Environnement Canada Environment Canada

Analyse de l'incertitude des estimations d'émissions des principaux contaminants atmosphériques provenant de sources mobiles au Canada

Direction générale des sciences et de la technologie

Division des inventaires et rapports sur les polluants

6 juin 2008

Canada

Analyse de l'incertitude des estimations d'émissions des principaux contaminants atmosphériques provenant de sources mobiles au Canada

6 juin 2008

Direction générale des sciences et de la technologie

Direction des sciences et évaluation des risques
Division des inventaires et rapports sur les polluants

Remerciements

Les experts suivants ont fourni des informations précieuses ou procédé à l'examen de portions du présent rapport.

- Mitch Murphy, Faculté de mathématiques et de statistiques, Université Carleton
- Brett Taylor, Division des inventaires et rapports sur les polluants, Environnement Canada
- Kathie Davidson, Centre des statistiques de l'aviation, Statistique Canada
- Réjean Doiron, Sean Fagan, Enquête sur les véhicules au Canada, Statistique Canada
- Steven G. Fritz, ing., Locomotive Technology Center, Southwest Research Institute
- Anton Van Heusden, Mona Jennings, Elizabeth Gagnon, Cynthia Wilson Giguère, Aline Power, David Backstrom, Division des inventaires et rapports sur les polluants, Environnement Canada
- Capt Adriaan W. Kooiman, Soutien des opérations de la flotte, Garde côtière canadienne
- Jeremy Heiken, Sierra Research Inc.
- Gilles Leduc, Division de la fabrication et de l'énergie, Statistique Canada
- Bruce McEwen, Direction du pétrole, du gaz et de l'énergie, Environnement Canada
- Siamak Moshiri, Centre de développement des systèmes moteurs, Inc.
- Judith Patterson, Université Concordia
- Roland Vaivads, Institut de technologie des procédés chimiques et de l'environnement, Conseil national de recherches du Canada

Vos commentaires :

Vos commentaires et questions sont les bienvenus. Vous pouvez nous les faire parvenir à l'adresse suivante :

npri@ec.gc.ca

ou

L'Inventaire national des rejets de polluants
Environnement Canada
200, boulevard Sacré-Cœur
Gatineau (Québec)
K1A 0H3

(Vous pouvez consulter le site Web www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=4A577BB9-1 pour plus d'informations sur l'Inventaire national des rejets de polluants)

Photos : © Thinkstock/iStockphoto – 2013

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada représentée par le ministre de l'Environnement, 2013

Also available in English

Résumé

Le présent document résume les résultats de l'analyse statistique des variables, les données, les modèles et les méthodes utilisées pour l'estimation des émissions des principaux contaminants atmosphériques (PCA) provenant de sources mobiles au Canada. Ces polluants sont nocifs pour la santé humaine et posent des problèmes de pollution atmosphérique tels que le smog, les pluies acides et une réduction de la visibilité. Ils comprennent les particules totales (PMT), les particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 10 microns (PM_{10}), les particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns ($PM_{2,5}$), les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV), le monoxyde de carbone (CO) et l'ammoniac (NH_3).

Nous avons quantifié le degré de confiance des estimations établies pour les moteurs d'aéronefs, les moteurs marins, les moteurs de véhicules routiers et hors route et les moteurs de locomotives. Cette analyse d'incertitude est utile pour l'élaboration et la mise en œuvre de règlements pour la gestion de la qualité de l'air au Canada et elle permet aux utilisateurs des données de comprendre les points forts et les points faibles de ces dernières.

Une échelle alphabétique fondée sur une version modifiée de l'indicateur de la qualité de Statistique Canada a servi à établir la qualité des données présentées dans les tableaux de l'analyse d'incertitude (voir le tableau A ci-dessus).

	Coefficient de variation
A – excellente	Moins de 5 %
B – très bonne	5 à 9,9 %
C – bonne	10 à 14,9 %
D – acceptable	15 à 19,9 %
E – à utiliser avec prudence	20 à 34,9 %
F – incertitude élevée	35 % ou plus

Tableau A – Sommaire d'incertitude par polluant et par source mobile

	PM_{10}	$PM_{2,5}$	Sox	Nox	COV	CO
	tonnes métriques					
Total - aéronefs	995[F]	995[F]	4 841[F]	61 442[F]	8 218[F]	46 357[F]
CDA	112[B]	112[B]	1 215[F]	6 123[B]	4 060[E]	9 931[C]
Vol de croisière	883[F]	883[F]	3 626[F]	55 319[F]	4 158[F]	36 426[F]
Transport maritime	5 820[F]	5 565[F]	32 359[F]	117 096[F]	8 035[F]	9 572[F]
Total - véhicules routiers	6 286[B]	5 726[B]	9 700[B]	408 341[B]	370 331[C]	8 068 222[B]
Véhicules légers à essence	402[B]	369[B]	740[B]	90 347[D]	153 043[E]	3 502 235[D]
Camions légers à essence	553[E]	460[D]	934[B]	131 233[B]	205 727[C]	4 502 841[C]
Véhicules légers à moteur diesel	375[E]	344[E]	419[F]	3 431[F]	1 193[F]	5 791[F]
Camions légers à moteur diesel	387[F]	355[F]	598[F]	3 448[F]	1 629[F]	4 281[F]
Véhicules lourds à essence	54[E]	44[E]	19[E]	4 620[E]	1 310[E]	17 417[E]
Véhicules lourds à moteur diesel	4 515[B]	4 154[B]	6 991[C]	175 263[B]	7 430[B]	35 656[B]
Total - moteurs hors route	48 254[F]	45 248[F]	7 434[F]	355 299[E]	872 464[F]	9 429 408[F]
Utilisation de carburant diesel hors route	16 805[E]	16 301[E]	7 138[F]	230 271[C]	17 959[E]	100 982[E]
Utilisation d'essence hors route	31 449[F]	28 947[F]	296[F]	125 028[F]	854 505[F]	9 328 426[F]
Total - locomotives	4 411[A]	4 277[A]	7 199[F]	112 082[A]	10 620[A]	25 923[A]
Service marchandises	4 097[A]	3 973[A]	6 624[F]	101 703[A]	9 672[B]	23 705[A]
Manœuvre	139[A]	135[A]	245[F]	4 803[A]	453[A]	971[A]
Service voyageurs	175[A]	170[A]	330[F]	5 576[A]	495[A]	1 248[A]

L'analyse a révélé que l'incertitude dans les estimations d'émissions a varié de manière significative en fonction de la source ou du type de véhicule. Par exemple :

- Les estimations des émissions pour la plupart des principaux contaminants atmosphériques provenant des locomotives ont été jugées « excellentes » (coefficient de variation inférieur à 5 %), en raison de la grande qualité, de la précision et de l'accessibilité des renseignements sur le parc de locomotives au Canada. Cependant, les émissions de dioxyde de soufre provenant des locomotives ont révélé un niveau plus élevé d'incertitude globale, en raison de l'incertitude liée à la différence dans les caractéristiques du carburant et la répartition spatiale des émissions de SO_2.

- Les estimations des émissions pour les véhicules routiers ont été jugées « bonnes » voire « très bonnes », et ce, également en raison de la qualité, de

la précision et de la disponibilité des renseignements statistiques pour les véhicules routiers au Canada.

- Les estimations des émissions provenant des aéronefs, du transport maritime et des véhicules hors route ont révélé un niveau élevé d'incertitude associée à ces derniers (coefficient de variation de plus de 35 %) en raison de l'utilisation de données très agrégées comme données d'entrée pour l'aviation, du manque de données disponibles pour les navires commerciaux et de la nature fragmentée de la distribution spatiale de l'équipement hors route.

Les possibilités d'améliorations futures pouvant être apportées aux estimations des émissions de sources mobiles comprennent l'utilisation de données propres au Canada qui sont, sur le plan spatial et temporel, réparties selon un niveau élevé de résolution.

Table des matières

1 Introduction 1
2 Aéronefs 6
2.1 Statistiques relatives aux mouvements des aéronefs 8
2.2 Facteurs d'émission 9
2.3 Résultats empiriques 12
3 Navires commerciaux 13
3.1 Marine marchande au Canada 13
3.2 Données sur les mouvements des navires 14
4 Véhicules routiers 15
4.1 Modèle MOBILE 15
4.2 Enquête sur les véhicules au Canada 23
4.3 Résultats empiriques 26
5.1 Modèle NONROAD 32
5.2 Estimations de la consommation de carburant 34
5.3 Facteurs d'émission 35
5.4 Résultats empiriques 36
6 Locomotives 38
6.1 Facteurs d'émission 38
6.2 Résultats empiriques 45
7 Conclusions 48
A Annexes 52
A.1 Distributions statistiques 52
A.1.1 Distribution normale 52
A.1.2 Distribution normale à plusieurs variables 53
A.1.3 Distribution log-normale 56
A.1.4 Distribution uniforme 57
A.1.5 Distribution bêta 57
A.1.6 Distribution Dirichlet 58
A.2 Analyse d'incertitude de Monte Carlo 59
A.2.1 Script perl du modèle MOBILE avec simulation Monte Carlo 59
A.2.2 Script perl du modèle NONROAD avec simulation Monte Carlo 64
A.2.3 Facteurs de correction pour les NO_x 68
A.3– Détails techniques du modèle MOBILE 70
A.3.1 Cadre probabiliste MOBILE-EVC 70
A.3.2 Simulation Monte Carlo des VKP 73
Références 76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données d'activité et facteurs d'émission 4
Tableau 2 : Version modifiée de l'échelle d'indicateurs de qualité de Statistique Canada 4
Tableau 3 : Statistiques relatives aux mouvements des aéronefs (Statistique Canada) ventilées en fonction du poids au décollage 9
Tableau 4 : Facteurs d'émission des aéronefs (EMEP/CORINAIR, 2007).....10
Tableau 5 : Facteurs d'émission des aéronefs à moteurs à pistons (OFAC, 2006) 11
Tableau 6 : Analyse de sensibilité de MOBILE.....19
Tableau 7 : Polluants de MOBILE à effets mineurs 23
Tableau 8 : Tableau 4-1 de l'EVC.....24
Tableau 9 : Tableau 4-2 de l'EVC.....25
Tableau 10 : Tableau 4-4 de l'EVC.....25
Tableau 11 : Estimations descendantes de la consommation de carburant du modèle NONROAD.....34
Tableau 12 : Régime de fonctionnement des locomotives selon le type de service 39
Tableau 13 : Facteurs d'émission de NO_x des locomotives (par cran).....41
Tableau 14 : Facteurs d'émission de CO des locomotives (par cran).....42
Tableau 15 : Facteurs d'émission de HC des locomotives (par cran) 43
Tableau 16 : Facteurs d'émission de PM des locomotives (par cran).....44
Tableau 17 : Estimations des PCA en 2005 (avec indicateurs de la qualité) 50
Tableau 18 : Données d'activité et facteurs d'émission – améliorations possibles.....51
Tableau 19 : Types de variables aléatoires 52
Tableau 20 : Tableau 2-1 de l'EVC.....71
Tableau 21 : Tableau 2-2 de l'EVC.....71
Tableau 22 : Tableau 2-3 de l'EVC.....72

Liste des figures

Figure 1 : Incertitude des données d'entrée et de sortie 1
Figure 2 : Cycle de décollage et d'atterrissage (CDA) 7
Figure 3 : Monte Carlo – CDA des aéronefs (tonnes métriques) 12
Figure 4 : Schéma du modèle MOBILE 16
Figure 5 : Mise en correspondance des classes de véhicules de l'EVC avec celles du modèle MOBILE.....24
Figure 6 : Monte Carlo – Véhicules légers à essence (tonnes métriques) 26
Figure 7 : Monte Carlo – Camions légers à essence (tonnes métriques).....27
Figure 8 : Monte Carlo – Véhicules légers à moteur diesel (tonnes métriques) 28
Figure 9 : Monte Carlo – Camions légers à moteur diesel (tonnes métriques) 29
Figure 10 : Monte Carlo – Véhicules lourds à essence (tonnes métriques) 30
Figure 11 : Monte Carlo – Véhicules à moteur diesel (tonnes métriques).....31
Figure 12 : Schéma du modèle NONROAD.....33
Figure 13 : Facteurs d'émission de NOx des moteurs CAI 35
Figure 14 : Facteurs d'émission de HCT des moteurs CAI 35
Figure 15 : Monte Carlo – Consommation de diesel hors route (tonnes métriques).....36
Figure 16 : Monte Carlo – Consommation d'essence/GPL/GNC hors route (tonnes métriques).....37
Figure 17 : Monte Carlo - Locomotives de train de marchandises (tonnes métriques).....45
Figure 18 : Monte Carlo – Locomotives de manœuvre (tonnes métriques) 46
Figure 19 : Monte Carlo – Locomotives de train de voyageurs (tonnes métriques).....47
Figure 20 : Distribution normale.....52
Figure 21 : Distribution normale à deux variables (exemple 1) 53
Figure 22 : Distribution normale à deux variables (exemple 2) 53
Figure 23 : Distribution normale à deux variables (exemple 3) 54
Figure 24 : Distribution normale à deux variables (exemple 4) 54
Figure 25 : Distribution normale à plusieurs variables 55
Figure 26 : Distribution log-normale.....56
Figure 27 : Distribution uniforme.....57
Figure 28 : Distribution bêta.....57
Figure 29 : Distribution Dirichlet.....58
Figure 30 : Script perl *monte_carlo_mobile.pl*.....60
Figure 31 : Script perl *monte_carlo_nonroad.pl* 65
Figure 32 : Diagramme psychrométrique.....69

Abréviations

ACFC	Association des chemins de fer du Canada
AEE	Agence européenne pour l'environnement
BEED	Bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada
CAI	Construction/agriculture/Industrie
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDA	Cycle de décollage et d'atterrissage
CH_4	Méthane
CLE	Camion léger à essence
CLMD	Camion léger à moteur diesel
CO	Monoxyde de carbone
CO_2	Dioxyde de carbone
COV	Composé organique volatil
CSA	Centre des statistiques de l'aviation (Statistique Canada)
EMEP	Programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe
EPA	Environmental Protection Agency (États-Unis)
EVC	Enquête sur les véhicules au Canada
FR	Freinage rhéostatique (locomotives)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNC	gaz naturel comprimé
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HC	Hydrocarbures
HCNM	Hydrocarbures autres que le méthane
IC	Intervalle de confiance
MSOD	Base de données d'observation de sources mobiles (EPA)
NH_3	Ammoniac
NO_x	Oxydes d'azote
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OMI	Organisation maritime internationale
PBD	Poids brut au décollage
PCA	Principaux contaminants atmosphériques

PM	Particules
PM_{10}	Particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 10 microns
$PM_{2,5}$	Particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns
PVR	Pression de vapeur Reid
SO_x	Oxydes de soufre
VKP	Véhicules-kilomètres parcourus
VLE	Véhicule léger à essence
VLMD	Véhicule léger à moteur diesel
VLoE	Véhicule lourd à essence
VLoMD	Véhicule lourd à moteur diesel
VMP	Véhicules-milles parcourus

Notations

$A, B, C, \ldots$	quantité connue
$\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \ldots$	variable aléatoire (quantité inconnue)
$\mathcal{A} \sim N(\mu, \sigma)$	$\mathcal{A}$ suit une distribution normale dont la moyenne est μ *et la variance* σ
$\boldsymbol{\mathcal{A}} = (\mathcal{A}_1, \ldots, \mathcal{A}_n)$	vecteur aléatoire
$\hat{\mathcal{A}}$	estimation ponctuelle
$(\mathcal{A}_L, \mathcal{A}_U)$	intervalle de confiance
$F(\{a,b,c\},\{d,e\})$	{ *F(a,d), F(a,e), F(b,d), F(b,e), F(c,d), F(c,e)* }
$\sum F(a,\{b,c,d\},e)$	*F(a,b,e) + F(a,c,e) + F(a,d,e)*
$\mathcal{E}, \mathcal{E}_{PM}, \mathcal{E}_{NOx}, \ldots$	facteur d'émission
$\mathcal{C}$	nombre de véhicules selon l'EVC
$\mathcal{G}$	essence
$\mathcal{D}$	diesel
$\mathcal{F}$	carburant
$\mathcal{V}_{LDGV}, \ldots, \mathcal{V}_{HDD8B}$	catégories de véhicules MOBILE
$\mathcal{M}_1, \ldots, \mathcal{M}_{28}$	véhicules-milles parcourus MOBILE
$\mathcal{S}$	source NONROAD

1 Introduction

Le présent rapport fait suite à une étude exhaustive (Taylor, 2007a) des variables, données, modèles et méthodes utilisées par Environnement Canada pour estimer les émissions des principaux contaminants atmosphériques (PCA) provenant de sources mobiles. Ces polluants sont nocifs pour la santé humaine et posent des problèmes de pollution atmosphérique tels que le smog, les pluies acides et une réduction de la visibilité. Ils comprennent les particules totales (PMT), les particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 10 microns (PM_{10}), les particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns ($PM_{2,5}$), les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV), le monoxyde de carbone (CO) et l'ammoniac (NH_3).

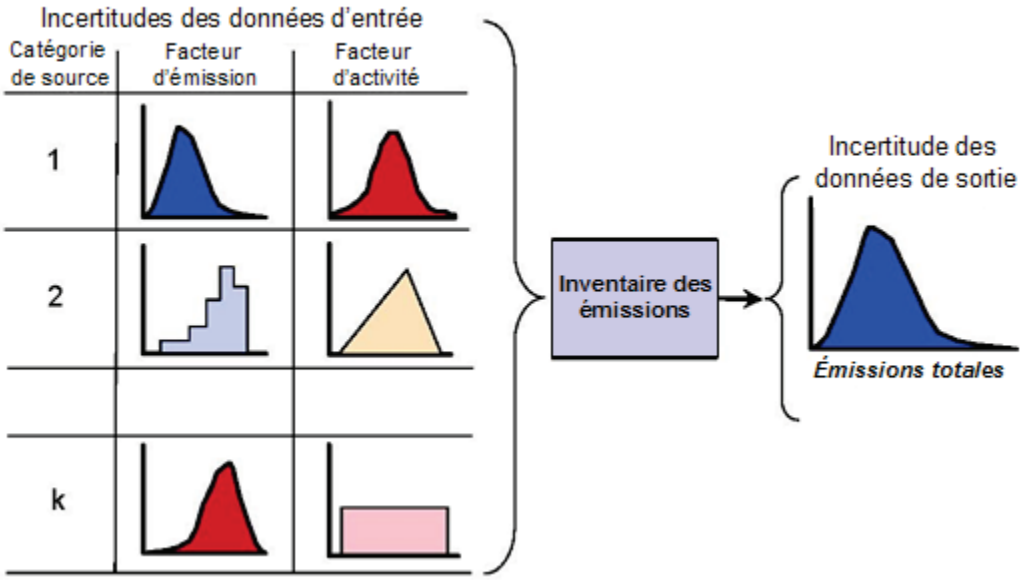


Figure 1 : Incertitude des données d'entrée et de sortie

L'objectif principal consiste à effectuer une analyse de l'incertitude des estimations d'émissions provenant de sources mobiles. Cette analyse quantifie le degré de confiance attaché aux estimations d'émissions en établissant les bornes de l'erreur correspondant à chaque variable dans la méthode utilisée pour estimer les émissions provenant d'aéronefs, de navires commerciaux, de véhicules routiers, de véhicules ou moteurs hors route et de locomotives. Les incertitudes liées aux données d'activité et aux facteurs d'émission sont combinées pour donner une

mesure globale de l'incertitude de l'estimation des émissions totales de PCA (figure 1).

Les PCA sont liés à la qualité de l'air local, tandis que les gaz à effet de serre (GES) comme le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde de diazote (N_2O) sont liés au changement climatique planétaire. Toutefois, les deux catégories d'émissions présentent des dimensions spatiales et temporelles. Le transport intercontinental et la pollution de l'air hémisphérique par l'ozone menacent l'agriculture et les écosystèmes naturels du monde entier et ont une grande incidence sur le climat. Les aérosols, qui sont dispersés à l'échelle planétaire, mais qui présentent d'importantes variations régionales, modifient les conditions climatiques planétaires par leurs effets directs et indirects sur le forçage radiatif (Akimoto, 2003).

Le présent rapport met en phase l'analyse d'incertitude de l'inventaire des PCA et celle de l'inventaire des GES. La composante des sources mobiles de l'inventaire des PCA comporte plusieurs éléments établis à l'aide de méthodes variées qui dépendent des informations disponibles. Ainsi, les estimations d'émissions présentent une large variété de degrés d'exactitude — et donc, d'incertitude. L'information sur l'incertitude permet d'établir l'ordre de priorité des efforts déployés pour améliorer l'exactitude des inventaires, et d'orienter la prise de décisions sur les méthodes à retenir.

On a régulièrement recours à l'analyse d'incertitude dans l'étude des émissions de gaz à effet de serre (Winiwarter et Rypdal, 2001; Webster *et al.*, 2003; Davies *et al.*, 2006; Gosling et O'Hagan, 2007; Kennedy *et al.*, 2008). Les Parties à l'Annexe 1 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) sont tenues de procéder à une estimation quantitative du degré d'incertitude qui caractérise les données utilisées pour toutes les catégories de sources et de puits de leurs inventaires nationaux de gaz à effet de serre en utilisant les bonnes pratiques (Frey *et al.*, 2006) recommandées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le présent rapport utilise la

méthode d'analyse de niveau 2 du GIEC (Monte Carlo) pour l'estimation des incertitudes, dont il est également question dans la Stratégie nord-américaine de recherche sur l'ozone troposphérique (NARSTO, 2005).

Environnement Canada s'intéresse depuis de nombreuses années à l'incertitude de ses estimations de GES (McCann, 1994; SGA, 2000; ICF, 2004, 2005). L'estimation des incertitudes ayant trait aux émissions de PCA, lorsqu'on la compare à celle concernant les GES, est un domaine en pleine évolution. On admet d'une manière générale que l'incertitude qui entoure l'estimation des émissions hors route est importante, mais les données disponibles et les études réalisées à ce jour sur cette question sont limitées (la plupart des recherches sont effectuées au département de génie de la North Carolina State University) (Bammi, 2001; Zheng et Frey, 2001; Frey et Bammi, 2002a,b, 2003; Chi, 2004; Frey, 2007).

Le présent rapport est le premier à aborder d'une manière systématique l'analyse de l'incertitude des émissions de PCA provenant de sources mobiles au Canada; il s'efforce de présenter dans toute la mesure du possible une évaluation non biaisée des estimations ponctuelles et des intervalles de confiance des estimations de PCA en s'appuyant sur les données disponibles à ce jour. On utilise pour la première fois dans l'analyse d'incertitude de Monte Carlo les distributions Dirichlet, une technique nouvelle et efficace d'estimation des incertitudes liées à des sous-groupes au sujet desquels on ne possède que des mesures agrégées.

Le rapport prend en compte les données d'activité et de facteurs d'émission provenant d'organisations environnementales et statistiques canadiennes, américaines et européennes (tableau 1). Les lacunes de ces ensembles de données et les améliorations envisageables sont examinées à la section 7 (Conclusions). Les informations disponibles pour le calcul des facteurs d'émission relatifs au NH_3 étaient limitées (Coe *et al.*, 1996). La base de données d'observation des sources mobiles de l'EPA et les données à plus haute résolution de l'Enquête sur les véhicules au Canada (voir le tableau 18 pour plus de détails) comptent parmi les améliorations futures les plus importantes que l'on puisse envisager.

Tableau 1 : Données d'activité et facteurs d'émission

	Données d'activité	Facteurs d'émission
Aéronefs	Statistiques relatives aux mouvements d'aéronefs de Statistique Canada	EMEP/CORINAIR (2007); FOCA (2006)
Navires commerciaux	Le transport maritime au Canada, Statistique Canada	EMEP/CORINAIR (2007)
Véhicules routiers	Données agrégées de l'EVC, Statistique Canada	MOBILE, par défaut
Moteurs hors route	Enquête sur les véhicules au Canada et Bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada	NONROAD, par défaut
Locomotives	Association des chemins de fer du Canada	Dunn et Eggleton (2002); Fritz (2004); Moshiri (2006)

On présente en annexe un examen des concepts statistiques requis pour cette analyse d'incertitude — par exemple, les distributions de probabilité. Une échelle alphabétique fondée sur une version modifiée de l'indicateur de la qualité de Statistique Canada (tableau 2) sert à établir la qualité des données présentées dans les tableaux de l'analyse d'incertitude (voir le tableau 17).

Tableau 2 : Version modifiée de l'échelle d'indicateurs de qualité de Statistique Canada

Qualité	Coefficient de variation
A – excellente	Moins de 5 %
B – très bonne	5 à 9,9 %
C – bonne	10 à 14,9 %
D – acceptable	15 à 19,9 %
E – à utiliser avec prudence	20 à 34,9 %
F – incertitude élevée	35 % ou plus

On présente en conclusion au présent rapport un résumé des principaux domaines où le degré d'incertitude est élevé, ou de ceux où l'exactitude pourrait être sensiblement améliorée, aux fins d'examens futurs. On inclut également une liste complète de documents de référence portant sur l'analyse d'incertitude des données sur les émissions.

Enfin, pour des motifs de transparence et de reproductibilité des résultats scientifiques, les analyses d'incertitude décrites ci-après s'appuient sur diverses sources de données qui sont toutes accessibles au public. Les auteurs fourniront sur demande une compilation de ces ensembles de données significatives.

2 Aéronefs

Ce sous-secteur englobe les émissions de PCA des aéronefs, à l'exclusion de celles provenant des équipements de services aéroportuaires qui sont incluses dans le sous-secteur des moteurs hors route. Patterson (2005) évalue les méthodes actuelles utilisées par Environnement Canada pour estimer les émissions des aéronefs, et recommande de possibles améliorations.

On suppose que les avions à turboréacteurs ou à turbopropulseurs, les hélicoptères et les avions militaires utilisent du carburéacteur à base de kérosène, aussi connu sous le nom de carburant aviation. Ce carburant est un distillat du pétrole sans plomb dont le type le plus répandu est le Jet A-1, fabriqué conformément à un ensemble de normes internationales (Wikipédia, 2008). On suppose par ailleurs que les aéronefs mus par des moteurs à pistons utilisent de l'essence aviation. Les émissions des aéronefs sont subdivisées à nouveau selon qu'elles sont produites pendant les phases de décollage/atterrissage ou de vol de croisière.

Le cycle de décollage et d'atterrissage (CDA) englobe l'ensemble des activités qui se déroulent près de l'aéroport, à une altitude inférieure à 3 000 pieds (1 000 m), y compris le roulage au sol à l'arrivée et au départ, le décollage, la montée initiale, l'approche et l'atterrissage (figure 2). Le vol de croisière englobe l'ensemble des activités qui se déroulent à une altitude supérieure à 3 000 pieds, y compris la fin de la montée jusqu'à l'altitude de croisière, le vol de croisière proprement dit, et la descente jusqu'au début du cycle d'atterrissage.

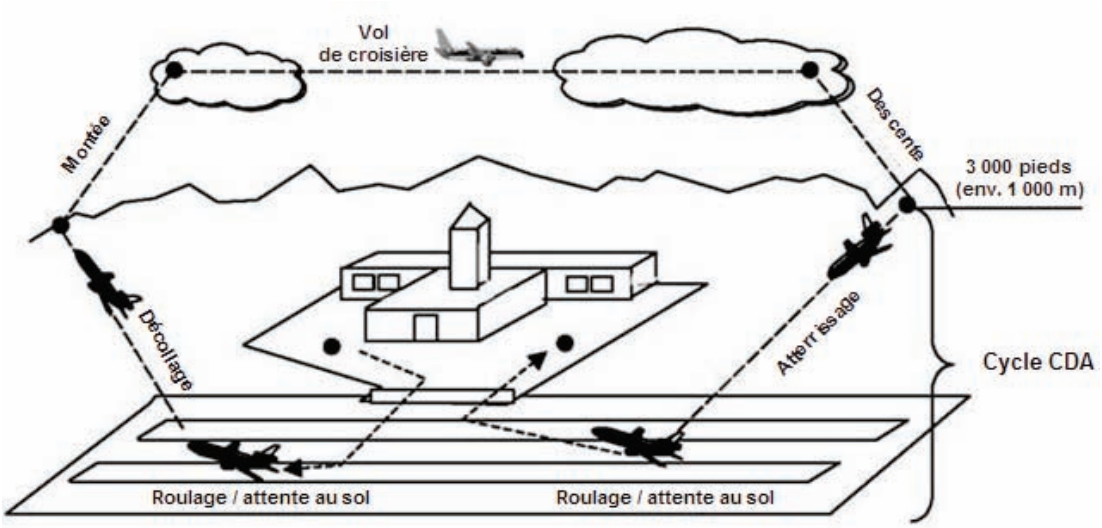


Figure 2 : Cycle de décollage et d'atterrissage (CDA)

Seules les émissions du CDA sont généralement prises en compte pour le calcul de la formation d'ozone troposphérique. Les incertitudes de l'estimation des émissions produites pendant le vol de croisière sont extrêmement grandes et difficiles à quantifier. Statistique Canada fait état de la quantité de carburant contenue dans les aéronefs des vols intérieurs et internationaux au départ des aéroports canadiens, mais le calcul de la proportion de ce carburant consommée dans l'espace aérien canadien serait un exercice difficile et sujet à des erreurs importantes. De plus, il existe peu de données accessibles au public concernant la consommation de carburant des quelque 30 000 vols effectués chaque mois dans l'espace aérien canadien entre le territoire continental des États-Unis et l'Europe. Pour toutes ces raisons, Taylor (2007a) fournit les meilleures estimations de la consommation qui soient disponibles à l'heure actuelle pour la portion des vols de croisière des aéronefs (tableau 17, Aéronefs, vol de croisière), avec un degré d'erreurs de plus de 35 % pour l'ensemble des polluants.

2.1 Statistiques relatives aux mouvements des aéronefs

On entend par mouvement d'aéronef tout décollage ou atterrissage, ou toute approche simulée par un aéronef. Les statistiques relatives aux mouvements d'aéronefs publiées par le Centre des statistiques de l'aviation (CSA) de Statistique Canada sont établies à partir de données recueillies par le personnel des tours de contrôle de la circulation aérienne ou des stations d'information de vol (Hillary *et al.*, 2007). Comme ces personnes sont hautement qualifiées pour ce travail d'observation et de transmission de rapports, les données communiquées sont d'une grande qualité. Le CSA gère une base de données sur l'ensemble des aéronefs immatriculés, qui contient notamment des informations sur le nom et le type d'aéronef, le poids brut au décollage (PBD), le type de moteur (à pistons, à turboréacteur ou à turbopropulseur) et la catégorie (voilure fixe, voilure tournante, ou planeurs).

Le tableau 3 présente le nombre de mouvements d'aéronefs, ventilés par classes de poids au décollage, d'où sont tirées les données sur l'activité des aéronefs utilisées dans le présent rapport. Les mouvements doivent être divisés par deux pour obtenir le nombre de cycles CDA. Les deux types de mouvements — itinérants et locaux — ont été pris en compte aux fins de l'analyse d'incertitude, mais le présent rapport traite uniquement de la méthodologie employée pour l'étude des mouvements itinérants.

Tableau 3 : Statistiques relatives aux mouvements des aéronefs (Statistique Canada) ventilées en fonction du poids au décollage

	Tours de contrôle	Stations d'info de vols	Aéroports non contrôlés	Ensemble des aéroports
	Mouvements			
Total – ensemble des aéronefs	**3 123 934**	**911 955**	**435 331**	**4 471 220**
2 000 kilogrammes et moins	891 366	313 262	140 066	1 344 694
2 001 à 4 000 kilogrammes	254 669	122 665	96 835	474 169
4 001 à 5 670 kilogrammes	314 383	206 357	102 720	623 460
5 671 à 9 000 kilogrammes	213 019	94 460	27 524	335 003
9 001 à 18 000 kilogrammes	258 910	94 475	34 363	387 748
18 001 à 35 000 kilogrammes	407 225	62 547	28 982	498 754
35 001 à 70 000 kilogrammes	432 893	11 975	4 841	449 709
70 001 à 90 000 kilogrammes	183 602	3 963	-	187 565
90 001 à 136 000 kilogrammes	56 554	2 078	-	58 632
136 001 kilogrammes et plus	111 313	173	-	111 486

2.2 Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission correspondant aux aéronefs à turboréacteurs ou à turbopropulseurs (tableau 4) sont tirés de EMEP/CORINAIR (2007). Ils sont dérivés de la banque de données de l'OACI sur les émissions des moteurs (ICAO, 2008). La méthodologie actuelle de certification de l'OACI comporte certaines lacunes notables : elle s'applique aux moteurs et ne tient donc pas compte de l'influence de la cellule; elle ne tient pas compte des émissions de PM ni de CO_2; elle a été élaborée pour traiter des problèmes locaux de qualité de l'air, et ne tient donc pas compte des émissions totales de polluants produites sur l'ensemble du cycle de vol (Norman *et al.*, 2003). On peut trouver dans Waldron *et al.* (2006) des informations supplémentaires sur les facteurs d'émission par sous-type d'aéronef, mais ces données ne sont pas prises en compte dans la présente analyse d'incertitude.

Tableau 4 : Facteurs d'émission des aéronefs (EMEP/CORINAIR, 2007)

	PBD	Carburant	NO_x	HC	CO
	kg	kg/CDA			
Turboréacteurs					
A310	152 987	1 541	23,20	5,54	25,84
A320	77 000	802	10,83	1,92	17,59
A330	230 000	2 232	36,13	2,11	21,50
A340	276 500	2 020	35,37	18,75	50,56
B727	95 028	1 413	12,57	7,20	26,37
B737 100	49 190	920	7,97	0,58	4,82
B737 400	68 050	825	8,25	0,67	11,83
B747 100-300	377 842	3 414	55,94	37,25	78,23
B747 400	396 890	3 402	56,64	1,85	19,50
B757	115 680	1 253	19,73	1,23	12,55
B767 300 ER	186 880	1 617	26,03	0,88	6,08
B777	142 900	2 563	53,64	22,77	61,38
BAC1-11	33 800	682	4,93	21,39	37,74
BAe146	42 200	570	4,19	1,01	9,69
DC10-30	259 459	2 381	41,71	22,84	61,62
DC9	49 900	876	7,26	0,77	5,35
F100	43 390	744	5,79	1,42	13,68
F28	29 500	666	5,19	32,86	32,72
MD 82	67 800	1 003	12,34	1,92	6,52
Turbopropulseurs					
Antonov 26	19 686	137	0,196	6,935	10,110
ATR 42-320	14 097	116	1,026	0,000	0,866
ATR 72-200	17 560	139	1,490	0,000	0,728
BAe Jetstream 31	6 248	45	0,373	0,045	0,513
BAe Jetstream 41	8 674	62	0,470	0,089	0,819
Beech 1900C Airliner	6 027	60	0,255	0,626	2,211
Beech Super King Air 200B	4 684	53	0,247	0,128	0,759
Beech Super King Air 350	5 317	59	0,246	0,231	1,874
Cessna 208 Caravan	2 770	29	0,159	0,026	0,285
Dash 8 Q400	23 887	210	2,403	0,000	1,137
Dash 8 Q400 4580 hp	23 802	185	1,822	0,638	1,561
De Havilland Dash 7	17 270	142	0,766	0,188	1,489
De Havilland DHC-3 Turbo-Otter	2 817	32	0,174	0,016	0,263
Dornier 328-110	10 625	125	1,209	0,000	0,708
Embraer 110P2A	5 250	49	0,280	0,024	0,373
Fokker 27 Friendship	16 799	167	0,356	1,721	7,490
Fokker 50 Srs 100	16 852	125	1,262	0,000	0,727
Lockheed C-130H Hercules	44 905	278	1,927	0,873	1,884
Lockheed P-3B Orion	37 829	255	1,740	0,837	1,793
Reims F406 Caravan II	3 552	41	0,213	0,037	0,442
Saab 2000	18 824	146	1,036	0,036	0,825
Saab 2000 3740 hp	18 656	151	1,087	0,036	0,842
Saab 340B	11 043	75	0,499	0,224	0,427
Shorts 330	9 220	71	0,386	0,115	0,793
Shorts 360-300	10 848	84	0,407	0,680	3,193
Shorts SC.7 Srs3M-200	5 668	25	0,182	0,658	0,500
Swearingen Metro III	5 654	46	0,384	0,044	0,508

On peut obtenir auprès de l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) suisse des données limitées sur les facteurs d'émission des aéronefs à moteurs à pistons (tableau 5) qui utilisent de l'essence aviation (OFAC, 2006).

Tableau 5 : Facteurs d'émission des aéronefs à moteurs à pistons (OFAC, 2006)

	Carburant	NO_x	HC	CO
	kg/CDA			
Lycoming IO-360-A1B6 200 hp	3,96	0,005	0,102	4,922
Lycoming IO-540-T4A5D 260 hp	5,63	0,017	0,138	5,341
Lycoming O-320-E2A 150 hp	3,18	0,028	0,047	2,397
Lycoming O-360-A3A 180 hp	3,87	0,012	0,071	3,930
Lycoming O-540-J3C5D 235 hp	4,74	0,003	0,150	6,060
Rotax 582 DCDI 64 hp	1,30	0,001	0,575	1,078
Rotax 912 80 hp	1,37	0,033	0,047	0,940
Rotax 912S 100 hp	1,48	0,023	0,033	0,911
Rotax 914 114 hp	2,79	0,026	0,071	2,314
TAE-125-01 Centurion 1.7 135 hp	1,57	0,030	0,005	0,019
TCM IO-550-B 300 hp	7,53	0,024	0,174	7,327
TCM TSIO-520-WB 325 hp	10,80	0,023	0,122	9,665

2.3 Résultats empiriques

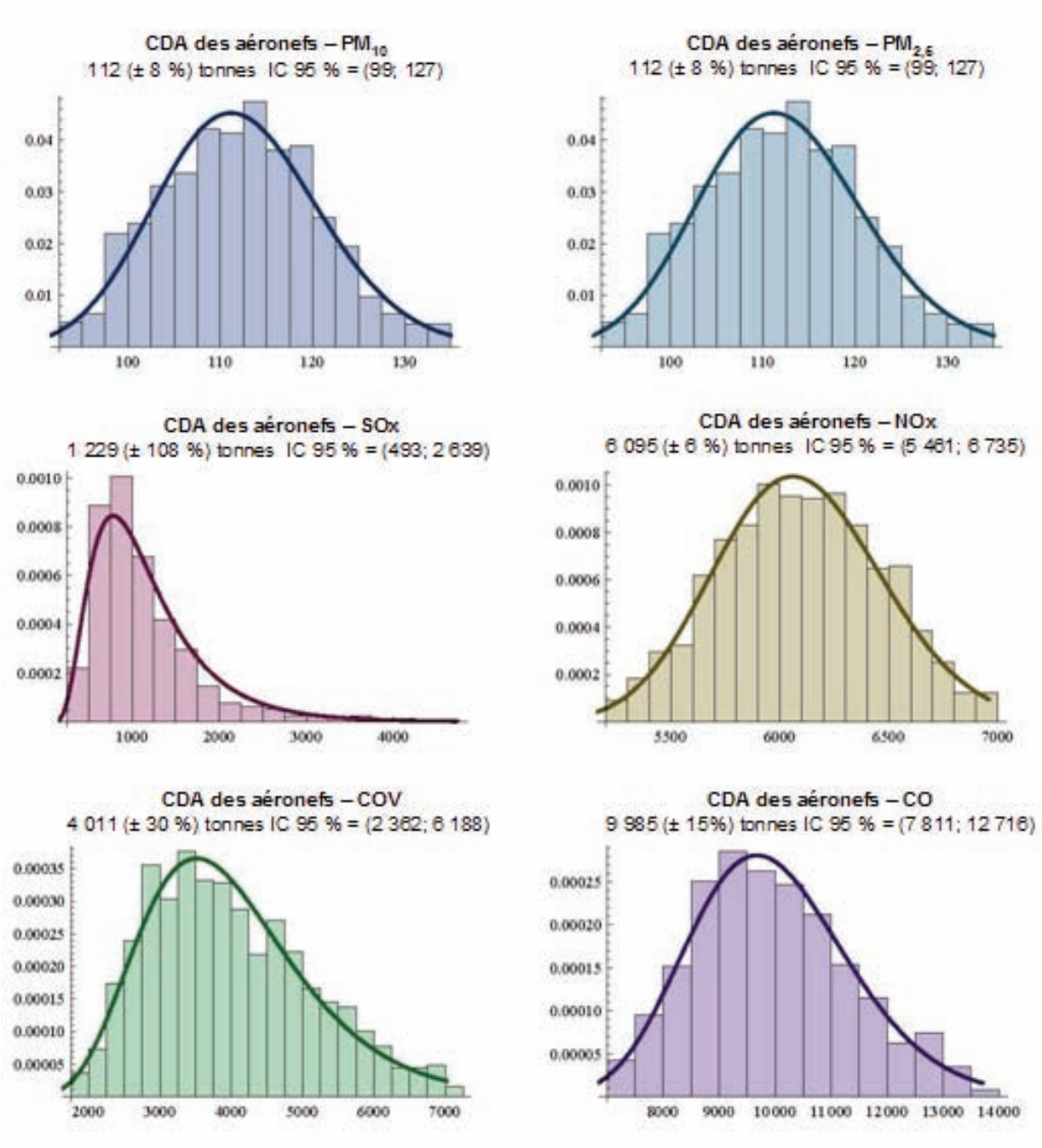


Figure 3 : Monte Carlo – CDA des aéronefs (tonnes métriques)

3 Navires commerciaux

Ce sous-secteur englobe les émissions de PCA des navires commerciaux, à l'exclusion de celles provenant des équipements des services portuaires terrestres qui sont incluses dans le sous-secteur des moteurs hors route. Il regroupe un certain nombre de catégories de navires, y compris les navires de charge, les navires pétroliers, les remorqueurs, les traversiers, les navires à passagers, les bateaux de pêche et les porte-conteneurs. SENES (2004) examine la méthodologie en usage à Environnement Canada pour l'estimation des émissions des navires commerciaux. Cette méthodologie ne prend pas en compte les normes de l'Organisation maritime internationale (OMI) relatives à la réduction des émissions de NO_x. Ces émissions seront réduites dans une proportion variant de 15 à 20 % pour les moteurs fabriqués après l'an 2000 (EEA, 2000).

3.1 Marine marchande au Canada

La méthode en vigueur, fondée sur la consommation de carburant, sert à calculer les émissions à partir des données du rapport « Marine marchande au Canada » de Statistique Canada. Il est impossible de déterminer la proportion de carburant utilisée à l'extérieur de la zone de 200 milles et qui ne contribue donc pas à la formation d'ozone troposphérique au Canada. On suppose donc qu'à un volume donné de carburant acheté au Canada et utilisé à l'extérieur du Canada correspond un volume égal de carburant acheté à l'extérieur du Canada et utilisé à l'intérieur de ses frontières. Les navires océaniques consomment du carburant dans les eaux internationales, et l'impossibilité de soustraire cette quantité de carburant conduit à une surestimation de la consommation impossible à quantifier. Taylor (2007a) présente les meilleures estimations disponibles à l'heure actuelle (tableau 17, transport maritime), qui sont assorties d'une marge d'erreur de plus de 35 % pour l'ensemble des polluants.

3.2 Données sur les mouvements des navires

La méthodologie actuelle d'estimation des émissions des navires commerciaux est périmée (Taylor, 2007a). On devrait donc plutôt utiliser les données exactes archivées par la Garde côtière canadienne sur les mouvements des navires, leur origine, leur destination et leur route de navigation pour estimer les émissions, à l'aide d'une méthode fondée sur les activités plutôt que sur la consommation de carburant. Environnement Canada s'emploie actuellement à obtenir ce type d'information.

4 Véhicules routiers

Ce sous-secteur englobe les émissions de PCA produites par les véhicules immatriculés pour circuler sur les routes (pavées ou non) et servant au transport des personnes et des marchandises. Les émissions de l'ensemble des PCA de ce sous-secteur proviennent de la combustion de combustibles fossiles dans les moteurs à combustion interne, de l'évaporation de ces combustibles à partir des systèmes d'alimentation en carburant et de l'usure des pneus et des freins. Le modèle MOBILE est un modèle perfectionné qui a besoin d'un certain nombre de données d'entrée pour fournir une estimation exacte des facteurs d'émission, lesquels sont ensuite multipliés par les véhicules-kilomètres parcourus (VKP) pour obtenir des estimations d'émissions. Ces estimations sont générées à l'échelle provinciale et territoriale et sur une base mensuelle, puis additionnées pour donner des estimations provinciales et territoriales annuelles.

Par le passé, les données sur le millage cumulé étaient calculées à partir des relevés de l'odomètre des véhicules inspectés dans le cadre du Programme Air pur Ontario, le programme ontarien d'inspection et d'entretien des véhicules (Stewart Brown Associates, 2004b,a, 2005; Taylor, 2005c). Selon Taylor (2007a), l'établissement de séries chronologiques adéquates et complètes sur les parcs de véhicules et les données de kilométrage était un aspect qui méritait d'être amélioré. Le présent rapport utilise un cadre probabiliste pour l'établissement de données sur les parcs de véhicules et sur les VKP dans chaque province, à partir de données agrégées tirées de l'Enquête sur les véhicules au Canada (EVC) de Statistique Canada.

4.1 Modèle MOBILE

Le modèle MOBILE a été créé par l'EPA afin d'estimer la pollution causée par les véhicules routiers (figure 4). Il sert à calculer les émissions d'hydrocarbures (HC), d'oxydes d'azote (NO_x) et de monoxyde de carbone (CO) produites par les automobiles, les motocyclettes et les camions légers et lourds (Beardsley *et al.*, 2001; Koupal et Glover, 2001; Glover *et al.*, 2003; Koupal et Brzezinski, 2003). Ce modèle utilise les données provenant des essais de contrôle des émissions

effectués sur des dizaines de milliers de véhicules (MSOD, 2002; Fulper, 2004). Il permet d'estimer les émissions de gaz d'échappement et les émissions par évaporation, sous forme de facteurs d'émission exprimés en grammes de polluant par véhicule et par heure (g/h) ou par véhicule-mille parcouru (g/mi).

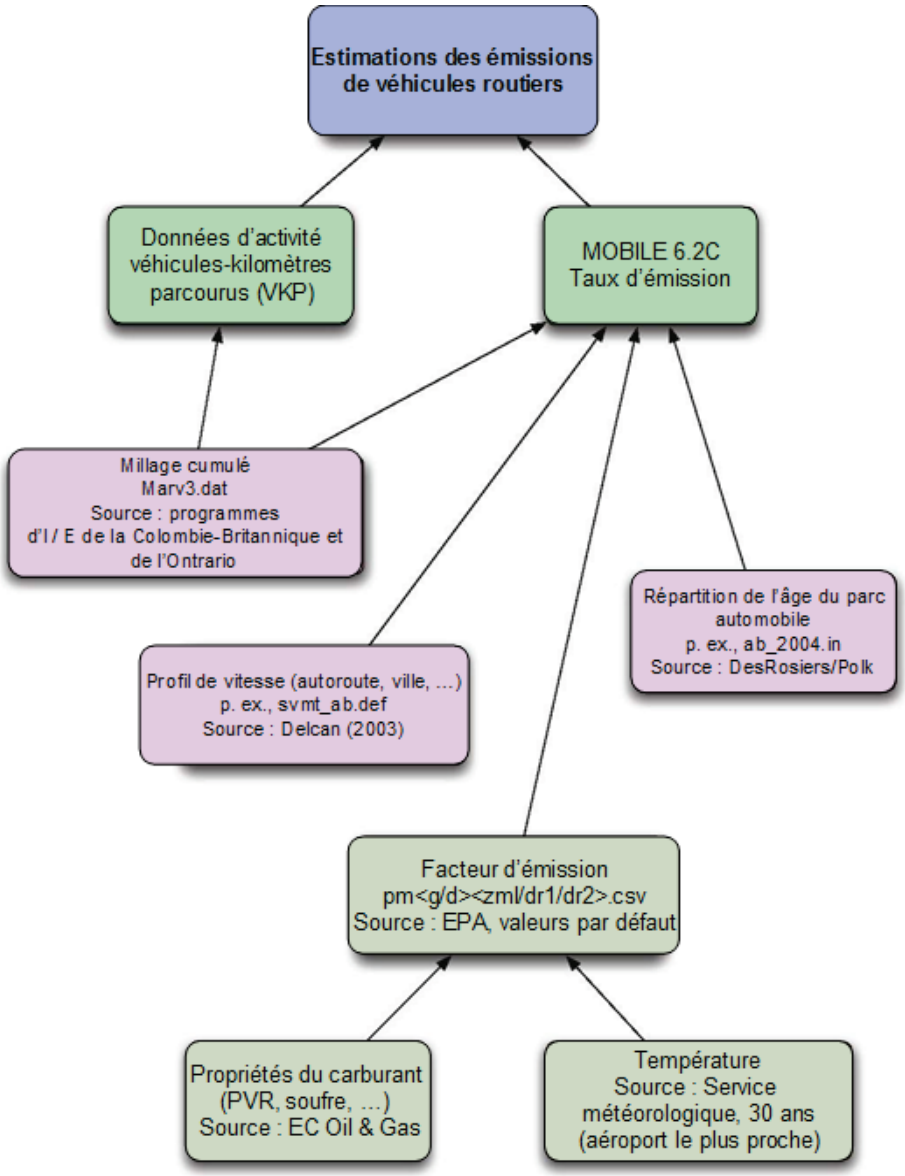


Figure 4 : Schéma du modèle MOBILE

Le modèle MOBILE, dont la première version – MOBILE1 – remonte à la fin des années 1970, a été périodiquement mis à jour pour refléter l'amélioration graduelle de la qualité des données, les changements apportés aux véhicules, aux moteurs et aux systèmes de réduction des émissions, l'évolution de la réglementation, des normes d'émissions et des procédures d'essais, et l'amélioration des connaissances sur les niveaux d'émissions en cours et sur les facteurs influant sur ces derniers. La version officielle actuelle, MOBILE6, a été lancée en janvier 2002. Les particules (PM) ont été ajoutées à la liste des polluants estimés (Glover et Cumberworth, 2003).

Ce modèle tient compte des répercussions, sur les émissions, des changements apportés aux normes sur les émissions des véhicules, de l'évolution du parc de véhicules et des activités, et des variations des conditions locales – par exemple, la température, l'humidité et la qualité des carburants. Les facteurs d'émission correspondant à une catégorie donnée de véhicule varient au fil du temps à mesure que les véhicules plus anciens sont remplacés par des véhicules plus récents répondant à des normes d'émissions plus strictes.

Depuis l'année de modèle 1988, les normes d'émissions en vigueur aux États-Unis et au Canada pour les véhicules légers et lourds ont été harmonisées, et aucun changement n'a été apporté aux données[1] de MOBILE6.2 correspondant à ces années de modèles. Toutefois, pour les années de modèles antérieures à 1988, les normes étaient différentes et les données du modèle MOBILE6.2 correspondant à ces années ont dû être modifiées pour s'appliquer à la situation canadienne (Gagnon et Taylor, 2003; Taylor, 2005a,b,d). Les données d'entrée d'une passe du modèle MOBILE6.2C représentent 9 100 sous-catégories de véhicules :

$$\mathcal{I} = \mathrm{R} \times \mathcal{M} \times \mathrm{F} \times \mathrm{Y} \tag{1}$$

$$= \underbrace{\{AB, \ldots, YT\}}_{\text{13 régions}^2} \times \underbrace{\{\ VL\ , \ldots,\ VLo8b\ \}}_{\text{14 catégories de véhicules MOBILE}} \times \underbrace{\{G, D\}}_{\text{2 types de carburants}} \times \underbrace{\{0, -1, \ldots, -24\}}_{\text{25 années de modèle}} \tag{2}$$

[1] 10 provinces et 3 territoires.

Le modèle MOBILE6 a besoin des températures quotidiennes minimales et maximales pour effectuer divers calculs : ajustements des concentrations de NO_x, de HC et de CO dans les gaz d'échappement en fonction de la température ambiante; fractions des émissions d'hydrocarbures associées aux pertes par évaporation diurnes, à celles du véhicule encore chaud à l'arrêt et à celles du véhicule en marche ou au repos. Les données météorologiques sont obtenues auprès du Service météorologique du Canada (SMC). On choisit, pour chaque province, territoire ou région, la ville la plus populeuse. Pour chacune de ces villes, l'aéroport le plus important (international si possible) devient le site de la station d'enregistrement des données météorologiques. On utilise les aéroports puisque chaque ville en possède un et qu'ils produisent souvent les séries de données les plus complètes et qui remontent le plus loin dans le passé. Les données météorologiques des villes retenues servent à définir les conditions de l'ensemble de la province, du territoire ou de la région où se trouvent ces villes.

Les teneurs en soufre du carburant diesel et de l'essence, mesurées en parties par million (ppm), sont tirées de Guthrie *et al.* (2006). Toutes les autres caractéristiques des carburants — par exemple, pression de vapeur Reid (PVR) et teneurs en composés oxygénés — sont tirées de SENES (2002). Le modèle MOBILE6 peut également prendre en compte les variations locales et temporelles de l'humidité qui influent sensiblement sur les facteurs de correction des NO_x. La méthodologie actuellement en usage à Environnement Canada ne tient pas compte des données historiques sur l'humidité.

La connaissance préalable de l'importance relative des divers paramètres d'entrée de MOBILE6 pour les résultats concernant les émissions peut jouer un rôle important dans la décision de tenir compte ou non des données locales. Giannelli *et al.* (2002) présentent une étude systématique de l'importance relative de divers paramètres d'entrée du modèle MOBILE6. Ils ont fait varier chacun des paramètres évalués, et comparé ensuite les émissions obtenues avec MOBILE6 aux valeurs par défaut ou à certaines valeurs d'entrée de base (tableau 6). Ces résultats ont ensuite été subdivisés en trois catégories d'effets sur les émissions : majeurs, intermédiaires et mineurs. L'âge du véhicule ou la distribution des immatriculations, la température

moyenne quotidienne, la PVR du carburant et la vitesse du véhicule sont les facteurs dont les effets sont les plus marqués avec des variations des émissions de 20 % ou plus par rapport aux émissions calculées avec les valeurs d'entrée par défaut. L'humidité absolue, la climatisation, l'altitude, le millage cumulé, les VMP par classe de vitesse et le nombre de démarrages par jour ont des effets intermédiaires, avec des variations des émissions allant de 5 à 20 %. Selon le type de polluant, les paramètres d'entrée qui restent (tableau 7) ont des effets mineurs, avec des variations des émissions inférieures à 5 %.

Tableau 6 : Analyse de sensibilité de MOBILE

COMMANDE	Variation des données d'entrée		Variation des émissions d'hydrocarbures	Variation des émissions de CO	Variation des émissions d'oxydes d'azote
Humidité absolue [Valeurs moyennes maximale et minimale de l'humidité relative mesurée le matin et l'après-midi, en août, à Atlanta et Tucson (données du National Weather Service).]	min.	-28 % (54 grains/lb)	(HCNM) Environ 0 %	-1 %	5 % (1975) 3 % (2005)
	max.	100 % (149 grains/ lb)	(HCNM) Environ 0 %	3 % (1975) 4 % (2000) 1 % (2025)	-11 % (1975) -7 % (2005) -11 % (2025)
Climatisation	Différences dues à la correction du MOBILE6 pour tenir compte de la climatisation		(HCNM) 1 % (1975) 1 % (2005) 0 % (2050)	11 % (1975) 13 % (2005) 4 % (2050)	3 % (1975) 4 % (2005) 8 % (2050)
Altitude	Différences des émissions observées entre les hautes et les basses altitudes		(HCNM) 26 % (1975) 10 % (1995) 7 % (2005)	41 % (1975) 17 % (1995) 10 % (2005)	-25 % (1975) -3 % (1995) -1 % (2005)
Vitesse moyenne (artères)	min.	10 mi/h	(COV) 69 % (2000) 75 % (2025)	43 % (1975) 26 % (2000) 32 % (2025)	22 % (1975) 20 % (2000) 32 % (2025)
		35 mi/h	-11 %	-11 %	-5 % (1975) -12 % (2000) -8 % (2025)
	max.	65 mi/h	(COV) -28 % (1975) -24 % (2025)	0 % (1975) 17 % (2000) 15 % (2025)	13 % (1975) 23 % (2000) 17 % (2025)
Vitesse moyenne (routes régionales)	min.	10 mi/h	(COV) 72 %	40 % (1975) 23 % (2000) 28 % (2025)	17 % (1975) 24 % (2025)
	max.	35 mi/h	(COV) -10 %	-4 % (1975) 0 % (2005) 0 % (2025)	-2 %

Tableau 6 : Analyse de sensibilité de MOBILE (suite)

COMMANDE	Variation des données d'entrée		Variation des émissions d'hydrocarbures	Variation des émissions de CO	Variation des émissions d'oxydes d'azote
Vitesse moyenne (autoroutes)	min.	10 mi/h	(COV) 75 % (1975) 68 % (2005) 72 % (2025)	39 % (1975) 26 % (2000) 28 % (2025)	16 % (1975) 25 % (2000) 21 % (2025)
		35 mi/h	-9 %	-8 %	-5 % (1975) 0 % (2000) -6 % (2025)
	max.	65 mi/h	(COV) -26 % (1975) -22 % (2025)	0 % (1975) 17 % (2000) 13 % (2025)	10 % (1975) 29 % (2000) 14 % (2025)
VMP/type d'infrastructure (ajouter ou soustraire une fraction des véhicules empruntant autoroutes et artères : nouvelle_autoroute + nouvelle_bretelle = (vieille_autoroute + vieille_bretelle) + x*vieille_artère nouvelle bretelle = 0,08* (nouvelle_bretelle + nouvelle_autoroute) nouvelle_autoroute = (0,92/0,08) * nouvelle_bretelle nouvelle_artère = (1-x)*vieille_artère	min.	soustraire 40 % des artères	(HCNM) -1 % (1975) -0,5 % (2020)	1 % (1975) 3 % (2025)	1 % (1975) 5 % (2000) 2 % (2020)
	max.	ajouter 40 % aux artères	(HCNM) 1 % (1975) 0 % (2007)	-2 % (1975) -3 % (2025)	-1 % (1975) -5 % (2000) -2 % (2020)
Programme sur les carburants / teneur en soufre (années civiles 2000 et suivantes; pour programme classique par défaut de l'est, réduire la teneur en soufre de 10, 20 et 30 %)	min.	-10 %	(HCNM) 0 % (2010) à -0,5 % (2000)	-0,2 % (2010) à -1,3 % (2000)	-0,4 % (2000) à -0,5 % (2025)
	max.	-30 %	(HCNM) -0,05 % (2010) à -1,4 % (2000)	-0,7 % (2010) à -4 % (2000)	-1 % (2000) à -2 % (2025)
Pression de vapeur Reid (PVR) (La PVR a été portée de 6,5 à 11,5 lb/po^2 pour un certain nombre d'années civiles entre 1975 et 2050, avec températures minimale et maximale de 72 et 92 ^{0}F respectivement. Les variations en pourcentage ont été calculées pour une PVR de 7,5 lb/po^2)	min.	6,5lb/po^2	-3 % (1985) à -6 % (2005)	0 % (1975-2050)	Environ 0 %
	max.	11,5lb/po^2	77 % (2005) à 38 % (1985)	101 % (2050) à 2 % (1975)	3 % (2050) à -0,6 % (1985)
Millage cumulé (augmentations ou baisses du millage cumulé par rapport aux valeurs par défaut de MOBILE6)	min.	Baisse de 20 %	(HCNM) 3 % (1980) 4 % (2005) 3 % (2015) 0,2 % (2020)	–1,7 % (1985) à -7,9 % (2020)	3 % (1990) à -12 % (2020)
	max.	Augmentation de 20 %	(HCNM) 1 % (1990) -1 % (2000) 1 % (2005) 3 % (2020)	3 % (1990) à 11 % (2020)	-2 % (1980) à 13 % (2020)

Tableau 6 : Analyse de sensibilité de MOBILE (suite)

COMMANDE	Variation des données d'entrée		Variation des émissions d'hydrocarbures	Variation des émissions de CO	Variation des émissions d'oxydes d'azote
Carburants oxygénés (concentration d'éther de 1 à 2,7 %; variations de la part du marché de 5 à 50 %)	min.	5 % marché, 1 % éther, 0 % alcool	(HCNM) env. 0 %	Environ 0 %	0 %
	max.	50 % marché, 0 % éther, 2,7 % alcool	(HCNM) -2 % (2000) à -3 % (2020)	-5 % (2000) à -3 % (2020)	0 %
Carburants oxygénés (concentration d'alcool de 0,7 à 3,5 %; variations de la part du marché de 5 à 50 %)	min.	50 % marché, 0 % éther, 0,7 % alcool	(HCNM) env. 1 % (2000) à (2020)	<1 % (2000) à (2020)	0 %
	max.	50 % marché, 0 % éther, 3,5 % alcool	(HCNM) -0,5 % (2000) à -1 % (2020)	-5 % (2000) à -2 % (2020)	0 %
Distribution des immatriculations (baisse des fractions de véhicules plus récents et hausse des fractions de véhicules plus âgés)	min.	5 % variation d'âge	(HCNM) 5 % (1985) à 31 % (2015)	3 % (1980) à 21 % (2000)	1 % (1985) à 12 % (2020)
	max.	20 % variation d'âge	(HCNM) 13 % (1975) à 74 % (2015)	9 % (1975) 47 % (1995) 22 % (2020)	1 % (1980) à 38 % (2020)
VMP/classe de vitesse (artères; -3 % - fractions de véhicules à vitesse basse nulles 9 % - fractions de véhicules égales pour toutes les vitesses 14 % - augmentation de la fraction des véhicules à faible vitesse de 10 % 21 % - augmentation de la fraction des véhicules à faible vitesse de 20 % 29 % - augmentation de la fraction des véhicules à faible vitesse de 30 %)	min.	-3 % (circ. fluide / vitesses de période creuse toute la journée)	(HCNM) -3 %	Environ -1 %	-3 % à -0,5 %
	max.	29 % (congestion; c.-à-d., 30 % de véhicules circulant en période de pointe à vitesses plus faibles)	(HCNM) 35 % (1975) 33 % (1985) 39 % (2050)	21 % (1975) 13 % (2005) 15 % (2020)	5 % (1975) à 8 % (2050)
VMP/classe de vitesse (autoroutes; réduction de la fraction de véhicules des classes de vitesse élevée aux vitesses plus basses)	min.	-50 % (distribution égale des vitesses)	(HCNM) 12 % (1975) 10 % (2020) 11 % (2050)	+3 % (1975) -1 % (2000) 0 % (2050)	0 % (1975) -1 % (1995) -2 % (2005) 0 % (2050)
	max.	10 % (la plupart des véhicules aux vitesses plus élevées)	(HCNM) -4 % (1975) -3 % (1985) -4 % (2050)	-3 % (1975) -2 % (1995) -1 % (2020)	Environ -1 %

Tableau 6 : Analyse de sensibilité de MOBILE (suite)

COMMANDE	Variation des données d'entrée		Variation des émissions d'hydrocarbures	Variation des émissions de CO	Variation des émissions d'oxydes d'azote
Démarrages par jour (variation du nombre de démarrages par jour de -50 à +50 %, par paliers de 10 % pour chaque type de véhicule)	min.	-50 %	(HCNM) -17 % (2025) à -13 % (1975)	-16 % (1975) à -13 % (2025)	-10 % (1975) à -7 % (2025)
	max.	50 %	(HCNM) 17 % (2025) à 14 % (1975)	14 % (2025) à 15 % (1975)	10 % (1975) à 7 % (2025)
Distribution des démarrages	Comparaison des émissions des fractions de démarrages horaires par défaut à une fraction constante de démarrages pour chaque heure de la journée		(HCNM) 0 % (1975) à 3 % (2025)	1 % (1975) à 3 % (2025)	2 % (1975) à 1 % (2025)
Teneur en soufre (années civiles 1999 et antérieures)	min.	10 %	(HCNM) -0,2 % (1999) à 0 % (1975)	-14 % (1999) à 0 % (1975)	3 % (1999) à 0 % (1975)
	max.	-90 %	(HCNM) -4 % (1999) à 0 % (1975)	0,8 % (1999) à 0 % (1975)	0,3 % (1999) à 0 % (1975)
Température, moyenne quotidienne (cycle standard, et variation de la température moyenne quotidienne de 12 à 107 ^{o}F)	min.	12 ^{o}F	17 % (2025); 34 % (1995) -6 % (1975)	0 % (1975) à 162 % (2025)	41 % (1975) à 22 % (2025)
	max.	107 ^{o}F	11 % (2025) 26 % (1995) 31 % (1975	56 % (1975) à 3 % (2025)	-15 % (1975) à 7 % (2025)
Cycles de température (température moyenne gardée constante, et variation du cycle standard)	min.	Température constante (-100 %)	(HCNM) -3 % (1975, 42 ^{o}F) -2 % (1975, 102 ^{o}F) -8 % (2000, 82 ^{o}F) 1 % (2025, 42 ^{o}F) 3 % (2025,102 ^{o}F)	-11 % (1975, 102 ^{o}F) -1 % (1975, 42 ^{o}F) 6 % (2025, 42 ^{o}F) -1 % (2025, 102 ^{o}F)	1 % (1975, 42 ^{o}F) 4 % (1975, 102 ^{o}F) -1 % (2025, 102 ^{o}F)
	max.	Plage de température 34 ^{o}F (+42 %)	1 % (1975, 42 ^{o}F) 2 % (1975, 102 ^{o}F) 6 % (2005, 82 ^{o}F) 1 % (2025, 42 ^{o}F) 3 % (2025, 102 ^{o}F)	0 % (1975, 42 ^{o}F) 5 % (1975, 72 ^{o}F) 3 % (1975, 102 ^{o}F) -2 % (2025, 42 ^{o}F) 0 % (2025, 102 ^{o}F)	1 % (1975, 82 ^{o}F) à -1 % (2025, 72 ^{o}F)
Température, moyenne quotidienne et humidité [pour chacune d'une série de températures moyennes quotidiennes (42, 72, 82, 92, 102 et 107 ^{o}F), avec une plage de 24 ^{o}F (différence de 24 ^{o}F entre les températures minimale et maximale), on fait varier l'humidité absolue. Les résultats sur les émissions sont mesurés et comparés pour chaque température quotidienne moyenne avec une humidité absolue fixée à 53,7, 75, 98,5, 107 ou 149,5 grains/lb]	min.	-28 % (54 grains/lb)	(HCNM) < 0 % et > -1 % (toutes les températures et toutes les années)	< 1 % et > -1 % (toutes les températures et toutes les années)	5 % (2025) 3 % (2005) 3 % (2000) 5 % (1975)
	max.	100 % (150 grains/lb)	(HCNM) > 0 % et < 1 % (toutes les températures et toutes les années)	< 4 % et > 0 % (toutes les températures et toutes les années)	-12 % (2025) -7 % (2005) -6 % (2000) -12 % (1975)

Tableau 7 : Polluants de MOBILE à effets mineurs

Émissions de HC :	**Émissions de CO :**	**Émissions de NO_x :**
Humidité absolue	Humidité absolue	VMP par type d'installation
Climatisation	VMP par type d'installation	Programme sur les carburants / teneur en soufre*
VMP par type d'installation	Programme sur les carburants / teneur en soufre*	PVR du carburant
Programme sur les carburants / teneur en soufre*	Température horaire	Température horaire
Température horaire	Carburants oxygénés	Carburants oxygénés
Millage cumulé	Teneur en soufre*	Teneur en soufre*
Carburants oxygénés	Distribution des démarrages	Distribution des démarrages
Teneur en soufre*	Cycles de température	Cycles de température
Distribution des démarrages	Température et humidité	Température et humidité
Cycles de température		
Température et humidité		

4.2 Enquête sur les véhicules au Canada

La censuration est une opération importante de l'enquête par échantillonnage puisqu'elle permet de protéger la confidentialité des répondants. L'Enquête sur les véhicules au Canada (EVC) procède à cette censuration en regroupant les données recueillies en larges catégories à une ou deux dimensions (tableaux 8-10). L'opération entraîne la destruction d'une proportion importante des informations, mais il demeure possible d'inférer les propriétés probabilistes des variables individuelles. Les catégories agrégées de véhicules de l'EVC — < 4,5 tonnes (L), 4,5-15 tonnes (M) et > 15 tonnes (H) — sont subdivisées récursivement pour donner les 28 catégories de véhicules du modèle MOBILE (figure 5).[2] Ce cadre probabiliste pourra par ailleurs être ajusté à l'avenir si Environnement Canada obtient des données à plus haute résolution.

[2] Voir l'annexe A.3 – Catégories de véhicules du modèle Mobile, et équations 6 à 48 pour plus de détails.

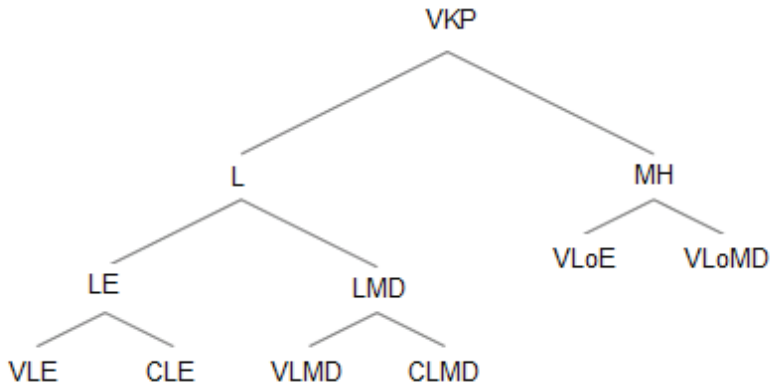


Figure 5 : Mise en correspondance des classes de véhicules de l'EVC avec celles du modèle MOBILE

Par exemple, si les nombres d'immatriculations albertaines dans les catégories VLE à CLMD 34 de MOBILE pour l'année de modèle courante sont des variables aléatoires inconnues, nous savons à tout le moins que leur somme est égale à la quantité connue C (AB,L,0) dont la valeur indiquée dans l'EVC s'établit à 133 386.

$$\mathcal{M}(AB,\ VLE\ ,0) + \mathcal{M}(AB,\ CLE\ ,0) + \mathcal{M}(AB,\ CLE\ 2,0) + \mathcal{M}(AB,\ CLE\ 3,0) + \mathcal{M}(AB,\ CLE\ 4,0) + \mathcal{M}(AB,\ VLMD\ ,0) + \mathcal{M}(AB,\ CLMD\ 12,0) + \mathcal{M}(AB,\ CLMD\ 34,0) \quad (3)$$

Tableau 8 : Tableau 4-1 de l'EVC

Tableau 4-1
Estimations du total au Canada du nombre de véhicules-kilomètres selon le type de véhicule et la juridiction

	Total, tous les véhicules	Véhicules jusqu'à 4,5 tonnes	Camions de 4,5 tonnes à 14,9 tonnes	Camions de 15 tonnes et plus
	millions			
Total - Canada	**326 144,9** A	**296 870,8** A	**7 437,6** B	**21 836,5** A
Terre-Neuve-et-Labrador	4 358,8 B	4 154,3 B	48,5 E	156,0 A
Île-du-Prince-Édouard	1 041,5 C	979,3 C	18,6 E	43,6 E
Nouvelle-Écosse	10 189,4 B	9 617,3 B	104,3 D	467,7 C
Nouveau-Brunswick	8 599,0 B	8 335,6 B	160,1 D	103,2 E
Québec	69 932,2 A	64 772,3 B	898,2 C	4 261,7 B
Ontario	130 391,6 A	120 464,9 A	1 544,0 C	8 382,8 B
Manitoba	11 973,0 B	10 256,5 B	157,7 D	1 558,9 B
Saskatchewan	11 194,3 B	9 432,5 B	468,5 D	1 293,3 C
Alberta	45 495,8 B	38 375,4 B	2 145,0 C	4 975,5 B
Colombie-Britannique	31 996,6 B	29 730,3 B	1 851,1 C	415,2 C
Yukon	536,2 B	398,7 B	27,8 D	109,7 C
Territoires du Nord-Ouest	380,5 B	304,7 B	10,7 E	65,1 D
Nunavut	56,0 D	49,1 D	F	F

Tableau 9 : Tableau 4-2 de l'EVC

Tableau 4-2
Estimations du total au Canada du nombre de véhicules-kilomètres selon le type de véhicule et l'année du véhicule

	Total, tous les véhicules	Véhicules jusqu'à 4,5 tonnes	Camions de 4,5 tonnes à 14,9 tonnes	Camions de 15 tonnes et plus
	millions			
Total, tous les âges du modèle du véhicule	**326 144,9** A	**296 870,8** A	**7 437,6** B	**21 836,5** A
Postérieur à 2003	69 380,7 A	58 785, 8 B	2 808,6 B	7 786,2 B
2001 à 2003	89 961,1 A	83 066,0 A	1 807,1 C	5 088,0 B
1997 à 2000	93 030,5 A	85 888,1 A	1 483,9 C	5 658,4 B
1993 à 1996	47 070,8 B	43 961,3 B	885,1 D	2 224,5 D
Antérieur à 1993	26 701,8 B	25 169,5 B	453,0 E	1 079,3 D

Tableau 10 : Tableau 4-4 de l'EVC

Tableau 4-4
Estimations du total au Canada du nombre de véhicules-kilomètres selon le type de véhicule et le type de carburant

	Total, tous les véhicules	Véhicules jusqu'à 4,5 tonnes	Camions de 4,5 à 14,9 tonnes	Camions de 15 tonnes et plus
	millions			
Total, tous les types de carburant	**326 144,9** A	**296 870,8** A	**7 437,6** B	**21 836,5** A
Essence	286 276,7 A	285 055,1 A	1 162,0 C	F
Diesel	38 245,0 A	10 261,4 C	6 236,2 B	21 747,4 A
Autre type de carburant	F	F	F	F

À l'avenir, si Environnement Canada obtient des données d'immatriculation détaillées par province, catégorie de véhicule de MOBILE et année de modèle, il sera possible de remplacer les variables aléatoires

$$\mathcal{M}(AB, \ \mathit{VLE} \ ;0), \ldots, \mathcal{M}(AB, \ \mathit{CLMD} \ 34{,}0) \tag{4}$$

dans ce modèle probabiliste par les quantités connues.

$$M(AB, \ \mathit{VLE} \ ;0), \ldots, M(AB, \ \mathit{CLMD} \ 34{,}0) \tag{5}$$

4.3 Résultats empiriques

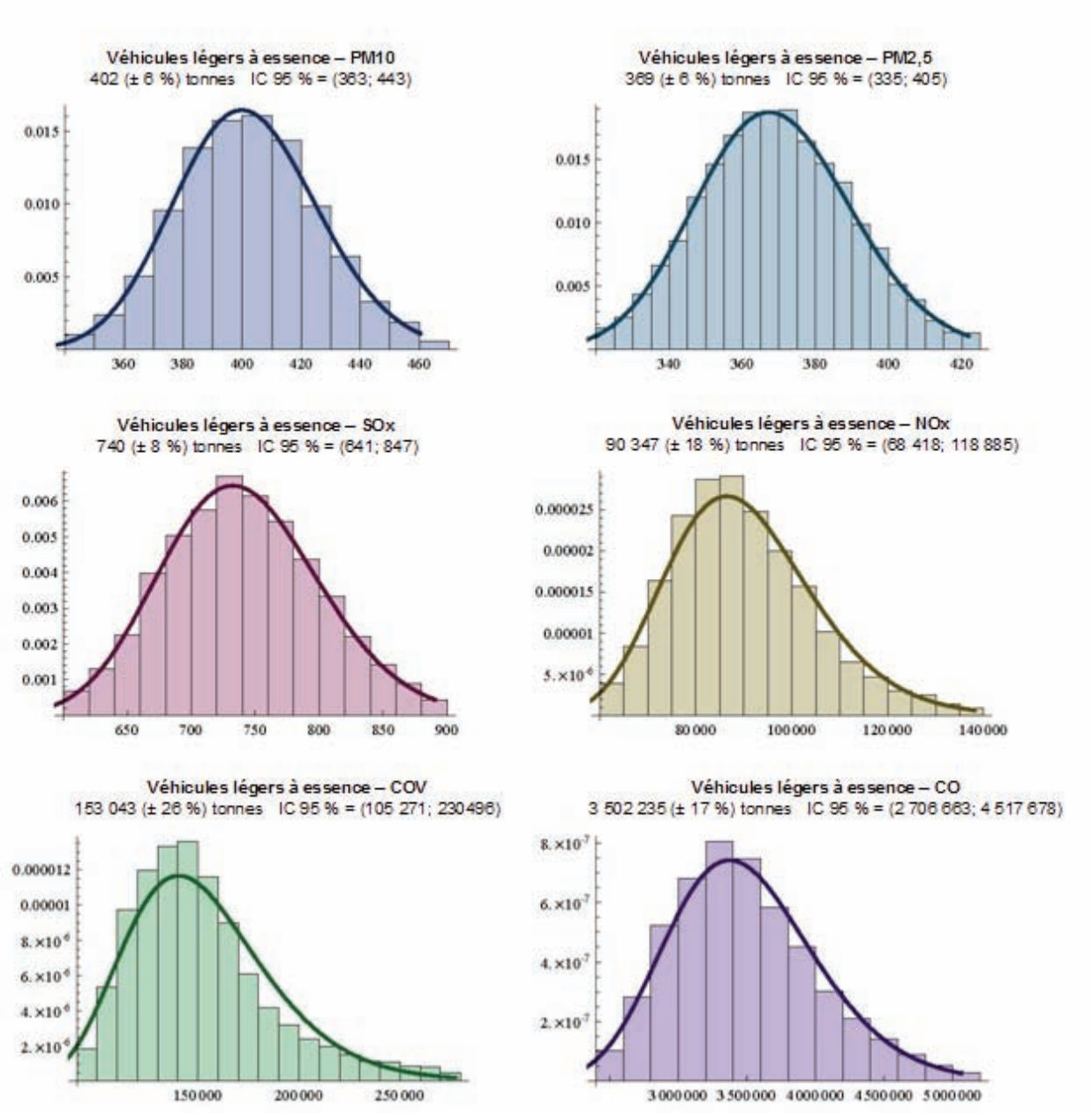


Figure 6 : Monte Carlo – Véhicules légers à essence (tonnes métriques)

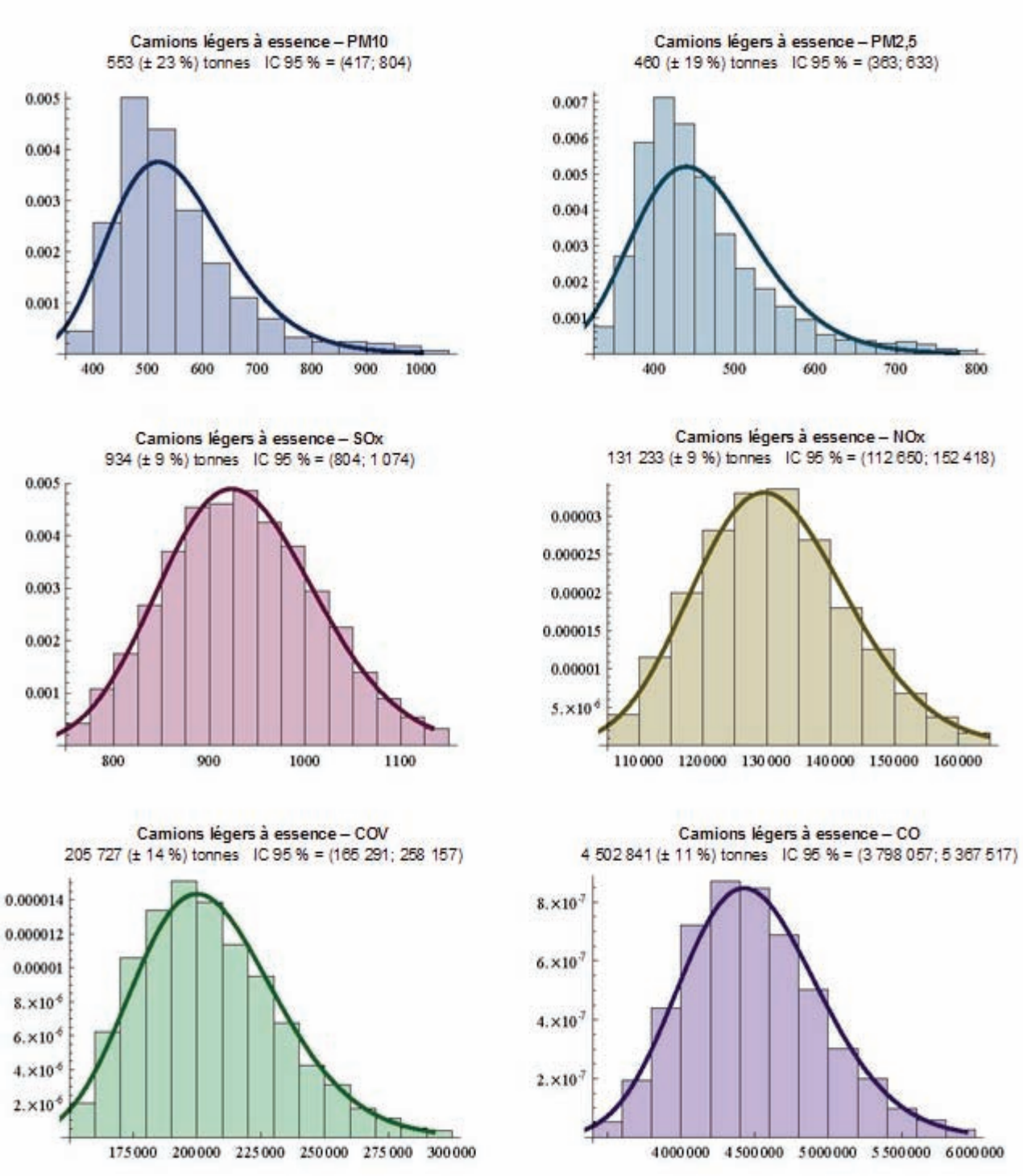


Figure 7 : Monte Carlo – Camions légers à essence (tonnes métriques)

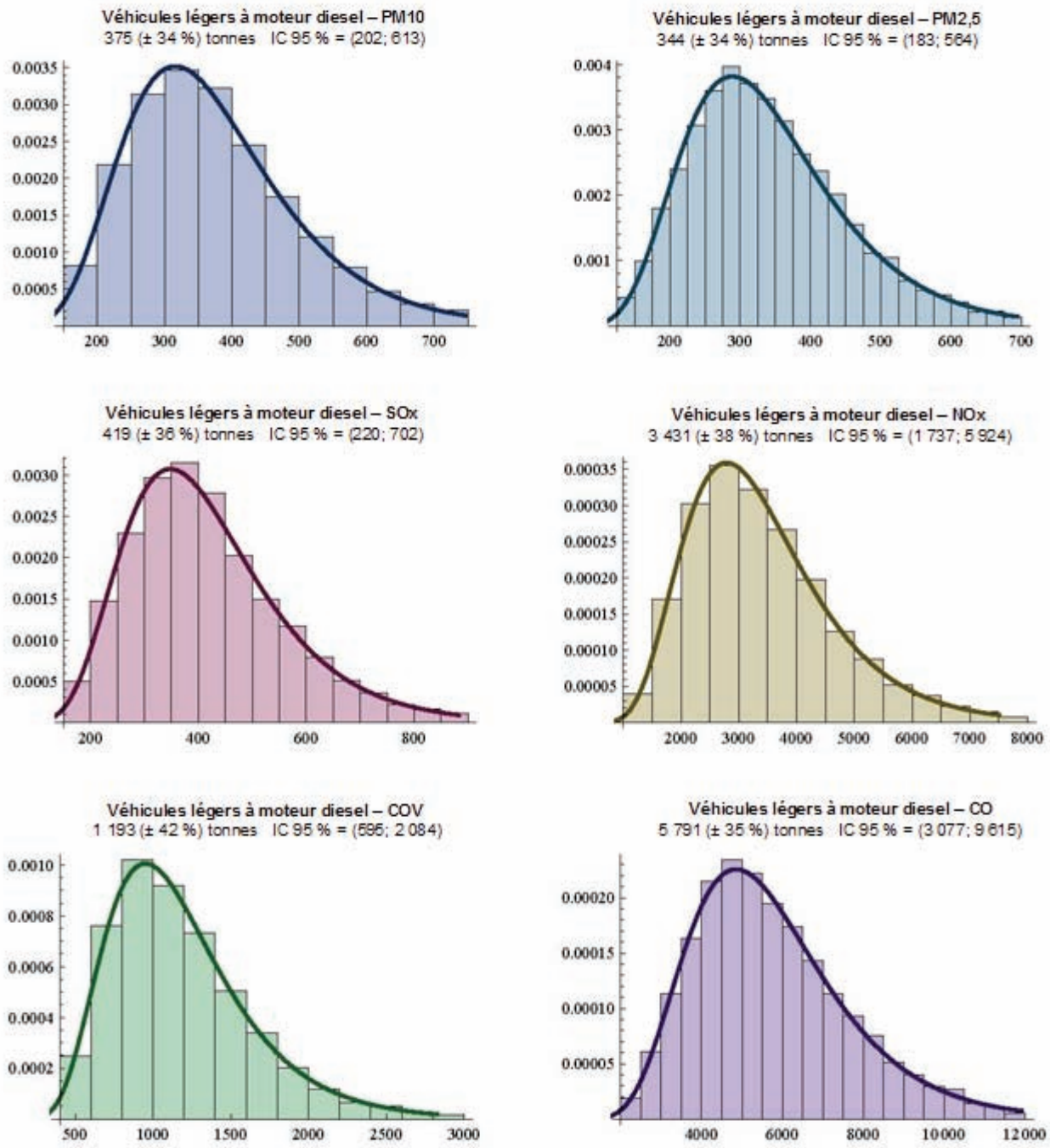


Figure 8 : Monte Carlo – Véhicules légers à moteur diesel (tonnes métriques)

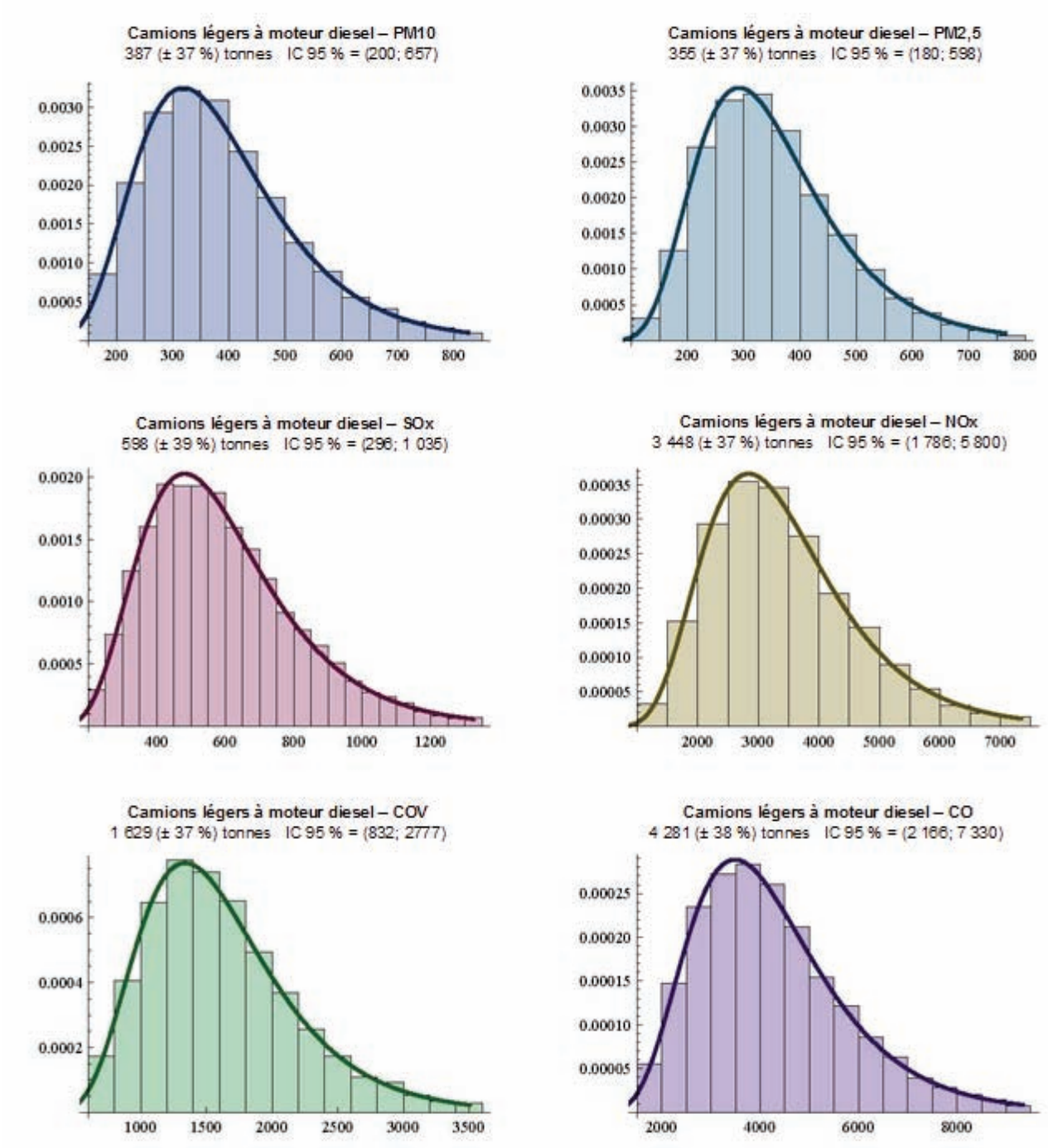


Figure 9 : Monte Carlo – Camions légers à moteur diesel (tonnes métriques)

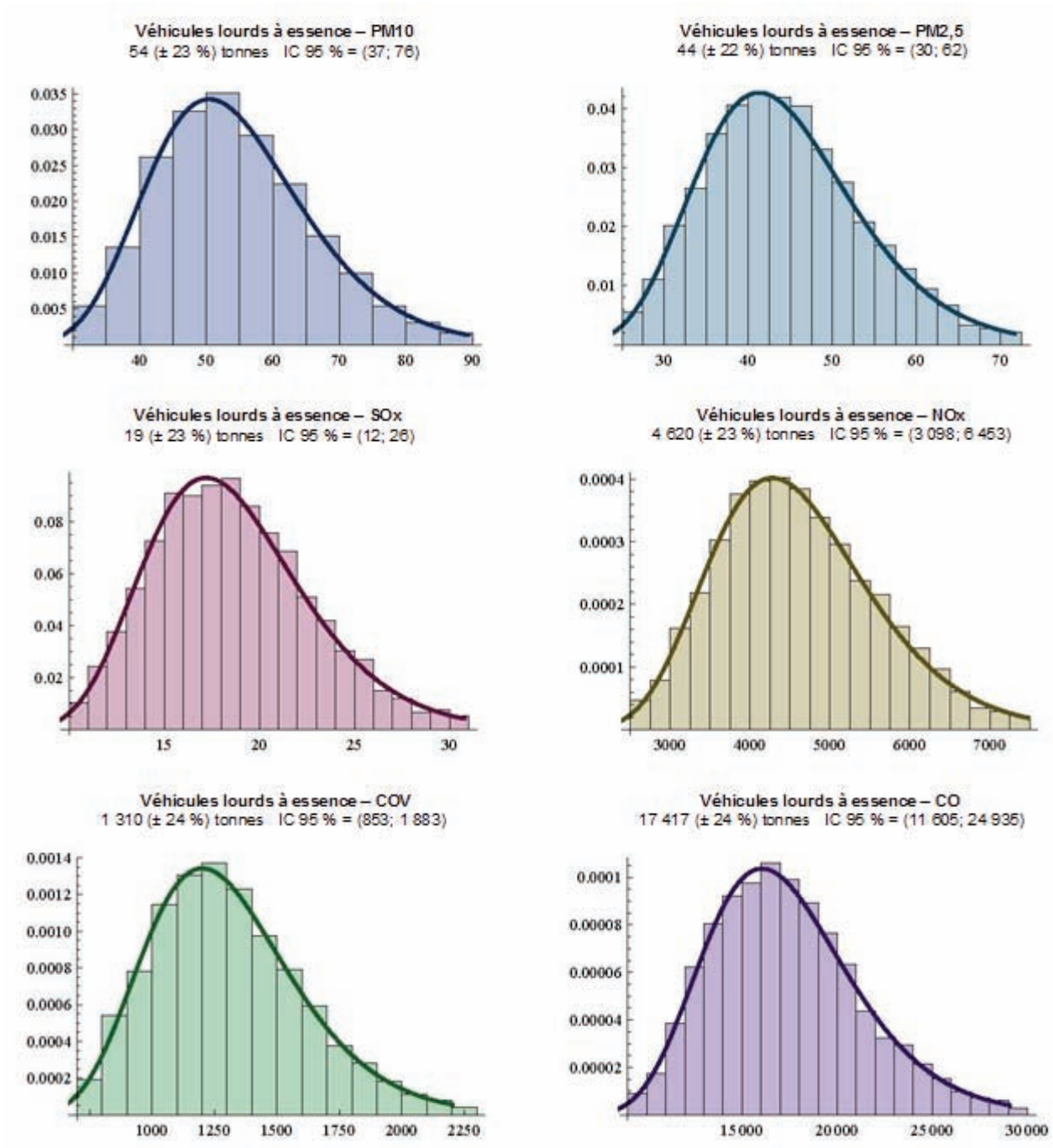


Figure 10 : Monte Carlo – Véhicules lourds à essence (tonnes métriques)

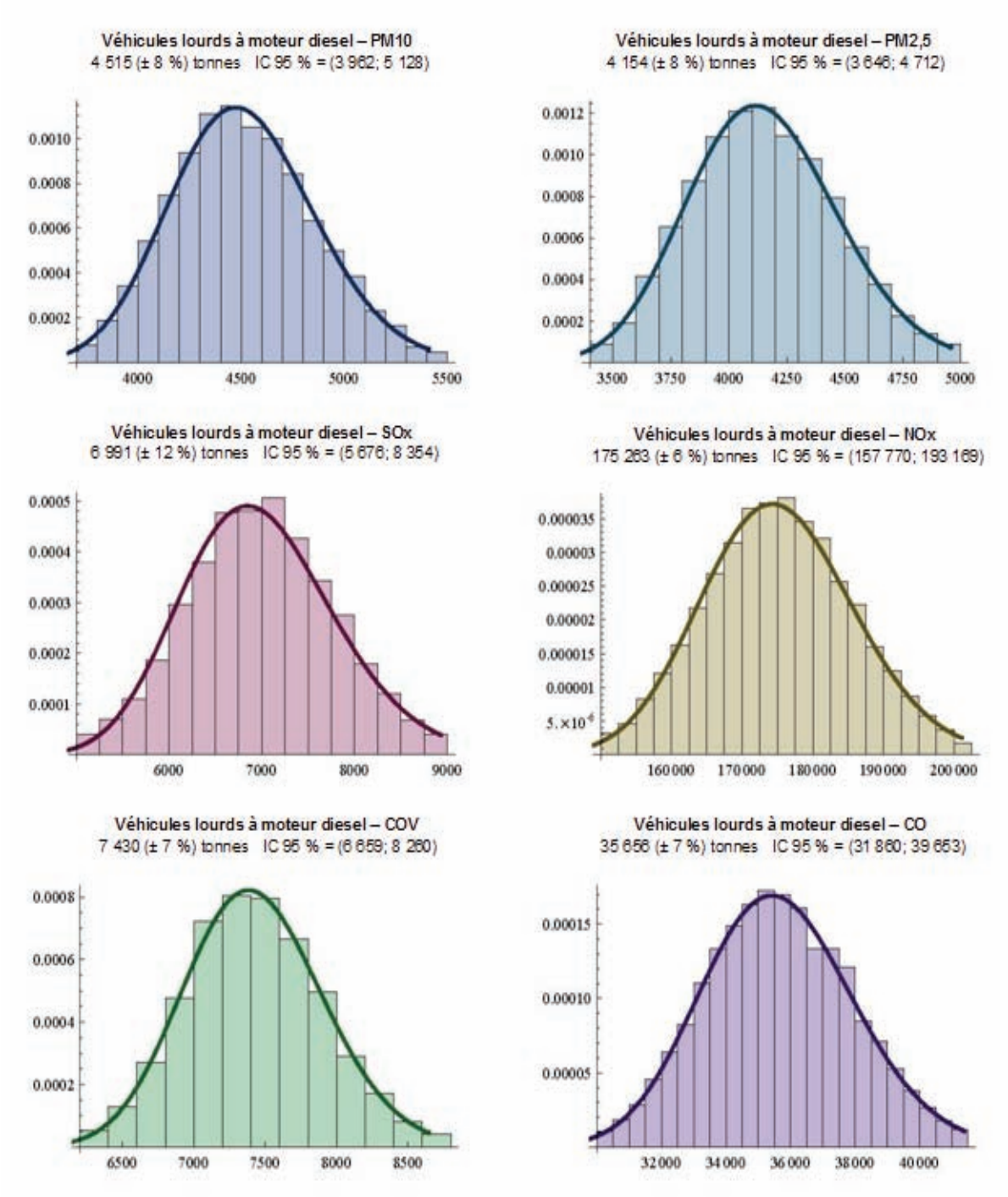


Figure 11 : Monte Carlo – Véhicules à moteur diesel (tonnes métriques)

5 Moteurs et équipements hors route

Ce sous-secteur englobe les émissions de PCA des moteurs, véhicules et équipements qui ne sont pas autorisés à être utilisés sur les chemins publics. Les types d'application hors route sont les petits moteurs à allumage commandé (p. ex., tondeuses et scies à chaîne), les gros moteurs à allumage commandé (p. ex., chariots élévateurs), les véhicules et moteurs à usage récréatif (p. ex., moteurs hors-bord, motomarines, motoneiges et motocyclettes hors route) et les moteurs diesel de la machinerie agricole et des équipements de construction, qui peuvent utiliser diverses sources d'énergie. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux moteurs à combustion interne. Les estimations d'émissions sont produites à l'échelle provinciale et territoriale, puis combinées pour donner des estimations nationales.

5.1 Modèle NONROAD

Le modèle NONROAD a été conçu par l'EPA pour estimer les émissions de tous les véhicules ou moteurs hors route (NONROAD, 2005; Harvey, 2006). Il inclut plus de 80 types de base et 260 types particuliers d'équipements et de véhicules hors route assortis chacun d'un code de classification des sources (CCS), qu'il subdivise encore par catégories de puissance (hp) et par type de carburant (diesel, essence, gaz de pétrole liquéfié (GPL) et gaz naturel comprimé (GNC)). On trouvera de plus amples informations sur l'adaptation canadienne du modèle NONROAD dans Cheminfo (2004) et Vaivads (2004a,b, 2005a,b, 2006).

Les estimations d'émissions provenant des équipements et véhicules hors route sont générées à l'aide d'une approche ascendante (figure 12). Les facteurs d'activité sont obtenus en multipliant le nombre d'heures par année par un facteur de charge et par une valeur de puissance nominale pour chaque CCS. Les facteurs d'émission tiennent compte de la distribution d'âge de l'équipement et des effets de la détérioration et de l'entretien au fil du temps. Les données sur les conditions météorologiques et le carburant servent de données d'entrée à la fois dans le modèle MOBILE (voir le tableau 6, section 4.1 pour plus de détails) et dans le modèle NONROAD. Comme le modèle MOBILE, le modèle NONROAD a besoin des valeurs minimales et maximales de la température quotidienne et des

caractéristiques du carburant pour calculer les facteurs de correction. Le modèle NONROAD applique également des facteurs de conversion des HC aux COV (EPA, 2005a), et des fractions $PM_{2,5}$ / PM_{10} de 0,92 pour l'essence et de 0,97 pour le diesel.

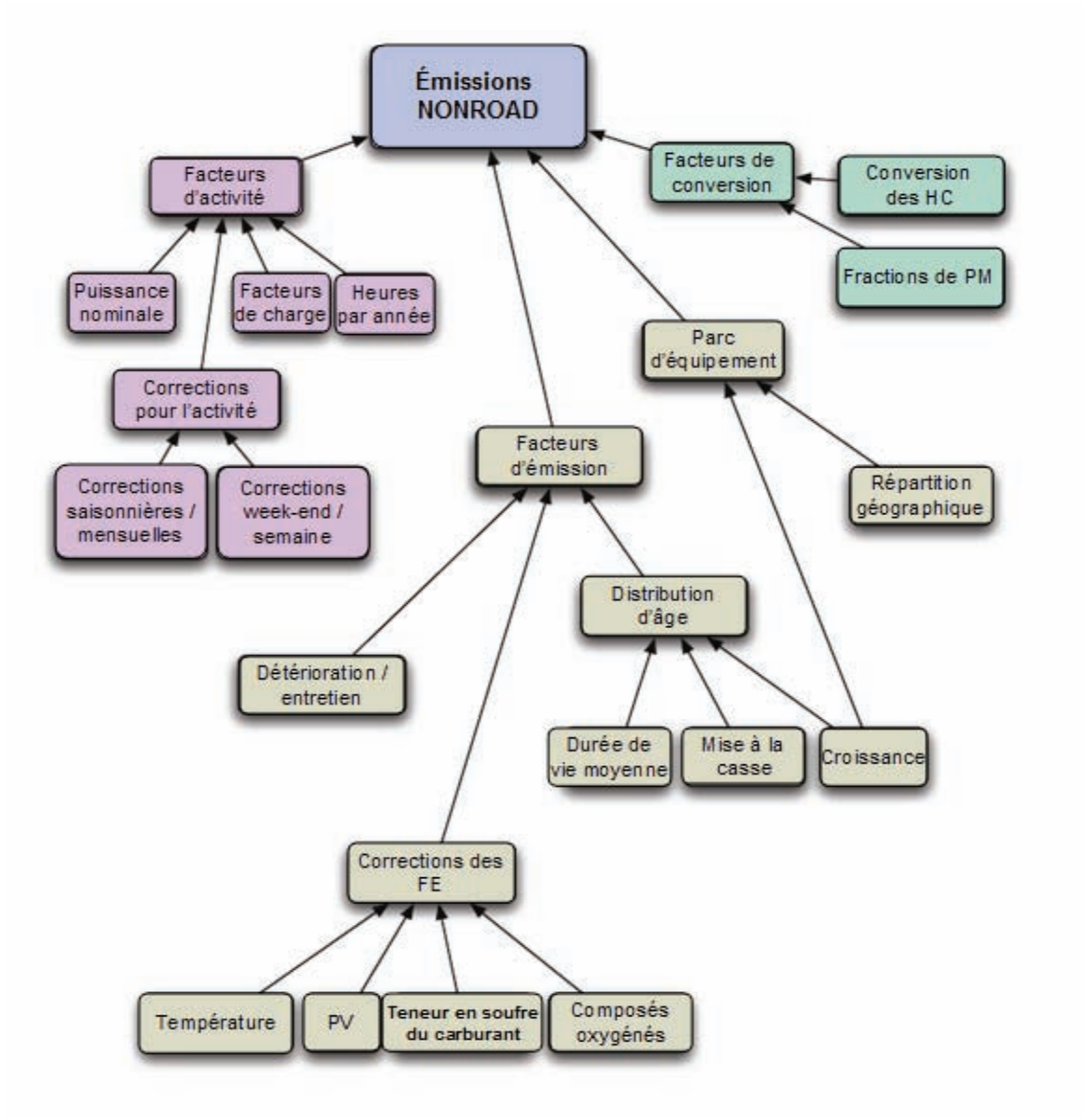


Figure 12 : Schéma du modèle NONROAD

Chi (2004) a effectué une analyse de sensibilité du modèle NONROAD et a déterminé les variables d'entrée qui ont des effets significatifs sur les émissions. Les résultats montrent qu'une croissance du parc d'équipement, de l'activité, du facteur de charge et du facteur d'émission a un effet important sur les estimations. Les

variances de la température ambiante, de la PVR, de la teneur en soufre du carburant (sauf pour les estimations des SO_x) et de la durée de vie utile ont un effet moins prononcé.

5.2 Estimations de la consommation de carburant

Le tableau 11 résume les estimations probabilistes descendantes de la consommation de carburant utilisées dans la présente analyse d'incertitude. Les estimations de la consommation d'essence et de diesel tirées de l'EVC de Statistique Canada (2005), et les indicateurs de la qualité de CANSIM (2008), sont soustraites des données sur les ventes de carburant fondées sur le recensement publiées dans le BDEE (2005) de Statistique Canada.

Tableau 11 : Estimations descendantes de la consommation de carburant du modèle NONROAD

	2002	2003	2004	2005
			mégalitres	
Total - ventes d'essence	39 599[A]	40 229[A]	40 993[A]	40 834[A]
Transport commercial et en commun	844[A]	890[A]	998[A]	1 105[A]
Ventes au détail (pompe)	34 985[A]	35 785[A]	36 576[A]	36 170[A]
Agriculture	1 501[A]	1 528[A]	1 441[A]	1 475[A]
Administration publique	197[A]	221[A]	236[A]	222[A]
Commerces et autres institutions	2 073[A]	1 805[A]	1 743[A]	1 862[A]
Soustraction : estimation de la consommation d'essence de l'ECV	32 681[A]	32 637[A]	31 045[D]	29 678[E]
Estimation de la consommation d'essence du modèle NONROAD	6 918[A]	7 592[A]	9 948[D]	11 156[E]
Total - ventes de carburant diesel	16 350[A]	17 594[A]	18 578[A]	19 484[A]
Transport commercial et en commun	6 027[A]	6 478[A]	6 576[A]	6 924[A]
Ventes au détail (pompe)	3 680[A]	3 943[A]	4 617[A]	4 639[A]
Agriculture	2 183[A]	2 258[A]	2 271[A]	2 271[A]
Administration publique	584[A]	690[A]	3 271[A]	802[A]
Commerces et autres utilisations	3 876[A]	4 226[A]	4 271[A]	4 848[A]
Soustraction : estimation de la consommation dediesel de l'ECV	10 262[B]	9 884[B]	9 455[B]	10 135[B]
Estimation de la consommation de diesel du modèle NONROAD	6 088[B]	7 710[B]	9 123[B]	9 349[B]

5.3 Facteurs d'émission

L'EPA (2004, NR-009c) décrit les facteurs d'émission de gaz d'échappement, les estimations des émissions du carter et la consommation spécifique de carburant par HP de puissance utile du modèle NONROAD utilisés pour les moteurs à allumage par compression (diesel). Les facteurs d'émission des moteurs à allumage commandé consommant de l'essence, du GNC ou du GPL sont traités dans le rapport NR-010e de l'EPA (2005b). Frey et Bammi (2002a, 2003) font état de degrés d'incertitude de 24 à 77 % pour les émissions de NO_x et de HC provenant des moteurs d'équipements d'entretien des pelouses et jardins, et de 15 à 49 % pour celles des moteurs d'équipements des secteurs de la construction, de l'agriculture et de l'industrie (CAI) (figures 13 et 14).

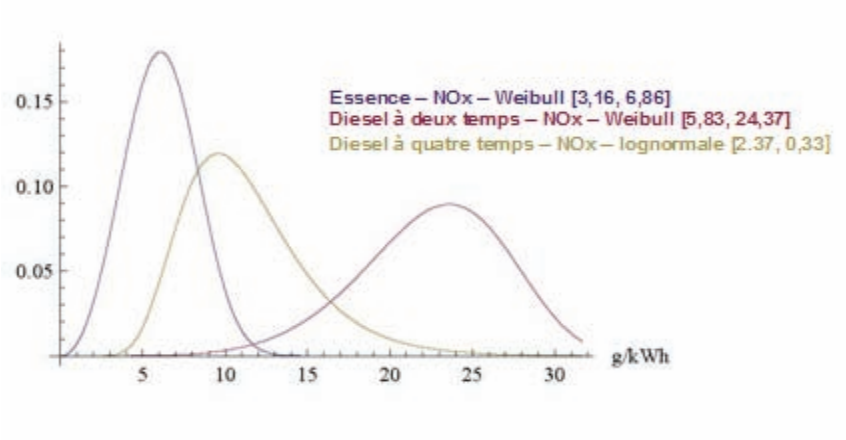


Figure 13 : Facteurs d'émission de NOx des moteurs CAI

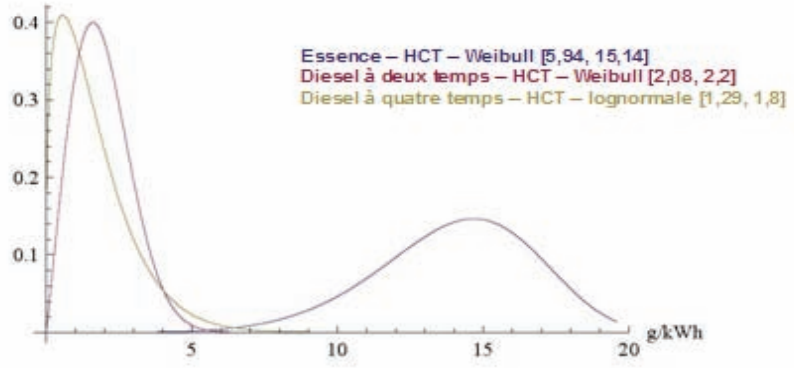


Figure 14 : Facteurs d'émission de HCT des moteurs CAI

5.4 Résultats empiriques

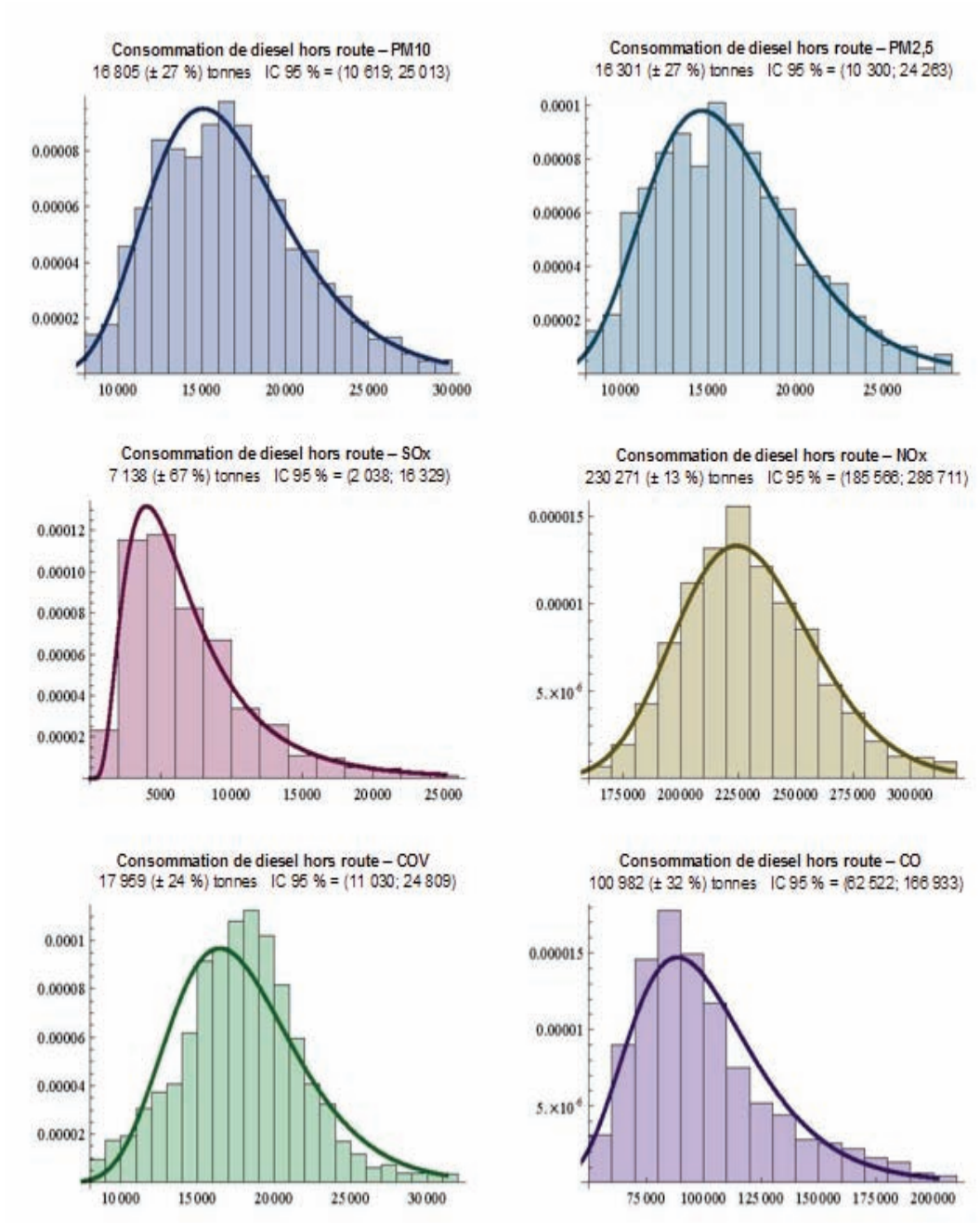


Figure 15 : Monte Carlo – Consommation de diesel hors route (tonnes métriques)

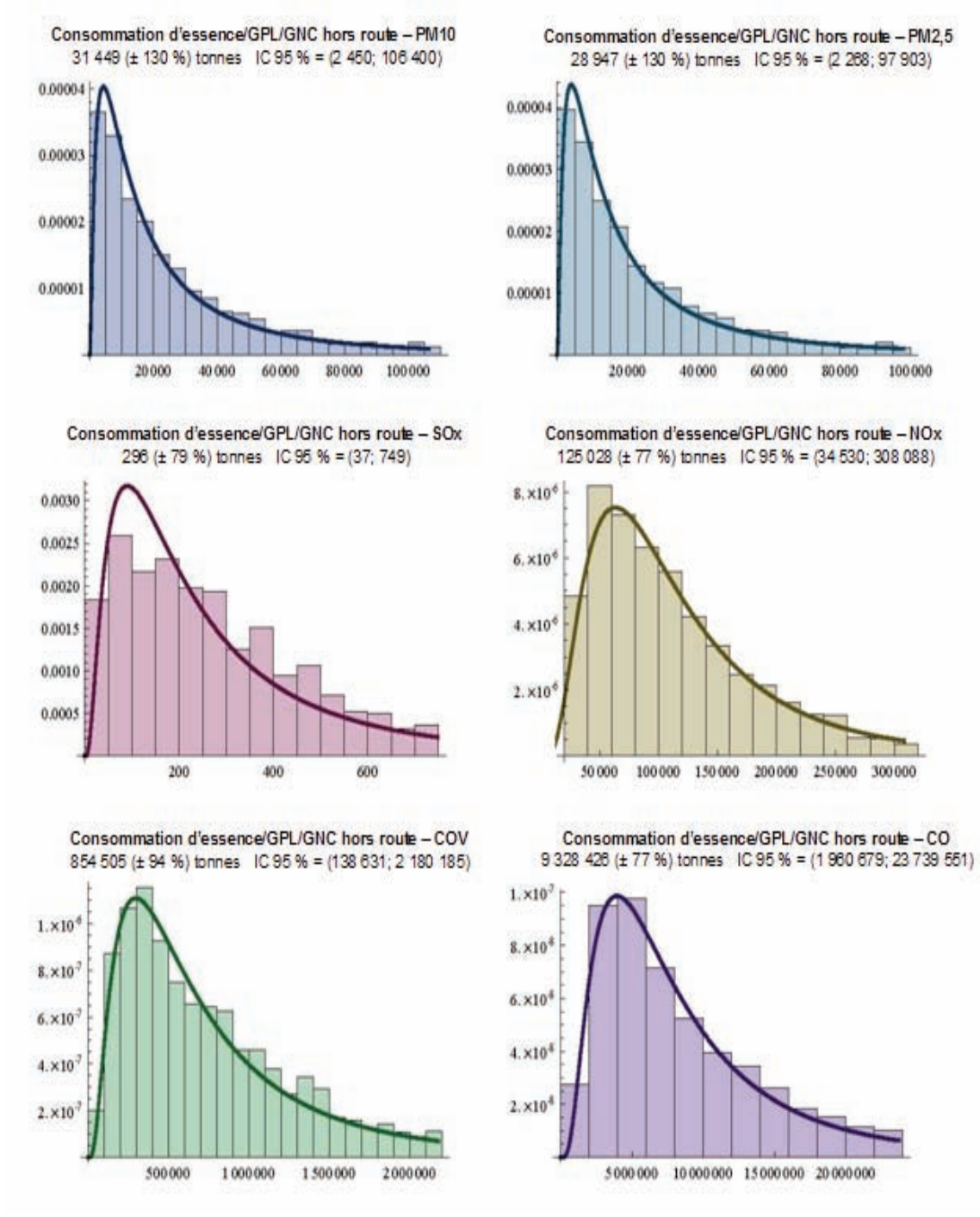


Figure 16 : Monte Carlo – Consommation d'essence/GPL/GNC hors route (tonnes métriques)

6 Locomotives

Ce sous-secteur englobe les émissions de PCA provenant des locomotives, à l'exclusion des équipements ferroviaires de soutien (pris en compte par le sous-secteur des moteurs hors route). Presque toutes les locomotives en usage en Amérique du Nord sont construites par deux entreprises : General Electric (Transportation Systems) et General Motors (Electromotive Division). Les nouvelles locomotives achetées par les compagnies de chemin de fer ont une durée de 30 à 40 ans; elles sont remises à neuf périodiquement pour maintenir le rendement de leurs moteurs (Sierra Research, 2004b).

La plupart des locomotives sont de type diesel-électrique, un moteur diesel entraînant une génératrice qui, à son tour, alimente des moteurs électriques de traction. Comme le moteur diesel n'assure pas directement la traction, sa vitesse est indépendante de la vitesse de la locomotive. Il utilise plutôt une série de réglages de puissance, ou réglages des gaz (« crans ») (Sierra Research, 2004b).

6.1 Facteurs d'émission

Par le passé, les facteurs d'émission et les niveaux d'activité ont été estimés ou calculés par l'Association des chemins de fer du Canada (ACFC) (LEM, 2000, 2002a,b, 2003, 2005, 2006). Ce sous-secteur était le seul pour lequel Environnement Canada ne jouissait pas d'une transparence totale ni de la maîtrise des estimations ou des paramètres d'entrée. Aux fins du présent rapport, les facteurs d'émission (tableaux 13 à 16) concernant la plus grande partie du parc canadien de locomotives ont été obtenus de diverses sources (Dunn et Eggleton, 2002; Fritz, 2004; Moshiri, 2006).

Les mesures des émissions des locomotives sont effectuées à chaque réglage de puissance, et on calcule les émissions moyennes à partir d'un régime de fonctionnement représentant le temps passé à chaque réglage, lequel diffère selon l'utilisation de la locomotive — service marchandises, service voyageurs ou manœuvre. Les locomotives utilisent généralement huit réglages de puissance, un ou deux réglages de ralenti et un ou deux réglages de freinage rhéostatique (FR)

(Sierra Research, 2004b). Le tableau 12 indique les régimes de fonctionnement publiés par l'EPA et l'ACFC.

La puissance au frein (bhp) est la mesure de la puissance du moteur sans la perte provoquée par la boîte de vitesse, le générateur, le différentiel, la pompe à eau, et d'autres composants auxiliaires tels que l'alternateur, la servodirection et le compresseur du climatiseur (Wikipédia, 2008).

Tableau 12 : Régime de fonctionnement des locomotives selon le type de service

	FR	Ralenti	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	Pourcentage du temps de fonctionnement du moteur									
EPA, activités de ligne	12,5	38,0	6,5	6,5	5,2	4,4	3,8	3,9	3,0	16,2
EPA, service voyageurs	6,2	47,4	7,0	5,1	5,7	4,7	4,0	2,9	1,4	15,6
EPA, manœuvre	0,0	59,8	12,4	12,3	5,8	3,6	3,6	1,5	0,2	0,8
ACFC, service marchandises	5,1	58,1	3,9	5,0	4,4	3,7	3,3	3,0	1,5	12,0
ACFC, service voyageurs	0,0	69,6	0,4	4,8	2,1	1,4	1,2	0,8	0,2	19,5
ACFC, manœuvre	0,0	83,0	4,1	4,0	3,6	2,0	1,0	0,5	0,3	1,5

Il s'agit donc d'une mesure de la puissance effective du moteur à l'arbre de commande, telle qu'obtenue au moyen d'un dynamomètre de moteur. La puissance réelle transmise aux roues est inférieure à cette valeur; l'utilisation du terme « frein » fait allusion à l'utilisation originale d'un frein manuel pour mesurer le couple pendant un essai, lequel est ensuite multiplié par le nombre de tours-minute et par une constante d'échelle pour donner une mesure de la puissance.

Les émissions à chaque réglage de puissance sont mesurées sous forme de taux — p. ex., en grammes par puissance au frein par heure (g/bhp-h). On mesure également le réglage de puissance en horse-power et le taux de consommation de carburant en livres ou en gallons par heure (Sierra Research, 2004b). On considère que le soufre présent dans le carburant est converti en SO_x pendant la combustion (Sierra Research, 2004a), et que les émissions de SO_x varient donc en rapport direct avec la teneur en soufre du carburant consommé. Les essais portant sur les émissions de NO_x utilisent des facteurs de correction tenant compte de la température de l'air d'admission du moteur et de l'humidité de l'air ambiant, tel que prescrit par le titre 40 du Code of Federal Regulations (CFR) de l'EPA (Moshiri, 2006). Toutefois, on n'utilise pas de facteur de correction des NO_x pour prendre en compte les variations des conditions atmosphériques survenant au cours d'une année donnée. Cela ajoute probablement un degré supplémentaire d'incertitude qui n'est pas quantifié dans le présent rapport.

Tableau 13 : Facteurs d'émission de NO_x des locomotives (par cran)

	Parc	FR	Ralenti	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		NO_x (grammes/litre)									
Service marchandises											
SD-40-2, 16-645E3, 3000 hp	590	59,6	67,8	77,2	61,9	61,0	60,3	60,5	56,7	54,7	55,1
AC4400CW, 16-7FDL, 4400 hp	376	61,6	28,5	36,7	41,1	55,1	62,5	41,6	42,1	40,1	35,4
Dash 9-44CM, 16-7FDL, 4400 hp	222	61,6	28,5	36,7	41,1	55,1	62,5	41,6	42,1	40,1	35,4
SD-75, 16-710G3C, 4300 hp	177	58,2	17,0	16,8	17,5	17,6	22,5	30,6	21,6	17,7	20,6
GP-38, 16-645, 2000 hp	130	49,8	71,4	60,7	57,9	65,9	68,7	70,3	75,0	76,4	74,5
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	81	49,8	71,4	60,7	57,9	65,9	68,7	70,3	75,0	76,4	74,5
ES44AC, 12-GEVO, 4360 hp	67	41,3	46,0	43,1	36,1	29,3	30,3	33,2	36,8	38,2	35,8
SD-60, 16-710G3, 3800 hp	61	43,4	90,9	63,9	60,5	55,9	56,5	55,8	61,8	69,4	62,9
SD-90, 16-710G3C, 4300 hp	61	58,2	17,0	16,8	17,5	17,6	22,5	30,6	21,6	17,7	20,6
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4000 hp	56	56,0	25,9	33,4	37,3	50,1	56,8	37,8	38,3	36,5	32,2
SD-50, 16-645F3B, 3600 hp	56	55,4	71,9	47,9	68,7	62,5	61,2	60,4	67,5	69,9	67,1
GP-38, 16-645, 2000 hp	47	49,8	71,4	60,7	57,9	65,9	68,7	70,3	75,0	76,4	74,5
SD-40-1, 16-645E3, 3000 hp	43	59,6	67,8	77,2	61,9	61,0	60,3	60,5	56,7	54,7	55,1
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4400 hp	25	61,6	28,5	36,7	41,1	55,1	62,5	41,6	42,1	40,1	35,4
SD-70, 16-710G3B, 4000 hp	25	47,6	47,6	46,3	46,0	50,8	53,5	55,3	65,0	75,2	66,7
GP-40, 16-645, 3000 hp	14	74,7	107,0	91,1	86,9	98,9	103,0	105,0	113,0	115,0	112,0
B39-8, 16-FDL16, 3900 hp	12	20,9	26,3	30,9	33,0	41,8	48,0	63,1	68,2	71,1	65,9
C30-7, 16-7FDL, 3000 hp	12	42,0	19,4	25,0	28,0	37,6	42,6	28,4	28,7	27,4	24,1
SD-40, 16-645D3A, 2250 hp	10	44,6	62,5	47,5	46,7	45,2	44,7	43,7	41,5	41,1	47,6
GP-40-2, 16-645, 3000 hp	8	74,7	107,0	91,1	86,9	98,9	103,0	105,0	113,0	115,0	112,0
Moyenne pondérée		*57,2*	*49,2*	*51,6*	*48,4*	*53,4*	*56,6*	*51,2*	*50,4*	*49,3*	*47,5*
Manœuvre											
GP-9, 16-645, 1750 hp	190	43,6	62,4	53,1	50,7	57,7	60,1	61,5	65,7	66,8	65,2
GP-9, 16-645, 1800 hp	163	44,8	64,2	54,7	52,2	59,3	61,8	63,3	67,5	68,7	67,1
GMD1, 12-645, 1200 hp	41	62,5	55,6	44,3	42,8	50,1	57,6	62,4	62,9	60,6	55,9
GP-38, 16-645, 2000 hp	29	49,8	71,4	60,7	57,9	65,9	68,7	70,3	75,0	76,4	74,5
SD-40-2, 16-645, 3000 hp	25	74,7	107,0	91,1	86,9	98,9	103,0	105,0	113,0	115,0	112,0
GP-9, 16-645, 1700 hp	17	42,4	60,7	51,6	49,3	56,0	58,4	59,8	63,8	64,9	63,3
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	9	49,8	71,4	60,7	57,9	65,9	68,7	70,3	75,0	76,4	74,5
Moyenne pondérée		*47,8*	*65,5*	*55,5*	*53,0*	*60,4*	*63,3*	*65,2*	*69,2*	*70,2*	*68,2*
Service voyageurs											
F59PH, 12-710G3, 3000 hp	61	36,2	57,6	55,7	61,3	58,1	51,8	47,2	43,0	46,9	45,9
FP40PH2, 16-645E3C, 3000 hp	54	59,6	67,8	77,2	61,9	61,0	60,3	60,5	56,7	54,7	55,1
P42DC, 16-7FDL, 4250 hp	21	59,5	27,6	35,5	39,7	53,2	60,4	40,2	40,7	38,8	34,2
Moyenne pondérée		*49,1*	*57,0*	*61,1*	*58,2*	*58,5*	*56,5*	*51,4*	*48,1*	*48,7*	*47,7*

Tableau 14 : Facteurs d'émission de CO des locomotives (par cran)

	Parc	FR	Ralenti	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		CO (grammes/litre)									
Service marchandises											
SD-40-2, 16-645E3, 3000 hp	590	10,43	27,56	12,68	4,13	3,01	2,41	4,46	7,03	10,45	9,93
AC4400CW, 16-7FDL, 4400 hp	376	18,02	8,3	2,17	2,19	4,34	7,59	9,46	8,94	8,02	8,15
Dash 9-44CM, 16-7FDL, 4400 hp	222	18,02	8,3	2,17	2,19	4,34	7,59	9,46	8,94	8,02	8,15
SD-75, 16-710G3C, 4300 hp	177	15,61	2,95	0,76	0,63	0,63	0,79	1,14	3,07	8,09	6,54
GP-38, 16-645, 2000 hp	130	12,43	16,2	8,03	5,74	3,48	2,65	2,5	2,98	4,57	8,52
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	81	12,43	16,2	8,03	5,74	3,48	2,65	2,5	2,98	4,57	8,52
ES44AC, 12-GEVO, 4360 hp	67	7,76	5,22	3,92	4,36	4,45	3,44	2,03	1,44	1,44	0,7
SD-60, 16-710G3, 3800 hp	61	4,54	7,94	2,66	2,1	1,85	4,28	6,81	7,85	4,08	3,86
SD-90, 16-710G3C, 4300 hp	61	15,61	2,95	0,76	0,63	0,63	0,79	1,14	3,07	8,09	6,54
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4000 hp	56	16,39	7,55	1,97	1,99	3,94	6,9	8,6	8,13	7,29	7,41
SD-50, 16-645F3B, 3600 hp	56	9,25	18,73	9,43	3,69	3,79	3,49	5,92	6,4	7,04	6,63
GP-38, 16-645, 2000 hp	47	12,43	16,2	8,03	5,74	3,48	2,65	2,5	2,98	4,57	8,52
SD-40-1, 16-645E3, 3000 hp	43	10,43	27,56	12,68	4,13	3,01	2,41	4,46	7,03	10,45	9,93
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4400 hp	25	18,02	8,3	2,17	2,19	4,34	7,59	9,46	8,94	8,02	8,15
SD-70, 16-710G3B, 4000 hp	25	5,84	5,84	3,08	2,7	1,98	6,48	10,18	10,34	5,39	5,49
GP-40, 16-645, 3000 hp	14	18,64	24,3	12,05	8,61	5,23	3,98	3,75	4,47	6,86	12,77
B39-8, 16-FDL16, 3900 hp	12	28,95	41,83	8,58	6,57	6,72	8,97	10,58	11,6	9,53	7,56
C30-7, 16-7FDL, 3000 hp	12	12,29	5,66	1,48	1,49	2,96	5,17	6,45	6,1	5,47	5,56
SD-40, 16-645D3A, 2250 hp	10	10,47	24,46	11,62	4,46	3,51	3,07	4,24	7,79	12,96	17,69
GP-40-2, 16-645, 3000 hp	8	18,64	24,3	12,05	8,61	5,23	3,98	3,75	4,47	6,86	12,77
Moyenne pondérée		*13,58*	*15,1*	*6,4*	*3,25*	*3,29*	*4,17*	*5,59*	*6,54*	*7,94*	*8,17*
Manœuvre											
GP-9, 16-645, 1750 hp	190	10,87	14,17	7,03	5,02	3,05	2,32	2,19	2,61	4	7,45
GP-9, 16-645, 1800 hp	163	11,18	14,58	7,23	5,17	3,14	2,39	2,25	2,68	4,12	7,66
GMD1, 12-645, 1200 hp	41	6,41	10,2	6,52	4,53	2,98	2,09	1,84	2,37	5,78	13,28
GP-38, 16-645, 2000 hp	29	12,43	16,2	8,03	5,74	3,48	2,65	2,5	2,98	4,57	8,52
SD-40-2, 16-645, 3000 hp	25	18,64	24,3	12,05	8,61	5,23	3,98	3,75	4,47	6,86	12,77
GP-9, 16-645, 1700 hp	17	10,56	13,77	6,83	4,88	2,96	2,25	2,13	2,53	3,89	7,24
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	9	12,43	16,2	8,03	5,74	3,48	2,65	2,5	2,98	4,57	8,52
Moyenne pondérée		*11,12*	*14,65*	*7,39*	*5,27*	*3,22*	*2,43*	*2,28*	*2,74*	*4,39*	*8,39*
Service voyageurs											
F59PH, 12-710G3, 3000 hp	61	4,54	6,72	2,36	2,83	1,38	1,8	3,65	5,88	4,34	4,06
FP40PH2, 16-645E3C, 3000 hp	54	10,43	27,56	12,68	4,13	3,01	2,41	4,46	7,03	10,45	9,93
P42DC, 16-7FDL, 4250 hp	21	17,41	8,02	2,09	2,11	4,19	7,33	9,14	8,64	7,75	7,87
Moyenne pondérée		*8,87*	*15,19*	*6,42*	*3,24*	*2,46*	*2,89*	*4,82*	*6,76*	*7,29*	*6,98*

Tableau 15 : Facteurs d'émission de HC des locomotives (par cran)

	Parc	FR	Ralenti	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		HC (grammes/litre)									
Service marchandises											
SD-40-2, 16-645E3, 3000 hp	590	4,60	9,07	6,01	2,43	1,81	1,66	1,57	1,61	1,74	1,84
AC4400CW, 16-7FDL, 4400 hp	376	7,55	4,75	1,51	1,19	1,33	1,15	0,92	0,91	0,86	0,81
Dash 9-44CM, 16-7FDL, 4400 hp	222	7,55	4,75	1,51	1,19	1,33	1,15	0,92	0,91	0,86	0,81
SD-75, 16-710G3C, 4300 hp	177	6,08	0,24	0,12	0,11	0,09	0,13	0,13	0,13	0,12	0,16
GP-38, 16-645, 2000 hp	130	4,78	7,10	4,05	2,01	1,53	1,45	1,54	1,52	1,68	1,73
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	81	4,78	7,10	4,05	2,01	1,53	1,45	1,54	1,52	1,68	1,73
ES44AC, 12-GEVO, 4360 hp	67	4,85	4,40	2,07	2,06	1,53	1,31	1,02	0,94	0,79	0,77
SD-60, 16-710G3, 3800 hp	61	4,83	7,44	2,72	2,03	1,54	1,43	1,34	1,37	1,49	1,63
SD-90, 16-710G3C, 4300 hp	61	6,08	0,24	0,12	0,11	0,09	0,13	0,13	0,13	0,12	0,16
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4000 hp	56	6,86	4,32	1,37	1,08	1,21	1,04	0,83	0,83	0,78	0,74
SD-50, 16-645F3B, 3600 hp	56	5,05	7,99	4,16	2,40	1,77	1,60	1,56	1,51	1,68	1,71
GP-38, 16-645, 2000 hp	47	4,78	7,10	4,05	2,01	1,53	1,45	1,54	1,52	1,68	1,73
SD-40-1, 16-645E3, 3000 hp	43	4,60	9,07	6,01	2,43	1,81	1,66	1,57	1,61	1,74	1,84
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4400 hp	25	7,55	4,75	1,51	1,19	1,33	1,15	0,92	0,91	0,86	0,81
SD-70, 16-710G3B, 4000 hp	25	6,98	6,98	2,96	2,07	1,42	1,21	1,13	1,19	1,26	1,36
GP-40, 16-645, 3000 hp	14	7,17	10,65	6,07	3,01	2,30	2,17	2,31	2,28	2,52	2,60
B39-8, 16-FDL16, 3900 hp	12	21,92	40,64	5,38	3,43	2,30	1,46	1,42	1,53	1,53	1,41
C30-7, 16-7FDL, 3000 hp	12	5,15	3,24	1,03	0,81	0,91	0,78	0,62	0,62	0,58	0,55
SD-40, 16-645D3A, 2250 hp	10	5,55	8,24	5,30	3,03	2,35	1,86	1,86	1,68	1,76	1,81
GP-40-2, 16-645, 3000 hp	8	7,17	10,65	6,07	3,01	2,30	2,17	2,31	2,28	2,52	2,60
Moyenne pondérée		*5,93*	*6,29*	*3,27*	*1,68*	*1,40*	*1,26*	*1,16*	*1,16*	*1,21*	*1,24*
Manœuvre											
GP-9, 16-645, 1750 hp	190	4,19	6,21	3,54	1,76	1,34	1,26	1,35	1,33	1,47	1,51
GP-9, 16-645, 1800 hp	163	4,30	6,39	3,64	1,81	1,38	1,30	1,39	1,37	1,51	1,56
GMD1, 12-645, 1200 hp	41	2,66	5,58	3,33	1,80	1,27	1,14	1,21	1,32	1,44	1,55
GP-38, 16-645, 2000 hp	29	4,78	7,10	4,05	2,01	1,53	1,45	1,54	1,52	1,68	1,73
SD-40-2, 16-645, 3000 hp	25	7,17	10,65	6,07	3,01	2,30	2,17	2,31	2,28	2,52	2,60
GP-9, 16-645, 1700 hp	17	4,07	6,03	3,44	1,71	1,30	1,23	1,31	1,29	1,43	1,47
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	9	4,78	7,10	4,05	2,01	1,53	1,45	1,54	1,52	1,68	1,73
Moyenne pondérée		*4,30*	*6,52*	*3,73*	*1,86*	*1,41*	*1,33*	*1,41*	*1,40*	*1,55*	*1,61*
Service voyageurs											
F59PH, 12-710G3, 3000 hp	61	5,51	3,83	1,39	1,13	0,97	1,04	1,09	1,20	1,60	1,40
FP40PH2, 16-645E3C, 3000 hp	54	4,60	9,07	6,01	2,43	1,81	1,66	1,57	1,61	1,74	1,84
P42DC, 16-7FDL, 4250 hp	21	7,29	4,59	1,46	1,15	1,28	1,11	0,88	0,88	0,83	0,79
Moyenne pondérée		*5,42*	*6,03*	*3,24*	*1,65*	*1,35*	*1,30*	*1,25*	*1,31*	*1,53*	*1,48*

Tableau 16 : Facteurs d'émission de PM des locomotives (par cran)

	Parc	FR	Ralenti	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		PM (grammes/litre)									
Service marchandises											
SD-40-2, 16-645E3, 3000 hp	590	1,59	2,73	1,65	1,63	1,53	1,32	1,26	1,36	1,26	1,31
AC4400CW, 16-7FDL, 4400 hp	376	3,42	2,29	1,64	0,53	1,94	1,00	1,30	0,91	0,82	0,73
Dash 9-44CM, 16-7FDL, 4400 hp	222	3,42	2,29	1,64	0,53	1,94	1,00	1,30	0,91	0,82	0,73
SD-75, 16-710G3C, 4300 hp	177	3,64	0,78	2,34	2,26	3,38	2,93	2,19	2,68	2,92	4,01
GP-38, 16-645, 2000 hp	130	1,28	2,17	1,03	1,47	1,51	1,17	1,11	1,35	1,19	1,30
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	81	1,28	2,17	1,03	1,47	1,51	1,17	1,11	1,35	1,19	1,30
ES44AC, 12-GEVO, 4360 hp	67	2,00	1,55	0,78	0,87	0,76	0,55	0,68	0,50	0,43	0,35
SD-60, 16-710G3, 3800 hp	61	1,74	2,60	1,34	1,53	1,54	1,36	1,34	1,53	1,34	1,39
SD-90, 16-710G3C, 4300 hp	61	3,64	0,78	2,34	2,26	3,38	2,93	2,19	2,68	2,92	4,01
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4000 hp	56	3,11	2,09	1,49	0,48	1,76	0,90	1,18	0,83	0,74	0,66
SD-50, 16-645F3B, 3600 hp	56	1,59	2,72	1,65	1,63	1,53	1,32	1,26	1,36	1,26	1,31
GP-38, 16-645, 2000 hp	47	1,28	2,17	1,03	1,47	1,51	1,17	1,11	1,35	1,19	1,30
SD-40-1, 16-645E3, 3000 hp	43	1,59	2,73	1,65	1,63	1,53	1,32	1,26	1,36	1,26	1,31
Dash 8-40CM, 16-7FDL, 4400 hp	25	3,42	2,29	1,64	0,53	1,94	1,00	1,30	0,91	0,82	0,73
SD-70, 16-710G3B, 4000 hp	25	1,79	1,79	0,85	1,05	1,35	1,69	1,64	1,47	1,40	1,47
GP-40, 16-645, 3000 hp	14	1,92	3,26	1,55	2,21	2,26	1,76	1,66	2,02	1,79	1,96
B39-8, 16-FDL16, 3900 hp	12	9,74	19,38	3,10	2,18	2,26	1,70	1,08	1,01	1,03	0,97
C30-7, 16-7FDL, 3000 hp	12	2,33	1,56	1,12	0,36	1,32	0,68	0,89	0,62	0,56	0,50
SD-40, 16-645D3A, 2250 hp	10	2,80	3,23	2,95	2,75	2,66	2,62	2,58	2,56	2,55	2,54
GP-40-2, 16-645, 3000 hp	8	1,92	3,26	1,55	2,21	2,26	1,76	1,66	2,02	1,79	1,96
Moyenne pondérée		*2,46*	*2,33*	*1,61*	*1,29*	*1,86*	*1,37*	*1,35*	*1,35*	*1,28*	*1,41*
Manœuvre											
GP-9, 16-645, 1750 hp	190	1,12	1,90	0,90	1,29	1,32	1,03	0,97	1,18	1,04	1,14
GP-9, 16-645, 1800 hp	163	1,15	1,96	0,93	1,32	1,36	1,06	1,00	1,21	1,07	1,17
GMD1, 12-645, 1200 hp	41	1,03	1,75	0,82	1,17	1,21	0,94	0,89	1,08	0,96	1,04
GP-38, 16-645, 2000 hp	29	1,28	2,17	1,03	1,47	1,51	1,17	1,11	1,35	1,19	1,30
SD-40-2, 16-645, 3000 hp	25	1,92	3,26	1,55	2,21	2,26	1,76	1,66	2,02	1,79	1,96
GP-9, 16-645, 1700 hp	17	1,09	1,85	0,88	1,25	1,28	1,00	0,94	1,14	1,02	1,11
GP-38-2, 16-645, 2000 hp	9	1,28	2,17	1,03	1,47	1,51	1,17	1,11	1,35	1,19	1,30
Moyenne pondérée		*1,18*	*2,00*	*0,95*	*1,35*	*1,39*	*1,08*	*1,02*	*1,24*	*1,10*	*1,20*
Service voyageurs											
F59PH, 12-710G3, 3000 hp	61	0,92	1,18	0,63	1,35	1,36	1,07	1,00	1,19	1,07	1,17
FP40PH2, 16-645E3C, 3000 hp	54	1,59	2,73	1,65	1,63	1,53	1,32	1,26	1,36	1,26	1,31
P42DC, 16-7FDL, 4250 hp	21	3,30	2,22	1,59	0,51	1,87	0,96	1,25	0,88	0,79	0,71
Moyenne pondérée		*1,55*	*1,96*	*1,18*	*1,33*	*1,51*	*1,15*	*1,14*	*1,21*	*1,10*	*1,16*

6.2 Résultats empiriques

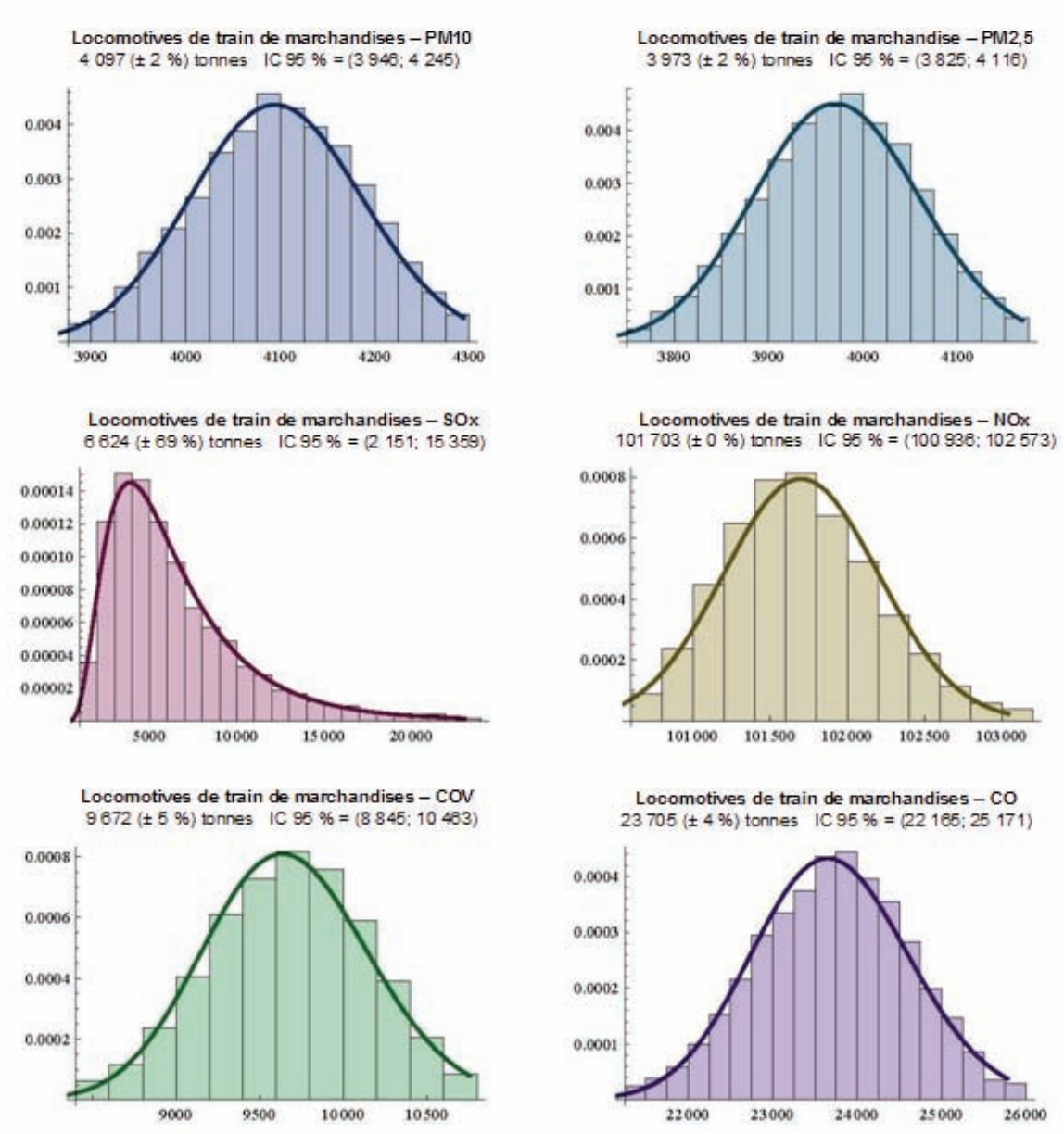


Figure 17 : Monte Carlo - Locomotives de train de marchandises (tonnes métriques)

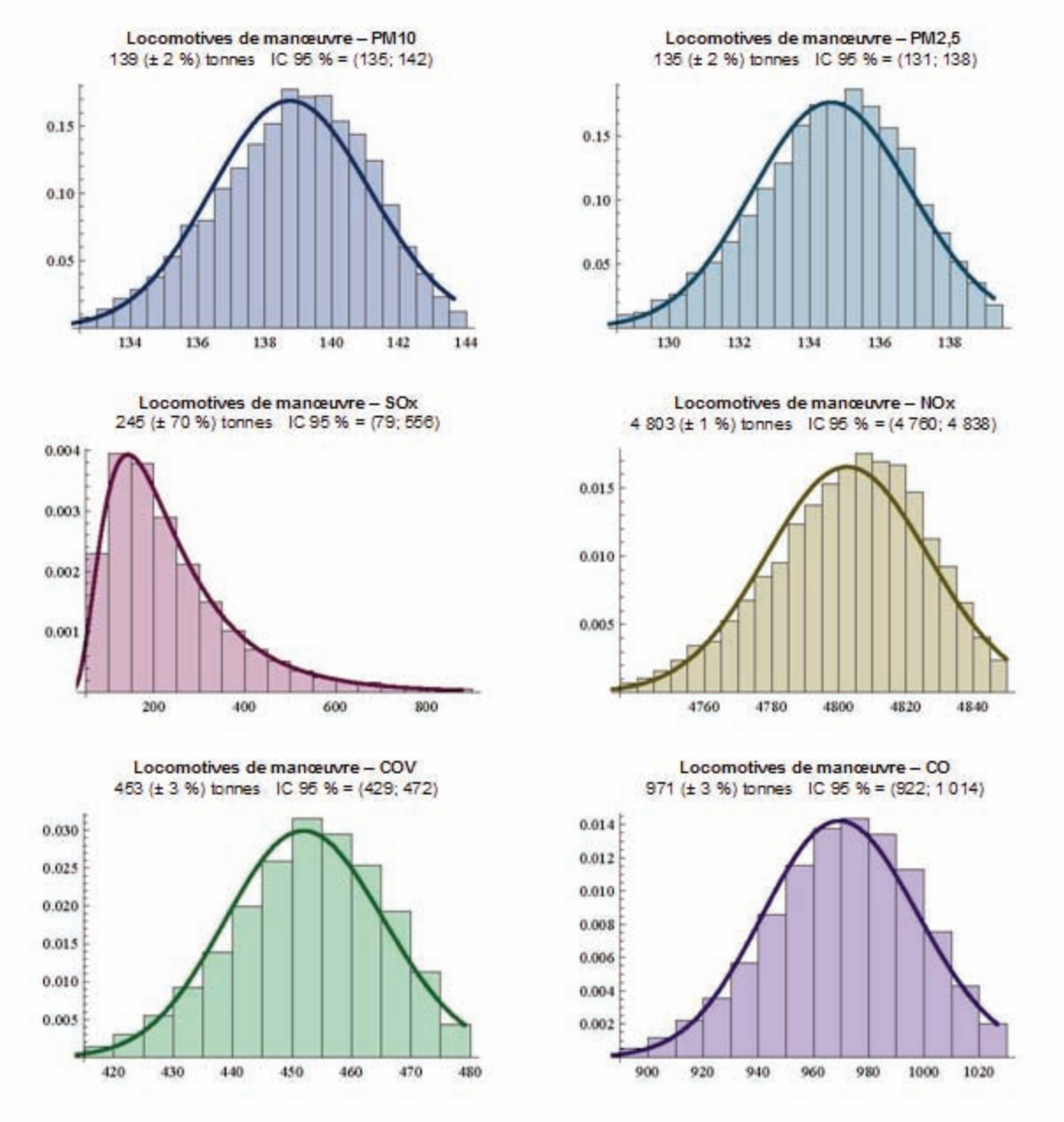


Figure 18 : Monte Carlo – Locomotives de manœuvre (tonnes métriques)

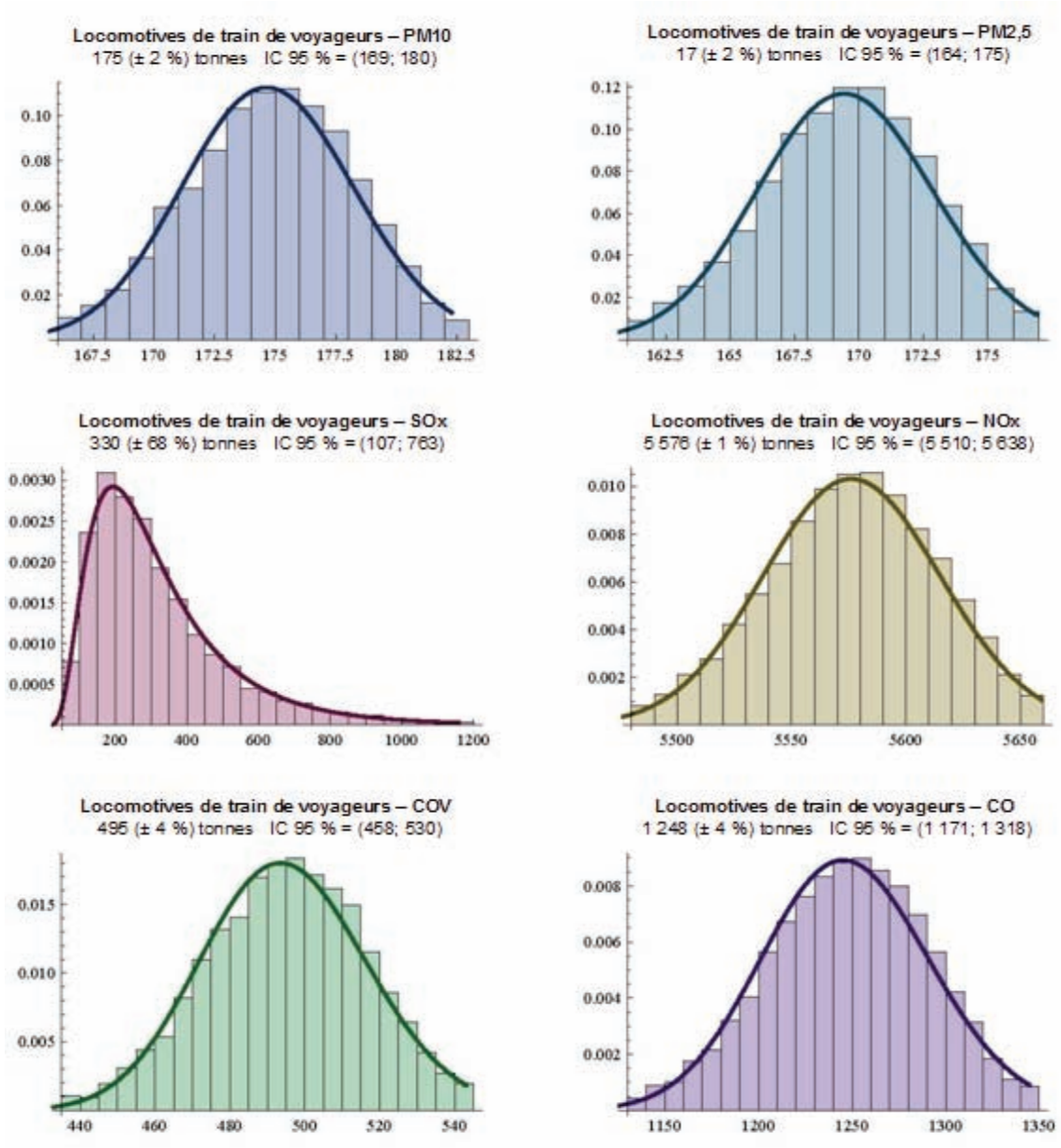


Figure 19 : Monte Carlo – Locomotives de train de voyageurs (tonnes métriques)

7 Conclusions

Voici les principales conclusions du présent rapport :

- Les méthodes d'estimation utilisées dans divers pays – y compris celles de l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis, de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) et d'Environnement Canada – se ressemblent beaucoup. Il est donc possible de faire des comparaisons valables d'un pays à l'autre. Le présent rapport se veut un complément aux modèles et données obtenues auprès de l'EPA et de l'AEE. Les méthodes d'estimation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et celles utilisées pour l'estimation des PCA se recoupent dans une large mesure.
- Les moteurs hors route produisent désormais plus d'émissions, de la plupart des polluants, que l'ensemble des véhicules routiers au Canada. Les émissions de CO des moteurs hors route pourraient atteindre jusqu'à 23,7 mégatonnes, alors que celles produites par les véhicules routiers atteignent au plus 9,7 mégatonnes. Les émissions de COV des moteurs hors route sont également beaucoup plus importantes, avec une borne de confiance supérieure de 2,2 mégatonnes, alors que les véhicules routiers en produisent moins de 481 kilotonnes.
- La piètre qualité des données d'activité correspondant aux moteurs hors route conduit à un degré très élevé d'incertitude des estimations d'émissions, avec des marges d'erreur de plus de 35 % pour la plupart des polluants. Cette incertitude s'explique également par la petite taille des échantillons prélevés pour la mesure des émissions des moteurs hors route.
- Les locomotives sont les sources mobiles pour lesquelles nous possédons les estimations d'émissions les plus exactes, avec des marges d'erreur de moins de 5 % pour l'ensemble des polluants, exception faite des SO_x (voir ci-dessous). Cette exactitude est due à la surveillance exhaustive du parc canadien de locomotives par l'Association des chemins de fer du Canada (ACFC), ainsi qu'aux données complètes de mesure d'émissions recueillies sur plus de 90 % des modèles de locomotive en service sur les chemins de fer canadiens.

- Le degré d'incertitude qui entoure les estimations d'émissions de SO_x mesurées avec l'approche ascendante pour l'ensemble des sources mobiles est lié à l'extrême variabilité de la teneur en soufre des divers carburants d'une raffinerie à l'autre, ou dans une raffinerie donnée au fil du temps (voir Guthrie *et al.* (2006) pour plus de détails). Une approche descendante fondée sur la teneur en soufre des carburants fournirait des estimations nationales beaucoup plus exactes.
- Les informations insuffisantes dont nous disposions sur les méthodes d'estimation des émissions d'ammoniac (NH_3), limitées à un seul rapport (Coe *et al.*, 1996), nous ont empêchés d'inclure ce polluant dans notre analyse d'incertitude.
- Les émissions de PCA produites par des sources mobiles hors route dans le cadre des activités d'exploitation des sables bitumineux en Alberta (Taylor, 2007b) n'ont pas été prises en compte dans le présent rapport.

Le tableau 17 résume les résultats empiriques de la méthode de Monte Carlo illustrés dans les figures 3, 6 à 11 et 15 à 19, le degré d'incertitude étant indiqué à l'aide de l'échelle alphabétique d'indicateurs de la qualité de Statistique Canada (voir le tableau 2).

Tableau 17 : Estimations des PCA en 2005 (avec indicateurs de la qualité)

	PM_{10}	$PM_{2,5}$	Sox	Nox	COV	CO
	tonnes métriques					
Total - aéronefs	995[F]	995[F]	4 841[F]	61 442[F]	8 218[F]	46 357[F]
CDA	112[B]	112[B]	1 215[F]	6 123[B]	4 060[E]	9 931[C]
Vol de croisière	883[F]	883[F]	3 626[F]	55 319[F]	4 158[F]	36 426[F]
Transport maritime	5 820[F]	5 565[F]	32 359[F]	117 096[F]	8 035[F]	9 572[F]
Total - véhicules routiers	6 286[B]	5 726[B]	9 700[B]	408 341[B]	370 331[C]	8 068 222[B]
Véhicules légers à essence	402[B]	369[B]	740[B]	90 347[D]	153 043[E]	3 502 235[D]
Camions légers à essence	553[E]	460[D]	934[B]	131 233[B]	205 727[C]	4 502 841[C]
Véhicules légers à moteur diesel	375[E]	344[E]	419[F]	3 431[F]	1 193[F]	5 791[F]
Camions légers à moteur diesel	387[F]	355[F]	598[F]	3 448[F]	1 629[F]	4 281[F]
Véhicules lourds à essence	54[E]	44[E]	19[E]	4 620[E]	1 310[E]	17 417[E]
Véhicules lourds à moteur diesel	4 515[B]	4 154[B]	6 991[C]	175 263[B]	7 430[B]	35 656[B]
Total - moteurs hors route	48 254[F]	45 248[F]	7 434[F]	355 299[E]	872 464[F]	9 429 408[F]
Utilisation de carburant diesel hors route	16 805[E]	16 301[E]	7 138[F]	230 271[C]	17 959[E]	100 982[E]
Utilisation d'essence hors route	31 449[F]	28 947[F]	296[F]	125 028[F]	854 505[F]	9 328 426[F]
Total - locomotives	4 411[A]	4 277[A]	7 199[F]	112 082[A]	10 620[A]	25 923[A]
Service marchandises	4 097[A]	3 973[A]	6 624[F]	101 703[A]	9 672[B]	23 705[A]
Manœuvre	139[A]	135[A]	245[F]	4 803[A]	453[A]	971[A]
Service voyageurs	175[A]	170[A]	330[F]	5 576[A]	495[A]	1 248[A]

Le tableau 18 résume les améliorations qu'il serait possible d'apporter :

- Une meilleure résolution des données d'activité fournies par NAV CANADA, la Garde côtière canadienne et l'EVC permettrait d'obtenir des estimations plus exactes pour l'ensemble des polluants.
- Les particules (PM) constituent, de loin, le polluant le plus complexe et le moins bien connu des émissions des aéronefs (Patterson, 2005; Taylor, 2007a). Les recherches récentes sur les émissions d'aéronefs ont mis l'accent sur ce problème (Wey *et al.*, 2007; Corporan *et al.*, 2008; Agrawal *et al.*, 2008).
- Environnement Canada a cherché sans succès à obtenir une version récente de la Base de données d'observation de sources mobiles (MSOD) de l'EPA

pour la préparation du présent rapport. L'acquisition future de cette vaste base de données qui contient des millions de résultats de mesures d'émissions à haute résolution permettrait d'accroître considérablement l'exactitude des estimations d'émissions provenant des véhicules routiers et des moteurs hors route.

- L'absence de facteurs de correction des mesures d'émissions de NO_x ou l'utilisation de facteurs erronés pour les moteurs hors route et les locomotives contribuent d'une manière importante à l'incertitude des estimations de ces polluants (voir l'annexe A.2.3 pour plus de détails), laquelle n'a pas été quantifiée dans le présent rapport.

Tableau 18 : Données d'activité et facteurs d'émission – améliorations possibles

	Données d'activité	Facteurs d'émission
Aéronefs	Mouvements par type d'aéronef (NAV CANADA)	PM
Navires commerciaux	Données de la Garde côtière canadienne sur les mouvements des navires	Correction des NO_x pour tenir compte de l'humidité
Véhicules routiers	Micro-données de l'EVC	MSOD
Moteurs hors route	-	MSOD
Locomotives	-	Correction des NO_x pour tenir compte de l'humidité et de la température

A Annexes

A.1 Distributions statistiques

Une variable aléatoire est une fonction dont le résultat est aléatoire et à laquelle on attribue une distribution de probabilité. Dans le présent rapport, les variables aléatoires sont classées en quatre types (tableau 19).

Tableau 19 : Types de variables aléatoires

	Incertitude	Variable aléatoire	Distribution
TYPE I	Connue	$\mathcal{A}$	$\delta(A)$[3]
TYPE II	Incertaine	$\mathcal{A}$	eg. $\mathcal{A} \sim \mathrm{N}(\mu, \sigma), \ldots$
TYPE III	↓	$\mathcal{A}_1 + \cdots + \mathcal{A}_n = \mathcal{B}$	$\boldsymbol{\mathcal{A}} \sim \mathrm{Dirichlet}(\alpha_1, \ldots, \alpha_n) \cdot \mathcal{B}$
TYPE IV	Très incertaine	$\mathcal{A}_1 + \cdots + \mathcal{A}_n = \mathcal{B}$	$\boldsymbol{\mathcal{A}} \sim \mathrm{Dirichlet}(\alpha_1, \ldots, \alpha_n) \cdot \mathcal{B}$

A.1.1 Distribution normale

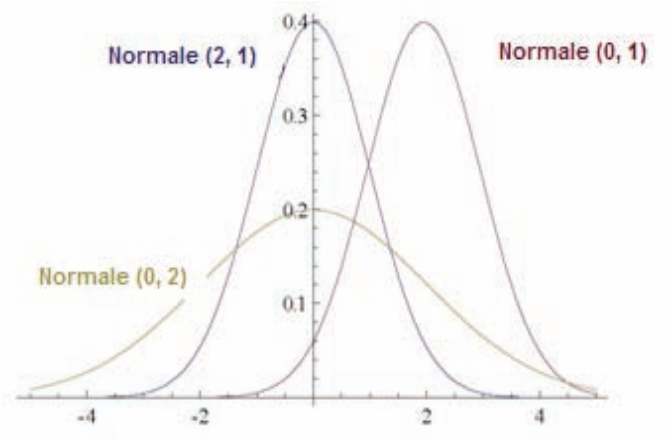
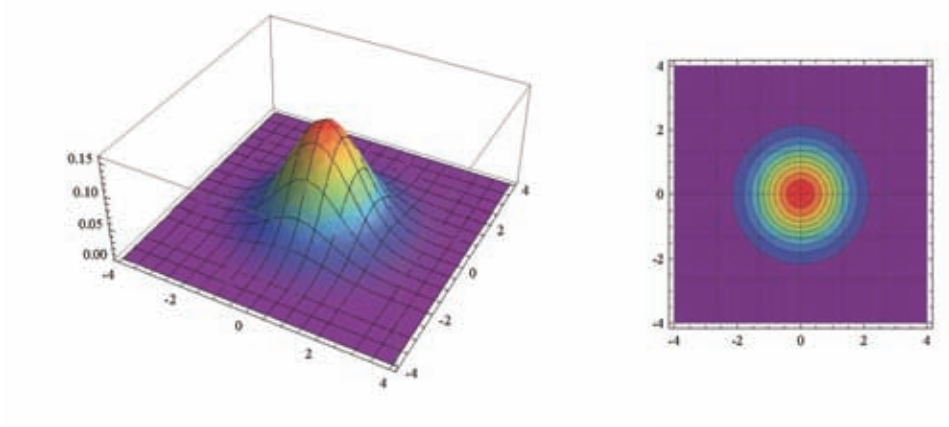


Figure 20 : Distribution normale

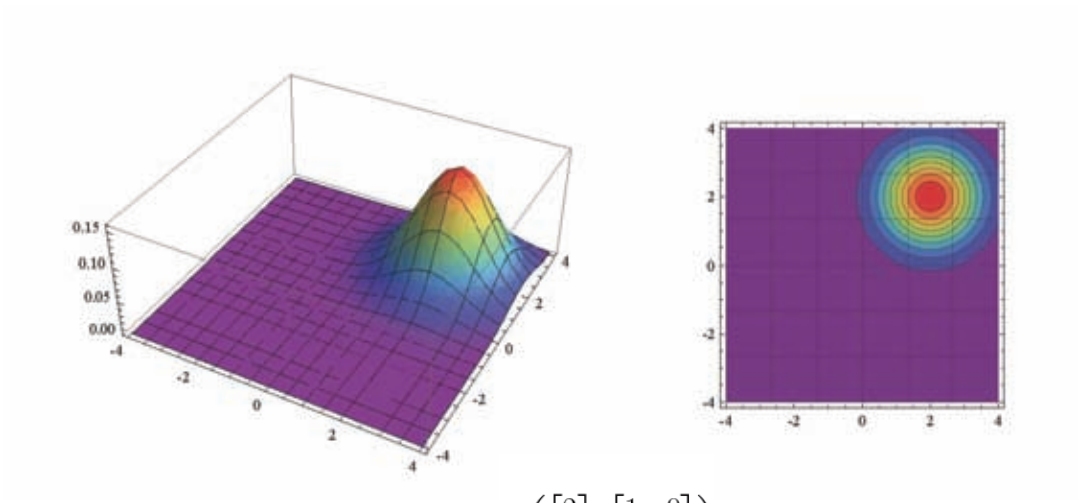
[3] Prend la valeur A avec une probabilité de 1. δ (A) est appelé le delta, ou point de masse, de la distribution à A.

A.1.2 Distribution normale à plusieurs variables



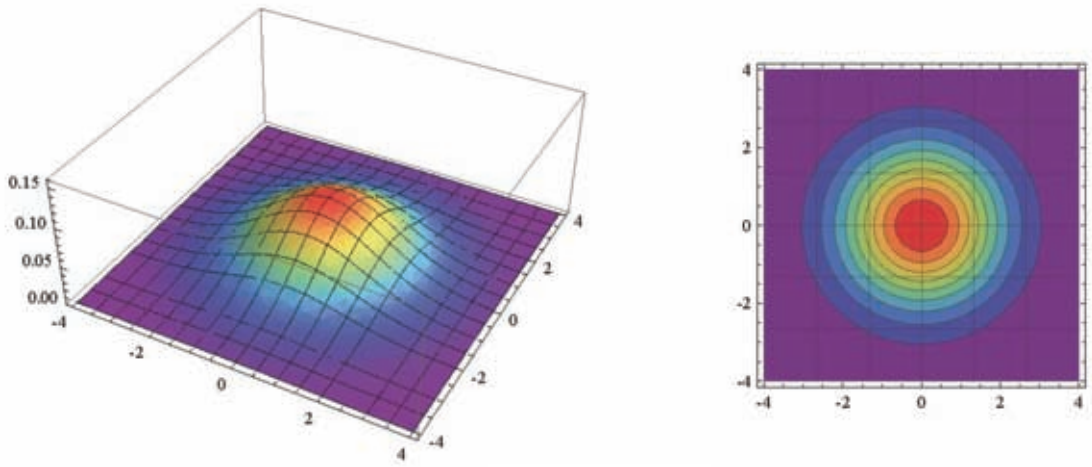
$$\mathrm{N}\left(\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{bmatrix}\right)$$

Figure 21 : Distribution normale à deux variables (exemple 1)



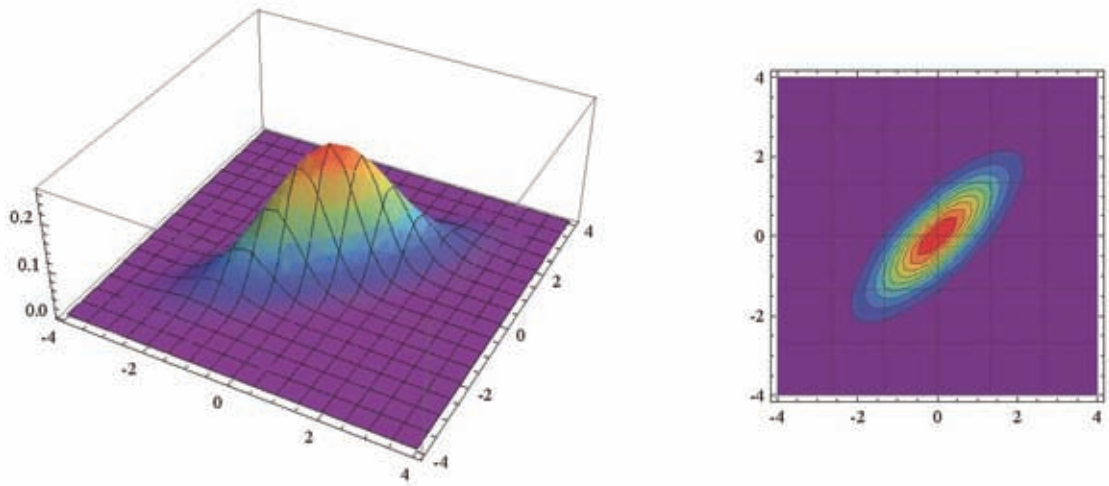
$$\mathrm{N}\left(\begin{bmatrix}2\\2\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{bmatrix}\right)$$

Figure 22 : Distribution normale à deux variables (exemple 2)



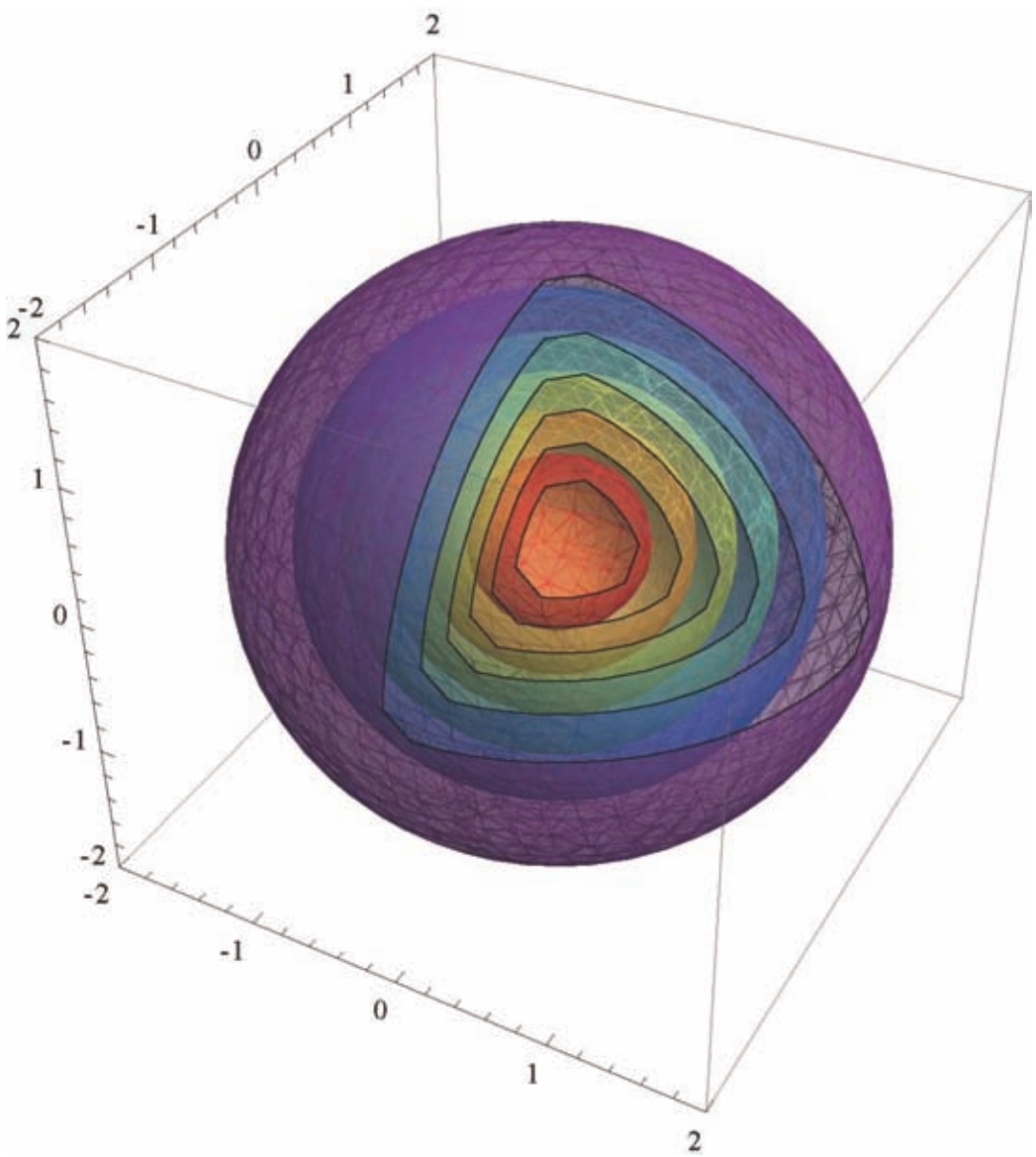
$$\mathrm{N}\left(\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}2 & 0\\0 & 2\end{bmatrix}\right)$$

Figure 23 : Distribution normale à deux variables (exemple 3)



$$\mathrm{N}\left(\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1 & .5\\.5 & 1\end{bmatrix}\right)$$

Figure 24 : Distribution normale à deux variables (exemple 4)



$$\mathrm{N}\left(\begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & 1 & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\right)$$

Figure 25 : Distribution normale à plusieurs variables

A.1.3 Distribution log-normale

En probabilité et statistique, la distribution log-normale est la distribution de probabilité unilatérale de toute variable aléatoire dont les valeurs logarithmiques suivent une distribution normale (Wikipédia, 2008). Si Y est une variable aléatoire à distribution normale, X = exp (Y) suit une distribution log-normale; de même, si X a une distribution log-normale, log (X) aura une distribution normale. La base de la fonction logarithmique n'a pas d'importance : si log (X) a une distribution normale, $\log_b$ (X) aura également une distribution normale pour toute paire de nombres positifs tels que a, b ≠ 1. Une variable peut être modélisée comme log-normale si on peut l'assimiler au produit de plusieurs petits facteurs indépendants.

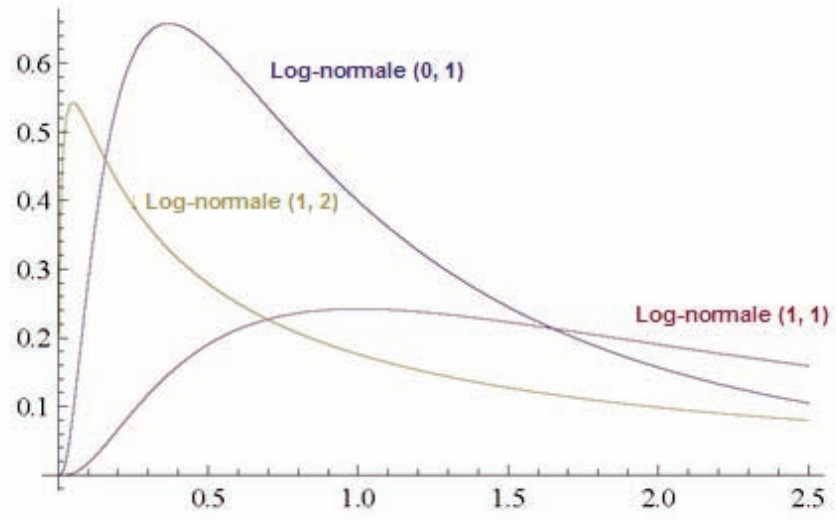


Figure 26 : Distribution log-normale

La distribution de Weibull est une distribution asymétrique apparentée à la distribution log-normale qui appartient à la famille des distributions exponentielles. On l'utilise souvent en analyse d'incertitude à cause de sa flexibilité : elle peut imiter le comportement d'autres distributions statistiques comme les distributions normale, log-normale et exponentielle.

A.1.4 Distribution uniforme

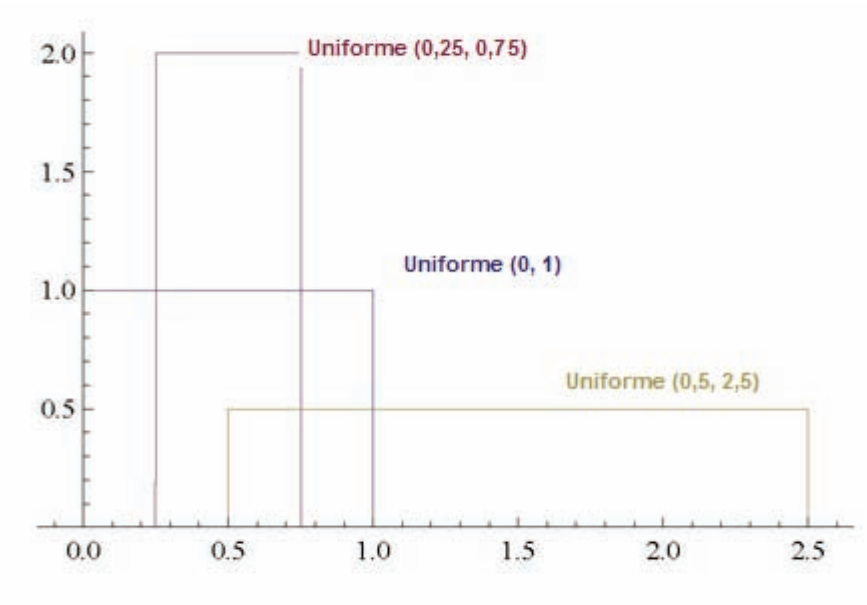


Figure 27 : Distribution uniforme

A.1.5 Distribution bêta

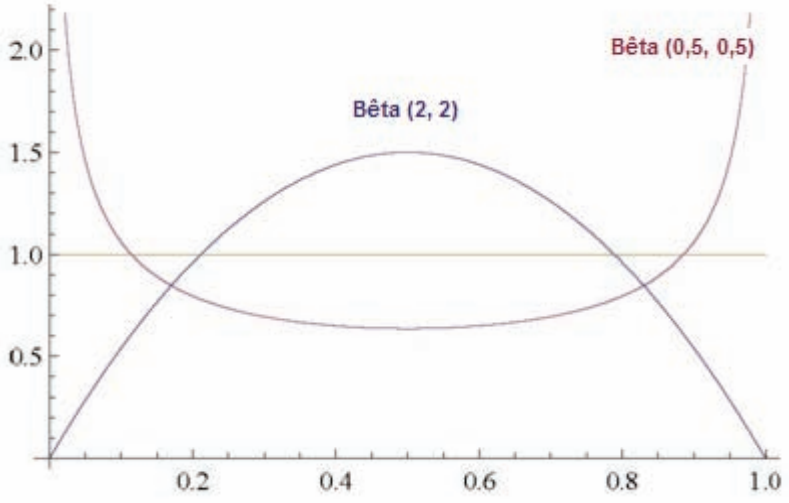


Figure 28 : Distribution bêta

Les distributions bêta sont versatiles et permettent de modéliser utilement une foule d'incertitudes, en particulier lorsque les variables aléatoires sont exprimées en pourcentages.

A.1.6 Distribution Dirichlet

En probabilité et statistique, la distribution Dirichlet est la généralisation à variables multiples de la distribution bêta, mieux connue comme la loi *a priori* conjuguée dans la distribution multinomiale en inférence bayésienne.

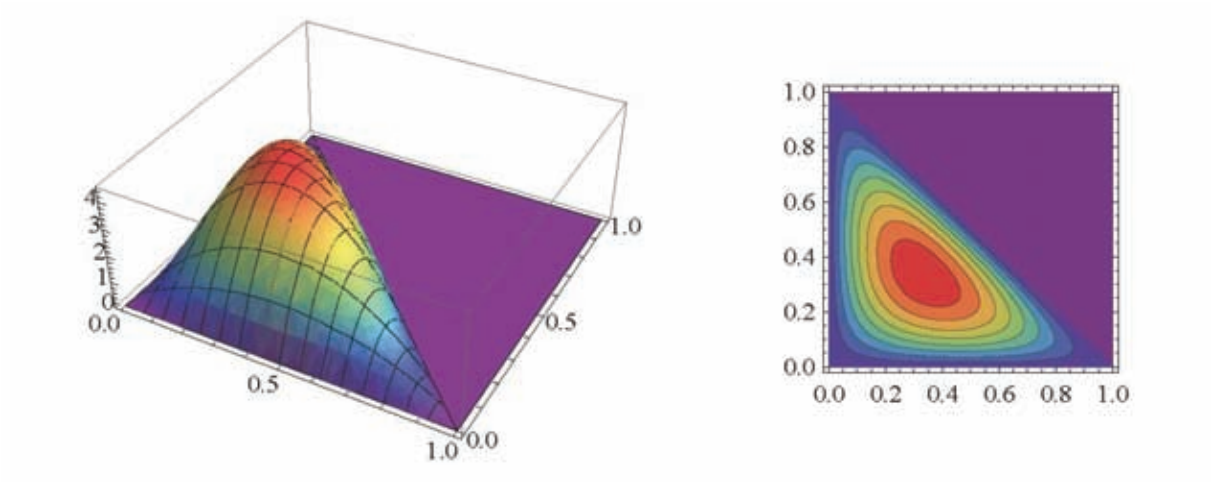


Figure 29 : Distribution Dirichlet

Wikipédia (2008) propose une interprétation intuitive des paramètres. On utilise par exemple la distribution Dirichlet si on souhaite couper des ficelles (chacune de longueur initiale de 1,0) en K ficelles de longueurs différentes, chacune ayant une longueur moyenne désignée, mais en autorisant une certaine variation de la longueur relative des ficelles. Les valeurs α/α_0 désignent les longueurs moyennes des ficelles découlant de la distribution. La variance correspondant à cette moyenne varie en rapport inverse de α_0.

A.2 Analyse d'incertitude de Monte Carlo

A.2.1 Script perl du modèle MOBILE avec simulation Monte Carlo

- *monte_carlo_mobile_canada ()* est la boucle principale de ce script. Elle tournera jusqu'à ce que le programme soit arrêté manuellement à l'aide de la commande ctrl-c. Deux passes indépendantes du modèle sont exécutées en parallèle pour doubler la performance sur des systèmes biprocesseurs. Ce code peut être facilement adapté pour un nombre arbitraire de processeurs parallèles.
- *write_regdist_files ()* crée des fichiers d'entrée aléatoires de la distribution d'immatriculations dans MOBILE pour 14 catégories de véhicules et 25 années de modèles pour chacune des 13 régions, à partir des données de l'EVC.
- *write_mileage_files ()* crée des fichiers d'entrée aléatoires du millage cumulé dans MOBILE pour 28 catégories de véhicules pour chacune des 13 régions, à partir des données de l'EVC.
- *write_speedvmt_files ()* crée des fichiers d'entrée aléatoires de la distribution de vitesses dans MOBILE pour chacune des 13 régions, à partir des données de Delcan (2003).
- *write_input_file ()* crée un fichier d'entrée unique dans MOBILE pour chaque passe Monte Carlo qui inclut les scénarios d'émissions de PM_{10} et de $PM_{2,5}$ pour 13 régions et 12 mois (312 scénarios au total).
- *rgs ()* génère une valeur aléatoire de la teneur en soufre de l'essence.
- *mobile_to_cvs ()* met en correspondance des catégories de véhicules dans MOBILE avec celles de l'EVC.
- *monte_carlo_filename ()* génère un nom de fichier de la forme suivante

  <région>_<année>_< passe >.<extension>
- *run_mobile ()* exécute le modèle MOBILE exécutable[4] comme un sous-processus.
- *random_dirichlet ()* génère un vecteur Dirichlet aléatoire.

[4] Version 6.2C (27-05-2005), légèrement modifiée pour fonctionner en GNU Fortran sous Mac OS X et Linux.

```
#!/usr/bin/perl

use threads;
use Math::Random qw(random_uniform random_beta);
use RegDist;
sub printarray;

monte_carlo_mobile_canada();
exit();

sub monte_carlo_mobile_canada {

  initialize_data();

  # keep running until ctrl-c
  while() {

    write_regdist_files( $year, $run );
    write_regdist_files( $year, $run+1 );
    write_mileage_files( $year, $run );
    write_mileage_files( $year, $run+1 );
    write_speedvmt_files( $year, $run );
    write_speedvmt_files( $year, $run+1 );
    write_input_file( $year, $run );
    write_input_file( $year, $run+1 );

    # start two threads and wait until they're done
    my $thread1 = threads->create('run_mobile', $year, $run );
    my $thread2 = threads->create('run_mobile', $year, $run+1 );
    $thread1->join();
    $thread2->join();

    $run+=2;

  }

}

sub write_regdist_files {

  my ($year,$run) = @_;

  for $region ( @regions ) {

    $out = "> " . monte_carlo_filename($region,$year,$run,"REG");
    open OUT, $out || die "can't open $out\n";
    print OUT "REG DIST\n";

    # 14 groups of 25 values
    for $i (1..14) {

      $class = $i<6 ? "L" : $i<12 ? "M" : "H";
      @alphas = @{ $regdist{uc $region}{$class} };
      @thetas = random_dirichlet( @alphas );
      printf OUT "%-2i ", $i;

      for $j (0..9) { printf OUT "%.6f ", $thetas[$j]; } print OUT "\n";
      for $j (10..19) { printf OUT "%.6f ", $thetas[$j]; } print OUT "\n";
      for $j (20..24) { printf OUT "%.6f ", $thetas[$j]; } print OUT "\n";

    }

    close OUT;

  }

}
```

Figure 30 : Script perl *monte_carlo_mobile.pl*

```
sub write_mileage_files {

  my ($year,$run) = @_;

  for $region ( @regions ) {

    $out = ">" . monte_carlo_filename($region,$year,$run,"MAR");;
    open OUT, $out || die "can't open $out\n";
    print OUT "MILE ACCUM RATES\n";

    for $i (1..28) {

      $class = mobile_to_cvs($classes[$i-1]); # 0-based array
      @alphas = @{ $mileage_dirichlet{$class} };
      @thetas = random_dirichlet( @alphas );
      printf OUT "%-2i ", $i;

      for $j (0..9) { printf OUT "%.6f ", $thetas[$j]; } print OUT "\n";
      for $j (10..19) { printf OUT "%.6f ", $thetas[$j]; } print OUT "\n";
      for $j (20..24) { printf OUT "%.6f ", $thetas[$j]; } print OUT "\n";

    }

    close OUT;

  }

}

sub write_speedvmt_files {

  my ($year,$run) = @_;

  for $region ( @regions ) {

    $out = ">" . monte_carlo_filename($region,$year,$run,"VMT");
    open OUT, $out || die "can't open $out\n";
    print OUT "SPEED VMT\n";

    # parse Svmt_XX.def file and use as dirichlet prior distribution
    open VMT, "grep '^ *[12]' Svmt_${region}.def |";

    while(<VMT>) {

      chop;
      s/^ *//;
      split / +/;
      $roadtype = shift;
      $class = shift;
      @alphas = map {10*$_} @_;
      @thetas = random_dirichlet( @alphas );
      printf OUT "$roadtype %-2i ", $class;
      for $theta ( @thetas ) { printf OUT "%.5f ", $theta; }
      print OUT "\n";

    }

    close VMT;
    close OUT;

  }


}
```

Figure 30 : Script perl *monte_carlo_mobile.pl* (suite)

```
sub write_input_file {

  my ($year,$run) = @_;
  $out = "> RUNS/ALL_${year}_$run.IN";
  open OUT, $out || die "can't open $out\n";

  # write header information
  print OUT "MOBILE6 INPUT FILE\n";
[...]
  print OUT "RUN DATA      \n";

  for $region ( @regions ) {


    print OUT "> $region $year  - All MOBILE6.2C pollutants  \n";
    print OUT "EXPRESS HC AS VOC  :         \n";
    print OUT "NO REFUELING       :         \n";
    print OUT "MILE ACCUM RATE    : ", monte_carlo_filename($region,$year,$run,"MAR"), "\n";
    print OUT "REG DIST           : ", monte_carlo_filename($region,$year,$run,"REG"), "\n";
    print OUT "EXPAND BUS EFS     :         \n";
    print OUT "SPEED VMT          : ", monte_carlo_filename($region,$year,$run,"VMT"), "\n";
    print OUT "FUEL PROGRAM       : 4         \n";
    printf OUT "%.2F %.2F %.2F %.2F %.2F %.2F %.2F %.2F \n", rgs(), rgs(), rgs(), rgs(), rgs(), rgs(), rgs(),
rgs();
[...]
    print OUT "DIESEL FRACTIONS   :         \n";

    # 14 groups of 25 values
    for $i (1..5) { for $j (1..25) { printf OUT "%.3f ", random_beta(1,0.47054,4.98058); } print OUT "\n";}
    for $i (1..6) { for $j (1..25) { printf OUT "%.3f ", random_beta(1,1.39024,0.764235); } print OUT "\n";}
    for $i (1..3) { for $j (1..25) { printf OUT "%.3f ", random_beta(1,7.20026,0.433379); } print OUT "\n";}

    # write monthly scenarios
    for $month (1..12) {

    $diesel_sulfur = random_uniform( 1, 25.0, 1000.0 );
    print OUT "SCENARIO RECORD    :  $region $year $month PM10   \n";
    print OUT "CALENDAR YEAR      :  $year\n";
    print OUT "EVALUATION MONTH   :  ", (4<$month && $month<10)?7:1,"\n";
    print OUT "PARTICLE SIZE      : 10       \n";
    print OUT "PARTICULATE EF     : PMGZML.CSV PMGDR1.CSV PMGDR2.CSV PMDZML.CSV PMDDR1.CSV PMDDR2.CSV   \n";
    printf OUT "DIESEL SULFUR      :  %.2f\n", $diesel_sulfur;
[...]
    print OUT "SCENARIO RECORD    :  $region $year $month PM2.5   \n";
    print OUT "CALENDAR YEAR      :  $year\n";
    print OUT "EVALUATION MONTH   :  ", (4<$month && $month<10)?7:1,"\n";
    print OUT "PARTICLE SIZE      : 2.5       \n";
[...]

    }

    print OUT "END OF RUN         :         \n";

  }

  close OUT;

}
```

Figure 30 : Script perl *monte_carlo_mobile.pl* (suite)

```
sub initialize_data {

  $run=1;
  $year=2005;

  @regions = ("AB", "BC", "MB", "NB", "NL", "NS", "NT", "NU", "ON", "PE", "QC", "SK", "YT");

  @classes = ("LDGV","LDGT1","LDGT2","LDGT3","LDGT4","HDGV2B","HDGV3","HDGV4","HDGV5","HDGV6","HDGV7",
"HDGV8A","HDGV8B","LDDV","LDDT12","HDDV2B","HDDV3","HDDV4","HDDV5","HDDV6","HDDV7","HDDV8A","HDDV8B",
"MC","HDGB","HDDBT","HDDBS","LDDT34");

  $mileage_dirichlet{L} = [0.198018, 0.198018, 0.279805, 0.279805, 0.279805, 0.289311, 0.289311, 0.289311,
0.289311, 0.148082, 0.148082, 0.148082, 0.148082, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827,
0.0847827, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827, 0.0847827];

  $mileage_dirichlet{M} = [0.377622, 0.377622, 0.242968, 0.242968, 0.242968, 0.199513, 0.199513, 0.199513,
0.199513, 0.119003, 0.119003, 0.119003, 0.119003, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067,
0.0609067, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067, 0.0609067];

  $mileage_dirichlet{H} = [0.356568, 0.356568, 0.233004, 0.233004, 0.233004, 0.259126, 0.259126, 0.259126,
0.259126, 0.101871, 0.101871, 0.101871, 0.101871, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264,
0.0494264, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264, 0.0494264];

}

sub rgs { # random gasoline sulfur
  return random_uniform( 1, 25.0, 40.0 );
}

sub mobile_to_cvs {
  ($_) = @_;
  s/L.*/L/;
  s/^.*[2-7].*$/M/;
  s/.*8.*/H/;
  s/.*B.*/M/; # buses => cvs medium class
  s/MC/L/; # motorcycles => cvs light cars
  return $_;
}

sub monte_carlo_filename {
  my ($region,$year,$run,$extension) = @_;
  return sprintf "RUNS/${region}_${year}_%04i.$extension", $run;
}

sub run_mobile {
  my ($year,$run) = @_;
  system( "echo RUNS/ALL_${year}_$run.IN | nice -n 20 ./mobile62c " );
}

sub random_dirichlet {
  my @alphas = @_;
  my @thetas = map { $_==0 ? 0 : random_gamma( 1, $_, 1.0 ) } @alphas;
  my $norm = sum( @thetas );
  return map {$_ / $norm} @thetas;
}
```

Figure 30 : Script perl *monte_carlo_mobile.pl* (suite)

A.2.2 Script perl du modèle NONROAD avec simulation Monte Carlo

- *monte_carlo_nonroad_canada ()* est la boucle principale de ce script. Elle tournera jusqu'à ce que le programme soit arrêté manuellement à l'aide de la commande ctrl-c. Deux passes indépendantes du modèle sont exécutées en parallèle pour doubler la performance sur des systèmes biprocesseurs. Ce code peut être facilement adapté pour un nombre arbitraire de processeurs parallèles.
- *source_fuel_type ()* met en correspondance des codes de classification de source dans NONROAD (CCS) avec des types de carburant (essence, diesel, GPL et GNC).
- *read_default_activity_file ()* lit le fichier d'activité par défaut de NONROAD.
- *read_base_run_output ()* lit les résultats des passes de base du modèle NONROAD.
- *write_random_activity_file ()* crée un fichier aléatoire d'activité dans NONROAD en répartissant les valeurs de consommation totale de carburant aux divers CCS à l'aide de la distribution *a priori* Dirichlet obtenue des passes de base du modèle NONROAD.
- *run_nonroad ()* exécute le modèle NONROAD exécutable[5] comme un sous-processus.
- *write_random_option_file ()* crée un fichier optionnel dans NONROAD pour chaque passe qui inclut des données météorologiques historiques provenant du SMC et des valeurs randomisées de la teneur en soufre par type de carburant.
- *random_dirichlet ()* génère un vecteur Dirichlet aléatoire.

[5] Version de l'EPA, légèrement modifiée pour fonctionner avec GNU Fortran sous Mac OS X et Linux.

```perl
#!/usr/bin/perl
use threads;
use Math::Random;

%regions = (
   ca => { min => 35.0, max => 52.0, avg => 43.5, state => "US TOTAL",     fips => 01000 },
   ab => { min => 27.1, max => 50.5, avg => 38.8, state => "North Dakota", fips => 38000 },
   bc => { min => 47.0, max => 56.0, avg => 51.5, state => "Washington",   fips => 53000 },
   mb => { min => 25.7, max => 46.3, avg => 36.0, state => "North Dakota", fips => 38000 },
   nb => { min => 31.8, max => 49.7, avg => 40.8, state => "Maine",        fips => 23000 },
   nf => { min => 33.3, max => 47.2, avg => 40.3, state => "Maine",        fips => 23000 },
   ns => { min => 34.3, max => 51.5, avg => 42.9, state => "Maine",     fips => 23000 },
   nt => { min => 15.0, max => 31.0, avg => 23.0, state => "Alaska",       fips => 02000 },
   nu => { min => 15.0, max => 31.0, avg => 23.0, state => "Alaska",       fips => 02000 },
   on => { min => 35.3, max => 54.0, avg => 44.7, state => "New York",     fips => 36000 },
   pe => { min => 33.3, max => 49.2, avg => 41.3, state => "Maine",        fips => 23000 },
   qc => { min => 34.3, max => 51.6, avg => 43.0, state => "New York",     fips => 36000 },
   sk => { min => 24.9, max => 47.9, avg => 36.4, state => "North Dakota", fips => 38000 },
   yk => { min => 20.8, max => 39.4, avg => 30.1, state => "Alaska",       fips => 02000 }
);

%lower_hp_bounds = ( 1=>0, 3=>1, 6=>3, 11=>6, 16=>11, 25=>16, 40=>25, 50=>40, 75=>50, 100=>75,
   175=>100, 300=>175, 600=>300,750=>600,1000=>750,1200=>1000, 2000=>1200, 3000=>2000
);

monte_carlo_canada();
exit();

sub monte_carlo_canada {

   $run = 1;
   read_default_activity_file();
   read_base_run_output("ca");

   # keep running until ctrl-c
   while() {

       write_random_activity_file( "ca", $run );
       write_random_activity_file( "ca", $run+1 );
       write_random_option_file( "ca", $run );
       write_random_option_file( "ca", $run+1 );

       # start two threads and wait until they're done
       my $thread1 = threads->create('run_nonroad', "ca", $run );
       my $thread2 = threads->create('run_nonroad', "ca", $run+1 );
       $thread1->join();
       $thread2->join();

       $run+=2;

   }

}

sub source_fuel_type {

   my ($scc) = @_;

       if( $scc =~ /2260|2265|2282005010|2282005015|2282010005|2285003015|2285004015/ ) { return "gasoline"; }
       elsif( $scc =~ /2267|2285006015/ ) { return "lpg"; }
       elsif( $scc =~ /2268|2285008015/ ) { return "cng"; }
       elsif( $scc =~ /2270|2282020005|2282020010|2282020025|2285002015/ ) { return "diesel"; }
       else { print "\nunable to determine fuel type for scc code $scc\n\n"; exit(-1); }

}
```

Figure 31 : Script perl *monte_carlo_nonroad.pl*

```
sub read_default_activity_file {

   # ======= read default activity file =======

      open ACTIVITY, "< data/activity/activity.dat" || die "can't open activity.dat\n";

      while(<ACTIVITY>) {
            if( m|/ACTIVITY/| ) { last; }
      }

      while(<ACTIVITY>) {

            if( m|/END/| ) { last; }

            #Line:   1-10   character   --- SCC code
            #        12-51  character   --- Equipment description (not used)
            #        52-56  character   --- Region code
            #        57-66  character   --- Technology type
            #        67-71  real        --- Minimum HP
            #        72-76  real        --- Maximum HP
            #        77-81  real        --- Load factor
            #        82-86  real        --- (not used)
            #        87-96  character   --- Activity level units
            #        97-106 real        --- Activity level
            #       107-116 real        --- Identifier for age adjustment curve (DEFAULT=no adjustment)
            #-------------------------------   TchType HPmn HPmx LFac NoUse    Units  Hours/Yr    AgeAdj

            ($scc, $part1, $part2) = /(\d{10})(.*ALL)     0 9999(.*Yr).*DEFAULT/;
            $activity{$scc} = { line=>$_, part1=>$part1, part2=>$part2 };

      }

      close ACTIVITY;

}

sub read_base_run_output {

   my ($region) = @_;

   # ======= read base run output =======

      open BASERUN, "< base_runs/${region}_$year.0.out" || die "can't open ${region}_$year.0.out\n";

      while(<BASERUN>) {

            if( /0,     ,(22\d{8}).*?(\d+).*(\d\.\d*E.\d*).*?(\d\.\d*E.\d*).*?(\d\.\d*E.\d*)/ ) {
                  $fuel_type = source_fuel_type($1);
                  %tmp = ( scc=>$1, hp=>0+$2, population=>0+$3, activity=>0+$4, fuel_consumed=>0+$5 );
                  push @{ $sources{$fuel_type} }, {%tmp};
            }

      }

      close BASERUN;

}
```

Figure 31 : Script perl *monte_carlo_nonroad.pl* (suite)

```
sub write_random_option_file {

   my ($year,$region,$run) = @_;

   $out = "> monte_carlo_runs/${region}_$year.$run.opt";
   open OUT, $out || die "can't open $out\n";

   print OUT "/PERIOD/\n";
   print OUT "Period type        : Annual\n";
   print OUT "Summation type     : Period total\n";
   print OUT "Year of episode    : $year\n";
   print OUT "Season of year     : \n";
   print OUT "Month of year      : \n";
   print OUT "Weekday or weekend : Weekday\n";
   print OUT "/END/\n\n";

   print OUT "/OPTIONS/\n";
   print OUT "Title 1            : ${region} $year monte carlo #$run\n";
   print OUT "Title 2            : ALL SOURCES\n";
   print OUT "Fuel RVP for gas   : 12.25 \n";
   print OUT "Oxygen Weight %    : 0 \n";
   printf OUT "Gas sulfur %       : %.4f \n", random_uniform( 1, .0001, .0040 );
   printf OUT "Diesel sulfur %    : %.4f \n", random_uniform( 1, .0001, .1000 );
   printf OUT "CNG/LPG sulfur %   : %.4f \n", random_uniform( 1, .0001, .0010 );
   print OUT "Minimum temper. (F): $regions{%region}{min} \n";
   print OUT "Maximum temper. (F): $regions{%region}{max} \n";
   print OUT "Average temper. (F): $regions{%region}{avg} \n";
   print OUT "Altitude of region : LOW\n";
   print OUT "/END/\n\n" ;
   print OUT "/REGION/\n";
   print OUT "Region Level       : US TOTAL\n";
   print OUT "US TOTAL           : 01000\n";
   print OUT "/END/\n\n";
   print OUT "/RUNFILES/\n";
   print OUT "ALLOC XREF         : data/allocate/allocate.xrf\n";
   print OUT "ACTIVITY           : monte_carlo_runs/${region}_$year_activity.$run.dat\n";
   print OUT "TECHNOLOGY         : data/tech/canada1.dat\n";
   print OUT "SEASONALITY        : data/season/season.dat\n";
   print OUT "REGIONS            : data/season/season.dat\n";
   print OUT "MESSAGE            : monte_carlo_runs/${region}_$year.$run.msg\n";
   print OUT "OUTPUT DATA        : monte_carlo_runs/${region}_$year.$run.out\n";
   print OUT "EPS2 AMS           : \n";
   print OUT "/END/\n\n";
   print OUT "/POP FILES/\n";
   print OUT "Population file    : data/pop/0${region}.pop\n";
   print OUT "/END/\n\n";
   print OUT "/GROWTH FILES/\n";
[_]
   print OUT "/END/\n\n";
   close OUT;

}

sub random_dirichlet {
  my @alphas = @_;
   my $K = scalar(@_);
   my @thetas = map { $_==0 ? 0 : random_gamma( 1, $_, 1.0 ) } @alphas;
   my $norm = sum( @thetas );
   #printf "%e\n",$norm;
   return map {$_ / $norm} @thetas;
}
```

Figure 31 : Script perl *monte_carlo_nonroad.pl* (suite)

A.2.3 Facteurs de correction pour les NO_x

Très tôt déjà (Krause, 1971), on reconnaissait que les conditions thermodynamiques de l'air d'admission influent sur les émissions de NO_x des moteurs. Plus précisément, la température et l'humidité de l'air d'admission ont un effet dominant (Gingrich *et al.*, 2003). En conséquence, il est raisonnable de supposer que les variations régionales des conditions de température et d'humidité peuvent influer sensiblement sur les niveaux d'émissions des moteurs.

Fondamentalement, les niveaux d'humidité de l'air ambiant influent considérablement sur les émissions de NO_x. Au cours d'une journée chaude et humide à Houston, les émissions effectives de NO_x seront inférieures à celles mesurées au cours d'une journée normale, et il conviendra donc d'ajuster les valeurs mesurées à la hausse. Inversement, au cours d'une journée chaude et sèche à Los Angeles (dans le désert), les émissions de NO_x seront plus élevées qu'au cours d'une journée normale, et il conviendra donc d'ajuster les valeurs mesurées à la baisse. La vapeur d'eau présente dans l'air déplace l'oxygène disponible. Ainsi, jour humide = moins d'oxygène υ températures maximales inférieures υ émissions de NO_x des moteurs réduites. Par temps sec, c'est l'inverse qui se produit. (Fritz, 2008, communication par courriel).

L'effet de l'humidité et de la température a été pris en compte dans les estimations d'émissions des véhicules routiers légers du modèle MOBILE6, qui tiennent compte également de l'effet des charges de la climatisation sur le moteur et les émissions de gaz d'échappement. Toutefois, l'effet de la température et de l'humidité n'a pas été pris en compte dans les estimations du modèle MOBILE6 concernant les véhicules lourds, ni dans celles du modèle d'émissions NONROAD, même si les données utilisées pour l'élaboration des facteurs d'émission ont été ajustées pour tenir compte de la température et de l'humidité (Lindhjem *et al.*, 2004).

Pour une valeur donnée d'humidité relative, la pression barométrique et la température donneront des valeurs différentes d'humidité absolue. On appelle

psychrométrie l'analyse des rapports entre ces variables, et la représentation graphique de ces rapports s'appelle diagramme psychrométrique (figure 32).

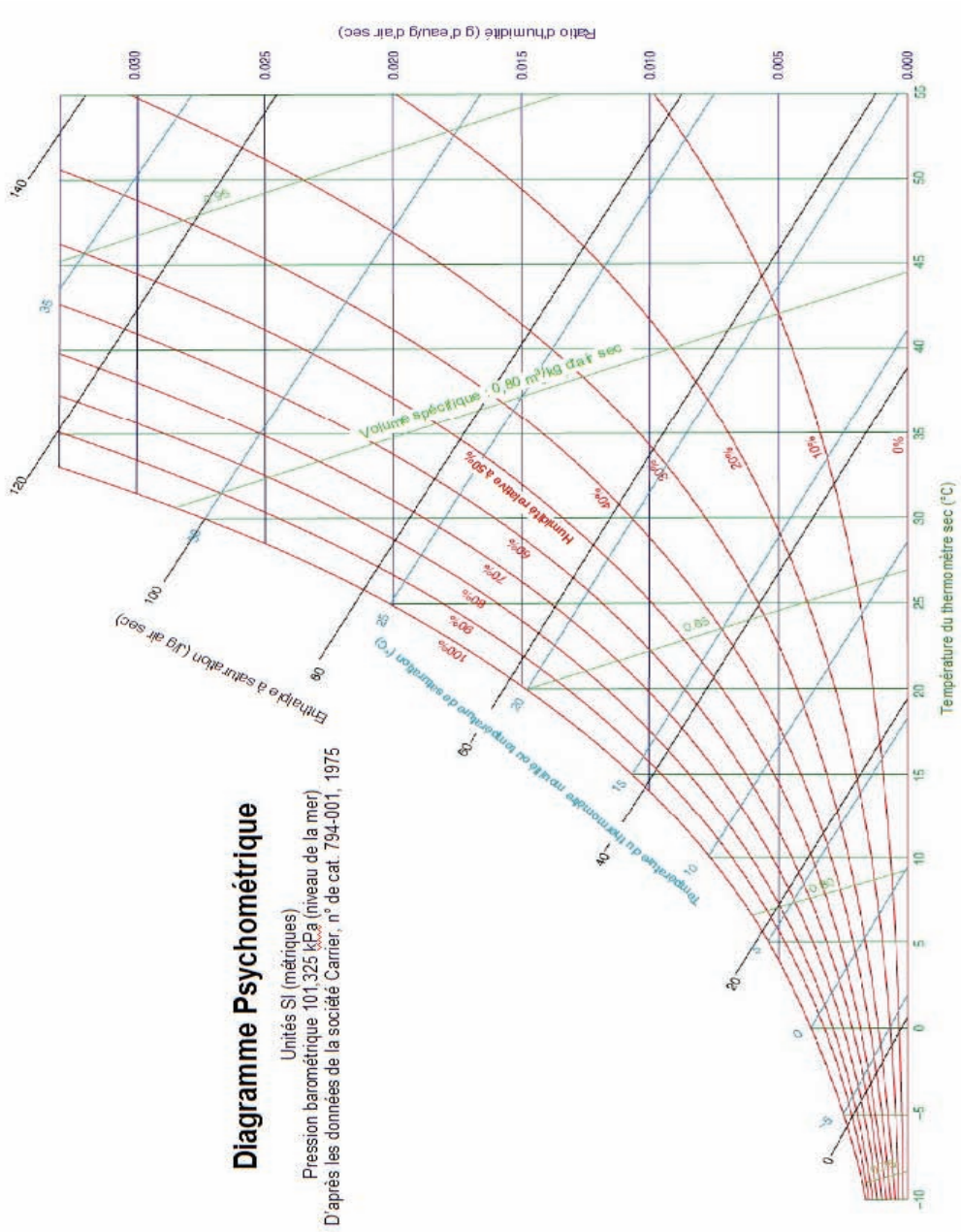


Figure 32 : Diagramme psychrométrique

A.3 Détails techniques du modèle MOBILE

Catégories de véhicules du modèle MOBILE :

A.3.1 Cadre probabiliste MOBILE-EVC

On met d'abord en correspondance les catégories de véhicules de l'EVC avec celles du modèle MOBILE

$$\{L, M, H\} = \{< 4{,}5 \text{ tonnes}, 4{,}5\text{-}15 \text{ tonnes}, > 15 \text{ tonnes}\} \tag{6}$$

$$L = \{VL, CL1, CL2, CL3, CLMD4\} \tag{7}$$

$$LE = \{VLE, CLE1, CLE2, CLE3, CLE4\} \tag{8}$$

$$LMD = \{VLMD, CLMD12, CLMD34\} \tag{9}$$

$$M = \{VLo2b, VLo3, VLo4, VLo5, VLo6, VLo7\} \tag{10}$$

$$LoE = \{VLoE2b, VLoE3, VLoE4, VLoE5, VLoE6, VLoE7\} \tag{11}$$

$$LoMD = \{VLoMD2b, VLoMD3, VLoMD4, VLoMD5, VLoMD6, VLoMD7\} \tag{12}$$

$$H = \{VLo8a, VLo8b\} \tag{13}$$

À partir du tableau 2-1 de l'EVC (tableau 20), on obtient

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{LE \cup LMD\}, 0) = C(AB,L,0) = 133386 \tag{14}$$

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{LE \cup LMD\}, -1) = C(AB,L,-1) = 185464 \tag{15}$$

$$\vdots$$

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{LE \cup LMD\}, -18) = C(AB,L,-18) = 44221 \tag{16}$$

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{LE \cup LMD\}, \{-19,\ldots,-25\}) = C(AB,L,-19) = 197194 \tag{17}$$

$$\sum \mathcal{M}(BC, \{LE \cup LMD\}, 0) = C(BC,L,0) = 107727 \tag{18}$$

$$\vdots$$

$$\sum \mathcal{M}(YT, \{LE \cup LMD\}, \{-19,\ldots,-25\}) = C(YT,L,-19) = 3703 \tag{19}$$

Tableau 20 : Tableau 2-1 de l'EVC

Tableau 2-1 - *suite*

Nombre de véhicules sur les listes d'immatriculation selon la juridiction et l'année du véhicule - Véhicules jusqu'à 4,5 tonnes

	Saskat-chewan	Alberta	Colombie-Britannique	Yukon	Territoires du Nord-Ouest	Nunavut	Total
Total, toutes les années des modèles de véhicules	**665 169**	**2 339 251**	**2 442 248**	**24 957**	**20 574**	**3 217**	**18 738 941**
Antérieur à 1988	84 786	197 194	224 900	3 703	1 712	200	971 045
1988	15 832	44 221	61 438	846	420	63	273 341
1989	17 916	54 084	75 982	936	482	71	338 664
1990	21 088	66 439	94 249	1 028	526	77	436 131
1991	23 780	74 956	99 368	1 004	593	100	511 646
1992	26 393	79 702	107 648	1 041	592	120	642 174
1993	25 286	77 942	104 020	1 020	585	129	668 587
1994	28 537	86 373	103 779	1 046	701	146	751 209
1995	31 283	94 954	109 989	1 158	732	164	853 165
1996	26 807	83 507	90 394	898	585	124	755 193
1997	36 241	115 707	119 284	1 248	904	203	1 005 921
1998	37 254	131 829	121 617	1 164	954	201	1 118 519
1999	31 328	114 391	110 929	1 042	998	203	1 066 548
2000	37 131	132 708	130 849	1 107	1 233	237	1 304 700
2001	37 672	140 985	131 539	1 217	1 365	256	1 227 560
2002	42 313	166 961	159 111	1 417	1 549	273	1 421 804
2003	42 489	176 756	163 312	1 568	2 056	221	1 514 407
2004	38 774	165 961	147 350	1 253	1 641	144	1 337 005
2005	37 664	185 464	165 952	1 390	1 742	173	1 472 539
2006	20 802	133 386	107 727	764	1 100	90	956 426
2007	1 727	15 706	12 804	98	95	13	111 882
2008	0	0	0	0	0	0	0
Année du modèle du véhicule, inconnue	0	0	0	0	1	0	406

Tableau 21 : Tableau 2-2 de l'EVC

Tableau 2-2 - *suite*

Nombre de véhicules sur les listes d'immatriculation selon la juridiction et l'année du véhicule - Camions de 4,5 tonnes à 14,9 tonnes

	Saskat-chewan	Alberta	Colombie-Britannique	Yukon	Territoires du Nord-Ouest	Nunavut	Total
Total, toutes les années des modèles de véhicules	**37 333**	**113 728**	**103 422**	**1 664**	**715**	**222**	**442 607**
Antérieur à 1988	24 777	31 858	13 350	469	118	46	94 364
1988	431	2 216	2 360	57	18	13	10 571
1989	389	2 272	2 663	51	19	6	10 501
1990	512	2 526	3 091	59	37	9	11 939
1991	461	2 032	2 491	34	18	5	9 270
1992	440	1 975	2 601	45	14	6	9 285
1993	494	2 025	3 087	33	13	11	10 712
1994	527	2 495	3 470	46	18	6	12 806
1995	718	3 200	4 049	32	34	23	16 497
1996	441	2 213	2 939	33	14	4	11 806
1997	670	3 672	3 873	65	25	9	16 216
1998	638	3 511	3 374	41	27	8	16 188
1999	675	4 497	4 411	64	40	13	22 292
2000	579	3 901	4 176	44	37	10	19 688
2001	830	5 737	5 004	59	33	6	21 800
2002	693	4 949	5 358	66	34	5	21 123
2003	830	6 047	8 826	113	37	9	28 417
2004	707	5 306	9 135	122	34	8	27 268
2005	1 329	10 778	10 266	107	65	6	36 223
2006	1 088	10 977	8 221	109	69	11	31 032
2007	97	1 532	668	7	3	0	3 833
2008	0	0	0	0	0	0	0
Année du modèle du véhicule, inconnue	0	0	0	0	0	0	157

Tableau 22 : Tableau 2-3 de l'EVC

Tableau 2-3 - suite

Nombre de véhicules sur les listes d'immatriculation selon la juridiction et l'année du véhicule — Camions de 15 tonnes et plus

	Saskat-chewan	Alberta	Colombie-Britannique	Yukon	Territoire du Nord-Ouest	Nunavut	Total
Total, toutes les années des modèles de véhicules	**26 259**	**80 965**	**16 874**	**1 248**	**1 025**	**155**	**318 272**
Antérieure à 1988	8 641	17 267	2 835	214	145	21	42 414
1988	940	1 850	471	32	20	0	6 353
1989	791	1 657	497	25	24	5	6 767
1990	815	1 914	785	32	29	4	7 167
1991	552	1 426	439	18	23	6	4 822
1992	550	1 155	581	32	19	4	4 807
1993	826	1 660	563	26	22	5	6 572
1994	1 115	2 636	691	39	39	5	9 885
1995	1 540	3 294	789	51	48	11	14 488
1996	1 104	2 703	716	52	55	6	11 292
1997	1 113	3 255	760	51	46	3	12 254
1998	1 475	4 725	780	60	65	9	19 442
1999	1 226	3 889	704	55	61	18	20 626
2000	1 172	4 095	617	79	63	7	23 857
2001	788	3 700	638	73	58	6	16 555
2002	429	2 874	591	49	36	4	11 846
2003	580	3 277	655	56	47	9	17 291
2004	717	4 367	909	66	58	9	19 562
2005	885	6 556	1 248	102	67	7	29 052
2006	774	6 566	1 272	99	72	5	24 724
2007	217	2 090	324	30	21	1	7 874
2008	0	0	0	0	0	0	0
Année du modèle du véhicule, inconnue	0	0	0	0	0	0	12

De même, à partir du tableau 2-2 de l'EVC (tableau 21), on obtient :

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{LoE \cup LoMD\}, 0) = C(AB, M, 0) = 10977 \tag{20}$$

$$\vdots$$

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{LoE \cup LoMD\}, \{-19, \ldots, -25\}) = C(YT, M, -19) = 469 \tag{21}$$

et enfin, à partir du tableau 2-3 de l'EVC (tableau 22), on obtient

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{HG \cup HD\}, 0) = C(AB, L, 0) = 10977 \tag{22}$$

$$\vdots$$

$$\sum \mathcal{M}(AB, \{HG \cup HD\}, \{-19, \ldots, -25\}) = C(YT, L, -19) = 214 \tag{23}$$

A.3.2 Simulation Monte Carlo des VKP

Nous avons également besoin d'estimer les véhicules-milles parcourus (VMT). À partir des tableaux 4-1 à 4-4 de l'EVC (voir les tableaux 8 à 10 du présent rapport), il est possible d'établir pour les VMT des équations semblables à celles présentées ci-dessus pour les immatriculations. Il convient toutefois de noter quelques différences importantes. Alors que nous avions auparavant des sommes de variables aléatoires égales à une quantité connue (TYPE III du tableau 19), nous avons maintenant des sommes de variables aléatoires égales à une autre variable aléatoire (TYPE IV du tableau 19). Il convient par ailleurs d'utiliser un facteur de conversion de 0,621371 mille par kilomètre puisque les valeurs communiquées dans l'EVC sont exprimées en kilomètres, tandis que le modèle MOBILE utilise des véhicules-milles parcourus.

On met d'abord en correspondance les kilomètres parcourus par les catégories de véhicules de l'EVC avec les sommes de variables par catégories correspondantes de véhicules du modèle MOBILE.

$$\mathcal{C}_{LG} = \mathcal{M}_{VLE} + \mathcal{M}_{CLE1} + \mathcal{M}_{CLE2} + \mathcal{M}_{CLE3} + \mathcal{M}_{CLE4} \tag{24}$$

$$\mathcal{C}_{LD} = \mathcal{M}_{VLMD} + \mathcal{M}_{CLMD12} + \mathcal{M}_{CLMD34} \tag{25}$$

où

$$\mathcal{C}_{L} = \mathcal{C}_{LE} + \mathcal{C}_{LMD} \tag{26}$$

$$= \mathcal{M}_{VLE} + \mathcal{M}_{CLE1} + \mathcal{M}_{CLE2} + \mathcal{M}_{CLE3} + \mathcal{M}_{CLE4} \tag{27}$$

$$+ \mathcal{M}_{VLMD} + \mathcal{M}_{CLMD12} + \mathcal{M}_{CLMD34} \tag{28}$$

À partir du tableau 4-1 de l'EVC (tableau 8), on obtient :

$$\sum \mathcal{M}(_{AB,\ \{LG \cup LD\},\{0,-25\}}) = 0.621371\ C(_{AB,L}) \sim \mathrm{N}(38375.4, 3799.16) \tag{29}$$

$$\sum \mathcal{M}(_{AB,\ \{MG \cup MD\},\{0,-25\}}) = 0.621371\ C(_{AB,M}) \sim \mathrm{N}(2145.0, 319.605) \tag{30}$$

$$\sum \mathcal{M}(_{AB,\ \{HG \cup HD\},\{0,-25\}}) = 0.621371\ C(_{AB,H}) \sim \mathrm{N}(4975.5, 492.575) \tag{31}$$

$$\sum \mathcal{M}(_{BC,\ \{LG \cup LD\},\{0,-25\}}) = 0.621371\ C(_{BC,L}) \sim \mathrm{N}(29730.3, 2943.3) \tag{32}$$

$$\vdots$$

$$\sum \mathcal{M}(_{YT,\ \{HG \cup HD\},\{0,-25\}}) = 0.621371 C(_{YT,H}) \sim \mathrm{N}(109.7, 16.3453) \tag{33}$$

De même, à partir du tableau 2-2 de l'EVC (tableau 9), on obtient :

$$\sum \mathcal{M}(_{\{AB,\ldots,YT\},\ \{LG,LD\},\{0,-1,-2\}}) = 0.621\ C(_{\{AB,\ldots,YT\},L,<3}) \sim \mathrm{N}(58785, 5819) \tag{34}$$

$$\sum \mathcal{M}(_{\{AB,\ldots,YT\},\ \{LG,LD\},\{-3,-4,-5\}}) = 0.621\ C(_{\{AB,\ldots,YT\},L,3-5}) \sim \mathrm{N}(83066, 4070) \tag{35}$$

$$\vdots$$

$$\sum \mathcal{M}(_{\{AB,\ldots,YT\},\ \{HG,HD\},\{-15,\ldots,-25\}}) = 0.621\ C(_{\{AB,\ldots,YT\},H,>14}) \sim \mathrm{N}(1079, 214) \tag{36}$$

Pour les véhicules légers de l'EVC jusqu'à 4,5 tonnes,

$$\mathcal{M}^{AB}_{VL} + \mathcal{M}^{AB}_{CL1} + \mathcal{M}^{AB}_{CL2} + \mathcal{M}^{AB}_{CL3} + \mathcal{M}^{AB}_{CL4} = C_L^{AB} \tag{37}$$

$$\mathcal{M}^{BC}_{VL} + \mathcal{M}^{BC}_{CL1} + \mathcal{M}^{BC}_{CL2} + \mathcal{M}^{BC}_{CL3} + \mathcal{M}^{BC}_{CL4} = C_L^{BC} \tag{38}$$

$$\vdots$$

$$\mathcal{M}^{YT}_{VL} + \mathcal{M}^{YT}_{CL1} + \mathcal{M}^{YT}_{CL2} + \mathcal{M}^{YT}_{CL3} + \mathcal{M}^{YT}_{CL4} = C_L^{YT} \tag{39}$$

$$\mathcal{M}_{VL} + \mathcal{M}_{CL1} + \mathcal{M}_{CL2} + \mathcal{M}_{CL3} + \mathcal{M}_{CL4} = C_L \tag{40}$$

Pour les véhicules de masse intermédiaire de l'EVC (4,5 -15 tonnes),

$$\mathcal{M}^{AB}_{VLo2b} + \mathcal{M}^{AB}_{VLo3} + \mathcal{M}^{AB}_{VLo4} + \mathcal{M}^{AB}_{VLo5} + \mathcal{M}^{AB}_{VLo6} + \mathcal{M}^{AB}_{VLo7} = C^{AB}_{M} \quad (41)$$

$$\mathcal{M}^{BC}_{VLo2b} + \mathcal{M}^{BC}_{VLo3} + \mathcal{M}^{BC}_{VLo4} + \mathcal{M}^{BC}_{VLo5} + \mathcal{M}^{BC}_{VLo6} + \mathcal{M}^{BC}_{VLo7} = C^{BC}_{M} \quad (42)$$

$$\vdots$$

$$\mathcal{M}^{YT}_{VLo2b} + \mathcal{M}^{YT}_{VLo3} + \mathcal{M}^{YT}_{VLo4} + \mathcal{M}^{YT}_{VLo5} + \mathcal{M}^{YT}_{VLo6} + \mathcal{M}^{YT}_{VLo7} = C^{YT}_{M} \quad (43)$$

$$\mathcal{M}_{VLo2b} + \mathcal{M}_{VLo3} + \mathcal{M}_{VLo4} + \mathcal{M}_{VLo5} + \mathcal{M}_{VLo6} + \mathcal{M}_{VLo7} = C_{M} \quad (44)$$

et pour les véhicules lourds de l'EVC (> 15 tonnes),

$$\mathcal{M}^{AB}_{VLo8a} + \mathcal{M}^{AB}_{VLo8b} = C^{AB}_{H} \quad (45)$$

$$\mathcal{M}^{BC}_{VLo8a} + \mathcal{M}^{BC}_{VLo8b} = C^{BC}_{H} \quad (46)$$

$$\vdots$$

$$\mathcal{M}^{YT}_{VLo8a} + \mathcal{M}^{YT}_{VLo8b} = C^{YT}_{H} \quad (47)$$

$$\mathcal{M}_{VLo8a} + \mathcal{M}_{VLo8b} = C_{H} \quad (48)$$

Références

Agrawal, H., A. Sawant, K. Jansen, J. Wayne Miller, et D. Cocker. (2008). *Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines. Atmospheric Environment*, sous presse.

Bammi, S. (2001). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in On-Road and Non-Road Mobile Source Emission Factors*. (Thèse non traduite; disponible à http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/527/1/etd.pdf.)

Beardsley, M., D. Brzezinski, et V. Rao. (2001). *MOBILE6 estimates of exhaust emissions for 1994-and-later light duty diesel cars and trucks*. Technical Report M6.EXH.001, Environmental Protection Agency.

Cheminfo (2004). *Environment Canada's estimates of off-road engine populations for the NONROAD model*. Rapport technique NR-01-E d'Environnement Canada, préparé par Cheminfo Services Inc.

Chi, T. (2004). *Uncertainty Analysis of the NONROAD Emissions Model for the State of Georgia*. Mémoire de maîtrise, Georgia Institute of Technology.

Coe, D., H. Main, L. Chinkin, C. Loomis et J. Wilkinson. (1996). *Review of Current Methodologies for Estimating Ammonia Emissions*. Préparé pour le California Air Resources Board par Alpine Geophysics, LLC, Arvada, Colorado.

Corporan, E., A. Quick et M. DeWitt. (2008). *Characterization of particulate matter and gaseous emissions of a C-130H aircraft*. J Air Waste Manag Assoc, 58(4):474–83.

Davies, J., M. Grant, et J. Venezia. (2006). *Transportation greenhouse gas emissions: Trends, uncertainties and methodological improvements*. *In :* 15th International Emission Inventory Conference.

Delcan (2003). *Average speed estimates for MOBILE6C emissions forecasting*. Rapport technique M6C-01-E d'Environnement Canada, préparé par Delcan Corporation et iTRANS Consulting Inc.

Dunn, R. et P. Eggleton. (2002). *Influence of duty cycles and fleet profile on emissions from locomotives in Canada*. Rapport technique TP 13945E, Transports Canada.

EEA (2000). Analysis of commercial marine vessels emissions and fuel consumption data.

EMEP/CORINAIR (2007). *Emission Inventory Guidebook, chapter 8: Other mobile sources and machinery*. Agence européenne pour l'environnement, http://reports.eea.europa.eu/EMEPCORINAIR5/en/.

EPA (1997). *Emission factors for locomotives: Technical highlights*. Technical Report.

EPA (2000). *Analysis of commercial marine vessels emissions and fuel consumption data*. (www.epa.gov/oms/models/nonrdmdl/c-marine/r00002.pdf)

EPA (2004). *Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling: Compression-ignition*. Technical Report NR-009c, Environmental Protection Agency.

EPA (2005a). *Conversion factors for hydrocarbon emission components*. Technical Report EPA420-R-05-015, Environmental Protection Agency.

EPA (2005b). *Exhaust emission factors for nonroad engine modeling: Spark-ignition*. Technical Report NR-010e, Environmental Protection Agency.

Frey, C. (2007). *Quantification of uncertainty in emission factors and inventories*. *In* : 16th Annual International Emission Inventory Conference.

Frey, C. et S. Bammi. (2003). *Probabilistic Nonroad Mobile Source Emission Factors*. Journal of Environmental Engineering, 129:162.

Frey, C., J. Penman, L. Hanle, S. Monni et S. Ogle. (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, volume 1 Orientations générales et établissement des rapports, chapitre 3 Incertitudes, pages 3.1 – 3.66. Disponible à www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html

Frey, H. et S. Bammi. (2002a). *Quantification of Variability and Uncertainty for Selected Nonroad Mobile Source Emission Factors*.

Frey, H. et S. Bammi. (2002b). *Quantification of Variability and Uncertainty in Lawn and Garden Equipment NO*. Journal of the Air & Waste Management Association, 52. IGES.

Fritz, S. G. (2004). *Locomotive exhaust emissions test report*: BNSF 9476. Rapport technique préparé pour Transports Canada.

Fulper, C. (2004). *Mobile Source Observation Data User Guide*. EPA.

Gagnon, K. et B. Taylor. (2003). *Environment canada's proposed plan for the canadian conversion of MOBILE6.2*. Rapport technique M6C-03-E d'Environnement Canada.

Giannelli, R., J. Gilmore, L. Landman, S. Srivastava, M. Beardsley, D. Brzezinski, G. Dolce, J. Koupal, J. Pedelty et G. Shyu. (2002). *Sensitivity analysis of MOBILE6.0*. Technical Report EPA420-R-02-035, Environmental Protection Agency.

Gingrich, J. W., T. J. Callahan, et L. G. Dodge. (2003). *Humidity and temperature correction factors for nox emissions from spark ignited engines*. Technical Report SwRI Project No. 03.10038, ENVIRON International Corporation.

Glover, E. L. et M. Cumberworth. (2003). *MOBILE6.1 particulate emission factor model technical description: Final report*. Technical Report M6.PM.001, Environmental Protection Agency.

Glover, E. L., Koupal, J., and Brzezinski, D. (2003). Update to the determination of CO basic emission rates, OBD and I/M effects for Tier 1 and later LDVs and LDTs. Technical Report M6.EXH.012, Environmental Protection Agency.

Gosling, J. et A. O'Hagan. (2007). *Understanding the uncertainty in the biospheric carbon flux for England and Wales*.

Guthrie, J., W. Al-Sarraj. et M. Froese. (2006). *Teneur en soufre des combustibles liquides 2006*. Rapport technique, Environnement Canada.

Harvey, C. (2006). *NONROAD2005 training*. In 15th Annual Emission Inventory Conference, Nouvelle-Orléans, Louisiane.

Hillary, N., K. Davidson, M. de Souza, J. Scolli, S. Savard, J. Charinos, D. Osabu-Kle et M. Savard. (2007). *Statistiques relatives aux mouvements d'aéronefs : tours et stations d'information de vol de Nav Canada : rapport annuel* (TP 577). Rapport technique, Statistique Canada.

ICF (2004). *Quantitative assessment of uncertainty in Canada's national GHG inventory estimates for 2001*.

ICF (2005). *Quantitative assessment of uncertainty in Canada's national GHG inventory estimates for 2001: Supplementary analysis*.

Kennedy, M., C. Anderson, A. O'Hagan, M. Lomas, I. Woodward, J. P. Gosling et A. Heinemeyer. (2008). *Quantifying uncertainty in the biospheric carbon flux for England and Wales*. Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society), 171(1):109–135.

Koupal, J. et D. Brzezinski. (2003). *Update to the accounting for the tier 2 and heavy-duty 2005/2007 requirements in MOBILE6*. Technical Report M6.EXH.013, Environmental Protection Agency.

Koupal, J. W. et E. L. Glover. (2001). *Determination of NOx and HC basic emission rates, OBD and I/M effects for Tier 1 and later LDVs and LDTs*. Technical Report M6.EXH.007, Environmental Protection Agency.

Krause, S. (1971). *Effect of Engine Intake-Air Humidity, Temperature, and Pressure on Exhaust Emissions*.

Lindhjem, C., L.-M. Chan et A. Pollack. (2004). *Applying humidity and temperature corrections to on and off-road mobile source emissions*. *In* : 13th International Emission Inventory Conference.

McCann (1994). *Uncertainties in Canada's 1990 GHG emission estimates*.

Moshiri, S. (2006). Locomotive emissions testing program. Technical Report ETR-0339, Transports Canada.

MSOD (2002). *Mobile Source Observation Data (MSOD): Database update*.

NARSTO (2005). *Improving emission inventories for effective air quality management across North America*.

NONROAD (2005). *User's Guide for the Final NONROAD2005 Model*. EPA Office of Transportation and Air Quality.

Norman, P., D. Lister, M. Lecht, P. Madden, K. Park, O. Penanhoat, C. Plaisance et K. Renger (2003). *Development of the technical basis for a New Emissions Parameter covering the whole AIRcraft operation: NEPAIR Final Technical Report*. (http://adg.stanford.edu/aa241/emissions/nepair-wp4-final-tech-report-20030912.pdf)

OACI (2008). *Aircraft engine emissions databank*. Rapport technique.

OFAC (2006). *Émissions des moteurs d'aéronefs à piston : rapport récapitulatif*. Rapport technique, Office fédéral de l'aviation civile.

Patterson, J. (2005). *Aviation emission inventory methodologies*. Rapport technique A-01-E, Environnement Canada.

SEL (2000). *Programme de surveillance des émissions des locomotives 1998*. Rapport technique SPE 2/TS/13, Environnement Canada.

SEL (2002a). *Programme de surveillance des émissions des locomotives 1999-2000*. Rapport technique SPE 2/TS/15, Environnement Canada.

SEL (2002b). *Programme de surveillance des émissions des locomotives 2001*. Rapport technique SPE 2/TS/16, Environnement Canada.

SEL (2003). *Programme de surveillance des émissions des locomotives 2002*. Rapport technique SPE 2/TS/17, Environnement Canada.

SEL (2005). *Programme de surveillance des émissions des locomotives 2004*. Rapport technique SPE 2/TS/19, Environnement Canada.

SEL (2006). *Programme de surveillance des émissions des locomotives 2005*. Rapport technique SPE 2/TS/20, Environnement Canada.

SENES (2002). *Emissions of air toxics from on-highway sources in canada: Estimated impacts of various vehicle and fuel control strategies*. Rapport technique M6C-02-E d'Environnement Canada, préparé par SENES Consultants Limited et Air Improvement Resource, Inc.

SENES (2004). *Review of methods used in calculating marine vessel emission inventories*. Rapport technique CM-01-E, SENES Consultants Limited et Air Improvement Resource, Inc.

SGA (2000). *Emission factors and uncertainties for CH4 &N2O from fuel combustion*. Rapport technique, préparé par SGA Energy Limited opour la Division des gaz à effet de serre.

Sierra Research (2004a). *Development of railroad emission inventory methodologies*. Rapport technique SR2004-06-02.

Sierra Research (2004b). *Revised inventory guidance for locomotive emissions*. Rapport technique SR2004-06-01.

Stewart Brown Associates (2004a). *I/M program effectiveness for Drive Clean and Air-Care*. Rapport technique M6C-08-E d'Environnement Canada. Préparé par Stewart Brown Associates.

Stewart Brown Associates (2004b). *Vehicle fleet profiles for Ontario and British Columbia; annual kilometre accumulation rates; vehicle-kilometres travelled; and I/M program effectiveness*. Rapport technique M6C-10-E d'Environnement Canada, préparé par Stewart Brown Associates.

Stewart Brown Associates (2005). *Vehicle fleet profiles and I/M program effectiveness for Ontario*. Rapport technique M6C-09-E d'Environnement Canada. Préparé par Stewart Brown Associates.

Taylor, B. (2005a). *The development of the MOBILE6.2C model*. Rapport technique M6C-06-E d'Environnement Canada, avec des contributions de Jeremy Heiken, SENES Consultants Limited et Air Improvement Resource, Inc.

Taylor, B. (2005b). *Frequently asked questions on MOBILE6.2c*. Rapport technique M6C-04-E d'Environnement Canada.

Taylor, B. (2005c). *Mileage accumulation rate file used in MOBILE6.2C*. Rapport technique M6C-11-E d'Environnement Canada.

Taylor, B. (2005d). *MOBILE6.2C Canadian supplemental users' guide*. Rapport technique M6C-05-E d'Environnement Canada.

Taylor, B. (2007a). *Criteria air contaminant emissions from mobile sources in Canada: Trends 1985 through 2030*. Rapport technique G-05-E d'Environnement Canada.

Taylor, B. (2007b). *Criteria air contaminant emissions from off-road mobile sources involved in oil sands activities in Alberta* Rapport technique NR-07-E d'Environnement Canada.

Vaivads, R. (2004a). *Canadian NONROAD engine population estimates from 1985 to 2030 by fuel type*. Rapport technique NR-02-E d'Environnement Canada.

Vaivads, R. (2004b). User's guide for the Canadian adaptation of the U.S. EPA's Draft NONROAD2004 emissions inventory model. Rapport technique NR-04-E d'Environnement Canada.

Vaivads, R. (2005a). *Incorporation of additional sub-regions into the Canadian adaptation of the U.S. EPA's Draft NONROAD2004 emissions inventory model*. Rapport technique NR-03-E d'Environnement Canada.

Vaivads, R. (2005b). *Recreational marine vessel fleet profiles for Canada*. Rapport technique NR-05-E d'Environnement Canada.

Vaivads, R. (2006). *Census division level inputs for the Canadian version of the U.S. EPA's NONROAD program*. Rapport technique NR-06-E d'Environnement Canada.

Waldron, C. D. *et al.* (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, volume 2 Énergie, chapter 3 Combustion mobile, pages 3.1 – 3.78. IGES. Disponible à www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/vol2.html.

Webster, M., C. Forest, J. Reilly, M. Babiker, D. Kicklighter, M. Mayer, R. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, P. Stone *et al*. (2003). *Uncertainty Analysis of Climate Change and Policy Response. Climatic Change*, 61(3):295–320.

Wey, C., B. Anderson, C. Wey, R. Miake-Lye, P. Whitefield et R. Howard. (2007). *Overview on the Aircraft Particle Emissions Experiment*. Journal of Propulsion and Power, 23(5):898–905.

Winiwarter, W. et K. Rypdal. (2001). *Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria*. Atmospheric Environment, 35(32):5425–5440.

Zheng, J. et H. Frey. (2001). *Quantitative analysis of variability and uncertainty in emission estimation: An illustration of methods using mixture distributions*. *In* : Proceedings of the Annual Meeting of the Air & Waste Management Association.

www.ec.gc.ca

Pour des renseignements supplémentaires :

Environnement Canada
Informathèque
10, rue Wellington, 23e étage
Gatineau (Québec) K1A 0H3
Téléphone : 1-800-668-6767 (au Canada seulement) ou 819-997-2800
Télécopieur : 819-994-1412
ATS : 819-994-0736
Courriel : enviroinfo@ec.gc.ca