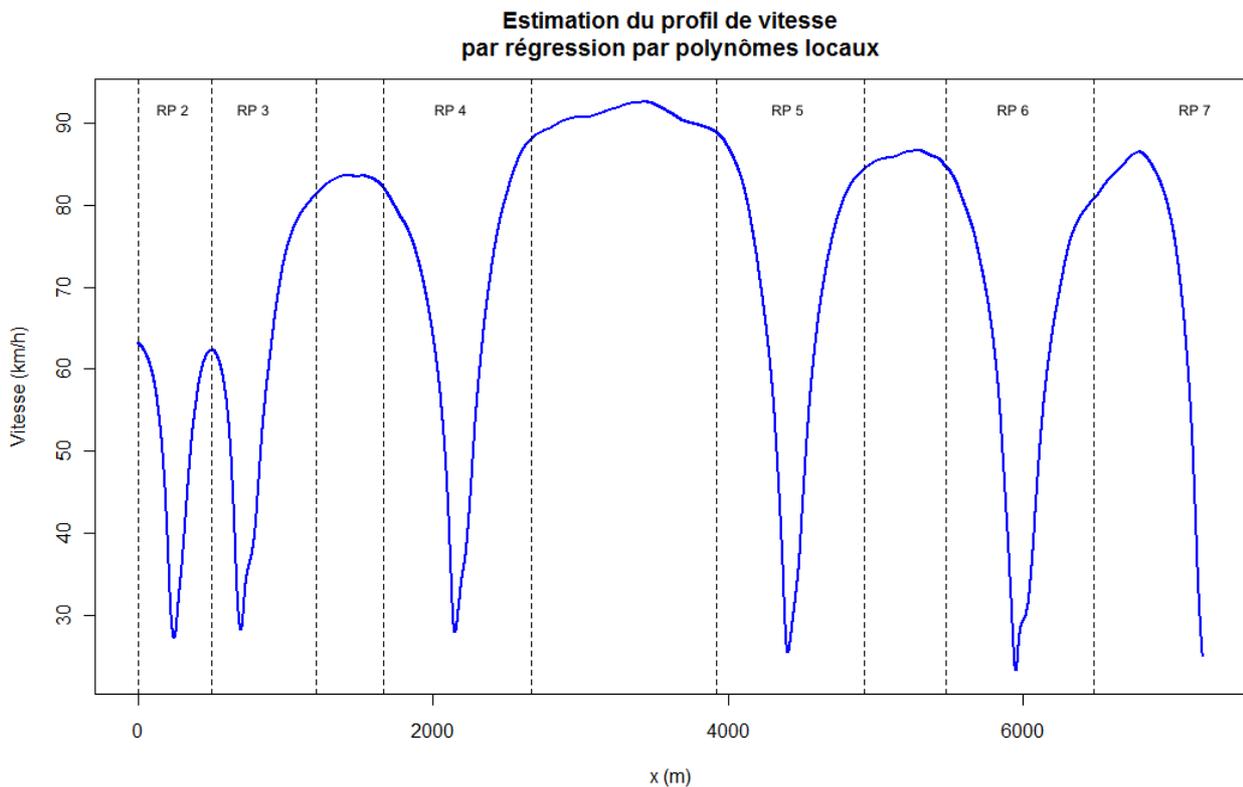


Les deux traits verticaux correspondent à l'entrée et la sortie du rond-point.

Au niveau d'un rond-point, l'accélération s'effectue en trois phases :

- une forte accélération correspondant à l'insertion du véhicule sur le rond-point ;
- une accélération modérée sur l'anneau ;
- une brusque accélération en sortie de giratoire.

15.4.2 - Profil de vitesse et de consommation



Sur le graphique ci-dessus, nous avons représenté une estimation du profil de vitesse sur la départementale D120 en utilisant des polynômes locaux de degré 2. En pointillés, nous avons représenté les zones d'influence du rond-point (phase de décélération avant le rond-point et phase d'accélération après franchissement du rond-point). Nous avons supposé que la zone d'influence du rond-point s'étendait sur 1 km centrée sur le rond-point.

Nous découpons les sections entre deux ronds-points en 3 tronçons :

- le tronçon d'accélération de longueur 500 mètres ;
- le tronçon central (vitesse stabilisée) ;
- le tronçon de décélération de longueur 500 mètres.

Dans la suite du chapitre, la zone d'influence d'un rond-point est composée des tronçons de décélération et d'accélération. Sur le graphique ci-dessus, les zones d'influence sont délimités par les lignes en pointillés.

15.4.3 - Consommation moyenne des usagers à proximité des ronds-points

Rond-point	conso moyenne (l/100 km)
2	8.86
3	11.57
4	9.16
5	8.93
6	9.99

Comme les deux ronds-points 2 et 3 sont très rapprochés, nous notons une consommation plutôt faible pour le rond-point 2 (distance d'accélération faible) et une consommation élevée pour le rond-point 3 (distance de décélération faible).

Pour le rond-point 6, la consommation est plus élevée puisque entre les ronds-points 6 et 7 la départementale passe par dessus des voies ferrées.

15.4.4 - Consommation moyenne hors zone d'influence des ronds-points

Entre deux ronds-points, nous calculons la consommation moyenne sur le tronçon central qui correspond à la consommation moyenne hors zone d'influence des ronds-points.

Section	Longueur (m)	Conso moyenne (l/100 km)
3->4	457	6.53
4->5	1258	7.16
5->6	556	6.97
Ensemble	2271	6.98

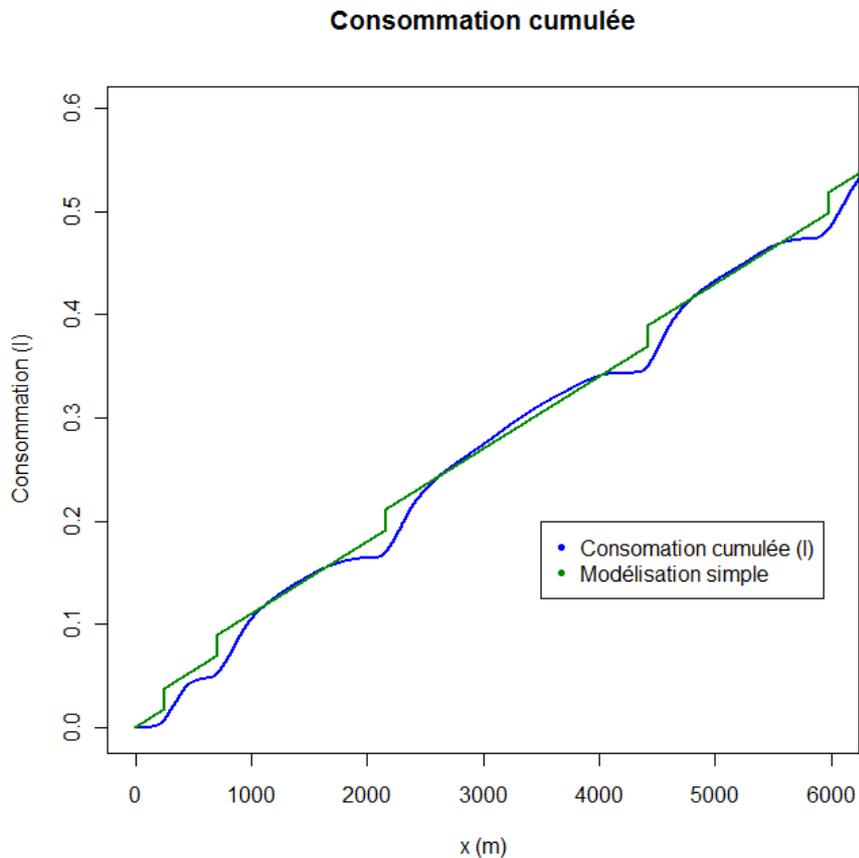
Globalement, la consommation moyenne est de 7 l/100 km en neutralisant les zones d'influence des ronds-points.

15.4.5 - Coût en carburant d'un rond-point en péri-urbain

En comparant la consommation moyenne calculée au paragraphe précédent avec les consommation à proximité des ronds-points 4 et 5, nous en déduisons que le coût d'un rond-point est d'environ **20 ml** de carburant.

15.4.6 - Estimation de la consommation cumulée sur l'ensemble de l'axe

Pour estimer la consommation sur l'ensemble de l'axe, nous pouvons dans un premier temps supposer que la consommation est constante sur l'axe hors zone d'influence des ronds-points. D'après les résultats précédents, cette consommation estimée est de 7 l/100 km. Pour chaque rond-point franchi, on suppose que la surconsommation de carburant est de 20 ml.



La modélisation simple de la consommation cumulée a été obtenue en partant de l'hypothèse que le coût en carburant d'un rond-point est de 20 ml de carburant et que la consommation moyenne hors rond-point est de 7 l / 100 km d'après les calculs effectués dans la partie précédente.

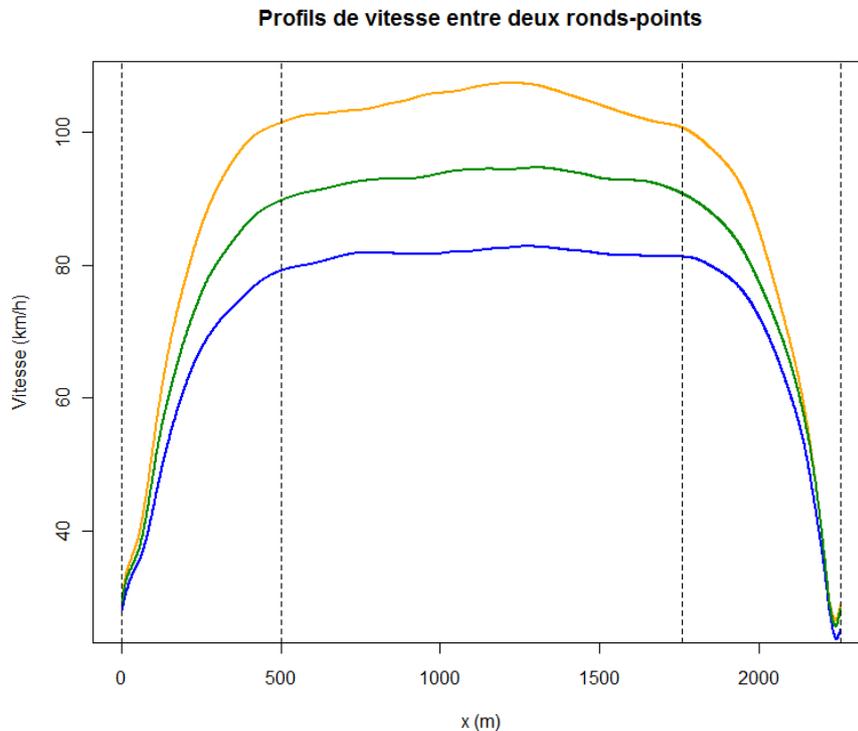
$$\text{conso cumulée}(x) = x \times c_{\text{moy}} + k(x) \times c_{\text{RP}}$$

avec

- $k(x)$ le nombre de RP franchis à l'abscisse x
- $c_{\text{moy}} = 7 \text{ l}/100 \text{ km}$
- $c_{\text{RP}} = 20 \text{ ml}$

15.5 - Étude la section située entre les ronds-points 4 et 5

Cette section est longue de 2230 mètres. La vitesse réglementaire est de 110 km/h. Nous classifions les trajectoires en utilisant l'algorithme KML en 3 groupes. Puis pour chaque groupe, nous estimons le profil de vitesse en utilisant une régression par polynômes locaux.



Nous avons choisi de découper en 3 parties les profils de vitesse entre deux ronds-points successifs :

- une section d'accélération longue de 500 mètres incluant la traversée du rond-point;
- une section centrale où la vitesse des usagers est stabilisée « phase vitesse de croisière » (de longueur de 1230 mètres) ;
- une section de décélération longue de 500 mètres.

Nous notons que 500 mètres après le début d'entrée sur le rond-point, les véhicules n'ont pas terminé d'accélérer. Comme l'accélération est modérée, elle est prise en compte dans la modélisation de la consommation sur la section centrale au travers du terme pke (le coefficient pke de la section centrale sera différent de celui calculé sur la section d'accélération).

15.5.1 - Modélisation de la consommation de la phase d'accélération

Nous utilisons le modèle suivant pour modéliser la consommation :

$$\text{conso} = \beta_0 + \beta_1 pke$$

avec $pke = (V_{max}^2 - V_{min}^2) / l$

avec $l = 514$ mètres, la longueur moyenne de la section d'accélération.

Le véhicule commence à accélérer quelques mètres avant son entrée sur sur l'anneau du rond-point.

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	4.15	0.41	10.02	1.32e-15
β_1 pke	10.68	0.37	29.02	<2e-16

Le coefficient de détermination ajusté vaut $R^2 = 0.92$. Le modèle choisi est donc bien adaptée à nos données.

15.5.2 - Modélisation de la consommation en vitesse de croisière

Nous supposons que sur la section centrale la vitesse est stabilisée. Nous utilisons le modèle classique suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 V^2 + \beta_2 \text{pke}$$

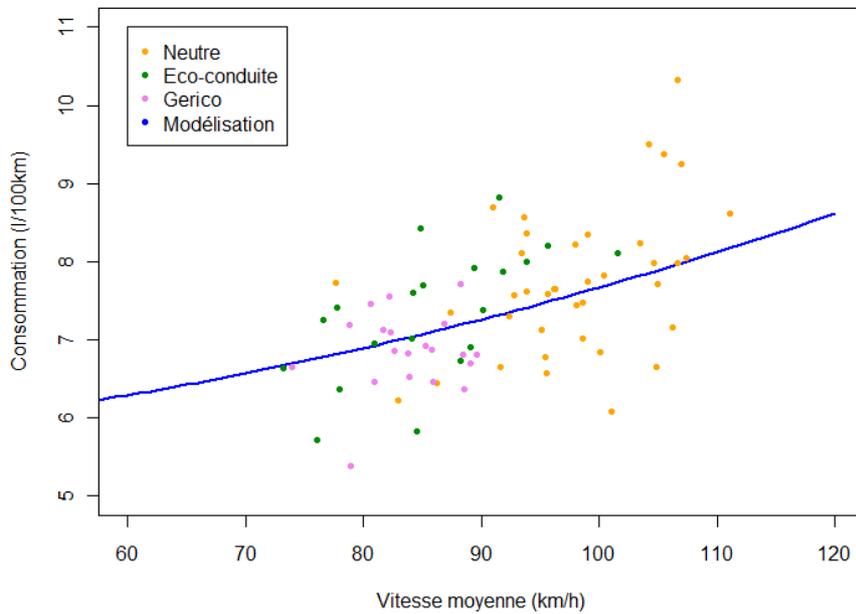
Nous obtenons les estimations suivantes des paramètres du modèle :

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	4.92	0.38	13.04	< 2e-16
β_1 V ²	2.16E-4	4.74E-5	4.55	1.99e-05
β_2 pke	5.55	1.27	4.38	3.76e-05

Le coefficient de détermination ajusté du modèle est faible ($R^2 = 0.44$). Sur la section étudiée, la vitesse des expérimentateurs n'est pas constante : ils accélèrent jusqu'au milieu de la section pour ensuite ralentir. La section étudiée est trop courte et la vitesse réglementaire trop élevée (110 km/h) pour observer une vitesse stabilisée du conducteur. L'indice pke et la vitesse quadratique moyenne sont étroitement liés pour la section étudiée. Pour rouler à des vitesses élevées, il est nécessaire d'accélérer sur la section centrale. Sur autoroute, nous avons vu que les usagers accélèrent sur une distance de 1500 mètres avant d'atteindre leur vitesse de croisière alors que sur la section péri-urbaine, nous avons supposé que les usagers accélèrent sur une distance de 500 mètres.

Nous vérifions que l'estimation du coefficient lié à la vitesse moyenne quadratique est acceptable. Dans le modèle, nous prenons comme valeur de pke, le pke médian des trajectoires (pke médian = 0.107). Nous obtenons alors le graphique suivant en représentant les couples de points consommation-vitesse

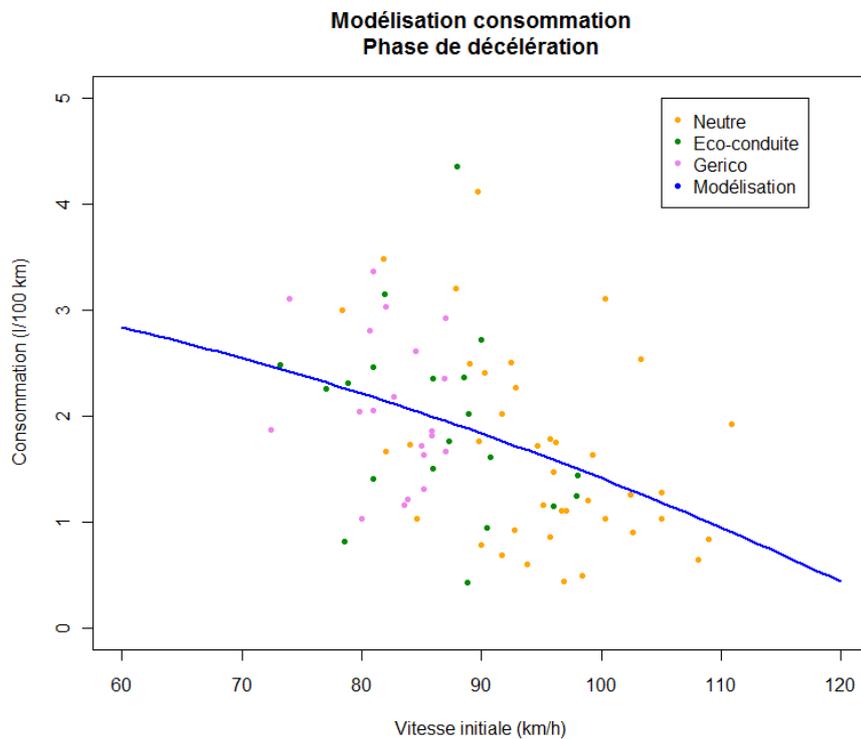
Modélisation consommation section centrale entre RP4 et RP5



15.5.3 - Modélisation de la consommation de la phase de décélération

Pour la phase de décélération, il n'est pas nécessaire d'utiliser de modèles complexes puisque la consommation sur cette section est relativement faible comparé avec celles des phases d'accélération et à vitesse stabilisée.

D'après le graphique ci-dessous, nous remarquons que la consommation en phase de décélération est peu liée à la vitesse initiale (coefficient de corrélation $r = -0.4$)



Nous modélisons la consommation en utilisant le modèle suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 - \beta_1 V_i^2/l$$

avec $l = 482.3$ mètres (moyenne des longueurs des sections de décélération)

et V_i la vitesse initiale (vitesse en entrée de la section de décélération).

Le terme $\beta_1 V_i^2/l$ correspond à l'énergie initiale du véhicule utilisée pour décélérer.

Plus la vitesse initiale du véhicule est élevée, moins l'utilisateur devra fournir d'énergie au véhicule pour décélérer et arriver au prochain rond-point avec une vitesse faible.

Coefficient	Estimation	Erreur standard	Statistique T	P-valeur
β_0 (Intercept)	3.64	0.48	7.62	5.4e-11
$\beta_1 V^2$	-2.22E-04	5.76E-05	-3.86	2.37E-04

Le coefficient de détermination est très faible ($R^2 = 0.15$). La consommation est très variable et dépend d'autres paramètres tel que le temps de freinage, le temps passé en frein moteur, le temps passé à accélérer. Le résultat de la modélisation figure sur le graphique ci-dessus (courbe en bleu).

16 - Synthèse

16.1 - Analyse globale

Pour chaque trajet, nous avons calculé un certain nombre d'indicateurs et nous nous sommes particulièrement intéressés aux indicateurs fondés sur la vitesse. L'analyse des données nous montre que les indices PKE et RPA (calculés à partir des données vitesse) sont très liés à la consommation.

Pour un trajet donné, nous pouvons modéliser la consommation en fonction de l'indice pke à l'aide du modèle simple suivant :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke}$$

Les deux coefficients β_0 et β_1 dépendent très fortement de la composition du trajet (pourcentage de distance parcourue en milieu urbain, pourcentage de distance parcourue sur autoroute,...).

Il serait intéressant d'essayer d'explicitier ces deux coefficients en fonction de la composition du trajet. Nous pourrions par exemple à partir des données GERICO, générer des trajets fictifs en réalisant des tirages aléatoires sur les données GERICO pour estimer les deux coefficients β_0 et β_1 en fonction de variables caractérisant le trajet.

16.2 - Analyse par type d'infrastructure

Lorsque nous analysons les données par type d'infrastructure, nous notons que les indices PKE et RPA sont très liés à la consommation. Cependant, la consommation peut être modélisée en utilisant d'autres variables qui n'ont pas le même rôle selon le type d'infrastructure. Par exemple, en milieu urbain une variable explicative de la consommation peut être la vitesse moyenne qui est corrélée négativement avec la consommation alors que sur autoroute ou sur VRU, la vitesse moyenne de parcours est corrélée positivement avec la consommation.

Milieu urbain

En milieu urbain, les expérimentateurs sont contraints de ralentir, de s'arrêter pour diverses raisons (conditions de circulation, arrêt au feu, virage,...) générant des surconsommations. La consommation en milieu urbain est élevée. On peut cependant réduire la consommation en ayant une conduite souple, par anticipation et en choisissant le rapport approprié en fonction de la vitesse.

Pour modéliser la consommation, nous avons sélectionné les deux modèles suivants :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke} + \beta_2 \text{nbstops}$$

avec le terme $\beta_2 \text{nbstops}$ qui correspond à une surconsommation liée à l'arrêt du véhicule.

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke} + \beta_2 \text{speedavg}$$

avec $\beta_2 < 0$, c'est à dire plus la vitesse de parcours est faible plus la consommation moyenne sera élevée.

Autoroute et VRU

Lorsque le trafic est fluide, pour économiser du carburant, il suffit de rouler à une vitesse constante et à des vitesses inférieures à la vitesse légale, par exemple 110 km/h ou moins sur autoroute. L'utilisation du limiteur et/ou du régulateur permettent donc en théorie d'économiser du carburant hors montées. Comme en milieu urbain, une bonne anticipation permet d'économiser du carburant. Nous proposons le modèle suivant pour modéliser la consommation sur autoroute :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 V^2 + \beta_2 \text{pke}$$

En montée

En montée, il faut fournir davantage d'énergie au véhicule puisqu'une partie de l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie potentielle. Nous proposons le modèle de consommation suivant en montée :

$$\text{cons} = \beta_0 + \beta_1 \text{pke} + \beta_2 p$$

avec p la pente de la section.

En descente

En descente, la consommation est liée à la distance parcourue avec la pédale d'accélération enfoncée.

Pour minimiser la consommation, il est conseillé d'utiliser au maximum le frein moteur en utilisant le rapport approprié.

16.3 - Synthèse de la modélisation

Infrastructure	R2	Variables				
		Intercept	pke	V	V ²	nbstops
parcours	0.89	5.34	10.17			
urbain	0.87	5.65	7.75			2.03
	0.87	9.4	10.46	-1.18E-1		
autoroute	0.95	3.45	3.02		3.67E-4	
VRU	0.65	4.17	5.58		1.82E-4	

Dans le tableau ci-dessus, nous avons retranscrit les coefficients des modèles proposés pour chacune des infrastructures étudiées. Nous notons qu'en urbain, les coefficients pke sont très nettement plus élevés que sur autoroute ou VRU où la vitesse joue un rôle plus important.

16.4 - Analyse microscopique

Dans l'analyse microscopique, nous avons analysé la consommation de carburant au niveau d'un

franchissement d'un stop, d'un feu, d'un rond-point ou encore du péage situé sur une section d'autoroute. Nous avons testé l'algorithme kml pour classifier les trajectoires. Cet algorithme permet par exemple pour le franchissement d'un feu de classifier en deux catégories les véhicules qui s'arrêtent de ceux ne s'arrêtant pas. Le franchissement d'un « obstacle » (feu tricolore, péage, passage piéton surélevé) entraîne inévitablement une surconsommation qui varie entre 10 et 20 ml selon l'environnement : on peut minimiser cette surconsommation en anticipant l'obstacle (par exemple en utilisant le frein moteur), en ayant une conduite souple et en changeant rapidement de rapport lors de la phase d'accélération.

16.5 - L'éco-conduite

Infrastructure	Mode de conduite			
	Neutre	Eco-conduite		
	conso (l/100km)	conso (l/100km)	% gain	
Urbain	10.3	9.2	11.1%	
Péri-urbain	9.3	8.2	11.5%	
Voies rapides	6.9	6.3	9.1%	
Autoroute	8.3	7.1	13.9%	
Les coteaux	Descentes	4.1	3.5	14.2%
	Montées	16.3	15.6	4.3%

Au travers de ce rapport, nous avons pu vérifier que l'application des règles d'éco-conduite conduisent à de très net gains d'énergie. Il serait toutefois intéressant de suivre l'évolution de la consommation de conducteurs formés à l'éco-conduite sur plusieurs semaines ou plusieurs mois afin de savoir si les règles d'éco-conduite sont appliquées sur du long terme. Les usagers continueront-ils à appliquer les règles d'éco-conduite ou au contraire la conduite citoyenne s'érode-t-elle au cours du temps ?

17 - Références

Akçelik, R. and Biggs, D.C. (1987). Acceleration profile models for vehicles in road traffic. *Transportation Science*, 21 (1), pp 36-54

Caute P.E. Rapport de stage : analyse statistique de trajectoires de véhicules en virage, 2010

Gabadinho, A., Ritschard, G., Müller, N.S. & Studer, M. (2011), Analyzing and visualizing state sequences in R with TraMineR, *Journal of Statistical Software*. Vol. 40(4), pp. 1-37.

Genolini C., Falissard B., KmL: k-means for longitudinal data, In *Computational Statistics*, Vol 25(2), pages 317-332, 2010

R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

Romon S., Projet GERICO, exploitation des données, rapport technique, 2006

Saint Pierre G., Andrieu C. Caractérisation de l'éco-conduite et construction d'un indicateur dynamique pour véhicules thermiques, Actes de la conférences PRAC (prévention des risques et aides à la conduite), 2010

Saint Pierre G., Le système LAVIA et la consommation de carburant Méthodes exploratoires pour données de conduite en situation naturelle, 2010, LCPC

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Centre d'Études Techniques de l'Équipement du Sud-Ouest

rue Pierre Ramond - BP 10
33166 Saint-Médard-en-Jalles Cedex
Tél : 05 56 70 66 33
Fax : 05 56 70 67 33

Courriel : cete-sud-ouest@developpement-durable.gouv.fr

www-developpement-durable.gouv.fr