



IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DES RÉSEAUX

Rapport d'étude

Etude de chargement des poids lourds et

calage des méthodes de test par rapport à l'usage réel.

Direction Scientifique

JACOB Bernard
IGPEF, Direction scientifique
Téléphone : 33 (0)1 81 66 83 12
bernard.jacob@ifsttar.fr

Date : 21 mai 2015

Auteur :

Franziska Schmidt, Mast/SDOA

Relecteur :

Bernard Jacob, Direction Scientifique

Nomenclature d'activité :

XX2-F14654

Référence sur numéro de contrat :

4090088661 (Numéro commande Michelin)

Confidentialité :

Oui

Résumé

Pour une meilleure adaptation des pneumatiques de poids-lourds à leurs usages, Michelin demande à l'Ifsttar de réaliser une étude sur les conditions de chargement des véhicules et leur charge utile, leurs dimensions géométriques et la position du centre de gravité. L'étude repose sur des analyses statistiques de données enregistrées par les stations de pesage en marche du réseau routier national et autoroutier. Michelin cherche également à optimiser les programmes d'essai de qualification des pneumatiques (fatigue et performances) notamment en termes de cas de charges.

L'étude utilise des données de trafic, enregistrées par les stations de pesage de la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) du Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie, pendant une année entière (septembre 2013 - août 2014) sur une autoroute à fort trafic, sur une autoroute à trafic moyen et sur une route nationale.

Les poids lourds ont été classifiés en 17 silhouettes types, correspondant à des gammes de pneus et des utilisations différentes. Les proportions de poids lourds dans chaque classe de silhouettes ont été déterminées. Pour chacune de ces silhouettes, une estimation des poids par essieu pour les véhicules vides a été faite, à partir du fractile à 5% des distributions de poids d'essieux. Ceci a permis de calculer la charge utile estimée de chaque poids lourd, par différence entre le poids total en charge et le poids à vide estimé.

En utilisant les dimensions des véhicules, et notamment les distances entre essieux et entre pare-chocs et essieux extrêmes, la distribution statistique de la position longitudinale du centre de gravité a été déterminée.

Dans une deuxième étude, des valeurs de charges d'essai optimales ont été déterminées pour les différentes classes de poids lourds et par essieu (tous rangs d'essieux, toutes silhouettes). Ces valeurs pourront être utilisées par Michelin pour des essais en laboratoire ou sur piste.

Table des matières

1	Contexte	4
1.1	Contexte général	4
1.2	L'Ifsttar et les compétences mobilisées	4
1.3	Les besoins de Michelin	5
2	Conditions et description des études	6
2.1	Choix des silhouettes de poids lourds étudiées	6
2.2	Etude numéro 1 : Etude de chargement des poids lourds	7
2.3	Etude numéro 2 : Calage des méthodes de test par rapport à l'usage réel	8
2.4	Moyens informatiques et matériels	9
2.5	Commentaires préliminaires	9
3	Résultats des analyses	10
3.1	Données de trafic et critères de classification en silhouettes	10
3.2	Résultats de l'étude 1 : Position longitudinale du centre de gravité	14
3.2.1	Détermination des dimensions géométriques	16
3.2.2	Détermination des poids par essieu à vide	16
3.2.3	Détermination des distributions statistiques de la charge utile	18
3.2.4	Détermination de la distribution statistique de la position du centre de gravité	18
3.3	Résultats de l'étude 1 : Valeurs tests optimales	19
4	Conclusions	23
A	Distribution de la charge utile pour les différentes silhouettes	32
B	Distribution de la position du centre de gravité pour les différentes silhouettes	50
C	Modes détectés et densité pour les poids sur essieux des différentes silhouettes	68

Table des figures

1	Distribution statistique de la charge utile pour les silhouettes 1 et 13.	18
2	Histogramme de la position longitudinale du centre de gravité des poids lourds de silhouette 1, pour des classes de charge utile de 2t ou 5t.	19
3	Choix des valeurs tests pour les 2 essieux de la silhouette 1.	22
4	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 1 de l'échantillon utilisé. . . .	33
5	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 2 de l'échantillon utilisé. . . .	34
6	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 3 de l'échantillon utilisé. . . .	35
7	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 4 de l'échantillon utilisé. . . .	36
8	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 6 de l'échantillon utilisé. . . .	37
9	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 7 de l'échantillon utilisé. . . .	38
10	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 9 de l'échantillon utilisé. . . .	39
11	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 10 de l'échantillon utilisé. . . .	40
12	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 11 de l'échantillon utilisé. . . .	41
13	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 12 de l'échantillon utilisé. . . .	42
14	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 13 de l'échantillon utilisé. . . .	43
15	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 14a de l'échantillon utilisé. . . .	44
16	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 14b de l'échantillon utilisé. . . .	45
17	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 15a de l'échantillon utilisé. . . .	46
18	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 15b de l'échantillon utilisé. . . .	47
19	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 16 de l'échantillon utilisé. . . .	48
20	Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 17 de l'échantillon utilisé. . . .	49
21	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 1, par tranches de 5t de charge utile.	51
22	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 2, par tranches de 5t de charge utile.	52
23	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 3, par tranches de 5t de charge utile.	53
24	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 4, par tranches de 5t de charge utile.	54
25	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 6, par tranches de 5t de charge utile.	55
26	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 7, par tranches de 5t de charge utile.	56
27	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 9, par tranches de 5t de charge utile.	57
28	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 10, par tranches de 5t de charge utile.	58
29	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 11, par tranches de 5t de charge utile.	59

30	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 12, par tranches de 5t de charge utile.	60
31	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 13, par tranches de 5t de charge utile.	61
32	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 14a, par tranches de 5t de charge utile.	62
33	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 14b, par tranches de 5t de charge utile.	63
34	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 15a, par tranches de 5t de charge utile.	64
35	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 15b, par tranches de 5t de charge utile.	65
36	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 16, par tranches de 5t de charge utile.	66
37	Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 17, par tranches de 5t de charge utile.	67
38	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 1.	68
39	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 2.	69
40	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 3.	70
41	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 4.	71
42	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 6.	72
43	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 7.	73
44	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 9.	74
45	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 10.	75
46	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 11.	76
47	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 12.	77
48	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 13.	78
49	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 14a.	79
50	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 14b.	80
51	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 15a.	81
52	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 15b.	82
53	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 16.	83
54	Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 17.	84

Chapitre 1

Contexte

1.1 Contexte général

L'entreprise Michelin est née en France en 1889. Ce groupe est engagé dans de nombreuses activités, pour une meilleure mobilité des personnes et des marchandises. Ainsi Michelin a développé une large gamme de produits vendus en France pour les voitures, 4x4 et camionnettes, les poids-lourds, les engins de génie civil, les tracteurs et engins agricoles, les deux-roues et même les avions. Michelin travaille également dans le domaine des cartes et guides, avec notamment le célèbre guide Michelin.

En France, plus de 23 000 personnes travaillent dans l'entreprise.

Clermont-Ferrand regroupe l'ensemble des pôles de responsabilités du groupe, de France et de la zone Europe. Plus de 2500 chercheurs sont également rassemblés au centre de recherche et de technologies à Ladoux (Clermont-Ferrand).

17 implantations industrielles réparties sur tout le territoire assurent une part importante de la production. Près d'un pneu produit sur deux est exporté, alors que les ventes françaises représentent environ le dixième des ventes mondiales. Est fabriquée en France la plupart de la gamme de produits, du pneu vélo, au pneu génie-civil, en passant par les pneus véhicules de tourisme, camionnette, poids-lourd, métro, avion, agricole, ...

Pour assurer ses fonctions, le pneu, produit complexe doit délivrer de multiples performances, souvent antagonistes, parmi lesquelles la sécurité (réduction de la distance de freinage sur sol sec et mouillé, tenue de route en courbe), l'économie de carburant, la longévité kilométrique, le plaisir de conduire... L'amélioration de l'une de ces performances ne doit pas se faire au détriment des autres. C'est pour cela que Michelin propose au quotidien de nouvelles gammes réunissant davantage de performances grâce à des technologies de pointe.

Pour cela, une meilleure connaissance des usages poids lourds est indispensable pour Michelin : ceci passe par une étude des chargements de poids lourds réalisés, c'est-à-dire le tonnage de la charge utile et la position de son centre de gravité.

1.2 L'Ifsttar et les compétences mobilisées

L'Ifsttar est l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux né en 2011 de la fusion entre le LCPC et l'Inrets. L'Ifsttar conduit des travaux de recherche finalisée et d'expertise dans les domaines des transports, des infrastructures, des risques naturels et de la ville pour améliorer les conditions de vie de nos concitoyens et plus largement favoriser un développement durable de nos sociétés.

L'Ifsttar travaille en particulier pour la DGITM (Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer), faisant partie du MEDDE (ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie) et propriétaire des stations de pesage et des données de pesage en France. Il travaille en collaboration avec le Céréma/Direction territoriale Est, gestionnaire délégué de ce réseau pour la DGITM. Les données de trafic issues du réseau des stations de pesage françaises sont utilisées par diverses unités des l'Ifsttar pour le calcul du comportement dynamique des poids lourds, les effets sur les infrastructures de chaussée ou les ouvrages d'art.

L'Ifsttar (et avant le LCPC) travaille sur les technologies du pesage en marche et ses diverses applications depuis le début des années 1980, et pour le compte de la DGITM à des fins de contrôle depuis 1996.

1.3 Les besoins de Michelin

Michelin souhaite disposer d'une meilleure connaissance des chargements de poids lourds, pour les différentes silhouettes de poids lourds proposées et pour lesquelles les pneus sont adaptés. Une classification plus adaptée des poids lourds a tout d'abord été nécessaire. Pour chacune des classes ainsi définies, ont été recherchées les informations suivantes :

- La distribution statistique de la position du centre de gravité de la charge utile,
- les valeurs de charge par essieu optimales pour les essais de pneus dans le centre de recherche ou de production.

Chapitre 2

Conditions et description des études

La première étape est de définir les silhouettes de poids lourds étudiées et les critères permettant de les différencier. Ensuite, pour chacune des silhouettes retenues (paragraphe 2.1), ont été recherchées les positions du centre de gravité de la charge utile (paragraphe 2.2) et les valeurs tests pour charge à l'essieu optimales (paragraphe 2.3).

2.1 Choix des silhouettes de poids lourds étudiées

Michelin conçoit et vise à adapter l'usage des pneumatiques de véhicules de transport de marchandises au type de poids lourds et à ses conditions d'emploi. Pour cela il est nécessaire de travailler à partir d'une classification des silhouettes de poids lourds et de fournir des résultats pour chacune d'elles. Les silhouettes retenues, présentées au Tableau 3.1 de la partie 3.1, sont brièvement décrites ci-dessous et correspondent à la demande de Michelin pour la conception et les conditions d'usage des pneumatiques :

- Les silhouettes 1 et 2 correspondent à des poids lourds rigides à deux essieux, notés C2 et U2, différenciables par les distances entre essieux et la répartition des poids sur les essieux. Plus particulièrement, la silhouette 1 concerne des véhicules avec un poids supérieur à 12t avec distinction des essieux directeurs et moteurs, alors qu'en catégorie 2, les essieux sont de même nature. Ainsi sur la silhouette 2, les pneus équipant les deux types d'essieux sont identiques alors qu'ils diffèrent pour l'autre : la distinction est donc nécessaire pour différencier les usages vis-à-vis de l'offre pneu.
- Les silhouettes 3 et 4 correspondent aux poids lourds rigides à 3 essieux notés C3, avec des critères concernant le ratio du poids sur l'essieu 2 divisé par le poids sur l'essieu 3. Les 6x2 (silhouette 3) sont des véhicules de transport de frêt alors que les 6x4 (silhouette 4) sont surtout des véhicules de chantier, petites toupies, bennes. Les gammes de pneu correspondantes (Xm1ti ou Xworks) sont différentes.
- Les silhouettes 6, 11 et 12 correspondent aux poids lourds à 4 essieux, décrits par le nombre d'essieux (4), la géométrie de la combinaison (porteur ou camion rigide et remorque ou semi-remorque) et les différentes distances entre essieux. La silhouette 6 correspond à un camion rigide à 4 essieux noté C4A. La silhouette 11 correspond au camion rigide à 2 essieux (C2) tractant une remorque à essieu tandem central (R2B). La silhouette 12 est celle d'un tracteur à 2 essieux avec une semi-remorque à essieux tandem, noté T2S2.
- Les silhouettes 7, 9, 10, 13, 14a, 14b et 16 correspondent à des ensembles à 5 essieux :
 - Les silhouettes 7 et 9 correspondent à un porteur à trois essieux (C3B : un essieu à l'avant et deux essieux à l'arrière) tractant une remorque à deux essieux ; dans le cas de la silhouette 7, il s'agit d'une remorque avec deux essieux isolés (silhouette C3B + R3A). La silhouette 9 correspond à un camion à trois essieux tractant une remorque à essieux tandem centraux (C3B + R2B). La silhouette 7 contient une remorque à essieux espacés, dont le premier est sur une tourelle et donc 2 points d'articulation très rapprochés ce qui rend cette silhouette très manœuvrable mais assez instable. Elle est donc (à l'opposé de 9) plutôt utilisée pour des usages de type transport de bennes. Les pneus doivent alors être adaptés au niveau d'instabilité.
 - La silhouette 10 correspond à un camion rigide à deux essieux tractant une remorque à trois essieux, organisés en tridem centré (C2 + R3B). Les silhouettes 10 et 11 ont aujourd'hui la même offre pneu mais pas le même PTR, il est donc intéressant de connaître le taux d'exploitation de la capacité de charge pour identifier une

scission potentielle de l'offre pneu afin d'avoir un meilleur compromis stabilité/port de charge.

- La silhouette 13 correspond à un tracteur à 2 essieux et une semi-remorque à essieux tridem (T2S3).
- Les silhouettes 14a, 14 b et 16 correspondent à des tracteurs à 3 essieux avec semi-remorque à deux essieux tandem (T3S2). Néanmoins elles se distinguent par le fait que la silhouette 14a est de type *pusher* (le troisième essieu du tracteur est moteur), alors que la silhouette 14b est de type *tag* (le deuxième essieu du tracteur est moteur). La silhouette 16 possède deux essieux moteur sur le tracteur (tandem moteur constitué des essieux 2 et 3).

La distinction entre ces silhouettes sera faite par la détection de la position de l'essieu moteur. Le critère utilisé dans les fichiers de trafic issus des équipements de pesage en marche sera : soit la détection des roues jumelées qui correspondent toujours à l'essieu moteur (donnée disponible dans les fichiers de trafic utilisés pour cette étude), soit par la valeur du rapport du poids sur l'essieu 2 au poids sur l'essieu 3. Si ce rapport $\frac{P_2}{P_3}$ est compris entre 0,5 et 0,8, il s'agit de la silhouette *pusher* (14a). Pour la silhouette 14b (*tag*), ce rapport est normalement compris entre 1,3 et 1,7. La silhouette 16 présente un rapport $\frac{P_2}{P_3}$ entre 0,8 et 1,3.

Les tracteurs 6x2 *pusher* (14a) et *tag* (14b) sont utilisés pour des usages différents a priori : la silhouette *tag* n'offre pas de possibilité de chargement supplémentaire en terme de poids sur essieu alors que la silhouette *pusher* en offre. Il s'agit donc de comprendre comment la capacité de charge de cet essieu supplémentaire est exploitée en usage réel.

- Les silhouettes 15a, 15b et 17 correspondent à des poids lourds à 6 essieux, soit un tracteur à trois essieux et une semi-remorque à essieux tridem (T3S3). Ici, comme pour le cas précédent, les différences entre elles correspondent au nombre et à la position des essieux moteurs. En effet, la charge sur l'essieu moteur est toujours supérieure à celle sur l'autre essieu non moteur du tandem du tracteur, mais il y a un certain équilibre si les deux essieux sont moteurs. Ceci est lié à des contraintes de motricité.

Ainsi la silhouette 15a *pusher* a un essieu moteur unique en troisième position (avec $\frac{P_2}{P_3}$ entre 0,5 et 0,8), la silhouette 15b *tag* a également un seul essieu moteur situé en deuxième position (avec $\frac{P_2}{P_3}$ entre 1,3 et 1,7), et la silhouette 17 comporte un tracteur avec deux essieux (tandem) moteurs ($\frac{P_2}{P_3}$ entre 0,8 et 1,3).

Ici aussi, la silhouette *pusher* (15a) offre des capacités de chargement supplémentaire (poids sur essieu 2 plus important), ce que ne fait pas la silhouette *tag* (15b). Il s'agit de déterminer l'usage qui est fait de cette capacité supplémentaire.

La pertinence de ces silhouettes pour l'objet de l'étude et celle des critères permettant de les discriminer seront testées et validées au cours du travail (paragraphe 3.1).

La **proportion de poids lourds** de chaque silhouette dans la population totale sera indiquée.

2.2 Etude numéro 1 : Etude de chargement des poids lourds

Michelin a besoin d'adapter les pneumatiques (matière, formes et dimensions, dimensionnement, etc.) des poids lourds à leurs conditions d'usage, et notamment les charges réelles statiques et dynamiques supportées. Ces charges dépendent notamment de la géométrie du véhicule et de la répartition des poids sur les essieux. Il est donc demandé de fournir comme résultats intermédiaires de l'étude :

1. Pour chaque silhouette, les géométries réelles rencontrées, qui seront déterminés à partir des données des fichiers de trafic de façon statistique par :
 - (a) **Moyenne statistique des différents empattements** rencontrés pour toutes les silhouettes (soit la distance entre pare-choc avant et premier essieu, et les différentes distances entre essieux).
2. La répartition des poids par essieu :
 - (a) **Moyenne statistique du poids par rang d'essieu pour le fractile à 5%** des véhicules les plus légers pour chacune des silhouettes, qui sera considérée comme poids des essieux/par essieu du/des véhicule(s) vide(s) et ceci afin de déterminer la charge utile,

- (b) **Distribution statistique de la charge utile** pour chaque silhouette. La charge utile sera calculée en soustrayant au poids réel de chaque essieu le poids moyen calculé au 1a pour les véhicules vides, puis en sommant les différences pour tous les essieux du véhicule.
- (c) **Distribution statistique de la position longitudinale du centre de gravité de la charge utile** par classe de charge utile de 5t. Pour déterminer cette position :
- Les dimensions prises en compte sont les empattements déterminés au point 1a (moyenne des différents empattements pour chaque silhouette) ;
 - Si ces résultats issus du 1a diffèrent trop des valeurs des poids lourds modèles utilisés par Michelin pour la conception des pneus, Michelin fournira ces dimensions.
- La position du centre de gravité par rapport au pare-choc avant est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$x_{CDG} = \frac{\sum_{i=1}^N d_{0,i} p_i}{\sum_{i=1}^N p_i}, \quad (2.1)$$

où :

- N est le nombre d'essieux du véhicule,
 - $d_{i-1,i}$ est la distance entre essieu $i - 1$ et essieu i (par convention, $d_{0,1}$ est la distance entre pare-choc avant et le premier essieu),
 - p_i est le poids de l'essieu i .
- La position peut également être repérée par rapport au premier essieu. La formule de calcul devient alors :

$$x_{CDG} = \frac{\sum_{i=2}^N d_{1,i} p_i}{\sum_{i=1}^N p_i}. \quad (2.2)$$

2.3 Etude numéro 2 : Calage des méthodes de test par rapport à l'usage réel

Cette étude vise à déterminer les valeurs d'essai de charges à l'essieu optimales pour la réalisation des essais de chargement de Michelin, pour chaque silhouette et chaque rang d'essieu. Ceci est primordial pour limiter le nombre de ces essais sans affecter leur représentativité. L'optimisation portera donc sur 2 critères pour chaque silhouette :

- Le nombre d'essais doit être minimum,
- Les valeurs de poids par essieux doivent correspondre au plus près à celles de la population totale des poids lourds de même silhouette dans le trafic.

Pour atteindre cet objectif, nous cherchons pour chaque silhouette i de poids lourds et pour chaque rang d'essieu j , un ensemble de k valeurs tests de poids sur essieux telles que des intervalles centrés sur ces valeurs et ayant une largeur de $\pm 10\%$ de chacune contiennent la plus grande proportion possible de la population des poids d'essieux :

$\forall i \in \{1, \dots, 17\}, \forall j \in \{1, \dots, n_i\}, \min_k P_{ijk}$ tel que :

$\bigcup_k [P_{ijk} - 10\%, P_{ijk} + 10\%]$ contienne le plus d'éléments de la population observée,

où i est le numéro de la silhouette considérée,

j est le rang d'essieu considéré,

n_i est le nombre d'essieux de la silhouette i ,

k est le nombre de valeurs tests.

Pour cela et dans un premier temps, la population des poids sur essieux observée, pour chaque silhouette et pour chaque position d'essieu, sera considérée comme une gaussienne multi-modale. Ainsi la valeur de chaque mode sera déterminée et la proportion d'éléments de l'échantillon ayant une valeur entrant dans l'intervalle considéré sera estimée.

On cherchera une valeur de k limitée à quelques unités.

De plus, comme les distributions seront a priori à tendance bimodale (essieux chargés ou non chargés), l'optimisation ci-dessus sera réalisée sur la base d'une distribution gaussienne bimodale. Pour déterminer les deux modes (moyennes et écarts-type), l'algorithme espérance-maximisation est appliqué.

2.4 Moyens informatiques et matériels

Les données de trafic issues des EPM ont été importées dans une base de données MySQL vu la quantité de données à traiter.

Les traitements statistiques demandés sont réalisés à l'aide du logiciel R (The R Project for Statistical Computing, <http://www.r-project.org/>). L'étude 2 est réalisée à l'aide du complément Mixtools de R (<http://cran.r-project.org/web/packages/mixtools/index.html>).

Le projet R consiste en une implémentation libre du langage S, développé depuis les années 1970 dans les laboratoires Bell par John Chambers et son équipe et distribué depuis 1993 sous licence commerciale exclusive par Insightful Corp. Initié dans les années 1990 par Robert Gentleman et Ross Ihaka (Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande), auxquels sont venus s'ajouter un noyau de chercheurs du monde entier en 1997, R constitue aujourd'hui un langage et un environnement de programmation intégré d'analyse statistique.

L'objectif du projet R est de fournir un environnement interactif d'analyse de données, doté d'outils graphiques performants et permettant une adaptation aisée aux besoins des utilisateurs, depuis l'exécution de tâches routinières jusqu'au développement d'applications entières.

Le langage de R est un langage fonctionnel orienté-objet, structure alliant la facilité d'utilisation à la souplesse et la puissance de la programmation.

De plus, l'adoption d'une licence libre de type GNU/GPL (General Public License) a favorisé son développement et permis son port vers de nombreux systèmes informatiques (Unix, Linux, Macintosh, Windows, etc.). Projet dynamique, R est en constante évolution et bénéficie de fréquentes mises à jour, disponibles gratuitement sur le site du CRAN (Comprehensive R Archive Network, <http://cran.rproject.org/>).

Avant tout destiné aux scientifiques, il est aujourd'hui largement diffusé dans la communauté académique et sert de support à de nombreuses recherches et publications.

2.5 Commentaires préliminaires

- Les densités présentées dans ce rapport ne sont pas des probabilités au sens $0.01 = 1\%$, mais des densités de probabilité. Autrement dit, ces valeurs sont normalisées pour obtenir une probabilité totale égale à 1, c'est-à-dire que l'aire sous la courbe est égale à 1, sans prise des échelles des axes. Par exemple (page 18), lorsque l'axe des abscisses est $\frac{1}{10}t$, la densité (unité de l'ordonnée) est telle que l'intégrale sous la courbe est égale à $1 \times \frac{1}{10}t$, soit $0.1t$.
- Les classes de charge utile pour la distribution de la position du centre de gravité sont données en $10t$ dans la légende : ainsi l'intervalle $[0 - 0.5]$ correspond à l'intervalle $[0 - 5]t$ (chapitre 3.2.4, page 18).

Chapitre 3

Résultats des analyses

3.1 Données de trafic et critères de classification en silhouettes

Tous les résultats sont donnés silhouette par silhouette.

L'étude a été réalisée sur la base d'un an de trafic (septembre 2013 - août 2014), respectivement sur trois sites différents : une route nationale, une autoroute à fort trafic international et une autoroute moins circulée.

La population totale considérée de poids lourds (poids total en charge supérieur à 3.5t) est de 2 933 331 véhicules, qui se répartissent de la manière suivante : 1262289 poids lourds sur l'autoroute à fort trafic international, 931111 sur l'autoroute moins circulée et 739931 poids lourds sur la route nationale. Les répartitions par silhouette sont données dans le tableau 3.2.

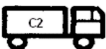
Les données traitées consistent, pour chaque élément de cet échantillon, en : les différents empattements (distance pare-chocs avant - premier essieu et les différentes distances entre essieux), les différents poids sur essieux, la distinction entre roues simples et roues jumelées pour chaque essieu.

Les données sont traitées. Un algorithme permet notamment de supprimer les enregistrements erronés par des tests de cohérence. La précision de la mesure des poids d'essieux est vérifiée par comparaison des mesures issues de deux capteurs : si les deux valeurs mesurées sont trop différentes, l'enregistrement est invalidé et effacé.

Pour la plupart des silhouettes, l'information donnée par les constructeurs (deuxième colonne du tableau 3.1 ci-dessous) et les informations sur la présence ou non d'essieux moteurs données par les enregistrements des stations de pesage ne coïncident pas. Nous avons alors choisi de ne pas tenir compte des informations données par les fichiers de trafic, car la précision de la détection des roues jumelées nous est inconnue. Ainsi la distinction entre silhouettes 14a et 14b, et entre 15a et 15b sera faite seulement sur la base des rapports entre poids sur essieux.







Le tableau 3.1 ci-après présente la répartition (nombre d'éléments pour chaque silhouette et pourcentage de la population totale) des poids lourds du trafic utilisé dans les différentes silhouettes, avec les critères utilisés pour leur distinction, sachant que nous utilisons également le nombre d'essieux détectés.

TABLE 3.1: Description des silhouettes de poids lourds utilisées dans cette étude.

Silhouettes	Critères de discrimination	Population	Commentaires
1 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $P_1 > 3t$	184451 6,29%	Il s'agit de la silhouette la plus commune pour les 2 essieux.
2	$d_{12 \min} = 2m$		

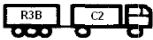

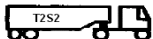
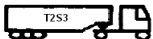
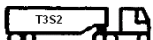
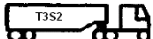
...

...

	$1,2t < P_1 < 3t$	28785 0,98%	<p>Cette silhouette ne représente que 0,98% de la population totale, ce qui correspond à 28785 éléments. Ainsi l'échantillon est suffisamment grand pour que les analyses statistiques puissent être effectuées.</p>
3 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $d_{23 \max} = 2m$ $\frac{P_2}{P_3} \in]1, 3, 2, 2]$	19730 0,67%	Même remarque que pour la silhouette 2.
4 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $d_{23 \max} = 2m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0, 4, 1, 3]$	18447 0,66%	Même remarque que pour la silhouette 2.
6 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \max} = 2.2m$ $d_{23 \min} = 2m$ $d_{34 \max} = 2m$	10366 0,35%	Même remarque que pour la silhouette 2.
7 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $d_{23 \max} = 2m$ $d_{34 \min} = 3m$ $d_{34 \max} = 6m$ $d_{45 \min} = 4m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0, 4, 1, 3]$	4164 0,14%	
9 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $d_{23 \max} = 2m$ $d_{34 \min} = 3m$ $d_{34 \max} = 6m$ $d_{45 \max} = 2m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0, 4, 1, 3]$	4635 016%	
10	$d_{01 \max} = 1,75m$		

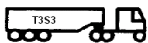
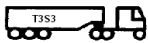
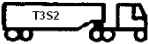
...

...

	$d_{12 \min} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 3m$ $d_{34 \max} = 1,8m$ $d_{45 \max} = 1,8m$	20658 0,7%	
11 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 3m$ $d_{34 \max} = 2m$	64085 2,18%	
12 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 5m$ $d_{34 \max} = 2m$	319478 10,89%	Il s'agit de la silhouette la plus commune parmi les 3 essieux.
13 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 3m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 4m$ $d_{34 \max} = 1,8m$ $d_{45 \max} = 1,8m$	1999914 68,17%	Il s'agit bien sûr de la silhouette la plus répandue parmi les 5 essieux.
14a 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 2m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 1m$ $d_{23 \max} = 1,8m$ $d_{34 \min} = 5m$ $d_{45 \max} = 2m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0.5, 0.7[$	342 0,011%	La proportion de cette silhouette, avec les critères tels qu'ils ont été définis, est très faible dans la population totale.
14b 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 2m$	174	La proportion de cette silhouette, avec les critères tels qu'ils ont été définis, est très faible dans la population totale.

...

...

	$d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 1m$ $d_{23 \max} = 1,8m$ $d_{34 \min} = 5m$ $d_{45 \max} = 2m$ $\frac{P_2}{P_3} \in]1,3,2,2]$	0,006%	
15a 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 2m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 1m$ $d_{23 \max} = 1,8m$ $d_{34 \min} = 4m$ $d_{45 \max} = 1,8m$ $d_{56 \max} = 1,8m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0,4,0,7[$	2619 0,089%	La proportion de cette silhouette, avec les critères tels qu'ils ont été définis, est très faible dans la population totale.
15b 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 2m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 1m$ $d_{23 \max} = 1,8m$ $d_{34 \min} = 4m$ $d_{45 \max} = 1,8m$ $d_{56 \max} = 1,8m$ $\frac{P_2}{P_3} \in]1,3,2,2]$	780 0,026%	La proportion de cette silhouette, avec les critères tels qu'ils ont été définis, est très faible dans la population totale.
16 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 2m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 1m$ $d_{23 \max} = 1,8m$	1655 0,056%	La proportion de cette silhouette, avec les critères tels qu'ils ont été définis, est très faible dans la population totale.

...

...

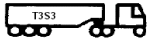
	$d_{34 \min} = 5m$ $d_{45 \max} = 2m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0, 7, 1, 3]$		
17 	$d_{01 \max} = 1,75m$ $d_{12 \min} = 2m$ $d_{12 \max} = 4,4m$ $d_{23 \min} = 1m$ $d_{23 \max} = 1,8m$ $d_{34 \min} = 4m$ $d_{45 \max} = 1,8m$ $d_{56 \max} = 1,8m$ $\frac{P_2}{P_3} \in [0, 7, 1, 3]$	3223 0,11%	La proportion de cette silhouette, avec les critères tels qu'ils ont été définis, est très faible dans la population totale.

TABLE 3.1: Description des silhouettes de poids lourds utilisées dans cette étude.

Le détail des populations, suivant les différents types de voie considérés, peut être retrouvé dans le tableau 3.2.

Nous observons ainsi que, bien que les définitions des classes des véhicules ont été définies avec soin, tous les véhicules ne rentrent pas dans une catégorie. En effet, ces catégories sont disjointes, d'après leurs définitions. Néanmoins, comme la somme des véhicules de silhouette 1 et 2 ne correspond pas au nombre de véhicules à 2 essieux par exemple, nous pouvons en déduire que l'ensemble des véhicules 2 essieux ne se retrouve pas dans une des catégories 1 ou 2. Il en va de même pour tout nombre d'essieux (de 2 à 6). Ainsi ces classes pourraient être améliorées encore ou affinées avec des données constructeur, néanmoins elles peuvent être utilisées ici car elles recouvrent la majorité de la population.

De plus, les différents trafics présentent des compositions similaires : les véhicules 5 essieux (73%), et en particulier les semi-remorques (silhouette 13, 68% de la population totale) sont largement majoritaires dans la population totale de poids lourds. Les véhicules 6 essieux sont rares, ils représentent moins de 1% du trafic. Pour l'ensemble des poids lourds considérés (2933331 éléments), ils sont au nombre de 19465. Ainsi, même si leur proportion est faible, ils nous semblent représentatifs et les calculs statistiques seront également réalisés sur ces populations.

3.2 Résultats de l'étude 1 : Position longitudinale du centre de gravité

Pour cette étude, les étapes réalisées successivement sont :

- Déterminer les dimensions géométriques des poids lourds, en particulier les différents empattements. Cela sera réalisé au paragraphe 3.2.1, et consistera à rechercher la moyenne statistique des différents empattements pour toutes les silhouettes.
- Déterminer les poids à vide. Il s'agira de déterminer les moyennes statistiques des poids par essieu pour les 5% de poids lourds les moins chargés pour les différentes silhouettes (paragraphe 3.2.2).
- Déterminer les distributions des charges utiles. Pour cela, les poids à vide seront déduits des poids totaux par essieux pour obtenir les différentes charges utiles. Ce sera réalisé pour toutes les silhouettes (paragraphe 3.2.3).
- Déterminer les distributions statistiques de la position longitudinale du centre de gravité pour les différentes silhouettes (paragraphe 3.2.4).

Silhouettes	Autoroute 1	Autoroute 2	Route nationale	Total
2 essieux	8.36%	10.41%	5.64%	8.33%
2 essieux non classés				1.06%
1	6.12%	8.07%	4.33%	6.29%
2	0.93%	1.26%	0.71%	0.98%
3 essieux	2.39%	3.29%	1.94%	2.56%
3 essieux non classés				1.23%
3	0.55%	0.79%	0.74%	0.67%
4	0.56%	0.97%	0.33%	0.66%
4 essieux	15.38%	13.22%	15.65%	14.76%
4 essieux non classés				1.34%
6	0.26%	0.62%	0.18%	0.35%
11	2.37%	1.85%	2.29%	2.18%
12	11.53%	9.37%	11.71%	10.89%
5 essieux	73.16%	72.16%	76.11%	73.59%
5 essieux non classés				4.274%
7	0.12%	0.19%	0.12%	0.14%
9	0.16%	0.18%	0.13%	0.16%
10	0.75%	0.54%	0.83%	0.7%
13	69.27%	65.96%	69.11%	68.17%
14a	0.0089%	0.013%	0.014%	0.011%
14b	0.0078%	0.0062%	0.0023%	0.006%
16	0.034%	0.067%	0.079%	0.056%
6 essieux	0.71%	0.92%	0.66%	0.76%
6 essieux non classés				0.545%
15a	0.055%	0.16%	0.053%	0.089%
15b	0.023%	0.046%	0.0069%	0.026%
17	0.072%	0.14%	0.14%	0.11%
Total (nombre)	1262289	931111	739931	2933331
Total non classés	7.1%	9.7%	9.1%	7.109%

TABLE 3.2 – Détails des populations pour les échantillons considérés.

3.2.1 Détermination des dimensions géométriques

Pour déterminer la position du centre de gravité de la charge utile des poids lourds, une première étape consiste à déterminer les dimensions géométriques à prendre en compte pour ce calcul. Ceci a été réalisé en utilisant ces grandeurs égales aux moyennes de ces dimensions sur toute la population. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.3 :

Silhouettes	d_{01}	d_{12}	d_{23}	d_{34}	d_{45}	d_{56}
1	112	537				
2	89	431				
3	124	539	136			
4	104	434	133			
6	99	186	286	137		
7	118	433	136	455	471	
9	120	438	135	638	139	
10	128	537	677	128	128	
11	126	544	751	136		
12	126	376	701	132		
13	129	376	573	131	131	
14a	135	277	132	823	138	
14b	129	389	134	711	145	
15a	132	286	131	601	132	133
15b	132	341	132	581	132	132
16	122	361	138	681	139	
17	121	343	137	625	138	138

TABLE 3.3 – Distances inter-essieux pour les différentes silhouettes de poids lourds (en cm).

La reconnaissance du début des pare-chocs avant est assez incertaine (boucles magnétiques), ce qui entraîne une incertitude de $\pm 10\%$ sur d_{01} . Pour les autres distances d_{12} , d_{23} , ..., l'incertitude est de $\pm 1\%$.

Pour cela, la position du centre de gravité sera repérée par rapport à l'essieu 1, avec l'équation (2.2) (voir paragraphe 2.2).

3.2.2 Détermination des poids par essieu à vide

La charge utile est déterminée en soustrayant à la charge totale le poids à vide. Celui-ci est déterminé en évaluant la moyenne des différents poids sur essieux des poids lourds appartenant aux 5% les moins chargés. Les valeurs correspondantes sont données dans le tableau 3.4 (l'unité est le dixième de tonne).

Certaines valeurs semblent très faibles : c'est le cas par exemple pour l'essieu 1 de la silhouette 2. Néanmoins, cela ne pose pas problème ici car il s'agit de petits véhicules avec un tonnage inférieur à 7.5t. De plus, nous avons fixé $p_1 < 3t$.

Une autre valeur qui semble faible est celle du premier essieu de la silhouette 4 (de valeur 2.05t).

Il est connu que pour les semi-remorques, le poids de l'essieu directeur est situé en moyenne autour de 5,2t pour des véhicules présumés vides (et autour de 6,5t pour des véhicules chargés dont le poids total est supérieur à 35t). Ainsi les valeurs ci-dessus (en particulier pour la silhouette 13) semblent ne pas être aberrantes.

Silhouettes	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
1	35,96	30,05				
2	15,28	30,63				
3	41,79	37,84	23,22			
4	20,56	17,69	16,03			
6	34,27	34,57	26,91	26,94		
7	49,94	30,48	30,35	21,63	19,02	
9	44,11	30,33	29,22	15,22	15,61	
10	43,38	43,21	15,23	15,37	15,75	
11	30,35	39,36	13,88	13,99		
12	39,70	33,13	18,55	18,45		
13	49,74	36,14	17,59	17,62	17,87	
14a	53,72	26,22	41,67	28,17	28,67	
14b	38,67	40,89	25,89	27,44	28,22	
15a	53,50	24,47	42,76	24,29	23,29	23,80
15b	50,47	41,32	25,17	22,97	23,12	24,07
16	46,68	33,52	33,92	20,35	21,02	
17	51,61	29,32	28,85	18,60	19,77	21,00

TABLE 3.4 – Poids par essieu des véhicules vides, pour les différentes silhouettes (en dixième de tonne, soit par tranche de 100kg).

3.2.3 Détermination des distributions statistiques de la charge utile

L'histogramme de la charge utile peut ainsi être estimé pour les différentes silhouettes, en soustrayant à la charge totale la somme des poids par essieu à vide. L'ensemble des distributions obtenues peut être trouvé dans l'annexe A, page 32.

A titre d'exemple, nous montrons ici l'histogramme de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 1 et de silhouette 13 (semi-remorques), voir Figure 1. Sont représentés l'histogramme brut, la densité (donc l'aire sous la courbe étant norme) et la moyenne (ligne verticale en rouge).

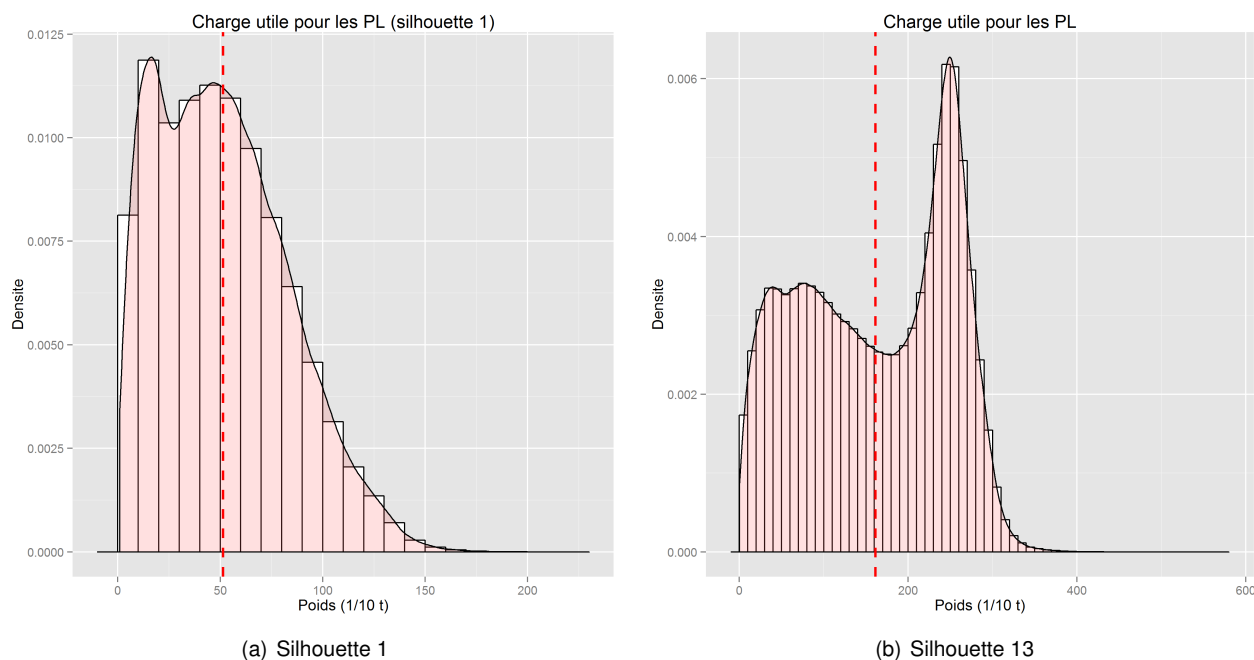


FIGURE 1 – Distribution statistique de la charge utile pour les silhouettes 1 et 13.

Ainsi, pour chacune des silhouettes, nous observons deux modes (peut-être ceux des poids lourds chargés en volume, et ceux chargés en poids). Les deux modes semblent avoir la même importance pour le poids lourds de silhouette 1. Néanmoins pour les poids lourds de silhouette 13, le mode des poids lourds chargés complètement semble être plus important.

De plus, il est intéressant de remarquer que certains poids lourds ne présentent qu'un seul mode, et donc une seule façon de charger le poids lourds.

3.2.4 Détermination de la distribution statistique de la position du centre de gravité

Avec ces dimensions et la charge utile déterminée précédemment, la position longitudinale du centre de gravité de la charge utile peut être estimée pour toutes les silhouettes de poids lourds, pour des largeurs de classe de $2dm$ et pour chaque classe de charge utile de $5t$ à l'aide de l'équation (2.2), page 8.

L'ensemble des figures peut être trouvé en Annexe B, page 50.

A titre d'exemple, la distribution statistique de la position du centre de gravité pour les poids lourds de silhouette 1 par tranche de $2t$ et $5t$ de charge utile peut être visualisé à la Figure 2. Ainsi nous observons que lorsque la charge utile augmente, la position du centre de gravité se déplace vers l'arrière du poids lourds. De plus, lorsque la charge utile augmente, la distribution de la position du centre de gravité est plus pointue, ce qui signifie que celui-ci a une plage de variation réduite.

En outre, pour les poids lourds présentant un porteur et une remorque (silhouettes 7, 9, 10, 11), la distribution de la position du centre de gravité présente également ce déplacement vers l'arrière du poids lourds quand la charge utile augmente, néanmoins la progression est plus complexe, et la transition entre le chargement de la remorque 1 et la

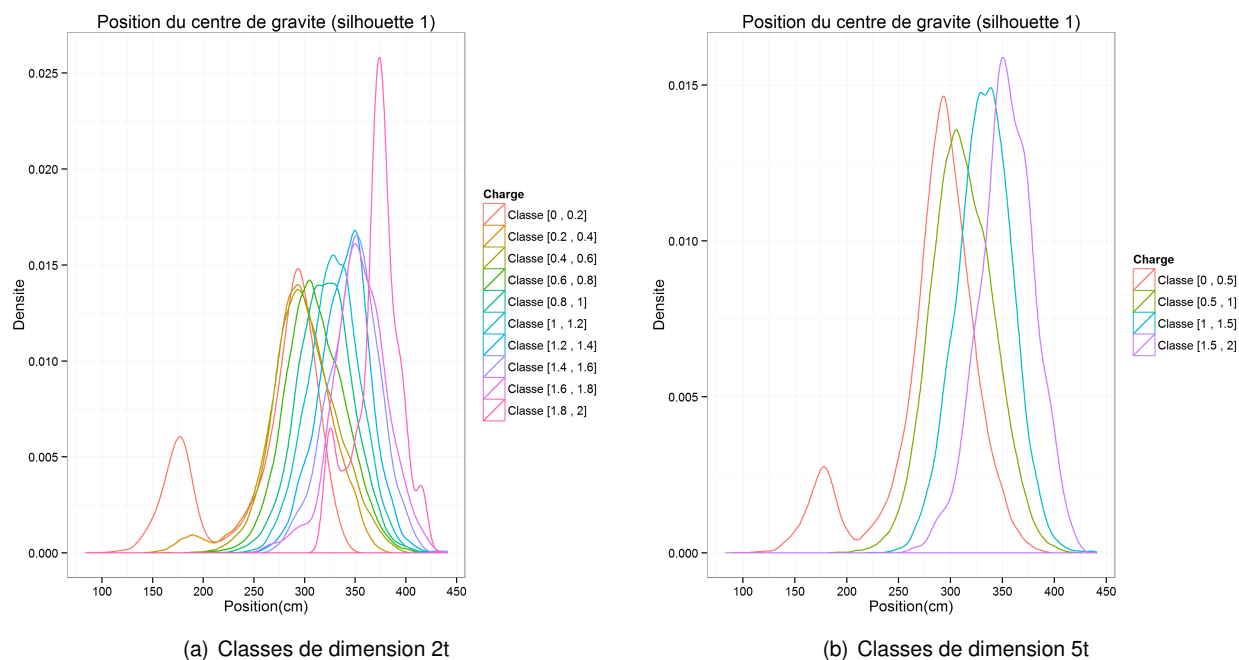


FIGURE 2 – Histogramme de la position longitudinale du centre de gravité des poids lourds de silhouette 1, pour des classes de charge utile de 2t ou 5t.

remorque 2 est visible. En effet, il est possible de charger indépendamment le porteur et la remorque, donc avec deux véhicules de chargement plus de dispersion peut être observée.

3.3 Résultats de l'étude 1 : Valeurs tests optimales

En appliquant la méthode explicitée auparavant, nous obtenons les valeurs optimales pour tester expérimentalement les pneus. Les valeurs numériques correspondantes sont données dans le tableau 3.5, alors que les représentations graphiques correspondantes sont données Annexe C, page 68.

Silhouettes	Essieu considéré	Valeur test 1 (0.1t)	Valeur test 2 (0.1t)	Population concernée	Commentaires
1	Essieu 1	35,2	53,6	47%	
	Essieu 2	52,5	79,8	36%	
2	Essieu 1	20,2	28,6	68%	
	Essieu 2	34,9	50,5	51%	
3	Essieu 1	65,9	64,9	81%	Une seule valeur test suffit,
	Essieu 2	63,4	92,1	44%	

...

...

	Essieu 3	39,4	59,5	42%	
4	Essieu 1	56,0	65,4	61%	
	Essieu 2	47,0	86,10	30%	
	Essieu 3	86,4	46,2	30%	
6	Essieu 1	39,6	55,9	52%	
	Essieu 2	55,8	39,3	55%	
	Essieu 3	39,1	76,1	31%	
	Essieu 4	38,6	72,8	34%	
7	Essieu 1	59,9	66,3	91%	Fusionner ?
	Essieu 2	46,6	83,1	43%	
	Essieu 3	43,7	74,5	37%	
	Essieu 4	35,7	64,0	34%	
	Essieu 5	67,3	33,4	26%	
9	Essieu 1	22,7	64,8	38%	
	Essieu 2	52,1	91,0	34%	
	Essieu 3	50,8	90,2	33%	
	Essieu 4	32,8	64,0	27%	
	Essieu 5	33,5	66,7	24%	
10	Essieu 1	61,2	60,8	58%	Une seule valeur test (6t),
	Essieu 2	64,6	100,8	39%	
	Essieu 3	26,5	44,1	35%	
	Essieu 4	26,5	45,5	36%	
	Essieu 5	25,9	44,8	32%	
11	Essieu 1	46,5	60,3	62%	
	Essieu 2	66,5	83,8	43%	
	Essieu 3	33,8	61,7	38%	
	Essieu 4	34,2	63,7	38%	
12	Essieu 1	43,1	59,6	71%	
	Essieu 2	54,2	78,8	41%	
	Essieu 3	32,5	50,0	34%	
	Essieu 4	34,0	52,2	37%	
	Essieu 1	63,6	32,7	64%	
	Essieu 2	101,1	53,8	37%	

...

...

	Essieu 3	30,3	66,0	33%	
	Essieu 4	30,6	66,3	33%	
	Essieu 5	30,5	66,5	34%	
14a	Essieu 1	32,3	62,0	70%	
	Essieu 2	68,0	48,0	41%	
	Essieu 3	48,8	88,1	36%	
	Essieu 4	67,4	38,0	31%	
	Essieu 5	65,4	100,1	33%	
14b	Essieu 1	59,3	61,2	92%	Fusionner les deux valeurs tests ?
	Essieu 2	73,1	82,3	61%	
	Essieu 3	73,0	46,2	44%	
	Essieu 4	49,1	71,6	30%	
	Essieu 5	55,4	58,5	54%	Fusionner les deux valeurs tests ?
15a	Essieu 1	52,5	61,1	89%	
	Essieu 2	85,6	48,6	36%	
	Essieu 3	88,7	77,8	75%	
	Essieu 4	55,7	68,7	56%	
	Essieu 5	55,2	69,3	41%	
	Essieu 6	30,6	66,4	53%	
15b	Essieu 1	59,9	57,6	59%	Fusionner les deux valeurs tests ?
	Essieu 2	53,5	88,2	42%	
	Essieu 3	48,8	51,3	37%	Fusionner les deux valeurs tests ?
	Essieu 4	49,6	71,8	42%	
	Essieu 5	73,5	49,7	42%	
	Essieu 6	59,4	28,7	29%	
16	Essieu 1	66,3	77,7	76%	
	Essieu 2	56,3	68,1	61%	
	Essieu 3	55,7	69,4	58%	
	Essieu 4	35,6	79,9	28%	
	Essieu 5	36,0	79,3	26%	

...

...					
17	Essieu 1	67,2	61,2	54%	Fusionner les deux valeurs tests ?
	Essieu 2	79,8	45,6	33%	
	Essieu 3	44,0	78,2	32%	
	Essieu 4	30,5	73,1	26%	
	Essieu 5	31,2	72,5	26%	
	Essieu 6	33,6	74,6	27%	

TABLE 3.5: Valeurs des tests optimales pour les charges à l'essieu, pour les différentes silhouettes et les différents rangs d'essieux.

On observe que les valeurs tests pour des essieux appartenant à des groupes d'essieux (tandem ou tridem) sont similaires. Cela est en effet logique. A titre d'exemple, les modes pour les différents essieux des poids lourds de silhouette 1 sont représentés Figure 3.

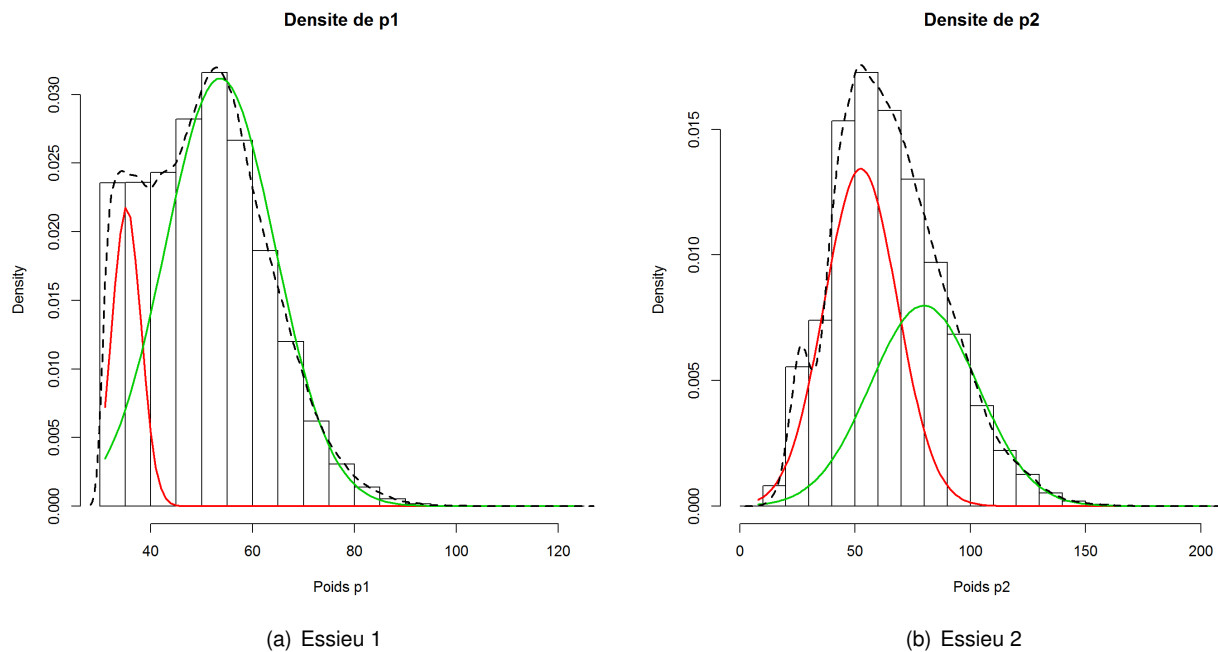


FIGURE 3 – Choix des valeurs tests pour les 2 essieux de la silhouette 1.

Chapitre 4

Conclusions

Trois fichiers de trafic, d'une durée respective d'un an (septembre 2013- août 2014) ont été utilisés, ce qui représente un total de presque 3 millions de véhicules lourds. Ceux-ci ont été distingués selon 17 silhouettes, dont les critères de discrimination ont été déterminés à l'aide de ces fichiers.

La distribution statistique de la position longitudinale du centre de gravité pour chacune de ces silhouettes a été estimée.

Ensuite, en supposant que les poids à l'essieu suivent des distributions statistiques de type bimodale (chargé ou non chargé), l'estimation de ces modes a permis d'obtenir les valeurs tests optimales pour les poids à l'essieu.

Dans le cas où Michelin souhaiterait raffiner cette étude, afin de prendre en compte les poids lourds non classés (voir tableau 3.2), nous recommanderions d'affiner les critères de classification, par exemple à l'aide de catalogue de constructeurs de poids lourds et de remorques.

De plus, pour la détermination des valeurs tests optimales, une hypothèse de gaussienne bimodale a été faite. Celle-ci pourrait être validée à l'aide de tests complémentaires.

Plus précisément, pour chacune des silhouettes (voir tableau 3.1, page 10), les commentaires suivants peuvent être faits :

TABLE 4.1: Récapitulatif des résultats et commentaires pour les différentes silhouettes.

Silhouettes	Essieu	Valeur test 1 (0.1t)	Valeur test 2 (0.1t)	Population concernée	Commentaires
2 PL porteur 4x2 184451 véhicules	Essieu 1	35.2	53.6	47%	
	Essieu 2	52.4	79.8	36%	

6.29%					<p>La répartition des trajets en charge et à vide est complexe car les distributions ne présentent pas une bimodalité marquée : le camion n'est donc pas complètement plein ou complètement vide. La position longitudinale du CdG de la CU est très dispersée d'une classe de CU à une autre. Ceci s'explique aussi par les critères de tri de cette classe de véhicule qui amènent à prendre en compte dans une même population des véhicules dont le PTAC est compris entre 10 et 19t. La moyenne de la gaussienne de faible charge ne correspond pas à la charge à vide attendue sur l'essieu arrière (5t ald 3t). On constate que la position du CdG de la CU recule lorsque la CU augmente, ce qui assez logique. Le mode de la position de la charge est situé entre 50% et 65% de l'empattement du véhicule depuis l'essieu 1. Les pneus arrières sont donc globalement sous exploités vis-à-vis des pneus avant (arrière en jumelé et avant en monte simple). Le mode de CU est à 5t et va jusqu'à 18t donc le PTAC (ajouter 6t6) est dépassé pour environ 2% des véhicules et on remarque que les véhicules sont assez peu chargés.</p>
<p>2 PL porteur 4x2 28785 véhi- cules 0.98%</p>	<p>Essieu 1</p> <p>Essieu 2</p>	<p>20.2</p> <p>34.9</p>	<p>28.6</p> <p>50.5</p>	<p>68%</p> <p>51%</p>	<p>La bimodalité visible sur l'essieu avant montre que cet essieu semble impacté par la charge utile donc que la CU est en général assez avancée. Sur l'essieu arrière, la bimodalité est difficilement visible sur l'histogramme car la largeur de classe n'est pas adaptée, aussi il mériterait d'être recalculé avec une largeur pertinente. En revanche, avec la décomposition en 2 modes, on remarque bien un 1^{er} mode à une valeur de 3.5t et peu dispersé et une deuxième valeur à 5t beaucoup plus dispersé, ce qui est caractéristique des modes de charge vide/chargé. Les ordres de grandeur sont à l'attendu. Le mode de la position de la charge est situé entre 65% et 80% de l'empattement du véhicule depuis l'essieu 1. Le PTAC est manifestement assez mal respecté, ce qui est bien connu. On constate que la position du CdG de la CU recule lorsque la CU augmente et que plus le frêt est léger, plus la position longitudinale du CdG est dispersée.</p>

3 PL porteur 6x2 pusher 19730 véhi- cules 0.67%	Essieu 1	65.9	64.9	81%	<p>La distribution de la charge de l'essieu steer est gaussienne. Il n'est pas évident que les 2 modes identifiés sur les 2 essieux arrières soient ceux de chargement à vide et en charge. Il y a néanmoins une certaine cohérence entre les essieux drive et tag. La médiane de la charge totale est à 18t pour 26t réglementaire, ce qui montre que ce type de véhicule est principalement dédié à une usage volume. On constate également que les véhicules les plus chargés sont chargés surtout à l'arrière à 85% de l'empattement steer-drive.</p>
	Essieu 2	63.4	92.1	44%	
	Essieu 3	39.4	59.5	42%	
4 Porteur 6x4 18447 véhi- cules 0.66%	Essieu 1	56.0	65.4	61%	<p>Les résultats de cette classe de véhicule sont critiquables car les charges à vide identifiées ne sont pas du tout à l'attendu : le poids à vide serait de 5.4t au total, ce qui est en dessous de la moitié de l'attendu. Il doit donc y avoir une erreur d'identification de cette classe. Si l'on regarde les distributions de charge de l'étude 2, on retrouve un mode sur essieu steer à 6.2t, ce qui est plus logique que les 2t identifiés en préambule de l'étude 1. En revanche ce mode est assez dispersé et il ne serait pas impacté par la charge utile. Les charges essieux D1 et D2 sont cohérentes et au niveau attendu pour des silhouettes qui concernent principalement des engins de chantier. La charge essieu plafonne à 13t sur les essieux drive. En charge maximale, ce sont les essieux drive qui portent la CU.</p>
	Essieu 2	47.0	86.1	30%	
	Essieu 3	86.4	46.2	30%	
6 Porteur 8x4 10366 véhi- cules 0.35%	Essieu 1	39.6	55.9	52%	
	Essieu 2	55.8	39.3	55%	
	Essieu 3	39.1	76.1	31%	

	Essieu 4	38.6	72.8	34%	Le poids à vide est de 12.3t, ce qui est logique. La médiane de PTAC est de 24t et on observe un nombre non négligeable de véhicules au-delà de 32t. Ces véhicules sont très souvent utilisés pour du transport de fret de chantier (béton, gravats, terre,...) donc pour du fret pondéreux et des distances courtes où la surcharge a très rapidement un effet visible sur la rentabilité du camion. Selon les charges par essieu de l'étude 2, on constate bien la bimodalité attendue pour environ 50% vide/ 50% chargé. Le centre de gravité est toujours d'autant plus en arrière que la CU est élevée.
7 Porteur 6x2 tag + remorque 2 essieux espacés 4164 véhicules 0.14%	Essieu 1	59.9	66.3	91%	La distribution de la charge sur l'essieu steer est assez gaussienne, ce qui indique que la valeur de CU n'influe pas la charge de l'essieu steer. Les charges essieux drive et steer sont semblables. Celles des 2 essieux trailer le sont aussi. La charge utile présente 2 modes de 7t et 22t indiquant visiblement 2 usages de charge différents pour cette silhouette soit des PTRAs de 22t et 37t indiquant que ces silhouettes sont dédiées à un usage de transport de fret peu dense. Les distributions de position de CdG de CU sont moins explicables mais nous avons affaire ici à un convoi qui possède 2 unités de chargement sans report de charge de l'une sur l'autre : les chargements de l'une et l'autre sont indépendants.
	Essieu 2	46.6	83.1	43%	
	Essieu 3	43.7	74.5	37%	
	Essieu 4	35.7	64.0	34%	
	Essieu 5	67.3	33.4	26%	
9 Porteur 6x2 tag + remorque 2 essieux centrés 4164 véhicules 0.14%	Essieu 1	22.7	64.8	38%	
	Essieu 2	52.1	91.0	34%	
	Essieu 3	50.8	90.2	33%	
	Essieu 4	32.8	64.0	27%	
	Essieu 5	33.5	66.7	24%	

					On note une assez faible représentation de cette classe vis-à-vis de nos attentes. Les stations étudiées sont probablement éloignées des frontières de l'Est du pays où ces silhouettes sont plus visibles : Allemagne et Benelux. La 2 ^e gaussienne est à retenir, la 1 ^{re} n'est pas significative. La largeur de classe de charge est trop grossière pour espérer identifier un profil d'usage mais nous nous limiterons dans cette étude à la gaussienne proposée. Les charges essieux drive et steer sont semblables. Celles des 2 essieux trailer le sont aussi. Le mode de CU est à 13t, ce qui fait un PTRA de 26t mais une quantité non négligeable de véhicule dépasse largement le 44t de PTRA.
10 Porteur 4x2 + remorque 3 essieux centrés 20658 véhicules 0.7%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5	61.2 64.6 26.5 26.5 25.9	60.8 100.8 44.1 45.5 44.8	58% 39% 35% 36% 32%	La distribution semble gaussienne : une seule valeur suffit. Il n'y a pas d'impact de la CU sur l'essieu steer. Pour le porteur, on observe un mode à 16t et pour la remorque un mode à 12.9t. On distingue a priori 3 types de chargement sur la distribution de CU : 7.5t, 13.5t, 24t, soit un PTRA à 20.8t, 26.8t, 37.3. Le maximum de CU est 35t, soit un PTRA de 48.3t. L'usage de ce genre de silhouette est donc clairement dédié au transport de fret peu dense. Contrairement aux véhicules porteurs analysés dans les lignes ci-dessus, où la position du CdG recule et est de moins en moins dispersée lorsque la CU augmente, nous observons ici que le CdG recule mais en revanche que sa position est de plus en plus dispersée.
11 Porteur 4x2 + remorque 2 essieux centrés 64085 véhicules 2.18%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4	46.5 66.5 33.8 34.2	60.3 83.8 61.7 63.7	62% 43% 38% 38%	

					<p>Le poids à vide semble très faible : 9.8t. La CU a 2 modes : 11t et 20t, soit un PTRa de 20.8t et 29.8t et un maximum à 39.8t. On retrouve une évolution de la position du CdG de la CU en accord avec les porteurs : plus le véhicule est chargé, moins la position du CdG est dispersée et plus elle est reculée. Sur l'essieu steer le mode à 4.6t n'est pas représentatif, on peut donc considérer la distribution gaussienne. La bimodalité de la charge de l'essieu drive est discutable. Les 2 essieux trailer ont la même distribution.</p>
<p>12 Tracteur 4x2 + semi-remorque tandem 319478 véhicules 10.89%</p>	<p>Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4</p>	<p>43.1 54.2 32.5 34.0</p>	<p>59.6 78.8 50.0 52.2</p>	<p>71% 41% 34% 37%</p>	<p>Le mode de CU pour cette silhouette est à 8t, soit PTRa de 19t et un maximum de CU à 30t soit un PTRa de 41t. L'usage est donc clairement du fret peu dense avec une assez grande variabilité de position de CdG de CU. Les essieux sont globalement moins chargés que sur la silhouette T2S3. En comparant la position des essieux de cette silhouette T2S2 avec la géométrie T2S3, on constate que les essieux 1, 2, 4 et 5 sont tous au même endroit. Ces T2S2 sont donc principalement des T2S3 avec essieu avant relevé. Il y aurait donc 1/7ème des T2S3 qui possèdent un essieu avant de semi relevé. Pour confirmer ce point, il faudrait analyser la distribution d_{23} et d_{34} entre les 2 classes.</p>
<p>13 Tracteur 4x2 + semi-remorque tridem 1999914 véhicules 68.17%</p>	<p>Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5</p>	<p>63.6 101.1 30.3 30.6 30.5</p>	<p>32.7 53.8 66.0 66.3 66.5</p>	<p>64% 37% 33% 33% 34%</p>	

					La distribution de CU est en accord avec les ordres de grandeur connus. L'usage maxi code correspond à environ 20% des véhicules. Les distributions de charge montrent une bimodalité sur essieux trailer et drive que l'on retrouve sur la distribution de la charge utile.
14a Tracteur 6x2 pusher + semi- remorque tandem 342 véhicules 0.011%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5	32.3 68.0 48.8 67.4 65.4	62.0 48.0 88.1 38.0 100.1	70% 41% 36% 31% 33%	Cette classe est très faiblement représentée et sa petite population ne permet pas de tirer des conclusions fiables.
14b Tracteur 6x2 tag + semi- remorque tandem 174 véhicules 0.006%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5	59.3 73.1 73.0 49.1 55.4	61.2 82.3 46.2 71.6 58.5	92% 61% 44% 30% 54%	Cette classe est très faiblement représentée et sa petite population ne permet pas de tirer des conclusions fiables.
15a Tracteur 6x2 pusher + semi- remorque tridem 2619 véhi- cules 0.089%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5 Essieu 6	52.5 85.6 88.7 55.7 55.2 30.6	61.1 48.6 77.8 68.7 69.3 66.4	89% 36% 75% 56% 41% 53%	

					La gaussienne à 5.2t ne semble pas être nécessaire sur l'essieu 1, comme celle de 8.5t sur essieu 2. L'usage de cette silhouette est quasi mono-modal situé au mode supérieur des semi de T2S3. Avec un poids à vide de 19.2t, ces convois semblent dédiés à un transport de fret pondéreux avec très peu de voyage à vide. Les limites de l'approche avec 2 gaussiennes apparaissent ici car les essieux de la semi-remorque ont le même histogramme mais les gaussiennes identifiées sur essieu 5 sont clairement différentes de celles des essieux 4 et 6. Une raison peut également en être la faible population analysée.
15b Tracteur 6x2 tag + semi-remorque tridem 780 véhicules 0.026%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5 Essieu 6	59.9 53.5 48.8 49.6 73.5 59.4	57.6 88.2 51.3 71.8 49.7 28.7	59% 42% 37% 42% 42% 29%	On peut fusionner les deux valeurs de tests sur essieux 1 et 3. Une largeur de classe plus fine permettrait de mieux voir les potentielles bimodalités. Cette silhouette est légèrement plus chargée que 15a, ce qui est surprenant car les limites de charge essieux (ie motricité) sont plus rapidement atteintes. Les positions de CU ne sont pour autant pas si différentes.
16 Tracteur 6x4 + semi-remorque tandem 1655 véhicules 0.056%	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4 Essieu 5	66.3 56.3 55.7 35.6 36.0	77.7 68.1 69.4 79.9 79.3	76% 61% 58% 28% 26%	Bonne cohérence des répartiteurs de charge essieux 2 et 3 et essieux 4 et 5. Véhicule souvent vide ou faiblement chargé.
17 Tracteur 6x4 + semi-remorque tridem	Essieu 1 Essieu 2 Essieu 3 Essieu 4	67.2 79.8 44.0 30.5	61.2 45.6 78.2 73.1	54% 33% 32% 26%	

3223 véhi- cules 0.11%	Essieu 5	31.2	72.5	26%	<p>Bonne cohérence des répartiteurs de charge essieux 2 et 3 et essieux 4, 5 et 6. On peut fusionner les deux valeurs de tests sur essieu 1. Ces convois sont utilisés visiblement pour des transports très lourds : fréquemment plus de 40t de CU avec un PV de 16.9t et un mode à 8t. On observe, comme pour la plupart des silhouettes convoi que la position la plus reculée du CdG de la CU est au centre de la surface utile. Les essieux arrières du tracteur sont donc en général plus chargés que les essieux de la semi donc dans la situation la plus sécuritaire.</p>
	Essieu 6	33.6	74.6	27%	

Annexe A

Distribution de la charge utile pour les différentes silhouettes

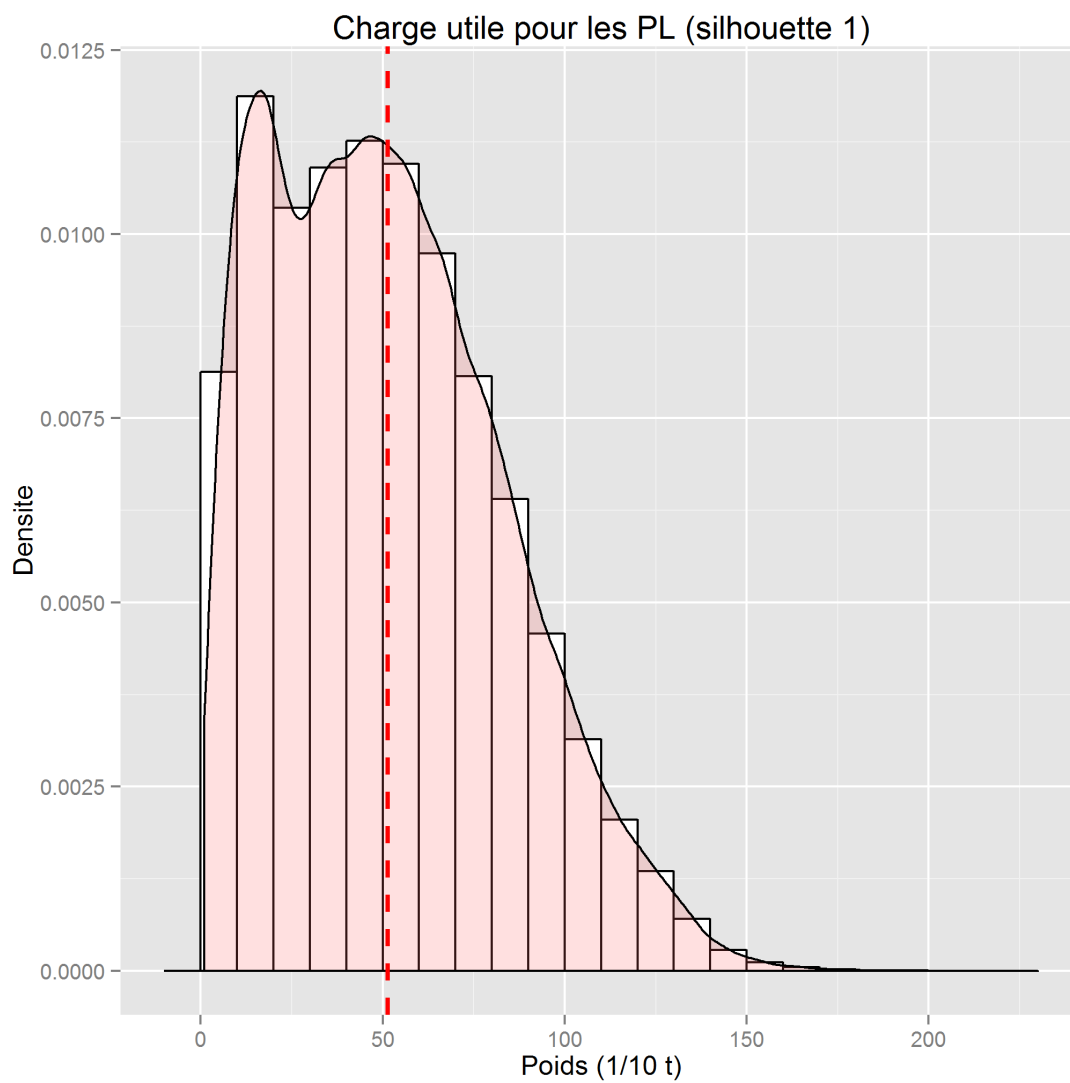


FIGURE 4 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 1 de l'échantillon utilisé.

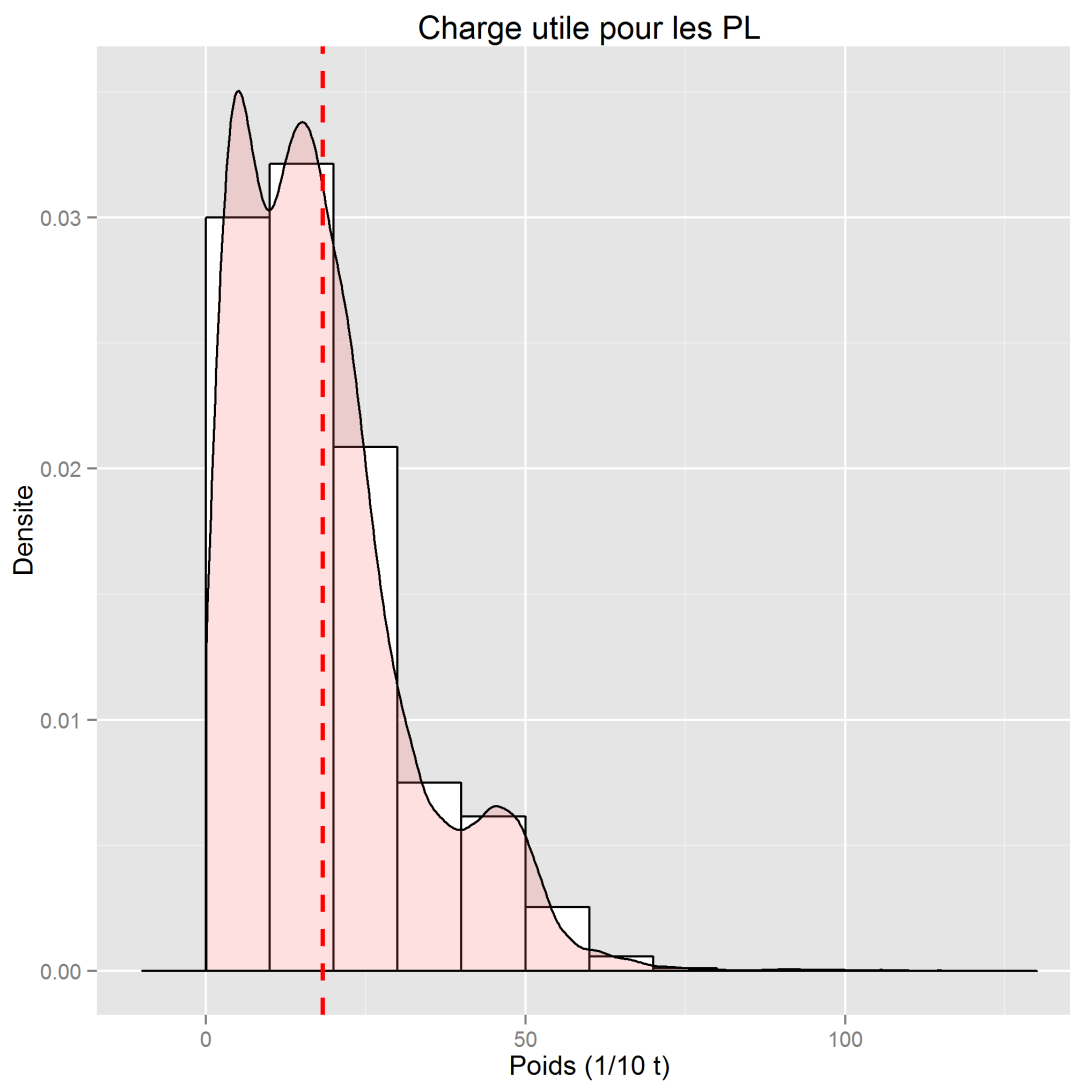


FIGURE 5 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 2 de l'échantillon utilisé.

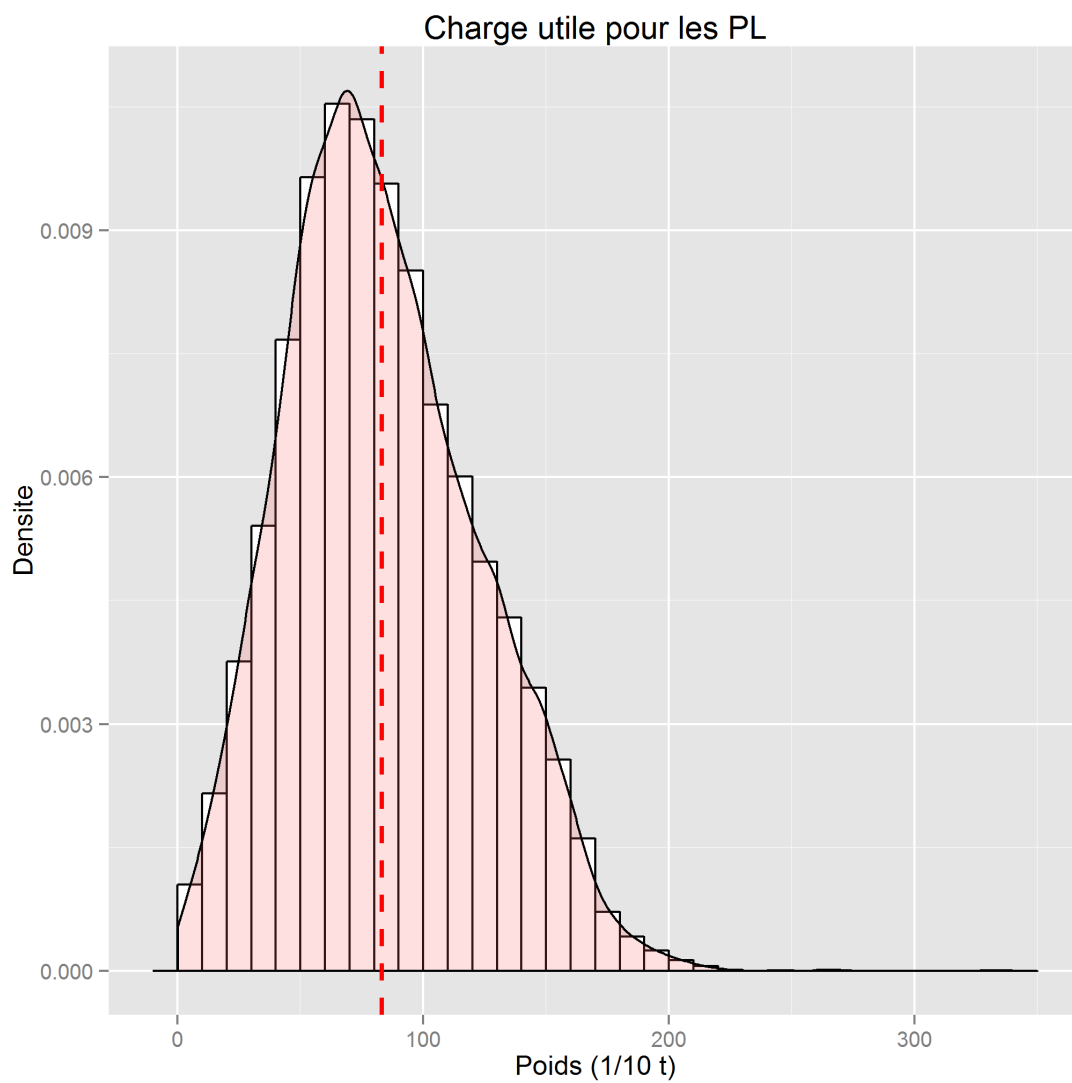


FIGURE 6 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 3 de l'échantillon utilisé.

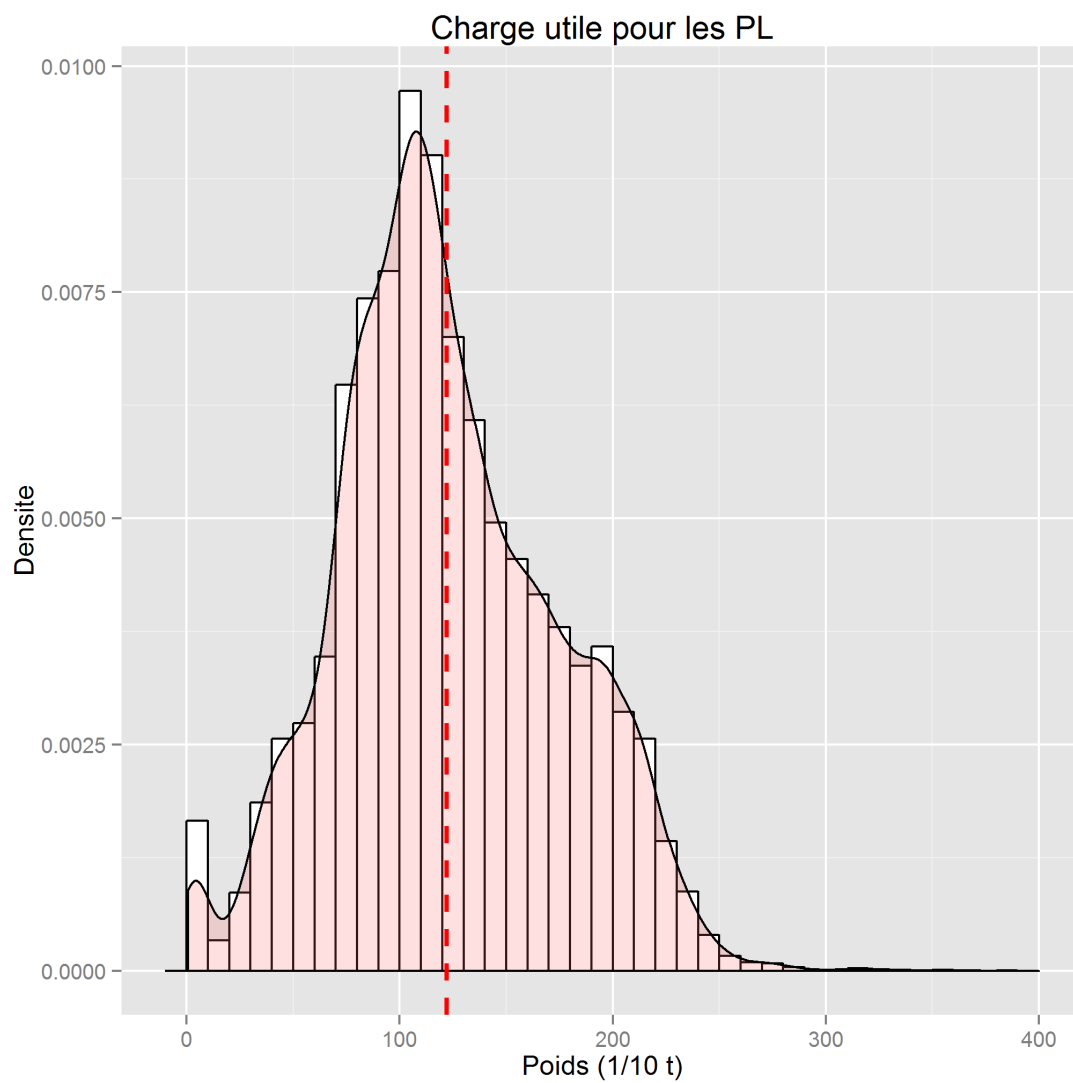


FIGURE 7 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 4 de l'échantillon utilisé.

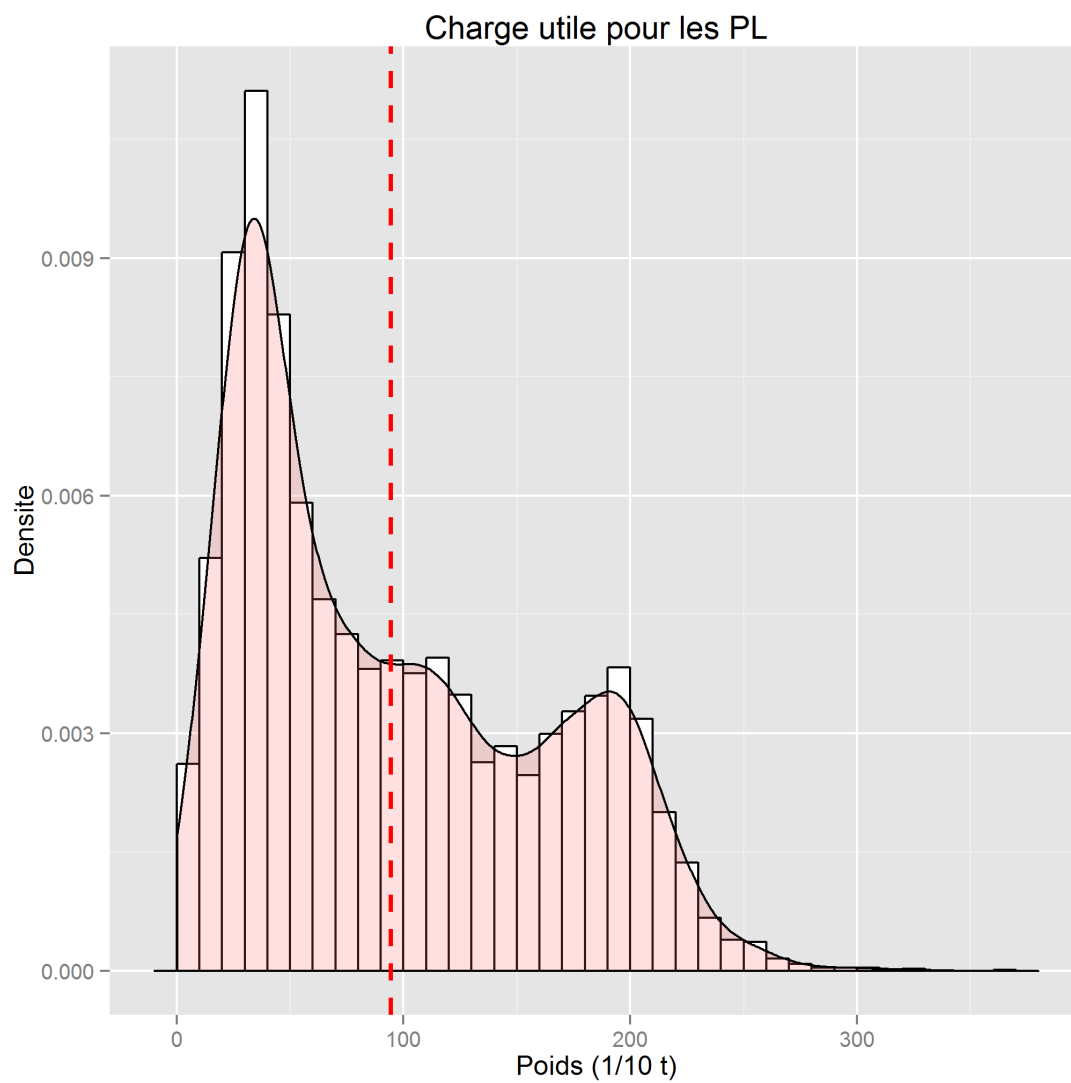


FIGURE 8 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 6 de l'échantillon utilisé.

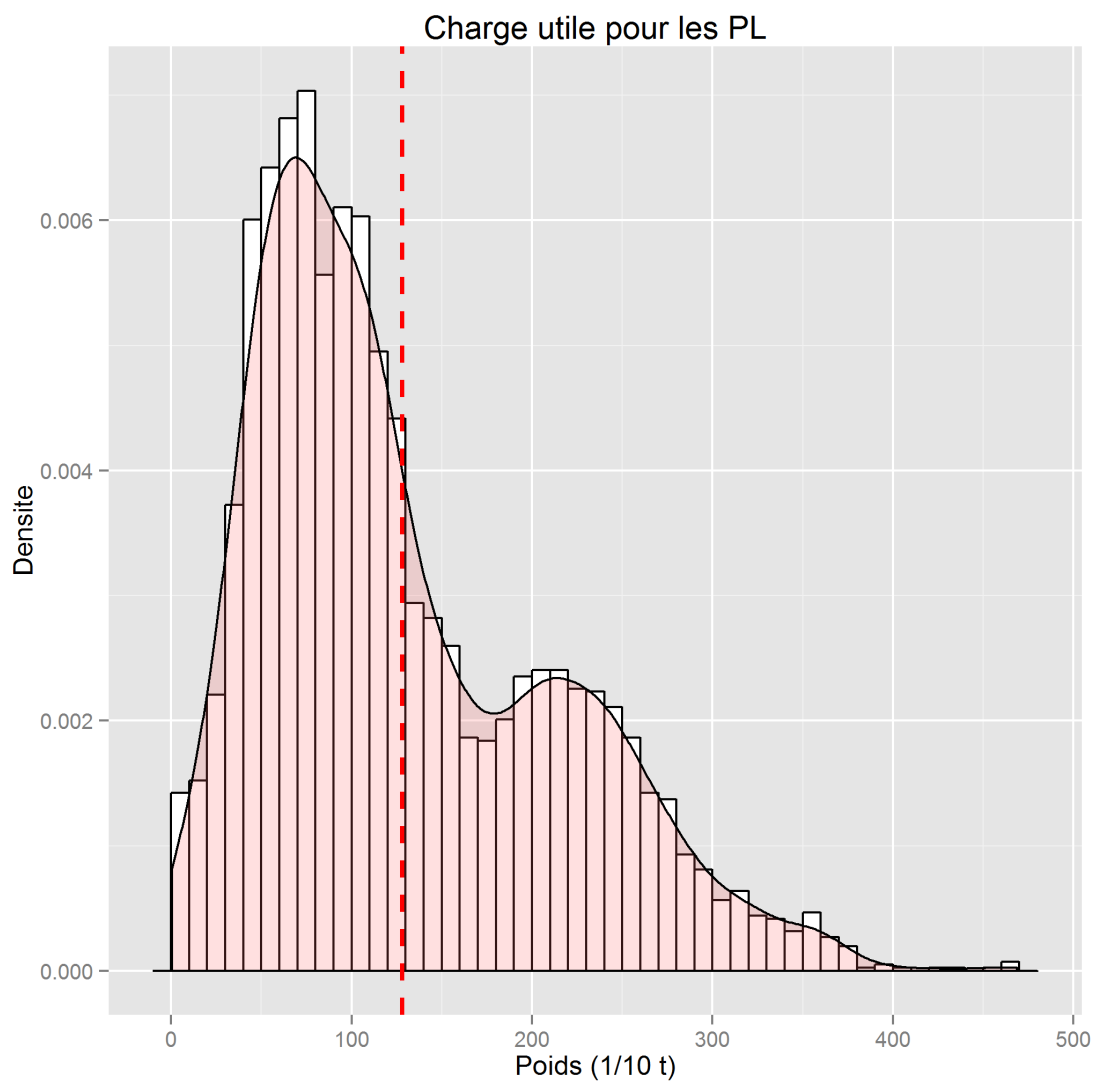


FIGURE 9 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 7 de l'échantillon utilisé.

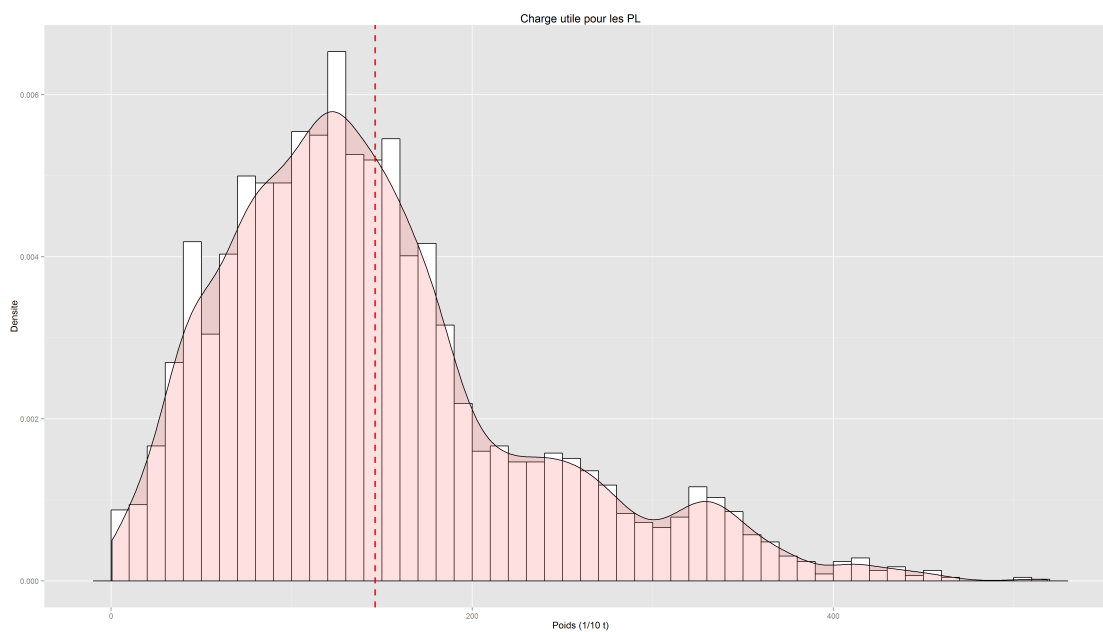


FIGURE 10 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 9 de l'échantillon utilisé.

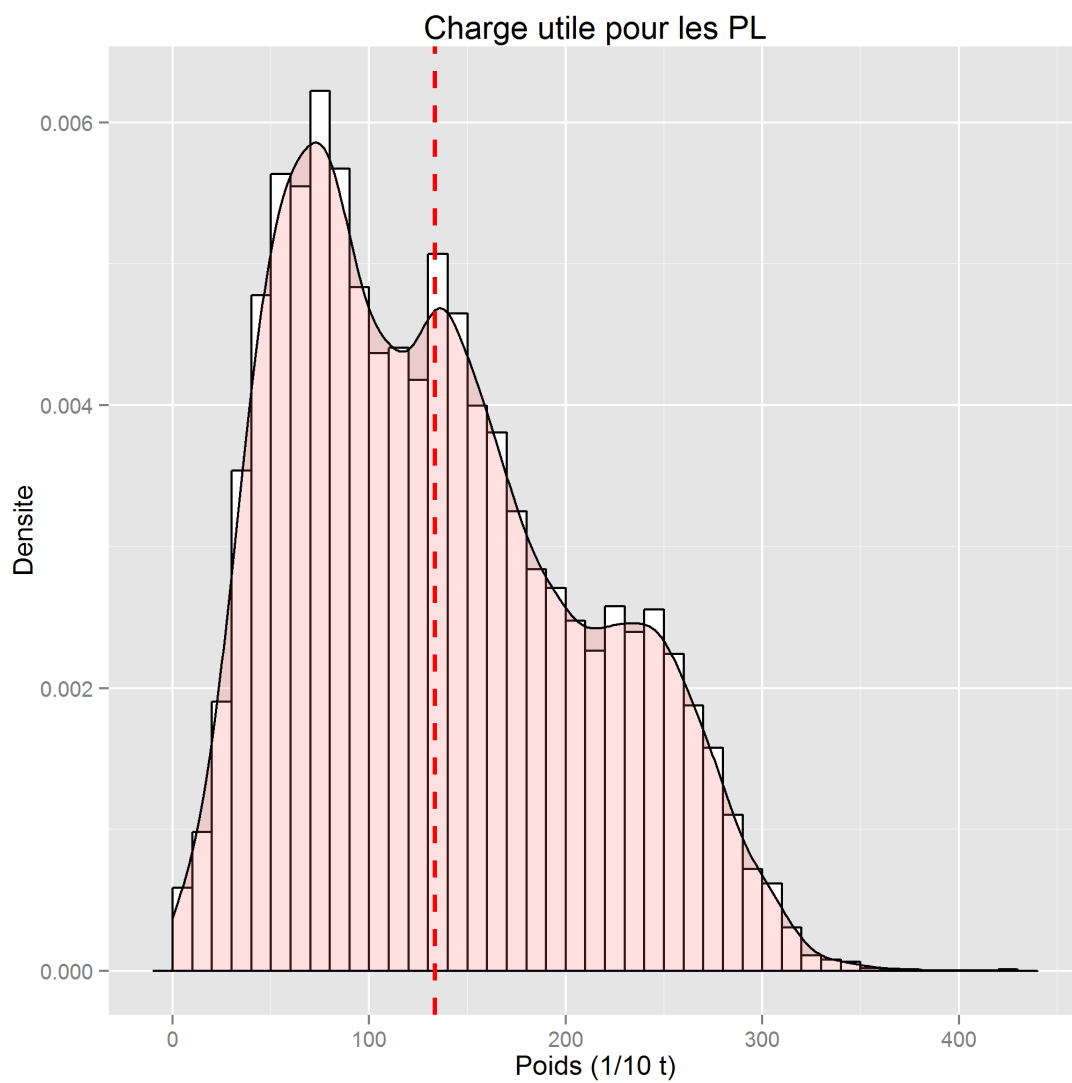


FIGURE 11 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 10 de l'échantillon utilisé.

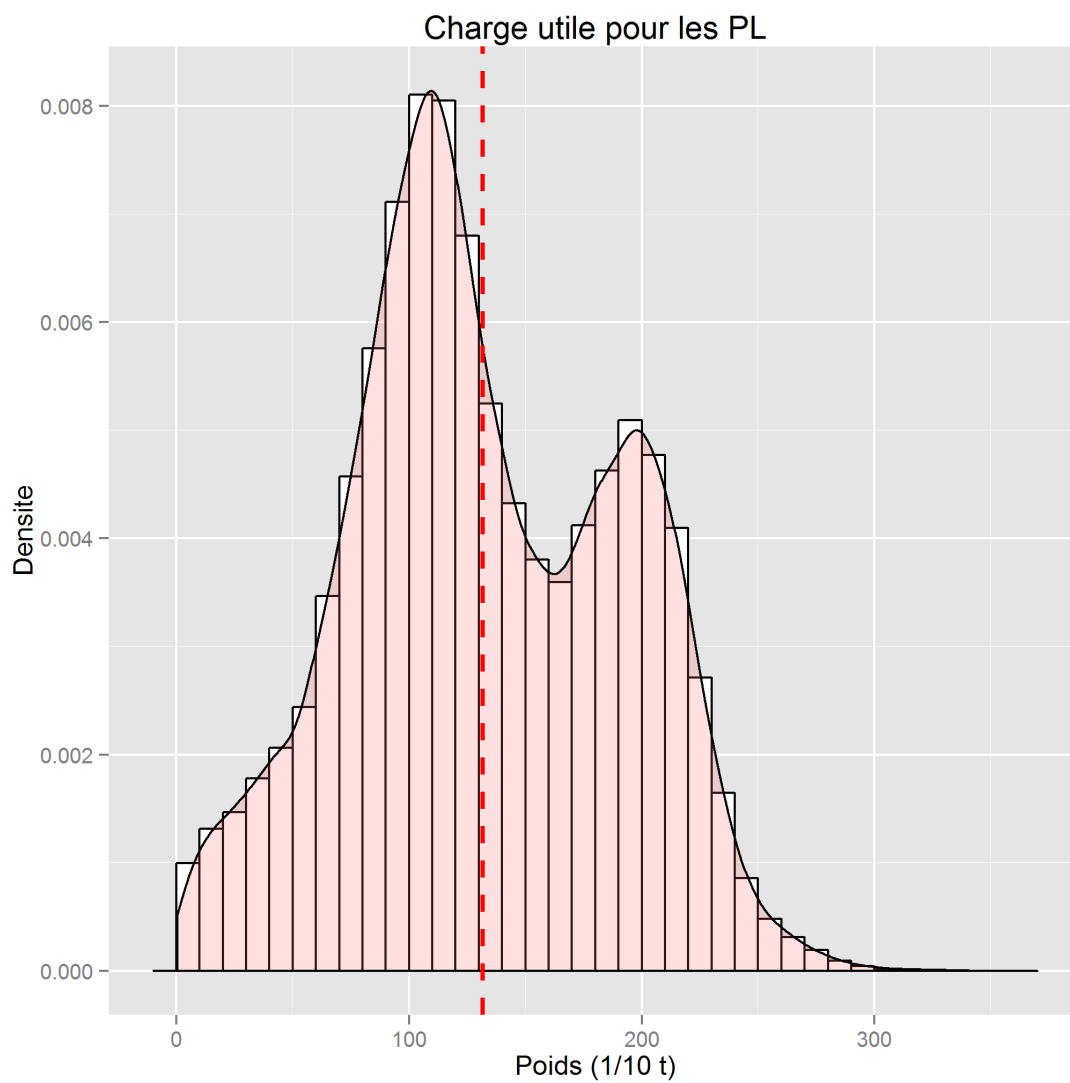


FIGURE 12 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 11 de l'échantillon utilisé.

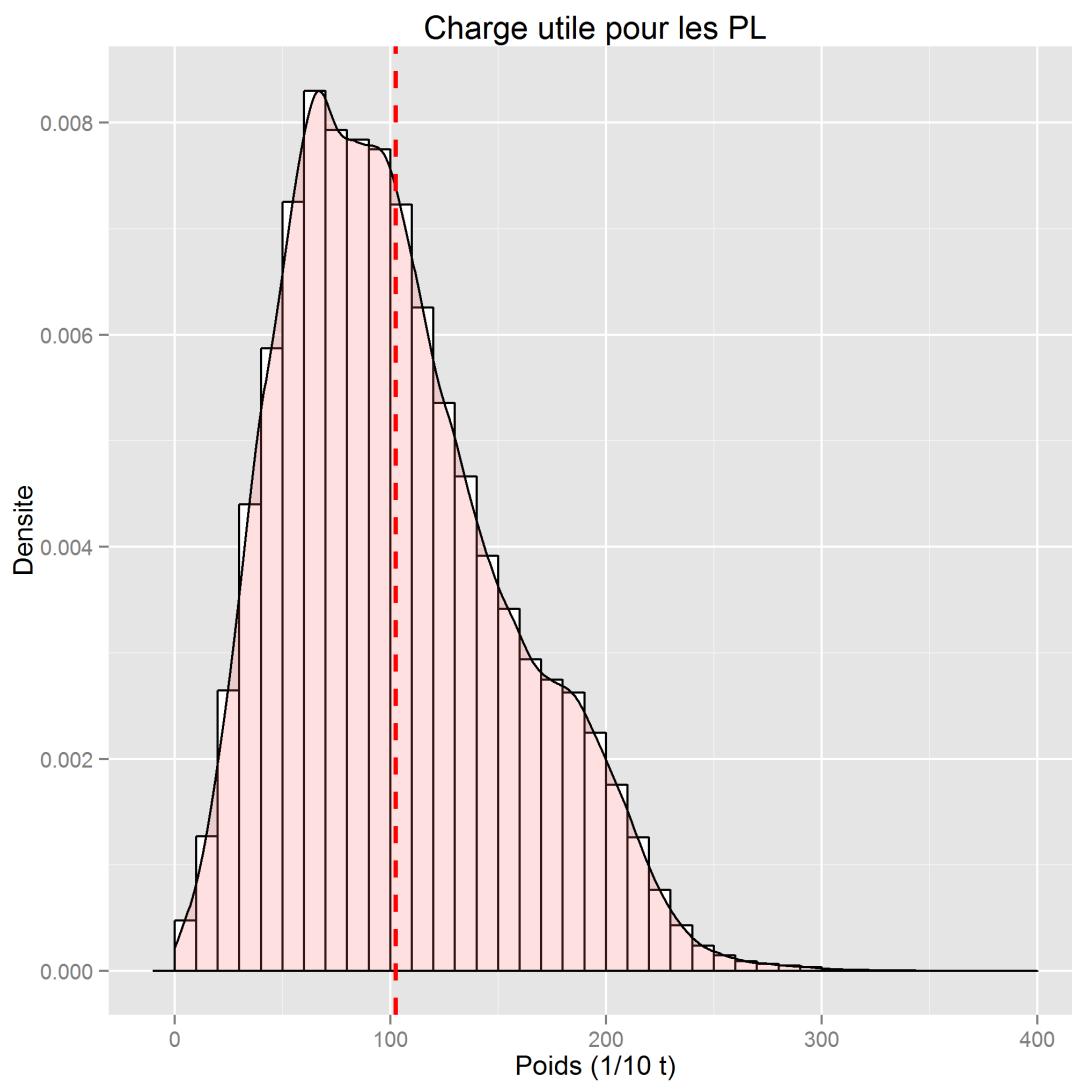


FIGURE 13 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 12 de l'échantillon utilisé.

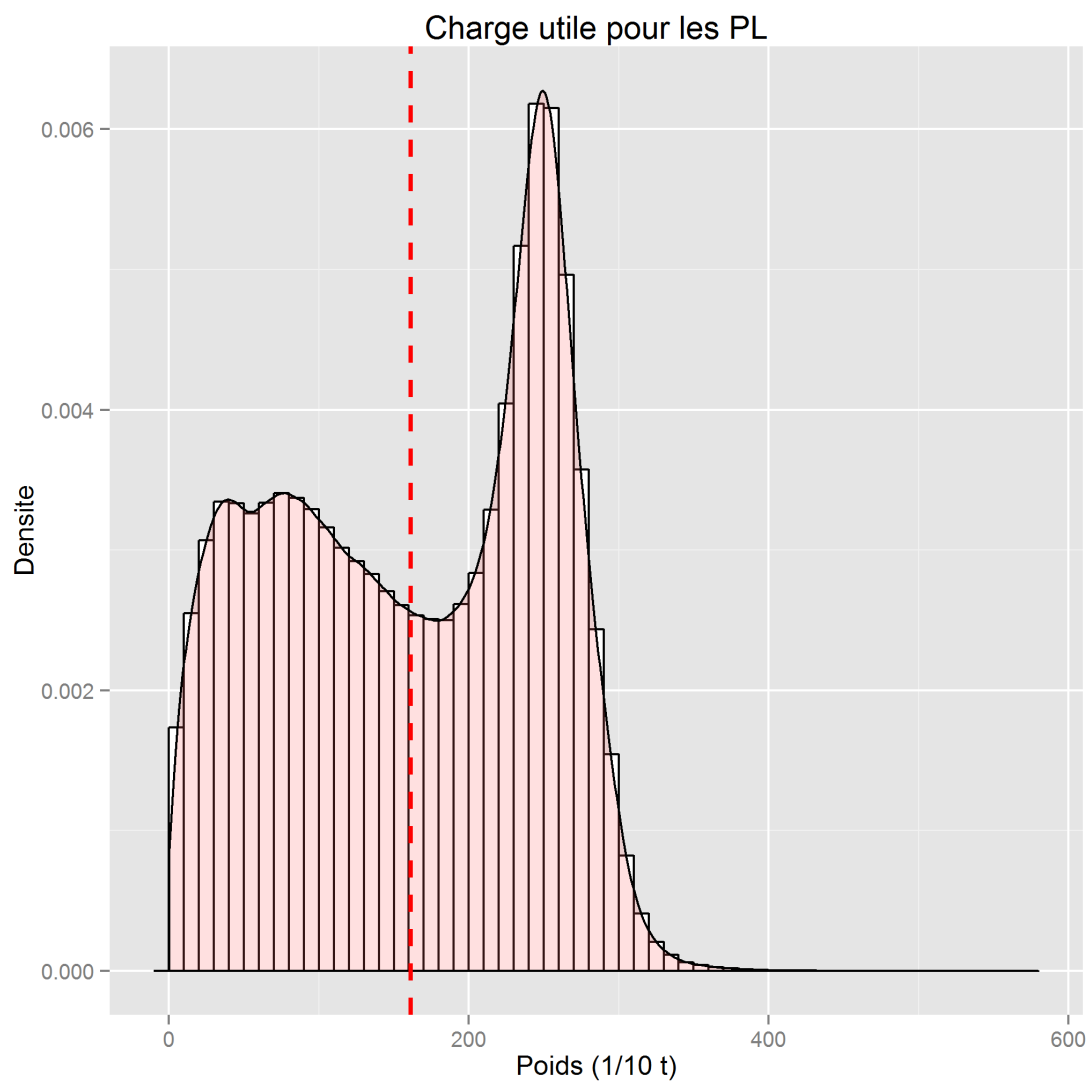


FIGURE 14 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 13 de l'échantillon utilisé.

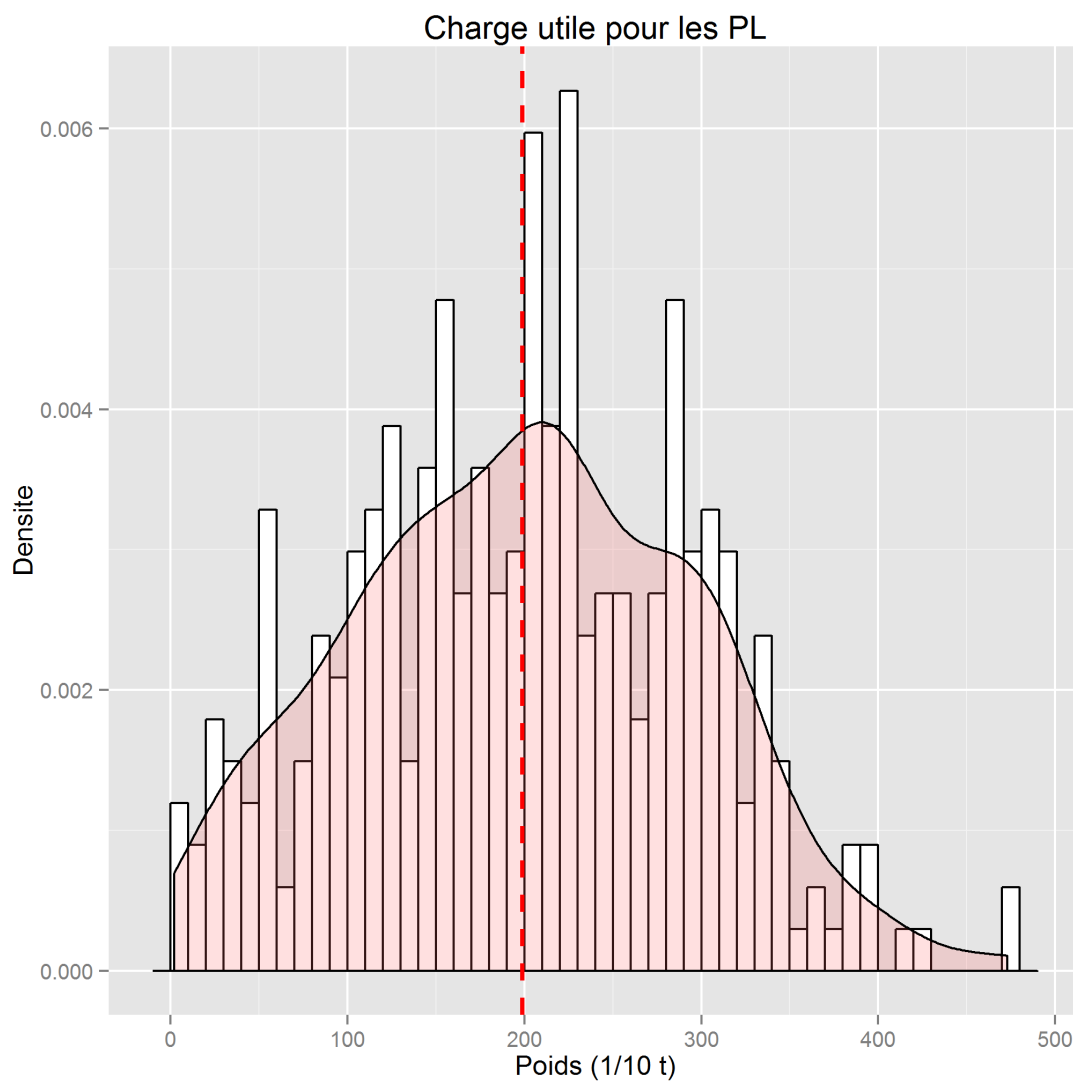


FIGURE 15 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 14a de l'échantillon utilisé.

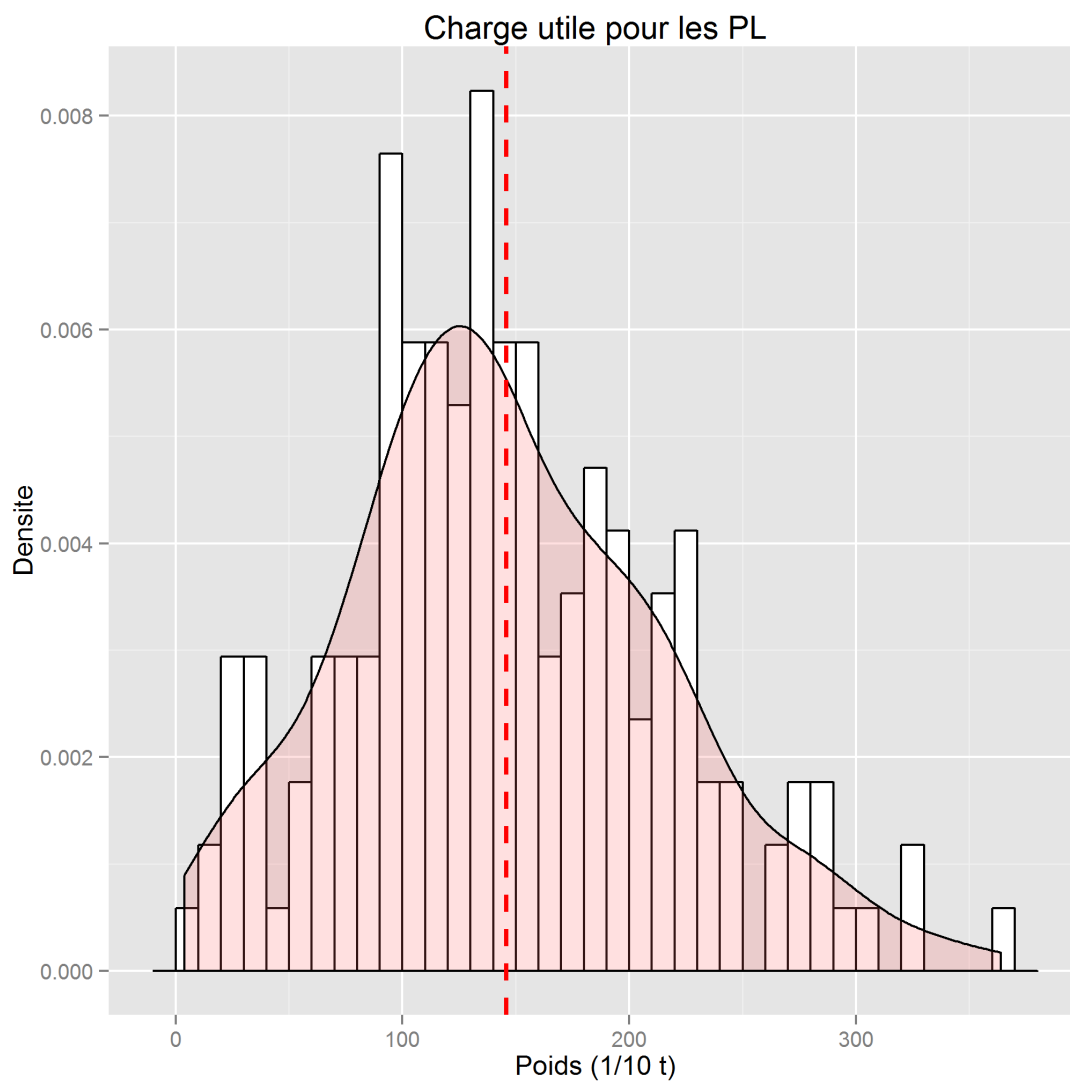


FIGURE 16 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 14b de l'échantillon utilisé.

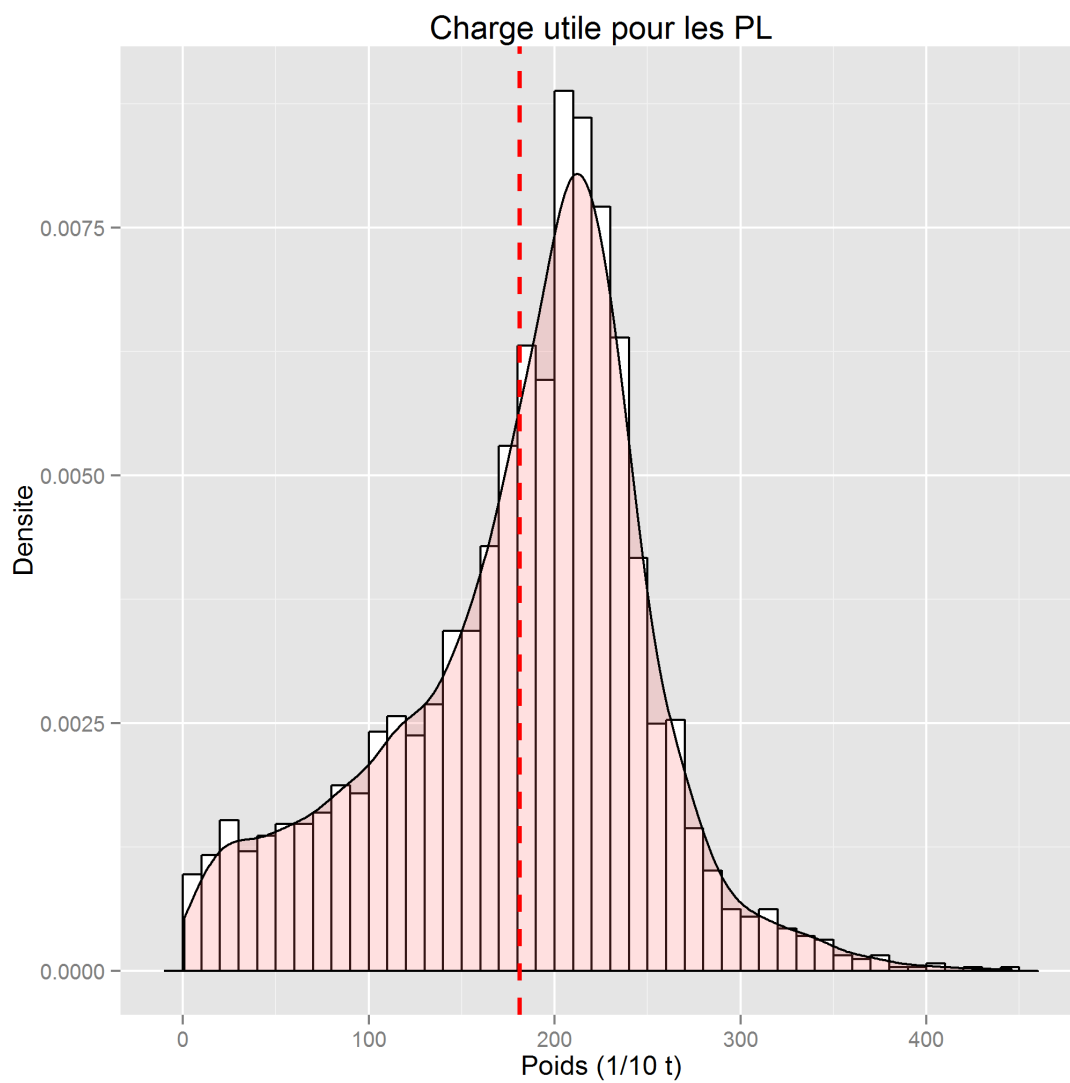


FIGURE 17 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 15a de l'échantillon utilisé.

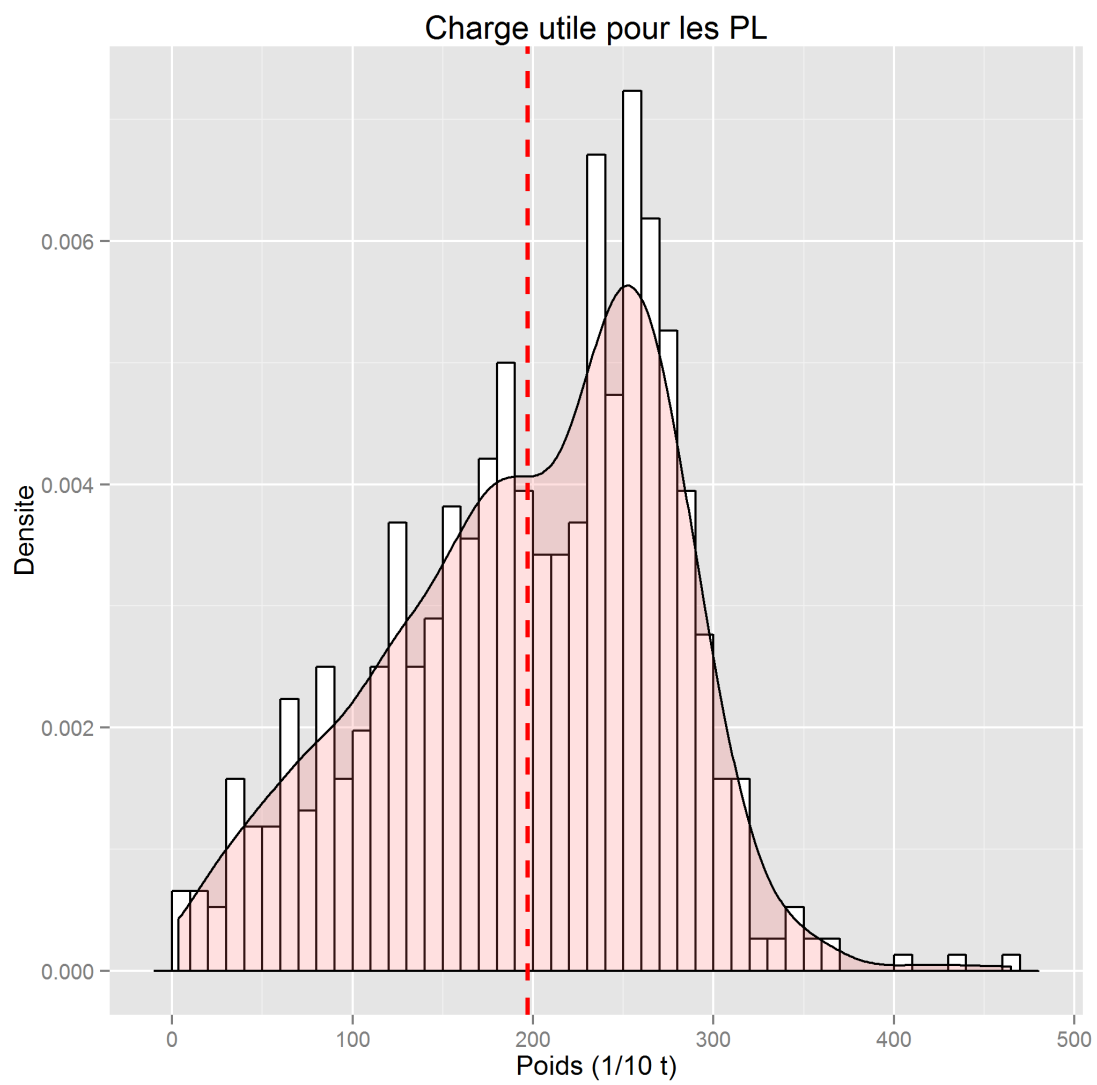


FIGURE 18 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 15b de l'échantillon utilisé.

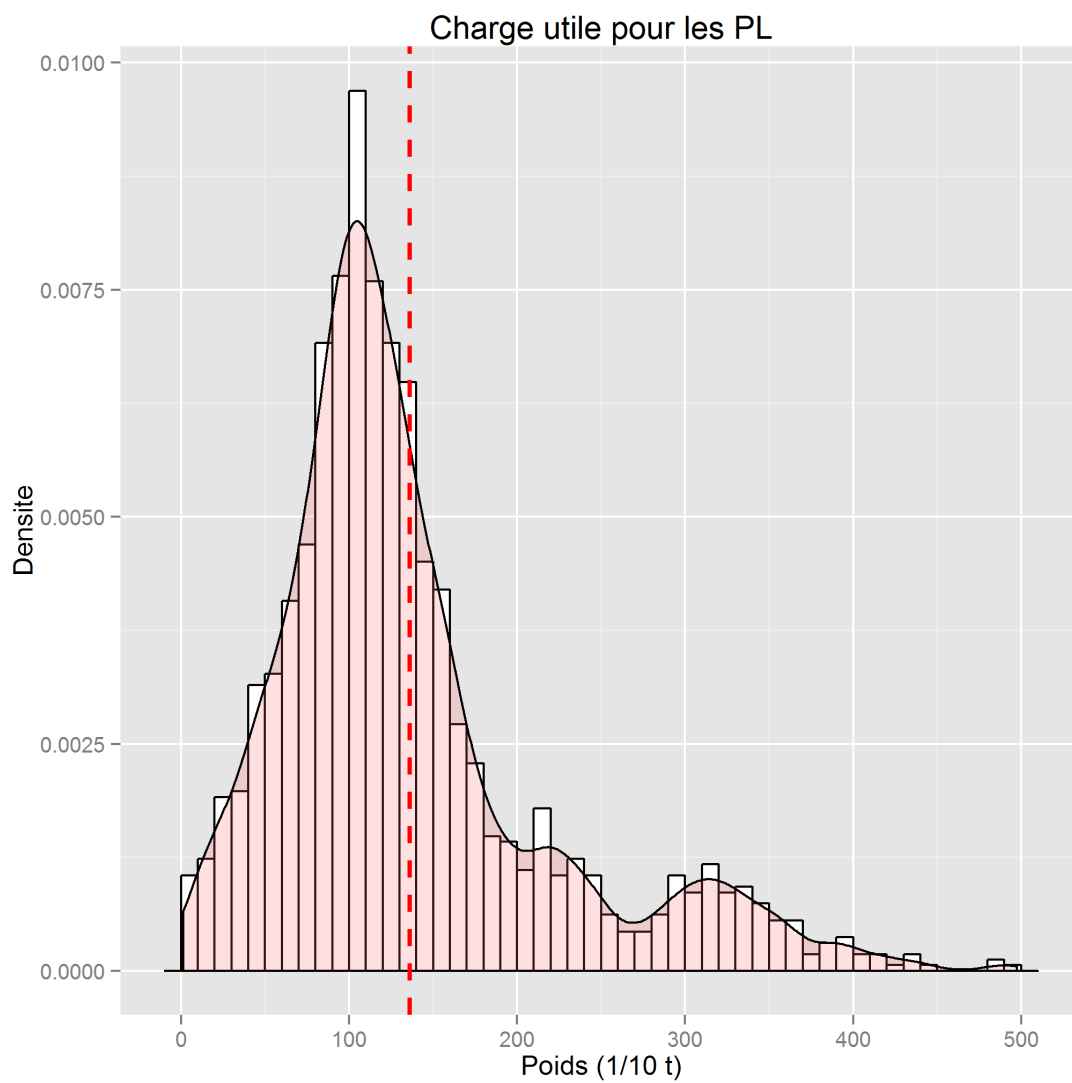


FIGURE 19 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 16 de l'échantillon utilisé.

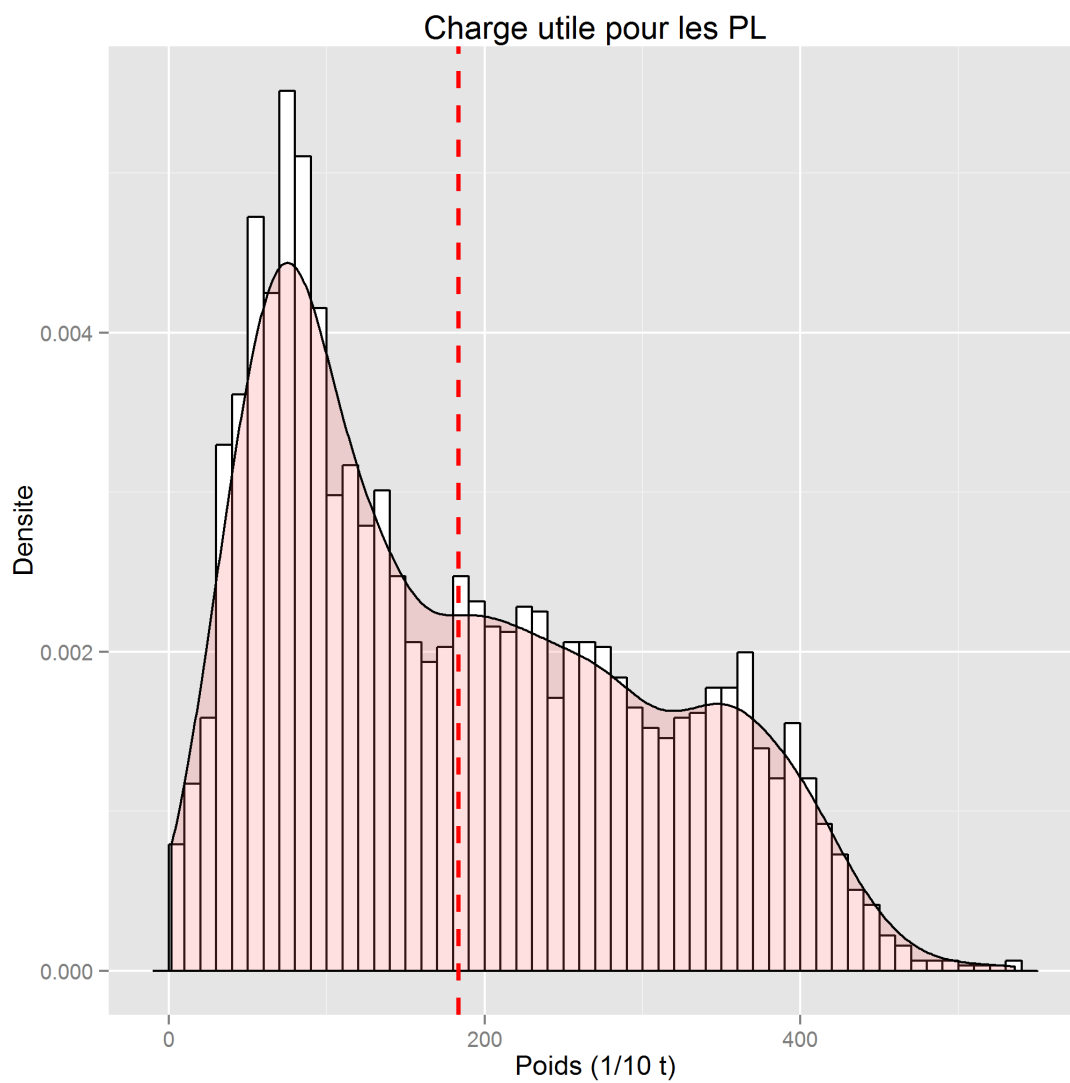


FIGURE 20 – Distribution statistique de la charge utile pour les poids lourds de silhouette 17 de l'échantillon utilisé.

Annexe B

Distribution de la position du centre de gravité pour les différentes silhouettes

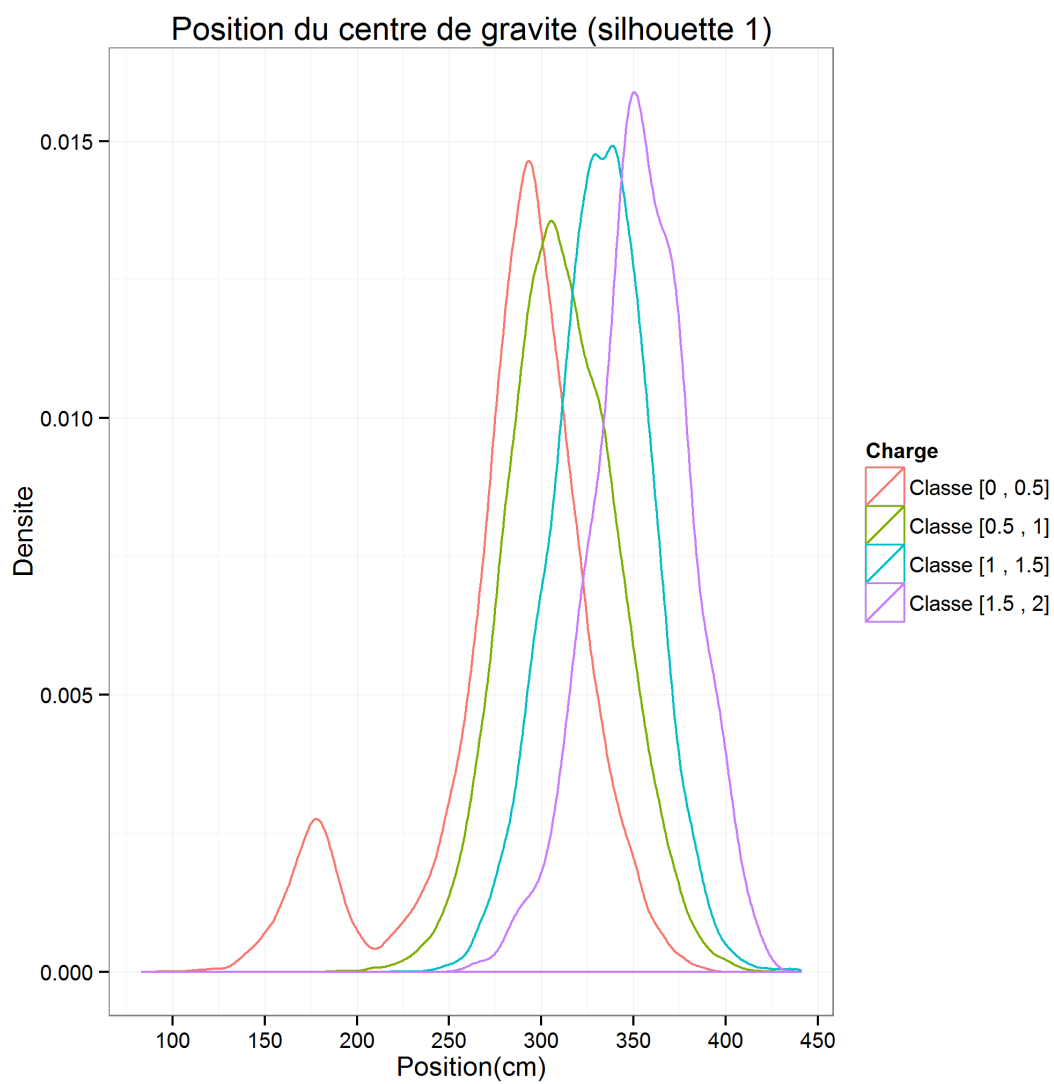


FIGURE 21 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 1, par tranches de 5t de charge utile.

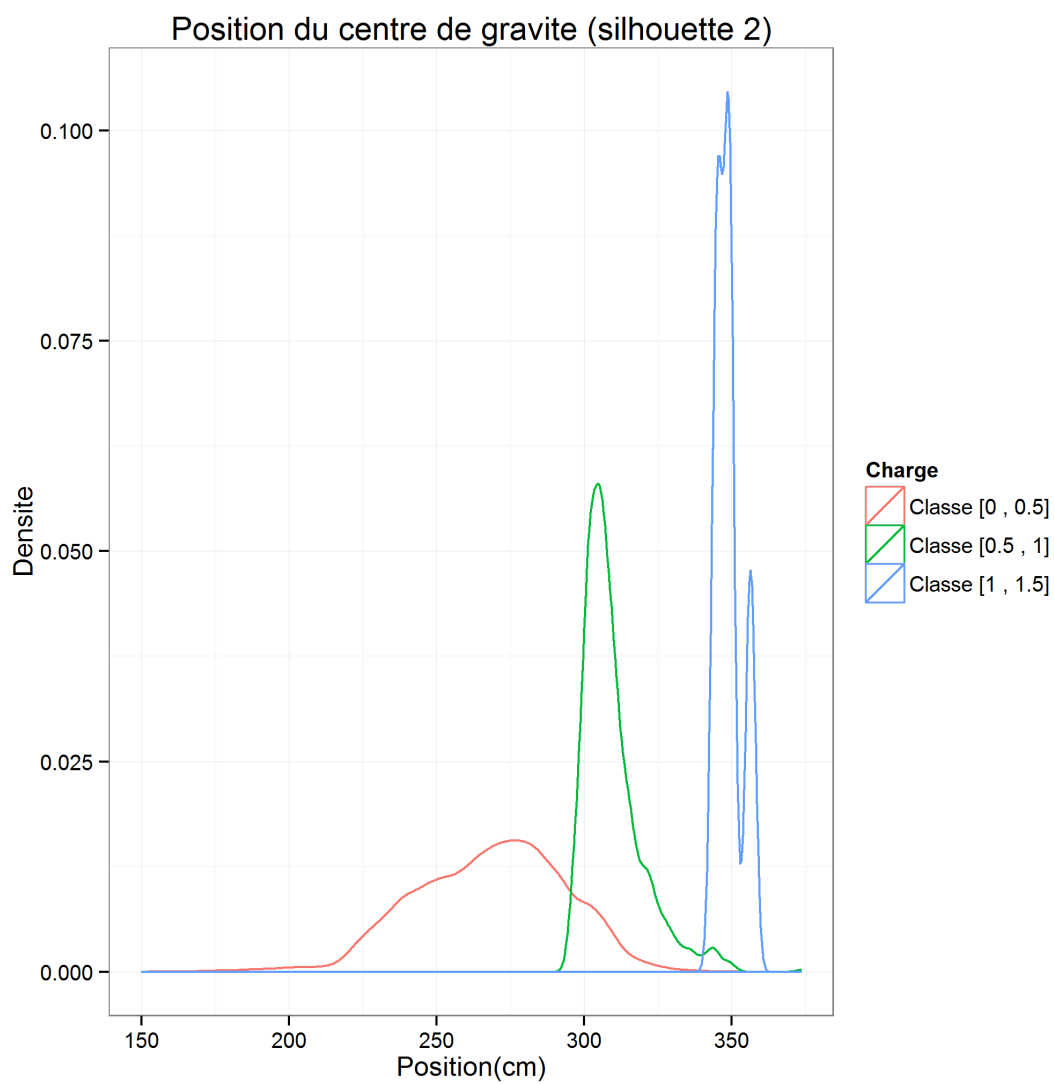


FIGURE 22 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 2, par tranches de 5t de charge utile.

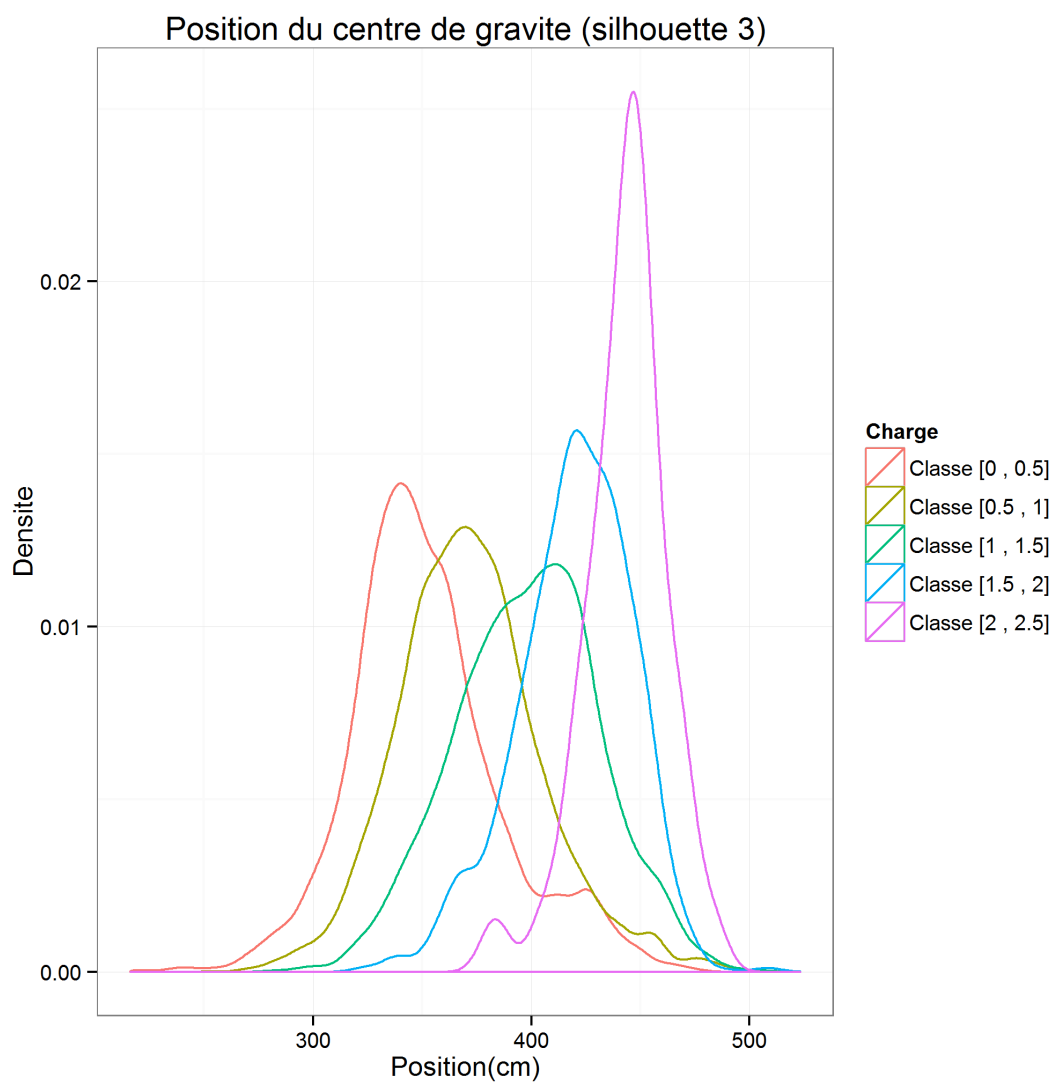


FIGURE 23 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 3, par tranches de 5t de charge utile.

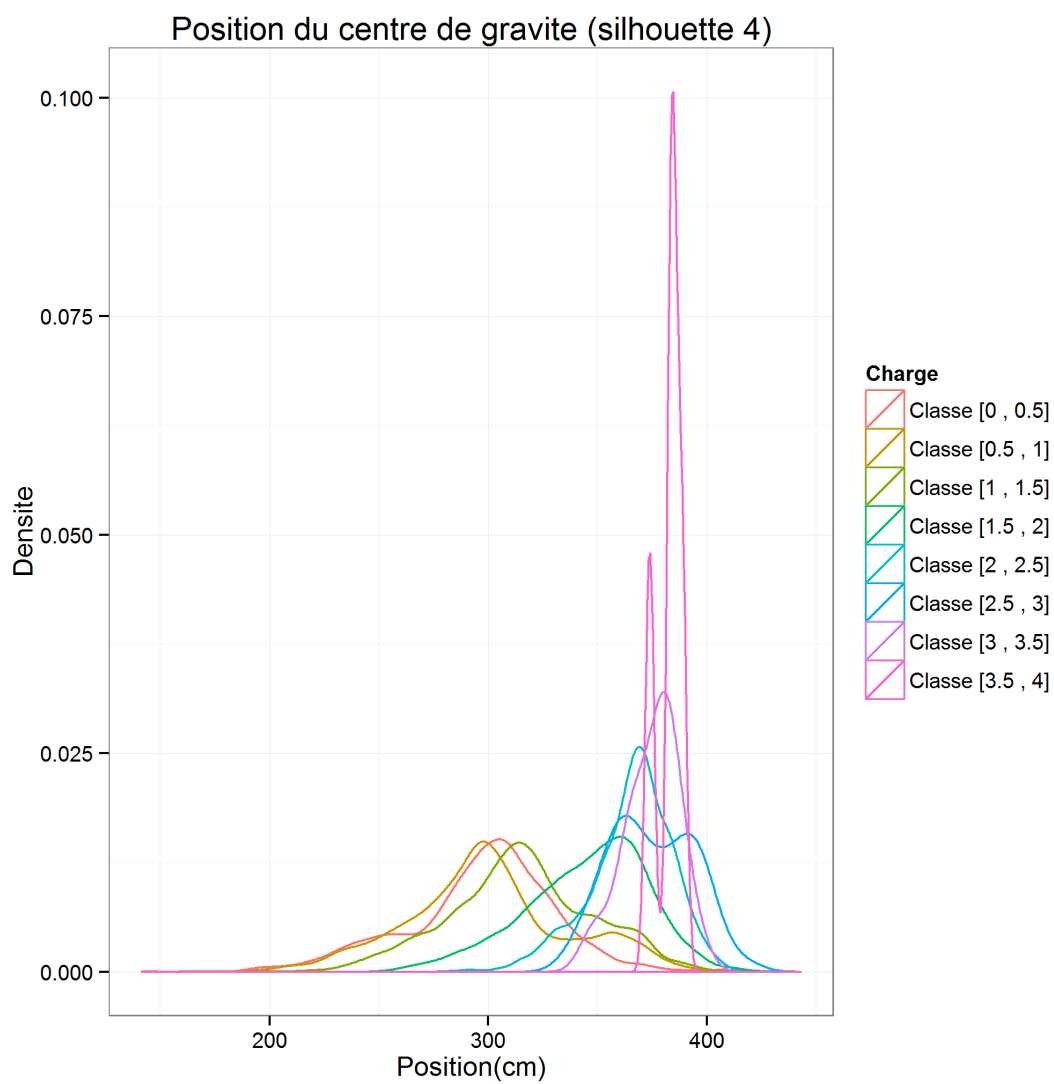


FIGURE 24 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 4, par tranches de 5t de charge utile.

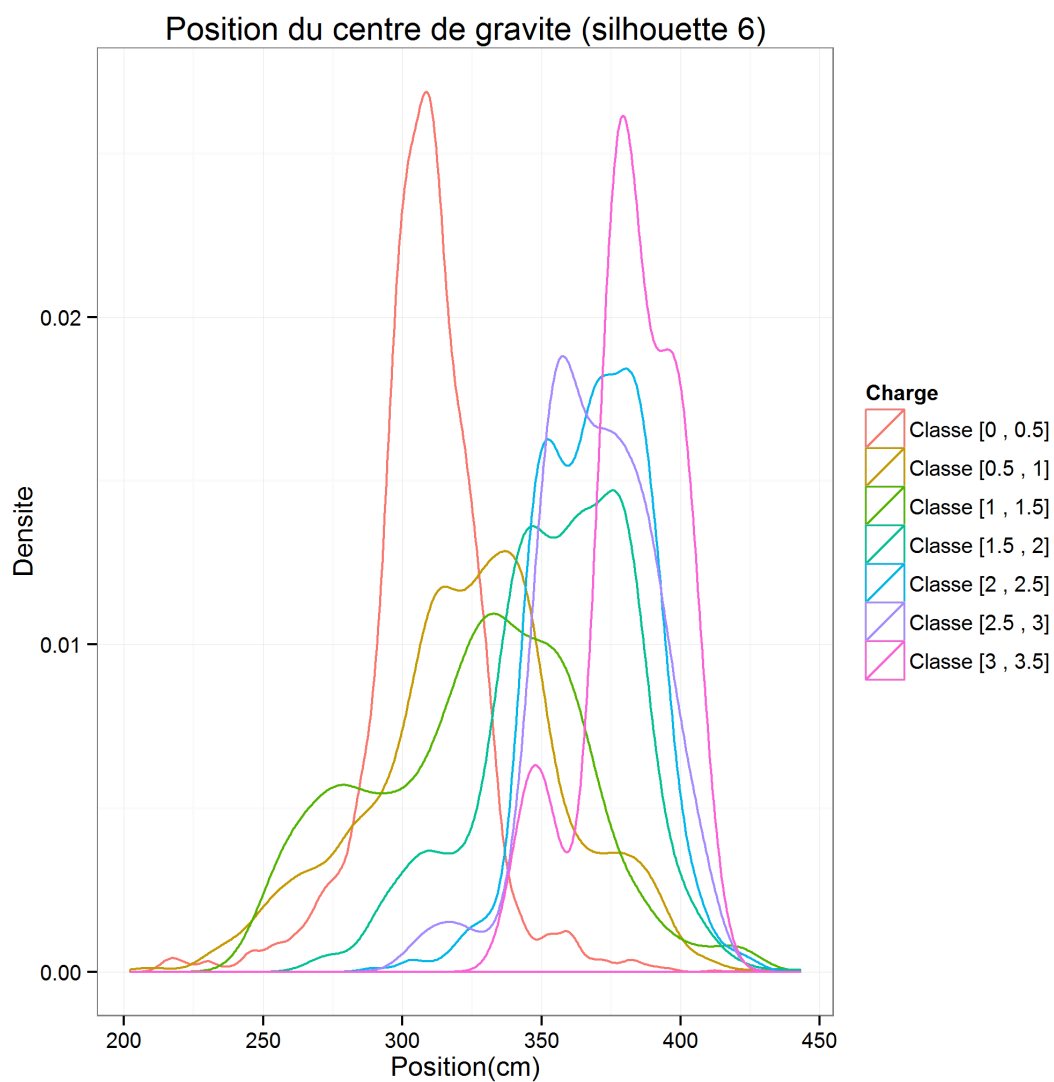


FIGURE 25 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 6, par tranches de 5t de charge utile.

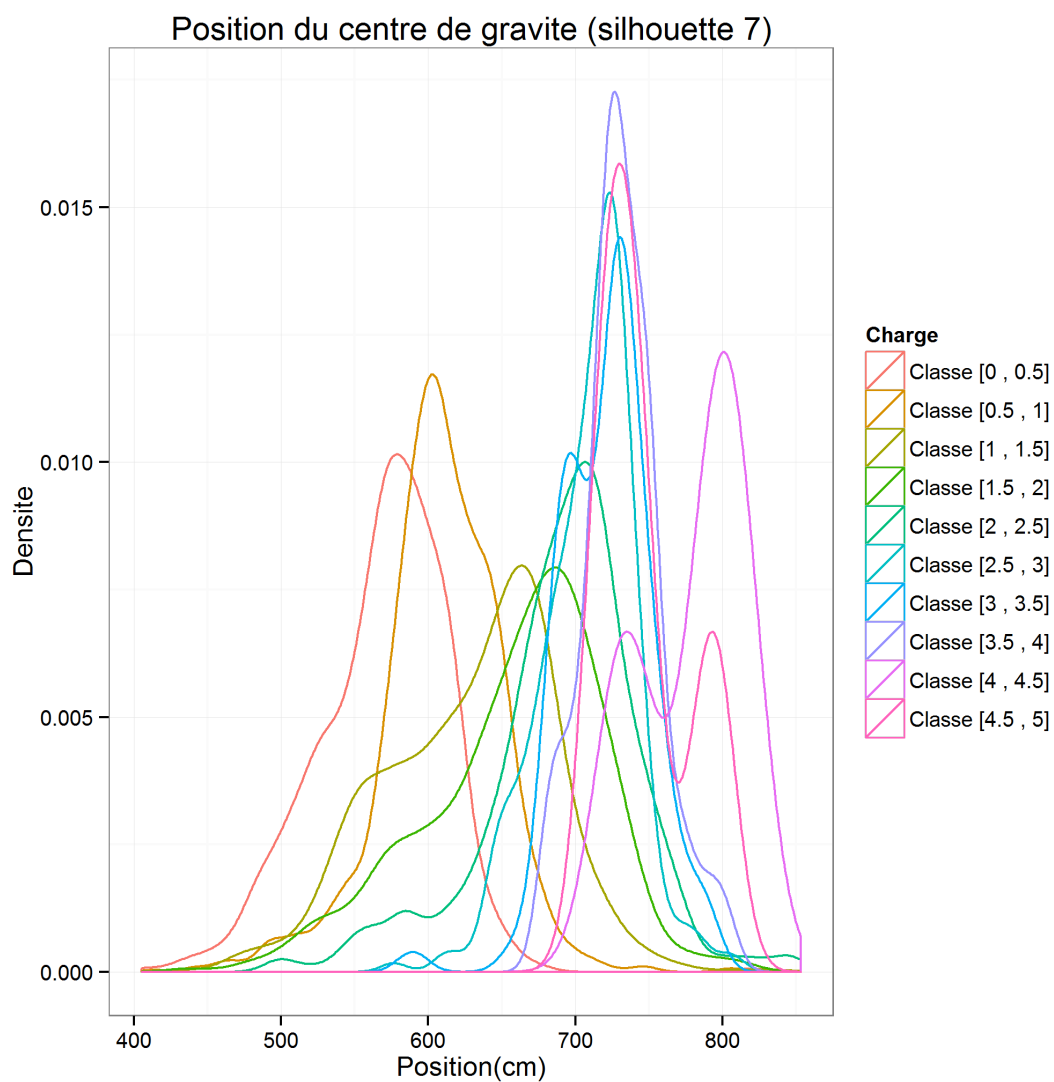


FIGURE 26 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 7, par tranches de 5t de charge utile.

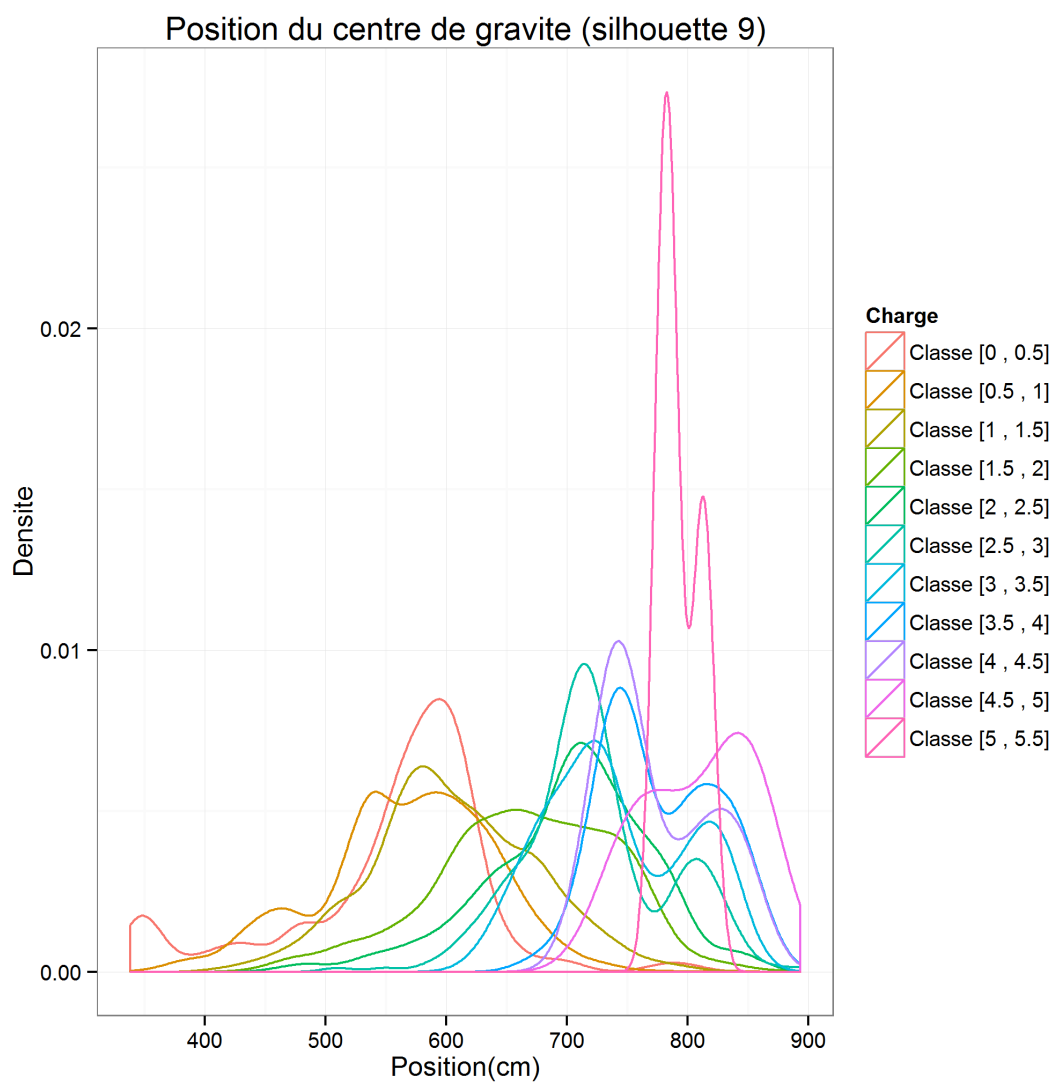


FIGURE 27 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 9, par tranches de 5t de charge utile.

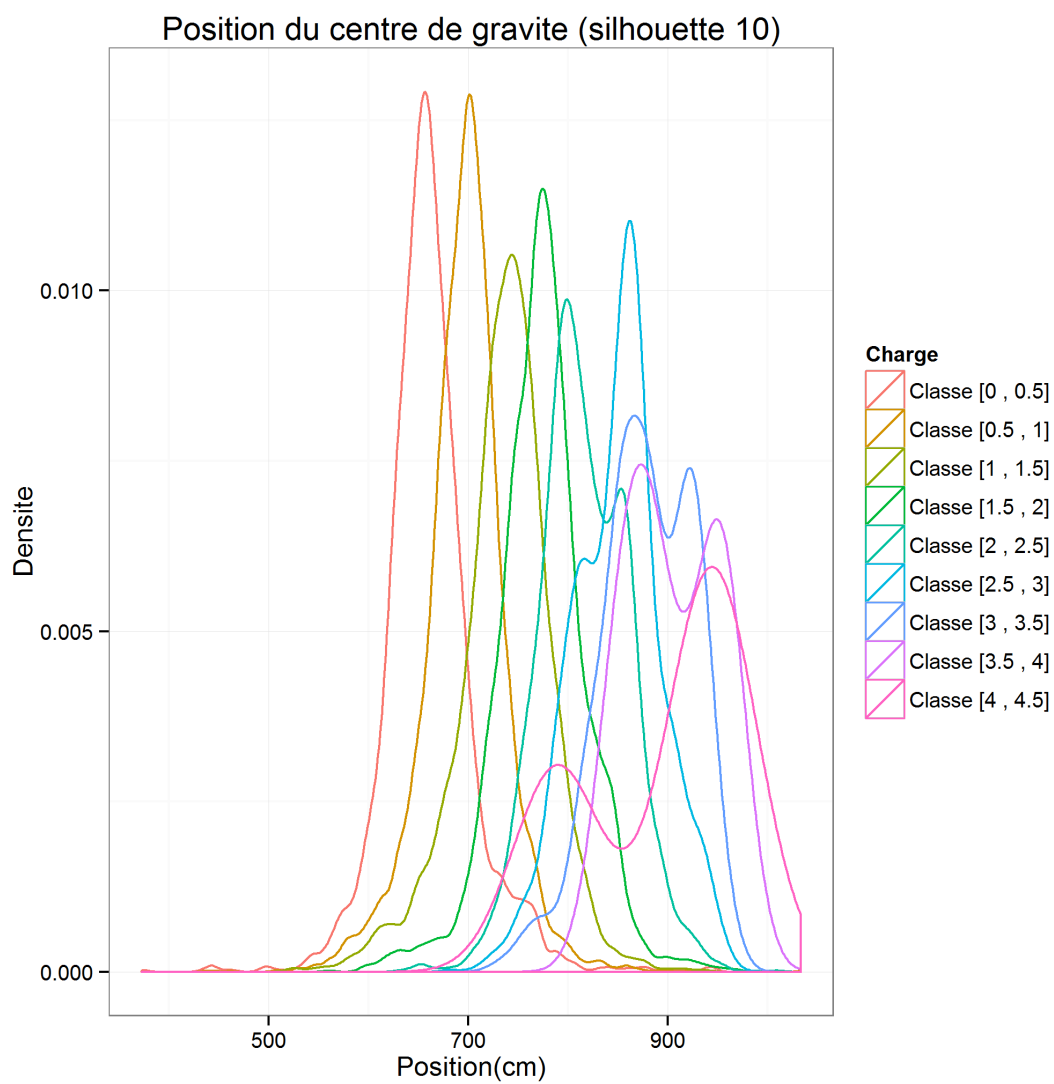


FIGURE 28 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 10, par tranches de 5t de charge utile.

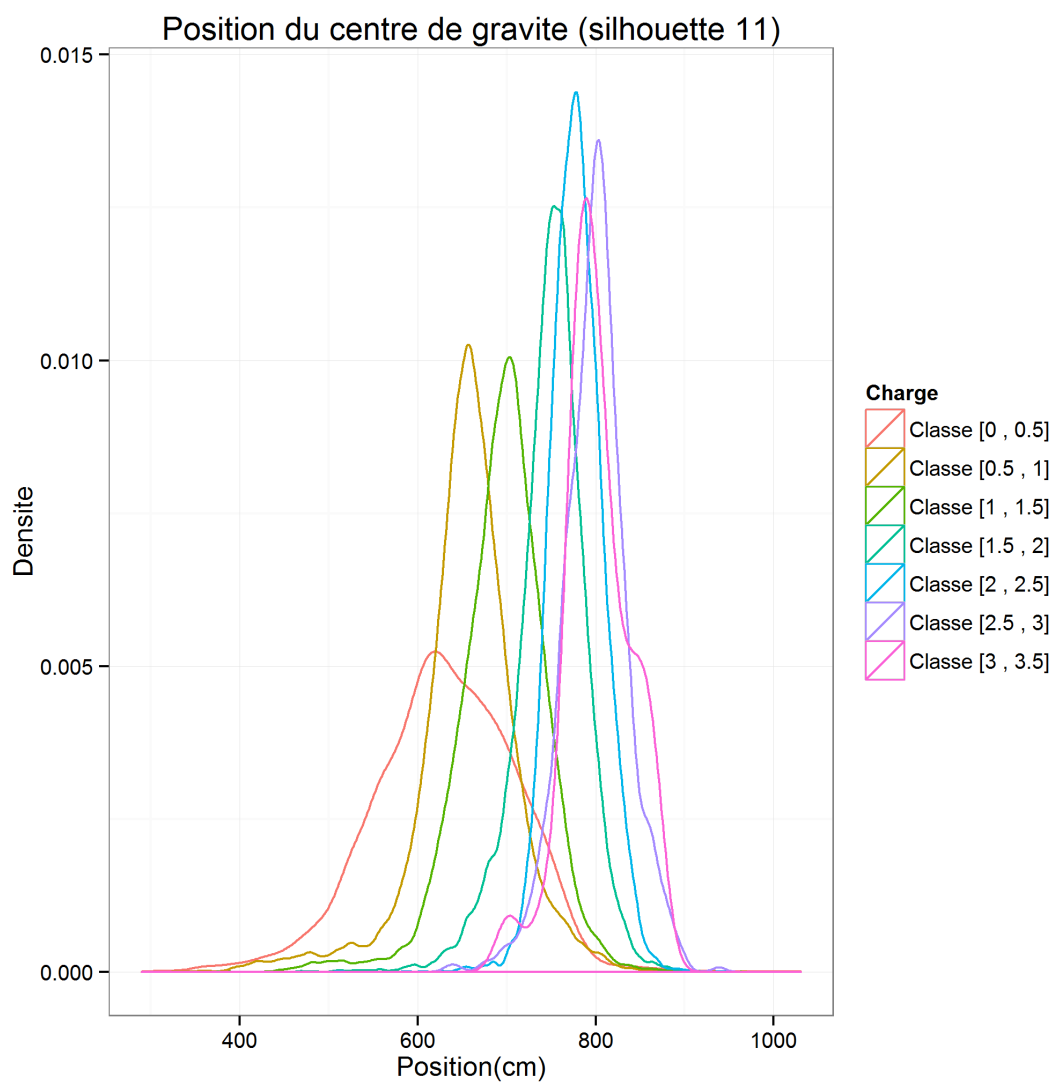


FIGURE 29 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 11, par tranches de 5t de charge utile.

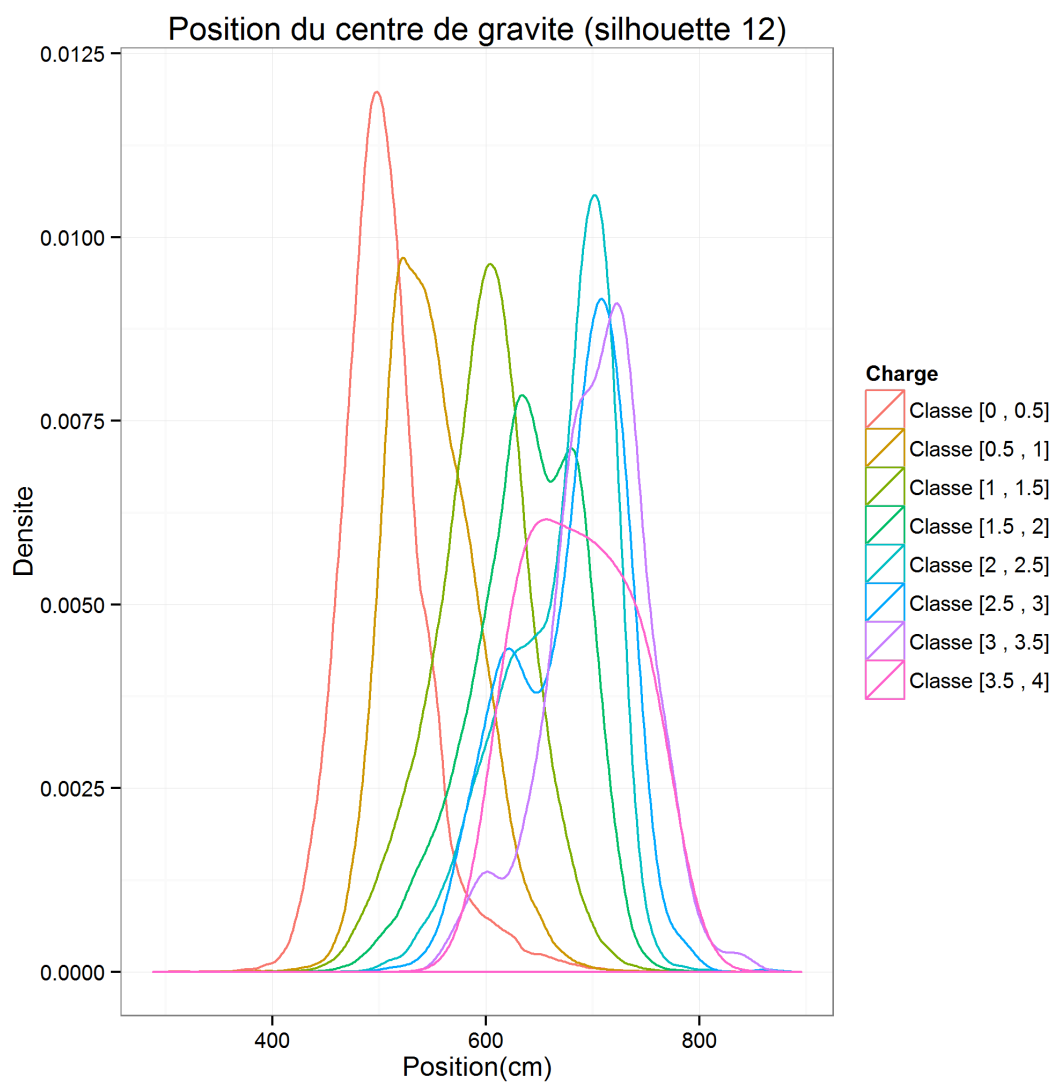


FIGURE 30 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 12, par tranches de 5t de charge utile.

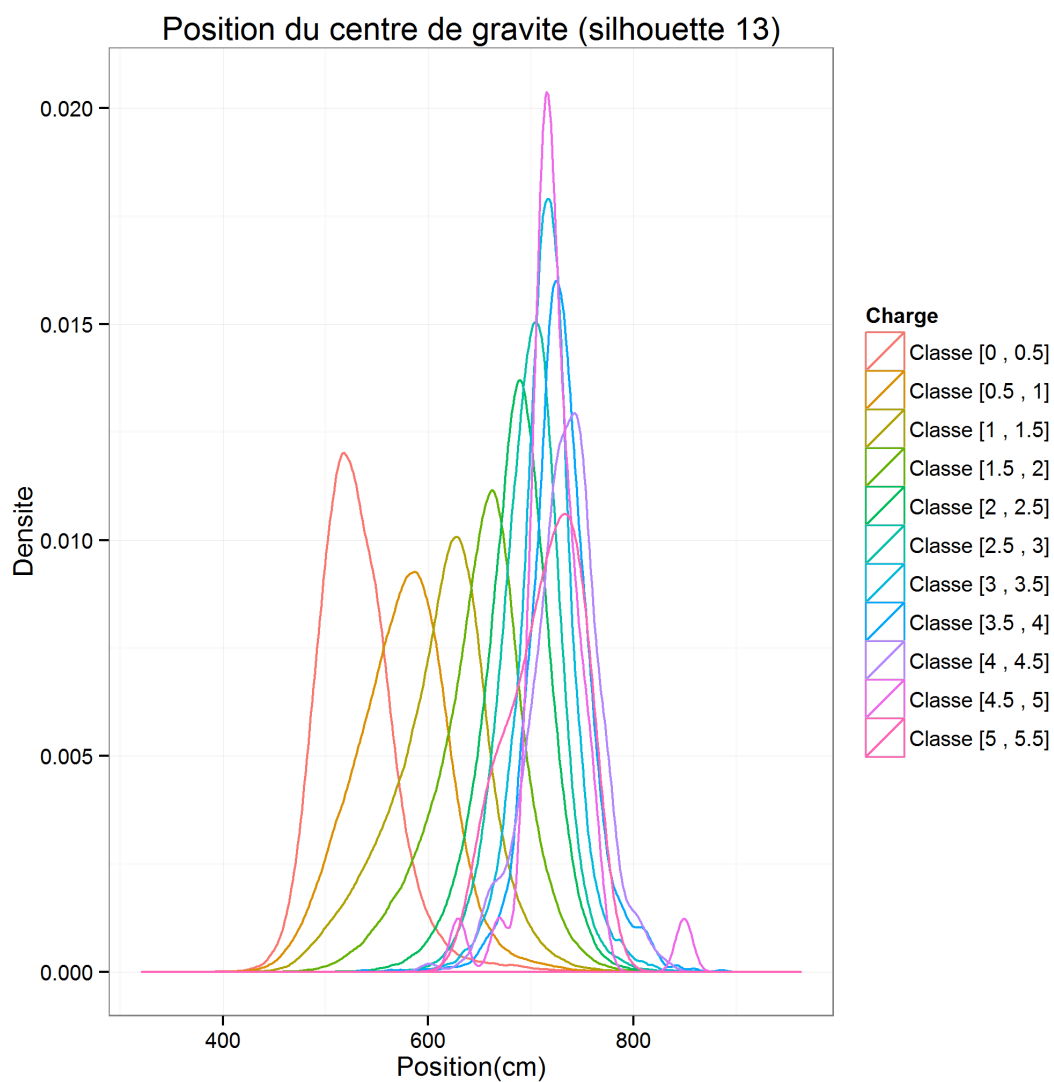


FIGURE 31 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 13, par tranches de 5t de charge utile.

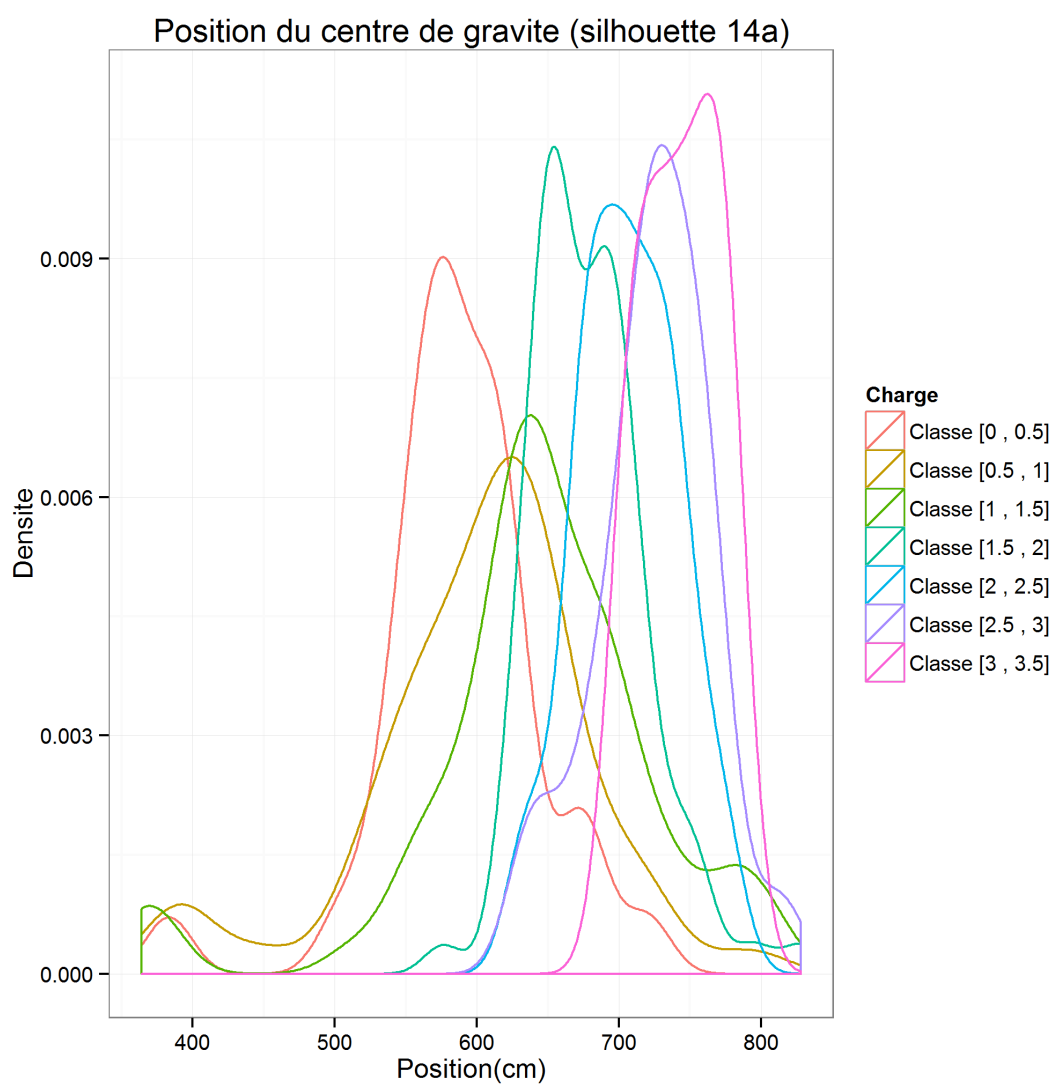


FIGURE 32 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 14a, par tranches de 5t de charge utile.

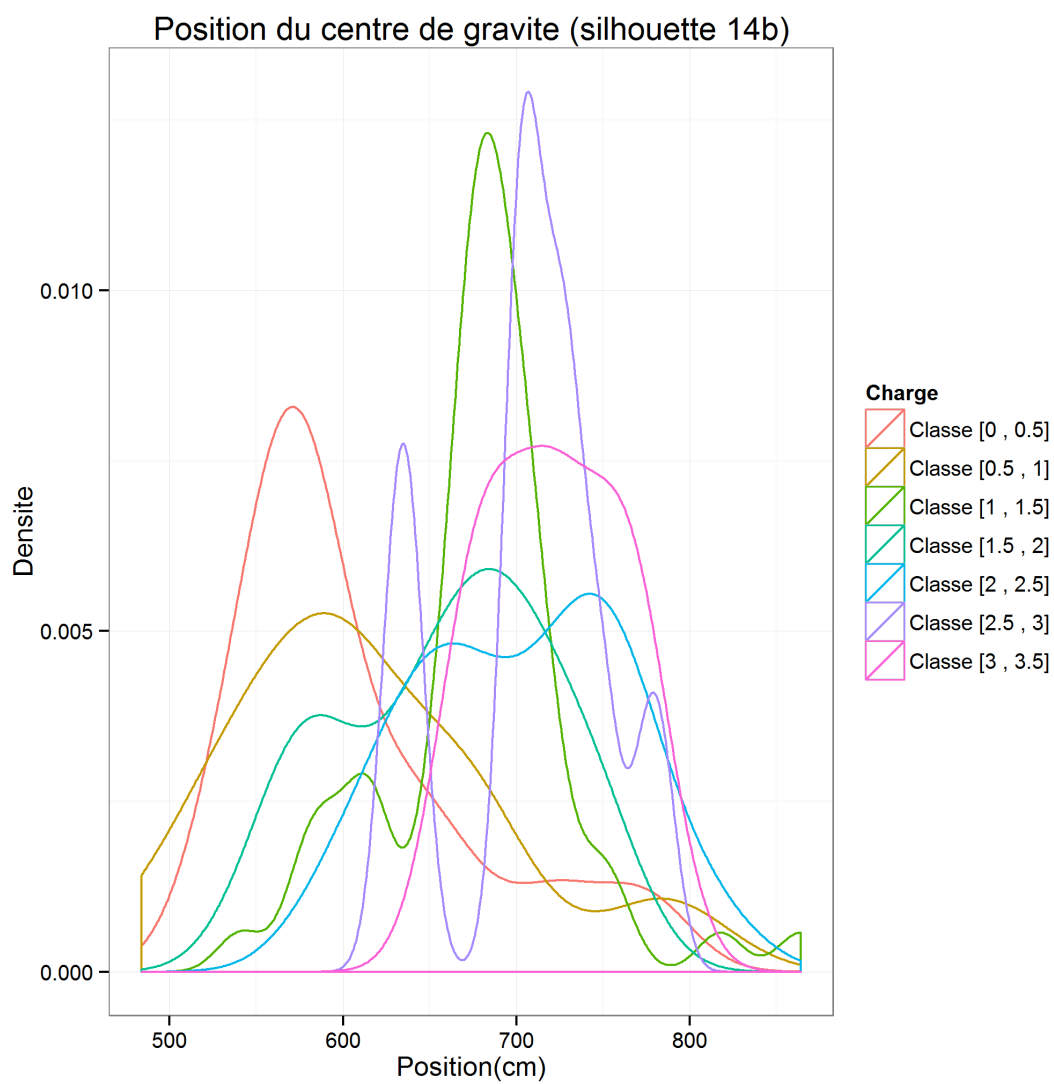


FIGURE 33 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 14b, par tranches de 5t de charge utile.

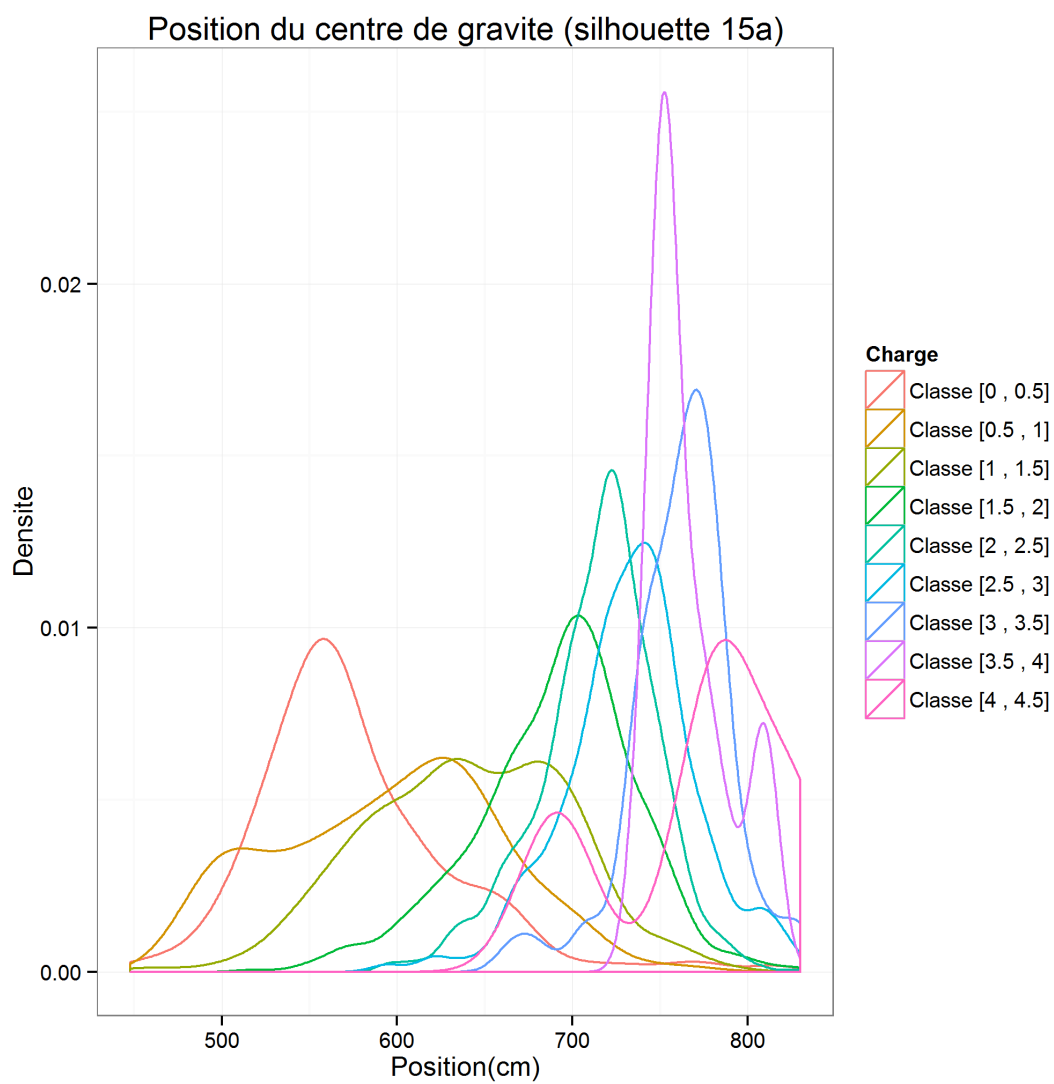


FIGURE 34 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 15a, par tranches de 5t de charge utile.

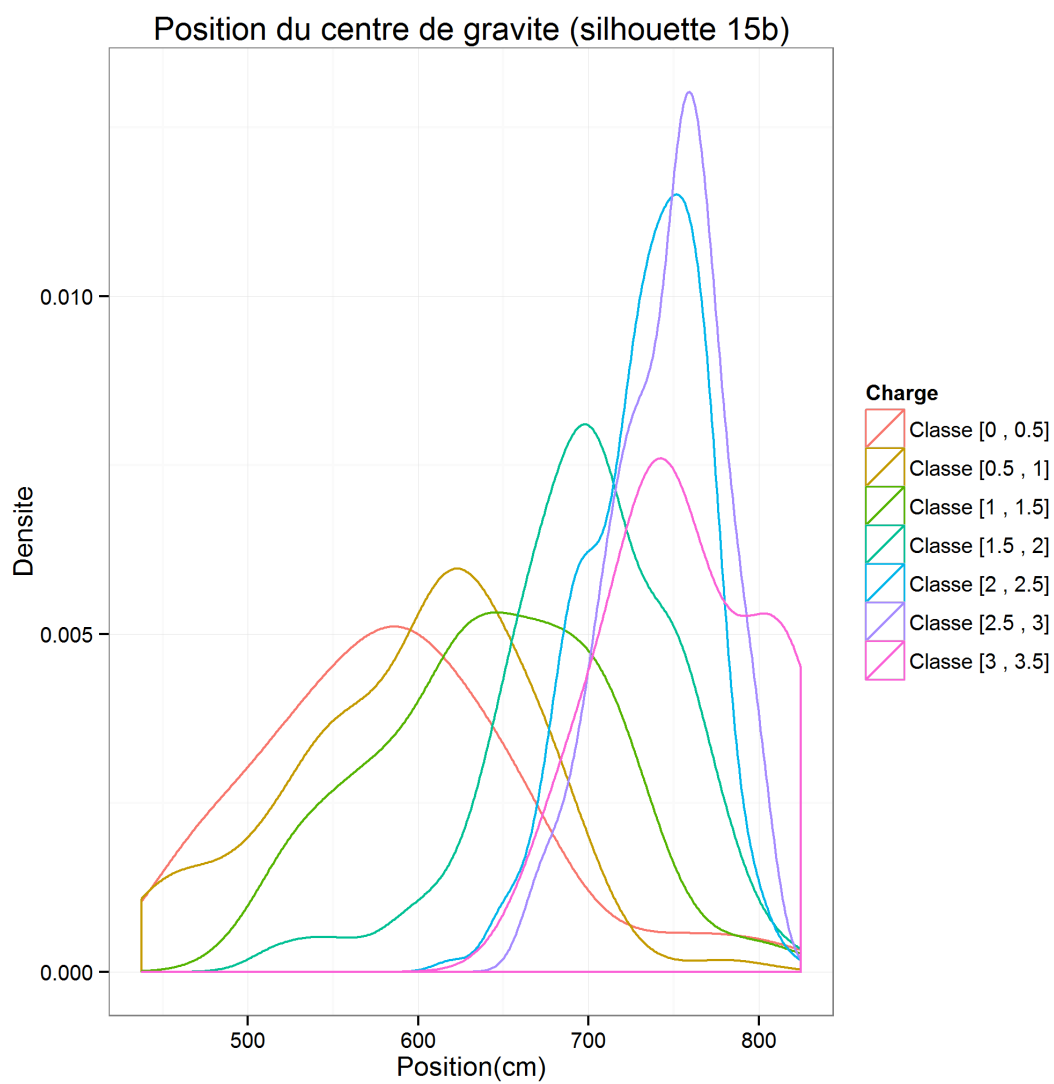


FIGURE 35 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 15b, par tranches de 5t de charge utile.

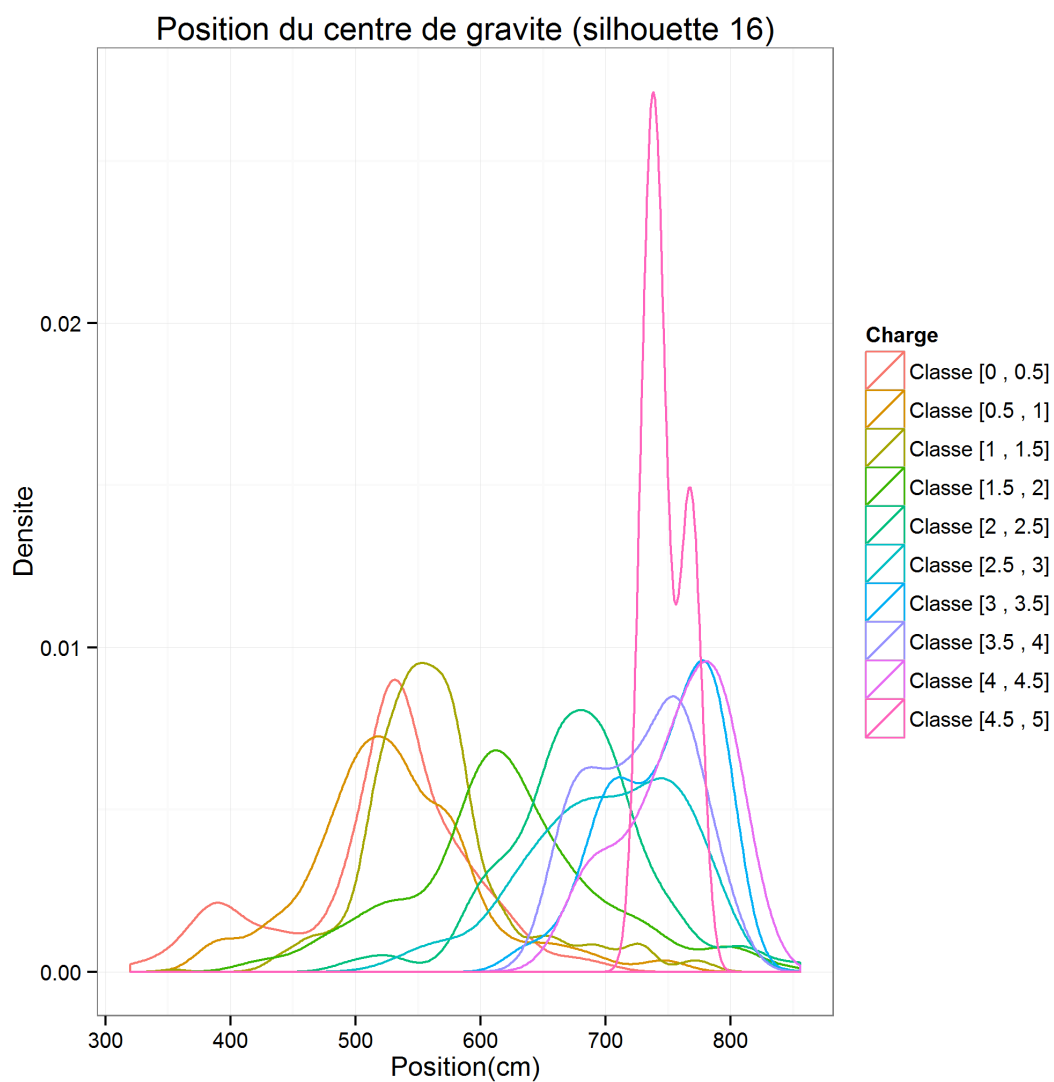


FIGURE 36 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 16, par tranches de 5t de charge utile.

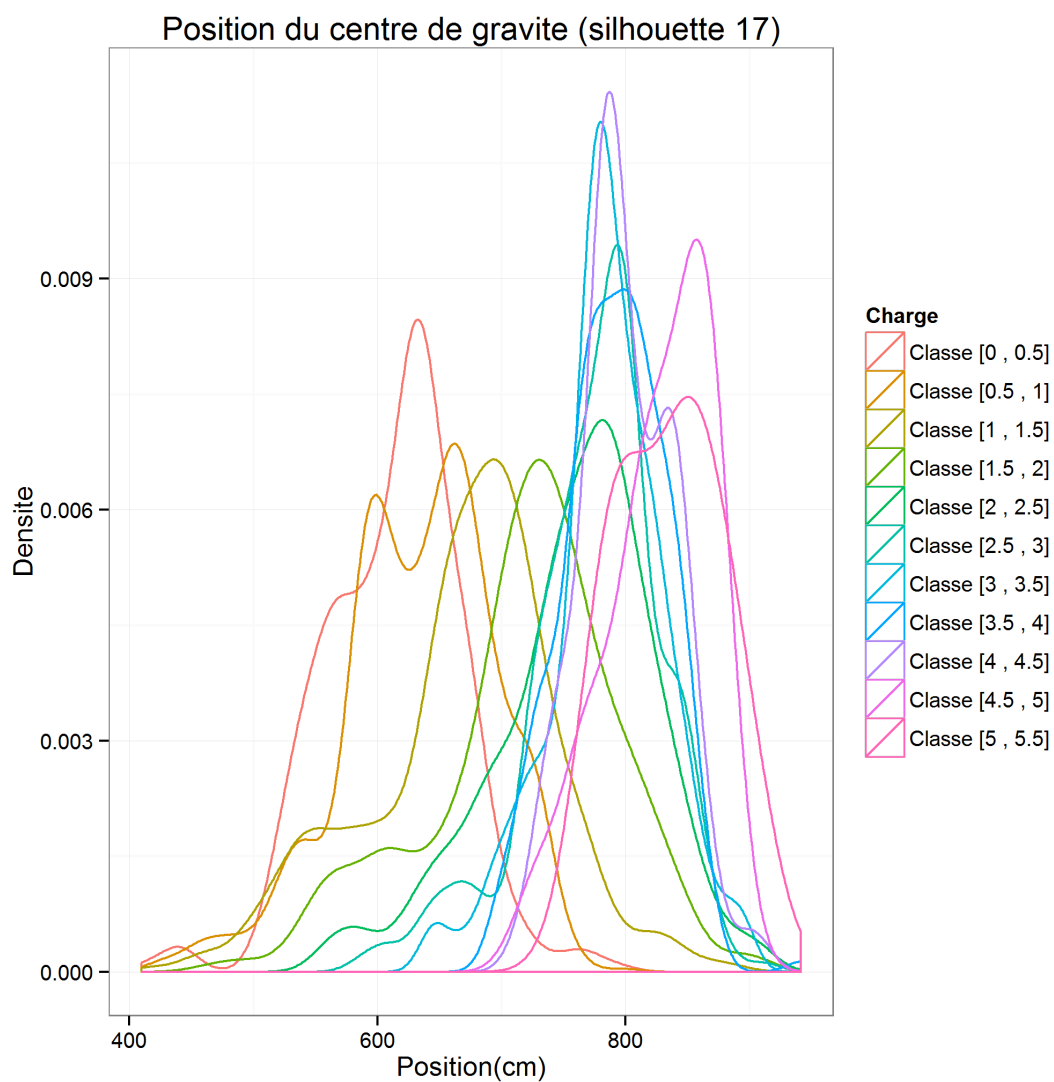


FIGURE 37 – Distribution statistique de la position du centre de gravité, pour les poids lourds de silhouette 17, par tranches de 5t de charge utile.

Annexe C

Modes détectés et densité pour les poids sur essieux des différentes silhouettes

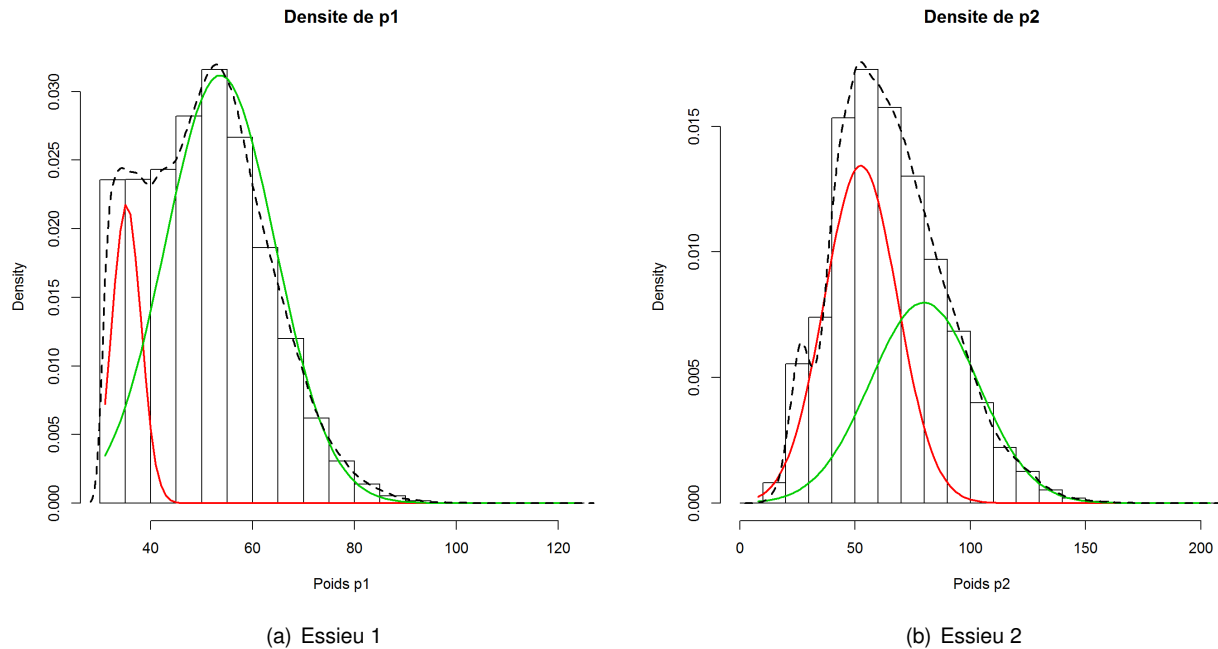
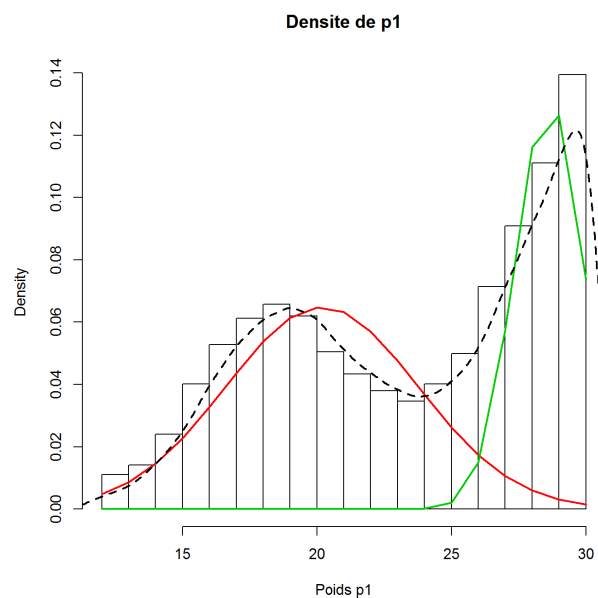
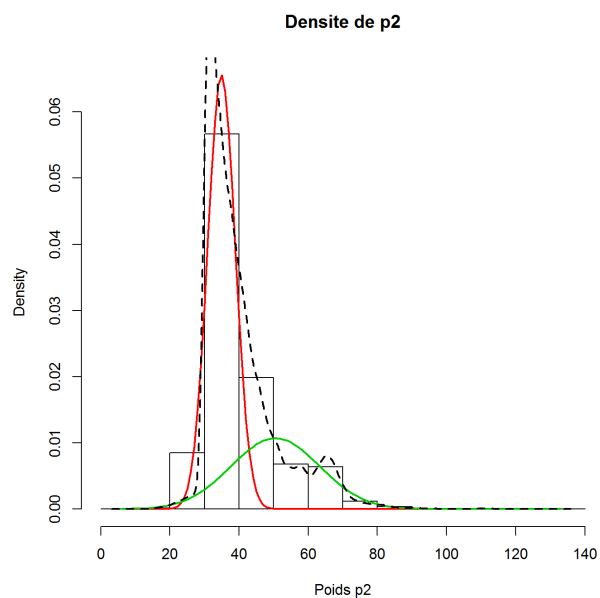


FIGURE 38 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 1.



(a) Essieu 1



(b) Essieu 2

FIGURE 39 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 2.

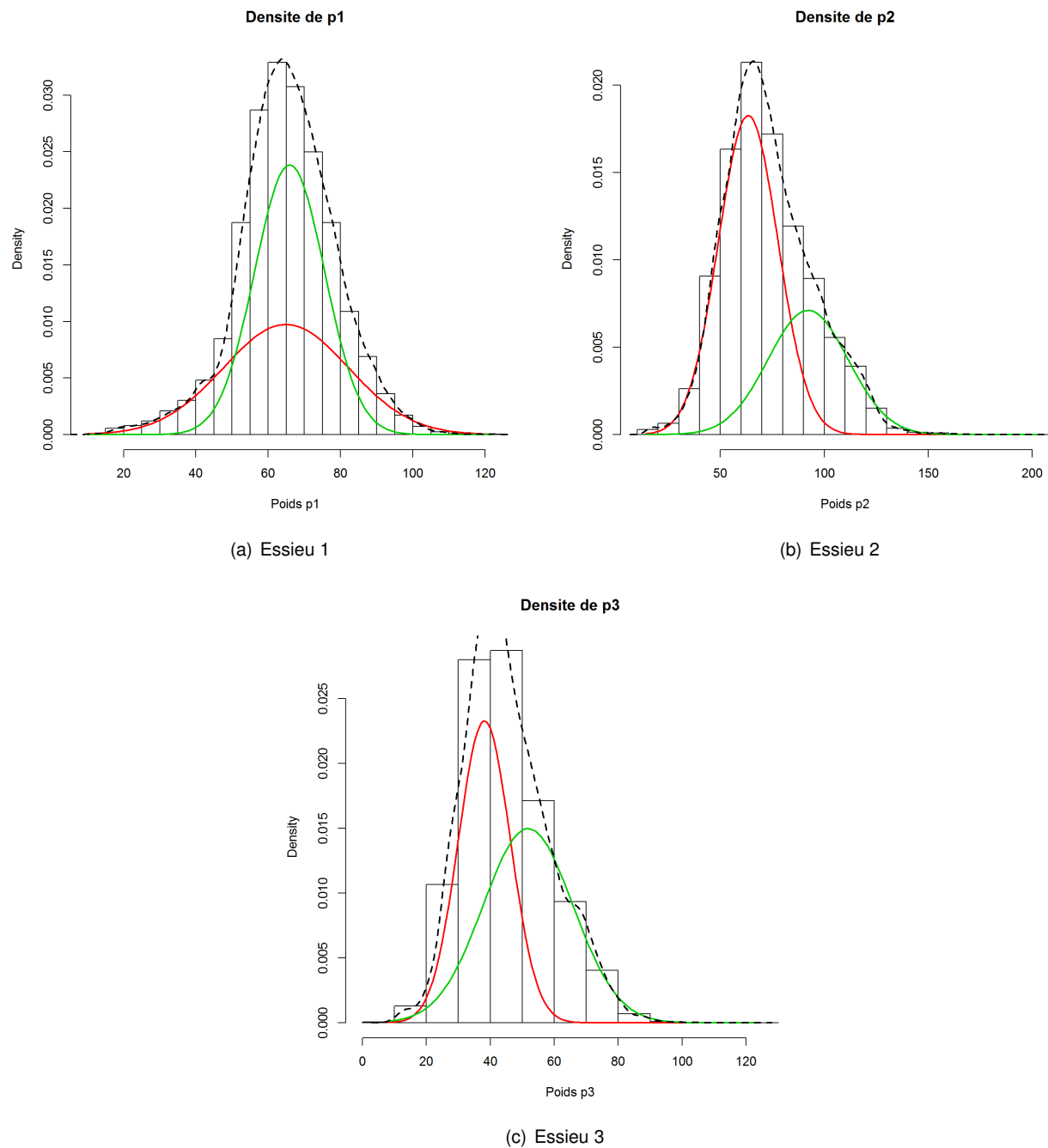
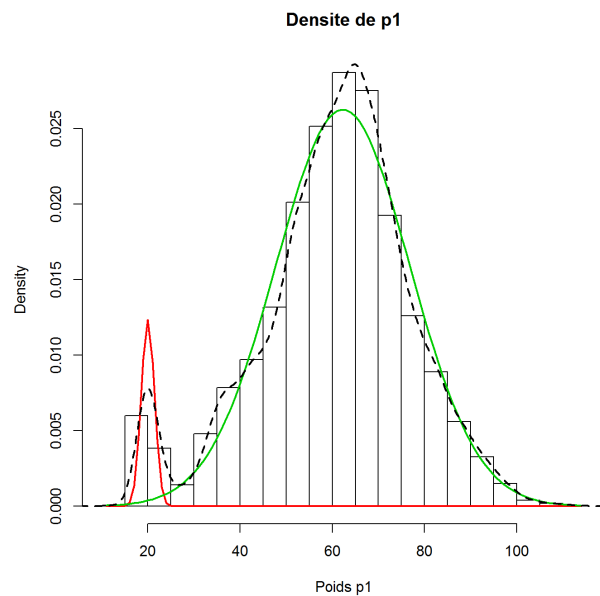
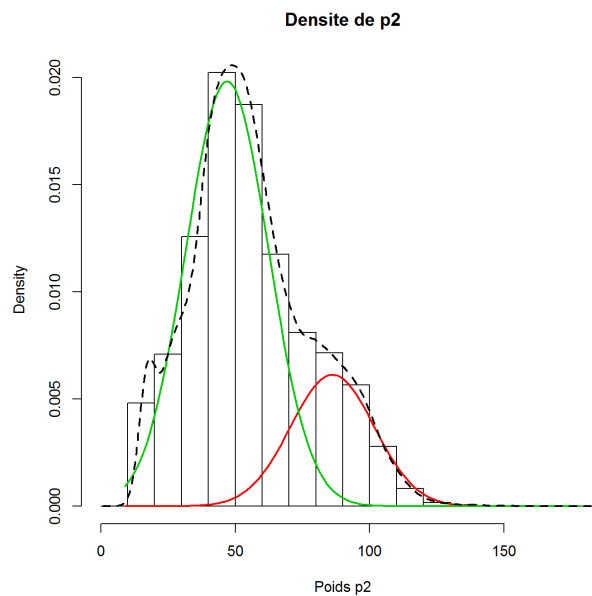


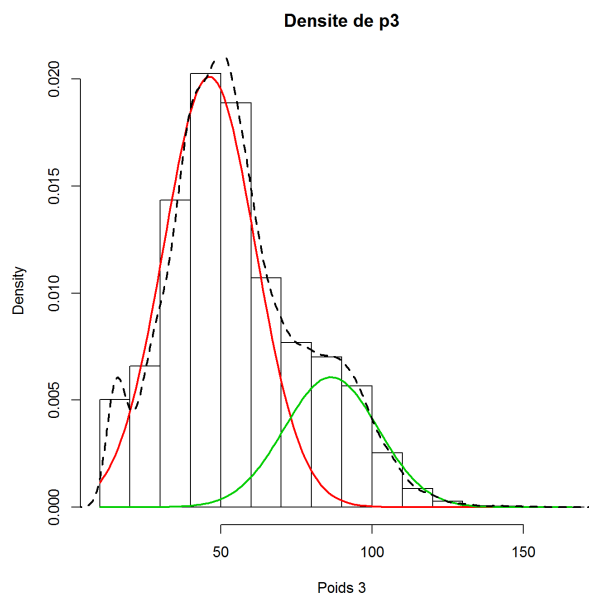
FIGURE 40 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 3.



(a) Essieu 1

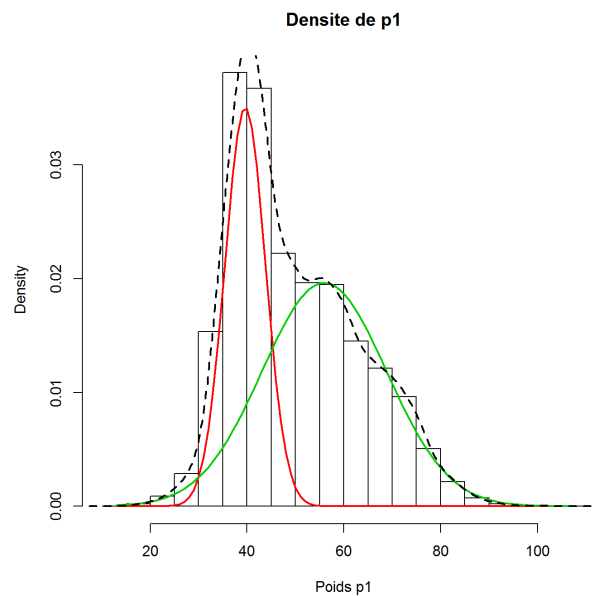


(b) Essieu 2

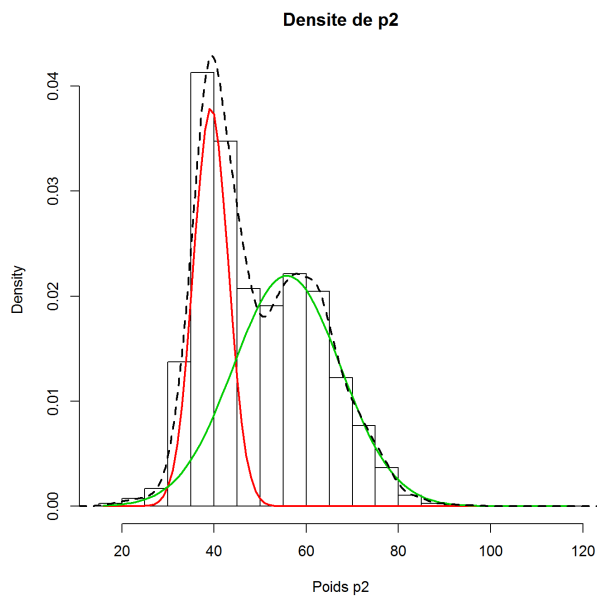


(c) Essieu 3

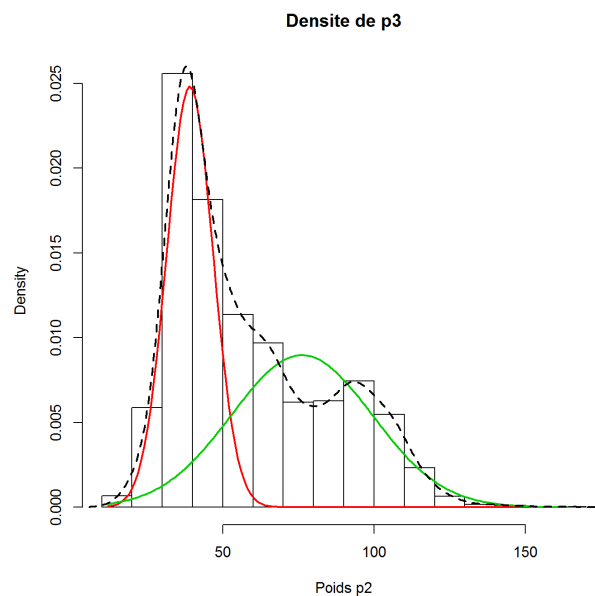
FIGURE 41 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 4.



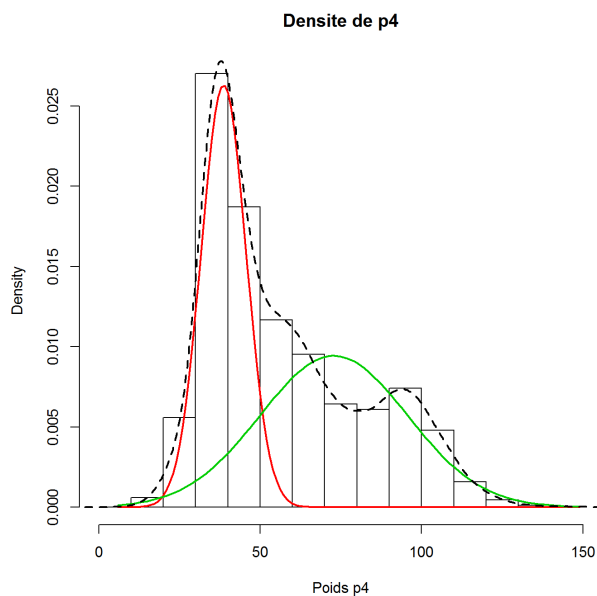
(a) Essieu 1



(b) Essieu 2

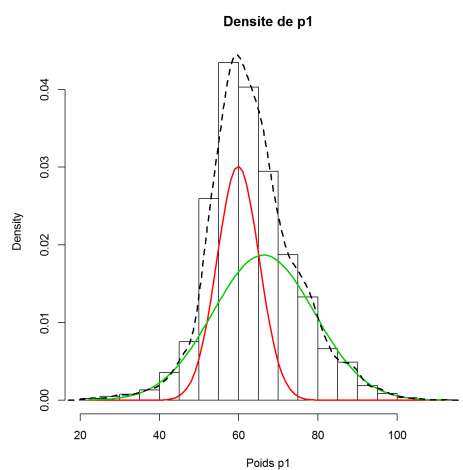


(c) Essieu 3

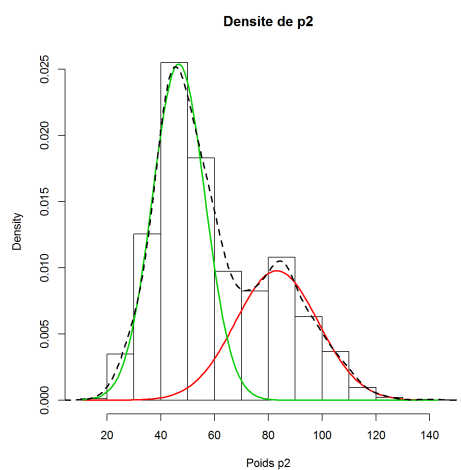


(d) Essieu 4

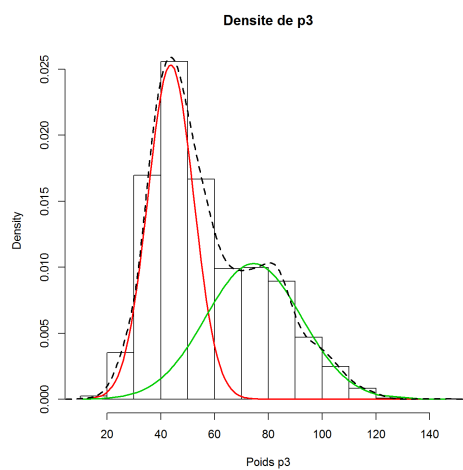
FIGURE 42 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 6.



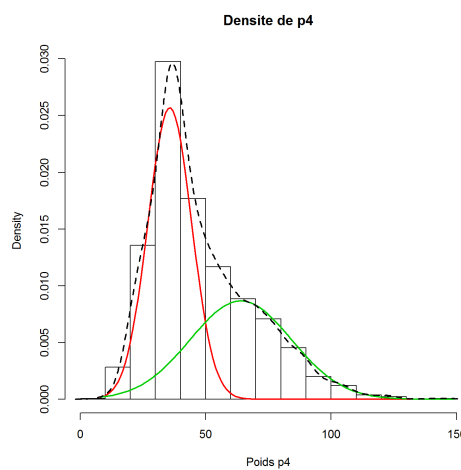
(a) Essieu 1



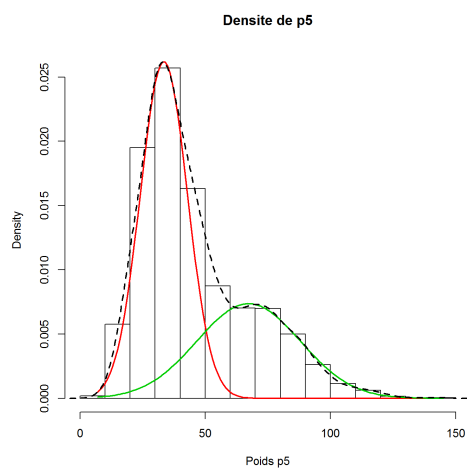
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

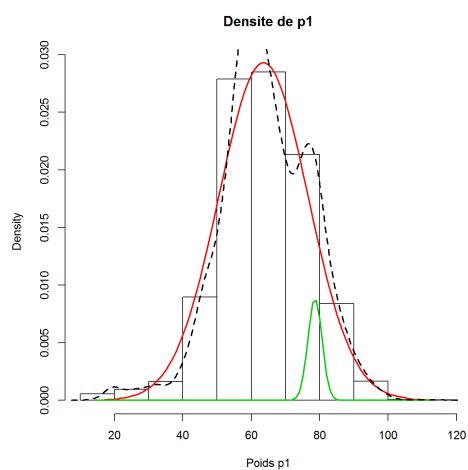


(d) Essieu 4

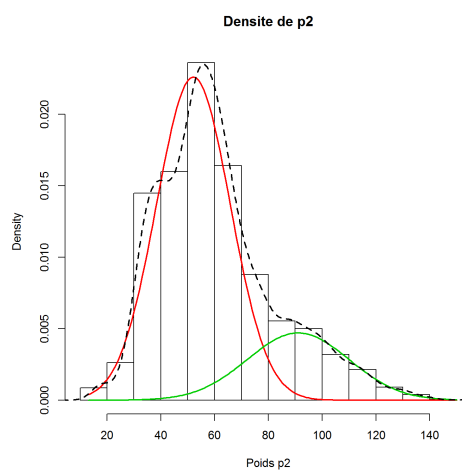


(e) Essieu 5

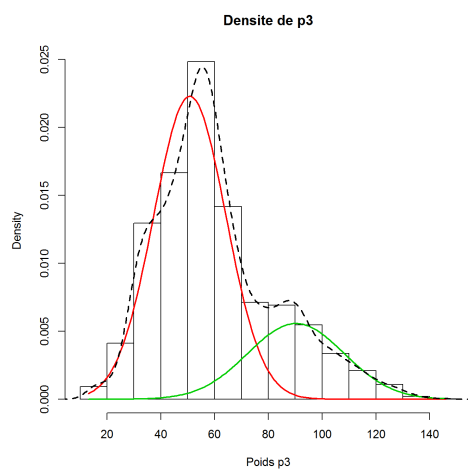
FIGURE 43 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 7.



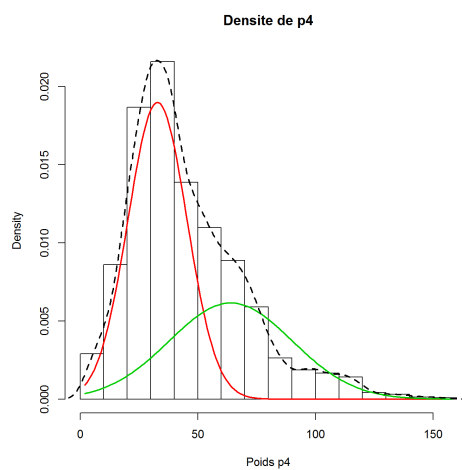
(a) Essieu 1



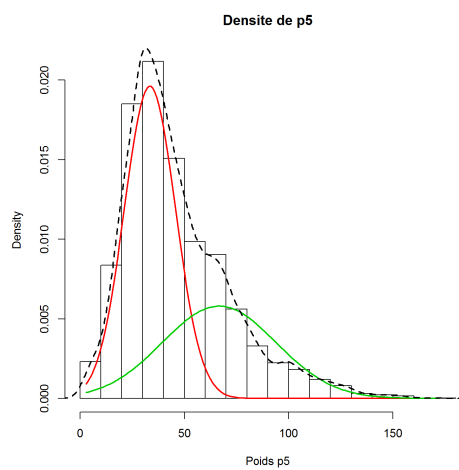
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

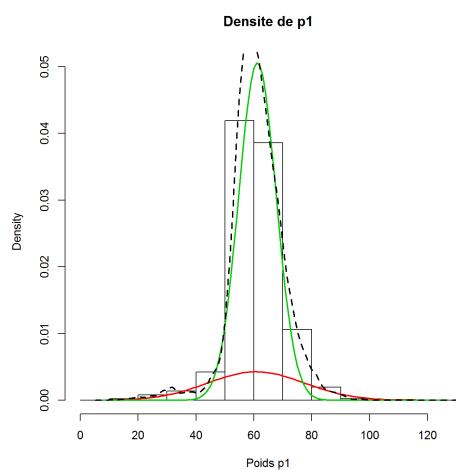


(d) Essieu 4

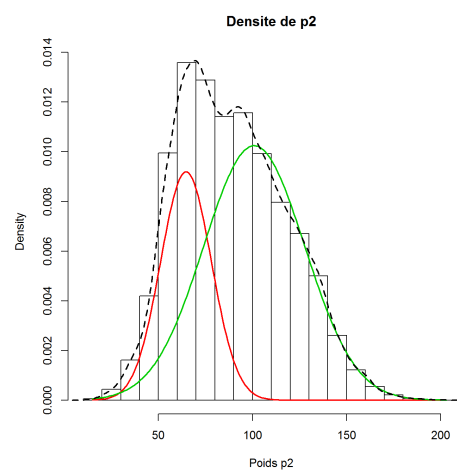


(e) Essieu 5

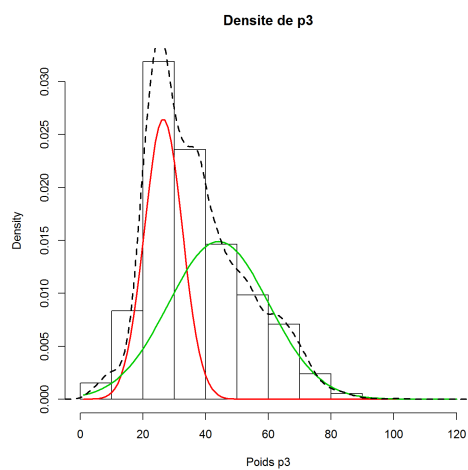
FIGURE 44 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 9.



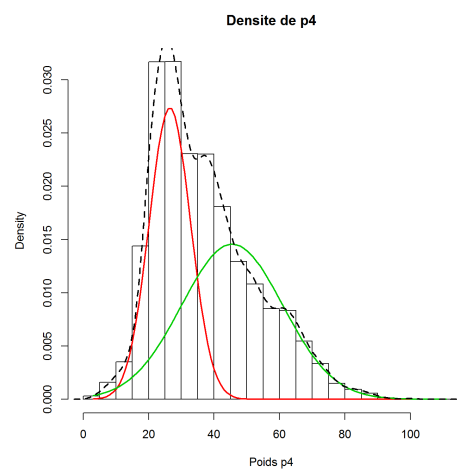
(a) Essieu 1



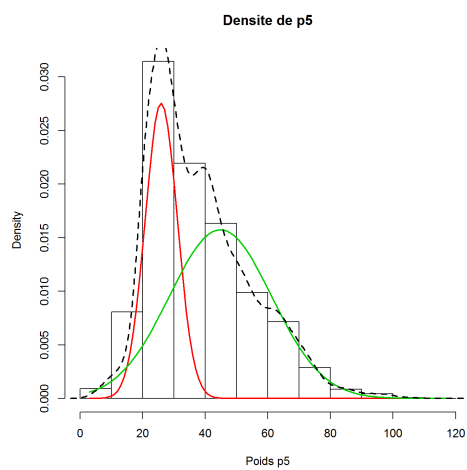
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

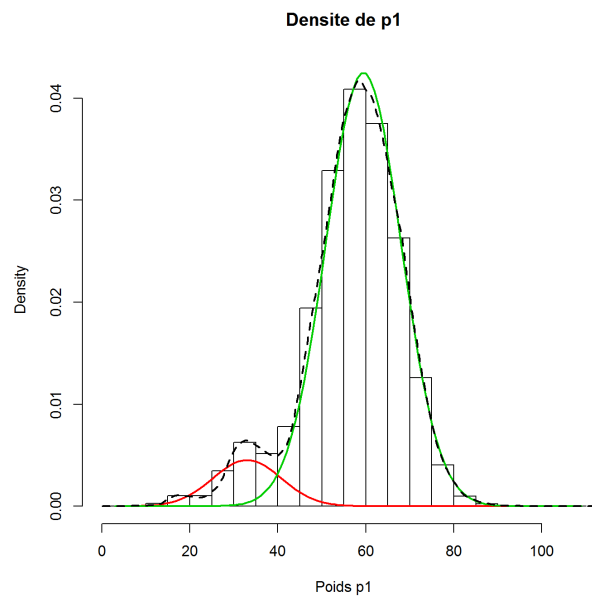


(d) Essieu 4

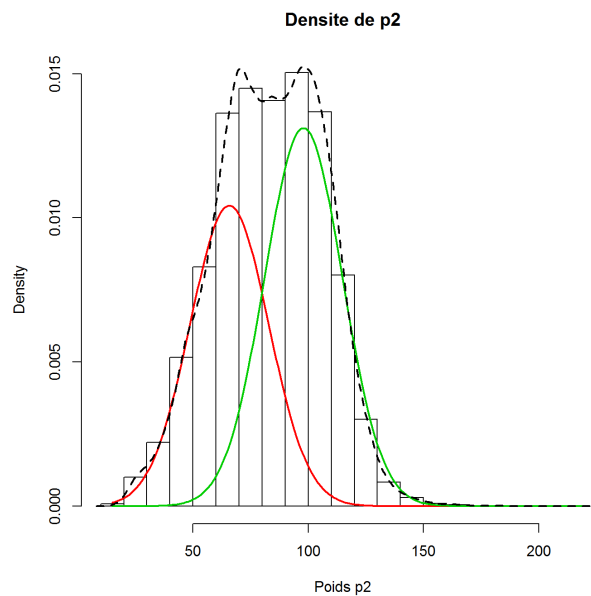


(e) Essieu 5

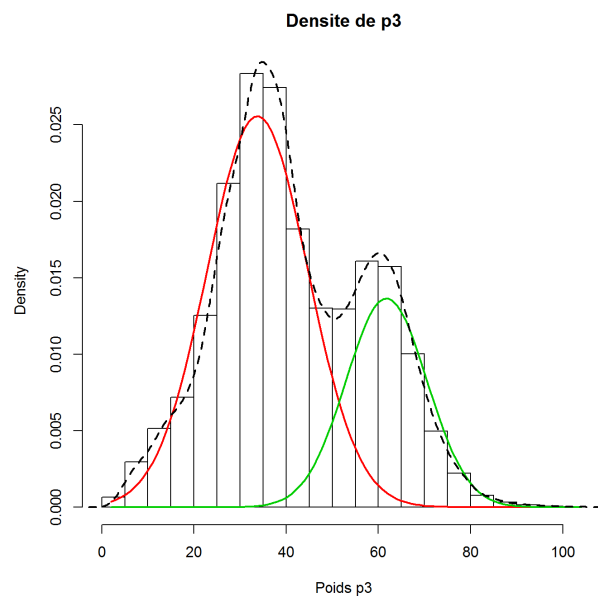
FIGURE 45 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 10.



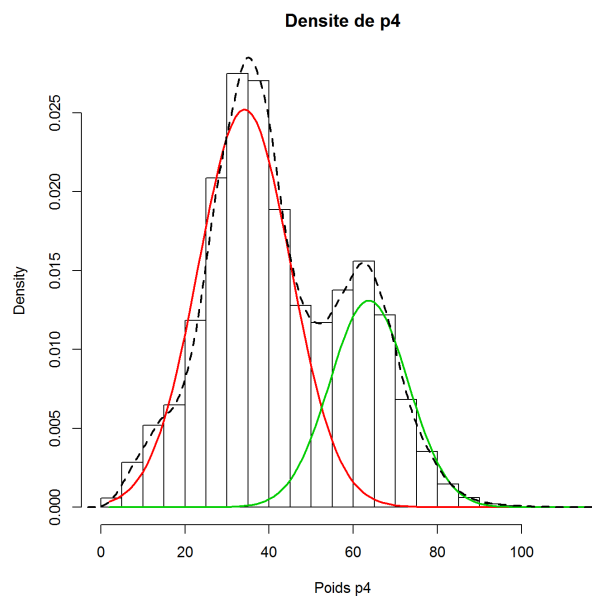
(a) Essieu 1



(b) Essieu 2

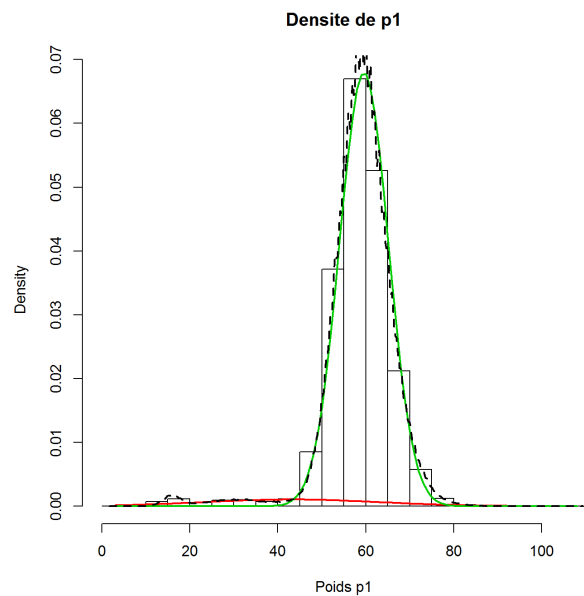


(c) Essieu 3

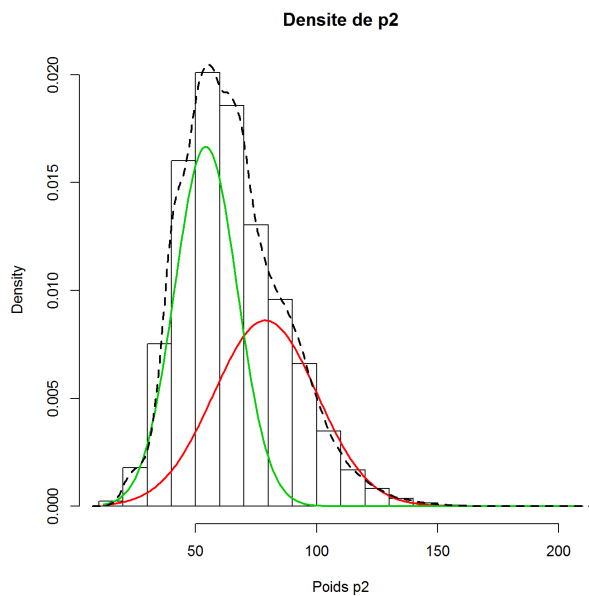


(d) Essieu 4

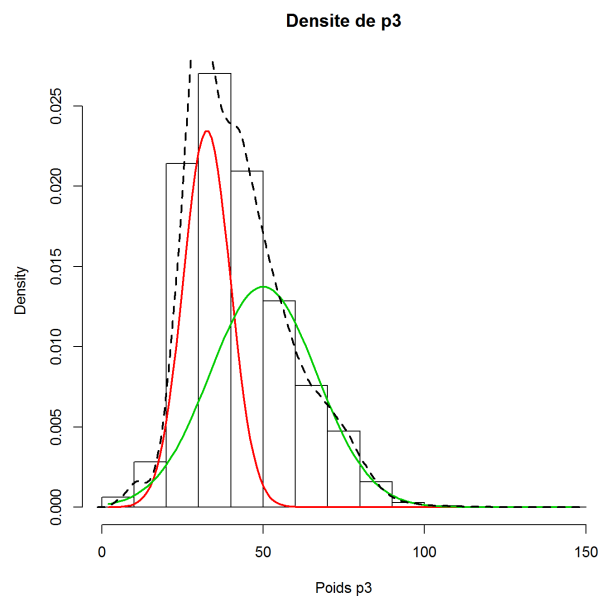
FIGURE 46 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 11.



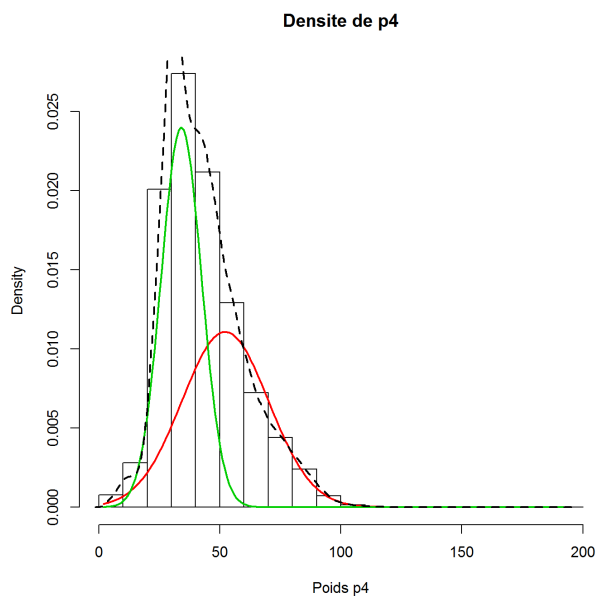
(a) Essieu 1



(b) Essieu 2

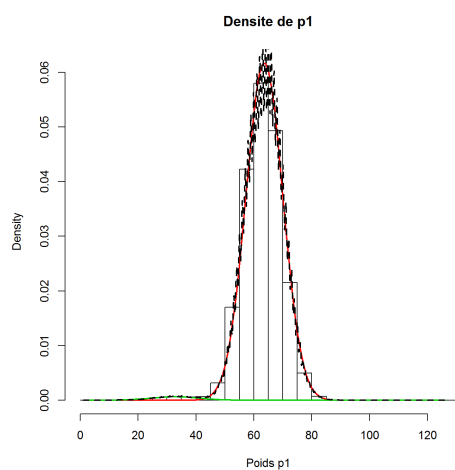


(c) Essieu 3

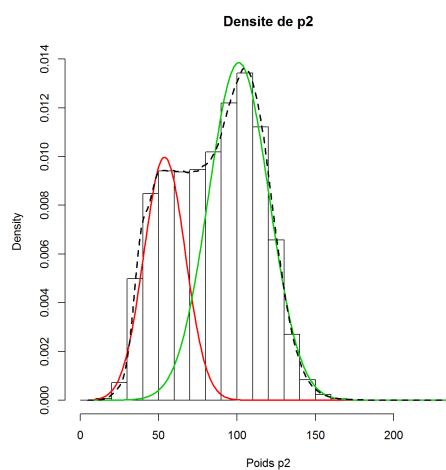


(d) Essieu 4

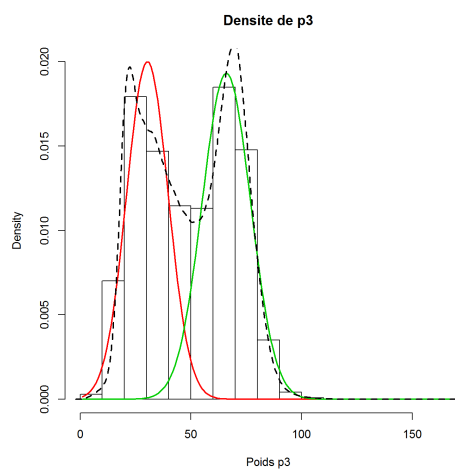
FIGURE 47 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 12.



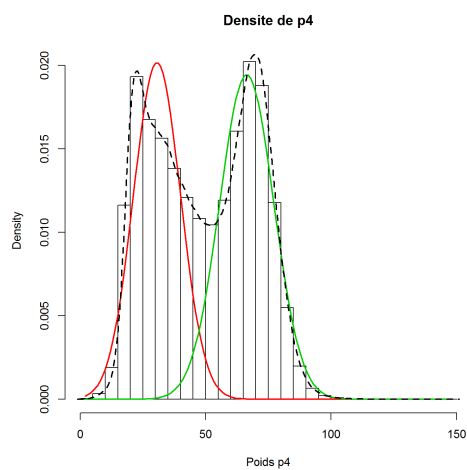
(a) Essieu 1



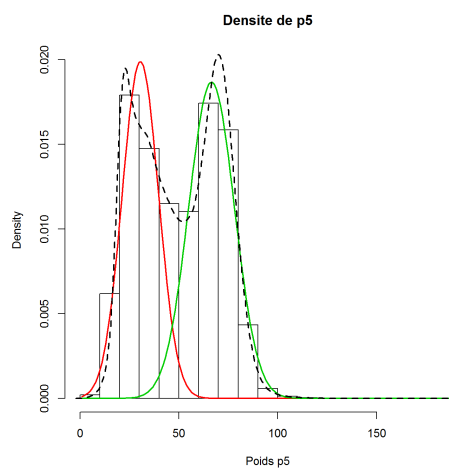
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

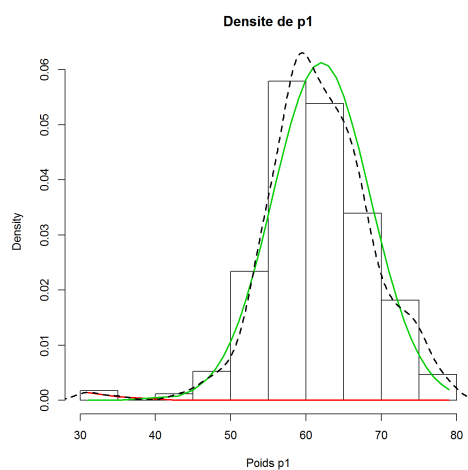


(d) Essieu 4

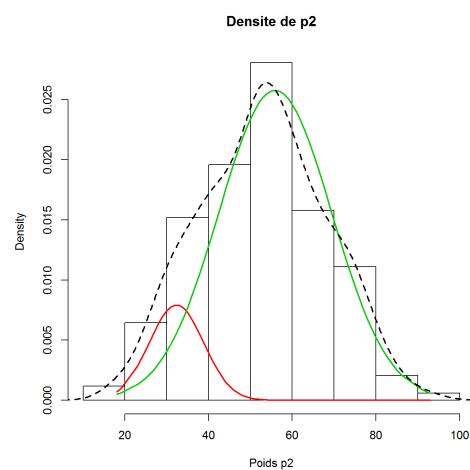


(e) Essieu 5

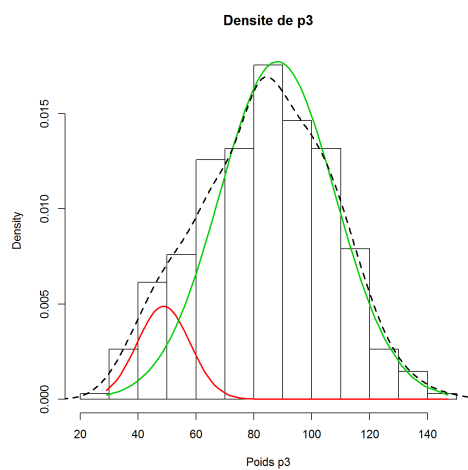
FIGURE 48 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 13.



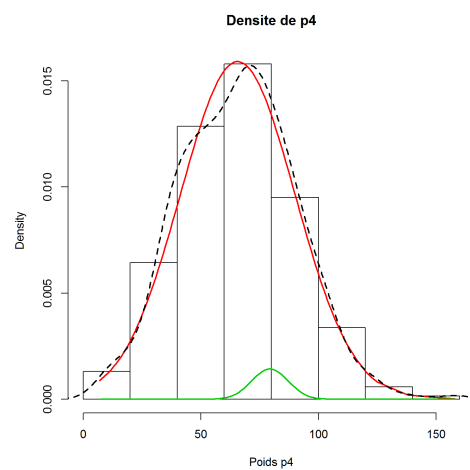
(a) Essieu 1



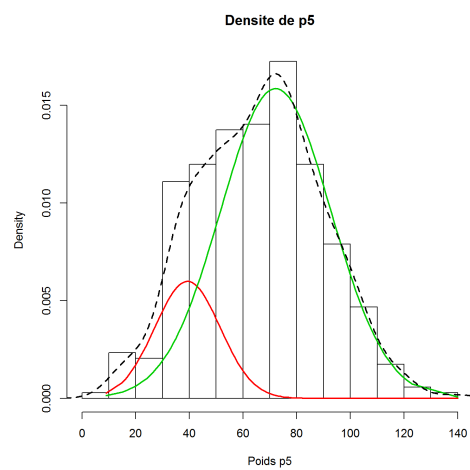
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

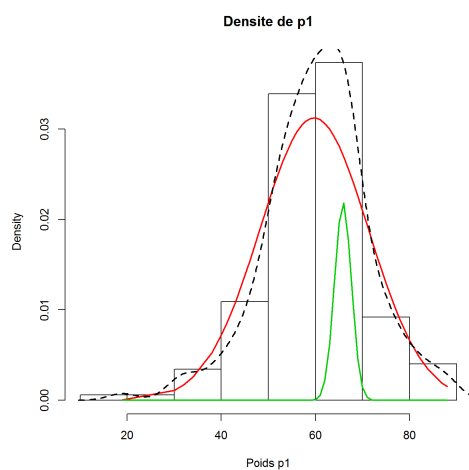


(d) Essieu 4

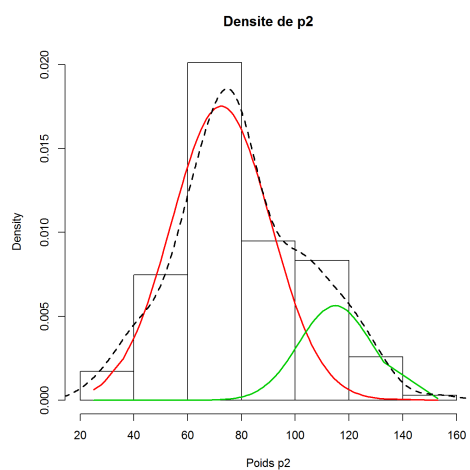


(e) Essieu 5

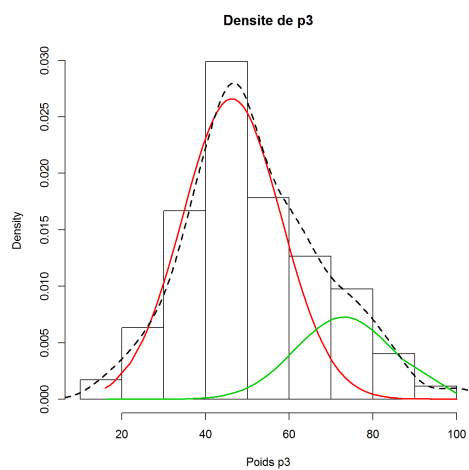
FIGURE 49 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 14a.



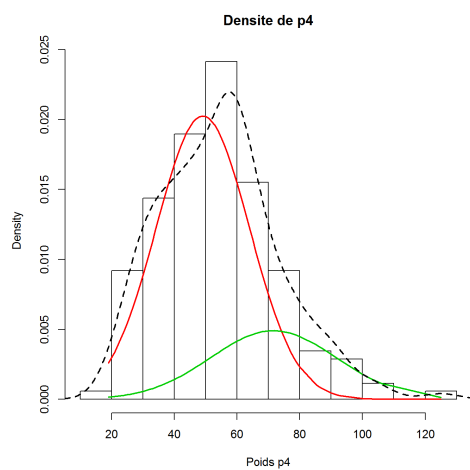
(a) Essieu 1



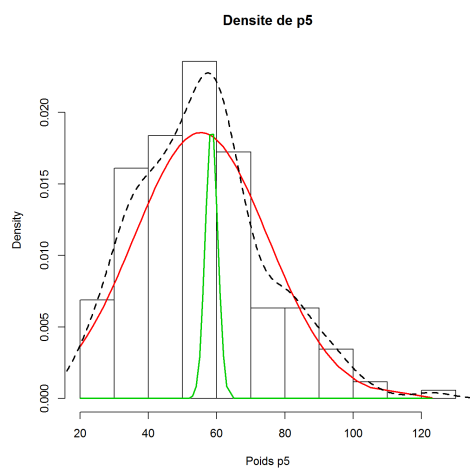
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

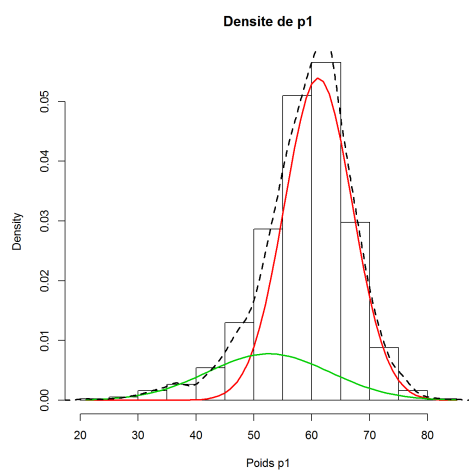


(d) Essieu 4

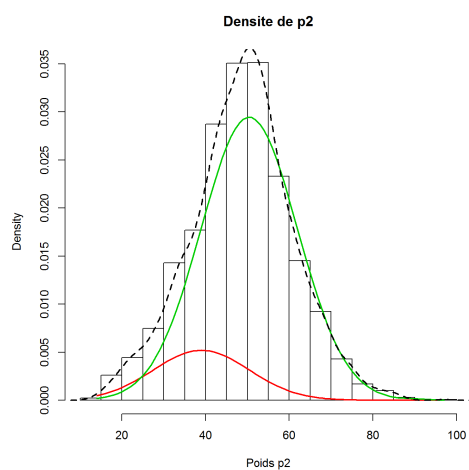


(e) Essieu 5

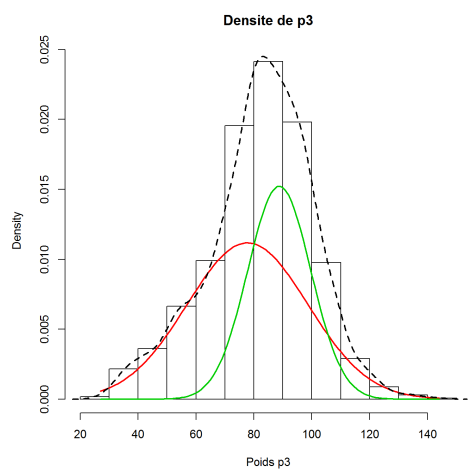
FIGURE 50 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 14b.



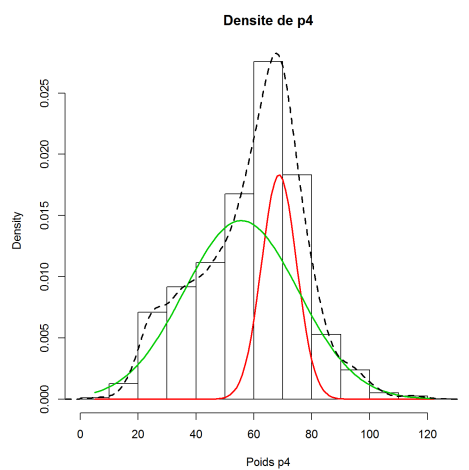
(a) Essieu 1



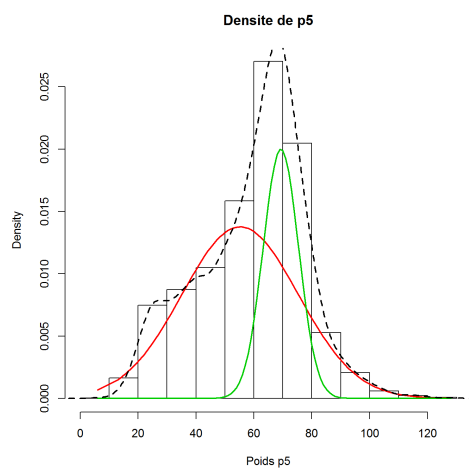
(b) Essieu 2



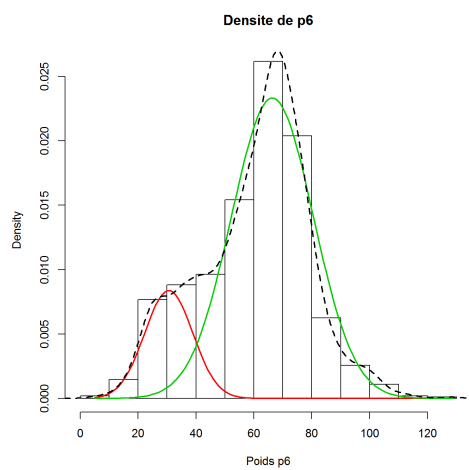
(c) Essieu 3



(d) Essieu 4

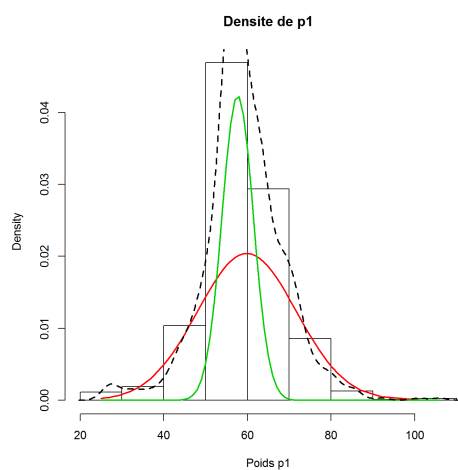


(e) Essieu 5

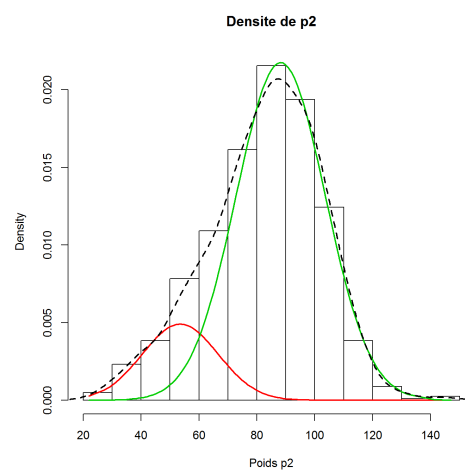


(f) Essieu 6

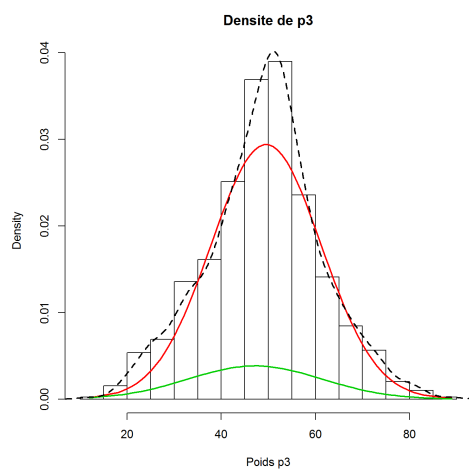
FIGURE 51 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 15a.



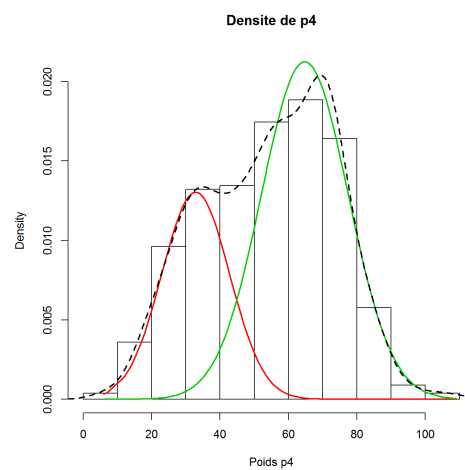
(a) Essieu 1



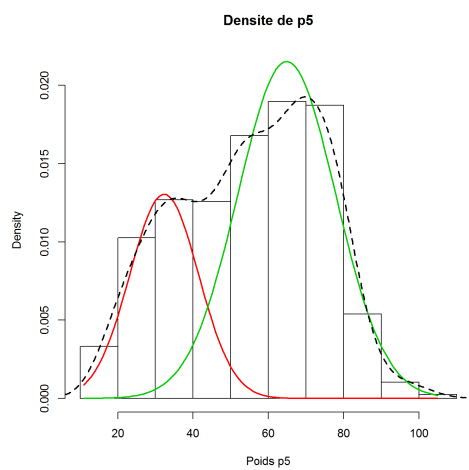
(b) Essieu 2



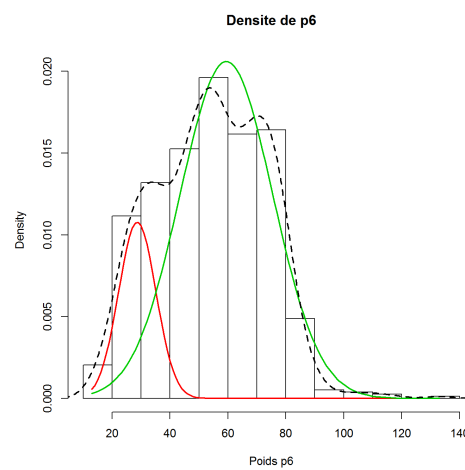
(c) Essieu 3



(d) Essieu 4

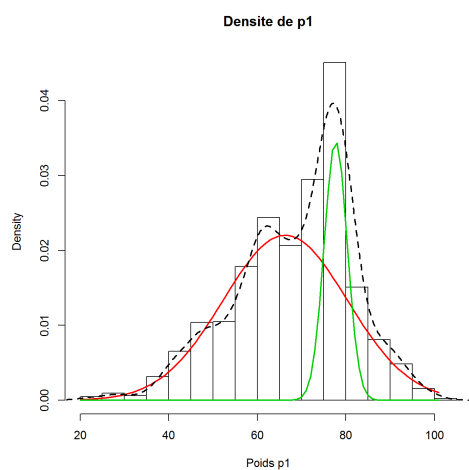


(e) Essieu 5

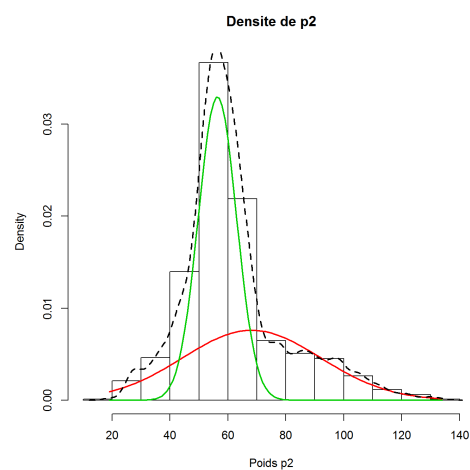


(f) Essieu 6

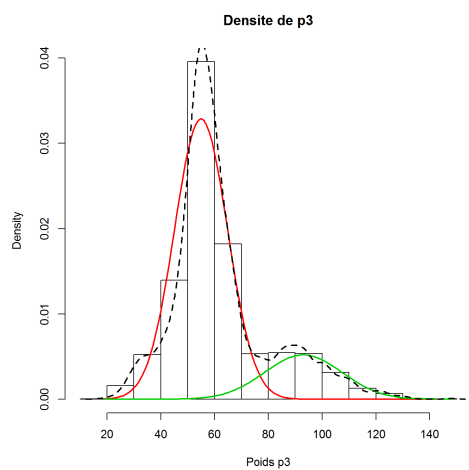
FIGURE 52 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 15b.



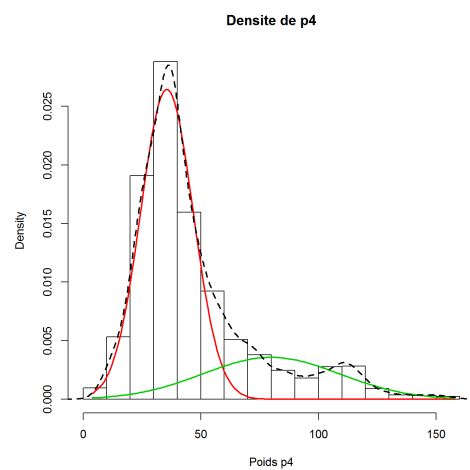
(a) Essieu 1



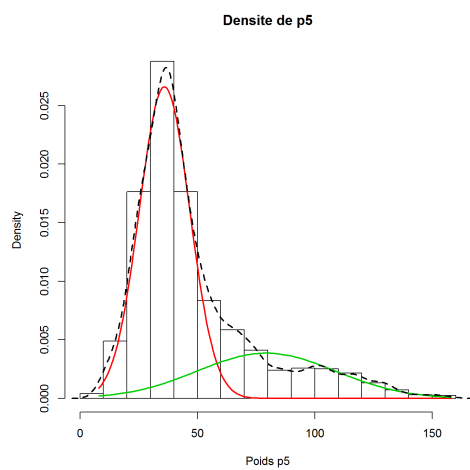
(b) Essieu 2



(c) Essieu 3

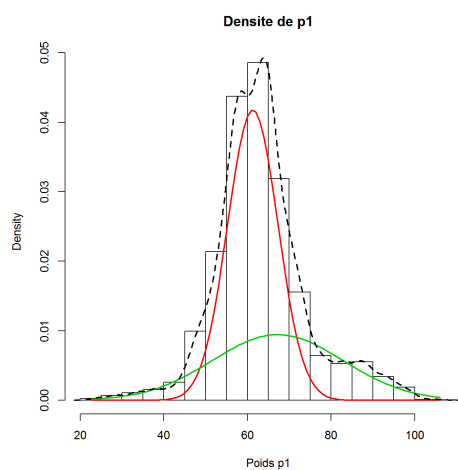


(d) Essieu 4

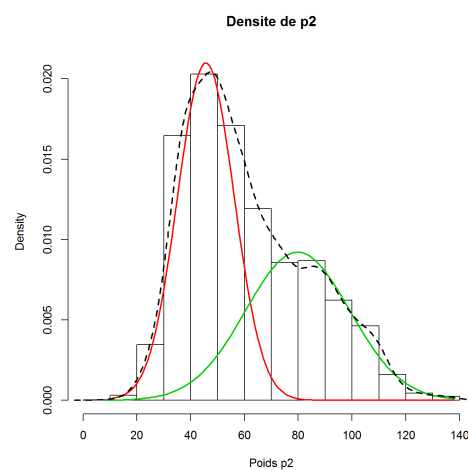


(e) Essieu 5

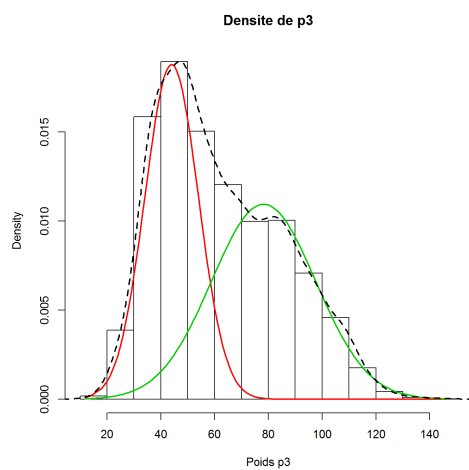
FIGURE 53 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 16.



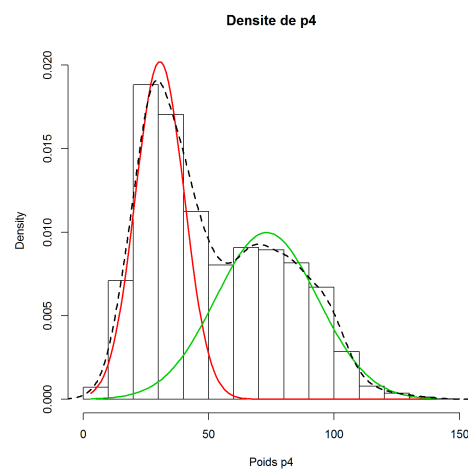
(a) Essieu 1



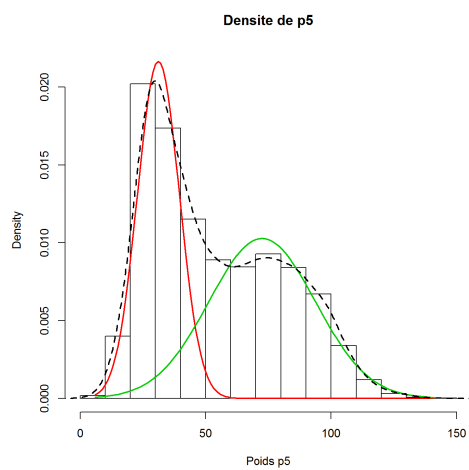
(b) Essieu 2



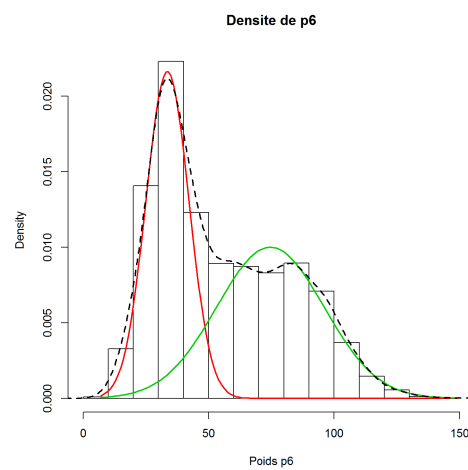
(c) Essieu 3



(d) Essieu 4



(e) Essieu 5



(f) Essieu 6

FIGURE 54 – Modes pour les poids sur essieux détectés pour les poids lourds de silhouette 17.