



HAL
open science

Projet ADEME CORTEA - Engins Mobiles Non-Routiers (EMNR)

Stéphanie O.L. Lacour, I. Fraboulet, P. Clain, E. Mathias, A. Baltzinger, S. Benzai, A.
Fiévet

► **To cite this version:**

Stéphanie O.L. Lacour, I. Fraboulet, P. Clain, E. Mathias, A. Baltzinger, et al.. Projet ADEME CORTEA - Engins Mobiles Non-Routiers (EMNR). [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.196. <hal-02605846>

HAL Id: hal-02605846

<https://hal.inrae.fr/hal-02605846v1>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



PROJET ADEME CORTEA ENGINS MOBILES NON-ROUTIERS (EMNR)

JANVIER 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'INERIS, l'IRSTEA et le CITEPA
convention N°1266C0104

Coordination technique : Denis Benita – Direction Villes et territoires durables,
ADEME Valbonne



RAPPORT FINAL

LISTE DES AUTEURS : Stéphanie LACOUR (IRSTEA), Isaline FRABOULET (INERIS), Etienne MATHIAS (CITEPA), Pascal CLAIN (IRSTEA), Alexandre BALTZINGER (IRSTEA), Samia BENZAI (IRSTEA), Amandine FIEVET (INERIS)

LISTE DES RELECTEURS : Pascal CLAIN (IRSTEA), Jean POULLEAU (INERIS), Julien VINCENT (CITEPA)

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

RAPPORT D'ÉTUDE N° DRC-14-119931-12413A

**PROJET ADEME CORTEA
Engins mobiles non-routiers (EMNR)**


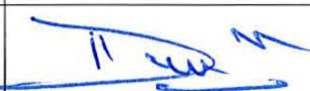

	Rédaction	Vérification	Approbation
INERIS	Isaline FRABOULET	Jean POULLEAU	Nicolas ALSAC
Qualité	Ingénieur à l'unité « Sources et émissions » Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'unité « Sources et émissions » Direction des Risques Chroniques	Responsable du Pôle « Caractérisation de l'environnement » Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

RESUME.....	17
SUMMARY.....	21
1. CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS.....	23
1.1 Contexte réglementaire	24
1.2 Contexte scientifique et environnemental : Les émissions de polluants des EMNR et incertitudes à lever sur les inventaires.....	25
2. ETUDES DES EMISSIONS DES TRONÇONNEUSES (IRSTEA/INERIS).....	27
2.1 Contexte réglementaire	27
2.2 Matériels et Méthodes.....	29
2.2.1 Banc de test IRSTEA.....	29
2.2.2 Tronçonneuses testées	31
2.2.3 Mesurage des émissions atmosphériques	32
2.2.4 Méthodes de caractérisation des émissions	34
2.3 Programme d'essais	35
2.3.1 Tronçonneuse STILH 023.....	35
2.3.2 Tronçonneuse STILH MS 521.....	36
2.4 Résultats de caractérisation des émissions des tronçonneuses.....	37
2.4.1 Constat général sur le fonctionnement des tronçonneuses et du banc d'essais.....	37
2.4.2 Bilan des essais validés.....	37
2.4.3 Caractérisation des effluents de la tronçonneuse STIHL 023.....	39
2.4.4 Caractérisation des effluents de la tronçonneuse STILH MS 521.....	47
2.4.5 Comparaison des résultats obtenus pour les différents régimes.....	50
2.5 Mesurages de puissance et consommation	65
2.6 Calcul des facteurs d'émissions pour les tronçonneuses	66
2.7 Synthèse relative à l'étude des émissions atmosphériques de tronçonneuses.....	68
2.7.1 Fonctionnement du couple : banc / tronçonneuse.....	68
2.7.2 Enseignement en termes de caractérisation des effluents et de détermination des facteurs d'émission	69
3. ETUDE DES EMISSIONS DE TRACTEURS (IRSTEA/INERIS).....	71
3.1 Généralités sur les émissions polluantes des engins non routiers diesel.....	71
3.1.1 Spécificités techniques des engins agricoles diesel.....	71
3.1.2 Réglementation des émissions polluantes.....	73
3.1.3 Procédure et cycles d'essai	78
3.2 Campagne de mesurages des émissions sur banc d'essai (IRSTEA/INERIS).....	85
3.2.1 Tracteurs testés.....	86
3.2.2 Instrumentation mise en œuvre	88
3.2.3 Méthodes et techniques mises en œuvre pour la réalisation des essais tracteurs sur le banc	
IRSTEA	90
3.2.4 Programmes d'essais.....	94
3.2.5 Résultats.....	95
3.2.6 Résultats de caractérisation des émissions de tracteurs	95
3.2.7 Etalonnage de la consommation de carburant et du couple pour la campagne de terrain.....	108
3.2.8 Effets instationnaires.....	112
3.2.9 Campagne de mesurage de terrain (IRSTEA).....	113

3.2.10	Détermination des facteurs d'émissions des tracteurs testés (IRSTEA).....	123
3.2.11	Synthèse relative à la caractérisation des émissions des tracteurs	126
4.	MISE A JOUR DES SCENARII D'EMISSION (CITEPA)	129
4.1	Tests sur les engins diesel.....	129
4.2	Tests sur les engins essence.....	142
5.	CONCLUSIONS	147
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	151
7.	LISTE DES ANNEXES	153

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Schéma d'un moteur 2-temps	28
Figure 2 : Schéma de principe du banc d'essai tronçonneuse (à gauche) et photo d'une tronçonneuse accouplée au banc frein	30
Figure 3 : Comparaison des mesures de débits (nm^3/s – 1 bar, 298 °C) par sonde de Pitot et débits estimés à partir du régime moteur	30
Figure 4 : Schéma du tube de prélèvement et de maintien des conditions de l'effluent réalisé à l'INERIS dans le cadre du projet	33
Figure 5 : Photos du tube de prélèvement et de maintien des conditions de l'effluent réalisé à l'INERIS dans le cadre du projet	33
Figure 6 : Comparaison des résultats en CO_2 , O_2 et température pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	53
Figure 7 : Comparaison des résultats en CO_2 , O_2 et température pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	53
Figure 8 : Comparaison des résultats en COVT, NO_x , NO et NO_2 pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	54
Figure 9 : Comparaison des résultats en COVT, NO_x , NO et NO_2 pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	54
Figure 10 : Comparaison des résultats en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	55
Figure 11 : Comparaison du profil normalisé des HAP pour les différents régimes, tronçonneuse	55
Figure 12 : Comparaison des résultats en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	56
Figure 13 : Comparaison du profil normalisé des HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	56
Figure 14 : Comparaison de la concentration moyenne totale en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	57
Figure 15 : Comparaison de la concentration moyenne totale en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	57
Figure 16 : Comparaison des résultats en particules totales pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	58
Figure 17 : Comparaison de la concentration moyenne en particules totales pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	58
Figure 18 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, régime pleine charge, tronçonneuse STIHL 023	59
Figure 19 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, régime ralenti, tronçonneuse STIHL 023.....	59
Figure 20 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, démarrages, tronçonneuse STIHL MS 521	60
Figure 21 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, régime ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521	60
Figure 22 : Comparaison des résultats en PM pour les différents régimes, STIHL 023.....	61
Figure 23 : Comparaison des résultats en PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	62
Figure 24 : Comparaison du profil normalisé des PM pour les différents régimes, STIHL 023	62

Figure 25 : Comparaison du profil normalisé des PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	63
Figure 26 : Comparaison de la concentration moyenne des PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023.....	63
Figure 27 : Comparaison de la concentration moyenne des PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521	64
Figure 28 : Comparaison des résultats de la distribution granulométrique pour les différents régimes obtenus par l'impacteur ELPI, STIHL 023,	64
Figure 29 : Nombre annuel d'heure d'utilisation des tracteurs en fonction de leur âge : l'utilisation moyenne est de 530 heures par an – Echantillon de 1200 tracteurs testés sur banc d'essai mobile sur la période 2007-2008 - Source FNCUMA et association AILE	72
Figure 30 : Coefficient de survie des tracteurs	72
Figure 31 : Evolution de la puissance des tracteurs testés dans le dispositif « banc d'essai mobile » entre 2007-2008 – échantillon de 1200 tracteurs	73
Figure 32 : Cycle d'essai des véhicules légers : ancien cycle d'essai NEDC à gauche et nouveau cycle WLTC à droite	78
Figure 33 : Cycles transitoires pour des mesurages de pollution des engins non routiers : vitesse du moteur à droite et couple du moteur à gauche - pour le cycle de l'US-EPA, les symboles représentent le cycle tel qu'il est défini par l'US-EPA, et la courbe représente l'essai réalisé dans le projet	79
Figure 34 : Evolution des régimes (à droite) et du couple (à gauche) d'un moteur d'engin agricole pendant une opération agricole	81
Figure 35 : Distribution des régimes et couples moteur observés sur une séquence de conduite réelle	81
Figure 36 : Distribution résultante des régimes du moteur (à droite) et du couple du moteur (à gauche) pour l'activité annuelle d'un tracteur	82
Figure 37 : Mesures d'émissions polluantes d'un moteur de poids-lourds sur différents cycles de conduites, dynamiques en foncé à gauche et statiques en clair à droite – d'après [7].....	83
Figure 38 : Tracteur New Holland T7.220 Tier3b testé au cours de la première campagne d'essai	86
Figure 39 : Gaine de prélèvement des gaz d'échappement	91
Figure 40 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 2200 tours/min, charge à 50%, tracteur New Holland.....	101
Figure 41 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 1500 tours/min et 2200 tours/min, tracteur New Holland	101
Figure 42 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5, en fonctionnement ralenti, tracteur New Holland	102
Figure 43 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 1500 et 2200 tours/min, tracteur New Holland	102
Figure 44 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour une charge à 75% à 2200 tours/min, tracteur New Holland	103
Figure 45 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 2200 tours/min, tracteur Massey Ferguson.....	103
Figure 46 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 1400 tours/min, tracteur Massey Ferguson	104
Figure 47 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 en fonctionnement ralenti /RMC/HB et RMT, tracteur Massey Ferguson	104
Figure 48 : Comparaison des concentrations en CO obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson	105

Figure 49 : Comparaison des concentrations en NO _x obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson	105
Figure 50 : Comparaison des concentrations en NO ₂ obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson	106
Figure 51 : Comparaison des concentrations en COVT obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson	106
Figure 52 : Comparaison des concentrations en poussières totales obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson	107
Figure 53 : Comparaison des concentrations en HAP obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson	107
Figure 54 : Comparaison des valeurs fournies par le réseau CAN du tracteur aux valeurs mesurées sur le banc d'essai pour la consommation de carburant (à gauche) et pour le couple du moteur (à droite).....	108
Figure 55 : Evolution des températures et émissions de NO _x à l'échappement sur des cycles réalisés à chaud et à froid	109
Figure 56 : Sollicitation d'un moteur agricole et conditions de désamorçage du système de dépollution SCR.....	110
Figure 57 : Températures d'équilibre correspondant aux paliers de la série NRSC et émissions de NO _x associées – Mesures obtenues sur le tracteur New Holland	110
Figure 58 : Evolution des émissions horaires de CO ₂ sur un cycle en palier (à gauche : palier de couple et régime et à droite : palier de couple uniquement)	113
Figure 59 : Evolution des émissions de COVT sur un cycle à palier (à gauche : palier de régime et.....	113
Figure 60 : Evolution des émissions de NO _x sur un cycle à palier (à gauche : palier de régime et couple et à droite : palier de couple uniquement)	113
Figure 61 : Equipement du tracteur pendant la campagne d'acquisition sur site : l'outil utilisé sur parcelle est un décompacteur (à droite) et le matériel de mesure des émissions polluantes est installée dans une benne attelée à l'avant du tracteur (à gauche)	114
Figure 62 : Opération de décompactage du sol sur la parcelle des palaquins- jour 2.....	115
Figure 63 : Visualisation du trajet suivi pour les 3 séquences de déplacement sur route du 18 septembre.....	116
Figure 64 : Visualisation du trajet réalisé pour une séquence de décompactage sur la parcelle 1 (à gauche) et 2(à droite)	116
Figure 65 : Evolution de la vitesse du véhicule au cours d'une séquence de décompactage du sol (séquence 1).....	117
Figure 66 : Evolution des conditions de fonctionnement du moteur pendant une séquence de décompactage (séquence 1).....	117
Figure 67 : Distribution du régime du moteur (à gauche) et du couple (à droite) pendant la séquence de décompactage (séquence 1)	118
Figure 68 : Distribution du régime du moteur (à gauche) et du couple (à droite) pendant les séquences de transport	118
Figure 69 : Distribution des conditions de fonctionnement du moteur et vitesse du véhicule pendant les séquences de travail sur parcelle : chaque séquence de travail a fait l'objet d'un réglage différent	121
Figure 70 : Evolution du couple et des émissions polluantes de NO _x et COVT au cours de la séquence 2	122
Figure 71 : Représentation graphique de la projection de l'évolution du parc EMNR de 2001 à 2029.....	129

Figure 72 : Représentation graphique des résultats des tests pour les NO _x	135
Figure 73 : Représentation graphique des résultats des tests pour les COVNM	137
Figure 74 : Représentation graphique des résultats des tests pour le CO	138
Figure 75 : Représentation graphique des résultats des tests pour les TSP	140
Figure 76 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour les NO _x	144
Figure 77 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour les COVNM	144
Figure 78 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour le CO	144
Figure 79 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour les TSP.....	145
Tableau 1 : Synthèse des textes réglementaires applicables aux engins diesel	24
Tableau 2 : Contribution des émissions des EMNR aux rejets nationaux en 2012, en % des émissions totales	25
Tableau 3 : Valeurs limites réglementaires des émissions polluantes des moteurs à essence de moins de 19 kW selon la directive 2002/88/EC : (*) sauf dérogation - voir texte pour les tronçonneuses et taille-haie, matériel testé dans le projet	27
Tableau 4 : Descriptif des tronçonneuses retenues dans le projet	31
Tableau 5 : Nombre d'essais réalisés par paramètres et par allure de fonctionnement.....	35
Tableau 6 : Nombre d'essais réalisés par paramètres et par allure de fonctionnement.....	36
Tableau 7 : Bilan de la première campagne de mesurages.....	38
Tableau 8 : Bilan de la seconde campagne de mesurages	38
Tableau 9 : Concentrations et température des gaz de combustion à pleine charge, (tronçonneuse STIHL 023)	39
Tableau 10 : Concentrations et température des gaz de combustion au ralenti, tronçonneuse STIHL 023*	40
Tableau 11 : Concentrations et température des gaz de combustion durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023	40
Tableau 12 : Concentrations en HAP à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023.....	41
Tableau 13 : Concentrations en HAP au ralenti, tronçonneuse STIHL 023.....	42
Tableau 14 : Concentrations en HAP durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023.....	42
Tableau 15 : Concentrations en TSP et PM à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023.....	43
Tableau 16 : Concentrations en TSP et PM au ralenti, tronçonneuse STIHL 023.....	44
Tableau 17 : Concentrations durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023.....	44
Tableau 18 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023.....	45
Tableau 19 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents au ralenti et durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023.....	46
Tableau 20 : Résultats de concentrations des gaz de combustion au ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521	47
Tableau 21 : Résultats de concentrations des gaz de combustion durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL MS 521.....	47
Tableau 22 : Concentrations en HAP au ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521	48

Tableau 23 : Concentrations en HAP durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL MS 521	48
Tableau 24 : Concentrations en TSP et PM au ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521	49
Tableau 25 : Concentrations en TSP et PM durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL MS 521	49
Tableau 26 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023.....	50
Tableau 27 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents au ralenti et durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023.....	51
Tableau 28 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents au ralenti et durant trois démarrages à froid, tronçonneuse STIHL MS521	52
Tableau 29 : Résultats des mesures de puissance au cours des essais- tronçonneuse STIHL 023.....	65
Tableau 30 : Facteurs d'émission pour la STIHL 023	66
Tableau 31 : Répartition des espèces de HAP dans le facteur d'émission.....	67
Tableau 32 : Substances pour lesquelles les débits massiques au ralenti sont supérieures aux débits massiques à pleine charge	68
Tableau 33 : Catégorie des moteurs diesel non routiers et VLE correspondant à chaque catégorie	74
Tableau 34 : Date d'entrée en vigueur des VLE pour l'homologation des moteurs d'engins non routiers.....	74
Tableau 35 : Dates d'entrée en vigueur des VLE pour la mise sur le marché des moteurs d'engins non routiers	75
Tableau 36 : Evolution des réglementations sur les émissions polluantes à l'échappement pour les engins non routiers (à gauche) et pour les tracteurs agricoles (à droite)	77
Tableau 37 : Valeur moyenne (et écart-type entre parenthèses) des points de fonctionnements testés au cours des cycles d'essai d'engins non routiers	80
Tableau 38 : Ecart-type des dérivées de régimes et de couples de moteur sur des séquences d'essai ou de conduite réelle.....	82
Tableau 39 : Estimation des parts à froid dans le temps d'utilisation des engins agricoles	84
Tableau 40 : Données relatives aux tracteurs testés au cours de la campagne de mesurages des émissions sur banc d'essais.....	87
Tableau 41 : Caractéristiques des bancs d'essais de tracteur de l'Irstea	88
Tableau 42 : Descriptif des points caractéristiques testés pour les essais NRSC du tracteur New Holland.....	93
Tableau 43 : Descriptif des points caractéristique testés pour les essais NRSC du tracteur Massey	93
Tableau 44 : Programme de tests réalisés sur le tracteur New Holland au banc d'essais IRSTEA.....	94
Tableau 45 : Programme de tests réalisés sur le tracteur Massey Ferguson au banc d'essais IRSTEA.....	94
Tableau 46 : Concentrations en polluants gazeux réglementés et température, tracteur New Holland.....	95
Tableau 47 : Concentrations en HAP, tracteur New Holland	96
Tableau 48 : Concentrations en COV spécifiques, tracteur New Holland	97
Tableau 49 : Concentrations en TSP et PM, tracteur New Holland	98
Tableau 50 : Concentrations en polluants gazeux réglementés, tracteur Massey Ferguson	99

Tableau 51 : Concentrations en HAP, tracteur Massey Ferguson.....	99
Tableau 52 : Concentrations en COV spécifiques, tracteur Massey Ferguson	100
Tableau 53 : Concentrations en TSP et PM, tracteur Massey Ferguson.....	100
Tableau 54 : Facteurs d'émission mesurés sur le cycle EPA- soft à chaud et après un démarrage à froid	111
Tableau 55 : Puissance, consommation et émissions polluantes moyennes par période de cycle (écart-type entre parenthèse)	112
Tableau 56 : Ecart-type des dérivés des couples et des régimes sur les différentes séquences de conduites enregistrées pendant la campagne de terrain	118
Tableau 57 : Synthèse des séquences de transports: consommations de carburant et distances parcourues.....	119
Tableau 58 : Facteur d'émission en condition réelle de transport – moyenne des valeurs mesurées sur 3 séquences et écart-types des valeurs – tracteur Tier3a	120
Tableau 59 : Caractéristiques des 3 séquences de décompactage	121
Tableau 60 : Caractéristiques de fonctionnement pendant la séquence de travail (valeurs médianes des points hors arrêt ou manœuvre)	121
Tableau 61 : Facteurs d'émissions polluantes mesurés pour une opération de décompactage – Tracteur Tier3a	123
Tableau 62 : Emission de polluant à chaud du tracteur tier3b testé au banc d'essai, ramenée à la puissance (colonne 3) et à la consommation de carburant (colonne 4) – Comparaison aux valeurs réglementaires EF/VLE (colonne 5, sauf HAP % de l'espèce dans les HAP) – voir le texte pour plus de détails	124
Tableau 63 : Emissions de polluant à chaud du tracteur tier3a testé au banc, ramenée à la puissance (colonne 3) et à la consommation de carburant (colonne 4) – Comparaison aux valeurs réglementaires EF/VLE (colonne 5, sauf HAP % de l'espèce dans les HAP) – voir le texte pour plus de détails	125
Tableau 64: Facteurs d'émissions du tracteur testé sur le terrain (mg/g carburant).....	126
Tableau 65 : Projection de l'Evolution du parc de 1960 à 2013.....	130
Tableau 66 : Consommations de carburants diesel prises en compte dans les simulations.....	132
Tableau 67 : Facteurs d'émission utilisés dans l'inventaire actuel.....	134
Tableau 68 : Facteurs d'émission testés issus des campagnes de mesure de l'IRSTEA	134
Tableau 69 : Résultats des tests pour les NO _x	136
Tableau 70 : Résultats des tests pour les COVNM.....	137
Tableau 71 : Résultats des tests pour le CO.....	139
Tableau 72 : Résultats des tests pour les TSP	140
Tableau 73 : Résultats comparaison témoin/tests pour les polluants NO _x , COVNM, CO et TSP	143

GLOSSAIRE

COVT	: Composés organiques volatils totaux,
COVNM	: Composés organiques volatils non méthaniques,
EMNR	: Engins mobiles non routiers,
HAP	: Hydrocarbures aromatiques polycycliques,
HC	: Hydrocarbures (équivalent à COVT),
NOx	: Oxydes d'azote,
NRMM	: Non-road mobile machinery,
PDF	: Prise de force,
PMx	: Particulate matter de diamètre inférieur à x microns,
PMB	: Point mort bas,
PMH	: Point mort haut,
SH	: Hand-held machinery (matériel portative),
SN	: Non hand held (matériel non portative),
TIER	: Time of Implementation for Emission Regulations,
TSP	: Total suspended particle,
VLE	: Valeur limite d'émission polluante.

RESUME

Les engins mobiles non routiers (EMNR) sont présents dans de nombreux secteurs d'activités (i.e. engins de l'industrie, du BTP, de l'agriculture/sylviculture et du résidentiel/tertiaire).

Ces engins n'étant pas enregistrés comme ceux du transport routier, les parcs sont mal connus et les émissions sont calculées directement à partir des consommations de carburant et de facteurs d'émission issus des Valeurs Limites d'Emission fixées pour les polluants réglementés, ou de quelques publications pour les composés non réglementés.

Dans ce contexte, l'objectif du projet EMNR a été de contribuer à l'amélioration de la connaissance des émissions polluantes des engins non routiers. Ce rapport traite des émissions de petits engins équipés de motorisations 2 temps essence et d'engins lourds équipés de moteur diesel (tracteurs) et de la remise à jour des inventaires nationaux d'émission pour les engins non routiers.

Deux tronçonneuses (correspondant respectivement aux phases 1 et 2 de la directive 2002/88/EC) et deux tracteurs (correspondant respectivement aux phases IIIa et IIIb de l'arrêté du 28 septembre 2005) ont été testés par l'INERIS et l'IRSTEA sur bancs d'essais à l'IRSTEA. Les polluants réglementaires classiques ainsi que d'autres composés tels que les HAP, la granulométrie en masse et en nombre des particules et la caractérisation chimique détaillée des composés organiques volatiles et semi volatiles émis ont été caractérisés. Une campagne de mesurage des polluants gazeux réglementaires a de plus été réalisée en situation réelle d'usage d'un des tracteurs. Des facteurs d'émissions ont été déterminés par l'IRSTEA sur la base de ces essais pour les tronçonneuses et les tracteurs testés. Plusieurs tests ont ensuite été réalisés par le CITEPA pour appréhender les écarts que générerait l'utilisation de facteurs d'émission issus de mesures pour la réalisation des inventaires comparés à l'utilisation des valeurs limites d'émission (VLE).

Pour les tronçonneuses, les observations suivantes ont pu être formulées :

- Le régime réduit se traduit par un niveau global des concentrations en polluants gazeux et particulaires organiques plus élevé qu'à pleine charge.
- Quel que soit le régime étudié, la distribution granulométrique massique est marquée par une prédominance de la fraction PM1.
- Le régime réduit se traduit par un doublement des concentrations en particules totales obtenues à pleine charge, imputable à une augmentation d'un facteur six de la fraction solide.
- Les phases de démarrages se caractérisent par des concentrations totales 50% supérieures à celles de la pleine charge, en raison d'un doublement de la fraction solide.
- La concentration de la fraction condensable demeure inchangée d'un régime à l'autre.
- Le passage du régime pleine charge au régime ralenti semble se traduire par une augmentation en absolu des concentrations massiques de toutes les tranches granulométriques. Il a été observé une augmentation de la contribution de la tranche comprise entre 1 μm et 2,5 μm et pour ce qui est de la distribution en nombre, un déplacement du mode de l'aérosol de 50 nm à 120 nm. Cette variation des diamètres entre la pleine charge et le régime réduit est probablement liée aux effets de température des rejets à l'échappement.
- Les concentrations en HAP sont respectivement de deux à six fois plus élevées en régime réduit, qu'en phase de démarrage et en régime de pleine charge.

- Le calcul des facteurs d'émission a permis d'établir que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que ceux de la littérature pour les polluants réglementés (COVT, NOx, PM) et plus faibles pour le CO. Le bilan des émissions carbonées montre que la combustion obtenue lors de nos essais a été meilleure que ce qui est rapporté par la littérature. Les valeurs obtenues pour les facteurs d'émissions de particules en nombre sont relativement élevées mais il est difficile de savoir à ce stade si cela est imputable à la technologie ancienne de la tronçonneuse testée. Le ratio des émissions de HAP totaux par rapport aux émissions particulières est également nettement plus élevé que celui observé sur des moteurs de scooters d'ancienne génération. La signature des HAP dans les facteurs d'émission est conforme à celle observée pour d'autres moteurs de technologie 2-Temps.
- Les niveaux d'émissions ramenés aux masses de carburant consommées, exploitables pour des inventaires, sont proposés : ces valeurs correspondent à des technologies anciennes.
- Les données fournies pour les tronçonneuses sont plus réduites que celles initialement prévues dans la convention en raison des difficultés rencontrées sur le banc d'essais qui a subi des avaries suffisamment importantes pour nous contraindre à stopper la campagne d'essais.

Deux tracteurs, correspondant chacun à une phase différente de réglementation, ont été testés sur un banc tracteur. Pour cette campagne de mesurage, le protocole d'essai a été conçu pour étudier les émissions de polluants en fonction des conditions de fonctionnement du moteur. Les concentrations de polluants dans les gaz d'échappement ont été quantifiées pour les polluants gazeux réglementés : CO, NOx, COV. On mesure la diminution des émissions au fur et à mesure des phases de réglementations. Les valeurs de concentration en méthane sont très faibles et souvent en dessous des limites de quantification pour les 2 modèles. Pour les particules, on montre que la majorité des particules émises ont un diamètre de 30 à 40 nm, comme pour les motorisations diesel. Sur la dernière génération, la présence d'un filtre à particule permet de diminuer sensiblement les concentrations dans les émissions. Des valeurs de surémissions à froid sont déterminées et la durée équivalente du froid correspond à 10 minutes de fonctionnement pour le polluant le plus sensible au démarrage à froid. On simule également des cycles bimodaux et on montre qu'une conduite oscillant entre 2 points de fonctionnement, typique d'un travail agricole, produit des émissions semblables à la moyenne pondérée de chaque mode pris isolément.

Enfin une campagne de mesurage a permis de suivre les émissions polluantes en condition réelle de conduite. Les facteurs d'émissions des polluants gazeux réglementés correspondant à chacune des activités de transport et de travail à la parcelle ont été déterminés à partir des caractéristiques des émissions à l'atmosphère et des paramètres de fonctionnement moteur. Comparée aux valeurs mesurées sur banc d'essai, la consommation spécifique de carburant est élevée en transport, tandis qu'elle diminue au cours des travaux lourds. Les émissions de COVT, NOx et CO augmentent en transport et dépassent parfois les seuils réglementaires. Cependant, les valeurs recueillies sont très dispersées selon la séquence observée, surtout pour le CO et COVT. Le facteur d'émission est ramené en g/km et les valeurs mesurées s'avèrent comparables à celle d'un poids-lourd de plus ou moins grande taille selon les polluants. Pour le travail du sol, les émissions de COVT et NOx sont proches des valeurs mesurées sur banc d'essai et les émissions de CO₂ diminuent significativement. Seule, l'émission de monoxyde de carbone augmente très fortement pour ce travail, mais reste en dessous des seuils réglementaires.

Suite à la détermination de facteurs d'émissions de plusieurs engins agricoles par l'IRSTEA sur la base des essais réalisés dans le projet EMNR, plusieurs tests ont été réalisés par le CITEPA pour appréhender les écarts que générerait l'utilisation de facteurs d'émission issus de mesures comparés à l'utilisation des valeurs limites d'émission (VLE), comme c'est le cas actuellement. Ces tests ont été menés pour les substances réglementées NOx, COVNM, particules et CO.

Les facteurs d'émission issus des travaux sur la tronçonneuse impacte les inventaires, significativement pour les émissions de COVNM et de CO, et plus faiblement pour les estimations de NOx et de particules, dont les niveaux d'émission sont très faibles et même négligeables au niveau français. Pour les COVNM et le CO, l'application d'un facteur d'émission basé sur ces mesures permettrait des réductions de l'ordre de 8 kt de COVNM et 45 kt de CO en 1990 (soit 0,3% et 0,4% du total national en 1990) et de 3 kt de COVNM et 18 kt de CO en 2010 (soit 0,3% et 0,5% du total national en 2010).

Au niveau des émissions des tracteurs, les résultats suivants ont été obtenus par le CITEPA :

- Pour les NOx, les facteurs mesurés s'éloignent assez peu des VLE. Les valeurs mesurées sont supérieures aux VLE pour les valeurs rapportées au kWh fourni (test 1) mais inférieures au VLE pour les valeurs rapportées au GJ consommé (test 2). Au bilan l'analyse de ces résultats donne une relativement bonne cohérence entre les valeurs mesurées et l'inventaire basé sur l'utilisation des VLE. Même en modifiant les facteurs d'émission des phases antérieures, les émissions varient au final assez peu par rapport au témoin que constitue l'inventaire actuel,
- Pour les COVNM, les facteurs d'émission mesurés sont significativement plus faibles que ceux de l'inventaire actuel (test 1 et test 2), ce qui entraîne une réduction forte des émissions à partir des années 2010 mais les émissions sont encore dirigées par la présence des engins des phases antérieures à la phase III ce qui explique l'impact très important d'une modification des phases antérieures dans les mêmes proportions par rapport au VLE. En condition terrain l'impact constaté est moindre même si également à la baisse par rapport à l'inventaire.
- Pour le CO, les facteurs d'émission mesurés s'éloignent considérablement des VLE pour les valeurs testées sur banc d'essai et dans une bien moindre mesure pour les essais réalisés sur le terrain. A noter que l'inventaire (témoin) ne fait pas évoluer les facteurs d'émission basés sur les VLE qui restent similaires pour les différentes phases.
- Pour les TSP, les facteurs d'émission testés n'influent pas fortement l'inventaire des particules sauf à modifier les facteurs d'émission des phases antérieures à la phase III.

SUMMARY

Off-road equipment and machinery are used in a lot of areas (industry, construction, agriculture, residential). Contrary to transport vehicles, they are not registered as a result the number of existing materials is poorly known and emissions are directly calculated using the fuel consumption and the emissions limit values fixed for regulated pollutants or data from the literature for non regulated compounds.

In that context, the aim of the EMNR project has been to fill in gaps in knowledge regarding atmospheric pollutant emissions from Off-road equipment and machinery. This report deals with the emissions from 2 steps gasoline engines (chain saw) and heavy-duty diesel vehicles (tractors) and the update of emissions inventory for Off-road equipment and machinery.

Two chain saws (respectively corresponding to stage I and II of the 2002/88/EC European directive) and two tractors (respectively corresponding to stage IIIa and IIIb of the 28th september 2005 french arrêté) have been tested by INERIS and IRSTEA on emissions bench at IRSTEA. Regulated pollutants as well as other emitted pollutants such as PAHs, aerosol size distribution in mass and number and VOCs and SVOCs have been characterized. Another emissions campaign on regulated gaseous compounds performed by IRSTEA took place in real conditions of use of on of the tractors. Emissions factors have been determined by IRSTEA based on these results. Several tests have been performed by CITEPA in order to evaluate gaps in emissions inventory obtained by using the emissions factors based on measurements instead of limit values.

For chain saw, the following information have been obtained:

- The use of chain saws in reduced output is characterized by a higher emission level of gaseous and particulate than pollutants nominal output;
- Whatever the output, the size distribution is mainly focused on PM₁;
- The reduced output causes double concentrations of TSP in comparison with nominal output, due to a strong increase (time six) of the solid fraction of the aerosol;
- Starting phases are characterized by an increase of concentrations of TSP of 50% due to a double concentration of the solid fraction of the aerosol;
- The concentration of the condensable fraction are not modified when changing from nominal to reduced output;
- When changing from nominal to reduced output all size fractions are increased. The contribution of the 1-2.5 μm in mass strongly increases and the mode of the aerosol in number is moved from 50 nm to 120 nm. These increases of size diameter are likely to be due to the fact that the temperature is lower in reduced output.
- PAHs emission concentrations measured in reduced output are respectively twice to six times those observed in nominal output.
- Determination of emissions factors showed that the results obtained are in the same range as the data from the literature for regulated compounds (TVOCs, NO_x, PM) except CO which exhibit lower results than observed in the literature. Carbonated emissions mass balance shows that the trials performed during the project were characterized by a better combustion than observed in the literature. Number emissions factors are quite high but this could be due to the fact the chain saw tested was quite an old technology. The ratio of PAHs against TSP is also higher than what can be observed for old generation mopeds. The PAHs profile is similar to those from typical two steps engines.
- Emission levels expressed per mass of fuel consumed have been determined, they correspond to old technologies.
- Data obtained for chain saw are limited compared to what was planned in the contract because of a technical problem that forced the project team to stop the sampling campaigns.

Two tractors, each one corresponding to a different stage of the regulation, have been tested on an emissions bench. For the measurement campaign a procedure has been designed in order to study the pollutant emissions as a function of the engine conditions of work.

The pollutant concentrations have been quantified for regulated compounds: CO, NO_x, VOCs, a decrease of the emission levels is observed according to the regulations stages. Methane emissions are below quantification limits for both tractors. For particulate matter, the emissions mode is centered on 30 nm to 40 nm, as observed in diesel engines. For the newest technology equipped with a particulate catalytic filter, concentrations are strongly reduced. Higher emissions are observed during cold start, which duration has been estimated to 10 minutes.

Finally, a field emissions measurement campaign has been performed for gaseous regulated compounds. Regulated gaseous emissions factors corresponding to transport and field work have been determined based on emissions measurements and engines parameters. VOCs, NO_x increase during transport and are sometimes higher than the limit values. However those values are very scattered, especially for CO and VOCs. Emissions factors expressed as g/km and measured values are comparable to what can be observed for heavy duty diesel engines. During ground work, emissions of VOCs and CO are closed to what has been obtained of emission bench and CO₂ emissions decrease significantly. On the other hand CO strongly increases during ground work but remains below limit values.

Thanks to the determination of emission factors of various off-road equipment and machineries during the EMNR project, several tests have been performed by CITEPA in order to evaluate gaps obtained by using the emissions factors based on measurements instead of limit values as it is done until now. Those tests have been performed of regulated compounds NO_x, NMVOCs, TSP and CO.

Emissions factors based on the measurements performed on the chain saw strongly impact emissions of NMVOCs, and CO and hardly impact NO_x and TSP whose French emissions levels are very low. For NMVOCs and CO the use of an emission factor based on these results would reduce the emissions of about 8 kt of NMVOCs and 45 kt of CO in 1990 (respectively 0,3% et 0,4% of total national in 1990) and 3 kt of NMVOCs and 18 kt of CO in en 2010 (respectively 0,3% and 0,5% of total national in 2010).

Regarding tractors, the following results have been obtained by CITEPA:

- For NO_x, emissions factors are quite close to limit values. The values obtained are higher than limit values when expressed in KWh supplied (test 1) but lower than emission limit values when expressed in GJ consumed (test 2). In the end, the analysis of results shows quite a good agreement between measured values and limit values. Even when modifying emissions factors from previous stages, the emissions do not vary much in comparison with the inventory in use.
- For NMVOCs, emissions factors are significantly lower than those from the inventory in use (test 1 and 2), which causes a strong reduction of emissions starting in the years 2010 but the emissions are still impacted by vehicles which stages are older than stage III which explains the very strong impact of a modification of prior stages in the same proportions to the ELVs. In field conditions the impact is less even if also downward from the inventory.
- For CO, the emission factors obtained are significantly different to limit values for measurement performed on the bench and less different for trials in the field. Note that inventory (witness) does not evolve emission factors based on ELVs which remain similar for the different phases.
- For the TSP, emission factors tested did not strongly influence inventory of particulate matter except if change the emission factors of the stages prior to the stage III are changed.

1. CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS

Pour étudier la pollution atmosphérique et réglementer les rejets de polluants à l'atmosphère, des méthodes normalisées de référence ont été définies et permettent, au fur et à mesure des années, d'obtenir des informations de plus en plus précises et exhaustives sur la nature et la quantité de substances polluantes émises à l'atmosphère. La méthode Corinair [1] est la méthode utilisée pour inventorier les émissions polluantes des différents pays européens : elle conduit à établir des inventaires qui répondent à des conventions et protocoles internationaux pour se protéger de la pollution atmosphérique longue distance.

Dans ces inventaires d'émissions polluantes, les tracteurs agricoles, les engins destinés aux travaux publics et le matériel dédié aux travaux forestiers, jardinage, entretiens des espaces verts appartiennent à la catégorie des transports et à la sous-catégorie des engins mobiles non routiers. On trouve dans Vigier, F., et al. [2] une présentation détaillée sur la méthodologie d'inventaire des émissions polluantes afférentes aux matériels agricoles. Pour la France, les tracteurs représentent environ 90% des émissions polluantes de ce secteur. Cette contribution représente entre 1 et 4% des émissions polluantes de tous les transports selon le polluant étudié. Elle est estimée à partir des ventes de carburants qui permettent de déterminer la quantité d'énergie livrée aux exploitations agricoles (cf. Lambrecht, U., Helms, H., Knörr, W.[3]). Mais les EMNR n'étant pas enregistrés comme ceux du transport routier, les parcs sont mal connus et les émissions sont calculées directement à partir des consommations de carburant et à partir de facteurs d'émission issus des Valeurs Limites d'Emission fixées pour les polluants réglementés, ou de quelques publications pour les composés non réglementés.

La Commission européenne a décidé de réglementer les émissions des moteurs équipant de tels engins, en fixant des valeurs limites d'émission pour plusieurs composés particuliers et gazeux car les contributions de ce secteur aux émissions de polluants atmosphériques s'avèrent importantes.

Dans ce contexte, la détermination de facteurs d'émission fiables, spécifiques et représentatifs de l'activité effective de chacun des secteurs où les EMNR sont présents est précieuse car rare. Cette détermination passe par la mise en œuvre de procédures réalistes et robustes de caractérisation des polluants présents.

L'objectif du projet EMNR a été de contribuer à l'amélioration de la connaissance des émissions polluantes des engins non routiers. Une étape préliminaire a été nécessaire pour choisir les méthodes de mesurage à mettre en œuvre pour la caractérisation des émissions : adaptation des méthodes avec le cas échéant l'interposition de systèmes de dilution pour éviter de saturer les supports de prélèvement ou pour rester dans la gamme des analyseurs utilisés. Cette étape préliminaire a amené l'INERIS à concevoir, tant pour les tronçonneuses que pour les tracteurs un dispositif, situé à l'échappement, permettant un maximum de mesurages simultanés sans perturber le fonctionnement de la tronçonneuse ou du tracteur. Des mises au point ont été réalisées lors de la caractérisation de la première tronçonneuse. Le chapitre 2 de ce rapport traite des émissions de petits engins équipés de motorisations 2 temps essence (tronçonneuses). Le chapitre 3 porte sur la caractérisation des émissions polluantes d'engins lourds équipés de moteur diesel (tracteurs). Le quatrième volet porte sur la remise à jour des inventaires nationaux d'émission pour les engins non routiers.

Pour les tronçonneuses et plus généralement les petits moteurs 2-temps essence, il est rappelé la réglementation propre à ces moteurs puis sont présentés les résultats de la caractérisation des concentrations à l'échappement de deux tronçonneuses, converties ensuite en facteurs d'émission.

Pour les tracteurs, les facteurs d'émissions utilisés pour les engins diesel sont basés sur des mesures qui datent de 2004 pour les matériels anciens et sur les valeurs seuils de la réglementation pour les matériels récents. La première partie du chapitre consacré aux tracteurs, rassemble quelques éléments documentaires spécifiques de la réglementation applicable aux engins non routiers diesel en général et aux tracteurs agricoles en particulier. Sont ensuite présentées les évolutions des procédures d'essai proposées pour répondre aux nouvelles exigences réglementaires. A travers cette discussion, est présenté le processus qui a conduit à faire évoluer les cycles d'essai pour en améliorer la représentativité.

Des éléments sont apportés pour entamer une discussion quant à la représentativité vis-à-vis des usages agricoles. Ensuite, sont présentées les mesures obtenues sur un banc d'essai de tracteurs pour étudier les concentrations polluantes à l'échappement. Les mesures caractérisent des tracteurs de technologie assez récente qui ont été ensuite comparées aux résultats d'une campagne in-situ pendant laquelle des facteurs d'émissions en condition réelle ont été déterminés. Enfin, cette partie s'achève par une synthèse des résultats des campagnes de mesurage de polluants sous la forme de facteurs d'émission destinés à nourrir l'approche inventaire.

Enfin, le dernier chapitre procède à la mise à jour des émissions du secteur EMNR en prenant en compte les facteurs d'émission déterminés dans ce projet.

1.1 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Les engins mobiles non routiers (EMNR) sont présents dans de nombreuses activités (i.e. engins de l'industrie, du BTP, de l'agriculture/sylviculture et du résidentiel/tertiaire).

Etant donnée l'importance des émissions de ces engins au niveau européen, la Commission Européenne a décidé de réglementer les émissions des moteurs équipant de tels engins. Ainsi, plusieurs directives relatives aux moteurs diesel d'une puissance comprise entre 18 et 560 kW et aux petits moteurs à essence d'une puissance maximale de 19 kW ont été adoptées. Ces directives ont été transposées en droit français par les arrêtés des 22 et 28 septembre 2005, relatifs aux contrôles de réception des moteurs fixant des valeurs limites des émissions de gaz polluants (NO_x, COVNM, CO) et de particules provenant des moteurs des EMNR et des tracteurs agricoles et forestiers. L'arrêté du 28 septembre 2005 se rapporte aux tracteurs agricoles et forestiers diesel et l'arrêté du 22 septembre 2005 aux autres engins diesel.

Une synthèse des dates d'entrée en vigueur des différentes phases pour les engins diesel (qui représentent le parc le plus important) est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Synthèse des textes réglementaires applicables aux engins diesel

Différentes phases	Arrêté du 22 septembre 2005 Date d'entrée en vigueur	Arrêté du 28 septembre 2005 Date d'entrée en vigueur
Phase I	entre le 1 ^{er} Janvier 1999 et le 1 ^{er} Juillet 1999 (en fonction de la puissance du moteur)	après le 30 Juin 2001
Phase II	entre le 1 ^{er} Janvier 2001 et le 1 ^{er} Janvier 2004 (en fonction de la puissance du moteur)	entre le 1 ^{er} Janvier 2002 et le 1 ^{er} Janvier 2004 (en fonction de la puissance du moteur)
Phase IIIA	entre le 1 ^{er} Janvier 2006 et le 1 ^{er} Janvier 2008 (en fonction de la puissance du moteur)	entre le 1 ^{er} Janvier 2006 et le 1 ^{er} Janvier 2008 (en fonction de la puissance du moteur)
Phase IIIB	entre le 1 ^{er} Janvier 2011 et le 1 ^{er} Janvier 2013 (en fonction de la puissance du moteur)	entre le 1 ^{er} Janvier 2011 et le 1 ^{er} Janvier 2013 (en fonction de la puissance du moteur)
Phase IV	entre le 1 ^{er} Janvier 2014 et le 1 ^{er} Octobre 2014 (en fonction de la puissance du moteur)	après le 1 ^{er} Octobre 2015

Pour les moteurs à allumage commandé (essence) d'une puissance inférieure ou égale à 19 kW, la première phase a pris effet en 2005, quel que soit le moteur. Pour la seconde étape (Phase II), la phase d'introduction des moteurs sur le marché s'étend de 2005 à 2009 selon la cylindrée du moteur et le caractère portable ou non de l'engin.

L'impact de ces réglementations est déjà visible au travers de la réduction de la contribution du secteur aux émissions globales (basée sur les hypothèses de renouvellement du parc), notamment sur les rejets de NOx et de particules des moteurs diesel (avec à terme la mise en œuvre de techniques de réduction en post traitement), ainsi que sur les émissions de COVNM des moteurs à essence, ce qui signifie que les flux émis par les EMNR et donc les facteurs d'émission vont évoluer avec l'âge des engins.

1.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET ENVIRONNEMENTAL : LES ÉMISSIONS DE POLLUANTS DES EMNR ET INCERTITUDES À LEVER SUR LES INVENTAIRES

Les EMNR participent de manière significative aux émissions de polluants atmosphériques en France. Les méthodologies d'estimation des émissions sont plus ou moins affinées selon les secteurs et le détail des statistiques et des informations disponibles.

Les substances pour lesquelles ce secteur contribue pour plus de 1% aux émissions de la France métropolitaine en 2008 sont listées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Contribution des émissions des EMNR aux rejets nationaux en 2012, en % des émissions totales

Substance	NOx	CO	CO ₂	HAP	COV	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
%	5,7	9,6	3,3	4,0	5,1	4,3	4,1	5,4

Les incertitudes sur les émissions de ces activités sont importantes du fait de la grande diversité d'engins de toutes tailles et d'utilisations très différentes. Ces engins n'étant pas enregistrés comme ceux du transport routier, les parcs sont mal connus. Les émissions sont donc calculées directement à partir des consommations de carburant par sous-secteur et par catégorie d'engins lorsque les informations sont disponibles (par exemple pour les engins essence, on fait une distinction entre les moteurs 2 et 4-temps).

Les engins diesel du secteur agricole sont ceux pour lesquels les données disponibles sont les plus détaillées : les recensements de l'AGRESTE (service de la statistique et de la prospective du Ministère de l'Agriculture) permettent d'estimer, avec une bonne précision, les parcs d'engins et leur évolution et plus particulièrement pour les tracteurs. Pour les engins essence de ce secteur, les données de parc ne sont pas disponibles. Les émissions des engins essence sont donc estimées directement à partir des consommations en carburant par catégorie d'engins (2-temps ou 4-temps, selon l'année de mise sur le marché). De plus, il est à noter qu'en termes d'émissions, les engins de l'agriculture / sylviculture sont prépondérants puisqu'ils représentent 81% des NOx des EMNR, 91% des TSP, 76% des COVNM, 83% des HAP, etc.

Pour les polluants réglementés (i.e. NOx, COVNM, TSP, CO), les facteurs d'émission utilisés au niveau national sont basés sur les valeurs limites réglementaires européennes. Ils sont calculés afin de pouvoir estimer les réductions d'émissions induites par le renouvellement du parc d'engins en fonction de la mise sur le marché des engins. Pour les autres polluants non réglementés tels que les HAP ou la spéciation des COVNM, les émissions sont estimées à partir de facteurs d'émission de la littérature rapportés à la consommation d'énergie totale, indépendamment de la phase de la réglementation à laquelle le moteur est assujéti. Les moteurs 2-temps émettent des quantités très importantes de particules et de composés organiques nocifs à la santé. Ces matières organiques, observées tantôt sous forme gazeuse, tantôt sous forme particulaire, proviennent des résidus de combustion, mais aussi d'imbrûlés d'huile et d'essence liées aux particularités du fonctionnement du moteur 2-temps. Ainsi, les quantités d'hydrocarbures rejetées par une tronçonneuse de 1 kW sont deux fois plus importantes que celles rejetées par un tracteur de 100 kW, à niveau de phase réglementaire équivalent. De même, les flux massiques et en nombres de particules recueillies pour ces moteurs dépassent souvent ceux mesurés pour des véhicules diesel.

2. ETUDES DES EMISSIONS DES TRONÇONNEUSES (IRSTEA/INERIS)

2.1 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Pour limiter la pollution atmosphérique, les états adoptent des réglementations afin de limiter les émissions de polluants des moteurs. Les valeurs limites qui s'imposent aux moteurs vont se sévérer au cours du temps. Les principaux organismes qui réglementent les émissions des moteurs à l'échappement, hors Asie, sont les suivants :

- CARB (California Air Resources Board) qui a été le plus précoce et qui a fixé les valeurs limites les plus sévères, dont les échelons ont été édictés par le CARB,
- US-EPA: (Environmental Protection agency) qui a défini les valeurs limites applicables aux Etats Unis, baptisées TIER_x (Time of Implementation for Emission Regulations),
- EEA : l'Union Européenne qui a défini également des plafonds d'émissions couramment appelés Euro_x pour les véhicules routiers. Pour les véhicules non-routiers et autres type de moteurs, les valeurs limites d'émission évoluent également dans le temps (on parlera de phases ou stage en anglais).

Au niveau européen, la directive 97/68/CE régle les émissions polluantes des engins mobiles non routiers (NRMM : non-road mobile machinery). Adoptée en 1997, cette directive fixe des plafonds d'émissions pour les polluants NOx, HC (COVT), PM et CO. Cette directive s'applique essentiellement aux moteurs diesel et c'est la directive 2002/88/EC qui a étendu la réglementation aux cas des moteurs à allumage commandé.

Cette seconde directive vise clairement à aligner la réglementation des moteurs à essence sur la réglementation américaine. La directive s'applique aux petits moteurs à essence, d'une puissance nette inférieure à 19 kW (moteur de type S : small) et distingue les moteurs associés à du matériel portatif (type SH : hand-held machinery) et non portatif (SN : non hand held). La phase 1 s'est attachée à appliquer à tous les moteurs de matériels de jardinage (scies, tondeuses, générateurs, pompes), après le 11 aout 2004, des exigences correspondant aux réglementations californiennes (Tier1).- ces dernières s'appliquent là-bas depuis 1995 - ainsi qu'aux réglementations américaines et japonaises. Les valeurs limites d'émissions polluantes et la date de mise en application de la phase 2 sont détaillées dans le Tableau 3 pour les différentes catégories de moteurs. Notons que la directive 2002/88/EC autorise une dérogation de 3 ans pour l'entrée en vigueur de la phase 2 pour les tronçonneuses, scies, débroussailleuses, tailles-haies.

Tableau 3 : Valeurs limites réglementaires des émissions polluantes des moteurs à essence de moins de 19 kW selon la directive 2002/88/EC : () sauf dérogation - voir texte pour les tronçonneuses et taille-haie, matériel testé dans le projet*

Catégorie	Cylindrée (cm ³)	Phase 1				Phase 2		Transition Phase 2 après
		CO	HC	NOx	HC+NOX	CO	HC+NOx	
	(g/kWh) →							
SH1	Cyl < 20	805	295	5,36		805	50	1 aout 2007
SH2	20 ≤ Cyl < 50	805	241	5,36		805	50	1 aout 2007(*)
SH3	50 ≤ Cyl	603	261	5,36		603	72	1 aout 2008(*)
SN1	Cyl < 66	519			50	610	50	1 aout 2004
SN2	66 ≤ Cyl < 100	519			40	610	40	1 aout 2004
SN3	100 ≤ Cyl < 225	519			16,1	610	16,1	1 aout 2007
SN4	225 ≤ Cyl	519			13,4	610	12,1	1 aout 2006

Les valeurs limites d'émissions de la phase 2 sont similaires aux normes californiennes (Tier3), américaines et japonaises. L'entrée en vigueur de la phase 2 pour le matériel de jardinage est plus récente que pour d'autres types de matériels (tracteurs).

Mais des difficultés techniques n'ont pas permis à ces moteurs de respecter les exigences de la phase 2 : c'est en particulier le cas pour certains engins mobiles portatifs à usage professionnel fonctionnant en positions multiples équipés de moteurs des classes SH:2 et SH:3, montés sur les tronçonneuses, les perceuses, débroussailluses, tondeuses, motoculteurs, aérateurs de gazon ou scies.

La directive 2010/26/EU a donc allongé la période de dérogation pour la mise en place de la phase 2 jusqu'au 31 juillet 2013 : cette dérogation concerne les machines équipées d'un moteur de classe SH2 ou SH3, d'une poignée à leur sommet destinés à l'entretien des arbres et fonctionnant en positions multiples (tronçonneuse et taille-haie portatifs). A la date d'achat du matériel pour le projet, la phase 2 n'était donc pas complètement rentrée en vigueur pour le matériel de jardinage testé dans le projet. Néanmoins, des Valeurs Limites d'Emission plus sévères sont déjà entrées en application aux Etats Unis et aux Japon : le matériel récent a donc fait l'objet de développements technologiques permettant de limiter les émissions et ce projet constitue une occasion d'apprécier l'effort entrepris pour atteindre les valeurs limites sévères en cours de négociation avec les acteurs du marché de moteur 2-temps inférieurs à 8 kW.

Les moteurs étudiés pour la catégorie des engins de jardinage sont des moteurs 2-temps de faible puissance (< 8 kW). Ces moteurs développent des puissances plus faibles que les moteurs 2-temps utilisés pour les 2-roues. Les moteurs 2-temps sont connus pour générer des émissions de composés organiques en quantité importante. L'objectif du projet est d'apporter des éléments de caractérisation détaillée sur la composition des fumées d'échappement de ces moteurs.

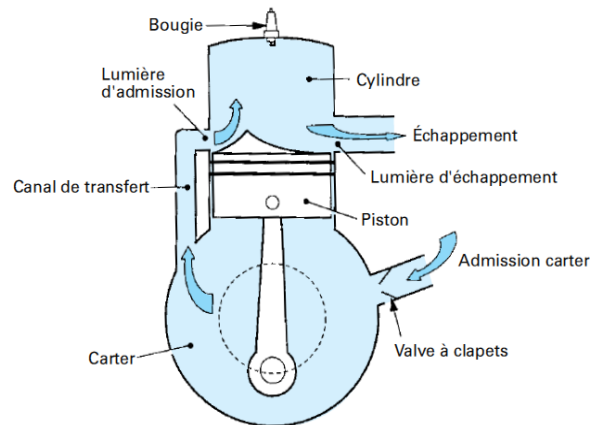


Figure 1 : Schéma d'un moteur 2-temps

Le cycle à 2 temps s'effectue pendant un tour seulement de vilebrequin. Les 2 phases de fonctionnement se distinguent par la présence ou non d'échanges gazeux avec l'extérieur.

Le premier temps est celui de l'échappement et l'admission : les ouvertures d'admission et d'échappement restent simultanément ouvertes pendant la plus grande partie de cette période qui voit le piston descendre du point mort haut (PMH) vers le point mort bas (PMB). L'admission des gaz frais et l'expulsion des gaz brûlés s'effectuent en même temps, dans une phase dite de balayage. Les gaz de combustion s'échappent sous leur propre pression et les gaz d'alimentation doivent être comprimés pour pouvoir pénétrer dans le cylindre. Cette légère compression, quelques dizaines de millibars, est obtenue en profitant de la course vers le bas du piston et en comprimant les gaz dans le carter (voir Figure 1). La compression est parfois assurée en utilisant un compresseur, mais le cas est rare pour les petits moteurs étudiés ici. L'alimentation en carburant s'effectue généralement en amont du cylindre. Le mélange air et carburant, appelé aussi mélange carburé, est réalisé souvent au niveau d'un carburateur. Les techniques d'injection directes, qui équipent les moteurs de 2-roues, sont moins usuelles pour le matériel de jardinage.

Le second temps est consacré à la compression des gaz admis dans le carter et simultanément à la combustion puis à la détente des gaz présents dans le cylindre. La fin de compression et la combustion se déroulent d'une manière identique à celles du moteur 4 temps. Depuis très longtemps, le balayage du mélange carburé se faisait par un seul canal de transfert. Cette technologie ne favorise pas l'homogénéisation du mélange dans la chambre de combustion. En effet, une partie des gaz frais (flux entrant) arrivant en fin d'échappement dans le cylindre balayent celui-ci et sortent directement, engendrant des pertes de mélange carburé par l'échappement.

Les moteurs 2-temps génèrent de ce fait des quantités d'hydrocarbures imbrûlés à l'échappement et donc une pollution très spécifique et importante. En outre, les moteurs 2-temps consomment un mélange d'essence et d'huile : l'huile permet d'assurer la lubrification des pièces dans le carter où se fait la compression des gaz avant combustion.

Cette huile est composée de molécules organiques lourdes qui ne participent pas tellement à la combustion et qui augmentent les quantités de substances organiques présentes dans les gaz d'échappement.

Pour réduire les émissions à l'échappement, les constructeurs ont beaucoup travaillé sur l'amélioration du balayage des moteurs. Les principales modifications apportées concernent des modifications des canaux de transfert et débouché: sur les moteurs récents, le nombre de canaux de transfert a augmenté. Leurs positions et leurs formes ont également changé de façon à optimiser la combustion dans le cylindre et limiter les pertes par balayage.

Pour satisfaire les valeurs limites, les constructeurs ont privilégié deux principes:

- Améliorer au maximum le moteur 2-temps classiques, avec les moteurs à «balayage stratifié». Le principe consiste à injecter « une veine d'air frais », sans carburant entre l'arrivée des gaz frais carburés dans le cylindre et la sortie des gaz d'échappement.

Cette veine d'air frais fait « tampon » et limite les émissions d'imbrûlés. L'admission de l'air frais se fait par une entrée spéciale montée sur un carburateur double corps ou directement par des clapets installés sur le cylindre.

- Modifier le moteur en combinant les caractéristiques du 2-temps et du 4-temps dans un même moteur dit «Mixte». Les moteurs mixtes ont un volume pratiquement identique au moteur 2-temps : ils comprennent la partie haute d'un moteur 4-temps (soupapes et distribution) et la partie basse d'un moteur 2-temps (carter étanche, graissage des pièces mobiles par «brouillard d'huile»). L'enjeu est d'obtenir un moteur aussi performant qu'un 2-temps classique, pas beaucoup plus lourd, mais surtout bien moins polluant. Dans cette technologie, le contrôle des soupapes permet de mieux contrôler la phase de balayage.

L'objectif du projet visait à établir des facteurs d'émission de moteurs 2-temps utilisés pour le matériel de jardinage. On s'est limité ici à des mesurages sur des tronçonneuses considérées comme représentatives de l'ensemble des moteurs 2-temps de jardinage : c'est en tout cas une catégorie pour laquelle le moteur fonctionne avec des taux de charge relativement élevés (0,85).

On s'intéresse en particulier à documenter l'évolution de ces facteurs d'émission au cours du temps, en comparant des matériels mis en service antérieurement aux réglementations des émissions aux matériels actuellement commercialisés.

2.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.2.1 BANC DE TEST IRSTEA

Le banc utilisé permet des tests de moteurs de débroussailleuse et d'autres moteurs à essence de faible encombrement, dans la limite de puissance de 12 kW.

Le banc comprend :

- un marbre anti-vibration, et le nécessaire à l'immobilisation de la machine testée.
- un frein à courant de Foucault (Vibro meter 2WB65 SPEZ), réglable mais non asservi, avec un accouplement flexible, dont la plage d'utilisation est limitée à une puissance de 12 kW, et le couple à 20 Nm. La vitesse de rotation est au maximum de 6000 tr/min en position verticale et 12000 tr/min à horizontale, position utilisée pour les tronçonneuses. Le régime moteur est réglé à l'aide d'un câble d'accélération qui permet de commander la poignée de la tronçonneuse tandis que le couple se règle à partir d'un dispositif électronique de commande du frein.

Ce frein développe un couple de freinage proportionnel à la vitesse de rotation. Le couple maximal est réglé à la vitesse nominale de la tronçonneuse.

Le refroidissement du frein est réalisé par de l'eau circulant dans le stator.

- une balance permettant de mesurer la masse de carburant consommée au cours de l'essai (première campagne : balance Mettler PM2000, puis balance par mesurage de l'effort sur un axe)

- un anémomètre (Delta Ohm HD 2214P2) permettant le mesurage des vitesses et températures d'air dans l'échappement. L'anémomètre est monté sur un porte-tube spécifique (L=75 cm et d= 20 mm). Les mesurages de débit à l'échappement et les mesurages des émissions polluantes ne sont pas simultanés, mais ils permettent de vérifier la concordance avec la formule utilisée pour estimer le débit à partir des régimes du moteur mesurés lorsque l'essai est pratiqué avec le porte-tube de prélèvement des effluents:

$$Q_v = N \cdot Cyl$$

La puissance calculée à partir des mesures de couple et de régime est corrigée de conditions atmosphériques selon la norme **NF ISO 15550**.

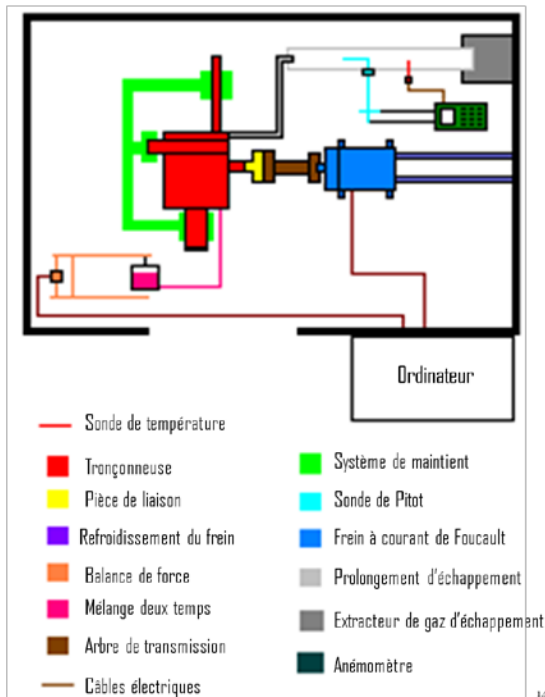


Figure 2 : Schéma de principe du banc d'essai tronçonneuse (à gauche) et photo d'une tronçonneuse accouplée au banc frein

Après la première campagne d'expérimentation, les instruments de mesure sont raccordés à une centrale d'acquisition (Campbell scientifique CR1000) pour l'acquisition en continu des paramètres de fonctionnement de la tronçonneuse (régime moteur, couple), de sa consommation de carburant. Les conditions ambiantes (température d'air, pression atmosphériques et hygrométrie dans le hall d'essai) sont mesurées en début d'essai (Vaisala RH and T probe, HMP 12).

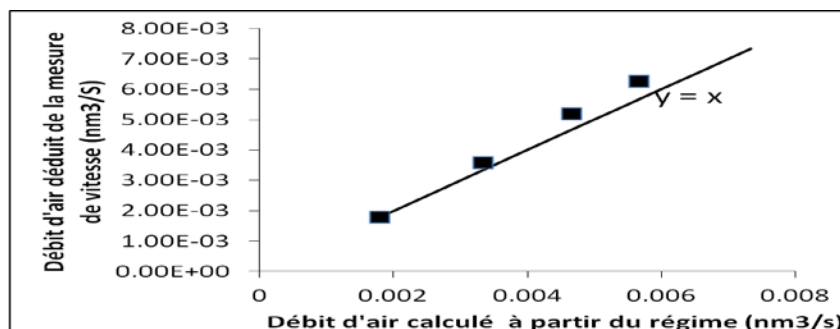


Figure 3 : Comparaison des mesures de débits (nm³/s – 1 bar, 298 °C) par sonde de Pitot et débits estimés à partir du régime moteur

2.2.2 TRONÇONNEUSES TESTÉES

On s'intéresse aux évolutions technologiques des moteurs 2-temps et à leurs conséquences sur les émissions polluantes. Un premier critère de sélection porte sur l'année de fabrication du matériel. Les tronçonneuses retenues ont été sélectionnées en tenant compte de critères liés également à :

- la puissance développée par le moteur : les tronçonneuses de faible puissance (1 à 2 kW) sont destinées plutôt à des petits travaux tandis que les tronçonneuses plus puissantes (3-4 kW) sont destinées à des travaux plus lourds, tout en respectant des limites de poids de matériel qui les rendent adaptées aux travaux forestiers en France.
- la fiabilité du matériel. Les tronçonneuses retenues pour les campagnes d'essais sont réputées pour leur fiabilité.

Les caractéristiques des machines devant être utilisées pour les expérimentations figurent dans le Tableau 4 tandis que des informations plus détaillées sont fournies en annexe A.

Tableau 4 : Descriptif des tronçonneuses retenues dans le projet

	Ancienne Technologie (avant 2007)		Technologie Actuelle
~1-2.5 kW	Stihl 023C Cyl = 40.2 cm ³ P = 1.9 kW		Stihl MS251/C Cyl = 73.5 cm ³ P = 2.2 kW
~ 2.5-5 kW	Stihl038 AV Cyl= 72.2 cm3 P = 3.6 kW	Stihl 034 AV Cyl = 56.5 cm3 P = 3 kW	Husqvarna Cyl = 73.5 cm3 P = 4.2 kW

En raison d'un problème de fonctionnement du banc d'essais apparu lors du test de la seconde tronçonneuse, les tests sur celle-ci n'ont pas été achevés. Le banc requérant une réparation lourde IRSTEA qui se désengage du domaine d'activité de suivi de ce type de matériel, a souhaité ne pas poursuivre le programme de caractérisation et en a informé l'ADEME.

Le carburant utilisé pendant toute la durée des essais est de l'essence sans plomb SP95 à basse teneur en soufre. Le mélange carburé est obtenu après addition d'un volume d'huile (Unil Opal synthétique – 2T) représentant 2,5% du volume total de mélange, soit un mélange légèrement inférieur aux préconisations des constructeurs (3% valeur conseillée).

Allures de fonctionnement testées

La majorité du matériel de jardinage (matériel portatif fonctionnant à vitesse fixe: coupes-bordures, débroussailleuses, souffleurs, aspirateur, tronçonneuses et scies portables) est testé sur un cycle d'essais qui comporte deux modes de fonctionnement (cycle G3 dédié aux matériels portatifs fonctionnant à vitesse fixe - hand held rated speed applications). Ces deux modes sont le mode ralenti et le mode nominal. À la phase 2, le facteur d'émission est calculé à partir des valeurs mesurées sur le cycle G3 en introduisant une pondération de 15% pour le mode ralenti et 85% pour le mode nominal. Nous retiendrons ici cette pondération ainsi que pour le matériel antérieur à la phase 1.

Le mode nominal est déterminé à partir des caractéristiques fournies par les constructeurs. L'essai consiste à maintenir le point de fonctionnement (ralenti ou nominal) pendant une heure, de façon à assurer la collecte d'une quantité de matière suffisante pour les analyses. Pour le mode nominal, les durées des essais (1 heure en charge) rendent le test sévère et, sur la première tronçonneuse testée il a été observé une dégradation de la performance du moteur qui se traduit par une moins grande stabilité du régime et du couple moteur à la fin de la campagne. Pour le mode ralenti, on évite un léger effet de freinage du frein sur le moteur en procédant à l'essai au ralenti en étant désaccouplé du banc.

Au cours de la première campagne, nous avons aussi testé un cycle de démarrage, baptisé cycle de démarrage à chaud, comportant deux démarrages successifs de la tronçonneuse suivis de 10 min pendant lesquelles le moteur tourne à pleine charge. Pour ces cycles, on relève le nombre de tentatives nécessaires pour le démarrage du moteur (nombre de tirage sur la poignée du démarreur).

Nota : Un cycle de démarrage est dit à chaud lorsque le moteur a subi d'autres tests dans les 24 heures précédant l'essai. Sinon, il est dit à froid.

2.2.3 MESURAGE DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES

Pour les tronçonneuses, la caractérisation des émissions a nécessité une étude préliminaire pour choisir les méthodes de mesurage à mettre en œuvre pour la caractérisation des émissions et pour adapter les systèmes de prélèvement afin de pouvoir réaliser un maximum de mesurages simultanés. Dans un premier, un tube équipé de piquages pour le prélèvement de polluants et visant le maintien des conditions d'émission, a été conçu à l'INERIS afin de réaliser la première campagne d'essais. Cette campagne de caractérisation des émissions de la tronçonneuse STILH 023 avait également pour objectifs la mise au point des méthodes de mesurage choisies. Les résultats de cette campagne ont permis de tirer des enseignements en termes de métrologie et d'apporter pour les campagnes suivantes des modifications et des ajustements aux méthodes de mesurage.

2.2.3.1 TUBE DE PRÉLÈVEMENT ET DE MAINTIEN DES CONDITIONS D'ÉMISSION DE L'EFFLUENT

Afin de réaliser des mesurages représentatifs des conditions réelles d'émission, il est impératif d'éviter toute modification de l'aérosol avant prélèvement. Pour ce faire, un tube de prélèvement permettant le maintien des conditions d'émission a été réalisé à l'INERIS. Ce tube (cf. Figure), consiste en un cylindre équipé d'une double enveloppe isolée à travers laquelle circule de l'air chaud à contre courant permettant de maintenir la température de l'effluent.

Les dimensions du tube ont été déterminées afin de respecter au mieux les conditions d'écoulement et pour permettre la réalisation des prélèvements dans des conditions s'approchant de celles prescrites par les normes en vigueur:

- Un diamètre (D) du tube de 40 mm a été choisi sur la base des informations sur les débits des tronçonneuses observés par l'IRSTEA lors de précédents essais et de façon à atteindre le meilleur compromis entre les contraintes d'ordre métrologique (vitesse d'écoulement suffisante, diamètre suffisant pour éviter des perturbations entre les points de prélèvement) et les contraintes d'ordre logistique (encombrement lié au tube).

Ces débits étaient compris entre 6 m³/h en régime réduit et 20 m³/h en régime nominal, ce qui correspond à une vitesse d'écoulement comprise entre 1 m/s et 4 m/s ;

- Une longueur de 920 mm visant à respecter les distances minimales entre les points d'émission situés en amont et en aval des points de prélèvement d'espèces particulaires respectivement égales à 5 D (200 mm) et 3 D (120 mm). Les points de prélèvement de gaz ont pour leur part été espacés d'une distance minimale de 1 D.

Le tube est équipé de 5 « piquages ». Quatre sont utilisés par l'INERIS pour réaliser les mesurages des paramètres suivants :

- mesurage en continu des gaz de combustion : 2 piquages
- mesurage des espèces particulaires : 1 piquage (buse de diamètre 12 mm intégrée)
- mesurage de la température : 1 piquage.

Un piquage supplémentaire a été mis à disposition de l'IRSTEA pour un mesurage de gaz.

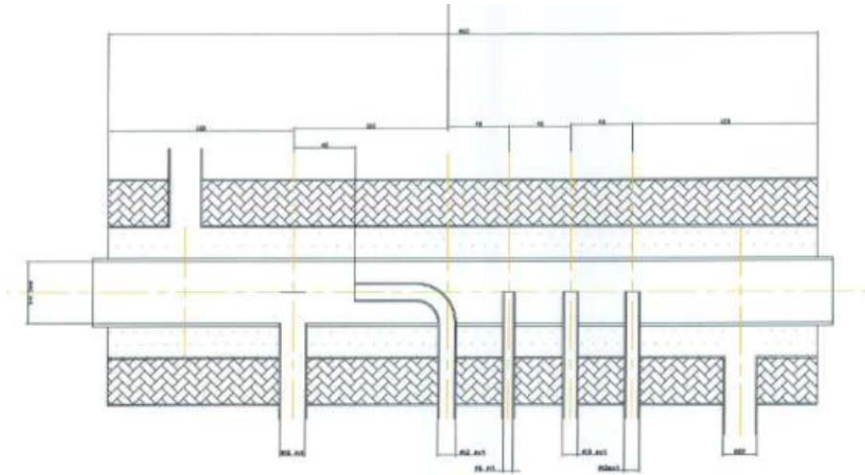


Figure 4 : Schéma du tube de prélèvement et de maintien des conditions de l'effluent réalisé à l'INERIS dans le cadre du projet

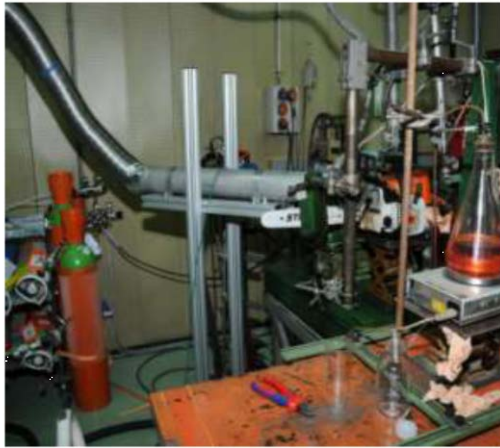


Figure 5 : Photos du tube de prélèvement et de maintien des conditions de l'effluent réalisé à l'INERIS dans le cadre du projet

2.2.4 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS

Les méthodes de caractérisation des émissions mises en œuvre sont présentées en détails en Annexe B.

L'effluent n'ayant pas fait l'objet de caractérisations préalables permettant d'évaluer les niveaux de concentrations des espèces cibles, une étape d'adaptation des méthodes de mesurage est nécessaire. Cela consiste par exemple à introduire un étage de dilution des effluents pour adapter les conditions de prélèvement (concentration, température, humidité) aux méthodes de mesurage mises en œuvre.

Le taux de dilution à appliquer et dans le cas de prélèvements intégratifs (filtres, supports solides, solutions de barbotage) la durée des prélèvements sont également fixés au cours des essais, ces mises au point ont été réalisées lors de la caractérisation de la première tronçonneuse.

Les résultats de cette campagne ont ensuite permis de tirer des enseignements en termes de métrologie et d'apporter pour les campagnes suivantes des modifications et des ajustements aux méthodes de mesurage choisies (annexe C).

2.3 PROGRAMME D'ESSAIS

Les essais de caractérisation des émissions atmosphériques des tronçonneuses ont été réalisés par du personnel habilité : Amandine Fievet, Nicolas Karoski, Denis Van Elsuve et Adrien Dermigny.

2.3.1 TRONÇONNEUSE STILH 023

Les essais se sont déroulés du 13 février 2013 au 19 février 2013, avec une moyenne de 4 essais par jour. Le tableau ci-dessous synthétise le nombre d'essais par composé et par allure de fonctionnement.

Tableau 5 : Nombre d'essais réalisés par paramètres et par allure de fonctionnement

Conditions	Paramètre									
	CO	CO ₂	O ₂	COVT/ COVNM	NO/ NO _x / NO ₂	TSP (solide+condensable)	HAPs	COVs spécifiques	PM10/ PM2.5/ PM1 en masse	Granulométrie détaillée des PM10 en nombre
Pleine charge	n=9	n=9	n=9	n=9	n=9	n=4	n=4	n=4	n=5	n=5
Régime ralenti	n=6	n=6	n=6	n=6	n=6	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3
Démarrage	n=2	n=2	n=2	n=2	n=2	n=2	n=2	n=2		

Démarrage : Démarrage à chaud comprenant 2 démarrages successifs suivis chacun d'un fonctionnement en pleine charge de 10 minutes.

2.3.2 TRONÇONNEUSE STILH MS 521

Les essais se sont déroulés les 18 et 19 juin 2013. En raison d'un problème lié au dysfonctionnement du banc moteur IRSTEPA, le programme d'essais initialement prévu a dû être modifié, sur les trois tronçonneuses une seule a pu être partiellement testée. Le tableau ci-dessous synthétise le nombre d'essais par composé et par allure de fonctionnement.

Tableau 6 : Nombre d'essais réalisés par paramètres et par allure de fonctionnement

Conditions	Paramètre									
	CO	CO ₂	O ₂	COVT/ COVN M	NO/ NOx/ NO ₂	TSP (solide+condensable)	HAPs	COVt	PM10/ PM2.5/ PM1 en masse	Granulométrie détaillée des PM10 en nombre
Régime ralenti	n=6	n=6	n=6	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3
Démarrage à froid	n=3	n=3	n=3	n=2	n=1	n=2	n=2	n=1	n=1	n=1

2.4 RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS DES TRONÇONNEUSES

2.4.1 CONSTAT GÉNÉRAL SUR LE FONCTIONNEMENT DES TRONÇONNEUSES ET DU BANC D'ESSAIS

Les durées importantes de fonctionnement pour réaliser les prélèvements à pleine charge altèrent le fonctionnement de la tronçonneuse. Il est constaté en effet qu'au bout de quelques cycles sur la tronçonneuse STIHL 023, les régimes et couples moteur deviennent plus difficiles à stabiliser et des baisses de régime et de couple sont fréquemment observées en cours d'essai. L'amplitude et la fréquence de ces baisses augmentent au fur et à mesure que l'on avance dans la campagne d'essais. Le banc n'étant pas conçu pour réguler les consignes de régime et de couple dans le temps, il est impossible de fixer une consigne parfaitement constante et il est apparu nécessaire d'enregistrer les régimes et couples de façon à caractériser la stabilité du fonctionnement pendant l'essai. Un dispositif d'acquisition continu de ces signaux a donc été mis en place afin de mettre en relation les concentrations mesurées sur les cycles et la stabilité de fonctionnement de la tronçonneuse.

Au cours de la seconde campagne, les premiers essais ont été réalisés avec la tronçonneuse Stihl MS251/C. Le programme de mesure a démarré avec les tests au ralenti (tronçonneuse non accouplée au banc) : 6 essais de ralenti ont été effectués et 3 essais de démarrage ont été réalisés. Les essais sont suspendus car les silentblocks, pièces en caoutchouc utilisées pour l'accouplement de l'arbre du moteur de la tronçonneuse à l'arbre de freinage, sont détériorés. Après réparation du banc entreprise la semaine suivante il s'avère que les valeurs de couple, de débits et de température d'échappement ne sont pas normales. La campagne est à nouveau arrêtée. Le démontage complet du banc d'essai révèle des problèmes de vétusté trop importants pour envisager une réparation. En octobre 2013, l'Irstea informe l'ADEME et ses partenaires de l'impossibilité de réaliser la suite des travaux initiés pour cette tâche.

2.4.2 BILAN DES ESSAIS VALIDÉS

Nota : La quantification des COV spécifiques n'a pu aboutir en raison de la saturation des supports de prélèvements (Annexe D) et ce malgré l'introduction d'un étage de dilution lors des essais sur la tronçonneuse Stihl MS 521.

2.4.2.1 PREMIÈRE CAMPAGNE

- En régime ralenti, en raison du faible débit de la tronçonneuse, il est possible que la présence du tube de prélèvement ait causé un phénomène d'aspiration, entraînant un manque d'étanchéité au niveau de la jonction avec le pot d'échappement de la tronçonneuse, l'écoulement gazeux s'est peut être trouvé « dilué » avec de l'air ambiant aspiré en aval du tube au niveau du collecteur d'extraction.
- Le tableau ci-dessous présente pour les paramètres étudiés ceux dont les résultats ont été validés (cases vertes), ceux pour lesquels des résultats incohérents ont été obtenus (cases grises) et ceux pour lesquels le support de prélèvement ou l'analyseur ont été saturés et qui demanderont une modification des conditions opératoires lors de la seconde campagne.

Tableau 7 : Bilan de la première campagne de mesurages

Conditions	Paramètre									
	CO	CO ₂	O ₂	COVT COVNM	NO NO _x NO ₂	TSP (solide/ condensable)	HAP	COV spécifiques	PM10 PM2.5 PM1 en masse	Granulométrie détaillée des PM10 en nombre
Pleine charge	Red	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Green
Régime ralenti	Red	Green	Green	Red	Grey	Green	Green	Red	Green	Green
Démarrage	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green

Saturation du système de mesurage Résultats incohérents Résultats validés

HAP : 2 essais invalidés en raison d'un problème analytique

2.4.2.2 SECONDE CAMPAGNE

Tableau 8 : Bilan de la seconde campagne de mesurages

Conditions	Paramètre									
	CO	CO ₂	O ₂	COVt	NO/ NO _x / NO ₂	TSP (solide/ condensable)	HAP	COVt	PM10/ PM2.5/ PM1 en masse	Granulométrie détaillée des PM10 en nombre
Régime ralenti	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Démarrage à froid	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Saturation du système de mesurage Résultats incohérents Résultats validés

2.4.3 CARACTÉRISATION DES EFFLUENTS DE LA TRONÇONNEUSE STIHL 023

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants. Ils sont partiels, le banc d'essais de l'IRSTEA étant tombé en panne. On observe globalement (mise à part pour les HAP) une bonne répétabilité des résultats obtenus en régime nominal. Celle-ci est un peu moins bonne en régime réduit, ce qui était prévisible puisque la source est plus difficilement maîtrisable et les émissions plus variables dans ce cas. Pour les HAP, la dispersion des résultats est plus élevée quel que soit le régime.

2.4.3.1 CARACTÉRISATION POUR LES POLLUANTS RÉGLEMENTÉS GAZEUX

2.4.3.1.1 CARACTÉRISTIQUES À LA PLEINE CHARGE

Tableau 9 : Concentrations et température des gaz de combustion à pleine charge, (tronçonneuse STIHL 023)

	Heure d'essais	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO _x (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Température °C
T1(P1)(PM)_13/02/13	13h46 à 15h00	9.3	6.9	13025	53	113	27	183
T1(P2)(PM)_13/02/13	15h36 à 16h50	9.9	6.4	10795	50	110	29	166
T1(P3)(PM)_13/02/13	17h07 à 18h10	9.8	7.0	10277	49	113	35	172
T1(P4)(PM)_14/02/13	10h05 à 11h23	10.3	6.3	Saturation	61	131	31	156
T1(P5)(PM)_14/02/13	12h48 à 14h15	10.0	6.6	Saturation	49	105	25	157
T1(P6)(HAP)_18/02/13	10h33 à 11h43	9.1	8.1	N.M.	58	127	32	186
T1(P7)(HAP)_18/02/13	13h07 à 14h17	9.2	7.7	N.M.	51	110	26	172
T1(P8)(HAP)_19/02/13	14h00 à 15h11	9.1	7.6	N.M.	57	135	39	270
T1(P9)(HAP)_19/02/13	15h27 à 16h04	7.6	9.6	N.M.	35	85	28	232
Moyenne Pleine charge		9.4	7.4	11366	51	114	30	188
Ecart type Pleine charge		0.8	1.0	1460	8	15	5	38

2.4.3.1.2 CARACTÉRISTIQUES AU RALENTI

Tableau 10 : Concentrations et température des gaz de combustion au ralenti, tronçonneuse STIHL 023*

	Heure d'essais	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NOx (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Température °C
T1(R1)(PM)_14/02/13	15h00 à 16h04	1.8	16.3	Saturation	32	16	-10	91
T1(R2)(PM)_14/02/13	16h08 à 16h57	1.9	16.1	Saturation	33	17	-10	92
T1(R3)(PM)_14/02/13	17h05 à 17h51	1.8	16.3	Saturation	33	16	-10	97
T1(R4)(HAP)_18/02/13	16h05 à 17h05	1.1	17.9	23861	15	10	-10	105
T1(R5)(HAP)_18/02/13	17h15 à 18h15	1.6	16.8	9767	19	12	-10	153
T1(R6)(HAP)_19/02/13	09h03 à 10h03	2.1	15.3	43900	25	16	-10	85
Moyenne Ralenti		1.7	16.4	25843	26	14	-10	104
Ecart type Ralenti		0.3	0.8	17152	8	3	0	25

*des résultats de mesure incohérents conduisant à des concentrations négatives de NO₂, ont été observés systématiquement en régime ralenti. Ces résultats sont peut être dus à des corrections d'interférence du CO₂ inappropriées pour les faibles niveaux de concentrations de NOx et CO₂ rencontrés pour cette configuration de ralenti.

2.4.3.1.3 CARACTÉRISTIQUES AU DÉMARRAGE

Tableau 11 : Concentrations et température des gaz de combustion durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NOx (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Température °C
T1(DC)(HAP)_19/02/13	10h48 à 11h03	7.2	10.1	N.M.	39	88	24	193

2.4.3.2 HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

Nota : B(a)A : Benzo (a) anthracène - B(b)F : Benzo (b) fluoranthène – BKF : Benzo (k) fluoranthène - B(a)P : Benzo (a) pyrène - D(a,h)A : Dibenzo (a,h) anthracène - B(g,h,i)P : Benzo (g,h,i) pérylène - In(1,2,3-c,d) : Indeno (1,2,3-c,d) pyrène

2.4.3.2.1 CARACTÉRISTIQUES À PLEINE CHARGE

Tableau 12 : Concentrations en HAP à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	Fluoranthène	B(a)A	B(b)F	BKF	B(a)P	D(a,h)A	B(g,h,i)P	In(1,2,3-c,d)	Somme des HAP (ng/m ³ à O ₂ réel)		
										>	<	
(ng/m ³ à O ₂ réel)												
T1(P6)(HAP)_18/02/13	10h33 à 11h43	39980	7390	8085	627	8114	<	96,5	15224	4081	83500	83597
T1(P7)(HAP)_18/02/13	13h07 à 14h17	30540	8434	6841	368	7468	<	99,6	8593	1892	64138	64237
T1(P8)(HAP)_19/02/13	14h00 à 15h11	Essais invalidés- Problème analytique										
T1(P9)(HAP)_19/02/13	15h27 à 16h04											
Moyenne Pleine charge		35260	7912	7463	498	7791	<	98	11909	2986	73819	73917
Ecart type Pleine charge		6675	738	879	183	456	<	2	4688	1548	13692	13689

2.4.3.2.2 CARACTÉRISTIQUES AU RALENTI

Tableau 13 : Concentrations en HAP au ralenti, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	Fluoranthène	B(a)A	B(b)F	B(k) F	B(a)P	D(a,h)A	Benzo(g, h,i)P	In(1,2,3- c,d)	Somme des HAP (ng/m ³ à O ₂ réel)		
										>	<	
										(ng/m ³ à O ₂ réel)		
T1(R4)(HAP)_18/02/13	16h05 à 17h05	276854	38132	43367	12640	71383	<	1179	130338	54781	627496	628675
T1(R5)(HAP)_18/02/13	17h15 à 18h15	421408	58354	66391	18450	99633	<	1165	204344	86774	955354	956518
T1(R6)(HAP)_19/02/13	09h03 à 10h03	95765	13035	15369	4766	25534	<	243	51676	24172	230318	230561
Moyenne Ralenti		264675	36507	41709	11952	65517	<	862	128786	55243	604389	605251
Ecart type Ralenti		163162	22703	25551	6868	37396	<	536	76346	31303	363070	363545

2.4.3.2.3 CARACTÉRISTIQUES AU DÉMARRAGE

Tableau 14 : Concentrations en HAP durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	Fluoranthène	B(a)A	B(b)F	B(k) F	B(a)P	D(a,h)A	Benzo(g, h,i)P	In(1,2,3- c,d)	Somme des HAP (ng/m ³ à O ₂ réel)		
										>	<	
										(ng/m ³ à O ₂ réel)		
T1(DC)(HAP)_19/02/13	10h48 à 11h03	206139	27095	23517	4452	27856	<	381	38054	17391	344504	344884

2.4.3.3 PARTICULES : TSP ET PM

2.4.3.3.1 CARACTÉRISTIQUES À PLEINE CHARGE

Tableau 15 : Concentrations en TSP et PM à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	IP (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Condensables (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	IP Tot (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)				Nombre total moyen (#/cm ³)
					PM1	PM2,5	PM10	PM10+D>10µm	
T1(P1)(PM)_13/02/13	13h46 à 15h00	N.M.	N.M.	N.M.	303	310	310	317	5.8E+08
T1(P2)(PM)_13/02/13	15h36 à 16h50	N.M.	N.M.	N.M.	251	259	266	273	5.4E+08
T1(P3)(PM)_13/02/13	17h07 à 18h10	N.M.	N.M.	N.M.	277	284	291	292	5.9E+08
T1(P4)(PM)_14/02/13	10h05 à 11h23	N.M.	N.M.	N.M.	248	253	259	259	5.2E+08
T1(P5)(PM)_14/02/13	12h48 à 14h15	N.M.	N.M.	N.M.	281	286	291	297	5.0E+08
T1(P6)(HAP)_18/02/13	10h33 à 11h43	139	294	433	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T1(P7)(HAP)_18/02/13	13h07 à 14h17	120	238	358	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T1(P8)(HAP)_19/02/13	14h00 à 15h11	145	326	471	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T1(P9)(HAP)_19/02/13	15h27 à 16h04	124	295	418	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
Moyenne Pleine charge		132	288	420	272	278	283	287	5.5E+08
Ecart type Pleine charge		12	36	47	23	23	21	22	3.8E+07

2.4.3.3.2 CARACTÉRISTIQUES AU RALENTI

Tableau 16 : Concentrations en TSP et PM au ralenti, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	IP (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Condensables (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	IP Tot (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)				Nombre total moyen (#/cm ³)
					PM1	PM2,5	PM10	PM10+D>10µm	
T1(R1)(PM)_14/02/13	15h00 à 16h04	N.M.	N.M.	N.M.	1139	1189	1197	1200	3.2E+08
T1(R2)(PM)_14/02/13	16h08 à 16h57	N.M.	N.M.	N.M.	1055	1106	1111	1116	3.4E+08
T1(R3)(PM)_14/02/13	17h05 à 17h51	N.M.	N.M.	N.M.	914	928	934	939	3.3E+08
T1(R4)(HAP)_18/02/13	16h05 à 17h05	674	168	842	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T1(R5)(HAP)_18/02/13	17h15 à 18h15	672	316	988	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T1(R6)(HAP)_19/02/13	09h03 à 10h03	925	267	1192	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
Moyenne Ralenti		757	250	1007	1036	1075	1081	1085	3.3E+08
Ecart type Ralenti		145	75	176	114	133	134	134	7.6E+06

2.4.3.3.3 CARACTÉRISTIQUES AU DÉMARRAGE

Tableau 17 : Concentrations durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023

	Heure d'essais	IP (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Condensables (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	IP Tot (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)			
					PM1	PM2,5	PM10	PM10+D>10µm
T1(DC)(HAP)_19/02/13	10h48 à 11h03	311	345	656	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.

2.4.3.4 COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES AUX DIFFÉRENTS RÉGIMES

2.4.3.4.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SOUS FORME DE TABLEAUX

Tableau 18 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023

		PLEINE CHARGE									Moyenne	Ecart type
		T1(P1)(PM)_13/02/13	T1(P2)(PM)_13/02/13	T1(P3)(PM)_13/02/13	T1(P4)(PM)_14/02/13	T1(P5)(PM)_14/02/13	T1(P6)(HAP)_18/02/13	T1(P7)(HAP)_18/02/13	T1(P8)(HAP)_19/02/13	T1(P9)(HAP)_19/02/13		
CO ₂	(%)	9.3	9.9	9.8	10.3	10.0	9.1	9.2	9.1	7.6	9.4	0.8
O ₂	(%)	6.9	6.4	7.0	6.3	6.6	8.1	7.7	7.6	9.6	7.4	1.0
COVT	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	13025	10795	10277	Saturation	Saturation	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	11366	1460
NO	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	53	50	49	61	49	58	51	57	35	51	8
NOx	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	113	110	113	131	105	127	110	135	85	114	15
NO ₂	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	27	29	35	31	25	32	26	39	28	30	5
Température	°C	183	166	172	156	157	186	172	270	232	188	38
IP	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	139	120	145	124	132	12
Condensables	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	294	238	326	295	288	36
IP Tot	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	433	358	471	418	420	47
PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM1	303	251	277	248	281	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	272	23
	PM2,5	310	259	284	253	286	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	278	23
	PM10	310	266	291	259	291	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	283	21
	PM10+D>10µm	317	273	292	259	297	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	287	22
Nombre total moyen	5.8.E+08	5.4.E+08	5.9.E+08	5.2.E+08	5.0.E+08	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	5.5E+08	3.8E+07	
Fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	/					39980	30540	Essais invalidés- analytique Problème		35260	6675
Benzo (a) anthracène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						7390	8434			7912	738
Benzo (b) fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						8085	6841			7463	879
Benzo (k) fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						627	368			498	183
Benzo (a) pyrène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						8114	7468			7791	456
Dibenzo (a,h) anthracène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						<97	<100			<98	2
Benzo (g,h,i) pérylène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						15224	8593			11909	4688
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						4081	1892			2986	1548
Somme des HAP (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	>						83500	64138			73819	13692
	<						83597	64237			73917	13689

Tableau 19 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents au ralenti et durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023

	RALENTI							DEMARRAGES A CHAUD		
	T1(R1)(PM)_14/02/13	T1(R2)(PM)_14/02/13	T1(R3)(PM)_14/02/13	T1(R4)(HAP)_18/02/13	T1(R5)(HAP)_18/02/13	T1(R6)(HAP)_19/02/13	Moyenne	Ecart type	T1(DC)(HAP)_19/02/13	
CO ₂ (%)	1,8	1,9	1,8	1,1	1,6	2,1	1,7	0,3	7,2	
O ₂ (%)	16,3	16,1	16,3	17,9	16,8	15,3	16,4	0,8	10,1	
COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Saturation	Saturation	Saturation	23861	9767	43900	25843	17152	N.M.	
NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	32	33	33	15	19	25	26	8	39	
NOx (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	16	17	16	10	12	16	14	3	88	
NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	0	24	
Température °C	91	92	97	105	153	85	104	25	193	
IP (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	674	672	925	757	145	311	
Condensables (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	168	316	267	250	75	345	
IP Tot (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	842	988	1192	1007	176	656	
PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM1	1139	1055	914	N.M.	N.M.	N.M.	1036	114	N.M.
	PM2,5	1189	1106	928	N.M.	N.M.	N.M.	1075	133	N.M.
	PM10	1197	1111	934	N.M.	N.M.	N.M.	1081	134	N.M.
	PM10+D>10µm	1200	1116	939	N.M.	N.M.	N.M.	1085	134	N.M.
Nombre total moyen	3,2,E+08	3,4,E+08	3,3,E+08	N.M.	N.M.	N.M.	331144207	7600628	N.M.	
Fluoranthène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	/			276854	421408	95765	264675	163162	206139	
Benzo (a) anthracène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				38132	58354	13035	36507	22703	27095	
Benzo (b) fluoranthène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				43367	66391	15369	41709	25551	23517	
Benzo (k) fluoranthène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				12640	18450	4766	11952	6868	4452	
Benzo (a) pyrène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				71383	99633	25534	65517	37396	27856	
Dibenzo (a,h) anthracène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				<1179	<1165	<243	<862	<536	<380	
Benzo (g,h,i) pérylène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				130338	204344	51676	128786	76346	38054	
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				54781	86774	24172	55243	31303	17391	
Somme des HAP (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				>	627496	955354	230318	604389	363070	344504
				<	628675	956518	230561	605251	363545	344884

2.4.4 CARACTÉRISATION DES EFFLUENTS DE LA TRONÇONNEUSE STILH MS 521

La deuxième campagne prévue dans le projet a été lancée en juin, mais d'En raison d'avaries survenues sur le banc de freinage de l'IRSTEA, seuls les résultats en régime ralenti et en démarrages sont disponibles pour la tronçonneuse STILH MS 521.

2.4.4.1 CARACTÉRISATION POUR LES POLLUANTS RÉGLEMENTÉS GAZEUX

2.4.4.1.1 CARACTÉRISTIQUES AU RALENTI

Tableau 20 : Résultats de concentrations des gaz de combustion au ralenti, tronçonneuse STILH MS 521

	Heure d'essais	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NOx (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Température °C
T2(R1)(PM)_18/06/13	10h38 à 11h28	2.6	15.5	31071.6	27871	N.M.	12	N.M.	62.0
T2(R2)(PM)_18/06/13	12h50 à 13h40	1.8	17.4	20311.6	18341	N.M.	10	N.M.	82.3
T2(R3)(PM)_18/06/13	14h09 à 14h59	1.7	17.4	21361.9	19639	N.M.	11	N.M.	81.9
T2(R4)(HAP)_18/06/13	15h37 à 16h27	1.6	18.1	8184.0	7576	N.M.	9	N.M.	84.2
T2(R5)(HAP)_18/06/13	16h52 à 17h42	1.8	17.8	6552.1	6440	N.M.	10	N.M.	81.7
T2(R6)(HAP)_19/06/13	09h41 à 10h31	1.8	17.7	7432.3	7526	N.M.	8	N.M.	77.2
Moyenne Ralenti		1.9	17.3	15818.9	14566	N.M.	10	N.M.	78.2
Ecart type Ralenti		0.4	0.9	9980.5	5168	N.M.	2	N.M.	8.3

2.4.4.1.2 CARACTÉRISTIQUES AU DÉMARRAGE

Tableau 21 : Résultats de concentrations des gaz de combustion durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STILH MS 521

	Heure d'essais	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NOx (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Température °C
T2(DF1)(PM)_18/06/13	09h58 à 10h13	2.1	12.8	2586.2	1983	N.M.	<4.1	N.M.	74.7
T2(DF2)(HAP)_19/06/13	09h08 à 09h20	0.6	19.8	2004.8	3701	N.M.	<4.1	N.M.	61.7
T2(DF3)(HAP)_19/06/13	15h16 à 15h26	1.7	18.2	1901.5	4195	N.M.	<4.1	N.M.	61.2
Moyenne démarrage		1.5	16.9	2164.1	3292.9	N.M.	<4.1	N.M.	65.8
Ecart type Démarrage		0.7	3.6	369.1	1161.3	N.M.	-	N.M.	7.7

2.4.4.2 HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

Nota : B(a)A : Benzo (a) anthracène - B(b)F : Benzo (b) fluoranthène – B(k)F : Benzo (k) fluoranthène - B(a)P : Benzo (a) pyrène - D(a,h)A : Dibenzo (a,h) anthracène - B(g,h,i)P : Benzo (g,h,i) pérylène - In(1,2,3-c,d) : Indeno (1,2,3-c,d) pyrène

2.4.4.2.1 CARACTÉRISTIQUES AU RALENTI

Tableau 22 : Concentrations en HAP au ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521

	Heure d'essais	Fluoranthène	B(a)A	B(b)F	B(k) F	B(a)P		D(a,h)A	Benzo(g,h,i)P	In(1,2,3-c,d)	Somme des HAP (ng/m ³ à O ₂ réel)	
											>	<
(ng/m ³ à O ₂ réel)												
T2(R4)(HAP)_18/06/13	15h37 à 16h27	276854	38132	43367	12640	71383	<	1179	130338	54781	627496	628675
T2(R5)(HAP)_18/06/13	16h52 à 17h42	421408	58354	66391	18450	99633	<	1165	204344	86774	955354	956518
T2(R6)(HAP)_19/06/13	09h41 à 10h31	95765	13035	15369	4766	25534	<	243	51676	24172	230318	230561
Moyenne Ralenti		264675	36507	41709	11952	65517	<	862	128786	55243	604389	605251
Ecart type Ralenti		163162	22703	25551	6868	37396	<	536	76346	31303	363070	363545

2.4.4.2.2 CARACTÉRISTIQUES AU DÉMARRAGE

Tableau 23 : Concentrations en HAP durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL MS 521

	Heure d'essais	Fluoranthène	B(a)A	B(b)F	B(k) F	B(a)P		D(a,h)A	Benzo(g,h,i)P	In(1,2,3-c,d)	Somme des HAP (ng/m ³ à O ₂ réel)	
											>	<
(ng/m ³ à O ₂ réel)												
T2(DF2)(HAP)_19/06/13	09h08 à 09h20	223600	30378	102178	7927	51776	<	2291	124629	34227	574716	577007
T2(DF3)(HAP)_19/06/13	15h16 à 15h26	25420	1562	8450	<	2840	<	2840	11716	2201	52402	58083
Moyenne démarrage		124510	15970	55314	<	5384	<	2566	68173	18214	313559	317545
Ecart type Démarrage		140134	20376	66276	<	3597	<	388	79842	22646	369332	366935

2.4.4.3 PARTICULES : TSP ET PM

2.4.4.4 CARACTÉRISTIQUES AU RALENTI

Tableau 24 : Concentrations en TSP et PM au ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521

	Heure d'essais	IP (mg/m ³ à O ₂ réel)	Condensables (mg/m ³ à O ₂ réel)	IP Tot (mg/m ³ à O ₂ réel)	PM (mg/m ³ à O ₂ réel)			Nombre total moyen (#/cm ³)
					PM2,5	PM10	PM10+D>10µm	
T2(R1)(PM)_18/06/13	10h38 à 11h28	N.M.	N.M.	N.M.	1812	1866	1908	6.0E+08
T2(R2)(PM)_18/06/13	12h50 à 13h40	N.M.	N.M.	N.M.	1008	1051	1086	4.5E+08
T2(R3)(PM)_18/06/13	14h09 à 14h59	N.M.	N.M.	N.M.	1032	1069	1103	4.7E+08
T2(R4)(HAP)_18/06/13	15h37 à 16h27	625	168	794	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T2(R5)(HAP)_18/06/13	16h52 à 17h42	429	79	508	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T2(R6)(HAP)_19/06/13	09h41 à 10h31	520	108	628	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
Moyenne Ralenti		525	118	643	1284	1329	1366	5.E+08
Ecart type Ralenti		98	46	144	457	466	470	8.E+07

2.4.4.4.1 CARACTÉRISTIQUES AU DÉMARRAGE

Tableau 25 : Concentrations en TSP et PM durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL MS 521

	Heure d'essais	IP (mg/m ³ à O ₂ réel)	Condensables (mg/m ³ à O ₂ réel)	IP Tot (mg/m ³ à O ₂ réel)	PM (mg/m ³ à O ₂ réel)			Nombre total moyen (#/cm ³)
					PM2,5	PM10	PM10+D>10µm	
T2(DF1)(PM)_18/06/13	09h58 à 10h13	N.M.	N.M.	N.M.	1115	1229	1338	3.1E+08
T2(DF2)(HAP)_19/06/13	09h08 à 09h20	1189	175	1363	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
T2(DF3)(HAP)_19/06/13	15h16 à 15h26	180	118	298	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
Moyenne démarrage		685	146	831	1115	1229	1338	3.1E+08
Ecart type Démarrage		713	40	753				

2.4.5 COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS RÉGIMES

2.4.5.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SOUS FORME DE TABLEAU

2.4.5.1.1 TRONÇONNEUSE STIHL 023

Tableau 26 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents à pleine charge, tronçonneuse STIHL 023

		PLEINE CHARGE									Moyenne	Ecart type	
		T1(P1)(PM)_13/02/13	T1(P2)(PM)_13/02/13	T1(P3)(PM)_13/02/13	T1(P4)(PM)_14/02/13	T1(P5)(PM)_14/02/13	T1(P6)(HAP)_18/02/13	T1(P7)(HAP)_18/02/13	T1(P8)(HAP)_19/02/13	T1(P9)(HAP)_19/02/13			
CO ₂	(%)	9,3	9,9	9,8	10,3	10,0	9,1	9,2	9,1	7,6	9,4	0,8	
O ₂	(%)	6,9	6,4	7,0	6,3	6,6	8,1	7,7	7,6	9,6	7,4	1,0	
COVT	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	13025	10795	10277	Saturation	Saturation	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	11366	1460	
NO	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	53	50	49	61	49	58	51	57	35	51	8	
NOx	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	113	110	113	131	105	127	110	135	85	114	15	
NO ₂	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	27	29	35	31	25	32	26	39	28	30	5	
Température	°C	183	166	172	156	157	186	172	270	232	188	38	
IP	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	139	120	145	124	132	12	
Condensables	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	294	238	326	295	288	36	
IP Tot	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	433	358	471	418	420	47	
PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM1	303	251	277	248	281	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	272	23	
	PM2,5	310	259	284	253	286	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	278	23	
	PM10	310	266	291	259	291	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	283	21	
	PM10+D>10µm	317	273	292	259	297	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	287	22	
Nombre total moyen		5,8,E+08	5,4,E+08	5,9,E+08	5,2,E+08	5,0,E+08	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	5,5E+08	3,8E+07	
Fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	/					39980	30540	Essais invalidés- analytique Problème		35260	6675	
Benzo (a) anthracène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						7390	8434			7912	738	
Benzo (b) fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						8085	6841			7463	879	
Benzo (k) fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						627	368			498	183	
Benzo (a) pyrène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						8114	7468			7791	456	
Dibenzo (a,h) anthracène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						<97	<100			<98	2	
Benzo (g,h,i) pérylène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						15224	8593			11909	4688	
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)						4081	1892			2986	1548	
Somme des HAP	(ng/m ₀ ³)						>	83500			64138	73819	13692
	à O ₂ réel)						<	83597			64237	73917	13689

Tableau 27 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents au ralenti et durant deux démarrages à chaud successifs, tronçonneuse STIHL 023

		RALENTI								DEMARRAGES A
		T1(R1)(PM)_14/02/13	T1(R2)(PM)_14/02/13	T1(R3)(PM)_14/02/13	T1(R4)(HAP)_18/02/13	T1(R5)(HAP)_18/02/13	T1(R6)(HAP)_19/02/13	Moyenne	Ecart type	CHAUD
										T1(DC)(HAP)_19/02/13
CO ₂	(%)	1,8	1,9	1,8	1,1	1,6	2,1	2	0	7
O ₂	(%)	16,3	16,1	16,3	17,9	16,8	15,3	16	1	10
COVT	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Saturation	Saturation	Saturation	23861	9767	43900	25843	17152	N.M.
NO	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	32	33	33	15	19	25	26	8	39
NOx	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	16	17	16	10	12	16	14	3	88
NO ₂	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	0	24
Température	°C	90,5	92,1	97,2	105	153	85	104	25	193
IP	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	674	672	925	757	145	311
Condensables	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	168	316	267	250	75	345
IP Tot	(mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	842	988	1192	1007	176	656
PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM1	1139	1055	914	N.M.	N.M.	N.M.	1036	114	N.M.
	PM2,5	1189	1106	928	N.M.	N.M.	N.M.	1075	133	N.M.
	PM10	1197	1111	934	N.M.	N.M.	N.M.	1081	134	N.M.
	PM10+D>10µm	1200	1116	939	N.M.	N.M.	N.M.	1085	134	N.M.
Nombre total moyen		3,22E+08	3,37E+08	3,34E+08	N.M.	N.M.	N.M.	331144207	7600628	N.M.
Fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				276854	421408	95765	264675	163162	206139
Benzo (a) anthracène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				38132	58354	13035	36507	22703	27095
Benzo (b) fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				43367	66391	15369	41709	25551	23517
Benzo (k) fluoranthène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				12640	18450	4766	11952	6868	4452
Benzo (a) pyrène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				71383	99633	25534	65517	37396	27856
Dibenzo (a,h) anthracène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				<1179.1	<1164.8	<243.2	862	536	<380.5
Benzo (g,h,i) pérylène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				130338	204344	51676	128786	76346	38054
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				54781	86774	24172	55243	31303	17391
Somme des HAP (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	>				627496	955354	230318	604389	363070	344504
	<				628675	956518	230561	605251	363545	344884

2.4.5.1.2 TRONÇONNEUSE STIHL MS 521

Tableau 28 : Synthèse des résultats de la caractérisation des effluents au ralenti et durant trois démarrages à froid, tronçonneuse STIHL MS521

	RALENTI						DEMARRAGE A FROID		
	T2(R1)(PM)_18/06/13	T2(R2)(PM)_18/06/13	T2(R3)(PM)_18/06/13	T2(R4)(HAP)_18/06/13	T2(R5)(HAP)_18/06/13	T2(R6)(HAP)_19/06/13	T2(DF1)(PM)_18/06/13	T2(DF2)(HAP)_19/06/13	T2(DF3)(HAP)_19/06/13
CO ₂ (%)	2,6	1,8	1,7	1,6	1,8	1,8	2,1	0,6	1,7
O ₂ (%)	15,5	17,4	17,4	18,1	17,8	17,7	12,8	19,8	18,2
CO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	31072	20312	21362	8184	6552	7432	2586	2005	1901
COVT (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	27871	18341	19639	7576	6440	7526	1983	3701	4195
NO (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
NOx (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	12,5	9,9	11,0	9,0	9,5	7,7	<4.1	<4.1	<4.1
NO ₂ (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
Température °C	62,0	82,3	81,9	84,2	81,7	77,2	74,7	61,7	61,2
IP (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	625	429	520	N.M.	1189	180
Condensables (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	168	79	108	N.M.	175	118
IP Tot (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	N.M.	N.M.	N.M.	794	508	628	N.M.	1363	298
PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM1	1707	916	962	N.M.	N.M.	988	N.M.	N.M.
	PM2,5	1812	1008	1032	N.M.	N.M.	1115	N.M.	N.M.
	PM10	1866	1051	1069	N.M.	N.M.	1229	N.M.	N.M.
	PM10+D>10µm	1908	1086	1103	N.M.	N.M.	1338	N.M.	N.M.
Nombre total moyen	5,99E+08	4,47E+08	4,71E+08	N.M.	N.M.	N.M.	3,13E+08	N.M.	N.M.
Fluoranthène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	/			276854	421408	95765	N.M.	223600	25420
Benzo (a) anthracène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				38132	58354	13035	N.M.	30378	1562
Benzo (b) fluoranthène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				43367	66391	15369	N.M.	102178	8450
Benzo (k) fluoranthène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				12640	18450	4766	N.M.	7927	<2840
Benzo (a) pyrène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				71383	99633	25534	N.M.	51776	3053
Dibenzo (a,h) anthracène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				<1179	<1165	<243	N.M.	<2291	<2840
Benzo (g,h,i) pérylène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				130338	204344	51676	N.M.	124629	11716
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				54781	86774	24172	N.M.	34227	2201
Somme des HAP (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)				627496	955354	230318	N.M.	574716	52402
				628675	956518	230561	N.M.	577007	58083

2.4.5.2 SYNTHÈSE GRAPHIQUE DES RÉSULTATS

2.4.5.2.1 POLLUANTS RÉGLEMENTÉS

Les résultats obtenus pour les différents régimes sont présentés ci-dessous.

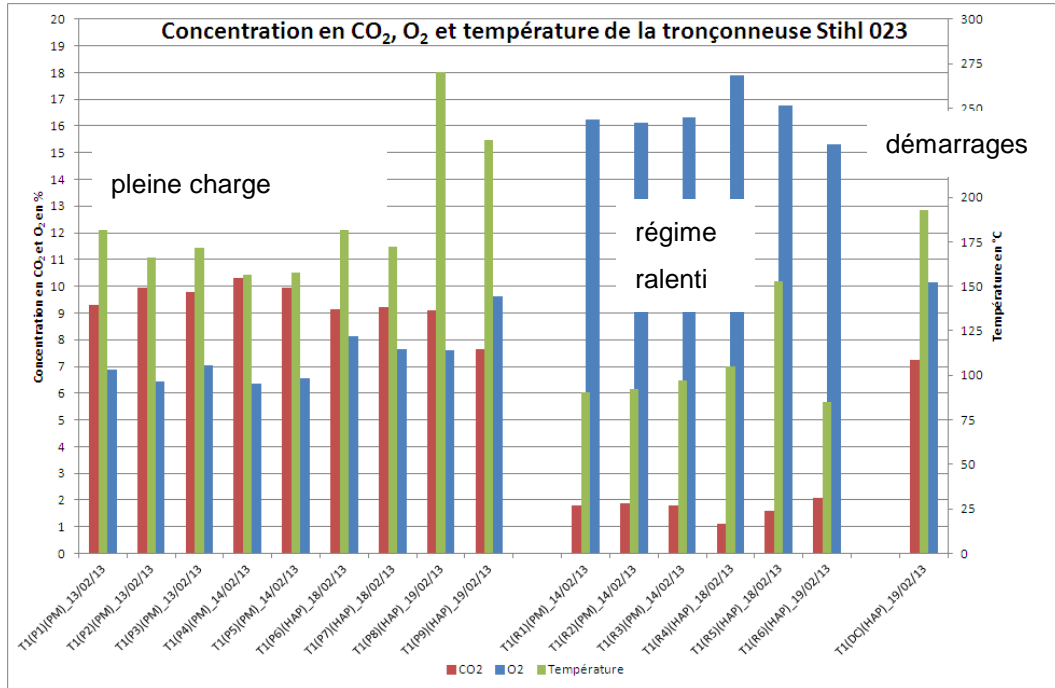


Figure 6 : Comparaison des résultats en CO₂, O₂ et température pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

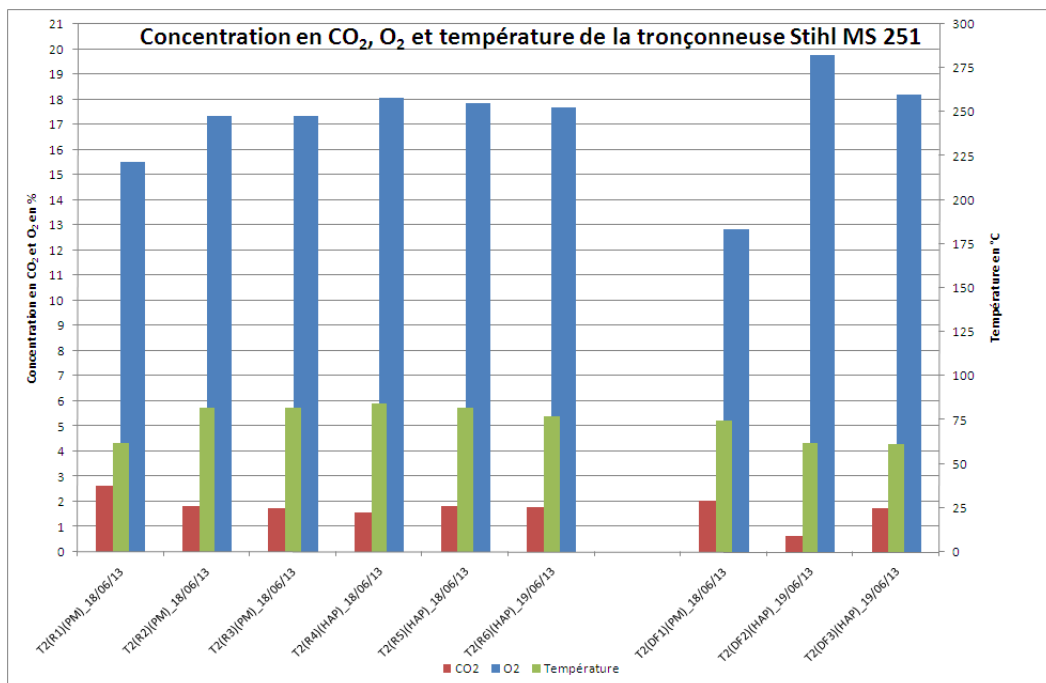


Figure 7 : Comparaison des résultats en CO₂, O₂ et température pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

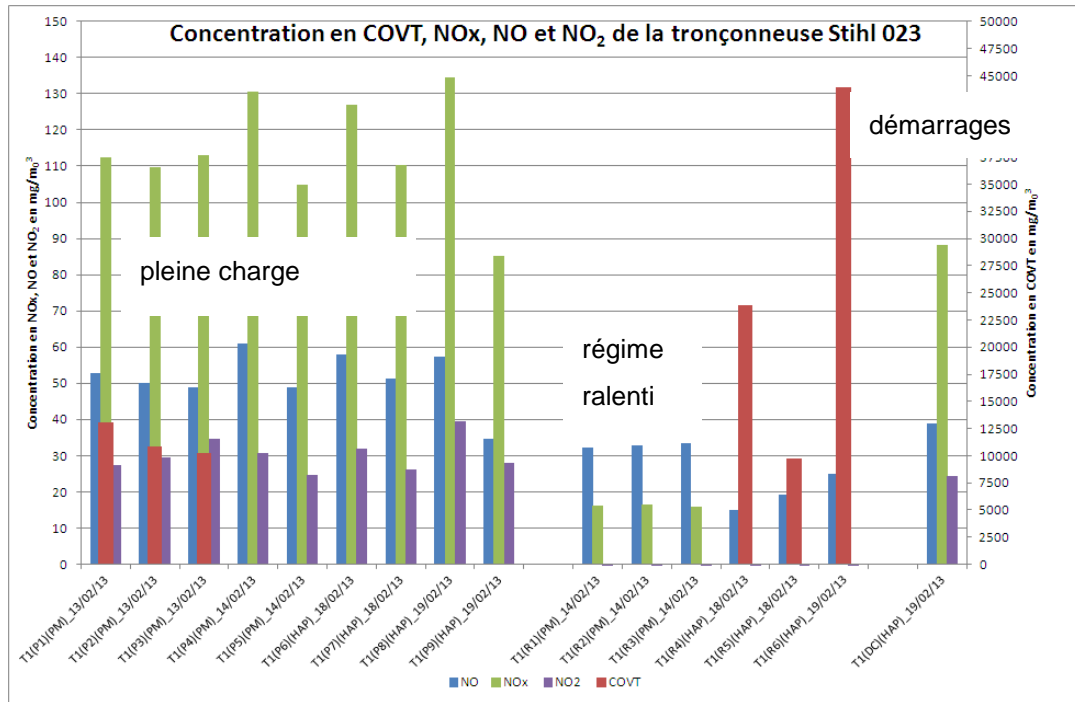


Figure 8 : Comparaison des résultats en COVT, NO_x, NO et NO₂ pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

La contribution du NO₂ aux concentrations de NO_x est de l'ordre de 25%. Mais il est possible que ce ratio NO₂/NO_x soit supérieur car une part du NO₂ a pu être piégée dans les condensats présents dans la ligne de prélèvement. La concentration globale de NO_x par voie de conséquence a pu être minimisée d'environ 5 %.

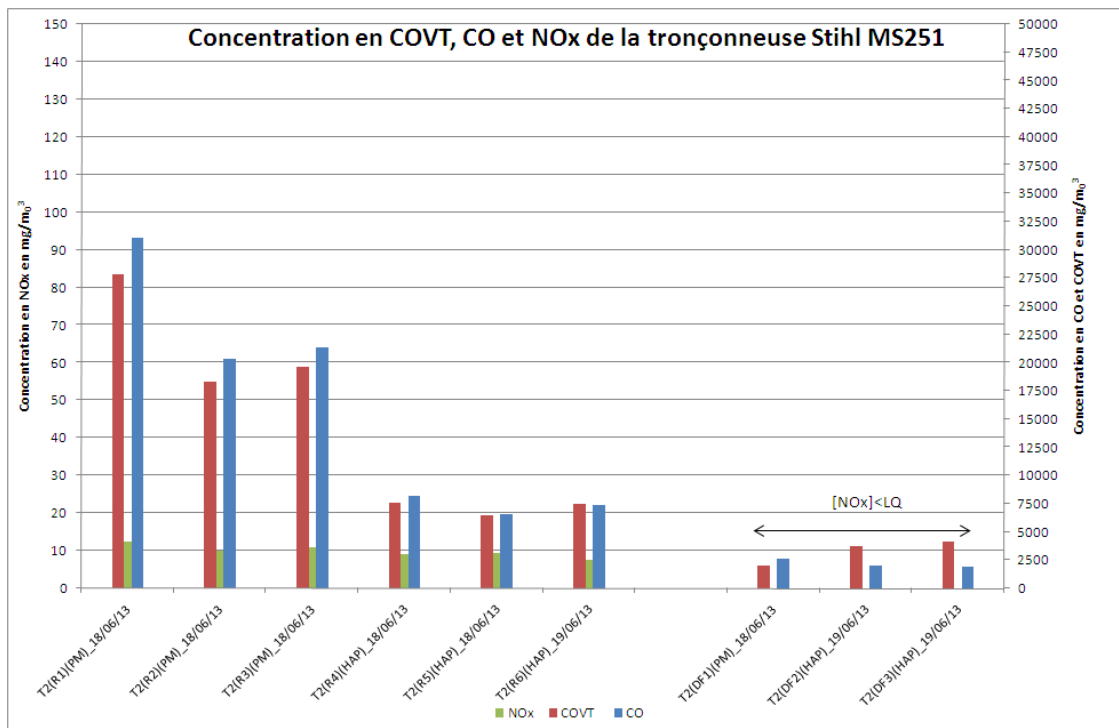


Figure 9 : Comparaison des résultats en COVT, NO_x, NO et NO₂ pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

2.4.5.2.2 HAP

Les résultats obtenus pour les HAP sont présentés ci-dessous. Ces résultats ont permis de formuler les observations suivantes :

- Les concentrations en HAP sont respectivement deux à six fois plus élevées en régime ralenti, qu'en régime de démarrage et en régime de pleine charge.
- En régime ralenti, une plus grande contribution des quatre HAP les plus lourds est observée.
- La contribution des dépôts collectés dans la sonde, déterminée en rinçant celle-ci lors des essais en pleine charge, n'excède pas plus de 3% de la concentration totale, ce qui est faible. La prise en compte de ce rinçage dans le résultat peut donc être négligée pour les essais en pleine charge. Il est cependant apparu nécessaire de réaliser la même détermination pour les essais en régime réduit lors des campagnes suivantes.

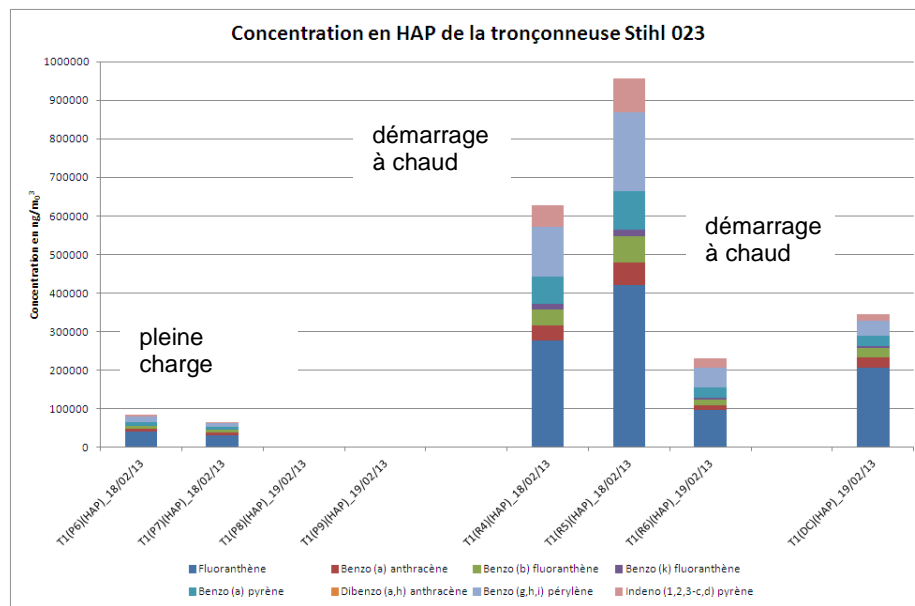


Figure 10 : Comparaison des résultats en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

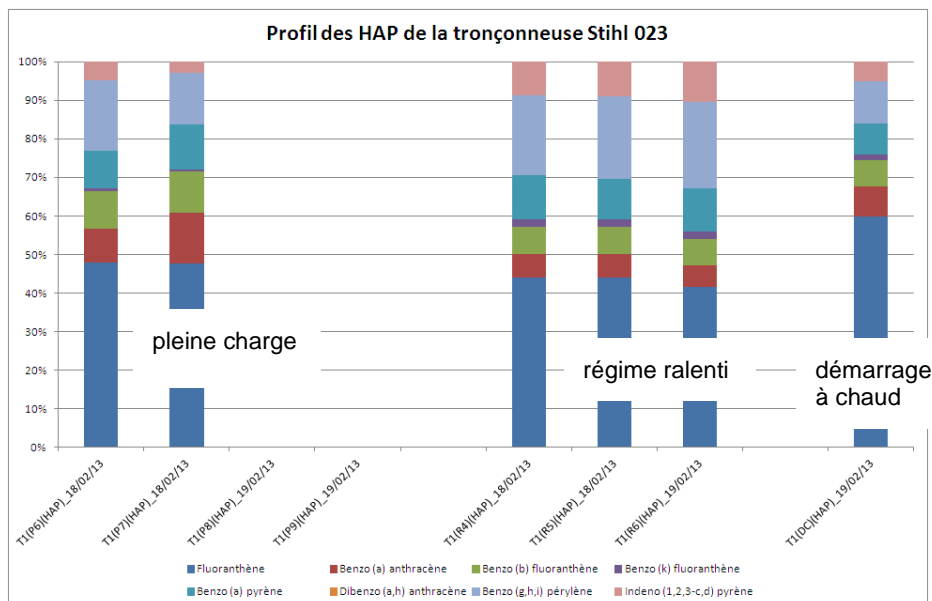


Figure 11 : Comparaison du profil normalisé des HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

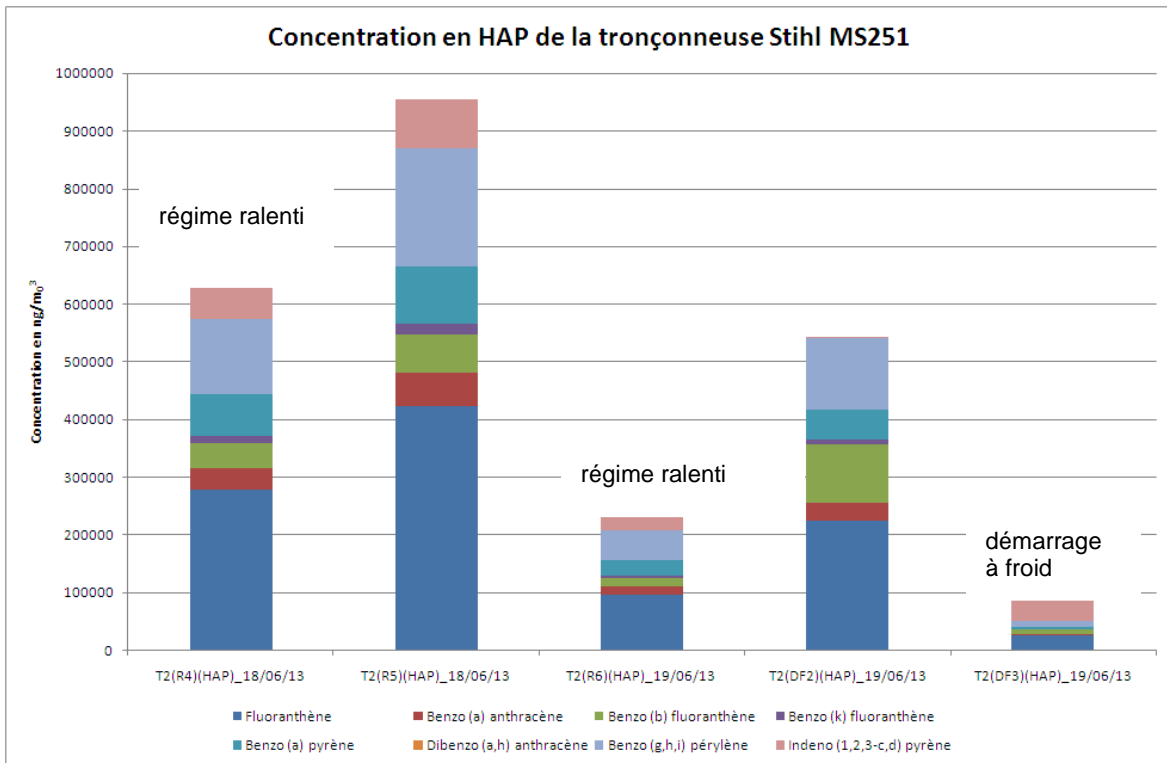


Figure 12 : Comparaison des résultats en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

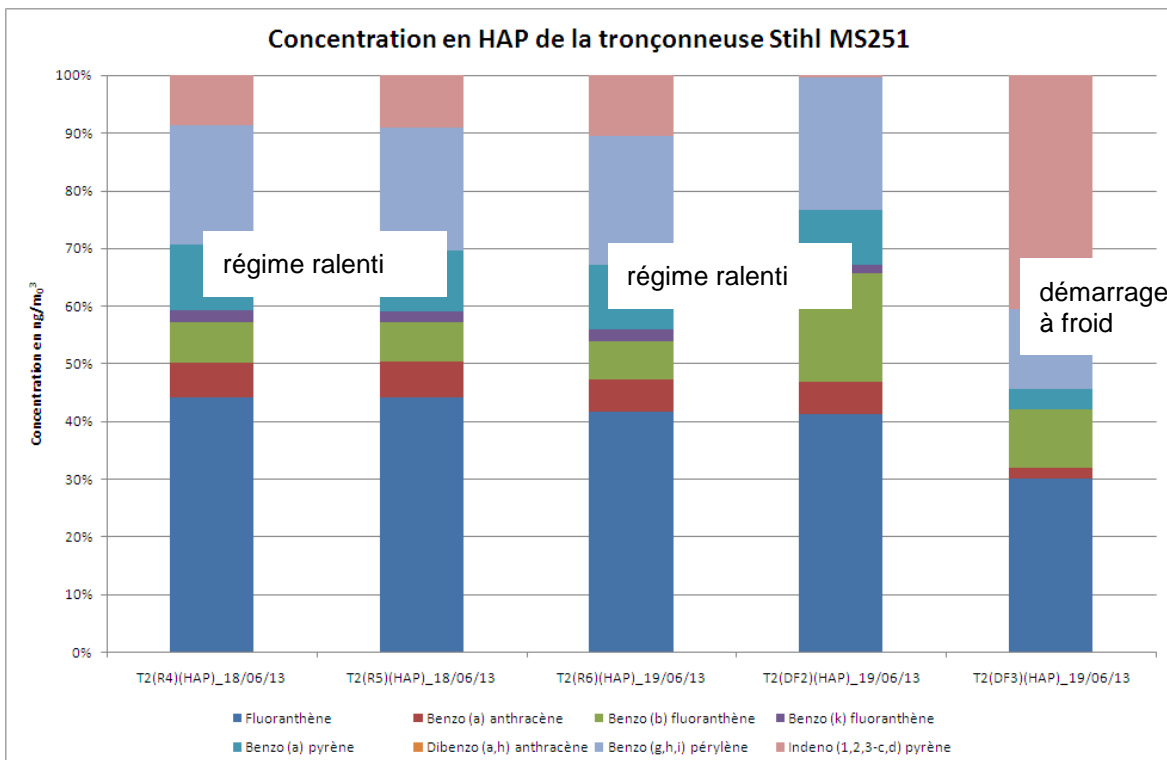


Figure 13 : Comparaison du profil normalisé des HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

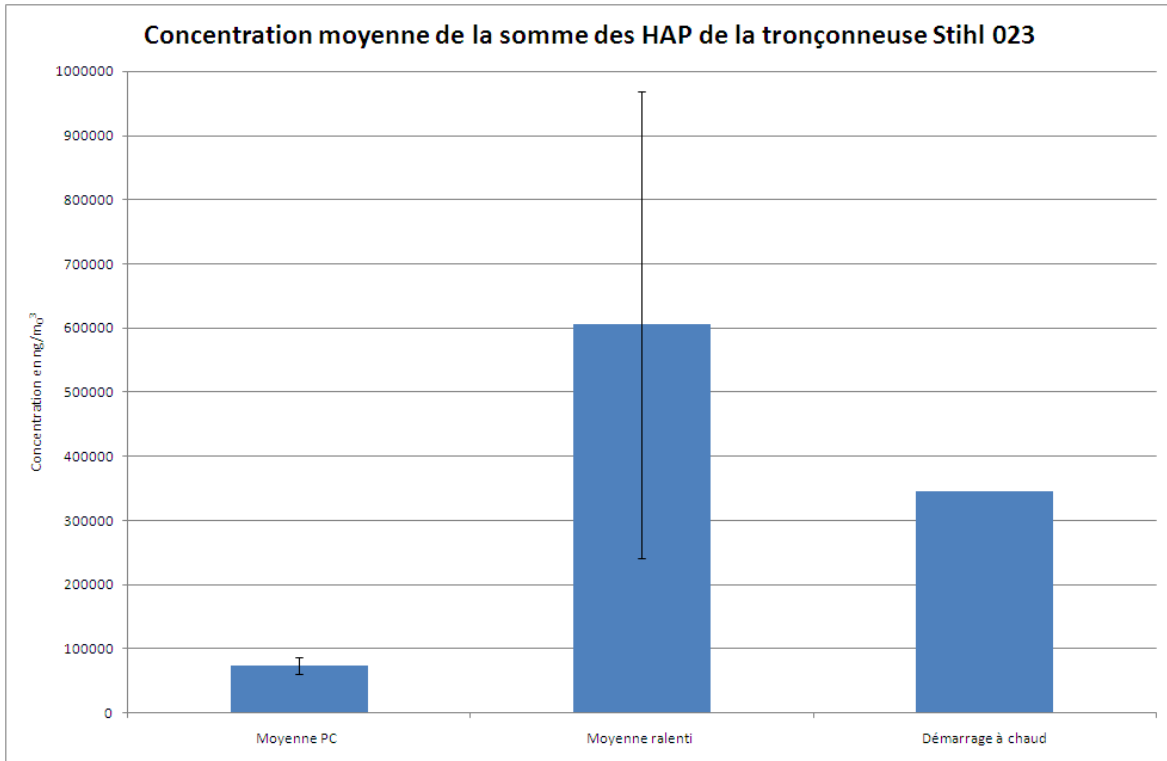


Figure 14 : Comparaison de la concentration moyenne totale en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

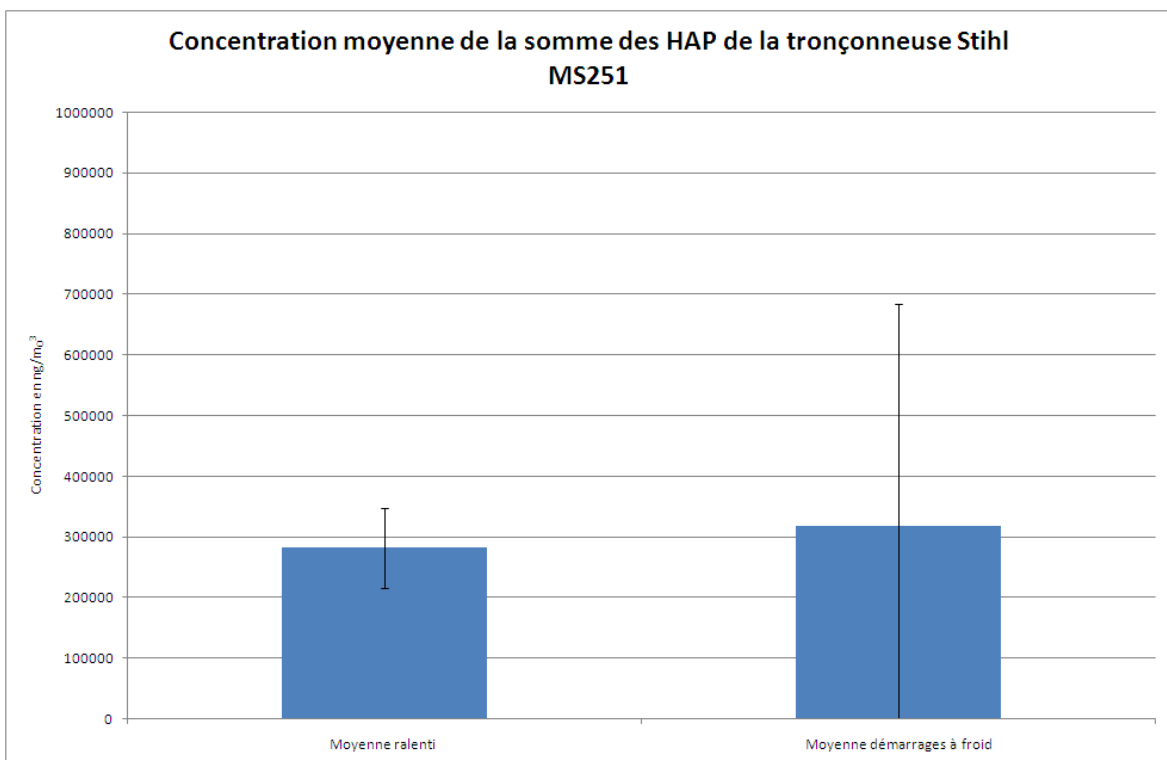


Figure 15 : Comparaison de la concentration moyenne totale en HAP pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

2.4.5.2.3 TSP, PM ET DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE

Deux approches manuelles de caractérisation des émissions de particules ont été appliquées :

- la mise en œuvre de la méthode TSP combinant un filtre qui collecte la fraction solide et des barboteurs à l'isopropanol qui collecte la fraction condensable.
- la méthode par impaction qui prélève les PM10 et dans l'étage supérieur, la fraction de diamètre supérieur à 10 µm couplée à une dilution visant à provoquer la condensation des espèces organiques semi volatiles qui constituent la fraction dite « condensable » de l'aérosol. Si cette méthode n'est pas censée collecter les particules totales, le résultat obtenu en sommant la concentration en PM10 à la concentration de la fraction de diamètre supérieur à 10 µm permet d'approcher les TSP.

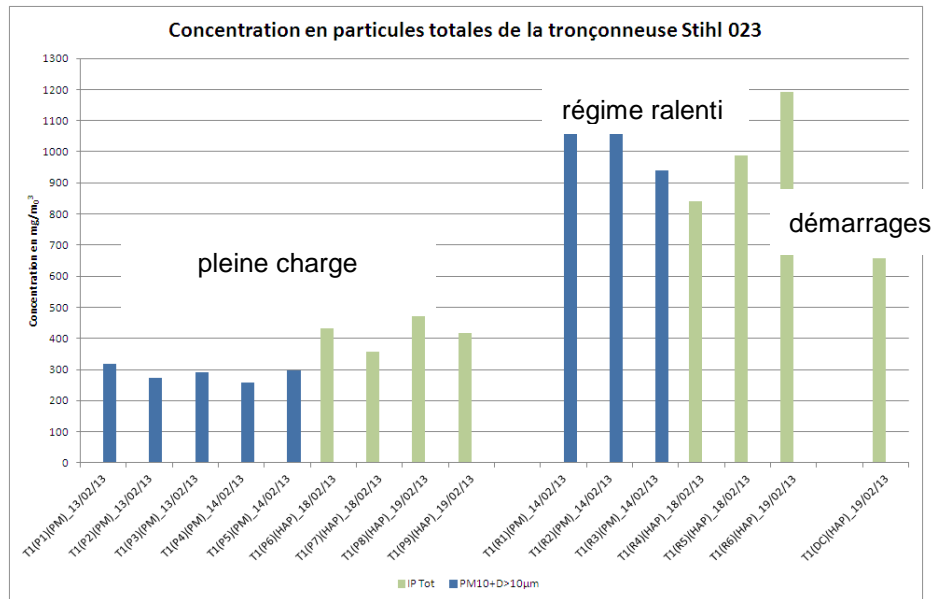


Figure 16 : Comparaison des résultats en particules totales pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

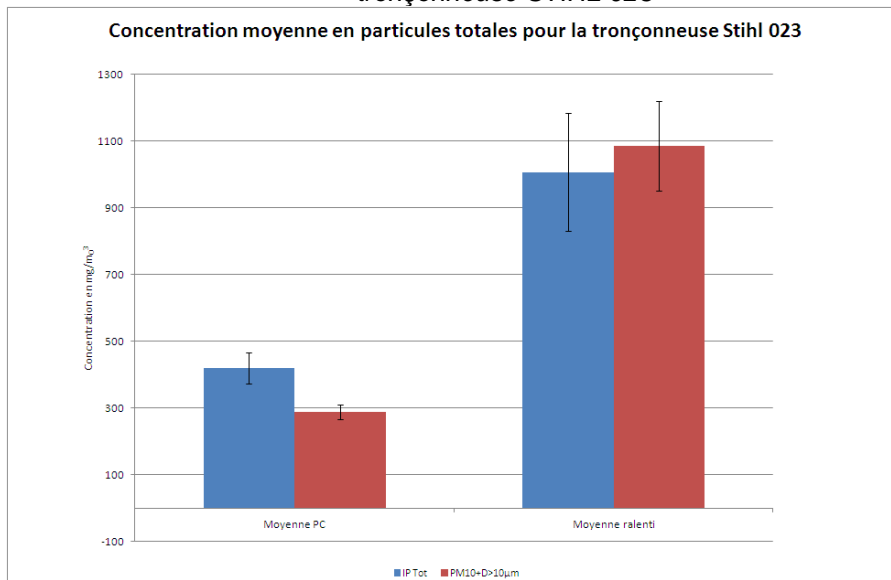


Figure 17 : Comparaison de la concentration moyenne en particules totales pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

Les résultats de répartition entre les phases solide et condensable de l'aérosol ainsi que les concentrations de particules totales, sont présentés dans les figures suivantes.

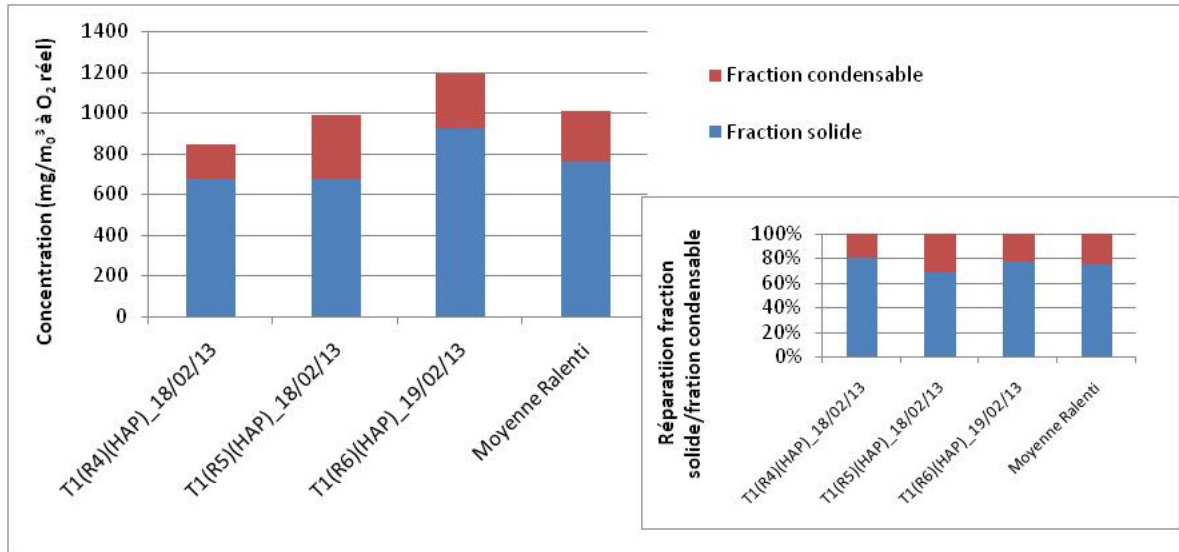


Figure 18 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, régime pleine charge, tronçonneuse STIHL 023

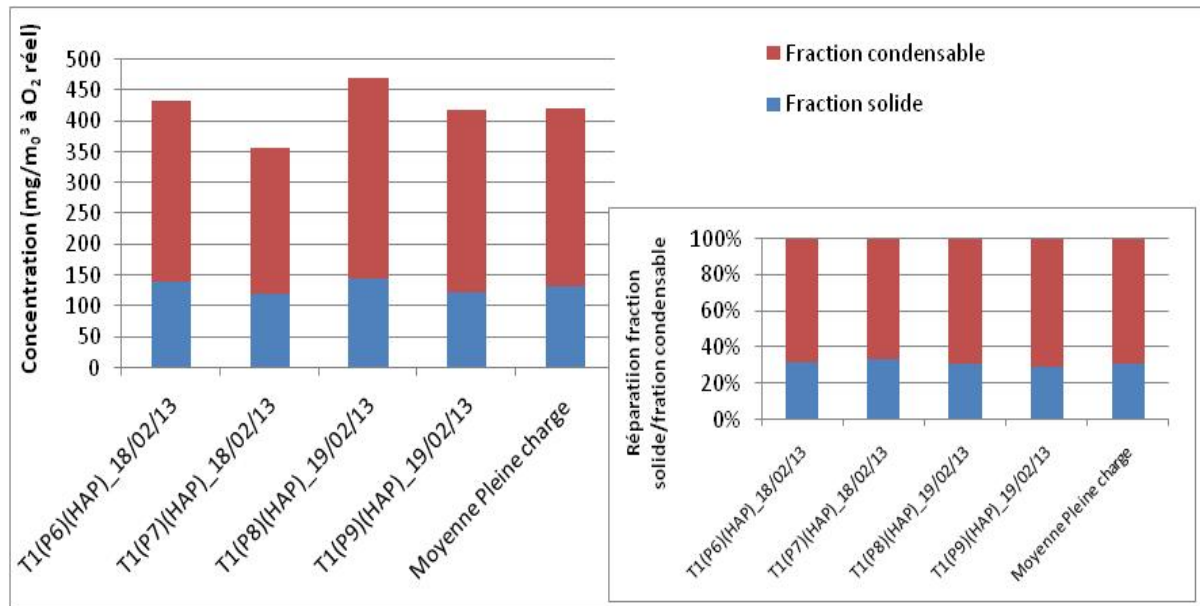


Figure 19 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, régime ralenti, tronçonneuse STIHL 023

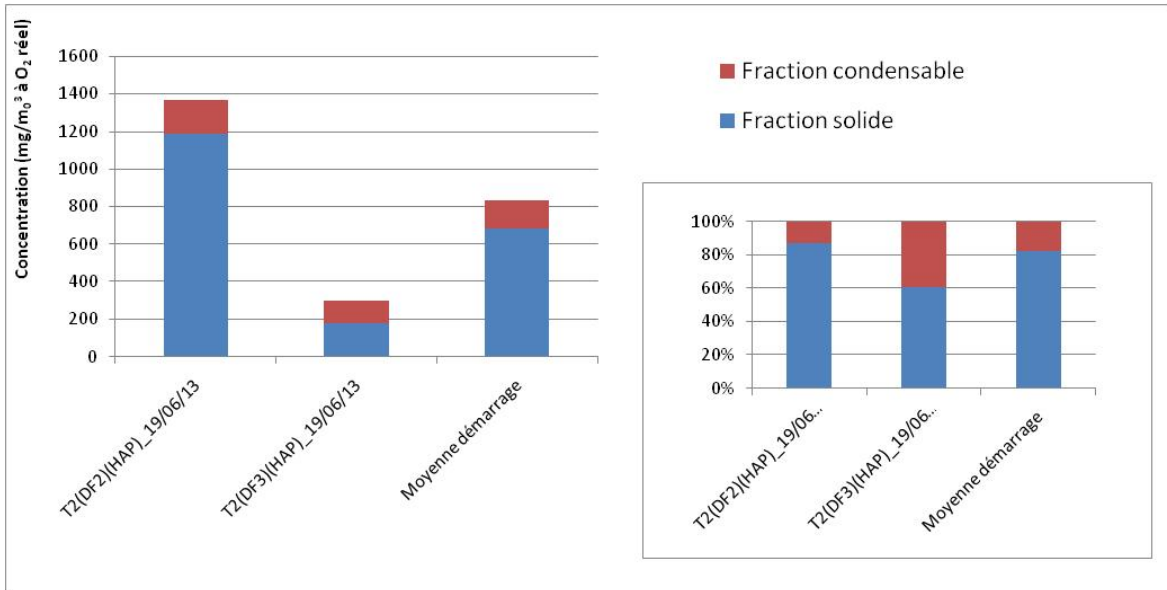


Figure 20 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, démarrages, tronçonneuse STIHL MS 521

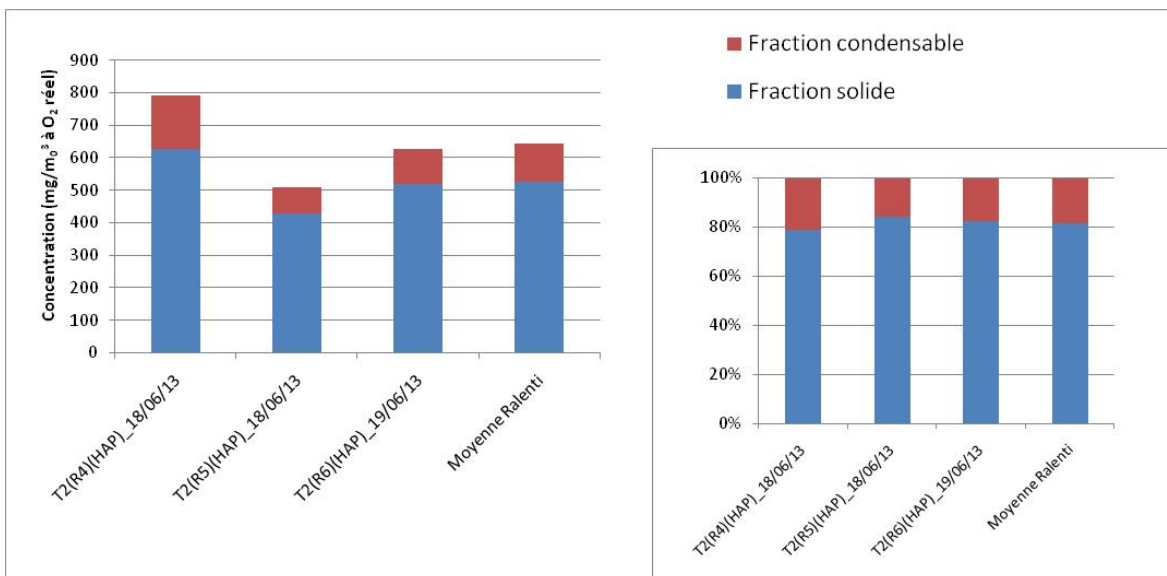


Figure 21 : Répartition de l'aérosol dans les phases solides et condensables, régime ralenti, tronçonneuse STIHL MS 521

La comparaison de ces figures indique :

- que le régime réduit se traduit par une augmentation globale (de l'ordre de 100%) des concentrations, imputables à une forte augmentation de la fraction solide, qui est 6 fois plus forte en régime réduit qu'en régime nominal,
- que la fraction condensable demeure inchangée d'un régime à l'autre.

L'aérosol se répartit majoritairement dans la phase condensable en pleine charge (70% phase condensable, 30% phase solide), alors que la tendance inverse est observée en régime réduit (20% phase condensable, 80% phase solide).

Par ailleurs, dans le cas des démarrages, on observe une augmentation de l'ordre de 50% des concentrations totales due à une augmentation de la fraction solide de l'ordre de 100%.

Enfin, la contribution des dépôts collectés dans le rinçage de sonde n'excède pas plus de 1,5 % de la concentration totale mesurée lors des essais en régime réduit, ce qui est faible. La prise en compte de ce rinçage dans le résultat pourra donc être évitée pour les essais en régime réduit et en régime pleine charge pour lequel la fraction condensable est du même ordre de grandeur en absolu.

Caractérisation physique :

Nota : Les distributions granulométriques ont été réalisées sur les régimes de ralenti et de pleine charge uniquement.

Quel que soit le régime étudié, la distribution granulométrique massique est marquée par une prédominance de la fraction PM1 majoritaire à Pleine Charge et régime ralenti.

Le passage du régime pleine charge au régime ralenti semble se traduire par une augmentation en absolu des concentrations massiques de toutes les tranches granulométriques et, en relatif cela se traduit par une augmentation de la contribution de la tranche comprise entre 1 µm et 2,5 µm.

En termes de distribution en nombre, on observe un déplacement du mode de l'aérosol de 50 nm à 120 nm. Cette variation des diamètres entre la pleine charge et le ralenti est sans doute liée aux effets de température des rejets à l'échappement : les modes sont généralement plus petits lorsque l'écoulement gazeux est plus chaud comme c'est le cas en pleine charge. Les spectres de taille des particules sont similaires en nombre et en diamètre à ceux mesurés par Etissa [4] pour des moteurs de scooters avant le catalyseur.

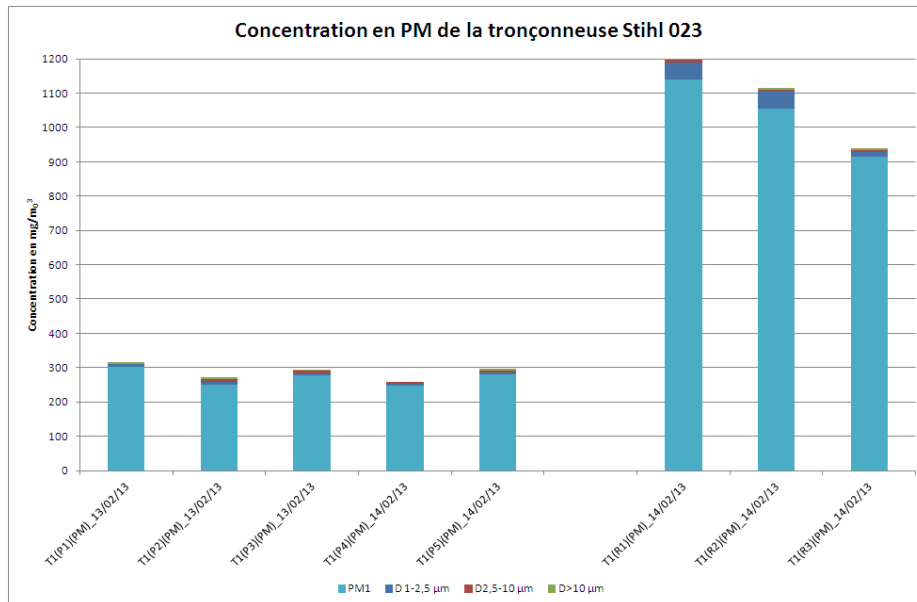


Figure 22 : Comparaison des résultats en PM pour les différents régimes, STIHL 023

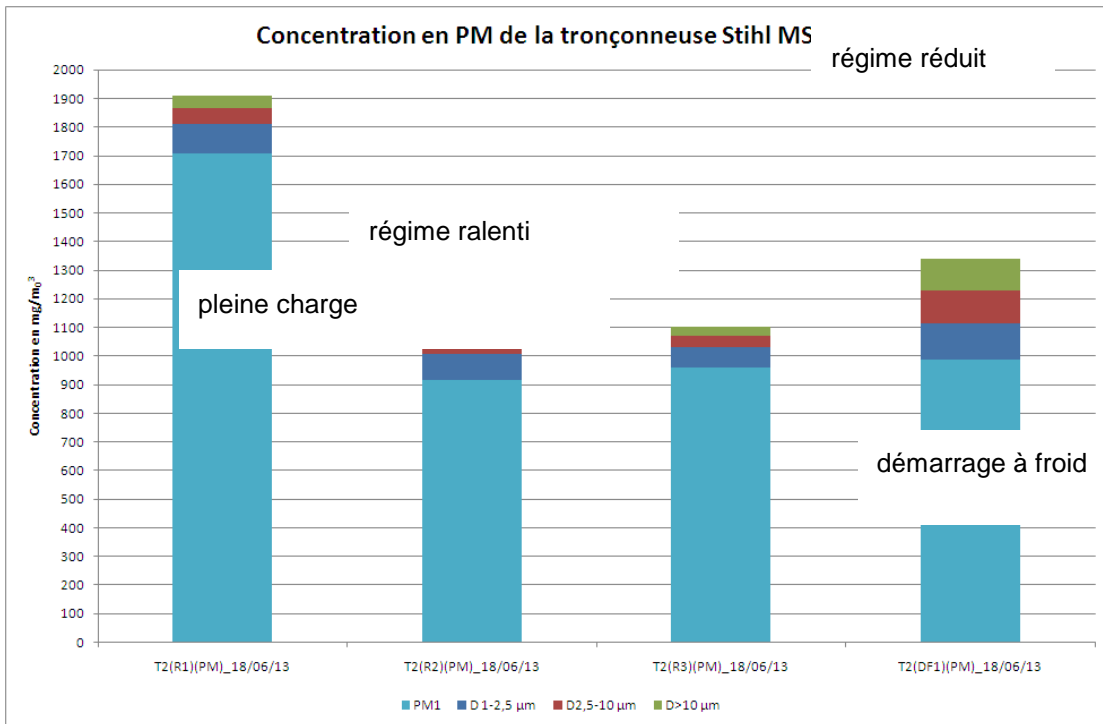


Figure 23 : Comparaison des résultats en PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

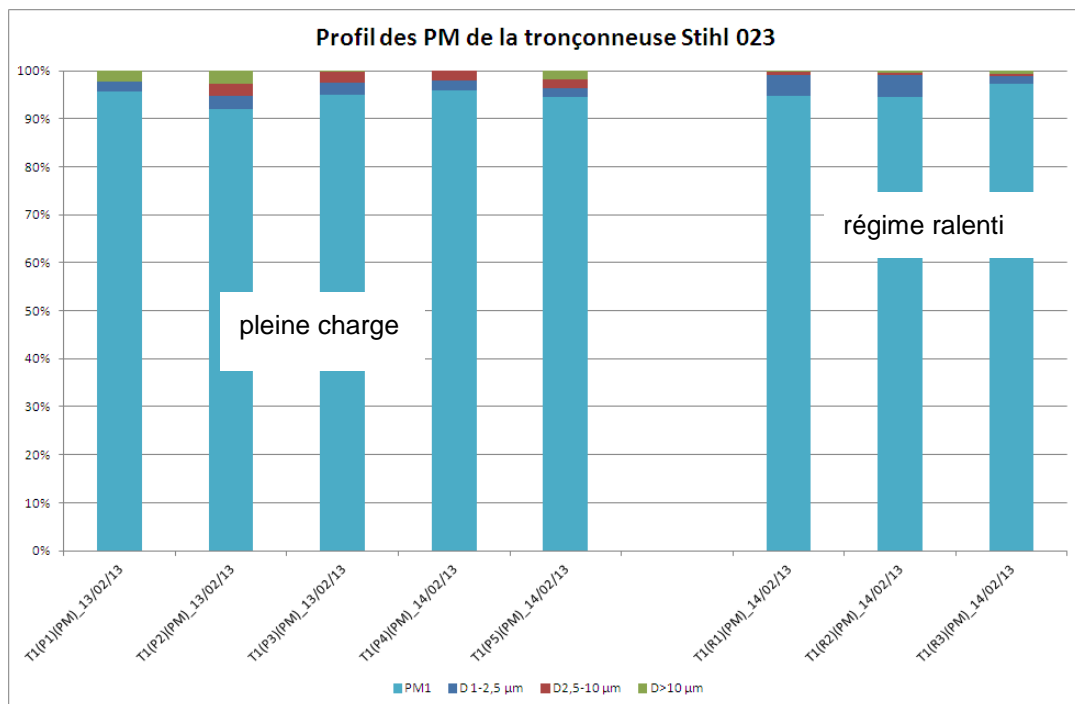


Figure 24 : Comparaison du profil normalisé des PM pour les différents régimes, STIHL 023

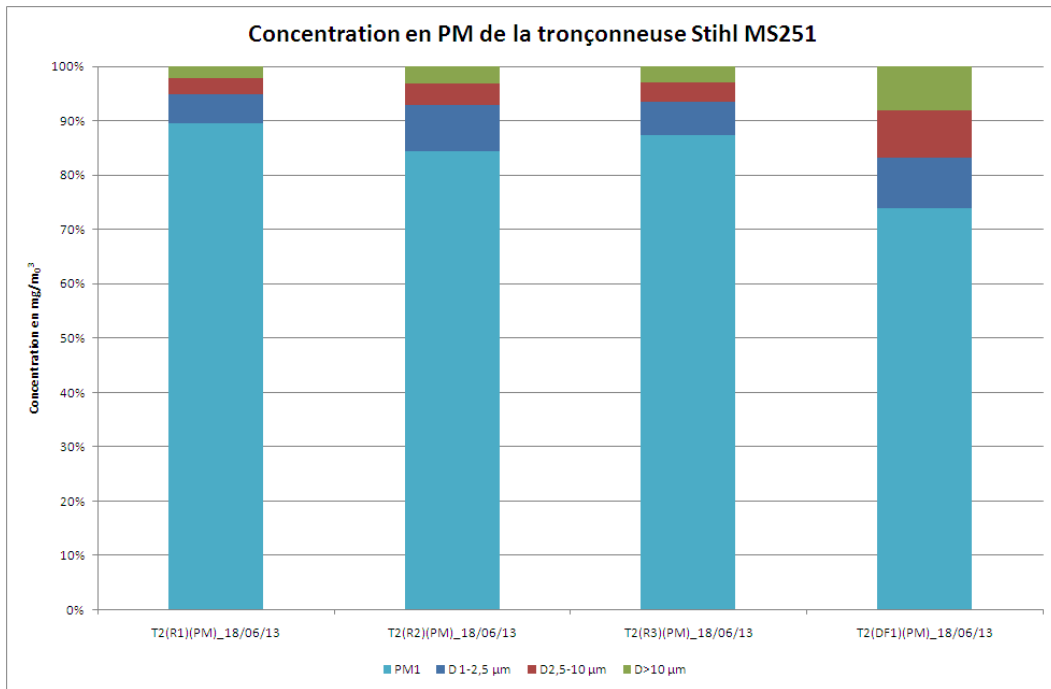


Figure 25 : Comparaison du profil normalisé des PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

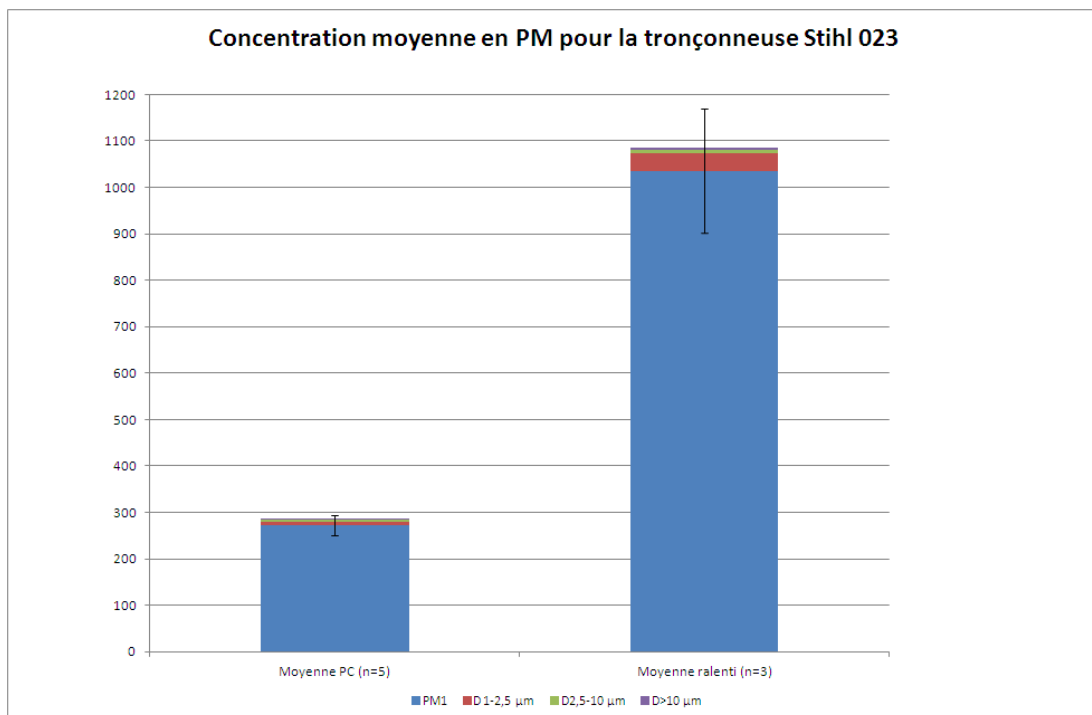


Figure 26 : Comparaison de la concentration moyenne des PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL 023

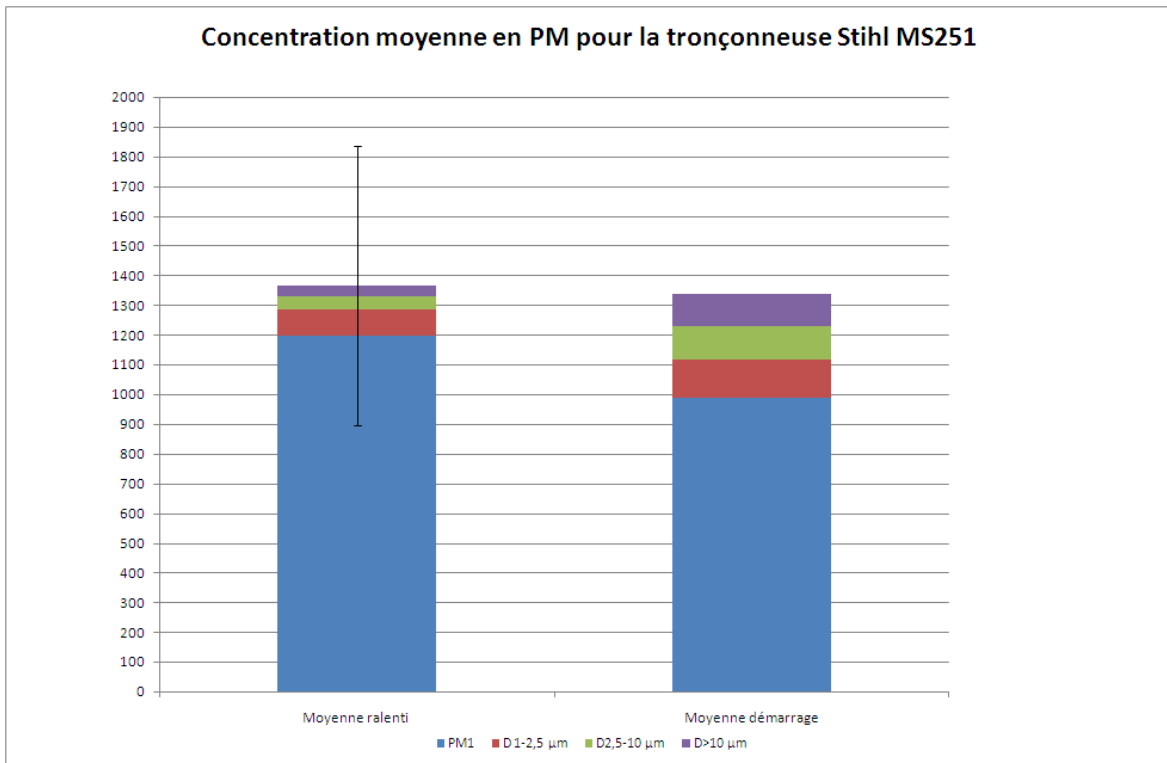


Figure 27 : Comparaison de la concentration moyenne des PM pour les différents régimes, tronçonneuse STIHL MS 521

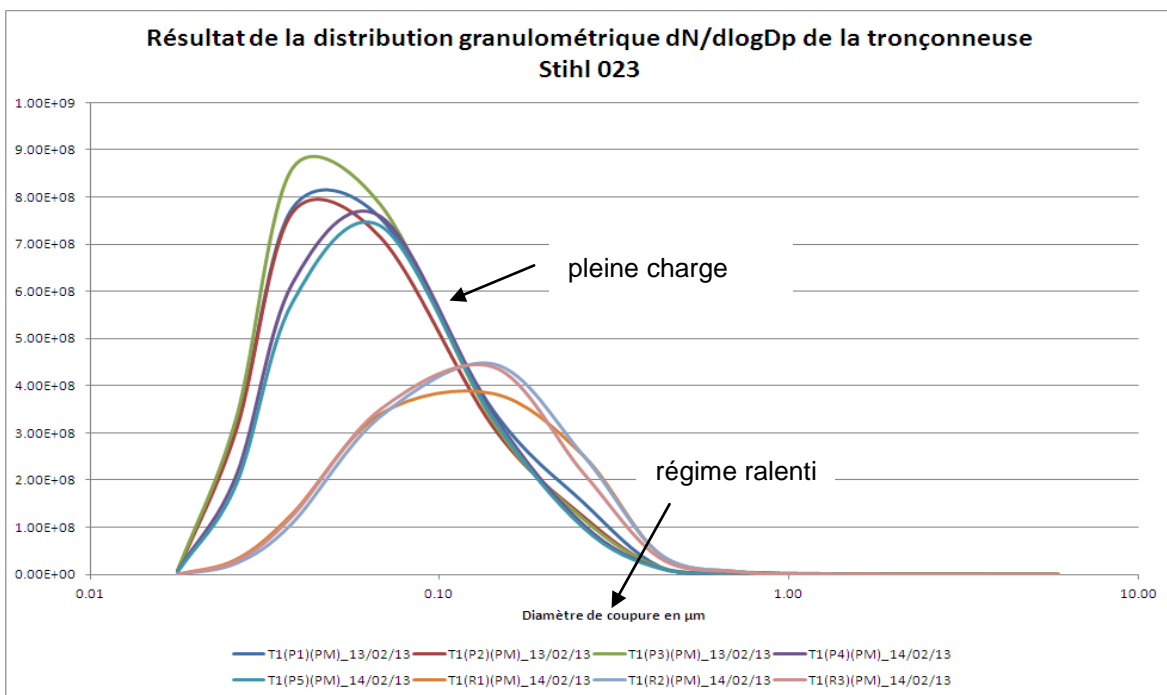


Figure 28 : Comparaison des résultats de la distribution granulométrique pour les différents régimes obtenus par l'impacteur ELPI, STIHL 023,

En raison des difficultés de fonctionnement du banc rencontrées lors de la seconde campagne, aucune donnée de granulométrie en nombre n'est disponible pour la tronçonneuse STIHL MS 521.

2.5 MESURAGES DE PUISSANCE ET CONSOMMATION

Les puissances corrigées des conditions climatiques et les consommations de carburant mesurées au cours des essais sont récapitulées dans le Tableau 29.

La consommation présente des fluctuations relatives plus importantes (8-10%) que celles de la puissance délivrée (4-5%). Les fluctuations de consommation ne sont pas corrélées à celles de la puissance.

Tableau 29 : Résultats des mesures de puissance au cours des essais- tronçonneuse STIHL 023

Date	Heure	Essai	Température ambiante	Pression (mbar)	Humidité relative (%)	Puissance corrigée	Consommation	Débit air
			(°C)	(mbar)	(%)	(kW)	(g/min)	Nm ³ /s
19/02/2013	10h48 - 11h03	AT1DCHAP (3)	21.0	1014.3	17.6 (*)	0.80	11.48	7.00E-03
13/02/2013	13h46 - 15h00	T1P1PM	21.9	1018.7	18.0	0.84	9.32	7.44E-03
13/02/2013	15h36 - 16h50	T1P2PM	22.5	1018.3	18.0	0.84	7.83	7.38E-03
13/02/2013	17h07 - 18h10	T1P3PM	23.3	1018.8	18.0	0.86	7.08	7.40E-03
14/02/2013	10h05 - 11h23	T1P4PM	23.0	1012.2	22.7	0.78	9.14	7.57E-03
14/02/2013	12h48 - 14h15	T1P5PM	23.1	1010.1	25.1	0.75	8.37	7.50E-03
18/02/2013	10h33 - 11h43	T1P6HAP	21.3	1014.0	18.4 (*)	0.79	8.37	7.57E-03
18/02/2013	13h07 - 14h17	T1P7HAP	20.5	1014.3	20.5 (*)		7.96	
19/02/2013	14h00 - 15h11	T1P8HAP	21.6	1012.7	18.9 (*)	0.84	8.99	6.71E-03
19/02/2013	15h26 - 16h04	T1P9HAP	18.6	1011.8	19.4 (*)	Essai invalidé		
					Moyenne	0.81	8.45	7.37E-03
					Ecart-type	0.04	0.71	2.76E-04
14/02/2013	15h00 - 16h04	T1R1PM	22.6	1009.0	27.8	0	2.85	1.63E-03
14/02/2013	16h08 - 17h05	T1R2PM	22.5	1008.8	30.1	0	2.56	1.72E-03
14/02/2013	17h03 - 17h51	T1R3PM	22.6	1008.8	31.3	0	2.40	
18/02/2013	16h05 - 17h05	T1R4HAP	22.2	1013.6	18.2 (*)	0	2.36	1.83E-03
18/02/2013	17h15 - 18h15	T1R5HAP	22.3	1013.7	19.6 (*)	0	2.35	1.77E-03
19/02/2013	9h03 - 10h03	T1R6HAP	20.3	1014.2	16.6 (*)	0	2.86	1.76E-03
					Moyenne	0	2.56	1.74E-03
					Ecart-type	0	0.24	7.50E-05

(*) station météorologique valeurs: valeurs de RH inférieures aux mesures Horiba (2 à 5 % d'écart)

T1DCHAP: consommation avant démarrages = 1903.74

Nm³ : mètres-cubes en condition standard, à 101.3 kPa et 20°C

2.6 CALCUL DES FACTEURS D'ÉMISSIONS POUR LES TRONÇONNEUSES

Les facteurs d'émissions sont calculés à partir des débits massiques E_i de polluants mesurés (moyenne des essais), qui sont rapportés à la puissance mécanique délivrée par le moteur P_i et en tenant compte des pondérations affectées ω_i au cycle G3 :

Équation 1

$$EF \text{ (g/kWh)} = \Sigma (\omega_i * E_i) / \Sigma (\omega_i * P_i)$$

où i est le mode testé, ralenti ou pleine charge

La formule est utilisée pour déterminer la consommation spécifique de carburant qui est de 657,8 g/kWh, soit 0,88 l/kWh. La valeur correspond aux moyennes des valeurs mesurées par Volckens pour du matériel de phase II II [5]. En effet, ce dernier a mesuré des consommations de différents matériels de jardinage dont la médiane varie entre 0.75 et 1.5 l/kWh selon les réglementations en vigueur. Ici, le rendement moyen du moteur à pleine charge est en effet relativement bas (13,5%). La consommation moyenne horaire de la tronçonneuse est ainsi de 0,6 l/h.

Les autres facteurs d'émissions sont récapitulés dans le Tableau 30. Les valeurs sont rapportées à la puissance dans une première colonne : les valeurs sont comparées à celles de la littérature. Elles sont rapportées et à la consommation de carburant de façon à pouvoir tirer des émissions à partir des valeurs de vente de carburant. Les facteurs d'émissions sont calculés à partir des débits d'échappement déterminés à partir de la concentration en oxygène : au ralenti, le débit « oxygène » (2.4 l/s) est plus important que celui mesuré directement par une sonde de Pitot et sans le tube de prélèvement (1.7 l/s) : pour ce mode de fonctionnement, l'étanchéité réalisée au niveau de l'extraction d'air n'avait pu être assurée et l'écoulement gazeux s'est peut être trouvé « dilué » avec de l'air ambiant aspiré en aval du tube au niveau du collecteur d'extraction.

Tableau 30 : Facteurs d'émission pour la STIHL 023

	EF (g/kWh)	EF (g/kWh) littérature moteur PreECE [5] Volckens [7] Alander	EF (g/g fuel)
CO ₂	2023	-	3.08
COVT	178	[5] 225 – 350 [7] 100 - 143	0.27
NO _x	1.33	[5] 0.5 – 1.75 [7] 0.21-0.31	2.03E-03
CO	62	[5] 200 – 1200 [7]. 459 – 578	9.45E-02
PM en nombre	2.87E+17	[7] 2 ^E +15	4.37E+14
IP tot	6.68		1.02E-02
HAP *10 ^{e3}	1970		3.00
PM _{10et>10}	5.31	[5] 3 – 7 (PM2.5) [7] 1.72 – 3.17	8.07E-03
PM1	5.04		7.66E-03

Les facteurs d'émissions sont comparés à ceux de Volckens[Volckens, 2007 #11] pour les polluants réglementés. Les facteurs d'émission sont globalement de l'ordre de grandeurs ou inférieures aux mesures de Volckens, pour le CO, les NO_x et les COVT : nos valeurs obtenues paraissent s'approcher des fourchettes des technologies de phase II pour les NO_x, et la consommation. Les émissions de CO apparaissent très faibles.

Les facteurs d'émission de particules sont élevés, même pour un moteur d'ancienne conception. Mais le facteur d'émission en PM reste toujours dans la fourchette entre 3 et 7 mg/kWh de Volckens pour la mesure de PM. 95% de la masse des particules émises est dans la gamme de taille submicronique.

Un facteur en nombre de particules de $2.87E+17/kWh$ est déterminé, dont la valeur est supérieure aux valeurs d'environ $1E15/kWh$ présentées par Alander pour un moteur analogue [7].

A ce stade, il est difficile de savoir si ce facteur est élevé comme l'est celui de la masse des particules : les nombres et masses de particules ne sont effectivement pas toujours reliés.

Enfin, on dispose d'éléments sur le facteur d'émission et la composition des émissions de HAP pour les tronçonneuses dans le Tableau 31. L'espèce majoritaire dans les émissions de HAP est le fluoranthène. Néanmoins, les espèces Benzo(a)anthracène, Benzo(a)pyrène et Indeno(1,2,3-c,d)pyrène présentent des émissions élevées, de l'ordre de 30-40 $\mu g/ g$ PM, qui sont conformes aux signatures des moteurs 2-temps marins [8].

Tableau 31 : Répartition des espèces de HAP dans le facteur d'émission

Espèce	Masse de l'espèce dans les émissions HAP (%)
Fluoranthène	43,80
Benzo(a)anthracène	6,11
Benzo(b)fluoranthène	6,95
Benzo(k)fluoranthène	1,95
Benzo(a)pyrène	10,82
Dienzo(a,h)anthracène	0,14
Benzo(g,h,l)pérylène	21,19
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	9,04

Pour certaines substances, le débit massique de polluant est plus important au ralenti qu'à la pleine charge. Les substances dont le débit massique est plus important au ralenti sont recensées dans le Tableau 32. Dans ce cas, nos facteurs d'émission obtenus se positionnent dans la fourchette haute de Volckens pour tous les polluants concernés : particules (PM et TSP), COVT. Les HAP mesurés dans cette étude présentent tous un débit massique en mode ralenti supérieur à celui du mode pleine charge, ce qui nous conduit à penser que le facteur d'émission global obtenu dans ce projet pour les HAP est assez élevé.

Pour ces polluants, le facteur de pondération du mode ralenti est un paramètre sensible du facteur d'émission. La quantité de HAP émise et rapportée aux émissions de particules est 0,37. Spezzano [6] obtient des ratios voisins de 0,05 sur des moteurs de scooters Euro0 à chaud. La contribution de HAP est proportionnellement plus importante dans les échappements de tronçonneuse.

Les émissions de carbones [C] se répartissent autour de 75% dans le CO_2 , 20% dans les COVT et 3,6% dans le CO. Les particules ne représentent qu'une très faible fraction des éléments carbonés émis (>1%). Cette répartition révèle que la combustion est mieux réalisée que dans Volckens [8] chez qui les émissions de CO, plus élevées que dans nos mesures, représentaient près d'un tiers du bilan carbone. Les écarts des mesures entre les IP totaux et les particules sur le ralenti sont aussi très importants : c'est sans doute ce qui explique l'écart entre le facteur d'émission d'IP totaux, qui est plus sensiblement plus élevé que le facteur d'émission de particule : la forte fraction solide au ralenti conduit à augmenter la mesure des IP totaux.

Tableau 32 : Substances pour lesquelles les débits massiques au ralenti sont supérieures aux débits massiques à pleine charge

Substance	q ralenti / q pleine charge
COVT	2,1
IP	2,2
PM tot	3,5
PM1	3,5
HAP	7,5
Benzo(a)anthracène	4,2
Benzo(b)fluoranthène	5,1
Fluoanthène	6,9
Benzo(a)pyrène	7,7
Dienzo(a,h)anthracène	8,1
Benzo(g,h,i)pérylène	9,9
Indeno(1,2,3,-c,d)pyrène	17
Benzo(k)fluoranthène	22

La quantification des COV spécifiques n'a pu aboutir en raison de la saturation des supports de prélèvements (Annexe D) et ce malgré l'introduction d'un étage de dilution lors des essais sur la tronçonneuse Stihl MS 521.

2.7 SYNTHÈSE RELATIVE À L'ÉTUDE DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DE TRONÇONNEUSES

La première campagne de caractérisation des émissions de tronçonneuses nous amène à tirer des conclusions sur :

- le fonctionnement du couple banc- tronçonneuse,
- la caractérisation des effluents et la détermination des facteurs d'émission.

2.7.1 FONCTIONNEMENT DU COUPLE : BANC / TRONÇONNEUSE

Les durées importantes de fonctionnement pour réaliser les prélèvements à pleine charge altèrent le fonctionnement de la tronçonneuse. Il a en effet été constaté qu'au bout de quelques cycles, les régimes et couples moteur deviennent plus difficiles à stabiliser et des baisses de régime et couple sont fréquemment observées en cours d'essai. L'amplitude et la fréquence de ces baisses augmentent au fur et à mesure que l'on avance dans la campagne d'essais. Le banc n'étant pas conçu pour réguler les consignes de régime et de couple dans le temps, il est impossible de fixer une consigne parfaitement constante et il est apparu nécessaire d'enregistrer les régimes et couples de façon à caractériser la stabilité du fonctionnement pendant l'essai. Un dispositif d'acquisition continu de ces signaux a donc été mis en place dès la seconde campagne pour mettre en relation les concentrations mesurées sur les cycles et la stabilité de fonctionnement de la tronçonneuse. Au cours de la première campagne, nous avons testé un cycle démarrage baptisé cycle de « démarrage à chaud ». Ce cycle comporte deux démarrages successifs de la tronçonneuse suivi de 15 min pendant lesquelles le moteur tourne en pleine charge.

Sur le cycle de démarrage, le débit de gaz ne peut être obtenu que par intégration des valeurs de régime avec le nouveau système d'acquisition (acquisition continue). Pour les résultats présentés ici, on ne peut raisonner qu'en concentration. Les concentrations mesurées au cours de la première campagne sont intermédiaires entre la pleine charge et le ralenti : la pleine charge étant la phase où les concentrations sont faibles, les concentrations élevées observées sur ce cycle sont liées au démarrage de la machine. La deuxième campagne prévue dans le projet a été lancée en juin, mais des avaries sur le banc de freinage de l'Irstea ont obligé à stopper la campagne sans disposer des mesures prévues.

2.7.2 ENSEIGNEMENT EN TERMES DE CARACTÉRISATION DES EFFLUENTS ET DE DÉTERMINATION DES FACTEURS D'ÉMISSION

Pour les tronçonneuses, les observations suivantes ont pu être formulées :

- Le régime réduit se traduit par un niveau global des concentrations en polluants gazeux et particulaires organiques plus élevé qu'à pleine charge
- Quel que soit le régime étudié, la distribution granulométrique massique est marquée par une prédominance de la fraction PM1.
- Le régime réduit se traduit par un doublement des concentrations en particules totales obtenues à pleine charge, imputable à une augmentation d'un facteur six de la fraction solide.
- Les phases de démarrages se caractérisent par des concentrations totales supérieures de 50% à celles de la pleine charge, en raison d'un doublement de la fraction solide.
- La concentration de la fraction condensable demeure inchangée d'un régime à l'autre.
- Le passage du régime pleine charge au régime ralenti semble se traduire par une augmentation en absolu des concentrations massiques de toutes les tranches granulométriques. Il a été observé une augmentation de la contribution de la tranche comprise entre 1 μm et 2,5 μm et pour ce qui est de la distribution en nombre, un déplacement du mode de l'aérosol de 50 nm à 120 nm. Cette variation des diamètres entre la pleine charge et le régime réduit est sans doute liée aux effets de température des rejets à l'échappement.
- Les concentrations en HAP sont respectivement de deux à six fois plus élevées en régime réduit, qu'en phase de démarrage et en régime de pleine charge.
- Le calcul des facteurs d'émission a permis d'établir que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que ceux de la littérature pour les polluants réglementés (COVT, NOx, PM) et plus faibles pour le CO. Le bilan des émissions carbonées montre que la combustion lors de nos essais a été meilleure que ce qui est rapporté par la littérature. Les valeurs obtenues pour les facteurs d'émissions de particules en nombre sont relativement élevées mais il est difficile de savoir à ce stade si cela est imputable à la technologie ancienne de la tronçonneuse testée. Le ratio des émissions de HAP totaux par rapport aux émissions particulaires est également nettement plus élevé que celui observé sur des moteurs de scooters d'ancienne génération. La signature des HAP dans les facteurs d'émission est conforme à celle observée pour d'autres moteurs de technologie 2-Temps.
- Les niveaux d'émissions ramenés aux masses de carburant consommées, exploitables pour des inventaires, sont proposés : ces valeurs correspondent à des technologies anciennes.
- Les données fournies pour les tronçonneuses sont plus réduites que celles initialement prévues dans la convention en raison des difficultés rencontrées sur le banc d'essais qui a subi des avaries suffisamment importantes pour nous contraindre à stopper la campagne d'essais.

3. ETUDE DES ÉMISSIONS DE TRACTEURS (IRSTEA/INERIS)

Pour la France, les tracteurs représentent environ 90% des émissions polluantes du secteur des EMNR. Cette contribution représente entre 1 et 4% des émissions polluantes de tous les transports selon le polluant étudié. Elle est estimée à partir des ventes de carburants qui permettent de déterminer la quantité d'énergie livrée aux exploitations agricoles (2).

Cette partie du rapport est centrée sur la deuxième tâche du projet EMNR qui concerne la caractérisation des émissions polluantes pour les engins lourds équipés de moteur diesel. Les travaux portent également sur les facteurs d'émissions utilisés pour les engins diesel: En effet, les facteurs d'émissions utilisés dans la méthode Corinair et véritablement mesurés datent de 2004 pour les polluants réglementés. Pour le matériel récent, on se sert actuellement des valeurs seuils de la réglementation comme facteurs d'émission. Un premier objectif de ce projet a donc été de réaliser des mesurages de concentrations d'un certain nombre de polluants atmosphériques émis afin de déterminer des facteurs d'émission sur un banc de tracteurs pour les comparer aux valeurs seuils normatives. Les mesurages portent sur des tracteurs de technologie récente et vise à vérifier l'évolution de ces facteurs d'émission et de les confronter aux seuils réglementaires applicables. Par ailleurs, les éléments permettant de proposer une caractérisation détaillée des espèces physico-chimiques présentes dans ces émissions étant très rares et encore plus anciens, des éléments très détaillés des émissions polluantes des engins agricoles ont été fournis portant notamment sur les teneurs en particules fines, en composés organiques volatils dans la phase gazeuse, en composés aromatiques polycycliques dans les phases gazeuse et particulaire.

Dans le premier volet de ce chapitre, un rappel est réalisé sur les motorisations les plus utilisées pour les engins agricoles. L'objectif est d'initier la discussion du volet 2 portant sur les cycles d'essai des moteurs diesel agricole. Dans le troisième volet, on donne les éléments nécessaires au dimensionnement du matériel de mesurage des polluants à l'échappement.

Cette partie du rapport présente enfin les résultats des campagnes de mesurage de polluants menées sur banc d'essais et en situation réelle et la détermination des facteurs d'émission.

3.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉMISSIONS POLLUANTES DES ENGIN NON ROUTIERS DIESEL

3.1.1 SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES DES ENGIN AGRICOLES DIESEL

En France, les engins agricoles constituent la plus forte contribution aux émissions polluantes des engins non routiers. Les tracteurs constituent la majorité de ce parc et leur effectif avoisine un million d'unité. Cette quantité correspond au parc statique de véhicule. Cependant, ce chiffre élevé masque des taux d'utilisation très dispersés. Avec près de 2,5 tracteurs par exploitation [2], il convient de distinguer les tracteurs dit de têtes, qui servent à effectuer la majorité des gros travaux des exploitations, tandis que les tracteurs secondaires n'effectuent un service beaucoup plus réduit. Sur la Figure 29, on observe une diminution de près de moitié des heures de service des tracteurs au cours de leur vie. Ces relevés sont encore sans doute en dessous de la réalité car elles correspondent aux tracteurs testés sur bancs mobiles, c'est-à-dire, ayant suffisamment de valeurs pour justifier de procéder à cet essai de puissance. Dans sa présentation, Lambrecht [3] estimait lui à moins de 40 heures annuelles la durée de service des tracteurs allemands de moins de 37 kW et de plus de douze ans.

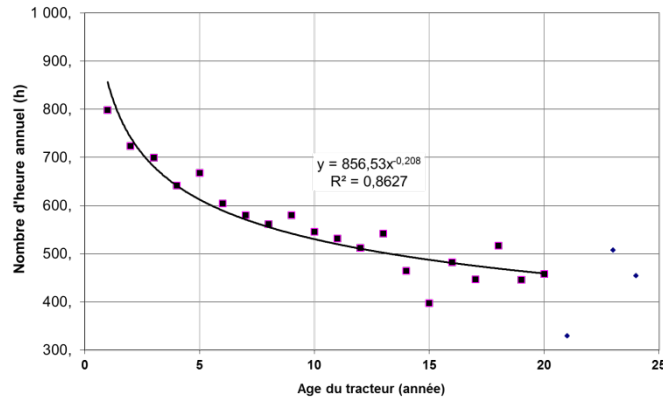


Figure 29 : Nombre annuel d'heure d'utilisation des tracteurs en fonction de leur âge : l'utilisation moyenne est de 530 heures par an – Echantillon de 1200 tracteurs testés sur banc d'essai mobile sur la période 2007-2008 - Source FNCUMA et association AILE

La durée de vie des tracteurs est assez longue (31 ans pour les tracteurs agricoles selon l'US-EPA). C'est ce que traduit la Figure 30 sur laquelle on observe un effectif assez constant des tracteurs de 12 à 25 ans. Les tracteurs plus récents sont naturellement beaucoup plus représentés dans les essais de banc mobiles, voir sur-représentés pour les tracteurs neufs. La décroissance est très rapide et très forte dans les 12 premières années : elle traduit l'importance accordée aux tracteurs récents et reflètent sans doute plus la plus grande valeur d'usage d'un tracteur récent, plus qu'un taux de survie du matériel (cf. Figure 30), dont les enquêtes sur le matériel agricole montre qu'il est très long. Le taux de pénétration des technologies récentes se traduit certainement plus par des heures d'utilisation que par le nombre de véhicules présent dans le parc statique.

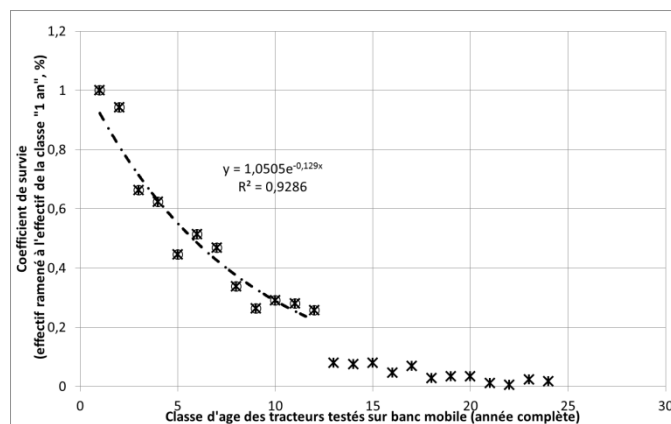


Figure 30 : Coefficient de survie des tracteurs

Le parc français de tracteurs agricoles est essentiellement équipé de moteurs diesel à 4 temps. Les cylindrées et les puissances varient selon la puissance exigée pour les travaux : le tracteur moyen immatriculé en France ces dernières années fait environ 100 kW (Figure 31). La puissance des motorisations a augmenté de façon continue pendant 20 ans (20 chevaux en 20 ans), mais elle semble plus stable depuis 5 ans. Les données utilisées ici ont été fournies par la FNCUMA, qui centralise les résultats des essais de puissance faits dans le cadre du dispositif de banc d'essai mobile. L'échantillon de tracteur est large, mais correspond à une couverture géographique qui est moins large que les données d'immatriculation utilisées dans l'approche inventaire. Cependant, ces données corroborent assez bien les hypothèses retenues dans l'approche « inventaire » de la présente étude.

Puissance moyenne des tracteurs testés sur banc d'essai mobile
par classe d'âge

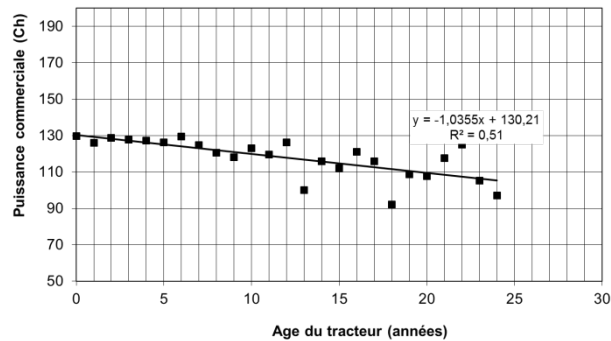


Figure 31 : Evolution de la puissance des tracteurs testés dans le dispositif « banc d'essai mobile » entre 2007-2008 – échantillon de 1200 tracteurs

D'une façon plus générale, les cylindrées inférieures à 5 l correspondent à des tracteurs de moins de 100 cv, tandis qu'il faut compter 7 à 8 l pour les tracteurs moyen (de 100 à 180 cv) et plus de 12 l au-delà de 180 cv. Si la puissance augmente, ce n'est pas le cas de la consommation de carburant du secteur : en effet, cette dernière était estimée à 4,5 MTEp dans les années 1980 et n'est plus que de 2,1 MTEp en 2003. Cette diminution correspond à une baisse du nombre d'exploitations, ainsi que des surfaces cultivées.

3.1.2 RÉGLEMENTATION DES ÉMISSIONS POLLUANTES

Les moteurs des engins non routiers sont soumis à des réglementations qui visent à limiter les émissions polluantes contenues dans les gaz de combustion rejetés par les moteurs thermiques. Les moteurs des engins non routiers sont soumis à des réglementations qui visent à limiter les émissions polluantes contenues dans les gaz de combustion rejetés par les moteurs thermiques. Durant les opérations de travaux forestiers et d'agriculture, de grandes quantités de gaz et de particules polluantes sont émises dans l'atmosphère. Les polluants principaux, qui font l'objet de valeurs seuils réglementées sont le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures imbrûlés (COVT), les oxydes d'azote (NOx) et les particules (PM).

La directive européenne légiférant sur les émissions polluantes de véhicules agricoles non-routiers est la directive 2000/25/CE du 22 mai 2000 modifiée par la directive 2014/43/EU du 18/03/2014. Elle fixe, par référence aux dispositions de la directive 97/68/CE du 16 décembre 1997 relatives aux mesures contre les émissions de gaz et de particules polluants provenant des moteurs à combustion interne destinés aux engins mobiles non routiers, les valeurs limites des émissions (VLE) de gaz polluants et de particules polluantes à appliquer par étapes successives ainsi que la procédure d'essai pour les moteurs à combustion interne destinés à la propulsion des tracteurs agricoles ou forestiers. Cette directive fonctionne comme les normes Euro pour les véhicules routiers. Les normes Euro ont été appliquées bien plus tôt du fait de l'importance du parc de véhicules routier par rapport aux véhicules non routiers. Ainsi la norme Euro 1 a été appliquée en 1993 alors que les VLE des EMNR n'apparaissent qu'avec la directive de 1997. Pour le non routier, le stage (ou phase) fait plutôt référence aux réglementations européennes tandis que TIER fait référence aux VLE américaines (Time of Implementation for Emission Regulations).

Cette directive détermine aussi les procédures d'essais (condition d'essai, matériel de mesurage, calcul de facteur de correction, ...) ainsi que le protocole de détermination des valeurs limites d'émission (VLE) pour chaque type de moteurs. Ces seuils (ou VLE) sont divisés en 5 étapes : les valeurs seuils et les dates de mise en application de la directive sont précisées dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Catégorie des moteurs diesel non routiers et VLE correspondant à chaque catégorie

Phase	Type Moteurs		VLE : Annexe I de la directive 97/68/CE + § 5.2 du règlement 96						
	Catégorie	Puissance (kW)	CO (g/kW.h)	HC (g/kW.h)	Nox (g/kW.h)	HC+Nox (g/kW.h)	PT (g/kW.h)		
I	C	37-75	annexe I, point 4.1.2.1	6,5	1,3	9,2		0,85	
	B	75-130		5	1,3	9,2		0,7	
	A	130-560		5	1,3	9,2		0,54	
II	D	18-37	annexe I, point 4.1.2.3	5,5	1,5	8		0,8	
	G	37-75		5	1,3	7		0,4	
	F	75-130		5	1	6		0,3	
	E	130-560		3,5	1	6		0,2	
III A Vitesse pas Constante	K	19-37	annexe I, point 4.1.2.4	5,5			7,5	0,6	
	J	37-75		5			4,7	0,4	
	I	75-130		5			4	0,3	
	H	130-560		3,5			4	0,2	
III B Vitesse pas Constante	P	37-56	annexe I, point 4.1.2.5	5			4,7	0,025	
	N	56-75		5	0,19	3,3		0,02	0,025
	M	75-130		5	0,19	3,3		0,02	0,025
	L	130-560		3,5	0,19	2		0,02	0,025
IV Vitesse pas Constante	R	56-130	annexe I, point 4.1.2.6	5	0,19	0,4		0,025	
	Q	130-560		3,5	0,19	0,4		0,025	

Pour l'application de ces VLE, deux dates sont à distinguer : l'homologation des moteurs est la première étape à satisfaire : les dates d'entrée en vigueur de VLE pour l'homologation (Tableau 34) précèdent les dates d'entrée en vigueur pour la mise sur le marché du matériel (Tableau 34).

Tableau 34 : Date d'entrée en vigueur des VLE pour l'homologation des moteurs d'engins non routiers

Phase	Type Moteurs		Date de mise en application (homologation)				
	Catégorie	Puissance (kW)	Directive 97/68/CE	Transposition FR	Directive 2000/25/CE	Transposition FR	règlement N°96 (CEE-ONU)
I	C	37-75	30/06/1998	/	31/12/2000	02/02/2001	
	B	75-130	30/06/1998	/	31/12/2000	02/02/2001	
	A	130-560	30/06/1998	/		/	
II	D	18-37	31/12/1999	23/09/2005	31/12/2000	02/02/2001	
	G	37-75	31/12/2002	23/09/2005	31/12/2002	31/12/2002	
	F	75-130	31/12/2001	23/09/2005	31/12/2001	31/12/2001	
	E	130-560	31/12/2000	23/09/2005	31/12/2000	02/02/2001	
III A Vitesse pas Constante	K	19-37	31/12/2005	31/12/2005	31/12/2005	01/01/2006	03/02/2008
	J	37-75	31/12/2006	31/12/2006	31/12/2006	01/01/2007	03/02/2008
	I	75-130	31/12/2005	31/12/2005	31/12/2005	01/01/2006	03/02/2008
	H	130-560	30/06/2005	23/09/2005	31/12/2005	01/01/2006	03/02/2008
III B Vitesse pas Constante	P	37-56	31/12/2011	31/12/2011	31/12/2011	01/01/2012	26/07/2012
	N	56-75	31/12/2010	31/12/2010	31/12/2010	01/01/2011	26/07/2012
	M	75-130	31/12/2010	31/12/2010	31/12/2010	01/01/2011	26/07/2012
	L	130-560	31/12/2009	31/12/2009	31/12/2009	01/01/2010	26/07/2012
IV Vitesse pas Constante	R	56-130	30/09/2010	30/09/2013	30/09/2013	01/10/2013	01/10/2013
	Q	130-560	31/12/2012	31/12/2012	31/12/2012	01/01/2013	01/01/2013

Tableau 35 : Dates d'entrée en vigueur des VLE pour la mise sur le marché des moteurs d'engins non routiers

Phase	Type Moteurs		Date de mise en application (mise sur le marché)				
	Catégorie	Puissance (kW)	Directive 97/68/CE	Transposition FR	Directive 2000/25/CE	Transposition FR	règlement N°96 (CEE-ONU)
I	C	37-75	31/03/1999		30/06/2001	30/06/2001	
	B	75-130	31/12/1998		30/06/2001	30/06/2001	
	A	130-560	31/12/1998		30/06/2001	30/06/2001	
II	D	18-37	31/12/2000	23/09/2005	31/12/2001	31/12/2001	
	G	37-75	31/12/2003	23/09/2005	31/12/2003	31/12/2003	
	F	75-130	31/12/2002	23/09/2005	31/12/2002	31/12/2002	
	E	130-560	31/12/2001	23/09/2005	31/12/2001	31/12/2001	
III A Vitesse pas Constante	K	19-37	31/12/2006	31/12/2006	31/12/2006	01/01/2007	03/02/2008
	J	37-75	31/12/2007	31/12/2007	31/12/2007	01/01/2008	03/02/2008
	I	75-130	31/12/2006	31/12/2006	31/12/2006	01/01/2007	03/02/2008
	H	130-560	31/12/2005	31/12/2005	21/12/2005	01/01/2006	03/02/2008
III B Vitesse pas Constante	P	37-56	31/12/2012	31/12/2012	31/12/2012	01/01/2013	26/01/2012
	N	56-75	31/12/2011	31/12/2011	31/12/2011	01/01/2012	26/01/2012
	M	75-130	31/12/2011	31/12/2011	31/12/2011	01/01/2012	26/07/2012
	L	130-560	31/12/2010	31/12/2010	31/12/2010	01/01/2011	26/01/2012
IV Vitesse pas	R	56-130	30/09/2014	30/09/2014	30/09/2014	01/10/2014	01/10/2014
	Q	130-560	31/12/2013	31/12/2013	31/12/2013	01/01/2014	01/01/2014

La directive 97/68/CE a été modifiée huit fois depuis 1997. En effet, avec les changements des méthodes d'essais et des nouvelles technologies moteurs, la directive a dû être adaptée au fil des années. Les principales évolutions sont présentées dans ce qui suit:

Modification 1 par la directive 2001/63/CE du 17 août 2001 : Elle modifie les conditions d'essai sur les moteurs (changements du facteur de correction) ;

Modification 2 par la directive 2002/88/CE du 9 décembre 2002 : Les moteurs à allumage commandés de faible puissance (moins de 19kW) sont ajoutés à la directive et sont alors réglementés eux aussi. Cette modification prévoit aussi une classification des familles de moteur plus détaillées et un marquage spécifique à chaque moteur obligatoire ;

Modification 3 par la directive 2004/26/CE du 21 avril 2004 : Les moteurs marins (navigation intérieure) sont intégrés à la directive. Avec cette modification les normes deviennent aussi plus sévères pour tous les moteurs (alignement de l'Europe sur les USA). La directive met en place une nouvelle procédure pour produire une meilleure simulation des conditions réelles de fonctionnement du moteur sur le banc de puissance : le cycle d'essai transitoire apparaît et les facteurs de pondération du cycle 8 modes évoluent ;

Modification 4 par la directive 2006/105/CE du 20 novembre 2006 : le système de numérotation des certifications de réception change. Chaque pays européen dispose d'un code pour pouvoir identifier la provenance des moteurs ;

Modification 5 par le règlement CE N° 596/2009 du 18 juin 2009 : Cette modification a été nécessaire pour adapter la directive aux progrès techniques. Elle modifie aussi la durée de la phase II pour les moteurs portatif 2T en la rallongeant ;

Modification 6 par la directive 2010/26/UE du 31 mars 2010 : Suite à cette modification il y a eu un changement du dispositif de mesurage des émissions et l'apparition de prescriptions relatives à la réception par type pour les phases III b et IV ;

Modification 7 par la directive 2011/88/UE du 16 novembre 2011 : Changement des démarches pour les fabricants d'équipement d'origine (FEO) ;

Modification 8 par la directive 2012/46/UE du 6 décembre 2012 : Les conditions de contrôle des moteurs sont redéfinies pour les phases III b et IV et des prescriptions sont données pour l'utilisation des agents réducteurs utilisés dans les moteurs diesel pour le traitement des NOx. Les fiches techniques moteurs type et les rapports d'essai type sont modifiés eux aussi.

Un point important est que les évolutions de VLE se font de manière à s'harmoniser avec les VLE des normes américaines. Les constructeurs de matériels agricoles travaillent le plus souvent sur le marché mondial, ce qui fait que les motorisations répondent généralement au standard mondial le plus exigeant et que les informations relevées sur les plaques moteurs font souvent référence à des exigences qui sont bien souvent les normes américaines.

C'est pourquoi un groupe de travail a été mis en place au début des années 2000 pour définir un règlement technique mondial pour cette catégorie d'engins. Néanmoins, l'harmonisation n'est pas toujours effective et les vagues de sévèrisation des VLE ont parfois porté sur un polluant précis pour les normes américaines et un autre pour les normes européennes.

A contrario des engins pour le BTP, les tracteurs agricoles et forestiers, sont en fait exclus de la directive 97/68/CE. En effet c'est la directive 2000/25/CE qui les concerne plus spécifiquement. Cette particularité vient du fait qu'il existait, avant la directive 97/68/CE, des directives spécifiques pour les tracteurs agricoles dont certaines portaient déjà en 1977 sur des limitations d'émissions polluantes (opacité des fumées). L'évolution des réglementations pour les tracteurs a donc parfois différée de celle des autres engins non routier, ainsi qu'on en retrace l'évolution dans le Tableau 36

Alors qu'ils sont soumis aux mêmes VLE que les autres engins non routiers, les dates d'application des phases diffèrent parfois entre ces 2 documents. Bien souvent, les dates de mise en application des nouvelles étapes de réglementation pour les tracteurs précèdent celles des autres engins et se rapprochent ainsi plus des réglementations mises en place aux Etats Unis. Il faut noter aussi que les moteurs qui équipent le matériel agricole ne sont pas toujours soumis aux directives spécifiques de ces engins : des moteurs homologués dans la catégorie « véhicules utilitaires lourds » sont aussi utilisés. Les procédures et les appareillages d'essai sont identiques dans les deux directives. Cependant, les cycles d'essai ne sont pas toujours les mêmes selon qu'on s'intéresse aux poids-lourds ou aux matériels non routiers.

Tableau 36 : Evolution des réglementations sur les émissions polluantes à l'échappement pour les engins non routiers (à gauche) et pour les tracteurs agricoles (à droite)

Dates	Tous Moteurs EMNR		Moteurs TRACTEURS	
	Référence Européenne	Transposition en Droit Français	Référence Européenne	Transposition en Droit Français
1974				Directive 74/150/CEE du 4 mars 1974, (tracteur)
1977			Directive 77/537/CEE (moteurs tracteurs)	
16/12/1997	Directive 97/68/CE (L059 P.1)			
22/05/2000			Directive 2000/25/CE du 22/05/2000 (L 173)	
17/01/2001				Arrêté du 17 janvier 2001
17/08/2001	M1 Directive 2001/63/CE du 17/08/2001 (L 227 P.41)			
09/12/2002	M2 Directive 2002/88/CE du 09/12/2002 (L35 P.28)			
23/09/2003	A1 Acte 23/09/2003 (L236)		A1 Conditions d'adhésion à l'UE du 23/09/2003 (L236 P.33)	
21/04/2004	M3 Directive 2004/26/CE du 21/04/2004 (L146 P.1)			
25/06/2004	C1 Rectificatif de 2004/26/CE du 25/06/2004 (L225 P.3)			
21/02/2005			M1 Directive 2005/13/CE du 21/02/2005 (L 55 P.35)	
22/09/2005		Arrêté du 22 septembre 2005		
28/09/2005				Arrêté du 28 septembre 2005
20/11/2006	M4 Directive 2006/105/CE du 20/11/2006 (L363 P.368)		M2 Directive 2006/96/CE du 20/11/2006 (L 363 P.81)	
18/06/2009	M5 Règlement CE N° 596/2009 du 18/06/2009 (L188 P.14)			
04/03/2010	C2 Rectificatif de 2010/26/UE du 04/03/2011 (L59 P.73)			
15/03/2010		Arrêté du 10 novembre 2010	M3 Directive 2010/22/UE du 15/03/2010 (L 91 P.1)	
31/03/2010	M6 Directive 2010/26/UE du 31/03/2010 (L86 P.29)			
10/11/2010				
14/09/2011			M4 Directive 2011/72/UE du 14/09/2011 (L 246 P.1)	
16/11/2011	M7 Directive 2011/88/UE du 16/11/2011 (L305 P.1)		M5 Directive 2011/87/UE du 16/11/2011 (L 301 P.1)	
22/06/2012		Arrêté du 22 juin 2012		
20/07/2012				Arrêté du 20 juillet 2012
23/11/2012		Arrêté du 23 novembre 2012		
06/12/2012	M8 Directive 2012/46/UE du 06/12/2012 (L353 P.80)			
13/05/2013			M6 Directive 2013/15/UE du 13/05/2013 (L 158 P.172)	
18/03/2014			M7 Directive 2014/43/UE du 18/03/2014 (L 82 P.12)	
21/03/2014		Arrêté du 21 mars 2014		

3.1.3 PROCÉDURE ET CYCLES D'ESSAI

3.1.3.1 ÉVOLUTION DES CYCLES D'ESSAI

Le cycle de conduite est la procédure qui définit les conditions de fonctionnement du moteur ou du véhicule au moment du contrôle des émissions. La représentativité des cycles de conduite a toujours été une qualité recherchée dans les mesurages de pollution. Cependant, cette qualité s'est souvent opposée à la nécessité d'un protocole répétable et robuste, faisant privilégier des cycles de conduite schématiques, comme le NEDC pour les voitures. En effet, ce cycle est une succession de plateaux sur lesquels la vitesse du véhicule est constante, ce qu'on ne trouve que rarement dans la conduite réelle (voir Figure 32). Des enjeux protectionnistes ont aussi conduit dans le passé à la coexistence de différentes réglementations ayant chacune un cycle d'essai particulier et propre à une région du monde. Depuis 2 décennies, ces cycles d'essais ont fait l'objet de travaux et de débats quant à leur représentativité vis-à-vis de la conduite réelle.

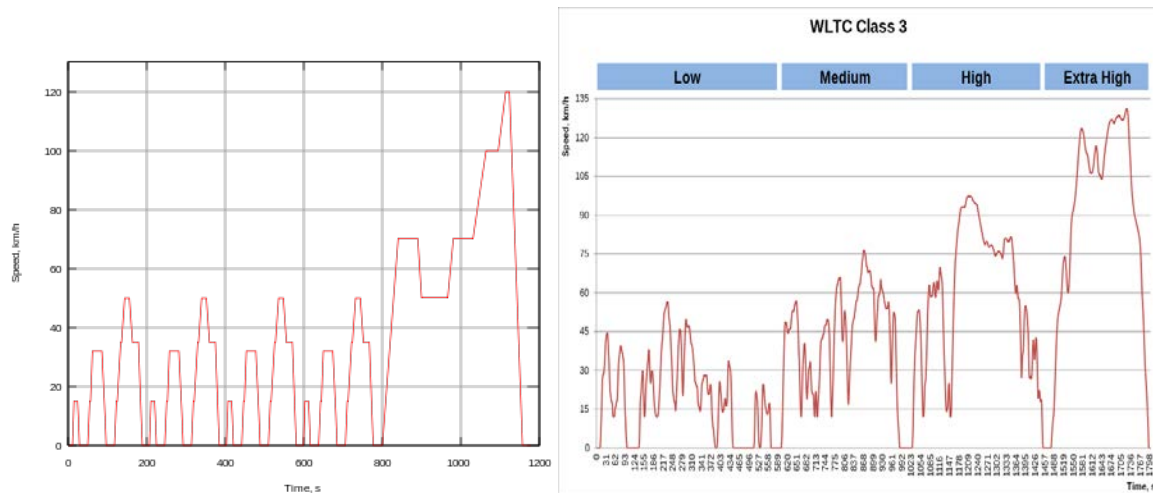


Figure 32 : Cycle d'essai des véhicules légers : ancien cycle d'essai NEDC à gauche et nouveau cycle WLTC à droite

Ces dix dernières années, les cycles d'essais pour le contrôle des émissions polluantes des véhicules ont fortement évolués, que ce soit pour les voitures particulières, les poids-lourds ou les véhicules non routiers. Ainsi, les VLE et les cycles de conduites s'harmonisent autour des protocoles mis en place à l'échelle mondiale, comme le WLTP pour les véhicules légers (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*). Ainsi, l'ancien cycle d'essai européen « NEDC » cède sa place au profit d'un cycle mondial WLTC classe 1 qui devient obligatoire en 2014 pour les voitures particulières (voir Figure 32). Le cycle WLTC est représentatif d'une conduite réelle.

Pour les poids-lourds, des cycles réels, comme le WHTC, le ETC ou le NRTC remplacent aussi petit à petit les cycles à paliers (ou à modes) utilisés pour les premières phases de réglementation. Ces cycles transitoires ont d'abord été facultatifs : ainsi, le cycle transitoire européen ETC, représentatif d'une conduite en milieu urbain, a d'abord servi à obtenir le label « EEV » (Enhanced Environmentally friendly Vehicle). Son principe a été défini dès 1999 et l'obtention du label EEV est la preuve de l'attention portée par le constructeur à la problématique de l'environnement et de la qualité de l'air en milieu urbain. Ce label a connu un essor important au moment de la mise en place de la réglementation Euro 4 en 2008 et surtout Euro 5 en 2011.

Le cycle WHTC est aussi un cycle transitoire basé sur un cycle de conduite d'un poids lourds commercial en usage réel. Il permet de tester des régions de la cartographie du moteur qui correspondent à des régimes et couples plus faibles que le cycle transitoire européen ETC. C'est sur ce cycle que sont basées les nouvelles VLE pour les poids lourds. Contrairement au cycle ETC, le cycle WHTC intègre aussi un mesurage des émissions à froid.

Cependant la prise en compte de ces émissions à froid n'est pas harmonisée entre les réglementations européennes et américaines. Ce cycle correspond aux 1800 consignes de couple et de régime moteur nécessaires à faire l'essai qui dure 1800 secondes.

Il se décline aussi en WHVC (World Harmonized Vehicle Cycle), c'est-à-dire, en série de consignes de vitesse permettant d'exécuter un essai sur un châssis dynamométrique. L'essai sur un châssis dynamométrique permet d'exprimer les émissions polluantes en g/km, alors que l'essai moteur conduit à un diagnostic exprimé en g/kWh.

Les moteurs équipant les engins mobiles non routiers forment une famille de moteurs diesel lourds, dont les applications et l'usage peuvent être très variés. Ainsi, il n'est pas rare de trouver des références de moteurs de type « marine » sur des engins de récolte de betterave... De plus, la distance parcourue n'est pas le meilleur indicateur du service rendu par ces engins, dont la vocation n'est pas de faire du transport, mais plutôt, de déplacer un procédé d'un chantier à l'autre. Un diagnostic basé sur des g/km n'aurait donc que peu de sens par rapport à l'usage de ces engins, dont le transport ne constitue que 10 % de l'activité. [1]. L'adhérence sur le sol meuble et les pneumatiques particuliers qui équipent ces engins rendent aussi l'essai sur châssis dynamométrique très difficile. En outre, la diversité des transmissions, châssis et utilisation font que les moteurs des engins mobiles non routiers sont toujours testés par famille sur des bancs moteurs. Comme les moteurs de poids-lourds, les émissions polluantes sont exprimées en g/kWh.

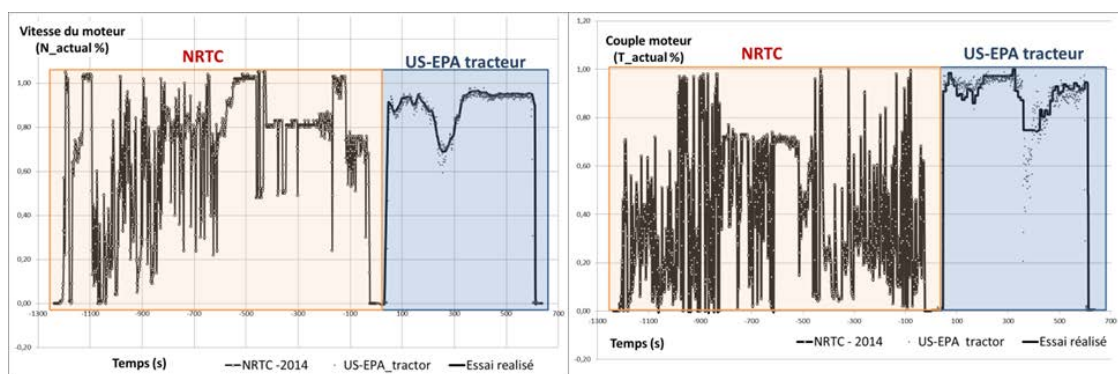


Figure 33 : Cycles transitoires pour des mesurages de pollution des engins non routiers : vitesse du moteur à droite et couple du moteur à gauche - pour le cycle de l'US-EPA, les symboles représentent le cycle tel qu'il est défini par l'US-EPA, et la courbe représente l'essai réalisé dans le projet

La polyvalence des usages auxquels sont destinés ces moteurs diesel lourds rend la question de la représentativité de l'essai plus difficile à traiter que pour les véhicules routiers. Comme pour les poids-lourds, les cycles d'essai pour le contrôle des émissions polluantes des engins non routiers ont d'abord consisté en des essais réalisés sur le moteur autour de modes de fonctionnement stabilisés (cycle NRSC). Progressivement et en parallèle à la démarche mise en place pour les voitures, des cycles transitoires spécifiques sont proposés pour les engins non routiers. Par exemple, il existe le cycle NRTC et les cycles orientés vers des applicatifs de l'US-EPA. Le cycle NRTC est apparu dès 2004 dans les directives européennes. Auparavant, l'US-EPA utilisait des cycles non routiers pour 2 applicatifs : les tracteurs agricoles et les excavateurs. Les consignes de vitesse de moteur et de couple pour les 2 cycles US-EPA-tracteurs et NRTC sont représentés sur la Figure 33. On remarque que ces deux cycles sont très différents à la fois par la forme du cycle d'essai et les conditions de fonctionnement qui sont testées. La comparaison de ces 2 cycles d'essai permet de nourrir une réflexion quant à la représentativité de ces essais pour les engins agricoles. On propose une analyse plus détaillée de ces différences en s'intéressant dans un premier temps au choix des points balayés et dans un second temps à l'organisation de ces points au cours du temps.

3.1.3.2 CHOIX DES POINTS BALAYÉS

Le choix des points balayés est résumé par les valeurs de régime et de couple moyen sur l'ensemble des cycles, dont les valeurs sont reportées dans le Tableau 37. Le régime moyen sur le cycle NRTC est un peu plus faible que sur l'US-EPA tracteur, mais c'est surtout pour le couple que les différences sont très nettes, avec un couple moyen testé beaucoup plus faible pour le NRTC et une puissance demandée au moteur faible par rapport au cycle américain.

Tableau 37 : Valeur moyenne (et écart-type entre parenthèses) des points de fonctionnements testés au cours des cycles d'essai d'engins non routiers

	NRTC	US-EPA	NRSC	Tracteur (100 heures)	Engins de récolte (3 moteurs, 580 heures)
Régime (%)	0.68	0.79	0.68	0.37	0.51
Couple (%)	0.39	0.79	0.49	0.43 ¹	0.56 ¹
Puissance ² (kW)	78	168	95	-	-

à gauche, valeurs observées sur des engins en fonctionnement

– (1) Couple à l'arbre moteur fourni par le CAN-SAEJ1939

– (2) La puissance est calculée uniquement à des fins de comparaisons avec l'hypothèse que

$$N_{reel} = 1400 \frac{tr}{min} * N_{actual,\%} + 800 \text{ et } T_{reel} = 1000 \text{ Nm} * T_{actual,\%}, \text{ soit une machine dont la puissance nominale serait d'environ 180 kW}$$

Ces valeurs sont comparées à des valeurs mesurées sur des engins en activité (voir le protocole expérimental dans [2] pour le tracteur). Le cycle d'essai propos » par l'US-EPA correspond à une séquence de travail réel telle que nous en avons observée, mais elle porte sur une seule activité du tracteur, vraisemblablement un travail lourd. Les régimes et couples correspondant sont élevés par rapport à l'activité réelle d'une machine observée sur un très grand nombre d'heure, comme c'est le cas des tracteurs ou des récolteuses pour lesquelles nous avons rapporté des mesures. La représentativité annuelle du cycle US-EPA est donc faible car elle prend mal en compte la polyvalence des usages pour les tracteurs.

Avec un couple moyen plus faible, le cycle NRTC semble mieux représenter l'activité générale de ces engins. Pour le régime moteur, les valeurs restent plus élevées que le recueil de terrain : sur ces engins lourds, le constructeur privilégie souvent un fonctionnement autour du couple maximal, qui se positionne à des régimes intermédiaires, voir bas. Les dispositifs de régulation électronique (régulation des vitesses d'avancement de la machine, commande hydraulique du rapport de transmission, gestion des régimes de prise de force économiques...) conçus pour travailler autour de ces régimes. Aussi, les régimes de rotation du moteur sont généralement très en dessous des régimes de rotation maximaux. Les représentations cartographiques des enregistrements de terrain montrent bien que le moteur est souvent sollicité dans les régions de charges et de régimes partiels (voir représentation cartographique en annexe E).

Lors de la mise au point du nouveau cycle WHTC, la représentation de ces points à charge partielle a fait l'objet d'une attention soutenue : ce nouveau cycle opère à des charges et régimes plus bas que les cycles ETC-poids lourds et NRTC-non routiers. Cette évolution va bien dans le sens des observations faites sur des engins en usage réel. Cependant, pour le WHTC comme pour le NRTC, si les zones de balayages cartographiques correspondent mieux aux observations de terrain, la dynamique des consignes semble peu représentative d'une séquence de travail.

3.1.3.3 DYNAMIQUE DU CYCLE

La dynamique du cycle correspond à l'organisation des points au cours du temps. Les courbes (Figure 33) opposent un cycle de l'US-EPA, structuré autour de plateau sur lesquels couples et régimes sont relativement stables, et un cycle NRTC dont les consignes balayent plus amplement la cartographie à travers des successions de montée/descente de régimes et couples.

Ce fonctionnement fortement instationnaire, voir intermittent, correspond mal aux observations de terrain. On reporte sur la Figure 34 un enregistrement du fonctionnement du moteur pendant une opération agricole typique. Pendant les 500 premières secondes, on observe effectivement des intermittences importantes du couple et plus modérée pour le régime. Cette partie de la séquence correspond au déplacement de l'engin de l'exploitation à la parcelle. Ensuite, après une période de ralenti, on observe une succession de plateaux sur lesquels le régime et le couple sont relativement stables. Ceux-ci sont séparés par des interruptions régulières qui correspondent souvent aux manœuvres en bout de champs ou à un repositionnement dans la parcelle.

On retrouve ici une activité structurée analogue à celle du cycle de l'US-EPA. Ce motif de fonctionnement s'observe sur la plupart des engins agricoles et pour la plupart de leurs activités.

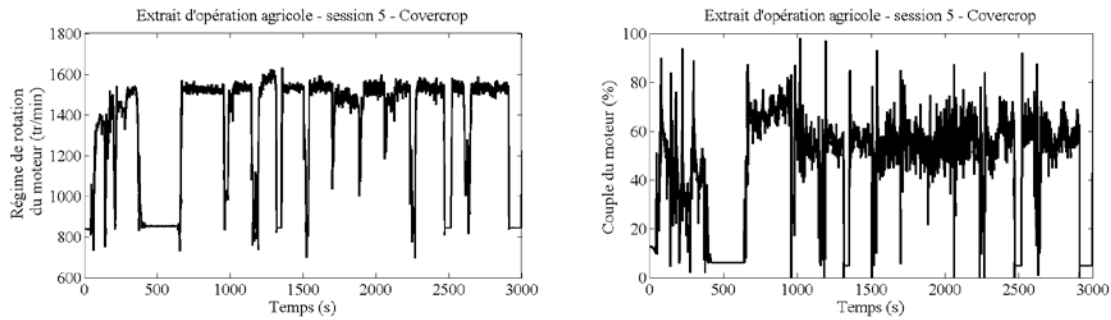


Figure 34 : Evolution des régimes (à droite) et du couple (à gauche) d'un moteur d'engin agricole pendant une opération agricole

Ce motif de fonctionnement produit des distributions de régime et couple qui ne correspondent pas à une loi uniforme et sont de ce fait très mal caractérisés par sa moyenne et son écart-type. Sur la Figure 35, on présente les distributions correspondant à une opération menée par un tracteur avec un cover-crop. Sur les deux variables du moteur, on observe un pic qui correspond en fait à la situation de travail dans la parcelle. Un second pic de moindre intensité correspond au fonctionnement au ralenti du moteur. La moyenne de ces deux gaussiennes se trouve dans une zone intermédiaire dans laquelle le moteur n'exerce que peu de temps son activité. En effet, les points de fonctionnement intermédiaires sont très peu représentés dans la distribution. Les distributions sont identiques pour d'autres types d'engins agricoles (voir en annexe E).

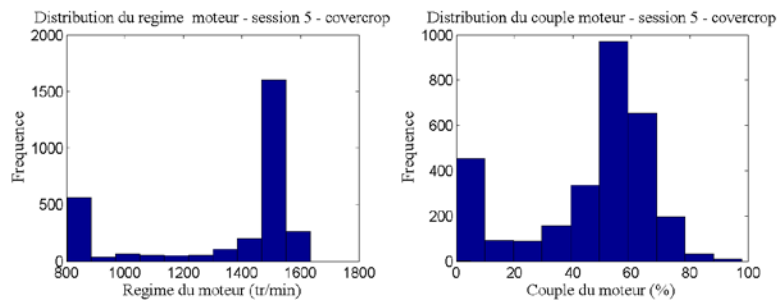


Figure 35 : Distribution des régimes et couples moteur observés sur une séquence de conduite réelle

Si on agrège toutes les opérations, la distribution résultante s'étale du fait de la superposition de différentes gaussiennes correspondant à chacune des activités d'un tracteur (voir Figure 36). Pour tous les cycles d'essai, la proportion des points de ralenti est moins forte que celle observée sur le terrain. Avec cette représentation, il est facile d'identifier la sur-représentation des valeurs de régimes et de couples très élevés du cycle de l'US-EPA.

Les valeurs de régimes élevés sont aussi sur-représentées avec le cycle NRTC. On retrouve ici une constatation qui a été faite pour les poids-lourds [3] : la gamme des régimes les plus fréquents en utilisation réel était très en dessous des régimes testés lors des essais réglementaires : cette constatation a conduit à remplacer les cycles ESC et ETC par les cycles WHTC et WHSC pour les véhicules utilitaires lourds. La même démarche mériterait d'être appliquée aux engins non routiers.

L'effectif des points à très bas couple (15 à 30%) est aussi sur-représenté dans le NRTC par rapport à notre exemple de tracteur. Ces points à bas couple correspondent à des séquences de transport pendant laquelle la puissance à fournir est faible pour entretenir le déplacement. On en observe assez peu dans l'utilisation des moteurs lourds.

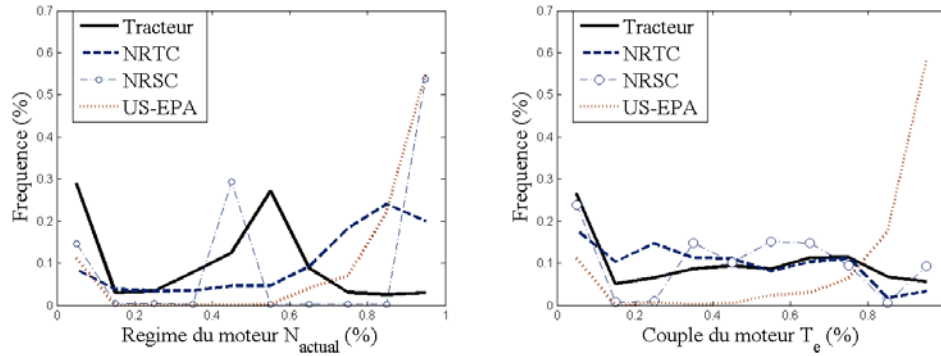


Figure 36 : Distribution résultante des régimes du moteur (à droite) et du couple du moteur (à gauche) pour l'activité annuelle d'un tracteur

Le cumul des activités (ou le cumul des choix de réglages des moteurs, voir distribution en annexe E) étale les distributions des points de fonctionnement et justifie un ample balayage de la cartographie du moteur. Cependant, on ne retrouve pas beaucoup dans la séquence d'essai la structure en paliers stables caractéristique du fonctionnement de moteurs non routiers. On propose d'apprécier la stabilité des consignes en évaluant les dérivés respectives du couple et du régime, qui représente des accélérations et des variations de charge :

Équation 2

$$\left| \frac{\partial N}{\partial t} \right|_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad \text{et} \quad \left| \frac{\partial T}{\partial t} \right|_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

Les dérivés permettent de faire la même analyse que celle qui est faite pour les véhicules routiers avec l'accélération. On exprime les dérivées « régime » et « couple » de façon indépendante. Les valeurs de ces dérivées suivent pour toutes les données chronologiques (cycles et expérimentations de terrain) une loi gaussienne centrée sur zéro. Ce centrage traduit le fait qu'une décélération suit toujours une accélération et qu'on revient en moyenne à un même point de départ. L'écart à la moyenne, ou plus précisément, l'écart-type, caractérise l'amplitude des accélérations et décélérations pendant les phases de conduite. L'écart-type permet d'apprécier la régularité du régime et du couple. Ces écart-types sont calculés pour les différents cycles d'essai proposés dans les réglementations ainsi que pour les observations de terrain dont nous disposons (voir Tableau 38).

Tableau 38 : Ecart-type des dérivées de régimes et de couples de moteur sur des séquences d'essai ou de conduite réelle

	NRTC	US-EPA	NRSC	Tracteur	Récolteuse
$\sigma_{\partial N / \partial t}$ (10^{-2} pourcent /s)	10.6	3.4	0.6	3.3	2.1
$\sigma_{\partial T / \partial t}$ (10^{-2} pourcent /s)	16.5	6.3	0.7	10.4	5.6

L'écart-type des dérivées est très faible pour le cycle statique NRSC et vaut 5 à 10 fois moins que des valeurs de terrain. Ce résultat reflète bien l'écart de représentativité de ce cycle par rapport à la conduite réelle. En usage, l'écart-type de la dérivée du régime $\sigma_{\partial N / \partial t}$ est compris entre 2 et 3 10^{-2} pourcent par seconde et l'écart-type de la dérivée du couple $\sigma_{\partial T / \partial t}$ varie entre 5. 10^{-2} et 10. 10^{-2} pourcent par seconde. Pour le cycle de l'US-EPA, on trouve des valeurs d'écart-type dans la gamme des valeurs de terrain. Le réalisme de cette conduite est ainsi mis en évidence. Les fluctuations de régimes et couples du cycle NRTC sont 2 à 3 fois supérieures à celles relevées sur le terrain et montre la sévérité de ce cycle.

Les conséquences de cette sévérité sur les émissions et la consommation sont difficiles à estimer : il est vraisemblable que ces sollicitations heurtées produisent des effets similaires à ceux observés pour les cycles urbains de type « stop and go » par rapport à ceux correspondant à une conduite fluide.

L'effet des intermittences s'apprécie en observant des mesures rapportées par [7] qui a testé différents types de cycles sur un moteur de poids-lourds : les résultats sont reproduits sur la Figure 37. Les essais en dynamique conduisent le plus souvent à des facteurs d'émission qui sont plus élevés que dans les essais statiques de référence. C'est surtout pour les polluants émis lorsqu'une bonne combustion ne peut pas s'établir qu'on trouve des différences marquées : l'effet est donc très sensible pour le facteur d'émission de CO, qui augmente de 20 000 % sur les cycles transitoires. Le facteur d'émission de COVT croît de près de 400 % sur les cycles transitoires. Les écarts sont beaucoup plus modérés pour les émissions de NOx qui n'augmentent que de 10% sur les essais dynamiques. Pour ce polluant, l'effet du cycle et le choix des points balayés est aussi important que la nature statique ou transitoire de l'essai. Ainsi, le cycle NRTC qui privilégie les régimes forts et les charges fortes correspond à un facteur d'émission presque 2 fois plus élevé que les cycles WHTC et ETC. On retrouve ce même rapport en comparant le cycle statique NRSC aux cycles statiques WHSC et ESC. Pour les particules, il est impossible de donner une tendance sur l'effet des essais transitoires par rapport aux essais statiques. On supposera dans la suite que ce paramètre est neutre. Malheureusement, nous n'avons pas trouvé d'éléments pour indiquer les effets des cycles transitoires sur les consommations de carburant : c'est pourtant sur la consommation que se focalisent maintenant les travaux liés aux comportements de conduite et aux effets instationnaires.

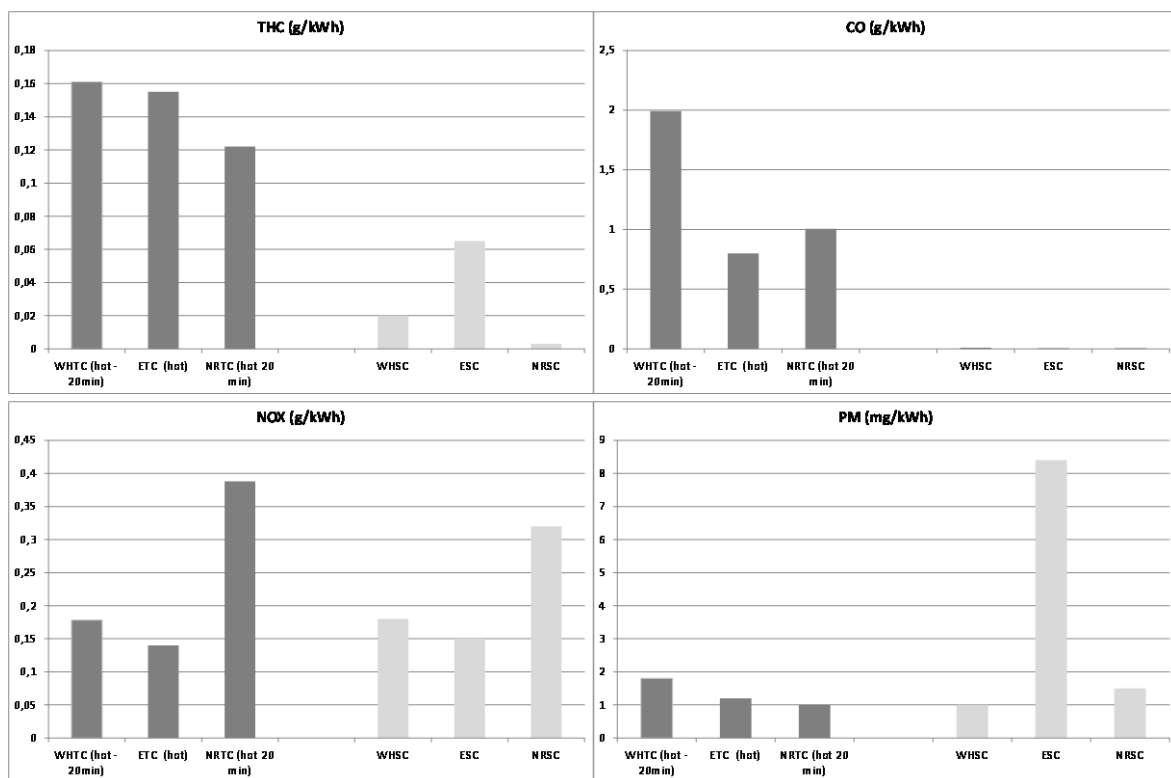


Figure 37 : Mesures d'émissions polluantes d'un moteur de poids-lourds sur différents cycles de conduites, dynamiques en foncé à gauche et statiques en clair à droite – d'après [7]

En même temps que les VLE ont diminué, des évolutions des cycles de conduite ont été proposées pour améliorer la représentativité de la méthode d'essai et du facteur d'émission mesuré lors de l'homologation des moteurs. Ces évolutions ont porté sur l'abaissement des régimes du moteur pour les essais relatifs aux poids-lourds. Nous avons montré qu'un tel changement pourrait s'appliquer aussi aux engins non routiers, pour lesquels les relevés de terrain indiquent que les régimes de rotation du moteur en usage sont inférieurs aux cycles réglementaires.

Les autres changements concernent la mise en place d'essais transitoires, pénalisant sur les facteurs d'émissions associés aux polluants CO et COVT. Nous avons vu que le cycle NRTC correspond à une dynamique plus sévère que l'usage moyen qui est fait des moteurs diesel dans les applications agricoles. L'effet de ces transitoires sur la consommation n'a pas pu être apprécié. Une évolution importante des méthodes d'essai concerne également la mise en place des mesurages d'émission à froid.

3.1.3.4 EMISSIONS À FROID

Les réglementations prennent en compte les émissions à froid des moteurs : à froid, les émissions sont beaucoup plus importantes dans les gaz d'échappement parce que les systèmes de dépollution ne sont pas fonctionnels. Leur mise en route dépend en général de conditions de température dans les gaz qui n'apparaissent que 6 à 13 min après le démarrage d'un moteur complètement froid ([4],[5],[7]). Dans la réglementation européenne, la part des émissions à froid se détermine à partir d'un essai transitoire réalisé sur un moteur froid, puis suit le même essai réalisé moteur chaud : l'émission totale se déduit de la somme pondérée de ces 2 essais, la pondération du cycle à froid étant de 10% pour la norme européenne.

Équation 3

$$E_t = 0.1 * E_{froid} + 0.9 * E_{chaud}$$

Les engins non routiers étant des engins de travail, leur utilisation est associée à des journées de travail sur un chantier d'opération. Aussi, les durées de fonctionnement du moteur sont assez longues et correspondent à un temps de travail. On se propose d'évaluer la part à froid à partir des connaissances recueillies à travers différents projets portant sur l'usage des machines agricoles.

A partir des durées de chantier enregistrées pendant le projet Efficient20 ([9]), sur un tracteur instrumenté [10] et sur des engins de récolte, on s'est proposé d'estimer la part du temps pendant effectuée à froid. Pour cela, suivant les observations de Rickert[7], on suppose que la durée pendant laquelle le moteur est froid est de 13 min. Pour les petits chantiers (inférieurs à 4 heures), il n'y a qu'un démarrage à froid par chantier. On étend cette hypothèse à tous les chantiers. On estime la part à froid en faisant le rapport entre la durée à froid par chantier et le nombre d'heures moyen d'un chantier. Ainsi, on estime que la part à froid pour ces engins varie de 3% pour une utilisation intensive à 10% pour une utilisation modérée (voir Tableau 39). La valeur réglementaire du facteur de pondération correspond donc au cas le plus défavorable de nos estimations. La valeur réglementaire américaine (5% à froid) est sans doute plus proche de l'utilisation moyenne reconstituée.

Tableau 39 : Estimation des parts à froid dans le temps d'utilisation des engins agricoles

	Efficient20 [9]	Tracteur instrumenté [10]	Engins de récolte instrumentés
Nombre d'heure par an	530	330	600
Nombre d'heure par chantier	5	2,5	7,5
Nombre de chantiers par an	133	132	80
Durée à froid par chantier (min)	13	13	13
Part du temps à froid (%)	0,04	0,09	0,03

En gras, figurent les valeurs extraites des références et en normal, les valeurs estimées

Mais d'autres effets que la taille du chantier peuvent aussi conduire à une augmentation de la part à froid. Les pauses intra-chantiers peuvent aussi augmenter la proportion du fonctionnement à froid.

Pour des engins agricoles spécialisés par exemple, les durées de chantiers sont parfois très longues (> 6 heures), mais on sait qu'il y a des arrêts du moteur pendant le chantier : ceux-ci correspondent à la pause méridienne et durent entre 20 et 50 minutes.

Leur influence n'a pas été prise en compte dans le calcul, car la durée de l'arrêt n'est pas suffisante pour un refroidissement complet du moteur : on ne sait pas bien définir le taux de froid pour un arrêt de ce type. Enfin, les longues périodes de ralenti peuvent aussi nuire aux émissions polluantes des moteurs récents, car les systèmes de post-traitement des gaz d'échappement peuvent se désamorcer lorsque les sollicitations du moteur sont trop faibles et que les températures d'échappement s'abaissent. Or, les périodes de ralenti s'observent très fréquemment dans l'usage des engins non routiers : ces périodes correspondent à des périodes de pause, de réglages ou d'attentes liées à l'organisation du chantier. On a d'ailleurs vu, dans le paragraphe précédent, sur les distributions des points de fonctionnement du moteur, que le ralenti constitue le second mode représentatif de la conduite des engins agricoles à l'échelle du chantier. Ces longs arrêts sont susceptibles d'augmenter la part « à froid » des émissions de la même façon que la durée d'arrêt avant un trajet influence les surémissions à froid pour les voitures [11]. Néanmoins, les valeurs de surémissions à froid sont généralement équivalentes ou moindre pour les moteurs diesel que pour les moteurs à essence. Elles diminuent aussi avec les évolutions technologiques[12]. On peut donc penser que si la part à froid des engins non routiers est surestimée, les conséquences de cette surestimation dans le bilan sont sans doute modérées.

L'analyse documentée des cycles de conduites pour les véhicules non routiers montre ainsi que les nouveaux cycles de conduite réglementaires sont plus, mais toujours peu, représentatifs des conditions de fonctionnement des machines agricoles. Le balayage plus ample de la cartographie du moteur constitue une amélioration de la représentation des usages réels. Mais la sévérité du cycle, mise en évidence par les valeurs des dérivées de régime et de couple, correspond à une conduite typique de transport. Elle reflète assez peu le fonctionnement stable des moteurs agricoles au cours des travaux au champ.

Pour ce projet, nous avons conservé l'approche par point de fonctionnement pour la mesure des émissions polluantes, c'est-à-dire, des cycles paliers. Le fait d'isoler chaque point de fonctionnement dans un prélèvement permet plus facilement de mettre en relation des valeurs d'émissions et des usages. Les durées des cycles d'essai sont relativement longues car elles sont dictées par la nécessité de collecter suffisamment de matières pour les analyses quantitatives.

A ces cycles, nous proposons deux séries de cycles supplémentaires : la première série concerne les émissions à froid. Nous comparerons les valeurs d'émissions à chaud et à froid sur un cycle représentatif de l'usage d'un moteur agricole. La seconde série vise à documenter les questions de sévérité de l'usage : on se propose d'étudier les effets de changements de points de fonctionnement en utilisant des cycles oscillants périodiquement entre 2 points de fonctionnement. Les détails des cycles retenus et les résultats de ces essais sont donnés dans le paragraphe suivant, où on présente la campagne d'essai menée sur les bancs dynamométriques d'essais tracteurs.

3.2 CAMPAGNE DE MESURAGES DES ÉMISSIONS SUR BANC D'ESSAI (IRSTEA/INERIS)

Les réglementations des émissions à l'échappement évoluent pour les moteurs Diesel des engins non routiers : les limites d'émission autorisées diminuent et on souhaite documenter cette évolution par des mesures sur des tracteurs récents et obtenir des informations détaillées sur la composition de ces émissions.

Une campagne de mesurages des émissions polluantes sur banc d'essai de tracteur a été réalisée par l'INERIS en partenariat avec l'IRSTEA dans les locaux de l'IRSTEA. Un banc d'essai tracteur permet de tester un tracteur complet en utilisant sa prise de force pour charger son moteur. Intermédiaire entre l'essai moteur et l'essai sur châssis dynamométrique, le banc d'essai permet de reproduire les conditions de fonctionnement du moteur du véhicule et de ses accessoires et de mesurer les concentrations en polluants dans les gaz d'échappement. Le test sur banc tracteur nous place dans un cadre différent de l'essai réglementaire pour l'homologation du moteur et les résultats présentés ici ne s'apparentent pas à un contrôle de pollution des véhicules testés.

Cette campagne a consisté, en plus des mesurages des polluants réglementaires gazeux, en une caractérisation de la granulométrie en masse et en nombre et une caractérisation chimique détaillée des composés organiques des effluents.

Dans ce paragraphe, les mesurages effectués au cours des campagnes sur banc d'essai, sont détaillés. On précise d'abord les caractéristiques techniques des tracteurs testés au cours de cette campagne. Le matériel d'essai utilisé avec en premier lieu le banc d'essai, est décrit, les méthodes de caractérisation des émissions atmosphériques sont fournies en annexe B.

3.2.1 TRACTEURS TESTÉS

Deux tracteurs ont été utilisés pour la campagne de mesure sur banc d'essais.

Le premier tracteur respecte la réglementation en vigueur au moment des essais (Etape 3B, notée dans ce qui suit Tier 3b). Nous avons donc opté pour un tracteur de série New Holland T7 220 immatriculé en 2012 soumis à la réglementation phase 3B. Ce tracteur (voir Figure 38) est un tracteur de location (452 heures d'utilisation). Il est équipé d'un moteur dont le loueur nous a assuré de la puissance 151 kW. Dans les faits, le tracteur est équipé d'un moteur de 124 kW au sens de la réglementation pollution. Mais ce moteur peut délivrer une puissance additionnelle de plus de 30 kW qui le positionne commercialement dans la catégorie des plus de 130 kW. Nous avons constaté à réception du tracteur qu'il n'était pas officiellement dans la catégorie de puissance initialement souhaitée (plus de 130 kW). Cependant, il correspondait bien à la réglementation de pollution souhaitée pour le projet (Tier 3b) et il appartient à la catégorie de puissance la plus courante en France. Pour respecter les VLE qui se durcissent aux fils des étapes, le New Holland T7 220 est équipé d'un **filtre à particules** et d'un **système SCR** (Selective Catalytic Reduction) pour réduire les particules et les NOx en sortie d'échappement. Le SCR est un système qui consiste à injecter un agent réducteur, l'urée, en fin de ligne d'échappement. La quantité d'urée utilisée lors des essais a été suivie, mais la précision des mesures ne permet pas d'estimer la quantité par essai. A partir du rapport d'essai officiel, de la notice technique fournie avec le tracteur et des caractéristiques gravées sur la plaque du moteur, on élabore la fiche technique du tracteur testé et de son moteur, de la notice technique fournie avec le tracteur et des caractéristiques gravées sur la plaque du moteur, on élabore la fiche technique du tracteur testé et de son moteur



Figure 38 : Tracteur New Holland T7.220 Tier3b testé au cours de la première campagne d'essai

A la dépose du projet, il était prévu de tester un tracteur Tier4 pour documenter les évolutions des émissions polluantes : la réglementation Tier4 est entrée en vigueur en janvier 2014 pour la catégorie de moteur 130-560 kW. Nous avons pris contact avec deux constructeurs qui n'ont pas souhaité mettre à disposition un tracteur correspondant à cette réglementation.

Il n'a pas été possible de trouver un tracteur en location satisfaisant ce critère ; tous les tracteurs disponibles à la location avaient été immatriculés par le concessionnaire en 2013 et donc, sous le coup de la réglementation Tier3b. Aussi, le second tracteur testé dans ce projet répond à la réglementation Tier3a, de façon à déterminer une évolution des facteurs d'émission au cours des réglementations.

Le deuxième tracteur est un Massey-Ferguson de 105 kW, immatriculé en 2009, mis à disposition de Irstea par la société AGCO. Avec 3200 heures au compteur, le nombre d'heure de fonctionnement est plus important que le précédent. A partir du rapport d'essai officiel du tracteur (numéro d'approbation OCDE 2/2 607), de la notice technique fournie avec le tracteur et des caractéristiques gravées sur la plaque du moteur, on élabore la fiche technique du tracteur testé et de son moteur. Ce tracteur Massey Ferguson utilisé pendant les essais sur banc et l'expérimentation de terrain est au départ un tracteur MF6480. Le tracteur est équipé d'un moteur PERKINS - 1106D-E66TA diesel 4 temps à injection directe et turbocompressé. Néanmoins, le calculateur du moteur installé sur ce tracteur correspond au modèle « MF 6475 » : ce modèle délivre une puissance inférieure au modèle « MF6480 ». Après contrôle, la puissance délivrée par notre tracteur ainsi que les réglages du moteur correspondent au modèle 6475 et sont spécifiés ci-dessous.

Tableau 40 : Données relatives aux tracteurs testés au cours de la campagne de mesurages des émissions sur banc d'essais

Marque MASSEY FERGUSON	Marque NEW HOLLAND
Type 6475	Type T7.220 AutoCommand
Puissance annoncée 142 CV (105 kW)	Puissance annoncée 170 CV (124 kW)
Norme de mesure de puissance utilisée ISO TR14396	Norme de mesure de puissance utilisée ECE R120
Conditions de puissance additionnelle (pdf, vitesse d'avancement) Pdf ou hydraulique ou gamme 3/4 (dès 6 km/h)	Conditions de puissance additionnelle (pdf, vitesse d'avancement) Transport ou PDF ou hydraulique
Valeur de la puissance additionnelle 20 ch	Valeur de la puissance additionnelle EPM + 45 ch
Rapport vitesse moteur / vitesse à la prise de force 2.03	Rapport vitesse moteur / vitesse à la prise de force 1.92
Marque du moteur PERKINS 1106D-E66TA (3390/2200)	Marque du moteur FPT
Type du moteur Diesel, 4 temps, injection directe turbocompressé	Type du moteur NEF
Nombre de cylindres 6	Nombre de cylindres 6
Cylindrée 6600 cm ³	Cylindrée 6728 cm ³
Type d'alimentation du moteur Turbo Intercooler turbocompresseur	Type d'alimentation du moteur Turbo Wastegate Intercooler
Régulation injection Régulation électronique	Régulation injection Régulation électronique
Pompe d'injection Common rail Bosch	Pompe d'injection Common rail Bosch
Régime nominal 2200 tr/min	Régime nominal 2200 tr/min
Couple maximal à la prise de force 580 Nm	Couple maximal à la prise de force obtenu: 772 Nm (réglé à 753 Nm)
Régime du couple maxi 1400 tr/min	Régime du couple maxi 1500 tr/min

3.2.2 INSTRUMENTATION MISE EN ŒUVRE

3.2.2.1 BANC D'ESSAI IRSTEA À LA PRISE DE FORCE

Irstea possède plusieurs bancs d'essais moteurs permettant de mesurer les performances de moteurs dont la puissance s'échelonne de 1 à 600 kW. La disposition des cellules d'essai a été étudiée de façon à permettre d'effectuer des mesurages de puissance soit directement à l'arbre du moteur, soit en sortie de transmission (prise de force des tracteurs agricoles). Les mesurages sont effectués suivant des protocoles préétablis (ISO, OCDE, CEE...) ou suivant des protocoles d'essai spécifiques. Des mesurages de températures, de pressions, de consommation de carburant (volumétriques et massiques) accompagnent ces mesurages de puissance. Un système informatique de pilotage et d'acquisition permet de mettre en œuvre automatiquement certains protocoles d'essais, d'enregistrer les résultats d'essais et de réaliser des tracés de courbes. Les bancs dynamométriques Schenck utilisés ici sont de type courant de Foucault.

Tableau 41 : Caractéristiques des bancs d'essais de tracteur de l'Irstea

Frein	W400	W780
Puissance maximale absorbée à 540 tr/min	90 kW	240 kW
Puissance maximale absorbée à 1000 tr/min	180 kW	450 kW
Puissance maximale absorbée à 3000 tr/min	350 kW	600 kW
Puissance maximale absorbée au régime maxi	350 kW à 5000 tr/min	600 kW à 3500 tr/min
Type de mesurage de consommation de carburant	Volumétrique	Volumétrique et massique

Chaque tracteur est équipé d'une prise de force ou PDF. Cet organe, situé à l'arrière du tracteur, permet de transmettre une énergie mécanique aux outils agricoles lors de travaux. Dans notre cas, la PDF sert à raccorder le frein dynamométrique au moteur du tracteur. Ainsi, le moteur transmet sa puissance du moteur au frein La prise de force n'est pas directement reliée à la sortie du moteur : il y a un rapport de transmission entre les deux organes mécaniques. Ce rapport est spécifique à chaque tracteur : pour le T7.220 il est de 1,92 et est de 2,03 pour le MF 6475. En effet, les mesures de couple et de régime s'effectuent au niveau de la prise de force et ce rapport est à prendre en compte pour définir des cycles exprimés en « régime prise de force » et « couple prise de force. Le fait de procéder aux essais sur un banc d'essai de tracteur nous différencie des essais d'homologation du moteur. Dans notre cas, tous les accessoires du moteur sont raccordés. La climatisation est cependant éteinte et on utilise la commande permettant d'interdire toute régénération du filtre à particule pendant les essais.

Un actionneur est installé sur le tracteur permettant de contrôler l'accélérateur du moteur depuis la centrale de pilotage et d'acquisition pour la réalisation des cycles d'essais. C'est à cet actionneur – et au frein - que sont transmises les consignes de couple à la prise de force et régimes moteur propre à un cycle d'essai. L'utilisation courante du banc se fait avec des cycles d'essai à points stabilisés. Pour les besoins du projet, nous avons modifié l'interface d'acquisition et les réglages du frein de façon à pouvoir tester des cycles dynamiques : augmentation des tolérances d'essai, modification des caractéristiques PID de régulation, suppression des intégrations des mesures sur 5 secondes et mesure de la consommation par méthode fréquentielle.

Malgré ces modifications, le banc d'essai utilisé reste un banc d'essai statique : les commandes et appareils de mesure ne permettent pas de travailler avec une fréquence supérieure à 1 Hz, contrairement à ce qui est requis pour les essais d'homologation. De plus, tous les cycles dynamiques ne sont pas réalisables. Nous sommes arrivés à reproduire facilement des dynamiques réelles enregistrées sur le tracteur MF6475 pendant des essais sur parcelle.

La réalisation de séquence de transport enregistrée sur le même tracteur s'avère plus problématique et s'accompagne souvent de calage moteur. De même, lorsqu'on utilise un cycle dynamique sévère comme le cycle réglementaire, nous nous sommes systématiquement heurtés à des calages des tracteurs testés. C'est pourquoi, seuls des cycles de travail agricole ont été utilisés. Ils ont dû être adoucis, c'est-à-dire que les montées en charge et décélération ont été amorties par un lissage (moyenne mobile de la consigne sur 5 points). Ainsi, le moteur ne subit pas trop de heurts en court d'essai et on évite tout risque de calage y compris sur cycle froid.

3.2.2.2 RÉCUPÉRATION ET DÉCODAGE DES DONNÉES DES RÉSEAUX EMBARQUÉS

L'introduction et la généralisation de bus multiplexés dans les véhicules routiers et non-routiers a permis d'augmenter les calculateurs et les capteurs à bord. Les engins actuels sont tous équipés de ces technologies de communication embarquées permettant l'échange et la connaissance de données à chaque instant. Les trames de données donnent accès à de nombreux paramètres du véhicule.

Sur les tracteurs agricoles, on retrouve en général 2 réseaux bus : le CANSAE-J1939, et le CAN ISOBUS. Ils sont accessibles directement sur la prise diagnostic du moteur (SAE-J1939) et la prise Isobus. Sur le terminal de bord, on peut également insérer une dérivation sur l'arrivée des informations et récupérer des informations d'un troisième réseau électronique : à cet endroit, la trame CAN (Controlled Area Network) est en général codée sous un format qui est propriété du constructeur :

- Le bus CAN gère l'électronique de gestion du moteur. Il permet ainsi d'avoir accès à la position de l'accélérateur, la consommation horaire instantanée, le couple et le régime moteur, la température d'air à l'admission, etc.
- Le bus ISOBUS s'occupe de la relation entre le tracteur et l'outil. Il permet, par ailleurs, de connaître les paramètres de fonctionnement du véhicule : vitesse réelle, position de l'attelage, vitesse de l'arbre prise de force (PDF), etc.
- Le bus Propriétaire est lui spécifique au tracteur utilisé. Il donne accès à certaines informations propres à certains organes du tracteur, par exemple gamme et rapport de vitesse engagé dans la transmission. Ce bus sert souvent à alimenter les ordinateurs de bord pour piloter la machine.

Pour ces trois réseaux, chacun des messages y circulant suit un formatage strict. En connaissant les règles de codages des informations, il est possible de récupérer les données. On dispose d'un appareil permettant de recueillir ces informations sur un enregistreur appelé Effibox qui se branche sur une prise diagnostic du tracteur. Il est possible d'enregistrer jusqu'à 3 réseaux CAN. Les données sont alors décodées selon la norme respective de chacun des bus pour extraire les informations recherchées. Le logiciel de décodage a été développé à Irstea. L'effibox nous permet ainsi de décoder les données du constructeur du tracteur Massey pour extraire certaines informations, comme le rapport de boîte engagé.

3.2.3 MÉTHODES ET TECHNIQUES MISES EN ŒUVRE POUR LA RÉALISATION DES ESSAIS TRACTEURS SUR LE BANC IRSTEA

3.2.3.1 TUBE DE PRÉLÈVEMENT ET DE MAINTIEN DES CONDITIONS D'ÉMISSION DE L'EFFLUENT TRACTEURS

Comme pour le cas des tronçonneuses, l'INERIS a conçu un tube de prélèvement permettant le maintien des conditions d'émission. Il est en effet essentiel d'éviter toute modification due à l'abaissement rapide de la température des effluents avant prélèvement. Ce tube consiste en un cylindre équipé d'une double enveloppe isolée à travers laquelle circule de l'air chaud à contre-courant permettant de maintenir la température de l'effluent (environ 190°C).

Les dimensions du tube ont été déterminées afin de respecter au mieux les conditions d'écoulement et pour permettre la réalisation des prélèvements dans des conditions s'approchant de celles prescrites par les normes en vigueur:

- Un diamètre (D) du tube de 13,5 cm a été choisi sur la base des informations sur les débits des tracteurs observés par l'IRSTEA lors de précédents essais et de façon à atteindre le meilleur compromis entre les contraintes d'ordre métrologique (vitesse d'écoulement suffisante, diamètre suffisant pour éviter des perturbations entre les points de prélèvement) et les contraintes d'ordre logistique (encombrement lié au tube). Les flux attendu étaient compris entre 0.04 (charge basse) de 0.3 kg/s (charge haute), ce qui correspond à une vitesse d'écoulement comprise entre 5 m/s et 20 m/s dans le tube;
- Une longueur de 225 cm visant à respecter les distances minimales entre les points d'émission situés en amont et en aval des points de prélèvement d'espèces particulières respectivement égales à 5 D (54 cm) et 3 D (40.5 cm). Les points de prélèvement de gaz ont pour leur part été espacés d'une distance minimale de 1 D.
- Il est équipé de plusieurs piquages pour les appareils de mesurages. En sortie, le tube de prélèvement est raccordé à un extracteur qui compense les pertes de charges induites par la ligne de prélèvement et évacue les fumées à l'extérieur des locaux d'essai.



Figure 39 : Gaine de prélèvement des gaz d'échappement

Des essais ont été réalisés de façon à vérifier que les performances du tracteur ne sont pas dégradées du fait de la présence de la ligne de prélèvement sur l'échappement. Les courbes enveloppes « avec » et « sans ligne » de prélèvement présentent effectivement des caractéristiques dans la tolérance admise pour les essais (5% du régime maximal et 10% du couple maximal).

3.2.3.2 MÉTHODES DE MESURAGE MISES EN ŒUVRE

Les méthodes de mesurage mises en œuvre par l'INERIS et l'IRSTEA sont brièvement mentionnées ci-dessous. Une description détaillée de ces méthodes est présentée en annexe B.

L'INERIS a réalisé:

- le mesurage des paramètres périphériques humidité, température
- le mesurage des gaz de combustion O_2 , CO , CO_2 , NOx ;
- le mesurage des émissions de particules totales TSP (phases solide et condensable),
- la détermination de la granulométrie en nombre et en masse de l'aérosol
- le mesurage des HAP en phases solide et gazeuse,
- le mesurage des COV totaux et des COV spécifiques

L'IRSTEA a réalisé le mesurage des gaz CO, CO₂, COVt, NO_x avec un analyseur embarqué afin de le calibrer avant la campagne de mesure de terrain ainsi que la détermination du débit en sortie du tube de maintien en température des émissions.

3.2.3.3 PROTOCOLE D'ESSAI ET DESCRIPTION DES CYCLES

Les essais sont réalisés avec un carburant gazole non routier. Pour les calculs, on utilise les ratios massiques d'une formulation standard de gazole à basse teneur en soufre ($w_c=86,33$, $w_h=0,1367$ et $w_n=0,14 \cdot 10^{-3}$, voir [14, 15]). Nous avons négligé l'apport d'oxygène qui pourrait être induit par l'incorporation de biodiesel dans l'ENR alors que les biodiesels peuvent avoir une composition massique assez différente de celle du diesel standard [1016.]. En effet, nous n'avons pas réalisé l'analyse des ratios massiques du carburant utilisé.

Les calculs sont effectués selon la méthode réglementaire, en utilisant la méthode du bilan carbone pour le calcul du débit de gaz d'échappement. Les concentrations sont toujours exprimées en conditions sèches. Les valeurs d'émissions massiques sont corrigées de l'humidité.

Pour les cycles instationnaires, les données provenant du banc d'essai sont resynchronisées avec les mesures enregistrées sur le réseau CAN (base de synchronisation : régimes du moteur). Pour cela, on fait varier le déphasage entre les séries. On calcule ensuite le coefficient de corrélation entre les séries $N_{\text{BANC}}[t](rpm)$ et $N_{\text{CAN}}[t \pm dt](rpm)$. Le déphasage proposé peut être une avance ($dt > 0$) ou un retard (dt négatif). La resynchronisation consiste à trouver le déphasage pour lequel la corrélation entre les séries est maximale. On procède de même avec les mesurages effectués avec l'analyseur de gaz en utilisant les séries $C_{\text{BANC}}(\frac{g}{h})$ et $E_{\text{CO}_2}(\%)$. La méthode permet ainsi de recalculer les séries en intégrant les déphasages temporels entre les différents appareils.

Les mesurages de vitesse de rotation et de couple se font au niveau de la prise de force et les valeurs sont à multiplier par 1,92 pour le tracteur New Holland et 2,03 pour le tracteur Massey pour obtenir les grandeurs à l'arbre moteur (rapport de vitesse entre l'arbre moteur et l'arbre à la prise de force). Toutes les valeurs de couple sont exprimées en couple équivalent à l'arbre moteur.

Les cycles d'essais réalisés pour le tracteur New Holland se décomposent en 2 séries :

- la première série, ou **série NRSC**, comprend des cycles statiques qui comprennent les 8 paliers du cycle à mode discrets NRSC. Les valeurs de couple et de régime correspondant aux mesurages faits pour ces 8 points. Ils figurent dans le Tableau 42.
- Pour chacun des cycles, on applique un cycle de préchauffe qui consiste à maintenir pendant un quart d'heure les consignes correspond au point à tester. Une fois la chauffe passée, on lance l'essai et les analyses de gaz sont déclenchées dès que la consigne atteint son palier.

La durée des prélèvements sur filtre est de 30 minutes. Pour les mesurages en continu, les résultats présentés sont la moyenne des enregistrements effectués pendant les 10 dernières minutes du palier. Chaque mesurage est répété 3 fois. La réalisation de 8 points est nécessaire pour le calcul du facteur d'émission.

- La seconde série ou **série EPA-soft** porte sur des essais de cycles instationnaires. Sur cette série, nous avons étudié les effets instationnaires et les effets de température de démarrage. Le banc de l'Irstea n'est pas à proprement parler un banc dynamique : la fréquence de commande et d'acquisition des mesures est trop basse pour satisfaire les exigences des dernières directives ([17], [18]) apparues au cours du projet. Le cycle de conduite utilisé pour ces essais est le cycle de tracteur proposé par l'US-EPA. Ce cycle a été adouci en moyennant les consignes sur 10 secondes afin d'éviter des « à-coup » conduisant à un calage systématique du moteur en cours d'essai. Le cycle lissé est représenté sur la Figure 33. Ce cycle a été utilisé pour des essais à chaud et à froid mais seuls les polluants gazeux réglementés ont fait l'objet d'un mesurage.

Tableau 42 : Descriptif des points caractéristiques testés pour les essais NRSC du tracteur New Holland

Appellation point	Régime de rotation du moteur (tr/min)	% de couple par rapport au couple maximum du régime	Couple mesuré (Nm)	Nombre de répétitions validées
1	2200	100	496	3
2	2200	75	425	2
3	2200	50	293	3
4	2200	10	142	3
5	1500	100	753	2
6	1500	75	598	1
7	1500	50	464	2
8	Ralenti (850)	0	-	2

Pour le tracteur Massey, nous avons également 2 séries de cycles :

- la première série, ou **série NRSC**, comprend les cycles statiques autour des 8 paliers du NRSC. Pour chacun de cycles, on applique les mêmes cycles de préchauffe que pour le tracteur New Holland. Pour le tracteur Massey, la durée des prélèvements sur filtre est de 45 minutes, ce qui représente 3 essais de 15 min chacun. Compte tenu de son faible intérêt – voir analyses intermédiaires), la répétition des cycles a été supprimée.
- La seconde série, ou **série RMC**, comporte trois cycles pseudo-instationnaires. Avec cette série, nous avons cherché à évaluer l'incidence des changements de régime et couple sur les émissions polluantes. Pour cela, nous avons proposé un cycle sur lequel on maintient un couple de freinage quasi-constant tandis que le régime moteur varie en alternance autour de 2 valeurs. Sur le second cycle, c'est le couple qui varie entre alternance autour de 2 valeurs tandis que le régime reste constant. Enfin, le dernier essai est le cycle RMC, c'est-à-dire, un cycle qui inclut les 8 points du protocole statique testés sur des paliers dont la durée est proportionnelle au facteur de pondération propre à chaque point.

Tableau 43 : Descriptif des points caractéristique testés pour les essais NRSC du tracteur Massey

Appellation point	Régime de rotation du moteur (tr/min)	% de couple par rapport au couple maximum du régime	Couple mesuré (Nm)	Nombre de répétition validée
1	2200	100	377	1
2	2200	75	283	1
3	2200	50	189	1
4	2200	10	37	1
5	1400	100	555	1
6	1400	75	416	1
7	1400	50	277	1
8	Ralenti (844)	0	-	1

3.2.4 PROGRAMMES D'ESSAIS

Pour l'INERIS, les essais de caractérisation des émissions atmosphériques des tronçonneuses ont été réalisés par du personnel permanent : Amandine Fievet, Nicolas Karoski, Denis Van Elsuve, Adrien Dermigny et Pascal Dubois. Pour l'irstea, les personnes suivantes ont participé aux campagnes d'essais: Stéphanie Lacour, Jacques Bendele-Kalenda, Alexandre Baltzinger, Samia Benzai, Sylvain Descloux, Pascal Clain.

3.2.4.1 TRACTEUR TIERS 3B NEW HOLLAND

Tableau 44 : Programme de tests réalisés sur le tracteur New Holland au banc d'essais IRSTEA

Allure (Tr/mn)	Charge	HAP	TSP	PM	COV spécifiques Orbo	COV spécifiques Carbo	Granulométrie en nombre
2200	50%	n=3	n=3	n=3	n=3	n=1	n=3
	10%	n=3	n=3	n=3	n=3	n=1	n=3
1500	50%	n=2	n=2	n=2	n=2	n=1	n=2
Ralenti	Ralenti	n=3	n=3	n=3	n=3	n=1	n=3
2200	100%	n=2	n=2	n=2	n=2	n=1	n=2
1500	100%	n=2	n=2	n=2	n=2	n=1	n=2
1500	75%						
2200	75%	n=3	n=3	n=3	n=3	n=2	n=3

3.2.4.2 TRACTEUR TIERS 3A MASSEY FERGUSON

Tableau 45 : Programme de tests réalisés sur le tracteur Massey Ferguson au banc d'essais IRSTEA

Allure (T/min)	Charge (%)	HAP	TSP	PM	COV spécifiques Carbo	Granulométrie en nombre
2200	10	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
	50	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
	75	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
	100	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
1500	50	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
	75	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
	100	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
Ralenti		n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
HB 2200		n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
HB 75		n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
RMC		n=1	n=1	n=1	n=1	n=1
Blanc		n=1	n=1	n=1	n=1	n=1

3.2.5 RÉSULTATS

3.2.6 RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS DE TRACTEURS

3.2.6.1 CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS DU TRACTEUR TIERS 3B NEW HOLLAND

Compte tenu des durées de prélèvement appliquées, les concentrations en particules déterminées pour le tracteur Tiers 3B New Holland sont de l'ordre des limites de quantification des méthodes. Il a donc été décidé pour la seconde campagne de cumuler sur un même support de prélèvement les trois répliques d'essais réalisés pour une condition donnée de fonctionnement du tracteur.

3.2.6.1.1 POLLUANTS GAZEUX RÉGLEMENTÉS

Tableau 46 : Concentrations en polluants gazeux réglementés et température, tracteur New Holland

Date	Essai	Allure	Charge	Heure	O ₂	CO ₂	Température	CO		NOx		NO ₂		COVT		CH ₄		COVnM	
					%	%	°C	ppm	mg/m ₃	ppm	mg NO ₂ /m ₃	ppm	mg/m ₃	ppm	mg/m ₃	ppm	mg/m ₃	ppm	mg/m ₃
04/12/2013	1	2200	50%	09h51 à 10h21	13.71	5.56	297.9	77.9	97.3	119.1	244.5	3.9	1.6	10.6	14.1	1.2	2.6	9.3	5.3
	2			11h20 à 11h50	14.10	5.22	274.6	80.4	100.5	113.4	232.8	3.1	1.6	8.8	11.6	1.3	2.8	7.4	4.2
	3			13h50 à 14h20	13.80	5.43	310.2	72.7	90.9	118.0	242.4	2.8	1.4	7.0	9.3	1.1	2.4	5.7	3.3
05/12/2013	10	2200	10%	13h18 à 13h48	17.00	2.97	195.4	123.3	154.1	164.8	338.4	9.3	5.0	15.8	20.5	0.8	1.7	14.9	8.3
	11			14h10 à 14h40	16.96	3.00	186.1	124.8	156.1	161.2	331.0	8.7	4.7	18.4	23.5	0.8	1.6	17.6	9.6
	12			15h02 à 15h32	17.01	2.96	188.9	127.1	158.8	175.5	360.3	10.1	5.4	18.5	24.3	0.8	1.7	17.7	9.9
	13	1500	50%	15h52 à 16h22	11.28	7.13	302.1	112.5	140.6	131.4	269.8	6.5	3.5	5.0	6.7	-0.7	-1.5	5.8	3.3
14	16h43 à 17h13			11.22	7.17	342.9	75.4	94.3	132.4	271.9	4.6	2.4	1.5	2.0	-0.8	-1.7	2.4	1.4	
09/12/2013	17	Ralenti		14h19 à 14h49	18.14	2.05	144.4	144.3	180.3	148.6	305.1	7.7	4.1	16.8	21.4	2.1	4.4	14.4	7.9
	18			15h19 à 15h49	18.00	2.18	129.9	151.1	188.9	142.3	292.2	7.7	4.1	19.6	24.9	2.0	4.3	17.2	9.4
	19			16h09 à 16h39	18.02	2.17	130.9	152.7	190.8	148.5	305.0	8.1	4.3	20.0	25.8	2.0	4.3	17.7	9.8
10/12/2013	20	2200	100%	09h27 à 09h57	11.96	6.64	348.8	56.3	70.3	170.1	349.4	8.2	4.4	5.3	7.1	-1.1	-2.4	6.5	3.7
	21			10h13 à 10h43	11.85	6.74	359.0	48.6	60.8	172.5	354.2	8.2	4.4	4.3	5.9	-1.3	-3.0	5.8	3.4
	22	1500	50%	13h48 à 14h18	11.77	6.90	319.3	72.7	90.9	121.8	250.0	4.7	2.5	HS	HS	HS	HS	HS	HS
	23	1500	100%	14h52 à 15h18	8.67	9.11	400.0	52.6	65.7	262.1	538.3	15.9	8.5	HS	HS	HS	HS	HS	HS
	24			15h35 à 16h05	8.64	9.16	412.2	52.7	65.9	302.0	620.2	20.5	11.0	3.3	4.5	-1.6	-3.7	5.2	3.0
25	1500	75%	16h23 à 16h53	9.92	8.27	376.9	59.3	74.2	172.1	353.5	9.6	5.2	3.0	4.1	-1.7	-3.8	4.9	2.9	
11/12/2013	26	2200	75%	09h44 à 10h14	12.92	5.88	314.5	55.3	69.1	131.5	270.1	5.7	3.1	0.7	0.9	-2.4	-5.2	3.4	1.9
	27			10h30 à 11h00	12.85	5.93	322.4	52.4	65.5	130.5	268.1	5.6	3.0	-0.1	-0.1	-2.7	-5.8	2.9	1.6

3.2.6.1.2 HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES HAP

Tableau 47 : Concentrations en HAP, tracteur New Holland

Essai	Allure	Charge	Heure	Fluoranthène	Benzo (a) anthracène	Benzo (b) fluoranthène	Benzo (k) fluoranthène	Benzo (a) pyrène	Dibenzo (a,h) anthracène	Benzo (g,h,i) pérylène	Indéno (1,2,3-c,d) pyrène	Somme des HAP (ng/m ³ à O ₂ réel)	
				(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	(ng/m ³ à O ₂ réel)	<	>
1	2200	50%	09h51 à 10h21	351.75 <	8.23	29.6	4.7	14.8	4.1	30.0 <	4.1 >	435.1 <	447.4
2			11h20 à 11h50	397.88	39.79	35.3	13.1	4.4	4.4	8.7	8.7 >	512.4 <	512.4
3			13h50 à 14h20	459.62	36.11	36.8	10.1	7.0 <	4.7	13.1	28.4 >	591.2 <	595.9
10	2200	10%	13h18 à 13h48	442.14	65.64	67.4	25.3	18.7	6.1	55.5	74.4 >	755.3 <	755.3
11			14h10 à 14h40	368.43	53.85	44.7	21.4	14.0 <	4.4	38.8	1029.0 >	1570.1 <	1574.5
12			15h02 à 15h32	304.63	34.75	30.0	13.1	13.8 <	4.5	43.1 <	4.5 >	439.3 <	448.4
13	1500	50%	15h52 à 16h22	301.69	35.01	26.9	9.2	9.5 <	4.4	11.9 <	4.4 >	394.2 <	403.0
14			16h43 à 17h13	299.96	28.87	13.8 <	4.5	4.7 <	4.5	6.1 <	4.5 >	353.4 <	366.9
17	Ralenti		14h19 à 14h49	409.34	26.85	87.8	36.3	80.8	22.9	182.7	222.3 >	1068.9 <	1068.9
18			15h19 à 15h49	209.74	41.71	58.0	22.2	129.6	33.0	238.0	304.0 >	1036.2 <	1036.2
19			16h09 à 16h39	207.24	42.89	54.9	20.5	114.9	30.4	236.2	279.5 >	986.5 <	986.5
20	2200	100%	09h27 à 09h57	411.45	31.55	42.4	18.3	10.2 <	4.3	17.7 <	4.3 >	531.7 <	540.2
21			10h13 à 10h43	382.35	38.92	48.8	20.4 <	4.6 <	4.6	14.4 <	4.6 >	504.8 <	518.6
22	1500	50%	13h48 à 14h18	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
23	1500	100%	14h52 à 15h18	434.94	33.49	47.8	20.7 <	4.3 <	4.3	10.0 <	4.3 >	546.9 <	560.0
24			15h35 à 16h05	184.96	33.54	17.0	5.4 <	4.9 <	4.9	6.2 <	4.9 >	247.1 <	261.9
25	1500	75%	16h23 à 16h53	302.25	42.46	35.0	14.6 <	4.8 <	4.8	7.0 <	4.8 >	401.3 <	415.7
26	2200	75%	09h44 à 10h14	159.49	34.21	9.7 <	4.6	4.9 <	4.6	5.3 <	4.6 >	213.6 <	227.4
27			10h30 à 11h00	209.99	25.15	26.1	10.5 <	4.9 <	4.9	7.6 <	4.9 >	279.3 <	294.0

3.2.6.1.3 COV SPECIFIQUES

Tableau 48 : Concentrations en COV spécifiques, tracteur New Holland

Concentration en µg/m ³								
	2200 tr/mn 10%	2200 tr/mn 50%	2200 tr/mn 75%	2200 tr/mn 100%	1500 tr/mn 50%	1500 tr/mn 75%	1500 tr/mn 100%	Ralenti
composé fluoré	0,1	1020,9	<76,1	162,8	1308,5	2806,1	<106,9	n.d.
chloromethane	n.d.	n.d.	190,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
acetaldehyde	<76,8	<74,9	78,7	n.d.	110,1	98,8	<106,9	105,0
methylmercaptan	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
acide acetique	n.d.	n.d.	n.d.	165,5	<91,7	697,7	n.d.	n.d.
benzene	112,7	<74,9	357,8	157,5	152,9	105,0	192,3	248,5
DMDS	n.d.	n.d.	99,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	122,5
toluene	120,4	204,7	1243,3	576,5	339,4	253,1	787,2	885,5
octane	25,6	n.d.	<76,1	n.d.	n.d.	n.d.	<106,9	n.d.
ethylbenzene	<76,8	<74,9	192,8	<80,1	100,9	n.d.	363,3	154,0
p-xylene	99,9	152,3	411,1	160,1	247,6	n.d.	901,1	336,0
m-xylene	<76,8	77,4	200,5	80,1	125,3	n.d.	459,5	185,5
nonane	<76,8	<74,9	126,9	90,7	<91,7	n.d.	534,3	147,0
o-xylene	<76,8	137,3	314,6	120,1	204,8	n.d.	733,7	273,0

3.2.6.1.4 PARTICULES : TSP ET PM

Tableau 49 : Concentrations en TSP et PM, tracteur New Holland

Date	Essai	Allure	Charge	Heure	IP (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	Condensables (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	IP Tot (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)	PM (mg/m ₀ ³ à O ₂ réel)				Nombre total moyen (#/cm ³)
								PM1	PM2,5	PM10	PM10+D>10µm	
04/12/2013	1	2200	50%	09h51 à 10h21	1.5	6.1	7.6	0.0	0.8	1.5	2.4	1.6E+07
	2			11h20 à 11h50	4.6	6.5	11.1	0.4	1.0	1.6	2.3	1.1E+07
	3			13h50 à 14h20	2.1	13.2	15.3	0.6	1.6	2.6	3.8	9.6E+06
05/12/2013	10	2200	10%	13h18 à 13h48	1.2	7.0	8.2	0.5	1.4	2.2	3.1	1.8E+07
	11			14h10 à 14h40	4.3	6.9	11.2	0.0	0.8	1.7	2.5	1.7E+07
	12			15h02 à 15h32	1.6	7.2	8.8	0.5	1.4	2.3	3.2	1.7E+07
	13	1500	50%	15h52 à 16h22	1.2	7.1	8.3	0.0	0.8	1.7	2.5	1.5E+07
	14			16h43 à 17h13	4.0	7.2	11.2	0.5	1.4	2.3	3.2	3.7E+06
09/12/2013	17	Ralenti		14h19 à 14h49	2.8	7.6	10.4	0.0	0.4	1.2	1.9	8.0E+06
	18			15h19 à 15h49	5.3	6.6	11.9	0.5	1.3	2.1	2.9	8.6E+06
	19			16h09 à 16h39	1.9	8.4	10.3	0.0	0.8	1.6	2.4	8.7E+06
10/12/2013	20	2200	100%	09h27 à 09h57	2.9	9.0	11.9	0.4	1.2	1.9	2.6	1.7E+07
	21			10h13 à 10h43	3.8	7.9	11.7	0.5	1.3	1.9	2.7	4.9E+06
	22	1500	50%	13h48 à 14h18	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	
	23	1500	100%	14h52 à 15h18	1.1	6.4	7.5	0.4	0.9	1.7	2.4	1.2E+08
	24			15h35 à 16h05	5.6	9.0	14.6	0.5	1.3	2.1	2.9	7.3E+07
	25	1500	75%	16h23 à 16h53	1.4	6.1	7.5	Problème	0.7	1.7	2.6	4.4E+06
11/12/2013	26	2200	75%	09h44 à 10h14	1.2	5.9	7.1	0.5	1.4	2.6	3.5	1.2E+07
	27			10h30 à 11h00	5.9	6.1	12.0	0.4	1.2	2.0	2.8	9.5E+06

3.2.6.2 CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS DU TRACTEUR TIERS 3A MASSEY FERGUSON

3.2.6.2.1 POLLUANTS GAZEUX RÉGLEMENTÉS

Tableau 50 : Concentrations en polluants gazeux réglementés, tracteur Massey Ferguson

Date	Essai	Allure	Charge	Heure	O ₂	CO ₂	Température	CO		NO _x		NO ₂		COVT		CH ₄		COVnM	
					%	%	°C	ppm	mg/m ₀ ³	ppm	mg NO ₂ /m ₀ ³	ppm	mg/m ₀ ³	ppm	mg/m ₀ ³	ppm	mg/m ₀ ³	ppm	mg/m ₀ ³
15/04/2014	1	2200	100%	10h42 à 11h28	12,33	6,83	357,9	128,5	160,6	298,9	613,9	24,1	49,5	23,6	12,6	<4	<2,1	23,8	12,8
	2		75%	13h37 à 14h22	13,16	6,03	342,4	116,1	145,1	196,1	402,8	13,1	26,9	39,8	21,3	<4	<2,1	39,7	21,3
	3		50%	14h43 à 15h28	14,18	5,25	308,6	133,2	166,5	155,6	319,4	12,5	25,7	53,5	28,6	<4	<2,1	53,0	28,4
	4		10%	16h13 à 16h55	16,60	3,40	191,6	202,3	252,8	218,2	448,0	34,1	70,1	71,4	38,3	<4	<2,1	69,9	37,4
16/04/2014	5	1400	100%	10h09 à 10h54	10,78	7,53	382,7	211,3	264,1	392,7	806,4	33,6	69,0	20,9	11,2	<4	<2,1	20,5	11,0
	6		75%	12h46 à 13h31	11,64	6,89	354,6	131,7	164,6	305,0	626,3	22,5	46,2	32,9	17,6	<4	<2,1	32,3	17,3
	7		50%	13h48 à 14h33	12,76	6,07	315,5	184,3	230,4	246,3	505,8	20,2	41,4	52,6	28,2	<4	<2,1	51,3	27,5
	8		Ralenti	15h01 à 15h46	18,11	2,11	112,9	146,1	182,6	319,3	655,7	51,4	105,5	51,6	27,6	<4	<2,1	49,2	26,3
	RMC	16h38 à 16h41	16,95	3,00	209,9	183,0	228,7	341,9	702,1	49,3	101,2	38,3	20,5	<4	<2,1	36,6	19,6		
	9	HB 2200	17h14 à 18h01	12,14	6,44	361,2	139,1	173,9	271,8	558,1	22,2	45,6	29,9	16,0	<4	<2,1	29,4	15,7	
17/04/2014	10	HB 75	09h34 à 10h20	12,59	6,28	347,1	125,8	157,2	251,3	516,1	20,1	41,3	37,2	19,9	<4	<2,1	36,6	19,6	
	11	RMC	10h48 à 11h26*	13,77	5,41	294,6	144,6	180,8	220,3	452,3	25,5	52,4	46,5	24,9	<4	<2,1	45,4	24,3	

3.2.6.2.2 HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES HAP

Tableau 51 : Concentrations en HAP, tracteur Massey Ferguson

Date	Essai	Allure	Charge	Heure	Fluoranthène	Benzo (a) anthracène	Benzo (b) fluoranthène	Benzo (k) fluoranthène	Benzo (a) pyrène	Dibenzo (a,h) anthracène	Benzo (g,h,i) pérylène	Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	Somme des HAP (ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)										
					(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)	(ng/m ₀ ³ à O ₂ réel)											
15/04/2014	1	2200	100%	10h42 à 11h28	572,47	<	29,08	<	11,14	<	7,76	<	7,89	<	7,76	<	7,76	>	0,00	<	651,62		
	2		75%	13h37 à 14h22	806,28	<	29,07	<	15,49	<	8,35	<	7,57	<	7,57	<	8,88	<	8,72	>	0,00	<	891,91
	3		50%	14h43 à 15h28	1275,37	<	29,81	<	36,61	<	9,26	<	8,71	<	8,71	<	9,26	<	9,46	>	0,00	<	1387,18
	4		10%	16h13 à 16h55	1366,24	<	33,73	<	29,59	<	8,76	<	10,21	<	8,26	<	17,52	<	13,24	>	0,00	<	1487,57
16/04/2014	5	1400	100%	10h09 à 10h54	485,22	<	26,67	<	12,88	<	7,54	<	7,54	<	7,54	<	7,54	<	7,54	>	0,00	<	562,47
	6		75%	12h46 à 13h31	766,10	<	25,19	<	13,10	<	7,39	<	7,39	<	7,39	<	7,91	<	7,39	>	0,00	<	841,87
	7		50%	13h48 à 14h33	1071,28	<	18,60	<	15,72	<	8,15	<	8,15	<	8,15	<	8,15	<	8,15	>	0,00	<	1146,33
	8		Ralenti	15h01 à 15h46	581,30	<	43,23	<	35,67	<	10,87	<	12,13	<	8,09	<	37,21	<	28,86	>	0,00	<	757,36
	RMC	16h38 à 16h41	NM		NM		NM		NM		NM		NM		NM		NM		NM		NM	<	NM
9	HB 2200	17h14 à 18h01	778,59	<	33,70	<	14,23	<	7,70	<	7,70	<	7,70	<	7,70	<	7,70	>	0,00	<	865,05		
17/04/2014	10	HB 75	09h34 à 10h20	635,04	<	31,86	<	10,19	<	7,14	<	7,14	<	7,14	<	7,14	<	7,14	>	0,00	<	712,79	
	11	RMC	10h48 à 11h26*	744,43	<	49,47	<	34,55	<	13,79	<	13,79	<	13,79	<	13,79	<	13,79	>	0,00	<	897,41	

3.2.6.2.3 COV SPÉCIFIQUES

Tableau 52 : Concentrations en COV spécifiques, tracteur Massey Ferguson

	Concentration en µg/m ³												
	Ralenti	1400 tr/mn_50%	1400 tr/mn_75%	1400 tr/mn_100%	2200 tr/mn_10%	2200 tr/mn_50%	2200 tr/mn_75%	2200 tr/mn_100%	RMC	HB 75	HB 2200	Blanc	Ambiant
composé fluoré	<28,5	154,3	1620,0	<29,6	<32,4	<29,7	<31,5	<30,6	n.d.	<30,4	<31,1	<31,0	n.d.
benzene	256,7	555,5	151,4	281,7	485,4	<29,7	283,3	<30,6	<37,2	<30,4	186,8	<31,0	<100,0
toluene	142,6	277,7	<30,3	207,5	663,4	<29,7	141,6	<30,6	<37,2	<30,4	<31,1	<31,0	1750,0
p-xylene	<28,5	<30,9	<30,3	<29,6	<32,4	<29,7	<31,5	<30,6	<37,2	<30,4	<31,1	<31,0	<100,0
m-xylene	114,1	154,3	<30,3	177,9	161,8	<29,7	<31,5	<30,6	<37,2	<30,4	<31,1	<31,0	<100,0
naphtalene	<28,5	<30,9	<30,3	<29,6	161,8	<29,7	<31,5	<30,6	<37,2	<30,4	<31,1	<31,0	<100,0
Acide formique	<28,5	<30,9	<30,3	<29,6	-	<29,7	173,1	<30,6	148,8	<30,4	<31,1	<31,0	<100,0
Acide acrylique	<28,5	<30,9	<30,3	<29,6	178,0	<29,7	n.d.	n.d.	n.d.	<30,4	<31,1	n.d.	<100,0
Styrene	<28,5	123,4	<30,3	<29,6	<32,4	n.d.	<31,5	<30,6	<37,2	<30,4	<31,1	<31,0	<100,0
1,2,4-Trimethylbenzene	142,6	154,3	<30,3	<29,6	210,3	<29,7	157,4	<30,6	n.d.	<30,4	<31,1	<31,0	<100,0

3.2.6.2.4 PARTICULES : TSP ET PM

Une contamination de la solution d'isopropanol utilisée pour collecter la fraction condensable des aérosols a été constatée dans le blanc de site. Les résultats de la fraction condensable des particules sont donc à considérer avec précaution.

Tableau 53 : Concentrations en TSP et PM, tracteur Massey Ferguson

Date	Essai	Allure	Charge	Heure	IP	Condensables	IP Tot	PM (mg/m ³ à O ₂ réel)				Nombre total moyen (#/cm ³)
					(mg/m ³ à O ₂ réel)	(mg/m ³ à O ₂ réel)	(mg/m ³ à O ₂ réel)	PM1	PM2,5	PM10	PM10+D>10µm	
15/04/2014	1	2200	100%	10h42 à 11h28	19,0	13,4	19,00	13,03	13,03	13,03	13,03	6,35E+07
	2		75%	13h37 à 14h22	19,7	19,5	19,70	13,91	13,91	13,91	13,91	7,83E+07
	3		50%	14h43 à 15h28	26,4	37,8	26,40	23,84	23,84	23,84	23,84	8,71E+07
	4		10%	16h13 à 16h55	19,4	20,9	19,40	14,44	14,44	14,44	14,44	5,68E+07
16/04/2014	5	1400	100%	10h09 à 10h54	20,3	18,6	20,30	12,99	12,99	12,99	12,99	3,95E+07
	6		75%	12h46 à 13h31	11,2	40,0	11,20	13,40	13,40	13,40	13,40	2,39E+07
	7		50%	13h48 à 14h33	15,2	20,6	15,20	13,87	13,87	13,87	13,87	4,01E+07
		Ralenti	15h01 à 15h46	5,5	17,6	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,74E+07
		RMC	16h38 à 16h41	NM*	NM*	NM*	NM*	NM*	NM*	NM*	NM*	2,96E+07
		HB 2200	17h14 à 18h01	23,3	17,6	23,30	13,76	13,76	13,76	13,76	13,76	7,29E+07
17/04/2014	10	HB 75		09h34 à 10h20	16,0	18,6	16,00	13,42	13,42	13,42	13,42	5,14E+07
	11	RMT		10h48 à 11h26*	23,8	43,5	23,80	25,74	25,74	25,74	25,74	4,32E+07

NM : non mesuré

3.2.6.3 DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE EN NOMBRE

Les données de granulométrie en nombre indiquent que les technologies et les conditions de fonctionnement (vitesse en tour/minute, charge, fonctionnement en mode ralenti) des tracteurs influent peu sur le mode des distributions granulométriques qui sont centrées sur 30 à 40 nm. Ce mode culmine à 10^7 - 10^8 , avec des concentrations supérieures pour le tracteur Massey Ferguson. En revanche, pour un tracteur donné, il n'est pas possible d'établir de tendance entre conditions de fonctionnement d'une part et quantité émise d'autre part.

3.2.6.3.1 TRACTEUR NEW HOLLAND

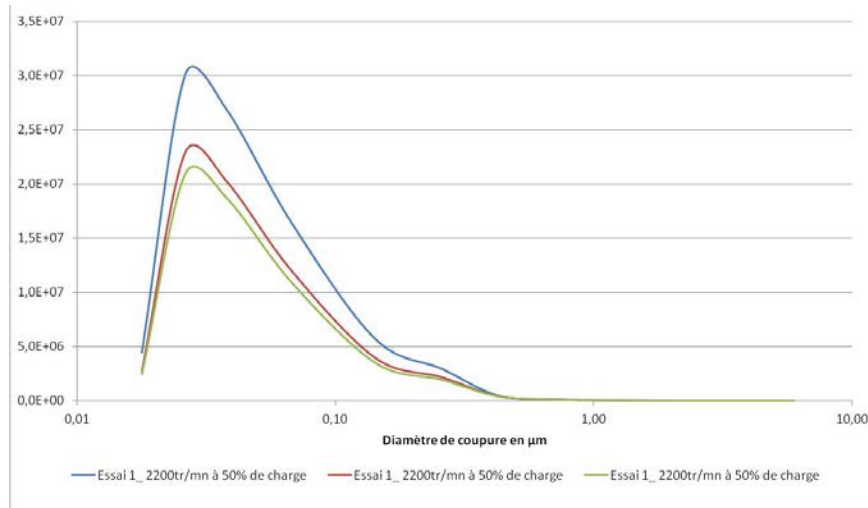


Figure 40 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 2200 tours/min, charge à 50%, tracteur New Holland

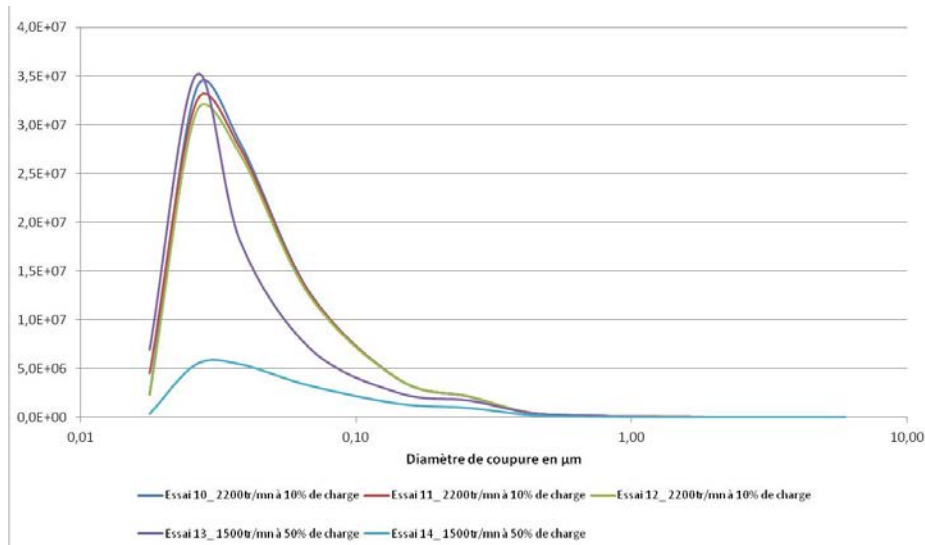


Figure 41 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 1500 tours/min et 2200 tours/min, tracteur New Holland

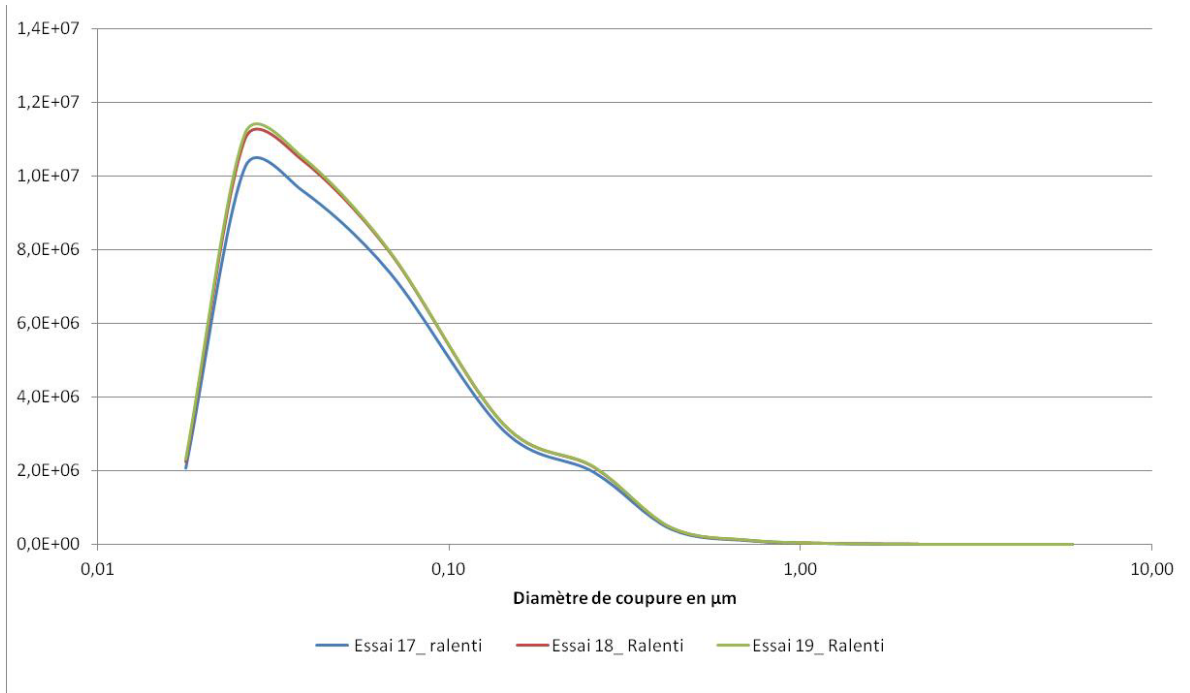


Figure 42 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5, en fonctionnement ralenti, tracteur New Holland

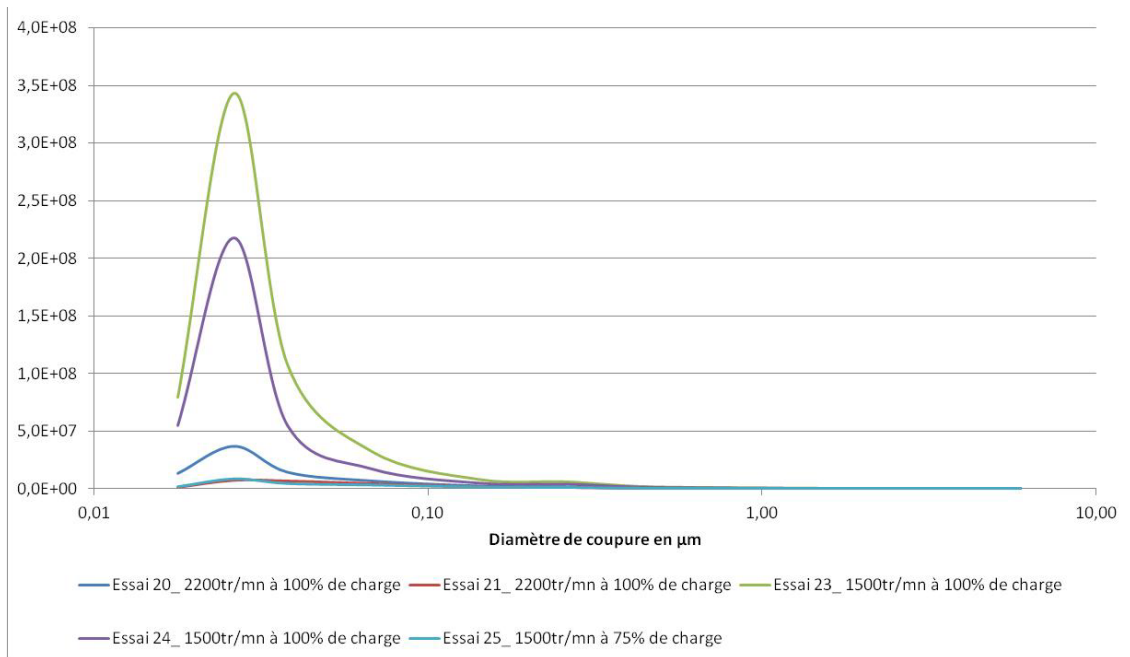


Figure 43 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 1500 et 2200 tours/min, tracteur New Holland

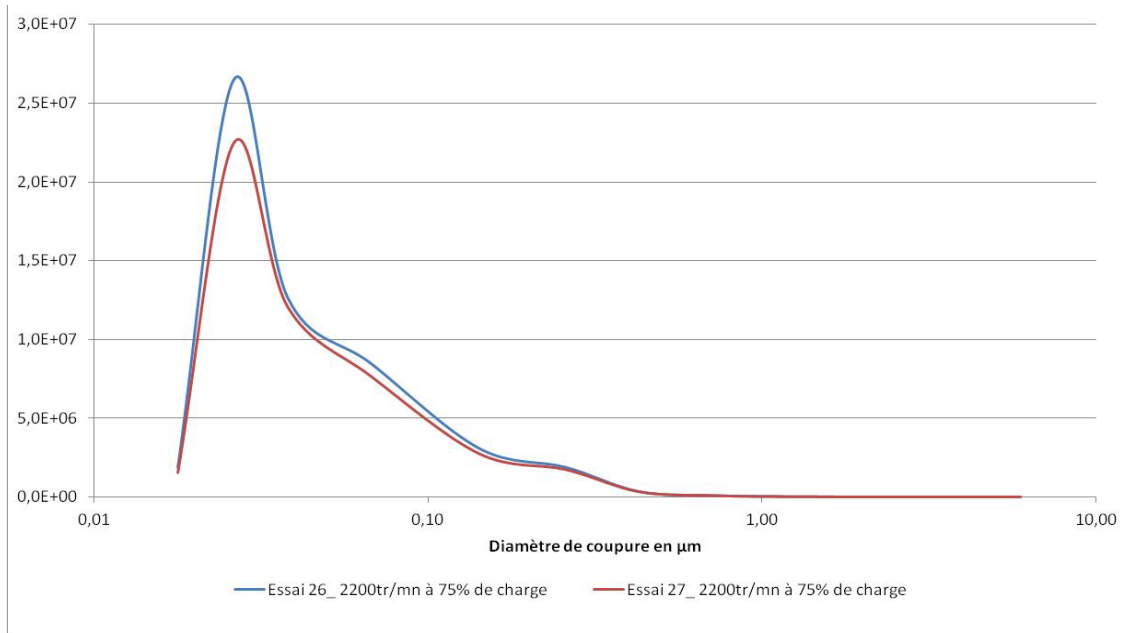


Figure 44 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour une charge à 75% à 2200 tours/min, tracteur New Holland

3.2.6.3.2 TRACTEUR MASSEY

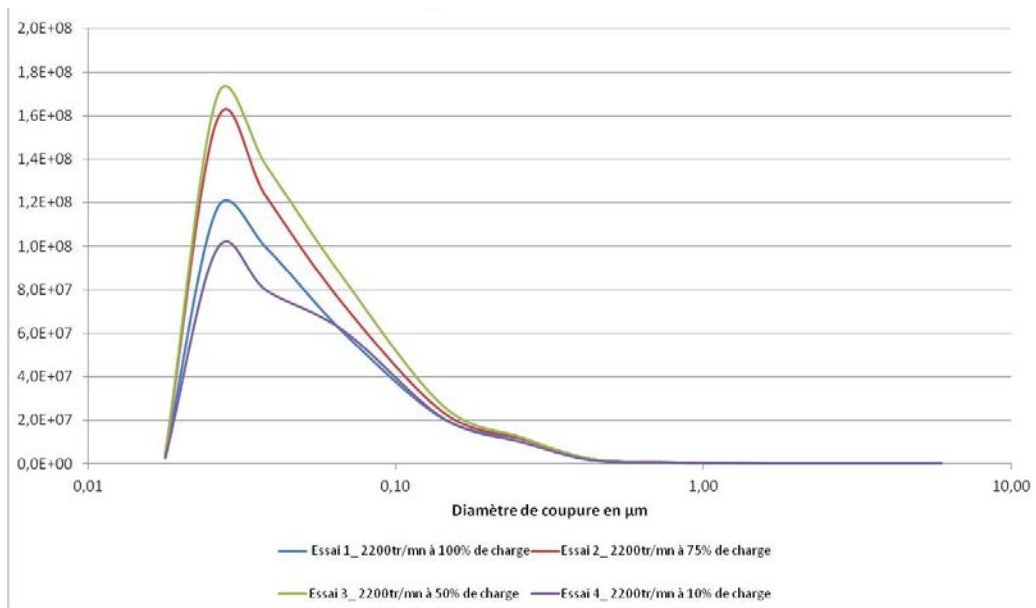


Figure 45 : Distribution granulométrique de la fraction PM2.5 pour différentes charges à 2200 tours/min, tracteur Massey Ferguson

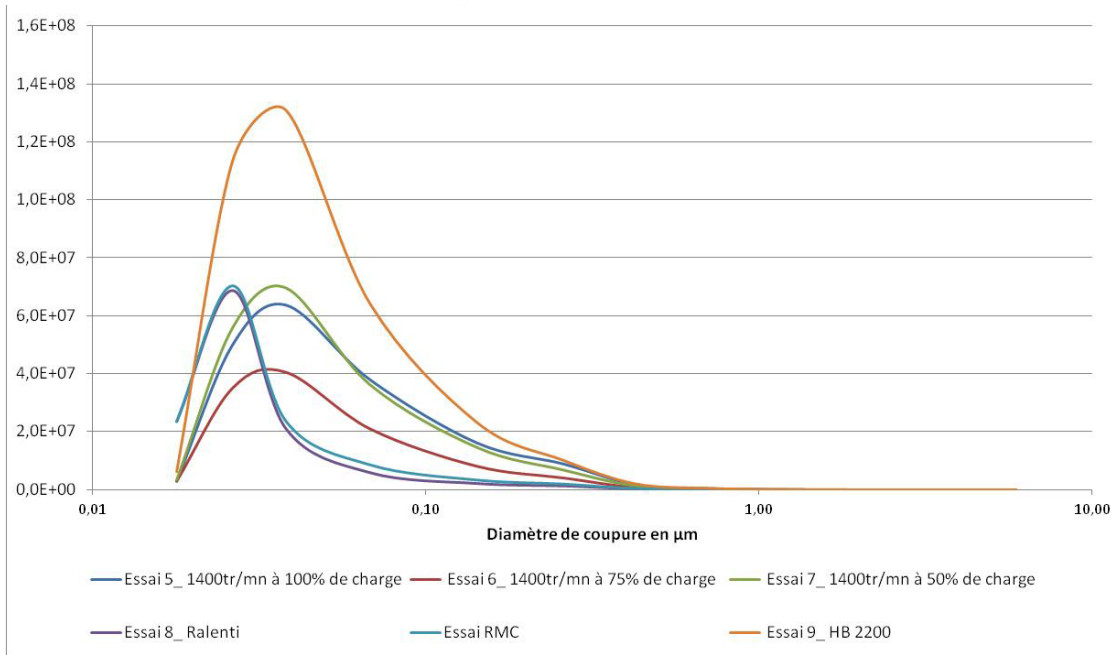


Figure 46 : Distribution granulométrique de la fraction PM_{2.5} pour différentes charges à 1400 tours/min, tracteur Massey Ferguson

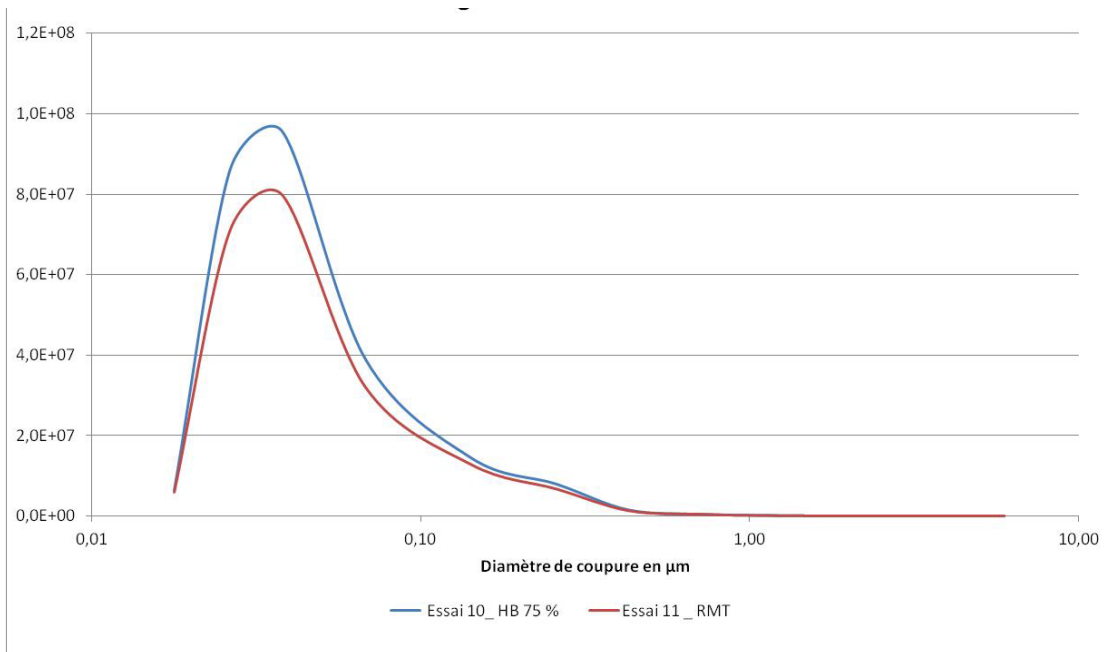


Figure 47 : Distribution granulométrique de la fraction PM_{2.5} en fonctionnement ralenti /RMC/HB et RMT, tracteur Massey Ferguson

3.2.6.4 COMPARAISON DES ÉMISSIONS DES DEUX TRACTEURS : SYNTHÈSE GRAPHIQUE DES RÉSULTATS

La comparaison des concentrations mesurées pour les différents paramètres indique des valeurs supérieures pour le tracteur Massey Ferguson, ce qui est cohérent avec les générations et technologies de tracteurs testés. En revanche, pour un tracteur donné, il n'est pas possible d'établir de tendance entre conditions de fonctionnement d'une part et quantité émise d'autre part.

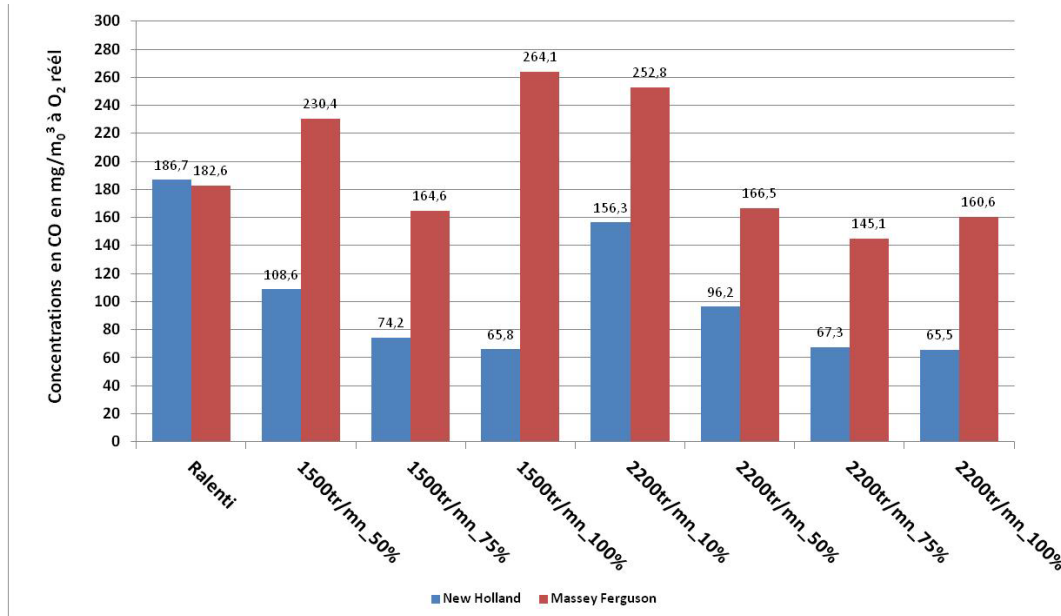


Figure 48 : Comparaison des concentrations en CO obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson

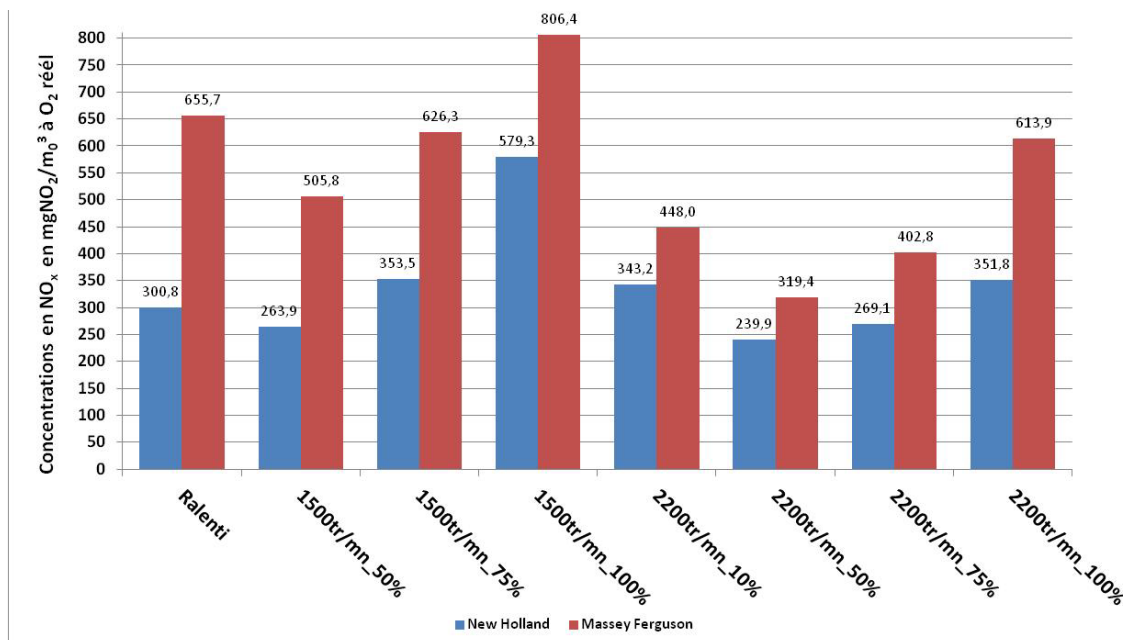


Figure 49 : Comparaison des concentrations en NO_x obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson

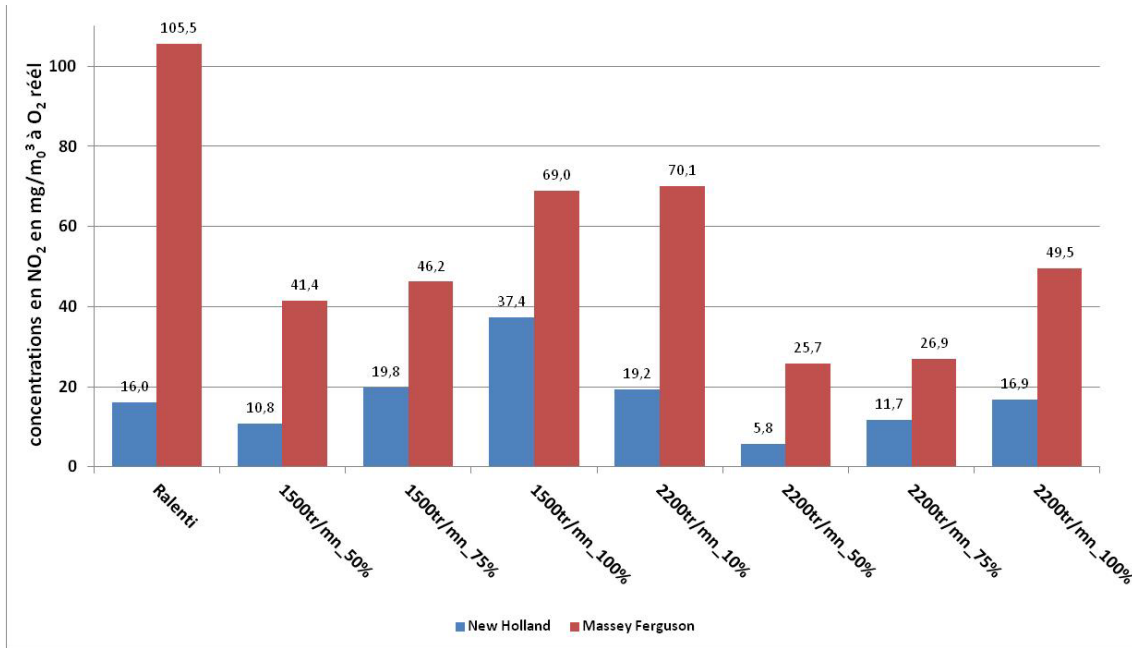


Figure 50 : Comparaison des concentrations en NO₂ obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson

Le rapport [NO₂]/[NO_x] augmente avec les émissions de NO_x. Sur l'ensemble des conditions de fonctionnement testées, ce rapport vaut :

$$\frac{[NO_2]}{[NO_x]} = 4.74 \% \mp 2.34$$

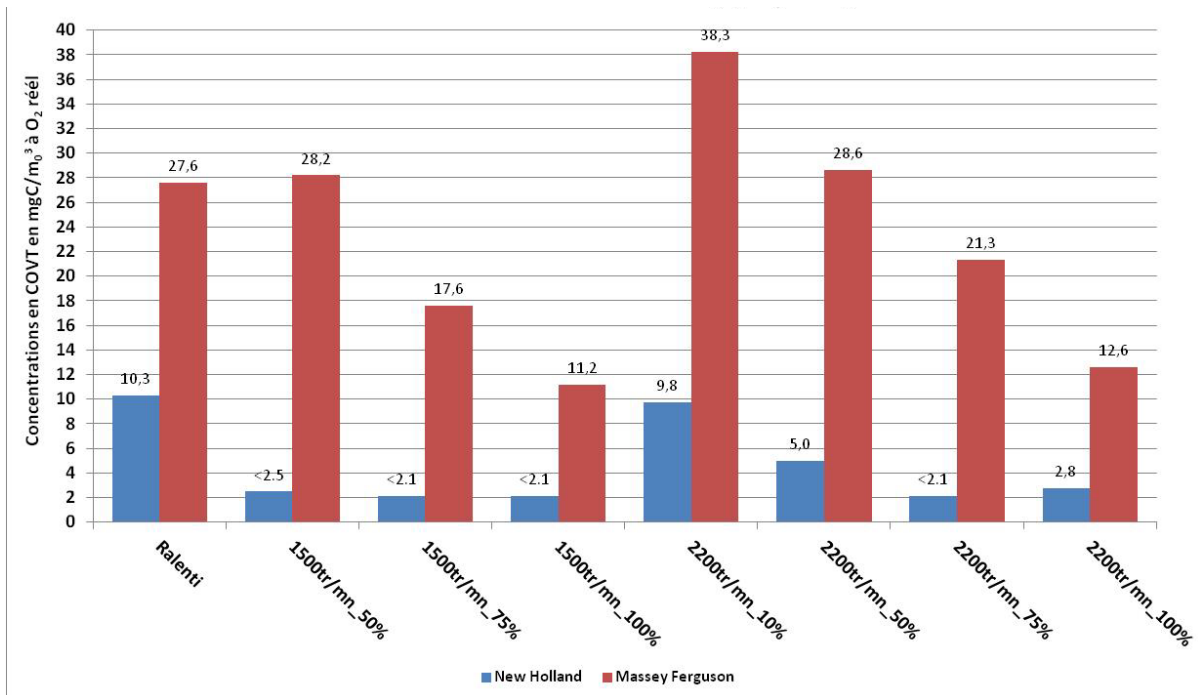


Figure 51 : Comparaison des concentrations en COVT obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson

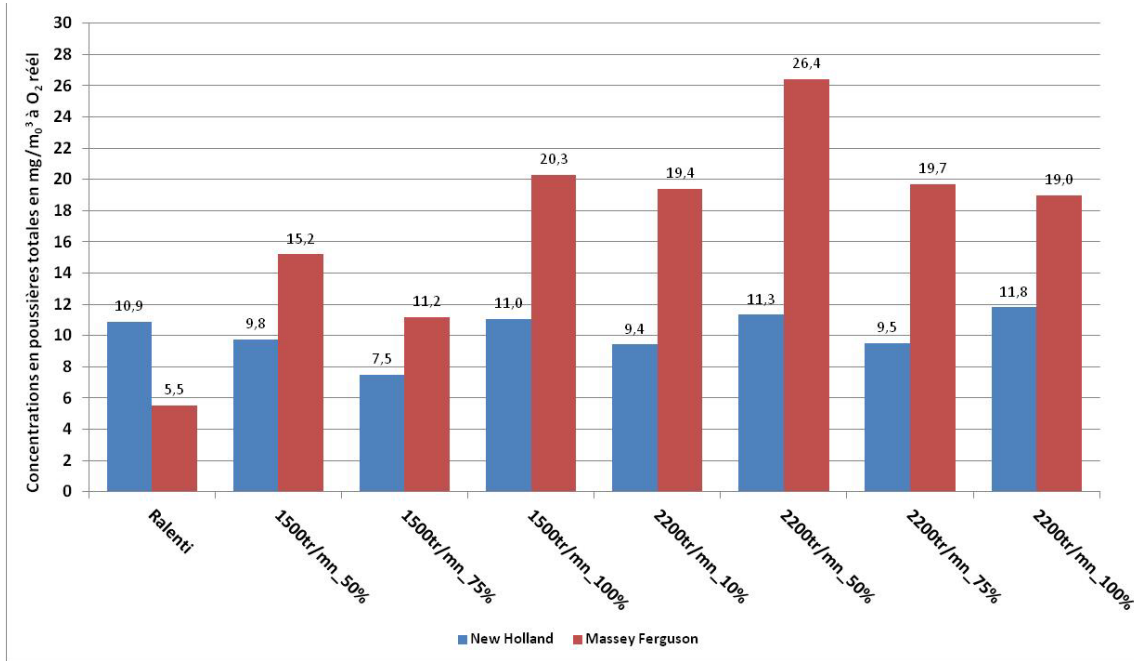


Figure 52 : Comparaison des concentrations en poussières totales obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson

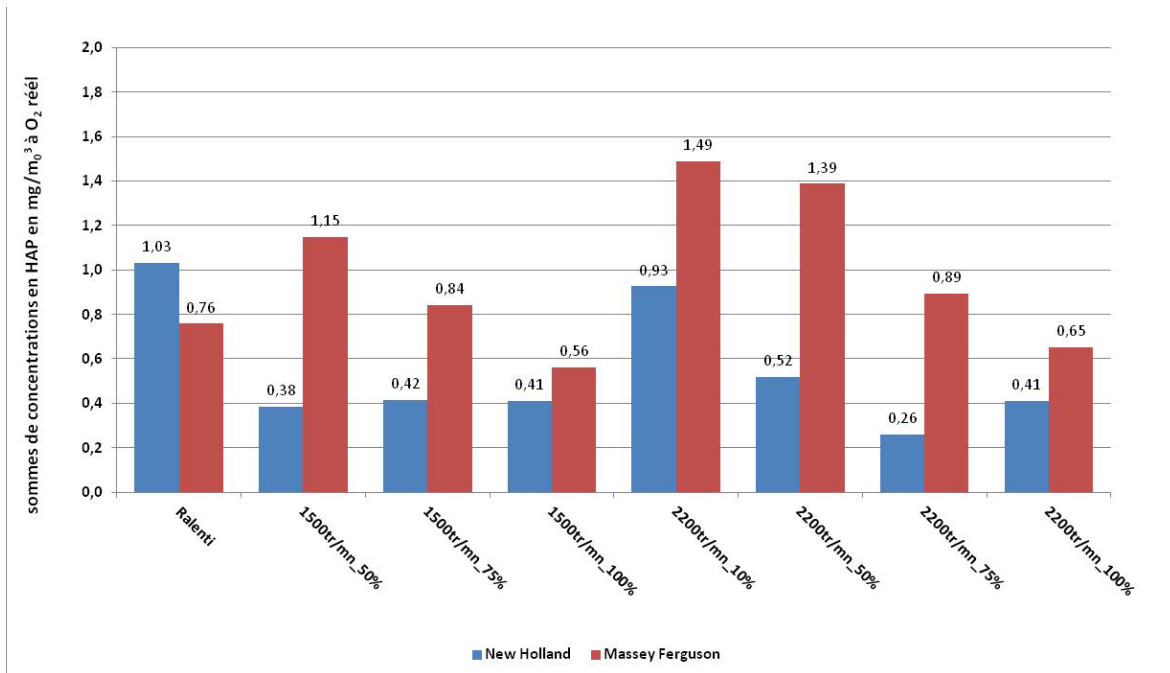


Figure 53 : Comparaison des concentrations en HAP obtenues pour les tracteurs New Holland et Massey Ferguson

3.2.7 ETALONNAGE DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT ET DU COUPLE POUR LA CAMPAGNE DE TERRAIN

Pour la campagne de terrain, les informations concernant le couple et la consommation proviennent du réseau électronique du tracteur. Les mesurages effectués au banc d'essai nous permettent de vérifier la qualité de l'information fournie par ce réseau. Sur la Figure 54, on compare les valeurs de consommation et de couple fournies par le réseau CAN aux mesures effectuées sur le banc. On observe que pour les consommations de carburant CAN sont conformes aux mesures réalisées avec notre compteur volumétrique. Pour le couple, l'équivalence n'est pas directe car le couple CAN est exprimé en pourcentage du couple maximal au régime concerné, tandis qu'on mesure la valeur du couple sur le banc. La courbe enveloppe du moteur du tracteur Massey étant assez plate, le couple maximal au régime concerné est relativement constant. Aussi, le couple maximal au régime concerné peut être ramené au couple maximal. Ainsi, la droite de régression à droite de la Figure 31 nous permet de convertir le couple CAN (fourni en %) en une valeur de couple à la prise de force pour le calcul des puissances :

Équation 4

$$T_{pdf} (Nm) = 6.159L_e (\%) - 48.13$$

Équation 5

$$C_{pdf} (l/h) = 0.9873 C_{can} (l/h) + 0.2627$$

A partir des valeurs CAN recueillies sur le terrain, on évalue avec ces deux relations la consommation réelle et la puissance demandée. Dans la suite de ce rapport, les puissances et les consommations correspondent ainsi aux valeurs recalculées par les relations ci-dessus et dites «pdf».

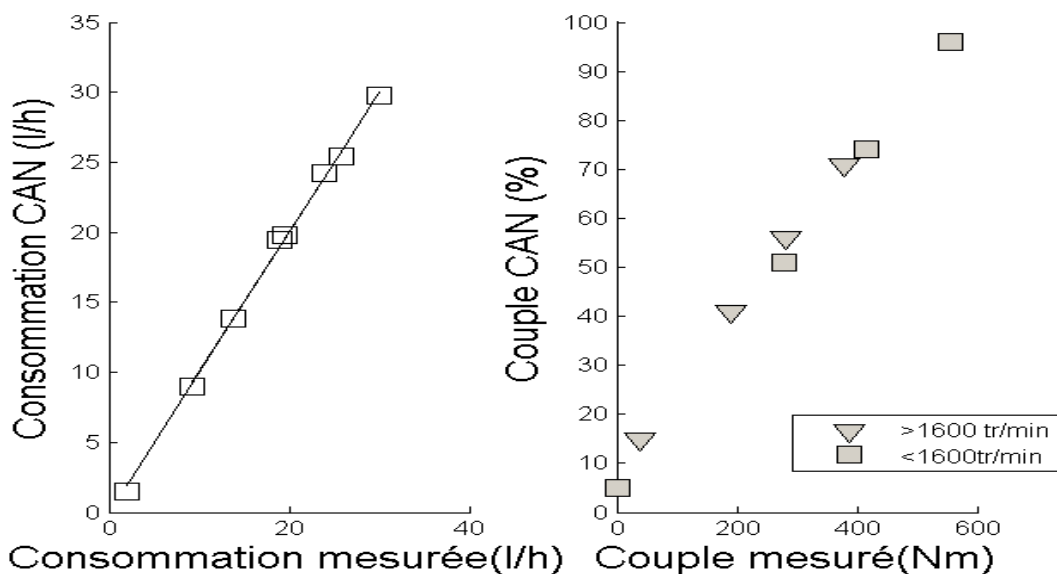


Figure 54 : Comparaison des valeurs fournies par le réseau CAN du tracteur aux valeurs mesurées sur le banc d'essai pour la consommation de carburant (à gauche) et pour le couple du moteur (à droite)

3.2.7.1 MESURAGES À FROID ET FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME SCR

Le système SCR est conçu pour diminuer les émissions de NOx en les piégeant à l'aide d'urée. Néanmoins, la réaction catalytique n'opère que pour des températures d'échappement élevées et dans un souci d'économie d'AdBlue, l'urée n'est pas injectée lorsque la température des gaz est faible. Ainsi, à froid, les émissions de NOx des motorisations diesel équipées de SCR restent élevées.

On observe l'effet de l'injection d'urée dans les mesures que nous avons recueillies sur les cycles dynamiques. Nous avons réalisés plusieurs essais avec le cycle tracteur de l'US-EPA. Trois essais sont réalisés à chaud : on applique un cycle de préchauffage, puis on lance le cycle d'essai en faisant varier la durée de la période de ralenti après la préchauffe. On teste également ce cycle sur 2 essais effectués à froid, c'est-à-dire, après une période de repos du moteur de plus de 12 heures. On observe sur la Figure 55 que la température à l'échappement au démarrage du cycle dépend des conditions précédant l'essai : plus l'essai est réalisé rapidement après la préchauffe, plus la température des gaz au démarrage est élevée. Plus la période de ralenti ou de repos est longue, plus la température est faible. Elle tend, après une nuit de repos, vers la température ambiante. La température des gaz d'échappement au point de prélèvement atteint 200-230°C, seuil de déclenchement du système SRC, après 50 secondes environ après un départ à chaud, et après 200 secondes environ après un départ à froid.

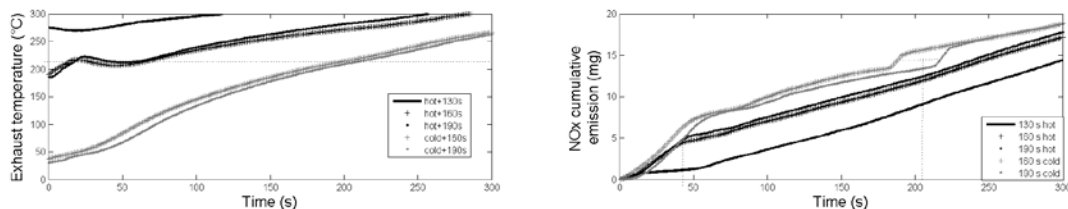


Figure 55 : Evolution des températures et émissions de NOx à l'échappement sur des cycles réalisés à chaud et à froid

L'effet du seuil de déclenchement du système SCR est bien visible sur les émissions de NOx. Pour un départ à chaud avec une faible période de ralenti (hot130), la température à l'échappement n'a pas le temps de retomber et le système SCR est directement opérationnel : l'émission cumulée de NOx, visible sur la Figure 55 à droite, progresse doucement et régulièrement tout au long du cycle. Lorsque la température d'échappement met plus de temps pour atteindre 200°C (hot160, hot190), on observe que l'émission cumulée de NOx croît très rapidement dans les premiers instants du cycle : l'émission est d'ailleurs quasi-identique pour les cycles « chauds » et les cycles « froids ». Après une cinquantaine de seconde, le SCR se déclenche pour les cycles à chaud et la masse de NOx émis progresse alors beaucoup plus lentement. C'est autour de 200 secondes après le départ que le système SCR se déclenche sur les cycles à froid (cold160 et cold190) et là-encore, ce déclenchement se repère avec la progression plus modérée de la quantité de NOx émise.

Les durées à froid observées au cours des essais avec le tracteur New Holland sont moins élevées que celles rapportées par [7], qui avait relevé 80 s à chaud après 5 min de ralenti, 490 s à chaud après 10 min de ralenti, 675 s à chaud après 20 min de ralenti et enfin 800 secondes à froid. Il faut dire que ces mesurages étaient effectués sur le cycle WHTC, pour lequel la demande de puissance au démarrage du cycle est beaucoup plus faible que dans notre cas. Or, la durée pour atteindre le seuil de déclenchement dépend de l'intensité avec laquelle on sollicite le moteur.

On montre en effet dans [8] les effets d'inertie thermique agissent sur la température de gaz d'échappement comme un filtre passe-bas. La constante de temps de ce filtre ne dépend que de l'architecture « moteur ». La constante de temps du tracteur New Holland vaut environ $\tau=130$ secondes, c'est-à-dire qu'il faut compter 3τ soit plus de 6 min pour atteindre la température d'équilibre, c'est à dire la valeur de température qui correspond à une sollicitation donnée et constante du moteur : cette durée est ce qu'on appelle généralement la durée de sur-émission à froid.

Mais l'approche avec un filtre passe-bas permet d'analyser d'autres conditions qui peuvent aussi neutraliser le fonctionnement du système SCR du fait d'une température d'échappement trop faible.

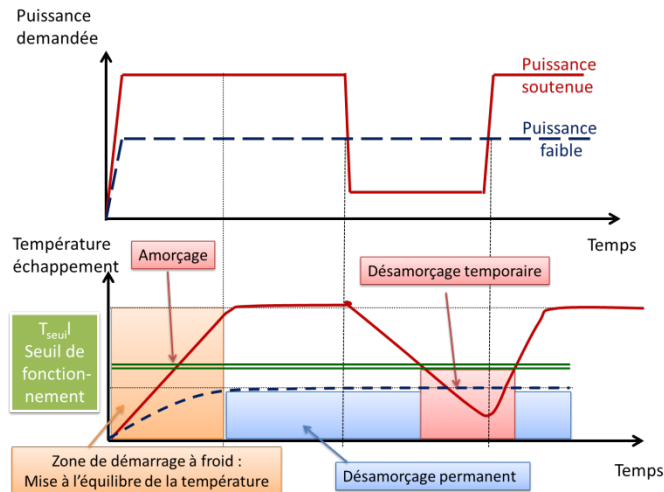


Figure 56 : Sollicitation d'un moteur agricole et conditions de désamorçage du système de dépollution SCR

En effet, les conditions d'atteinte du seuil sont représentées sur la Figure 56 : au démarrage, les premiers instants correspondent à une mise à l'équilibre progressive de la température. La durée de mise à l'équilibre thermique est identique quel que soit le niveau de sollicitation du moteur. Seule la durée nécessaire au franchissement du seuil varie. Le seuil d'enclenchement du SCR sera rapidement dépassé si la puissance demandée est soutenue. Plus la puissance demandée est soutenue, plus le seuil est rapidement dépassé. Le seuil est moins rapidement atteint si la sollicitation du moteur est faible. Il se peut même que ce seuil ne soit jamais atteint si la puissance demandée au moteur ne permet pas d'atteindre la température minimale d'enclenchement du SCR : on est alors dans une situation de désamorçage permanent. De même, pendant une période relativement longue de ralenti, la température à l'échappement peut descendre suffisamment pour désamorcer le système.

Les essais stationnaires permettent de déterminer la température d'équilibre correspondant à chaque condition de fonctionnement du moteur. Ces températures sont représentées sur la Figure 57, à gauche, en fonction de la consommation de carburant. La température à l'échappement augmente avec la consommation de carburant. Pour une même consommation, la température à l'échappement augmente à faible régime. En effet, la quantité d'air admis diminue avec le régime et la chaleur libérée par la combustion se concentre dans un plus petit volume : la température est alors plus élevée. La température d'échappement est inférieure à 250°C dans trois des huit situations de fonctionnement testées : le point de ralenti, et les points 10% et 25% au régime nominal. Toutes ces situations correspondent à une demande de puissance faible.

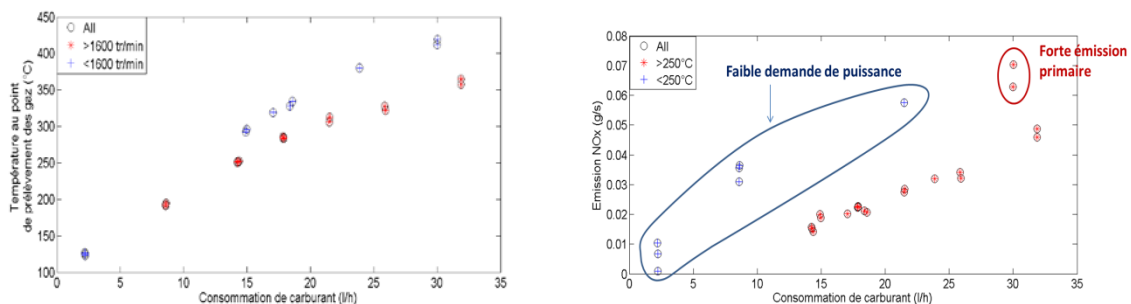


Figure 57 : Températures d'équilibre correspondant aux paliers de la série NRSC et émissions de NOx associées – Mesures obtenues sur le tracteur New Holland

Sur la Figure 57 à droite, on a reporté les émissions de NOx correspondant aux paliers du NRSC. On observe que les émissions de NOx ont tendance à augmenter avec la température. Cependant, pour les 3 situations à faible demande de puissance, les émissions de NOx rapportées à la consommation de carburant sont relativement élevées.

Il est vraisemblable que la raison soit liée au désamorçage probable du SCR pour ces points de fonctionnement. On serait donc en situation de désamorçage permanent du SCR sur ces points de fonctionnement.

L'émission mesurées sur ces points apparaît être le double de l'émission « tendance » mesurée sur les autres points. Mais on observe aussi une émission élevée pour un autre point de fonctionnement : il s'agit du point de puissance maximale au régime intermédiaire, point pour lequel la température d'échappement est la plus élevée. Pour ce dernier, les explications avancées sont plus classiques : la température particulièrement élevée pourrait induire des phénomènes de dissociation plus prononcés dans la chambre de combustion. Ceci entraînerait ainsi une émission primaire de NOx plus importante que pour les autres points. La quantité d'urée injectée ne serait alors plus suffisante pour dépolluer aussi efficacement les gaz d'échappement.

Dans le Tableau 54, on reporte les écarts d'émissions mesurés sur les cycles à chaud et à froid. Ces données sont à manipuler avec précaution car bien que l'essai à froid ait été réalisé 2 fois et l'essai à chaud 3 fois, les conditions d'essai ne sont optimales (voir annexe E). On observe que pour un même travail fourni (en kWh), le fonctionnement à froid conduit à des émissions polluantes plus élevées et à une augmentation de la consommation de carburant. L'écart est surtout sensible sur les émissions de COVT qui sont doublées. L'augmentation à froid est inférieure à 10% pour la consommation et les émissions de NOx et CO₂. Quand on raisonne par g de carburant, les émissions à froid sont également plus élevées pour les NOx et les imbrûlés. Par contre, la puissance mécanique et les émissions de CO₂ délivrée par un gramme de carburant diminuent : la puissance mécanique diminue du fait du moins bon rendement du moteur et de l'augmentation de friction. Les émissions de CO₂ diminuent aussi car la combustion à froid est moins bonne : la part du carburant imbrûlé augmente et peut expliquer ce résultat.

Tableau 54 : Facteurs d'émission mesurés sur le cycle EPA- soft à chaud et après un démarrage à froid

	Par kWh			Par g fioul		
	Chaud	Froid	Ecart	Chaud	Froid	Ecart
Fioul (g)	226	249	+10 %	-	-	-
NOx (g)	1,82	2,02	+11 %	8,08	8,14	+7 %
COVT (g)	0,028	0,062	+133 %	0,12	0,3	+112 %
CO ₂ (g)	711	743	+5 %	3,15	2,99	-5 %
Power (Wh)				4,43	4,02	-9 %

Weilenmann, dans [12], propose pour les voitures de calculer la distance de surémission à froid par :

$$\text{Équation 6} \\ \gamma = \frac{CSEE}{e_{hot}}$$

γ représente ainsi la distance qu'il faudrait parcourir avec un véhicule à chaud pour émettre la même quantité de polluant que la surémission à froid. La surémission à froid, CSEE (Cold start excess emission) est la quantité additionnelle de polluant émise par un véhicule pendant la durée à froid. Mais la durée à froid se détermine avec un cycle spécial : un cycle à froid consiste à répéter une micro-séquence de conduite jusqu'à ce que les émissions de polluants sur cette séquence se stabilisent. Seule la répétition des micro-séquences permet de déterminer à partir de quand les émissions séquentielles sont stabilisées, c'est-à-dire, la durée à froid. Avec un cycle d'essai conventionnel, on ne peut pas définir correctement la durée à froid.

Cependant, nous avons estimé auparavant dans ce rapport que cette durée à froid est de l'ordre de 12-13 min, soit environ la durée du cycle US-EPA. Si on considère que la durée à froid est égale à la durée du cycle, on peut déterminer la CSEE, en soustrayant l'émission du cycle à froid de l'émission du cycle à chaud. On peut alors en déduire un gamma « EMNR », γ , soit la durée équivalente du froid, c'est-à-dire, la quantité d'heure de travail à chaud qu'il faut développer pour émettre la même quantité que la surémission.

$$\gamma_{cold} = dT_{cycle} [h] \frac{\bar{E}_{usepa,cold} - \bar{E}_{usepa,hot} [g/h]}{\bar{E}_{spe,hot} [g/h]}$$

En faisant ce calcul, on obtient des durées équivalentes du froid inférieures à la minute pour la consommation de carburant, l'émission de CO₂ et de NO_x. Pour les hydrocarbures, la durée à froid atteint presque 10 min, soit presque le cycle complet. Pas très rigoureux, ce calcul montre néanmoins la durée équivalente du froid est faible : La surémission à froid représente 10 minutes de travail, ce qui est peu par rapport à la durée moyenne d'une opération agricole.

3.2.8 EFFETS INSTATIONNAIRES

Nous avons vu dans le chapitre 2 que le fonctionnement d'un tracteur se fait en général en alternance autour de 2 modes et que les cycles instationnaires proposés dans la réglementation ne correspondaient pas à ce type de conduite. Pour un meilleur réalisme du cycle de conduite, il serait nécessaire que le cycle de conduite réelle présente des séquences d'alternance entre un mode haut et un mode bas, le mode ralenti, le mode haut pouvant varier d'une séquence à une autre pour représenter différentes opérations agricoles et/ou différents stratégies de réglage des groupes motopropulseur.

Nous avons souhaité examiner plus en détail l'effet d'une alternance des points de fonctionnement. Pour cela, nous avons mis au point deux cycles d'essai, les cycles RMC, qui ont été testés sur le tracteur Massey. Ces deux cycles sont construits de la même façon : on choisit 2 points P1 et P2 de fonctionnement parmi les 8 points de fonctionnement à tester pour le facteur d'émission. On règle le frein pour travailler sur le point P1 pendant 360, puis on effectue une transition linéaire de 20 vers le point P2, on travaille sur le point P2 pendant 360 seconde et enfin, on effectue une transition de 20 secondes vers le point P1. Cette séquence de 760 secondes est répétée 7 fois et on présente en annexe E, l'évolution des émissions massiques de polluants au cours de ces répétitions. Soulignons que les alternances proposées sont lentes : le choix des durées est imposé par les caractéristiques de notre banc d'essai pour la durée de la rampe et par la durée caractéristique d'une ligne de travail pour la durée du plateau. On compare les valeurs dynamiques aux valeurs statiques dans le Tableau 55.

Tableau 55 : Puissance, consommation et émissions polluantes moyennes par période de cycle (écart-type entre parenthèse)

Par période de 720 s	« Puissance » kWh	Fioul kg	CO ₂ kg	COVT g	NO _x g
Cycle à couples variables					
Stationnaire	13.3	3.86	12.1	2.68	40.8
Instationnaire	13.3 (0.00)	3.82 (0.03)	12.0 (0.18)	2.71 (0.04)	40.1 (1.3)
Cycle à couples et régimes variables					
Stationnaire	16.1	4.81	15.1	3.05	53.6
Instationnaire	16.0 (0.00)	4.86 (0.03)	15.3 (0.24)	2.84 (0.14)	55.6 (1.4)

Les valeurs « instationnaires » sur les différentes séquences sont représentées sur les figures 58 à 60 et bien que les courbes puissent laisser croire à des dérives tendanciennes, le coefficient de dispersion des mesures d'une séquence à l'autre est faible et du même ordre de grandeur que le coefficient de variation inter-cycle.

La comparaison des valeurs instationnaires aux valeurs stationnaires montre que la différence entre les deux est inférieure à 5% dans presque tous les cas. Seules, les émissions de COVT sont affectées par les alternances de régime et couple du second cycle. Le COVT (comme le CO qui n'a pu être traité pour ces essais faute d'une panne de la cellule d'analyse) sont les polluants les plus sensibles aux transitoires. L'émission est plus élevée de 7% dans le cas stationnaire. Cette comparaison montre l'équivalence entre 8 tests sur chaque mode et le test « 8 modes en une passe » : si la durée des rampes est suffisamment courte devant celle des plateaux, l'écart est négligeable.

On peut donc utiliser les valeurs mesurées sur le cycle NRSC pour déterminer les facteurs d'émission du Massey. Cette comparaison permet aussi d'établir que si on schématise le fonctionnement d'un tracteur pour un usage donné par un fonctionnement bimodal il est possible de calculer un facteur d'émission bimodal en combinant les valeurs mesurées en sur des modes statiques, si la fréquence des alternances n'est pas trop élevée.

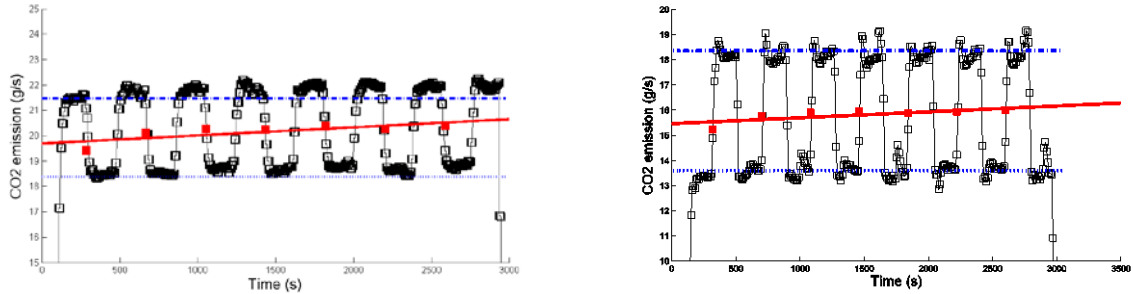


Figure 58 : Evolution des émissions horaires de CO2 sur un cycle en palier (à gauche : palier de couple et régime et à droite : palier de couple uniquement)

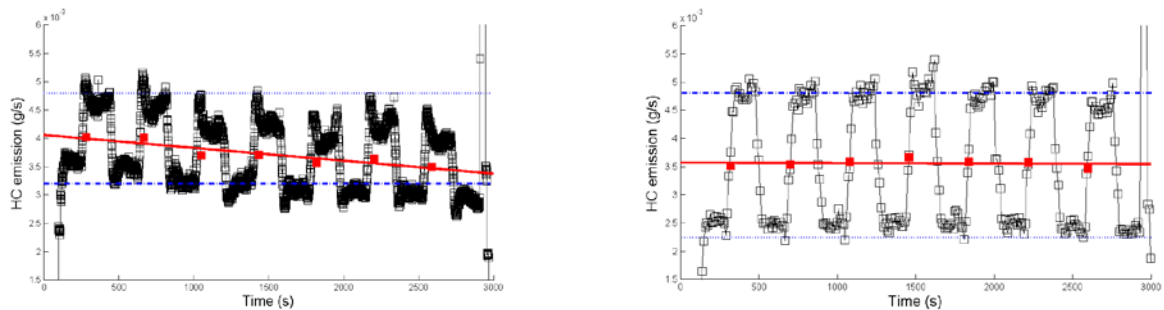


Figure 59 : Evolution des émissions de COVT sur un cycle à palier (à gauche : palier de régime et couple et à droite : palier de couple uniquement)

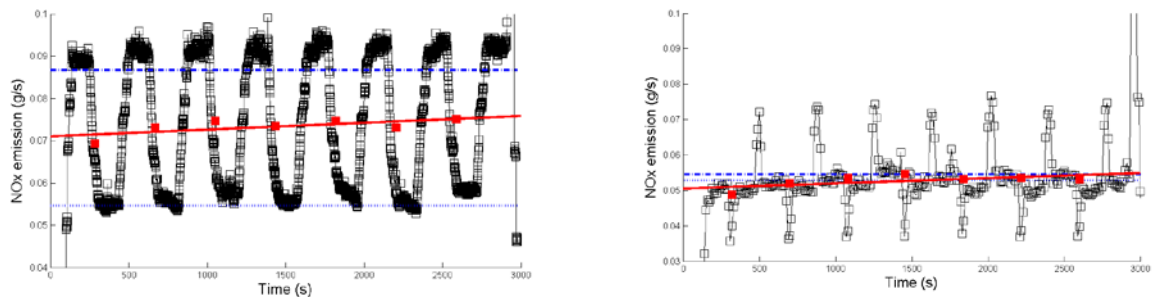


Figure 60 : Evolution des émissions de NOx sur un cycle à palier (à gauche : palier de régime et couple et à droite : palier de couple uniquement)

3.2.9 CAMPAGNE DE MESURAGE DE TERRAIN (IRSTEA)

3.2.9.1 PRÉSENTATION DU DÉROULEMENT DE LA CAMPAGNE

Une campagne de mesurage a été réalisée en situation réelle d'usage du tracteur. Elle s'est déroulée sur deux jours le 18 et 19 septembre 2014 à Montoldre, dans l'Allier. C'est le tracteur Massey Ferguson (Tier3a) qui a été utilisé pour cette campagne, le tracteur New Holland n'étant pas disponible pour faire ces mesures dans le temps imparti au projet.

Pour ces mesurages, le tracteur était équipé des systèmes d'enregistrements suivants :

- d'un enregistreur de données CAN : la fréquence d'acquisition dépend de la fréquence des messages spécifiques à chaque message
- d'un gps : le gps fournit et enregistre la position et la vitesse du véhicule (1 Hz)

- de l'analyseur de polluant gazeux Horiba : 5 valeurs par seconde pour une sortie à 1 Hz
- d'une centrale d'acquisition permettant de mesurer le débit gazeux à l'admission ainsi que la température du carburant (1 Hz)



Figure 61 : Equipement du tracteur pendant la campagne d'acquisition sur site : l'outil utilisé sur parcelle est un décompacteur (à droite) et le matériel de mesure des émissions polluantes est installée dans une benne attelée à l'avant du tracteur (à gauche)

Le tracteur a été utilisé pour 2 types d'activité :

- Déplacement : 3 séquences de transport ont été enregistrées sur le trajet aller-retour menant de l'exploitation à une parcelle. Le transport s'est effectué chargé (tracteur avec la benne attelée à l'avant et le décompacteur à l'arrière). Les trajets ont été effectués en utilisant la conduite automatique (gestion automatique des rapports de boîte de vitesses). Les mesurages ont été faits sur route ouverte et fréquentée. L'itinéraire fait un peu plus de 9 km.
- Décompactage : le décompactage du sol est réalisé avec un décompacteur ECO-MULCH à 5 dents associé à un rouleau qui permet de régler la profondeur de travail.

Cette profondeur était réglée à 25 cm pendant les essais. Un premier essai a été réalisé sur une parcelle (sol argileux) située à 3 km de l'exploitation. Le lendemain, suite à des orages, 3 essais ont été réalisés sur une autre parcelle ayant un sol plus sableux. Les essais consistaient en 2 passes (un aller-retour) correspondant à environ 10 minutes de travail. Il n'était pas possible d'enregistrer d'une seule traite toute une opération agricole. En effet, l'analyseur est soumis à beaucoup de vibration dans la benne.

Il arrive que l'enregistrement s'arrête de lui-même sous l'effet de ces vibrations. Dans ce cas, toute l'acquisition est perdue, ce qui a été le cas lors d'une campagne précédente et lors de cette campagne (voir plus bas). Aussi, nous avons limité les séquences à une trentaine de minutes de façon à vérifier régulièrement et garantir la bonne acquisition des données. Au cours de ces essais, différents régimes du moteur ont été testés : l'essai à 1400 tr/min (régime du couple maximum) n'est pas exploitable, la séquence ayant été interrompue par le calage du moteur qui a empêché l'enregistrement des paramètres moteurs.



Figure 62 : Opération de décompactage du sol sur la parcelle des palaquins- jour 2

Pour le transport, la dernière séquence est incomplète : les mesurages se sont interrompus après 18 minutes et 7,9 km. L'interruption n'a pas été remarquée en cours d'expérimentation et nous n'avons pas pu refaire une séquence supplémentaire. La séquence a néanmoins été analysée car nous avons enregistré les valeurs sur plus de 80% du trajet.

Comme pour les mesurages sur banc, les valeurs de débits reposent sur le bilan carbone et les émissions de NOx sont corrigées de l'humidité. Les mesurages de concentrations instantanées et consommations sont lissés en faisant la moyenne glissante sur 3 points autour de chaque mesure.

Cette procédure permet d'éviter l'apparition de quelques valeurs de débit massique d'échappement anormalement élevées ou négatives : ces valeurs anormales apparaissent 2 à trois fois sur chaque séquence et peuvent venir d'un déphasage mineur entre le relevé de consommation et le relevé de CO₂. Les mesures instantanées d'émissions sont corrigées des conditions atmosphériques et de l'humidité avec les mêmes procédures que celles décrites dans la réglementation pour les essais instationnaires.

Pour le mesurage du monoxyde de carbone, l'appareil enregistre des dérives très importantes et si on prend en compte la correction de la dérive, les mesures de concentration deviennent systématiquement négatives en cours de séquence. Aussi, la correction de la dérive n'est pas appliquée sur ce polluant, mais les mesures sont à considérer avec précaution.

La consommation de carburant et du couple équivalent à l'arbre, et par suite de la puissance mécanique, sont déterminées à partir des courbes d'étalonnage établies au cours de la campagne banc et présentées dans le paragraphe précédent.

On présente ici différentes visualisations des séquences de travail effectuée pendant l'expérimentation de terrain. Chaque séquence a été programmée de façon à correspondre environ à 15 min, soit la durée approximative d'un cycle de conduite. Le trajet effectué pour les séquences de transport est représenté sur une carte sur la Figure 63. Les aller-et-retour effectués sur les séquences de décompactage sont représentées sur la Figure 64.



Figure 63 : Visualisation du trajet suivi pour les 3 séquences de déplacement sur route du 18 septembre



Figure 64 : Visualisation du trajet réalisé pour une séquence de décomptage sur la parcelle 1 (à gauche) et 2 (à droite)

Sur les enregistrements, les portions de ralenti en début et fin de séquence ont été volontairement réduites : leurs durées sont de toute façon peu représentatives de la réalité car elles correspondent aux réglages de l'appareil de pollution. En effet, le fonctionnement de l'appareil de mesure des émissions gazeuses, nécessite une intervention manuelle pour lancer l'acquisition en début et en fin de séquence, afin d'assurer l'étalonnage et la mesure des zéro et dérives des différentes cellules de mesure.

Sur la Figure 65, on observe l'évolution de la vitesse du véhicule pendant une séquence de travail sur parcelle. La vitesse du « gps » est non signée, c'est-à-dire, qu'on ne peut pas savoir à partir de cette valeur si le tracteur avance ou recule. L'information est connue grâce aux données CAN qui contiennent le sens de rotation des roues. Sur les bords de l'enregistrement, et autour de 430 secondes, on remarque que la vitesse pratiquée diffère du reste de l'enregistrement : ce sont les instants de manœuvre pour amorcer le travail, faire demi-tour et dégager le tracteur de la parcelle en fin d'enregistrement. Ils sont encadrés en vert sur la figure.

Le long du sillon, la vitesse est plus régulière et correspond à la vitesse de travail. Si le profil présente quelques paliers très nets où la vitesse est réellement constante, on observe également quelques secondes où la vitesse chute plus brutalement : ces chutes correspondent aux pertes d'adhérence.

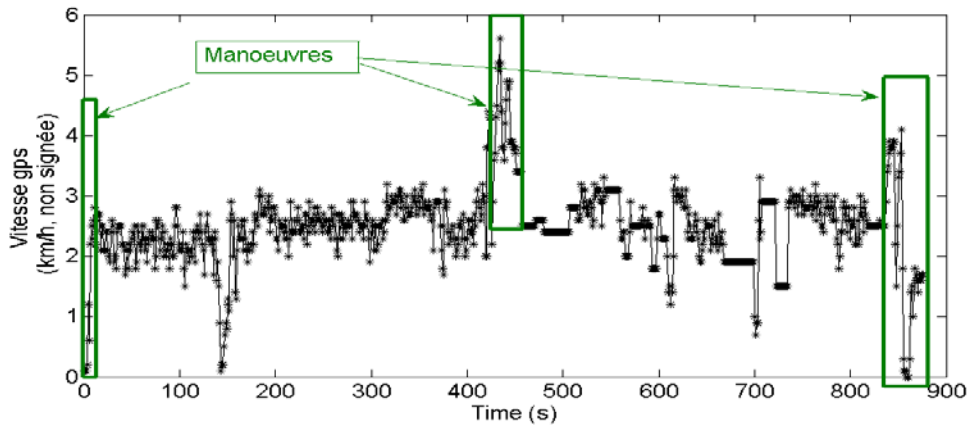


Figure 65 : Evolution de la vitesse du véhicule au cours d'une séquence de décompactage du sol (séquence 1)

On met en parallèle les conditions de fonctionnement du moteur, qui sont représentées sur la Figure 66. On observe que les périodes de manoeuvres sont plus faciles à identifier sur le couple du moteur, la vitesse de rotation du moteur restant toujours constante. Les effets de perte locale d'adhérence sont moins visibles sur ces variables.

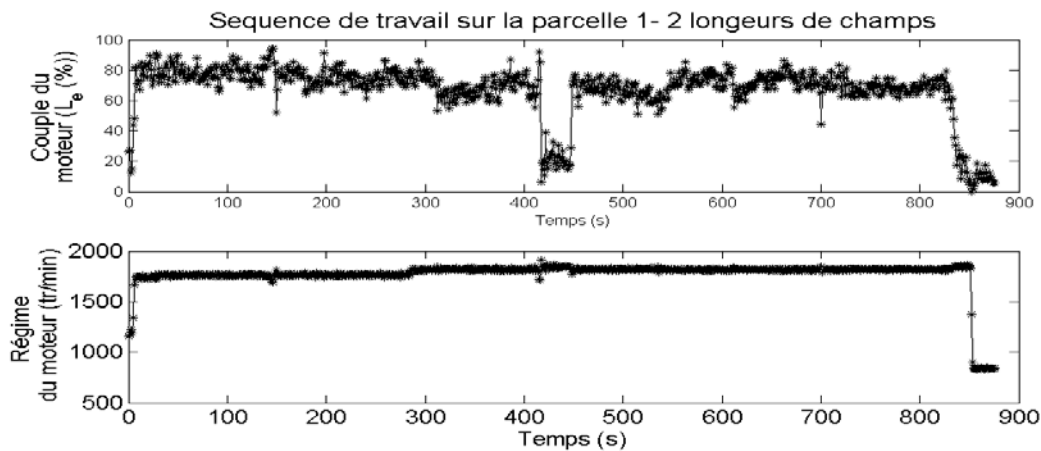


Figure 66 : Evolution des conditions de fonctionnement du moteur pendant une séquence de décompactage (séquence 1)

Ces mêmes données sont représentées sous la forme d'un histogramme sur la Figure 67. On voit apparaître sur ces séquences la forme bimodale caractéristique du fonctionnement du moteur des tracteurs pour les travaux sur parcelle. L'importance du mode ralenti est cependant réduite par rapport à l'usage réel, du fait du mode opératoire spécifique aux mesurages des émissions polluantes (1 seul aller et retour, pas de temps de réglage).

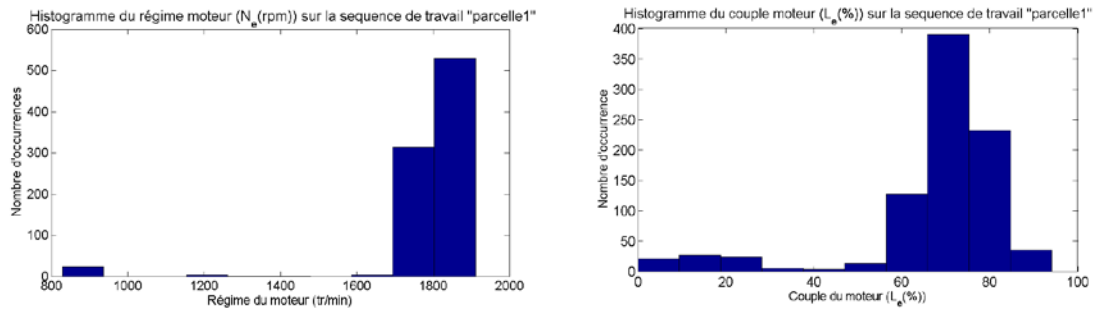


Figure 67 : Distribution du régime du moteur (à gauche) et du couple (à droite) pendant la séquence de décompactage (séquence 1)

La distribution des variables du moteur sur les séquences de transports est représentée sur la Figure 68. Pour le régime, on observe toujours une distribution bimodale, avec le mode ralenti à 850 tr/min et le mode croisière à 1500 tr/min. La sélection automatique du rapport de boîte induit cette surreprésentation du régime de 1500 tr/min.

Pour le couple, la structure bimodale disparaît pendant le transport pour faire place à une distribution beaucoup plus étalée. Le mode ralenti (10 %) reste plus fréquent que toutes les autres valeurs de couple. Cette distribution correspond à celle du cycle NRTC dans lequel toutes les valeurs intermédiaires sont bien représentées, y compris les valeurs de couples faibles (voir Figure 36).

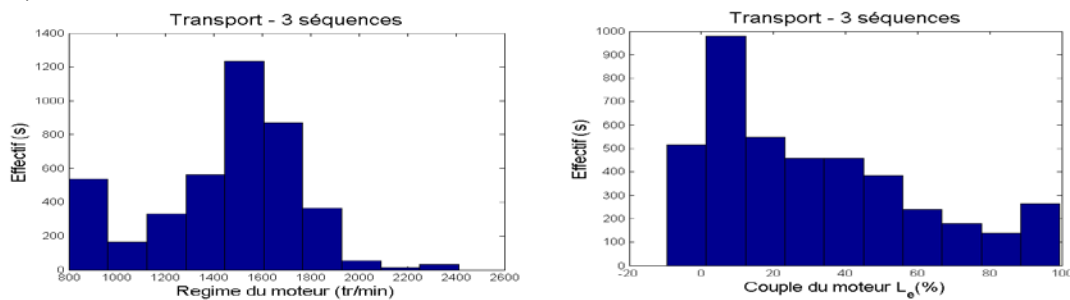


Figure 68 : Distribution du régime du moteur (à gauche) et du couple (à droite) pendant les séquences de transport

Sur ces séquences, on calcule les dérivés du couple moteur et du régime adimensionné. La valeur moyenne des dérivées est nulle et on retrouve des écarts-types très similaires à ceux calculés sur le cycle US-EPA. L'écart-type de la dérivée du régime est un peu plus élevée en transport, mais elle reste très en dessous de la valeur du cycle d'essai NRTC : les séquences de transport se font avec le passage automatique des vitesses : ceci peut expliquer que les fluctuations de régime soient faibles. Pour le couple, les fluctuations mesurées en transport sont proches des valeurs du cycle NRTC. Ces valeurs viennent confirmer le manque de représentativité du cycle NRTC vis-à-vis des activités agricoles.

Tableau 56 : Ecart-type des dérivés des couples et des régimes sur les différentes séquences de conduites enregistrées pendant la campagne de terrain

	US-EPA	Décompactage			Transport		
		Séq. 1	Séq. 2	Séq.3	Séq. 1	Séq. 2	Séq. 3
$\sigma_{\partial N / \partial t}$ (10^{-2} pourcent /s)	3.4	2.9	3.3	3.7	4.3	4.4	4.8
$\sigma_{\partial t / \partial t}$ (10^{-2} pourcent /s)	6.3	6.7	5.1	6.5	14.8	15.0	16.9

3.2.9.2 SYNTHÈSE DES MESURAGES EFFECTUÉS EN TRANSPORT

Les caractéristiques moyennes des séquences sont présentées dans le Tableau 57. On observe que les vitesses moyennes pratiquées sont relativement différentes d'un trajet à l'autre : le chauffeur a parfois ralenti pour laisser passer d'autres véhicules, ce qui peut expliquer la vitesse assez basse observée sur la première séquence. On apprécie la variabilité des mesures en calculant l'écart-type des valeurs rapporté à la valeur moyenne. La variabilité des conditions opératoires est élevée (près de 15% pour les vitesses) et explique la variabilité importante des mesures d'énergie (consommation et énergie mécanique).

Tableau 57 : Synthèse des séquences de transports: consommations de carburant et distances parcourues

Séquence	Durée (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)	Consommation (l)	Energie mécanique (kWh)
1	1665	9099	19,7	4,13	8,37
2	1411	9132	24,6	3,66	8,89
3	1086	7889	26,3	3,35	10,76
$\sigma/\mu(\%)$			14,6	10,4	13,5

Les facteurs d'émissions sont calculés par intégration sur chaque séquence à l'aide de la formule suivante :

Équation 7

$$FE = \int \dot{m}_{pol}(t).dt / \int \dot{p}_{pdf}(t).dt$$

où \dot{m}_{pol} est l'émission instantanée massique du polluant pol et \dot{p}_{pdf} est la puissance instantanée à la prise de force calculée à partir des valeurs de N_e et L_e .

Les valeurs intégrales d'émissions sont aussi déterminées et ramenées à la consommation totale de carburant et à la distance parcourue :

Équation 8

$$FE_{km} = \int \dot{m}_{pol}(t).dt / \int v(t).dt \text{ et } FE_{fuel} = \int \dot{m}_{pol}(t).dt / \int \dot{m}_{fuel}(t).dt$$

Ces facteurs d'émissions sont présentés dans le Tableau 58, où on les compare aux valeurs mesurées sur banc.

Tableau 58 : Facteur d'émission en condition réelle de transport – moyenne des valeurs mesurées sur 3 séquences et écart-types des valeurs – tracteur Tier3a

	Carburant	CO	CO2	COVT	NOx
<i>[g/kWh]</i>					
Mesure banc (série Irstea)	307	1,88	965	0,24	3,39
Moyenne (écart-type)	327 (28)	2.25 (1,7)	1162 (80)	0,38 (0,16)	6,65 (1,61)
<i>[g/g carburant]</i>					
Mesures banc (série Irstea)		6,1	3,15	0,79	12,0
Moyenne (écart-type)	-	33,2 (10,5)	3,07 (0,15)	1,08 (0,49)	19,1 (8,1)
<i>[g/km]</i>					
Moyenne (écart-type)	342 (0,01)	11,4 (3,9)	1 015 (0,04)	0,37 (0,17)	6,54 (2,86)
<i>[g/h]</i>					
Moyenne (écart-type)	8 067 (1 389)	273 (115)	23 880 (4 048)	8.29 (3.41)	151 (70.7)

Les valeurs d'émissions sont également exprimées en g/g de carburant pour les besoins de l'inventaire, ainsi qu'en g/km. Ces dernières sont très élevées par rapport aux émissions des voitures particulières. La technologie de ce tracteur est ancienne et explique en partie ces valeurs. La faible vitesse de circulation de l'engin est aussi un facteur explicatif. L'émission de CO : 11 g/km est notablement plus élevée que celle de 2 g/km pour un poids-lourd déterminée en 2010 dans [19]. Avec 6 g/km de NOx, l'émission est dans la fourchette haute d'un poids-lourd. L'émission de CO₂ de ce tracteur est un peu inférieure à celle d'un poids-lourd de 32 tonnes.

3.2.9.3 SYNTHÈSE DES MESURES EFFECTUÉES SUR PARCELLE

La réalisation des mesurages sur parcelle a été plus difficile : le 18 septembre, l'expérimentation a été arrêtée du fait d'un épisode pluvieux. Le lendemain, les mesurages ont repris, mais nous avons dû travailler sur une autre parcelle ayant un sol sableux et assez sec, la première parcelle ayant été trop détrempée par une forte averse matinale pour que nous puissions y travailler avec l'outil de décompactage. Les conditions d'adhérence étaient moyennes et le glissement a été assez semblable (22-23%) sur toutes les séquences, y compris dans la première parcelle. Pendant la matinée, nous avons aussi tenté de tester plusieurs réglages du moteur. Mais toutes les séquences d'essai n'ont pas pu être exploitées. Par exemple, les essais réalisés « au couple maximum » n'ont pas été correctement enregistrés, car le tracteur a calé pendant la séquence dans une zone où le sol de la parcelle est plus difficile à travailler. Aussi, les valeurs obtenues sur ces 3 enregistrements ne permettent pas de faire une analyse de la variabilité des mesures de pollution sur une même séquence de travail: elles illustrent plutôt la variabilité des conditions de fonctionnement du moteur qu'on peut trouver pendant la réalisation d'une même opération agricole. Cette variabilité est représentée sur la Figure 69 où on voit les distributions de régime et de couple : on observe bien les choix de régime bien différenciés sur chacune des séquences.

Les couples correspondant sont d'autant plus élevés que les régimes sélectionnés pour l'opération sont faibles. Leur dispersion est toujours plus élevée que celle correspondant au régime.

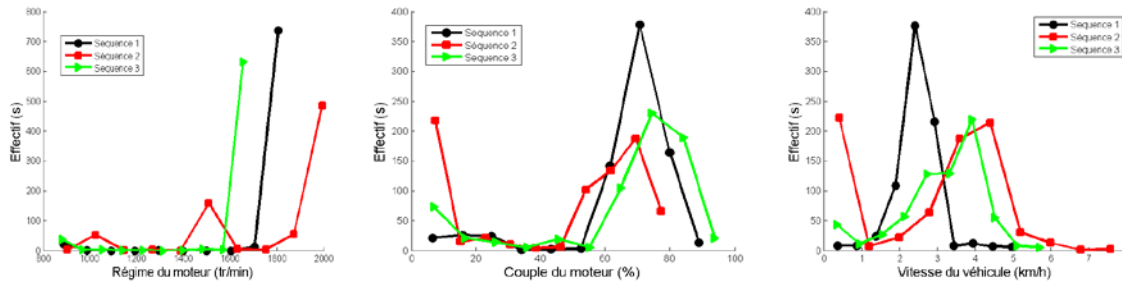


Figure 69 : Distribution des conditions de fonctionnement du moteur et vitesse du véhicule pendant les séquences de travail sur parcelle : chaque séquence de travail a fait l'objet d'un réglage différent

La séquence 2 est particulière : au démarrage de la séquence, les réglages étaient basés sur une vitesse de rotation du moteur de 1500 tr/min. Au bout d'une minute, le conducteur s'est aperçu qu'il ne parviendrait pas à traverser une zone de terre plus meuble et le réglage a été modifié. L'arrêt pour faire la modification a pris environ 2 minutes et demie, ce qui est plus long que les périodes de ralenti en début et fin de séquence. C'est ce qui explique la plus grande proportion d'enregistrements à couple faible et à vitesse nulle sur cette séquence.

Nous avons choisi de conserver l'intégralité de la séquence 2 dans l'analyse pour 2 raisons : les réglages étant fréquents, il nous est apparu important de les inclure pour améliorer la représentativité des mesures. D'autre part, il a paru important de raisonner sur une même distance de travail et conserver ainsi une certaine proportionnalité avec les hectares travaillés. Dans cette séquence, le mode ralenti est sur-représenté par rapport à la conduite habituelle du fait que nous n'effectuons qu'un aller-retour. Dans les autres séquences, il est en fait sous-représenté par rapport aux valeurs rapportées dans le chapitre précédent.

Tableau 59 : Caractéristiques des 3 séquences de décompactage

Séquence	Durée (s)	Distance (m)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation (l)	Energie mécanique (kWh)
1	774	536	2,5	3,55	14,6
2	762	593	2,8	2,78	10,1
3	681	591	3,1	2,78	11,5

L'influence des arrêts ou périodes de ralenti est souvent négligée. Pourtant, cet arrêt explique pourquoi la vitesse moyenne pratiquée sur l'ensemble de l'opération 2 est inférieure à celle de la séquence 3 alors que la vitesse de travail, de 3,6 km/h, est légèrement plus élevée (voir

Tableau 60). La consommation horaire de carburant, affichée au tableau de bord pendant la séquence 2 est également plus élevée que pour la séquence 3, alors que la quantité totale de carburant dépensée est la même pour les 2 séquences.

Tableau 60 : Caractéristiques de fonctionnement pendant la séquence de travail (valeurs médianes des points hors arrêt ou manœuvre)

Séquence	Vitesse de travail (km/h)	Régime de travail (tr/min)	Couple de travail (%)	Puissance de travail (kW)	Consommation affichée (l/h)
1	2,5	1820	70,7	73,4	21,5
2	3,6	2015	65,1	72,5	22,4
3	3,4	1650	76,1	72,6	20,3

Ici, on aborde en fait la question des taux de charge des moteurs : pendant le travail sur la ligne, la sollicitation du moteur, voisine de 73 kW, est à peu près identique pour les 3 séquences : elle se décline en différents réglages de régime, de couple et des vitesses d'avancement contrastées en relation avec la nature du sol. Le taux de charge guide le choix des points balayés sur la cartographie pour les essais au banc. Mais le coefficient de charge (load factor) désigne aussi le nombre de kWh fournis par le moteur dans l'approche inventaire : c'est la puissance moyenne utilisée au cours de l'année, ramenée à la puissance nominale du moteur (ici, 100 kW). Il vaut respectivement 0,67, 0,48 et 0,61 respectivement pour les séquences 1, 2 et 3. Dans nos expérimentations, les sollicitations exprimées en puissance instantanée « au travail » sont très proches : les consommations horaires varient effectivement de +/- 5 % selon les choix de réglage. Mais le coefficient de charge moyen varie beaucoup plus que les consommations horaires et il est d'autant plus faible que les durées passées au ralenti sont longues. La dépense d'énergie totale dépend beaucoup de la durée d'intégration de ces consommations horaires : ici, elle varie de +/- 13 % selon les séquences. La dépense d'énergie totale la plus importante correspond à la séquence la plus longue et non pas à la séquence où la consommation horaire affichée est la plus élevée.

Négliger les périodes de ralenti n'a pas trop de conséquences sur l'estimation des consommations. C'est ce qu'on observe sur la séquence 2, pour laquelle on observe l'évolution du couple moteur sur la Figure 70. En dessous, on trace l'évolution de la quantité de polluant/carburant émise ou consommée : ces quantités s'accroissent régulièrement au fur et à mesure de la séquence. Cette séquence se termine par une minute de ralenti (remontée de l'outil, descente de la benne avant la coupure de l'analyseur). Au début de cette sous-séquence, on est à 98,8 % du carburant utilisé : la contribution de cette période à la consommation totale est donc très faible (1,2 %). Elle l'est un peu moins si on regarde les émissions polluantes de COVT et de NOx, à qui il manque encore 5% et respectivement 7% du total.

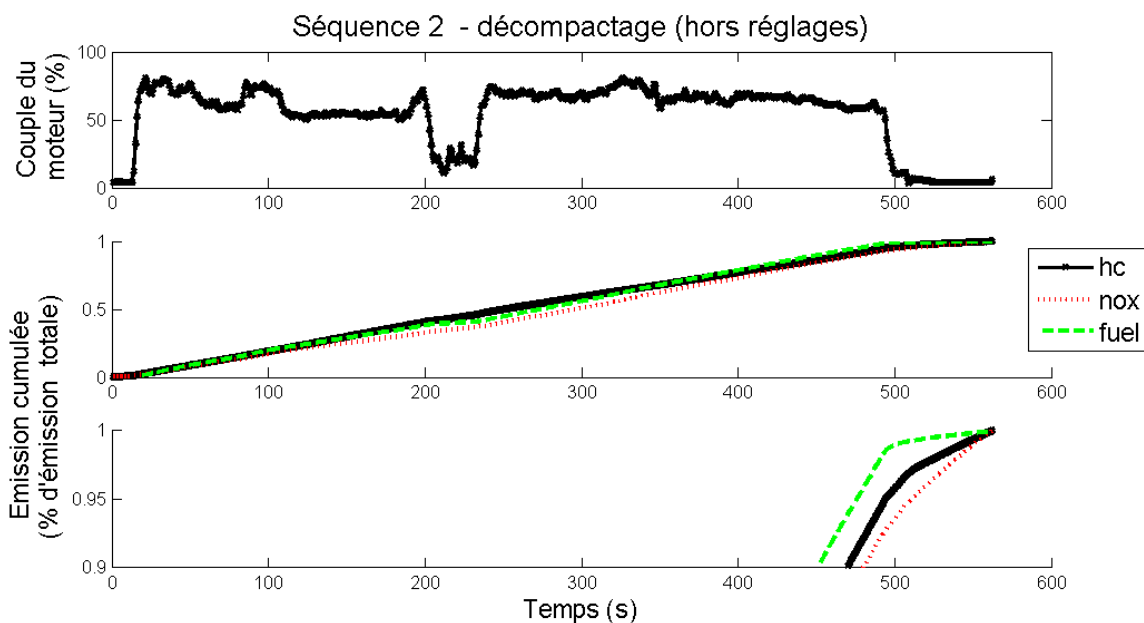


Figure 70 : Evolution du couple et des émissions polluantes de NOx et COVT au cours de la séquence 2

On rassemble dans le Tableau 61 les valeurs de facteurs d'émission déduites de cette campagne de terrain. En observant les valeurs ramenées en g/kWh, on remarque que la consommation spécifique du tracteur est meilleure que la valeur mesurée au banc. La séquence portant sur des charges du moteur importantes, le rendement de l'engin est meilleur et la consommation spécifique diminue. Les émissions de CO₂ suivent cette tendance et diminuent de 20% par rapport aux émissions sur banc d'essai. Les valeurs d'émission de COVT et NOx de terrain sont similaires aux valeurs mesurées sur le banc de tracteur. Seules, les émissions de monoxyde de carbone augmentent de 120% : elles présentent aussi une dispersion très grande selon les séquences et ce, contrairement aux autres substances.

Tableau 61 : Facteurs d'émissions polluantes mesurés pour une opération de décompactage – Tracteur Tier3a

	Carburant	CO	CO ₂	COVT	NO _x
[g/kWh]					
Mesure banc	307	1,88	965	0,24	3,39
Moyenne (écart-type)	254 (19)	4,1 (2,2)	793 (60)	0,25 (0,08)	3,03 (0,18)
[g/g carburant]					
Mesures banc			3,15	0,79	12,0
Moyenne (écart-type)	-	15,91 (7,1)	3,13 (0,00)	0,98 (0,23)	12,0 (0,90)
[g/km]					
Moyenne (écart-type)	5 340 (1,11)	81,5 (26,9)	16 700 (0,4)	5,09 (0,80)	64,4 (14,5)
[g/h]					
Moyenne (écart-type)	14 790 (1 700)	2.31 (0.78)	46 263 (5 325)	14.2 (1.72)	179 (29)

Dans le bas du tableau, on présente les valeurs d'émission ramenée aux kilomètres parcourus. Pour cette application, les kilomètres parcourus n'ont pas le même sens que pour les applications transport. La distance parcourue est proportionnelle aux hectares de travail, à la largeur de l'outil près. Pour une même surface réalisée, la distance parcourue dépend en fait de la taille et de la forme de la parcelle, de la largeur de l'outil utilisé. Pour des travaux lents, un tracteur peut par exemple parcourir une vingtaine de kilomètre pour 5 heures de chantier. Néanmoins, on mesure à travers la consommation par kilomètre le volume de consommation des engins agricoles. On peut mieux saisir, à travers cette grandeur, l'intérêt des outils de grandes largeurs, qui, lorsque la machine est capable de les tirer, permettant de réduire significativement les distances parcourues.

Enfin, les émissions de NO_x sur parcelle (g/kWh) sont plus faibles que pendant le transport. Mais le moteur est en moyenne plus chargé et la quantité de NO_x émise à l'heure est donc en fait plus élevée : cette unité est très sensible à la taille du moteur utilisée pendant les travaux. Les émissions de COVT sont également plus faibles et stables d'une séquence à l'autre. Les changements de réglages n'ont eu que peu d'impact sur ces deux polluants.

3.2.10 DÉTERMINATION DES FACTEURS D'ÉMISSIONS DES TRACTEURS TESTÉS (IRSTEA)

A partir des émissions massiques de polluants et des puissances mesurées, on reconstitue le facteur d'émission de chacun des tracteurs testés :

Équation 9

$$EF_{pol} = \frac{\sum_{8points} w_i \dot{q}_{i,pol}}{\sum_{8points} w_i P_{i,pol}} = \frac{\bar{C}_{pol,nrsc} \bar{q}_{exh,m,nrsc}}{\bar{P}_{nrsc}}$$

Les valeurs de pondération sont reprises de la norme ou sont directement intégrées dans la durée des paliers du cycle NRSC. Des valeurs d'émissions en fonction de la consommation de carburant sont calculées pour les besoins de l'inventaire.

Pour les essais sur le tier3b, il manque un point d'essai du protocole. Les sommes ne sont faites que sur 7 points (émissions et puissance). Les mesures de COV, CH₄ et COVnm étant proches des limites de quantification, nous avons utilisé la demi-valeur de quantification lorsque pour les points très proches des blancs ou négatifs. Le tracteur est affecté à la classe 75 kW-130kW, conformément aux indications apposées sur la plaque moteur et sans tenir compte de la puissance additionnelle disponible.

Les émissions de ce tracteur sont inférieures aux valeurs limites réglementaires pour tous les polluants testés. Les émissions de particules sont également très faible et proche des blancs. Néanmoins, la masse totale de particule correspond aux valeurs d'émission des IP solides. La part des IP condensables est importante.

Tableau 62 : Emission de polluant à chaud du tracteur tier3b testé au banc d'essai, ramenée à la puissance (colonne 3) et à la consommation de carburant (colonne 4) – Comparaison aux valeurs réglementaires EF/VLE (colonne 5, sauf HAP % de l'espèce dans les HAP) – voir le texte pour plus de détails

Substance	unité	EF unité/kWh	EF unité/kg carburant	EF / VLE
carburant	g	215		
CO ₂	g	855	3980	
CO	g	0,60	2,80	0,12
NO _x	g	2,16	10,0	0,65
NO ₂	g	0,11	0,53	
COVT	g	0,05	0,23	0,26
CH ₄	g	0,03	0,14	
COVnM	g	0,02	0,11	
IP solides	mg	20,5	95,2	
IP condensables	mg	48,9	227	
IP Tot	mg	69,3	323	
PM ₁	mg	2,40	11,2	
PM _{2,5}	mg	7,77	36,1	
PM ₁₀	mg	13,5	63,0	
PM _{10+D>10µm}	mg	19,1	88,8	0,95
Nombre total		1,454E+08	6,77E+08	
Fluoranthène	ng	2081	9682	63 %
Benzo (a) anthracène	ng	246	1142	7,5 %
Benzo (b) fluoranthène	ng	238	1107	7,2 %
Benzo (k) fluoranthène	ng	98	456	3 %
Benzo (a) pyrène	ng	85	395	2,6 %
Dibenzo (a,h) anthracène	ng	41	189	1,3 %
Benzo (g,h,i) pérylène	ng	172	395	5,3 %
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	ng	396	799	12,1 %
Somme des HAP totaux	ng	3278	15612	100 %

Pour le tracteur tier3a, les facteurs d'émission sont également reconstitués en g/kWh pour la comparaison du projet et en g/g de carburant pour les besoins de l'inventaire. Les valeurs limites réglementaires sont respectées pour les émissions de CO et de particule. Le seuil est dépassé pour la valeur (COVT+NOX) ce qui explique le coefficient de dépassement, identique car appliqué forfaitairement à ces 2 polluants. Ce dépassement peut s'expliquer par les conditions d'essai, différentes de l'essai réglementaire et par l'incertitude de mesure sur les NOx. L'usure du moteur peut aussi être légitimement invoquée, vu l'ancienneté et le nombre réalisé par le tracteur testé. L'intégralité des émissions particulières se fait dans la gamme de très faible taille.

Les émissions de méthane sont négligeables. Les émissions de HAP sont constituées très majoritairement de fluoranthène, tandis que le Benzo (g,h,i) pérylène et l'Indeno (1,2,3-c,d) pyrène sont très peu présents.

Tableau 63 : Emissions de polluant à chaud du tracteur tier3a testé au banc, ramenée à la puissance (colonne 3) et à la consommation de carburant (colonne 4) – Comparaison aux valeurs réglementaires EF/VLE (colonne 5, sauf HAP % de l'espèce dans les HAP) – voir le texte pour plus de détails

Substance	unité	EF unité/kWh	EF unité/kg carburant	EF / VLE
Carburant	g	307		
CO ₂	g	1196	3901	
CO	g	1,88	6,1	0,38
NO _x	g	4,56	14,9	1,20
NO ₂	g	0,40	1,3	
COVT	g	0,22	0,7	1,20
CH ₄	g	0,00	0	
COVnM	g	0,22	0,7	
IP solides	mg	196	640	
IP condensables	mg	119	389	
IP Tot	mg	-		
PM ₁	mg	152	495	
PM _{2,5}	mg	152	495	
PM ₁₀	mg	152	495	
PM _{10+D>10µm}	mg	152	495	0,51
Nombre total		6,28E+08	2,05E+09	
Fluoranthène	ng	8785	28648	90%
Benzo (a) anthracène	ng	297	970	3%
Benzo (b) fluoranthène	ng	203	664	2%
Benzo (k) fluoranthène	ng	86	280	<1%
Benzo (a) pyrène	ng	85	278	<1%
Dibenzo (a,h) anthracène	ng	81	266	<1%
Benzo (g,h,i) pérylène	ng	107	350	1%
Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	ng	99	323	1%
Somme des HAP	ng	9744	3178	100%

Les mesures de terrain permettent de formuler un facteur d'émission représentatif d'une opération de travaux du sol. Pour cela, il est supposé que le tracteur consacre 10% de son temps au déplacement et 90% de son temps au travail sur parcelle.

A partir des facteurs d'émission de terrain correspondant à chacune des activités, une émission moyenne est reconstituée dont les valeurs sont présentées dans le Tableau 64. Ainsi, une consommation spécifique du tracteur sur l'opération de 261 g/kWh est obtenue. Les fortes émissions de polluant pendant la phase de transport sont compensées par de plus faibles émissions sur la phase de travail.

Le bilan produit alors un facteur d'émission moyen qui respecte les valeurs réglementaires. Le changement d'analyseur de NOx entre les essais banc et terrain explique aussi une partie de la bascule en dessous du seuil réglementaire.

Tableau 64: Facteurs d'émissions du tracteur testé sur le terrain (mg/g carburant)
- (10% transport et 90% travail lourd)

	CO	NOx	COVT (eq 1C)	CO ₂
Phase IIIa « terrain »	17,6	12,7	0,99	3 124
Ratio Mesure/VLE	0,78	0,91	0,91	-

3.2.11 SYNTHÈSE RELATIVE À LA CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS DES TRACTEURS

Dans ce chapitre, nous avons vu que les réglementations relatives aux EMNR avaient beaucoup évolué ces dernières années, notamment pour ce qui concerne les conditions d'essai des engins. Si les VLE n'ont pas changé, les méthodes actuelles d'essai intègrent maintenant une part à froid à l'intérieur de la VLE et un cycle d'essai dynamique est proposé pour les phases réglementaires en cours.

Nous nous sommes interrogés sur la représentativité du cycle WHTC ou NRTC comme cycle de conduite d'un engin agricole. La polyvalence des usages et des réglages des groupes motopropulseurs dans cette catégorie d'engin impose en effet de réaliser un balayage ample de la cartographie moteur pour les EMNR.

Nous avons aussi mis en évidence la sévérité du cycle qui est typique d'un usage « transport » et moins pertinent pour caractériser un usage agricole où les sollicitations du moteur sont moindres.

Pour les campagnes de mesurage des émissions de deux tracteurs, correspondant chacun à une phase différente de réglementation 3a et 3b, le protocole d'essai a été conçu pour étudier les émissions de polluants en fonction des conditions de fonctionnement du moteur. Les concentrations de polluants gazeux réglementés CO, NOx, COVT dans les gaz d'échappement diminuent de tier3a à tier3b.

Les valeurs de concentration en méthane sont très faibles et souvent en dessous des limites de quantification pour les 2 modèles. La majorité des particules émises ont un diamètre de 30 à 40 nm, comme pour les motorisations diesel. Sur la dernière génération, la présence d'un filtre à particule permet de diminuer sensiblement les concentrations dans les émissions.

Les émissions à froid ont été déterminées et la durée équivalente du froid est estimée à moins de 10 minutes de fonctionnement pour les hydrocarbures imbrûlés. Des cycles bimodaux simulant une conduite oscillant entre 2 points de fonctionnement, typique d'un travail agricole, conduisent à des émissions semblables à la moyenne pondérée de chaque mode pris isolément.

Enfin une campagne de mesurage a permis de suivre les émissions polluantes en condition réelle de conduite. Les facteurs d'émissions des polluants gazeux réglementés correspondant à chacune des activités de transport et de travail à la parcelle ont été déterminés à partir des caractéristiques des émissions à l'atmosphère et des paramètres de fonctionnement moteur.

Comparée aux valeurs mesurées sur banc d'essai, la consommation spécifique de carburant est élevée en transport, tandis qu'elle diminue au cours des travaux lourds.

Les émissions de COVT, NOx et CO augmentent en transport et dépassent parfois les seuils réglementaires. Cependant, les valeurs recueillies sont très dispersées selon la séquence observée, surtout pour le CO et COVT.

Le facteur d'émission est ramené en g/km et les valeurs mesurées s'avèrent comparables à celle d'un poids-lourd de plus ou moins grande taille selon les polluants.

Pour le travail du sol, les émissions de COVT et NOx sont proches des valeurs mesurées sur banc d'essai et les émissions de CO₂ diminuent significativement. Seule, l'émission de monoxyde de carbone augmente très fortement pour ce travail, mais reste en dessous des seuils réglementaires.

L'ensemble des résultats de mesurage est synthétisé sous la forme de facteurs d'émission exprimés tantôt en fonction des kilowattheures d'énergie mécanique développée, tantôt en fonction des quantités de carburant utilisées. Les facteurs d'émission sont déterminés pour toutes les substances mesurées sur banc d'essai, y compris pour les HAP et les particules en nombre.

4. MISE A JOUR DES SCENARII D'EMISSION (CITEPA)

Suite à la détermination de facteurs d'émissions de plusieurs engins agricoles par l'IRSTEA sur la base des essais réalisés dans le projet EMNR, plusieurs tests ont été réalisés par le CITEPA pour appréhender les écarts que générerait l'utilisation de facteurs d'émission issus de mesures comparés à l'utilisation des valeurs limites d'émission (VLE) comme c'est le cas actuellement. Ces tests ont été menés pour les substances réglementées NOx, COVNM, particules et CO.

4.1 TESTS SUR LES ENGIN DIESEL

L'inventaire actuel réalisé par le CITEPA.

L'inventaire actuel fonctionne en utilisant une estimation de l'évolution du parc de tracteurs ce qui permet d'associer les différents engins à des normes d'émissions lors de la mise en circulation. Les consommations de l'agriculture sont normalisées ou « bouclées » sur les consommations globales de l'agriculture estimée dans le bilan national de l'énergie réalisé par le SOeS.

Dans le cadre de cet exercice et pour mieux voir les impacts des changements de facteur d'émission sur les tracteurs les plus récents, des projections jusqu'en 2030 ont été réalisées mais sans mettre en œuvre de scénarios complexe les consommations et parcs étant supposés constants seul l'âge des engins et les facteurs d'émission associés évoluant entre 2014 et 2030.

Comme l'inventaire du CITEPA fonctionne de manière à englober toutes les consommations agricoles, les autres engins que les tracteurs agricoles sont présentés mais leurs facteurs d'émission n'ont pas été modifiés car leur poids dans l'inventaire est relativement négligeable comparé à celui des tracteurs agricoles et parce qu'il n'est pas évident que les essais portant sur les tracteurs puissent être facilement transposables à ces autres engins.

Parc pris en compte pour les engins diesel

Il est considéré dans les inventaires actuels une durée de vie des engins de 15 ans soit un renouvellement de 6,67% du parc chaque année.

Il est important de considérer dans ces analyses que les évolutions de parc donnent une tendance à la baisse significative grâce à l'évolution des normes et que par conséquent les écarts observés sur une norme entraîne des impacts assez peu perceptibles sur les résultats comparés à l'évolution forte des normes sur la période considérée. Les tracteurs testés correspondent à des tracteurs aux normes de phase III (A & B), et il est estimé que ces tracteurs atteindront un effectif maximum proche de 50% du parc sur la période 2014 – 2021.

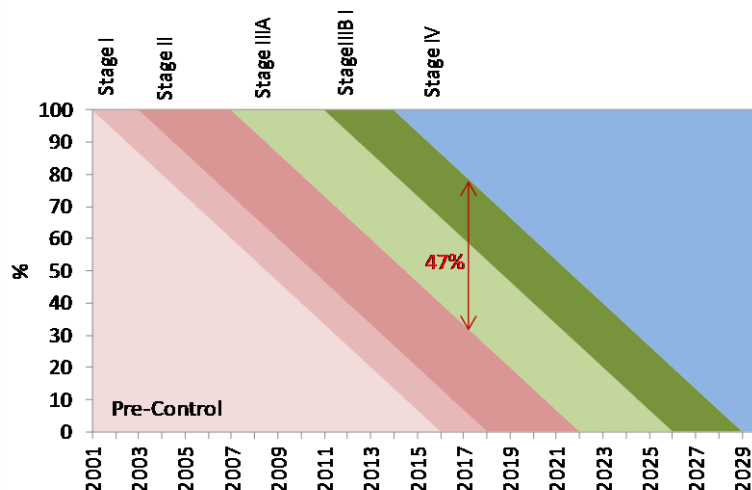


Figure 71 : Représentation graphique de la projection de l'évolution du parc EMNR de 2001 à 2029

Tableau 65 : Projection de l'Evolution du parc de 1960 à 2013

	Tracteurs agricoles	Automoteurs télescopiques	Moissonneuses batteuses	Ensileuses automotrices	Epaneur de lisier	Motoculteurs, motofaucheuses...	Presses à grosses balles	Pulvérisateurs automoteurs	Récolteuses de maïs automotrices	Tracteurs forestiers	Débusqueuses	Débardeuses
1960	700 000	16 822	117 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1961	765 000	16 822	117 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1962	830 000	16 822	129 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1963	900 000	16 822	142 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1964	950 000	16 822	152 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1965	1 010 000	16 822	163 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1966	1 050 000	16 822	177 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1967	1 085 000	16 822	196 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1968	1 115 000	16 822	214 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1969	1 145 000	16 822	196 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1970	1 205 000	16 822	178 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1971	1 291 000	16 822	161 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1972	1 305 000	16 822	172 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1973	1 319 000	16 822	178 000	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1974	1 338 002	16 822	156 512	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1975	1 363 872	16 822	153 743	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1976	1 373 223	16 822	154 446	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1977	1 400 303	16 822	145 486	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1978	1 413 848	16 822	148 285	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1979	1 425 354	16 822	150 392	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1980	1 474 484	16 822	142 867	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1981	1 485 491	16 822	144 974	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1982	1 494 496	16 822	147 482	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1983	1 495 897	16 822	148 686	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1984	1 492 295	16 822	149 726	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1985	1 492 094	16 822	131 731	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1986	1 485 791	16 822	150 994	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1987	1 481 988	16 822	151 862	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1988	1 476 285	16 822	128 420	3 647	2 055	112 921	70 950	12 428	13 065	6 700	2 715	1 767
1989	1 458 592	16 822	125 313	3 647	2 055	112 921	75 646	12 428	12 220	6 700	2 715	1 767
1990	1 440 899	16 822	122 207	3 647	2 055	112 921	80 341	12 428	11 375	6 700	2 715	1 767
1991	1 423 207	16 822	119 100	3 647	2 055	112 921	85 037	12 428	10 530	6 700	2 715	1 767
1992	1 405 514	16 822	115 994	3 647	2 055	112 921	89 732	12 428	9 685	6 700	2 715	1 767
1993	1 387 821	16 822	112 887	3 647	2 055	112 921	94 428	12 428	8 840	6 700	2 715	1 767
1994	1 370 128	16 822	109 781	3 647	2 055	112 921	99 124	12 428	7 996	6 700	2 715	1 767
1995	1 352 435	16 822	106 674	3 647	2 055	112 921	103 819	12 428	7 151	6 700	2 715	1 767
1996	1 334 742	16 822	103 567	3 647	2 055	112 921	108 515	12 428	6 306	6 700	2 715	1 767
1997	1 317 050	16 822	100 461	3 647	2 055	112 921	113 210	12 428	5 461	6 700	2 715	1 767
1998	1 299 357	16 822	97 354	3 647	2 055	112 921	117 906	12 428	4 616	6 700	2 715	1 767
1999	1 281 664	16 822	94 248	3 647	2 055	112 921	122 601	12 428	3 771	6 700	2 715	1 767
2000	1 263 971	16 822	91 141	3 647	2 055	112 921	127 297	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2001	1 246 462	16 822	88 914	3 647	2 055	104 745	127 523	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2002	1 228 953	16 822	86 686	3 647	2 055	96 569	127 749	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2003	1 211 443	16 822	84 459	3 647	2 055	88 394	127 976	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767

	Tracteurs agricoles	Automoteurs télescopiques	Moissonneuses batteuses	Ensileuses automotrices	Epandeur de lisier	Motoculteurs, motofaucheuses...	Presses à grosses balles	Pulvérisateurs automoteurs	Récolteuses de maïs automotrices	Tracteurs forestiers	Débusqueuses	Débardeuses
2004	1 193 934	16 822	82 231	3 647	2 055	80 218	128 202	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2005	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2006	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2007	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2008	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2009	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2010	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2011	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2012	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
2013	1 176 425	16 822	80 004	3 647	2 055	72 042	128 428	12 428	2 926	6 700	2 715	1 767
...												

Tableau 66 : Consommations de carburants diesel prises en compte dans les simulations

TJ	Carburants diesel		
	Fioul domestique	Gasoil non routier	Biodiesel
1960	35 112	0	0
1961	38 850	0	0
1962	42 588	0	0
1963	50 526	0	0
1964	52 878	0	0
1965	55 440	0	0
1966	63 756	0	0
1967	72 072	0	0
1968	77 007	0	0
1969	81 942	0	0
1970	91 745	0	0
1971	75 594	0	0
1972	85 092	0	0
1973	99 933	0	0
1974	100 691	0	0
1975	92 782	0	0
1976	96 369	0	0
1977	98 100	0	0
1978	101 011	0	0
1979	100 929	0	0
1980	100 263	0	0
1981	95 979	0	0
1982	96 736	0	0
1983	97 825	0	0
1984	98 493	0	0
1985	99 374	0	0
1986	100 681	0	0
1987	101 355	0	0
1988	103 085	0	0
1989	103 584	0	0
1990	104 172	0	0
1991	101 837	0	0
1992	102 240	0	0
1993	101 841	0	0
1994	103 243	0	0
1995	104 249	0	0

TJ	Carburants diesel		
	Fioul domestique	Gasoil non routier	Biodiesel
1996	103 166	0	0
1997	103 824	0	0
1998	103 593	0	0
1999	103 678	0	0
2000	105 281	0	0
2001	105 775	0	0
2002	107 662	0	0
2003	110 188	0	0
2004	117 337	0	0
2005	116 263	0	0
2006	115 188	0	0
2007	112 313	0	0
2008	116 576	0	0
2009	118 127	0	0
2010	116 029	0	0
2011	91 161	27 899	1 671
2012	0	111 346	6 945
2013	0	124 078	7 871
2014	0	124 109	9 066
2015	0	124 116	10 297
...			

Tableau 67 : Facteurs d'émission utilisés dans l'inventaire actuel

g/GJ fioul consommé	CO	PM	NOx	COVNM
PRE PHASE	492	140	1 333	224
PHASE I	472	77	876	124
PHASE II	472	36	667	124
PHASE IIIA	472	36	405	43
PHASE IIIB	472	2	362	38
PHASE IV	472	2	38	18

g/kWh fourni par les tracteurs	CO	PM	NOx	COVNM
PRE PHASE	5,0	0,9	9,2	1,3
PHASE I	5,0	0,4	7,0	1,3
PHASE II	5,0	0,4	4,3	0,4
PHASE IIIA	5,0	0,03	3,8	0,4
PHASE IIIB	5,0	0,03	0,4	0,2
PHASE IV	5,0	0,9	9,2	1,3

Tableau 68 : Facteurs d'émission testés issus des campagnes de mesure de l'IRSTEA

g/GJ fioul consommé	CO	PM	NOx	COVNM
PHASE IIIA (Banc moteur)	145	12	355	18
PHASE IIIA	419	Non disponible	302	24
PHASE IIIB	67	2	238	3

g/kWh fourni par les tracteurs	CO	PM	NOx	COVNM
PHASE IIIA	1,9	0,2	4,6	0,2
PHASE IIIB	0,6	0,02	2,2	0,02

4 simulations différentes comparées à 1 témoin (inventaire édition décembre 2014)

Test 1 : Les facteurs d'émission issus des VLE ont été remplacés pour les phases IIIA et IIIB sur la base des résultats obtenus sur banc d'essai moteur pour les deux engins correspondants. Les autres facteurs d'émission correspondants aux phases antérieures et à la phase IV n'ont pas été modifiés. Dans ce test ce sont les facteurs d'émission rapporté au kwh fourni par les machines qui ont été remplacés.

Test 2 : Le test 2 est similaire au test 1 sauf que ce sont les facteurs d'émission rapportés au GJ de fioul consommé qui ont été remplacés.

Test 3 : Comme pour le test 1 les facteurs d'émission issus des VLE ont été remplacés pour les phases IIIA et IIIB mais le ratio (Valeur mesurée)/VLE a été appliqué à tous les facteurs d'émission des phases antérieures et de la phase IV.

Ce sont les facteurs d'émission rapportés au kwh fourni qui ont été remplacés. Ce test reste assez peu réaliste, car les différences observées entre un appareil et les valeurs limite d'émission des normes auxquelles il est censé répondre peuvent difficilement s'étendre aux autres appareils répondant aux normes plus anciennes. Ce test est pertinent s'il s'avère que les normes traduisent un écart constant avec la réalité mais aucune information dans ce sens n'a été relevée.

Test 4 : Les facteurs d'émission issus des VLE ont été remplacés pour la phase IIIA par les facteurs d'émission mesurés sur l'appareil correspondant testé en condition réelle sur le terrain. Pour les phases ultérieures les valeurs ont été modifiées si la VLE était supérieure à celle corrigée pour la phase IIA. Ce sont les facteurs d'émission rapportés au GJ consommé qui ont été remplacés.

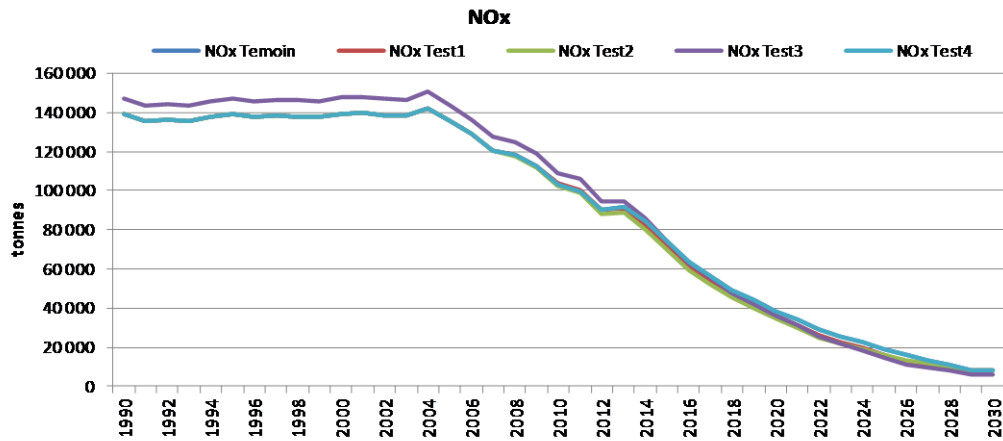


Figure 72 : Représentation graphique des résultats des tests pour les NO_x

Tableau 69 : Résultats des tests pour les NO_x

NOx (tonnes)	Témoïn	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1990	138 910	138 910	138 910	146 972	138 910
1991	135 785	135 785	135 785	143 663	135 785
1992	136 312	136 312	136 312	144 217	136 312
1993	135 769	135 769	135 769	143 639	135 769
1994	137 627	137 627	137 627	145 600	137 627
1995	138 955	138 955	138 955	147 002	138 955
1996	137 501	137 501	137 501	145 458	137 501
1997	138 365	138 365	138 365	146 369	138 365
1998	138 045	138 045	138 045	146 026	138 045
1999	137 691	137 691	137 691	145 674	137 691
2000	139 349	139 349	139 349	147 450	139 349
2001	139 549	139 549	139 549	147 686	139 549
2002	138 642	138 642	138 642	146 731	138 642
2003	138 301	138 301	138 301	146 384	138 301
2004	142 055	142 055	142 055	150 359	142 055
2005	135 579	135 579	135 579	143 508	135 579
2006	128 965	128 965	128 965	136 524	128 965
2007	120 518	120 518	120 518	127 601	120 518
2008	117 944	118 126	117 633	124 881	117 944
2009	112 270	112 638	111 640	118 877	112 270
2010	103 161	103 703	102 232	109 237	103 161
2011	99 820	100 571	98 531	105 711	99 820
2012	90 125	89 880	88 084	94 309	90 125
2013	91 972	90 604	88 828	94 868	91 972
2014	84 485	81 999	80 435	85 621	84 485
2015	74 358	71 849	70 271	74 698	74 358
2016	63 600	61 091	59 513	63 135	63 600
2017	56 477	53 967	52 389	55 442	56 477
2018	49 492	46 982	45 404	47 888	49 492
2019	44 073	41 564	39 986	42 007	44 073
2020	38 703	36 194	34 616	36 175	38 703
2021	33 898	31 389	29 811	30 908	33 898
2022	28 779	26 268	24 695	25 329	28 779
2023	25 617	22 896	21 891	21 840	25 617
2024	22 454	19 524	19 087	18 350	22 454
2025	19 282	16 143	16 273	14 852	19 282
2026	16 161	12 823	13 515	11 414	16 161
2027	13 479	11 257	11 717	9 730	13 479
2028	10 797	9 690	9 920	8 046	10 797
2029	8 135	8 135	8 135	6 375	8 135
2030	8 135	8 135	8 135	6 375	8 135

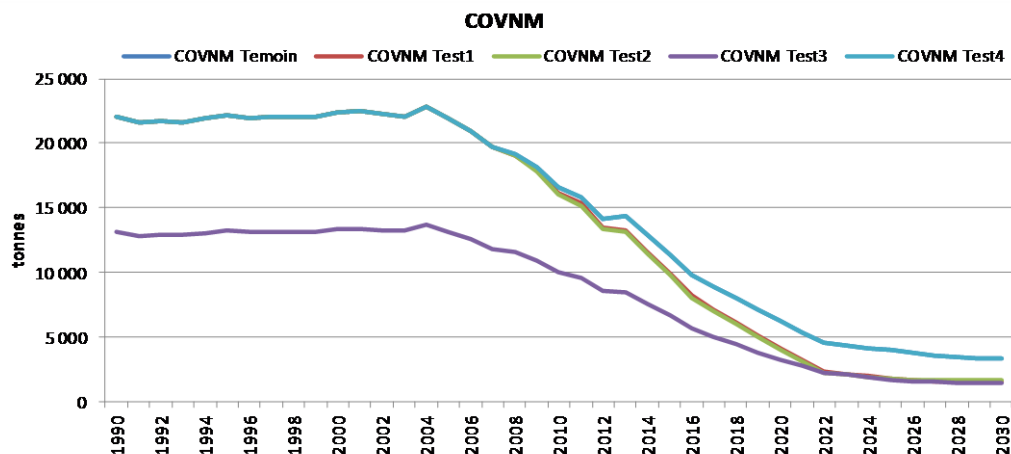


Figure 73 : Représentation graphique des résultats des tests pour les COVNM

Tableau 70 : Résultats des tests pour les COVNM

COVNM (tonnes)	Témoin	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1990	22 094	22 094	22 094	13 129	22 094
1991	21 610	21 610	21 610	12 851	21 610
1992	21 707	21 707	21 707	12 918	21 707
1993	21 634	21 634	21 634	12 884	21 634
1994	21 944	21 944	21 944	13 078	21 944
1995	22 170	22 170	22 170	13 224	22 170
1996	21 953	21 953	21 953	13 104	21 953
1997	22 106	22 106	22 106	13 206	22 106
1998	22 071	22 071	22 071	13 196	22 071
1999	22 075	22 075	22 075	13 198	22 075
2000	22 401	22 401	22 401	13 393	22 401
2001	22 468	22 468	22 468	13 421	22 468
2002	22 238	22 238	22 238	13 307	22 238
2003	22 103	22 103	22 103	13 246	22 103
2004	22 836	22 836	22 836	13 706	22 836
2005	21 931	21 931	21 931	13 185	21 931
2006	20 985	20 985	20 985	12 613	20 985
2007	19 736	19 736	19 736	11 860	19 736
2008	19 199	19 072	19 038	11 561	19 199
2009	18 150	17 894	17 824	10 956	18 150
2010	16 547	16 170	16 067	10 016	16 547
2011	15 875	15 351	15 209	9 636	15 875
2012	14 201	13 461	13 325	8 536	14 201
2013	14 332	13 254	13 106	8 511	14 332
2014	12 966	11 623	11 479	7 596	12 966
2015	11 424	9 954	9 812	6 647	11 424

COVNM (tonnes)	Témoïn	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
2016	9 786	8 200	8 063	5 649	9 786
2017	8 879	7 179	7 046	5 043	8 879
2018	7 983	6 168	6 039	4 448	7 983
2019	7 087	5 157	5 033	3 853	7 087
2020	6 205	4 160	4 040	3 272	6 205
2021	5 401	3 242	3 125	2 769	5 401
2022	4 591	2 318	2 207	2 258	4 591
2023	4 389	2 146	2 079	2 078	4 389
2024	4 186	1 975	1 951	1 899	4 186
2025	3 982	1 802	1 822	1 719	3 982
2026	3 783	1 634	1 698	1 543	3 783
2027	3 634	1 628	1 692	1 530	3 634
2028	3 485	1 622	1 686	1 516	3 485
2029	3 337	1 615	1 680	1 502	3 337
2030	3 337	1 615	1 680	1 502	3 337

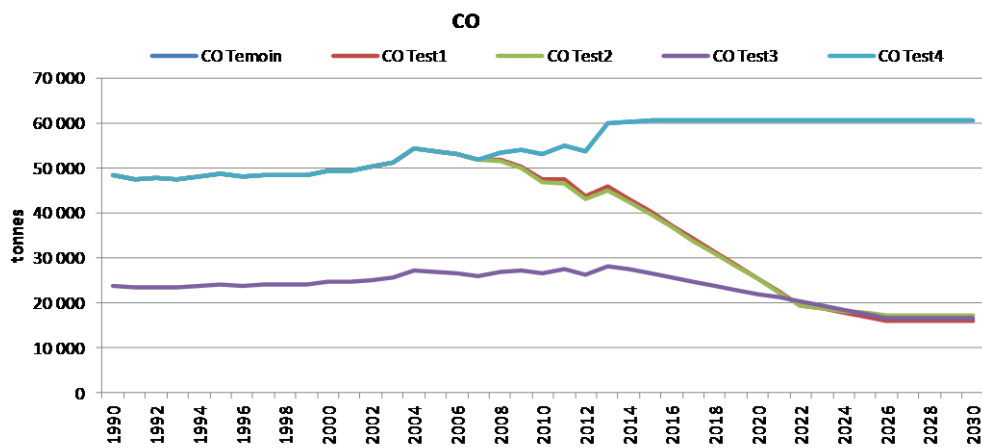


Figure 74 : Représentation graphique des résultats des tests pour le CO

Tableau 71 : Résultats des tests pour le CO

CO (tonnes)	Témoin	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1990	48 447	48 447	48 447	23 881	48 447
1991	47 381	47 381	47 381	23 379	47 381
1992	47 590	47 590	47 590	23 505	47 590
1993	47 426	47 426	47 426	23 448	47 426
1994	48 101	48 101	48 101	23 807	48 101
1995	48 593	48 593	48 593	24 076	48 593
1996	48 112	48 112	48 112	23 864	48 112
1997	48 443	48 443	48 443	24 055	48 443
1998	48 360	48 360	48 360	24 042	48 360
1999	48 425	48 425	48 425	24 103	48 425
2000	49 201	49 201	49 201	24 518	49 201
2001	49 411	49 411	49 411	24 619	49 411
2002	50 153	50 153	50 153	24 996	50 153
2003	51 187	51 187	51 187	25 518	51 187
2004	54 355	54 355	54 355	27 105	54 355
2005	53 706	53 706	53 706	26 789	53 706
2006	53 084	53 084	53 084	26 491	53 084
2007	51 638	51 638	51 638	25 781	51 638
2008	53 472	51 649	51 450	26 709	53 472
2009	54 055	50 361	49 959	27 013	54 055
2010	52 969	47 527	46 934	26 482	52 969
2011	54 985	47 435	46 611	27 503	54 985
2012	53 746	43 740	42 996	26 083	53 746
2013	59 809	45 738	44 979	28 130	59 809
2014	60 220	43 082	42 388	27 419	60 220
2015	60 635	40 373	39 744	26 692	60 635
2016	60 490	37 265	36 708	25 711	60 490
2017	60 490	34 301	33 816	24 787	60 490
2018	60 490	31 337	30 924	23 864	60 490
2019	60 490	28 374	28 033	22 941	60 490
2020	60 490	25 410	25 141	22 018	60 490
2021	60 490	22 446	22 249	21 094	60 490
2022	60 490	19 498	19 374	20 171	60 490
2023	60 490	18 636	18 813	19 248	60 490
2024	60 490	17 774	18 252	18 325	60 490
2025	60 490	16 911	17 691	17 401	60 490
2026	60 490	16 056	17 134	16 485	60 490
2027	60 490	16 056	17 134	16 485	60 490
2028	60 490	16 056	17 134	16 485	60 490
2029	60 490	16 056	17 134	16 485	60 490
2030	60 489	16 055	17 134	16 485	60 489

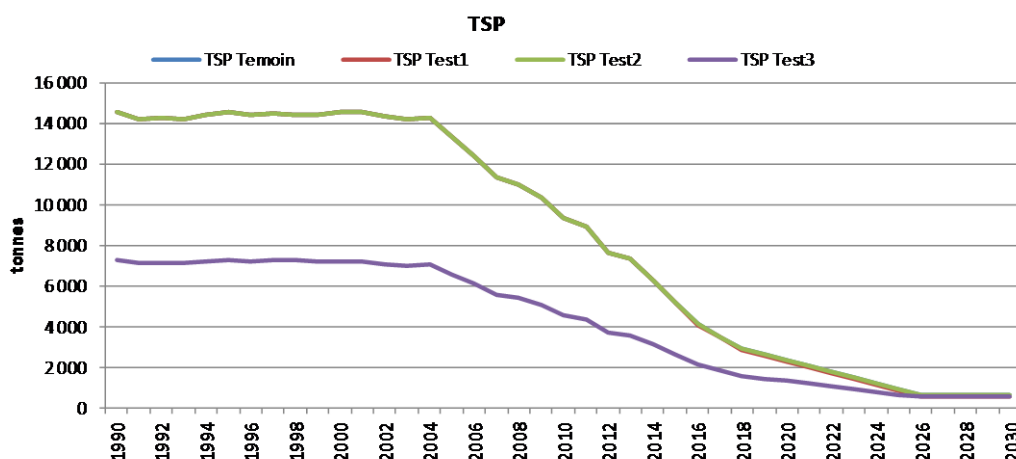


Figure 75 : Représentation graphique des résultats des tests pour les TSP

Tableau 72 : Résultats des tests pour les TSP

TSP (tonnes)	Témoin	Test 1	Test 2	Test 3
1990	14 517	14 517	14 517	7 261
1991	14 190	14 190	14 190	7 101
1992	14 246	14 246	14 246	7 133
1993	14 189	14 189	14 189	7 108
1994	14 384	14 384	14 384	7 209
1995	14 523	14 523	14 523	7 282
1996	14 371	14 371	14 371	7 210
1997	14 462	14 462	14 462	7 259
1998	14 429	14 429	14 429	7 247
1999	14 375	14 375	14 375	7 191
2000	14 531	14 531	14 531	7 241
2001	14 532	14 532	14 532	7 210
2002	14 318	14 318	14 318	7 092
2003	14 157	14 157	14 157	6 992
2004	14 274	14 274	14 274	7 048
2005	13 348	13 348	13 348	6 588
2006	12 439	12 439	12 439	6 136
2007	11 362	11 362	11 362	5 600
2008	10 998	10 998	10 998	5 416
2009	10 339	10 339	10 339	5 086
2010	9 363	9 363	9 363	4 601
2011	8 895	8 895	8 895	4 353
2012	7 656	7 650	7 656	3 745
2013	7 360	7 345	7 358	3 597
2014	6 313	6 290	6 309	3 122

TSP (tonnes)	Témoin	Test 1	Test 2	Test 3
2015	5 242	5 213	5 238	2 635
2016	4 132	4 095	4 127	2 135
2017	3 522	3 477	3 516	1 858
2018	2 930	2 878	2 922	1 597
2019	2 644	2 585	2 636	1 464
2020	2 359	2 292	2 349	1 332
2021	2 097	2 022	2 086	1 222
2022	1 811	1 729	1 800	1 090
2023	1 526	1 437	1 513	957
2024	1 240	1 144	1 227	825
2025	951	847	936	688
2026	682	570	666	570
2027	682	571	667	571
2028	683	572	668	572
2029	684	573	669	573
2030	684	573	669	573

Analyse des résultats

NOx :

Les facteurs mesurés s'éloignent assez peu des VLE. Les valeurs mesurées sont supérieures aux VLE pour les valeurs rapportées au kwh fourni (test 1) mais inférieures au VLE pour les valeurs rapportées au GJ consommé (test 2). Au bilan l'analyse de ces résultats donne une relativement bonne cohérence entre les valeurs mesurées et l'utilisation des VLE dans l'inventaire. Même en modifiant les facteurs d'émission des phases antérieures, les émissions varient au final assez peu par rapport au témoin que constitue l'inventaire actuel.

COVNM :

Les facteurs d'émission mesurés sont significativement plus faibles que l'inventaire actuel (test 1 et test 2), cela entraîne une réduction forte des émissions à partir des années 2010 mais les émissions sont encore dirigées par la présence des engins des phases antérieures à la phase III ce qui explique l'impact très important d'une modification des phases antérieures dans les mêmes proportions par rapport au VLE. En condition terrain l'impact constaté est moindre même si également à la baisse par rapport à l'inventaire.

CO :

Les facteurs d'émission mesurés s'éloignent considérablement des VLE pour les valeurs testées sur banc d'essai et dans une bien moindre mesure pour les essais réalisés sur le terrain. A noter que l'inventaire (témoin) ne fait pas évoluer les facteurs d'émission basés sur les VLE qui restent similaires pour les différentes phases.

TSP :

Les facteurs d'émission testés n'influent pas fortement l'inventaire des particules sauf à modifier les facteurs d'émission des phases antérieures à la phase III.

4.2 TESTS SUR LES ENGINES ESSENCE

L'inventaire actuel réalisé par le CITEPA.

L'inventaire actuel fonctionne en utilisant une estimation du parc de motoculteurs (moteurs 4 temps) et de tronçonneuses (moteurs de 2 temps), même si les données relatives à ces parcs sont peu robustes. En effet, le parc de tronçonneuses estimé est maintenu à un niveau stable de 255 000 unités. Les facteurs d'émission sont basés sur les normes d'émission.

Dans le cadre de cet exercice et pour mieux voir les impacts des changements de facteur d'émission sur les normes les plus récentes, des projections jusqu'en 2030 ont été réalisées mais sans mettre en œuvre de scénarios complexe les consommations et parcs étant supposés constants seul l'âge des engins et les facteurs d'émission associés évoluant entre 2014 et 2030.

Dans les campagnes de mesures de l'IRSTEA, seule une tronçonneuse a été testée, mais les tronçonneuses représentent l'essentiel de la consommation d'essence, les motoculteurs étant peu utilisés sur l'année.

Test

Un seul test a été réalisé en remplaçant les facteurs d'émission actuellement utilisés dans l'inventaire par les valeurs mesurés sur la tronçonneuse pour la phase pré-contrôle (correspondant à la norme de la tronçonneuse testée) et pour tous les phases ultérieurs dans la mesure où ces nouveaux facteurs d'émission mesurés sont inférieurs à ceux précédemment utilisés.

Tableau 73 : Résultats comparaison témoin/tests pour les polluants NO_x, COVNM, CO et TSP

tonnes	NOx		COVNM		CO		TSP	
	Témoin	Test	Témoin	Test	Témoin	Test	Témoin	Test
1990	119	116	17 657	9 874	54 648	9 161	331	278
1991	117	114	17 838	9 966	54 838	8 832	334	281
1992	112	109	17 547	9 795	53 579	8 271	328	276
1993	104	101	16 762	9 348	50 832	7 502	313	263
1994	102	99	16 934	9 435	51 001	7 175	317	266
1995	85	83	14 671	8 167	43 879	5 865	274	230
1996	83	81	14 820	8 242	44 015	5 569	277	232
1997	81	79	14 970	8 318	44 146	5 266	279	234
1998	70	68	12 971	7 207	38 250	4 563	242	203
1999	68	65	12 474	6 931	36 786	4 388	233	195
2000	65	63	11 973	6 653	35 308	4 212	223	187
2001	62	60	11 474	6 375	33 836	4 036	214	180
2002	60	58	10 974	6 098	32 362	3 860	205	172
2003	57	55	10 478	5 822	30 900	3 686	196	164
2004	54	52	9 977	5 543	29 421	3 509	186	156
2005	53	50	9 429	5 238	27 879	3 326	176	148
2006	51	47	8 882	4 933	26 334	3 141	167	140
2007	49	44	8 300	4 609	24 674	2 943	156	131
2008	48	42	7 277	4 040	22 933	2 736	145	122
2009	44	37	6 136	3 407	20 515	2 447	130	109
2010	46	37	5 755	3 196	20 488	2 444	130	109
2011	47	37	5 358	2 975	20 393	2 433	129	108
2012	48	38	4 982	2 767	20 375	2 430	129	108
2013	49	38	4 608	2 560	20 362	2 429	129	108
2014	48	36	4 030	2 239	19 361	2 309	123	103
2015	49	36	3 632	2 019	19 122	2 281	121	101
2016	50	36	3 284	1 826	19 122	2 281	121	101
2017	51	36	2 936	1 633	19 122	2 281	121	101
2018	52	36	2 589	1 440	19 122	2 281	121	101
2019	53	36	2 258	1 258	19 122	2 281	121	101
2020	53	36	1 927	1 075	19 122	2 281	121	101
2021	53	36	1 597	893	19 122	2 281	121	101
2022	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2023	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2024	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2025	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2026	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2027	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2028	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2029	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101
2030	53	36	1 269	712	19 122	2 281	121	101

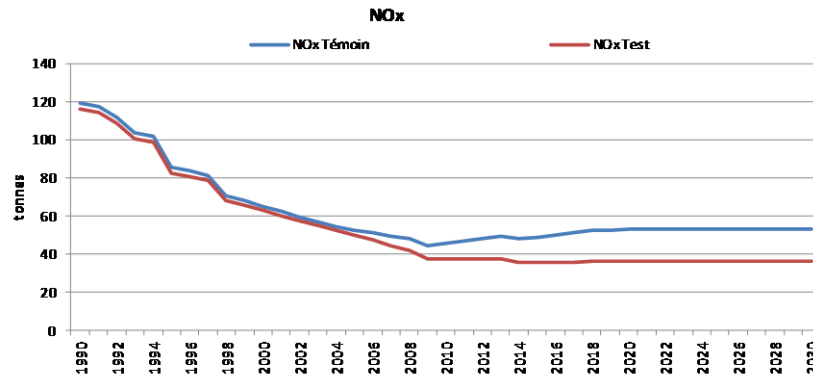


Figure 76 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour les NO_x

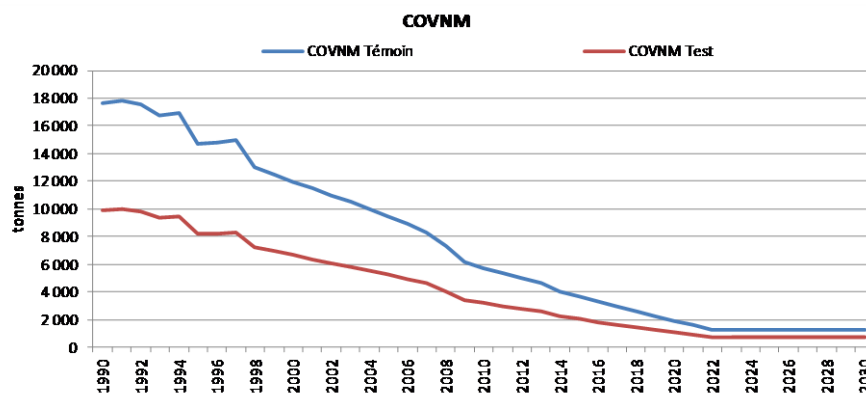


Figure 77 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour les COVNM

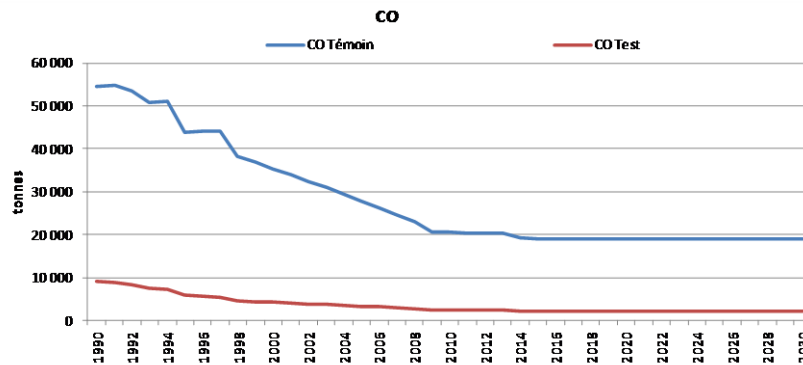


Figure 78 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour le CO

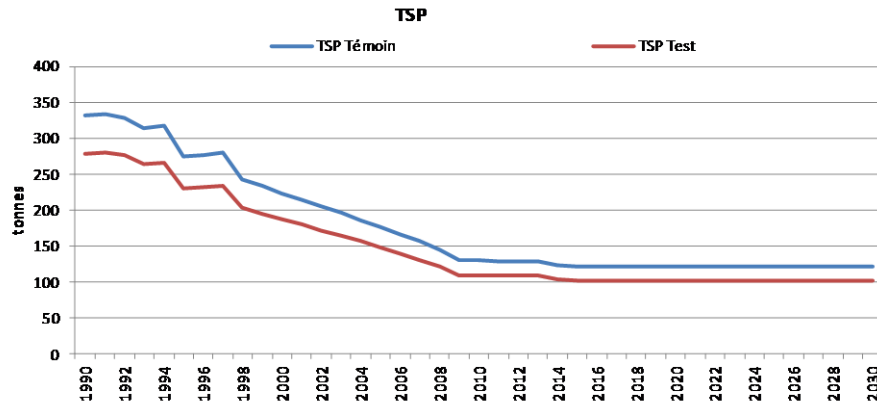


Figure 79 : Représentation graphique de la comparaison témoin/test pour les TSP

Analyse des résultats

Les facteurs d'émission issus des travaux sur la tronçonneuse impacte significativement les émissions de COVNM et de CO et plus faiblement les estimations de NOx et de particules dont les niveaux d'émission sont très faibles et même négligeable au niveau français. Pour les COVNM et le CO, l'application d'un facteur d'émission basé sur ces mesures permettrait des réductions de l'ordre de 8 kt de COVNM et 45 kt de CO en 1990 (soit 0,3% et 0,4% du total national en 1990) et de 3 kt de COVNM et 18 kt de CO en 2010 (soit 0,3% et 0,5% du total national en 2010).

5. CONCLUSIONS

L'objectif du projet EMNR a été de contribuer à l'amélioration de la connaissance des émissions polluantes des engins mobiles non routiers. Une étude préliminaire a été nécessaire pour choisir les méthodes de mesurage à mettre en œuvre pour la caractérisation des émissions et pour adapter les systèmes de prélèvement afin de pouvoir réaliser un maximum de mesurages simultanés. Les mises au point ont été réalisées lors de la caractérisation de la première tronçonneuse. Le chapitre 1 de ce rapport présente le contexte et les objectifs de l'étude. Le chapitre 2 de ce rapport traite des émissions de petits engins équipés de motorisations 2 temps essence (tronçonneuses). Le chapitre 3 porte sur la caractérisation des émissions polluantes d'engins lourds équipés de moteur diesel (tracteurs). Le chapitre 4 porte sur la remise à jour des inventaires nationaux d'émission pour les engins mobiles non routiers.

Deux tronçonneuses (correspondant respectivement aux phases 1 et 2 de la directive 2002/88/EC) et deux tracteurs (correspondant respectivement aux tiers IIIa et IIIb de l'arrêté du 28 septembre 2005) ont été testés sur bancs d'essais à l'IRSTEA. Les polluants réglementaires classiques ainsi que d'autres composés tels que les HAP, la granulométrie en masse et en nombre des particules et la caractérisation chimique détaillée des composés organiques volatiles et semi volatiles émis ont été caractérisés. Une campagne de mesurage des polluants gazeux réglementaires a de plus a été réalisée en situation réelle d'usage d'un des tracteurs. Des facteurs d'émissions ont été déterminés sur la base de ces essais pour les tronçonneuses et les tracteurs testés.

Pour les tronçonneuses, les observations suivantes ont pu être formulées :

- Le régime réduit se traduit par un niveau global des concentrations en polluants gazeux et particulaires organiques plus élevé qu'à pleine charge
- Quel que soit le régime étudié, la distribution granulométrique massique est marquée par une prédominance de la fraction PM1.
- Le régime réduit se traduit par un doublement des concentrations en particules totales obtenues à pleine charge, imputable à une augmentation d'un facteur six de la fraction solide.
- Les phases de démarrages se caractérisent par des concentrations totales 50% supérieures à celles de la pleine charge, en raison d'un doublement de la fraction solide.
- La concentration de la fraction condensable demeure inchangée d'un régime à l'autre.
- Le passage du régime pleine charge au régime ralenti semble se traduire par une augmentation en absolu des concentrations massiques de toutes les tranches granulométriques. Il a été observé une augmentation de la contribution de la tranche comprise entre 1 μm et 2,5 μm et pour ce qui est de la distribution en nombre, un déplacement du mode de l'aérosol de 50 nm à 120 nm. Cette variation des diamètres entre la pleine charge et le régime réduit est sans doute liée aux effets de température des rejets à l'échappement.
- Les concentrations en HAP sont respectivement de deux à six fois plus élevées en régime réduit, qu'en phase de démarrage et en régime de pleine charge.
- Le calcul des facteurs d'émission a permis d'établir que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que ceux de la littérature pour les polluants réglementés (COVT, NOx, PM) et plus faibles pour le CO. Le bilan des émissions carbonées montre que la combustion lors de nos essais a été meilleure que ce qui est rapporté par la littérature. Les valeurs obtenues pour les facteurs d'émissions de particules en nombre sont relativement élevées mais il est difficile de savoir à ce stade si cela est imputable à la technologie ancienne de la tronçonneuse testée.

Le ratio des émissions de HAP totaux par rapport aux émissions particulaires est également nettement plus élevé que celui observé sur des moteurs de scooters d'ancienne génération. La signature des HAP dans les facteurs d'émission est conforme à celle observée pour d'autres moteurs de technologie 2-Temps.

- Les niveaux d'émissions ramenés aux masses de carburant consommées, exploitables pour des inventaires, sont proposés : ces valeurs correspondent à des technologies anciennes.
- Les données fournies pour les tronçonneuses sont plus réduites que celles initialement prévues dans la convention en raison des difficultés rencontrées sur le banc d'essais qui a subi des avaries suffisamment importantes pour nous contraindre à stopper la campagne d'essais.

Pour ce qui est des tracteurs, les réglementations relatives aux EMNR ont beaucoup évolué ces dernières années, notamment pour ce qui concerne les conditions d'essai des engins. Si les VLE n'ont pas changé, les méthodes d'essai intègrent désormais une part à froid à l'intérieur de la VLE et un cycle d'essai dynamique pour les phases réglementaires.

Nous nous sommes interrogés sur la représentativité du cycle WHTC ou NRTC comme cycle de conduite d'un engin agricole. La polyvalence des usages et des réglages des groupes motopropulseurs dans cette catégorie d'engin impose en effet de réaliser un balayage ample de la cartographie moteur pour les EMNR.

Nous avons aussi mis en évidence la sévérité du cycle qui est typique d'un usage « transport » et moins pertinent pour caractériser un usage agricole où les sollicitations du moteur sont moindres.

Une campagne de mesure sur banc d'essai a été menée pour caractériser les émissions polluantes des tracteurs. Deux tracteurs, correspondant chacun à une phase différente de réglementation, ont été testés sur un banc tracteur. Pour cette campagne de mesurage, le protocole d'essai a été conçu pour étudier les émissions de polluants en fonction des conditions de fonctionnement du moteur. Les concentrations de polluants dans les gaz d'échappement ont été quantifiées pour les polluants gazeux réglementés : CO, NOx, COV. On mesure la diminution des émissions au fur et à mesure des phases de réglementations. Les valeurs de concentration en méthane sont très faibles et souvent en dessous des limites de quantification pour les 2 modèles. Pour les particules, on montre que la majorité des particules émises ont un diamètre de 30 à 40 nm, comme pour les motorisations diesel. Sur la dernière génération, la présence d'un filtre à particule permet de diminuer sensiblement les concentrations dans les émissions. Des valeurs de surémissions à froid sont déterminées et la durée équivalente à froid est estimée à moins de 10 minutes de fonctionnement pour les hydrocarbures imbrûlés. On simule également des cycles bimodaux et on montre qu'une conduite oscillant entre 2 points de fonctionnement, typique d'un travail agricole, produit des émissions semblables à la moyenne pondérée de chaque mode pris isolément.

Enfin une campagne de mesurage a permis de suivre les émissions polluantes en condition réelle de conduite. Les facteurs d'émissions des polluants gazeux réglementés correspondant à chacune des activités de transport et de travail à la parcelle ont été déterminés à partir des caractéristiques des émissions à l'atmosphère et des paramètres de fonctionnement moteur. Comparée aux valeurs mesurées sur banc d'essai, la consommation spécifique de carburant est élevée en transport, tandis qu'elle diminue au cours des travaux lourds. Les émissions de COVT, NOx et CO augmentent en transport et dépassent parfois les seuils réglementaires. Cependant, les valeurs recueillies sont très dispersées selon la séquence observée, surtout pour le CO et COVT. Le facteur d'émission est ramené en g/km et les valeurs mesurées s'avèrent comparables à celle d'un poids-lourd de plus ou moins grande taille selon les polluants. Pour le travail du sol, les émissions de COVT et NOx sont proches des valeurs mesurées sur banc d'essai et les émissions de CO₂ diminuent significativement. Seule, l'émission de monoxyde de carbone augmente très fortement pour ce travail, mais reste en dessous des seuils réglementaires.

Suite à la détermination de facteurs d'émissions de plusieurs engins agricoles par l'IRSTEA sur la base des essais réalisés dans le projet EMNR, plusieurs tests ont été réalisés par le CITEPA pour appréhender les écarts que générerait l'utilisation de facteurs d'émission issus de mesures comparés à l'utilisation des valeurs limites d'émission (VLE) comme c'est le cas actuellement. Ces tests ont été menés pour les substances réglementées NOx, COVNM, particules et CO.

Suite à la détermination de facteurs d'émissions de plusieurs engins agricoles par l'IRSTEA sur la base des essais réalisés dans le projet EMNR, plusieurs tests ont été réalisés par le CITEPA pour appréhender les écarts que génèreraient l'utilisation de facteurs d'émission issus de mesures comparés à l'utilisation des valeurs limites d'émission (VLE), comme c'est le cas actuellement. Ces tests ont été menés pour les substances réglementées NOx, COVNM, particules et CO.

Les facteurs d'émission issus des travaux sur la tronçonneuse impacte significativement les émissions de COVNM et de CO et plus faiblement les estimations de NOx et de particules dont les niveaux d'émission sont très faibles et même négligeable au niveau français. Pour les COVNM et le CO, l'application d'un facteur d'émission basé sur ces mesures permettrait des réductions de l'ordre de 8 kt de COVNM et 45 kt de CO en 1990 (soit 0,3% et 0,4% du total national en 1990) et de 3 kt de COVNM et 18 kt de CO en 2010 (soit 0,3% et 0,5% du total national en 2010).

Au niveau des émissions des tracteurs, les résultats suivants ont été obtenus par le CITEPA :

- Pour les NOx, les facteurs mesurés s'éloignent assez peu des VLE. Les valeurs mesurées sont supérieures aux VLE pour les valeurs rapportées au KWh fourni (test 1) mais inférieures au VLE pour les valeurs rapportées au GJ consommé (test 2). Au bilan, l'analyse de ces résultats donne une relativement bonne cohérence entre les valeurs mesurées et l'inventaire basé sur l'utilisation des VLE. Même en modifiant les facteurs d'émission des phases antérieures, les émissions varient au final assez peu par rapport au témoin que constitue l'inventaire actuel.
- Pour les COVNM, les facteurs d'émission mesurés sont significativement plus faibles que ceux de l'inventaire actuel (test 1 et test 2), ce qui entraîne une réduction forte des émissions à partir des années 2010 mais les émissions sont encore dirigées par la présence des engins des phases antérieures à la phase III ce qui explique l'impact très important d'une modification des phases antérieures dans les mêmes proportions par rapport au VLE. En condition terrain l'impact constaté est moindre même si il est également à la baisse par rapport à l'inventaire.
- Pour le CO, les facteurs d'émission mesurés s'éloignent considérablement des VLE pour les valeurs testées sur banc d'essai et dans une bien moindre mesure pour les essais réalisés sur le terrain. A noter que l'inventaire (témoin) ne fait pas évoluer les facteurs d'émission basés sur les VLE qui restent similaires pour les différentes phases.
- Pour les TSP, les facteurs d'émission testés n'influent pas fortement l'inventaire des particules sauf à modifier les facteurs d'émission des phases antérieures à la phase III.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction

1. Chang, J.P., Fontenelle, J.P., Serveau, N., *Inventaires des émissions polluantes atmosphériques en France, séries sectorielles et analyses et étendues*, C. 622, Editor 2007, CITEPA: Paris. p. 291.
2. Vigier, F., et al., *Comment déterminer la consommation des automoteurs agricoles ?* Revue SET, 2012. **7**: p. 46-53.
3. Lambrecht, U., Helms, H., Knörr, W., *Air pollutant emissions of combustion engines in Off-road equipment and machinery (The forgotten sector)*. in *Expert meeting on the Improvement of Transport Emission Inventories*. 2007. JRC Ispra, Italy: IFEU.

Tronçonneuses et engins essence

1. Morten Winther, et al., *For the Non-road mobile sources and machinery Part, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013*, EEA.
2. Samaras, Z., Zierock, K.H., Norris, J., *Emission inventory guidebook - OTHER MOBILE SOURCES & MACHINERY*. Vol. B810-48. 2006: European Environmental Agency. 48.
3. Chang, J.P., Fontelle, J.P., Serveau, N., *Inventaires des émissions polluantes atmosphériques en France, séries sectorielles et analyses et étendues*, C. 622, Editor 2007, CITEPA: Paris. p. 291.
4. Etissa, D., et al., *Investigation of particles emitted from modern 2-stroke scooters*. Atmospheric Environment, 2008. **42**(1): p. 183-195.
5. Volckens, J., et al., *Emissions profile from new and in-use handheld, 2-stroke engines*. Atmospheric Environment, 2007. **41**(3): p. 640-649.
6. Spezzano, P., et al., *Particle- and gas-phase emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from two-stroke, 50-cm(3) mopeds*. Atmospheric Environment, 2008. **42**(18): p. 4332-4344.
7. Alander, T., et al., *Particle emissions from a small two-stroke engine: Effects of fioul, lubricating oil, and exhaust aftertreatment on particle characteristics*. Aerosol Science and Technology, 2005. **39**(2): p. 151-161.
8. Volckens, J., D.A. Olson, and M.D. Hays, *Carbonaceous species emitted from handheld two-stroke engines*. Atmospheric Environment, 2008. **42**(6): p. 1239-1248.

Tracteurs et engins diesel

1. Chang, J.P., Fontenelle, J.P., Serveau, N., *Inventaires des émissions polluantes atmosphériques en France, séries sectorielles et analyses et étendues*, C. 622, Editor 2007, CITEPA: Paris. p. 291.
2. Vigier, F., et al., *Comment déterminer la consommation des automoteurs agricoles ?* Revue SET, 2012. **7**: p. 46-53.
3. Lambrecht, U., Helms, H., Knörr, W., *Air pollutant emissions of combustion engines in Off-road equipment and machinery (The forgotten sector)*. in *Expert meeting on the Improvement of Transport Emission Inventories*. 2007. JRC Ispra, Italy: IFEU.
4. Clairotte, M., *Impact of fiouls and exhaust aftertreatment systems on the unregulated emissions from mopeds, light and heavy-duty vehicles*, in *Electronique2012*, UNIVERSITE MONTPELLIER 2, SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC. p. 284.
5. Lacour, S., et al., *A model to assess tractor operational efficiency from bench test data*. Journal of Terramechanics, 2014. **54**: p. 1-18.
6. OCDE. *Réduire les émissions de NOx de la circulation routière*. in *Conférence européenne des ministres des transports*. 2006. Dublin.

7. Rickert, G. *Overview of emissions on World-Harmonised and Non-road cycles from the AECC Euro VI programme*. in *AECC Technical Seminar on Heavy-duty Engine Emissions*. 2007. Brussels.
8. Lacour, S., F. Massouh, and P. Podevin, *Récupération d'énergie dans les gaz d'échappement d'un moteur diesel: effet de phénomènes transitoires*, in *COFFRET'12*, S.F.d. thermiciens, Editor 2012, COFFRET: Sozopol, Bulgaria. p. 125-131.
9. Lacour, S., D. Ellis, and D. Debroize, *On-field measurements during agricultural operation and related fioul consumptions of tractors: references and parameter analysis*, 2013, IRSTEA: Antony. p. 31.
10. Burgun, C., *Caractérisation et modélisation des besoins énergétiques d'un tracteur agricole : Application à l'étude des performances en lien avec les lubrifiants du groupe motopropulseur.*, in *Genie des procedes et technologie avancees2013*, Université Pierre et Marie Curie - Conservatoire Nationale des Arts et metiers: Paris. p. 250.
11. Weilenmann, M.F., P. Soltic, and S. Hausberger, *The cold start emissions of light-duty-vehicle fleets: A simplified physics-based model for the estimation of CO2 and pollutants*. *Science of The Total Environment*, 2013. **444**(0): p. 161-176.
12. Weilenmann, M., J.-Y. Favez, and R. Alvarez, *Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories*. *Atmospheric Environment*, 2009. **43**(15): p. 2419-2429.
13. Hughey, C.A., et al., *Elemental Composition Analysis of Processed and Unprocessed Diesel Fioul by Electrospray Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry*. *Energy & Fuels*, 2001. **15**(5): p. 1186-1193.
14. Totten, G., S. Westbrook, and R. Shah, *Fiouls and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing*. 2003: ASTM International
15. Levine, R.B., T. Pinnarat, and P.E. Savage, *Biodiesel Production from Wet Algal Biomass through in Situ Lipid Hydrolysis and Supercritical Transesterification*. *Energy & Fuels*, 2010. **24**(9): p. 5235-5243.
16. Européenne, C., *Directive 2012/46/UE*, 2012, Journal officiel de l'Union européenne. p. 126.
17. JORF, *Arrêté du 21 mars 2014* 2014, Journal Officiel de la République Française. p. 6034.
18. Joumard, R., et al., *Accuracy of Exhaust Emission Factor Measurements on Chassis Dynamometer*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009. **59**(6): p. 695-703.
19. HUGREL, C. and R. JOUMARD, *Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025*, 2006. p. 160.

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
ANNEXE A	Fiches descriptives des tronçonneuses	5
ANNEXE B	Méthodes de caractérisation des émissions mises en œuvre	17
ANNEXE C	Enseignements en termes de métrologie et stratégie de mesurage suite à la première campagne tronçonneuse	5
ANNEXE D	Chromatogramme de l'analyse des COV spécifiques tronçonneuses	1
ANNEXE E	Cartographie d'engins agricoles en activité Statistiques de validation des essais transitoires réalisés sur le tracteur New Holland Détails sur les campagnes de mesures des émissions polluantes sur le banc tracteur	5

ANNEXE A

Fiche descriptive des tronçonneuses

Tableau 1- Descriptif détaillée des tronçonneuses prévue pour les mesures d'émissions polluantes

<p> Tronçonneuse 1 Marque : Stihl Modèle : 023 C Date de fabrication : 1989 Date d'acquisition : 1990(*) Cylindrée : 40.2 cm³ Puissance de sortie : 1.9 kW Ralenti : 2800 tr/min Régime à pmax (ISO7293) : 9500 tr/min Alésage cylindre (bore) : 40 mm Course (stroke): 32 mm Système d'allumage : Bosch WSR 6F (écartement électrodes 0.5 mm) Numéro de série : 1125-731 1001* Pièce de liaison tronçonneuse-frein : S.1 </p>	
<p> Tronçonneuse 2 Marque : Stihl Modèle : 034 AV Date de fabrication : 1986 Date d'acquisition : 1990(*) Cylindrée : 56.5 cm³ Puissance de sortie : 3.0 kW* Ralenti : 2.700 tr/min Régime à pmax (ISO7293) : 9.500 tr/min Couple max : 3.5 Nm (à 6.500 tr/min) Alésage cylindre (bore) : 46 mm Course (stroke): 34 mm Système d'allumage : Bosch WSR 6F (écartement électrodes 0.5 mm) Numéro de série : 11193409 FD * Pièce de liaison tronçonneuse-frein : S.1 </p>	

<p>Tronçonneuse 3 Marque : Stihl Modèle : MS251/C Date de fabrication : 2013 * Date d'acquisition : 2013 Cylindrée : 73,5 cm³ Puissance de sortie : 2.2 kW Ralenti : 2800 tr/min Régime à pmax (ISO7293) : 9500 tr/min Alésage cylindre (bore) : 44 mm Course (stroke): 30 mm Système d'allumage : NGK CMR6H-0.5 mm sur électrode Numéro de série : 1163 790 1001A * Pièce de liaison tronçonneuse-frein : S.1 L'étiquette d'homologation relative aux émissions de nuisances à l'échappement indique le nombre d'heures de fonctionnement durant lequel ce moteur satisfait aux exigences des normes antipollution fédérales : Catégorie A : 300 heures, B : 125 heures, C : 50 heures</p>	<p>Brochure commerciale : « Conçue autour du moteur 2 temps STIHL à balayage stratifié, la tronçonneuse MS 251 réduit de 20% sa consommation et de 50% les émissions d'échappement. Nerveuse et puissante, elle est le compagnon idéal pour l'entretien autour de la maison ou la production de bois de chauffage. Son capot d'une seule pièce lui permet d'accéder rapidement à tous les organes mécaniques pour rendre l'entretien toujours plus facile. Son tendeur de chaîne latéral et ses bouchons des réservoirs 1/4 de tour lui apportent un niveau de confort issu directement des matériels professionnels. »</p> 
<p>Tronçonneuse 4 Marque : Husqvarna Modèle : 576 XP Date d'acquisition : 2013 Brochure commerciale Moteur, X-Torque, Air injection TM (moteur à balayage assisté), décompresseur Smart-Start Cylindrée : 73,5 cm³ Puissance de sortie : 4.2 kW Ralenti : 2700 tr/min Régime à pmax : 9600 tr/min Alésage cylindre : 51 mm Course : 36 mm Système d'allumage : SEM AM50 - 0.5 mm sur électrode Pièce de liaison tronçonneuse-frein : S.3</p>	

Tronçonneuse 5

Marque : Stihl **Modèle :** 038 AV
Magnum

Date de fabrication : 1986

Date d'acquisition : 1990(*)

Cylindrée : 72.2 cm³

Puissance de sortie : 3.6 kW

Ralenti : 2500 tr/min

Régime à pmax (ISO7293) : 9500
tr/min *

Alésage cylindre (bore) : 52 mm

Course (stroke) : 34 mm

Système d'allumage : Bosch WSR
6F (écartement électrodes 0.5 mm)

Numéro de série : 11193409 FD *

**Pièce de liaison tronçonneuse-
frein :** S.2



ANNEXE B

Méthodes de mesurage

MÉTHODES MISES EN ŒUVRE PAR L'INERIS

1. MÉTHODES NORMALISÉES DE CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES DE POLLUANTS ISSUS DES SOURCES FIXES ADAPTÉES À LA PROBLÉMATIQUE DES ÉMISSIONS DE TRONÇONNEUSES

1.1 MESURAGE DES HAP ET DES POUSSIÈRES TOTALES (FRACTION SOLIDE ET CONDENSABLE)

Les poussières totales (fraction solide et condensable) et les HAP ont été prélevés simultanément. Le montage consiste en une sonde et un filtre plan chauffés permettant un maintien de la température de l'effluent à 120°-125°C.

Pour les particules, sont simultanément déterminées :

- la concentration en poussières totales sur un filtre plan ; la quantité de poussières piégée sur les filtres est déterminée par pesée des filtres avant et après prélèvement, après étuvage (1h à 180°C avant prélèvement) et passage au dessiccateur.
- la quantité de poussières et condensables déposées dans la sonde de prélèvement, le produit de rinçage de la sonde de prélèvement est évaporé à sec dans un bêcher. L'extrait sec est déterminé par pesée après passage dans un dessiccateur.
- en dérivation de la ligne de prélèvement principale, la fraction condensable piégée dans une série de barboteurs remplis d'isopropanol et maintenus à froid (maintien de la température de l'effluent à un niveau inférieur ou égale à 20°C). Ce protocole, a été développé et validé par l'INERIS pour les émissions des appareils de chauffage domestique utilisant la biomasse. La quantité piégée dans les barboteurs est déterminée après évaporation du solvant et pesée.

Les masses ainsi obtenues sont sommées afin de déterminer l'indice pondéral.

Pour le mesurage des HAP, le mode opératoire suivi est basé sur celui décrit dans la norme NF X 43-329. Les 8 composés listés dans la norme et mesurés au cours des essais sont ceux représentant la famille des HAP au plan de la cancérogénèse.

En aval du filtre, les HAP sont piégés dans une cartouche remplie de résine XAD-2 préalablement conditionnée, précédée d'un condenseur pour abaisser la température en entrée de la résine en-dessous de 20°C et de son pot à condensats.

Les différents supports de piégeage : filtre (après pesée), condensats, résine XAD-2 et solvants de rinçage de la sonde, du porte-filtre, du réfrigérant et du pot à condensats sont collectés et traités en laboratoire.

Les échantillons solides (filtres après pesée, résine) sont ensuite extraits au Soxhlet au DCM ; les échantillons aqueux sont traités par extraction liquide-liquide avec du DCM.

Enfin l'analyse quantitative est effectuée au moyen d'un chromatographe en phase liquide haute performance (HPLC) équipé d'un détecteur fluorescent.

Les gaz sont prélevés au moyen d'une pompe dont le débit est réglable, et le volume prélevé est mesuré avec un compteur à gaz sec.

Spécificités liées à la problématique :

- Prélèvement non isocinétique : en raison des vitesses faibles qui rend très difficile la mise en place d'un prélèvement isocinétique et de la distribution fine de l'aérosol, il a été jugé acceptable de ne pas réaliser les prélèvements dans les conditions isocinétiques. Ceux-ci ont été réalisés dans des conditions de « sur-isocinétisme », lesquelles ont peu d'impact sur la distribution de l'aérosol en masse (vitesse de prélèvement à l'extrémité de la canne de prélèvement supérieure à la vitesse d'écoulement dans le conduit).
- Le filtre de prélèvement TSP étant utilisé pour l'analyse des HAP, il n'est pas réalisé d'étuvage après prélèvement pour éviter l'évaporation des HAP avant analyse;
- Les procédures de rinçage et d'analyse des produits de rinçât étant différentes pour les HAP et les TSP. Il n'est donc pas possible de réaliser les rinçages pour ces deux paramètres à chaque essai. Ils ont donc été réalisés séparément, le premier sur un régime nominal uniquement, le second TSP sur le régime réduit uniquement.

1.2 AUTRES MESURAGES MANUELS PÉRIPHÉRIQUES

Mesurage de température

La température des gaz dans le conduit est déterminée au moyen d'un thermocouple K.

Mesurage de la teneur en vapeur d'eau

La teneur en vapeur d'eau est mesurée selon la norme NF EN 14790.

Le mesurage consiste à prélever un échantillon de gaz au moyen d'une sonde chauffée, à filtrer les gaz et à piéger la vapeur d'eau au moyen d'une unité de prélèvement comprenant un étage de condensation et un étage d'absorption.

La teneur en vapeur d'eau est déterminée par gravimétrie, par pesée de l'unité de piégeage avant et après prélèvement

1.3 MESURAGE AUTOMATIQUE DES GAZ

Mesurages de O₂, CO, CO₂, NO_x

L'échantillon d'effluent gazeux est prélevé au moyen d'une pompe étanche fonctionnant à un débit de 10 l/min.

Les gaz sont filtrés à l'aide d'un filtre chauffé puis la vapeur d'eau est condensée dans un système de refroidissement afin d'abaisser le point de rosée des gaz humides et empêcher ainsi la condensation dans la ligne de prélèvement et dans les analyseurs. Une partie du gaz (représentant environ 50 % du débit total) passe dans la chaîne d'analyse.

Les concentrations en gaz sont donc exprimées sur gaz sec.

En parallèle, la sonde de prélèvement d'un analyseur de gaz est insérée sur le porte-tube. Cet analyseur de gaz *HORIBA OBS2200*, permet de mesurer sur les fumées asséchées les concentrations de polluants gazeux (CO, NO_x, THC, CO₂). Le débit de prélèvement est adapté aux conditions du fonctionnement nominal et l'analyseur est testé pour le mode ralenti. Le calibrage de l'appareil est effectué automatiquement au début de l'essai par la comparaison avec une bouteille de gaz étalon réalisée sur mesure par Linde (CO₂ : 16%, C₃H₈ : 594 ppm, CO : 4445 ppm, NO : 869 ppm) et la procédure d'essai comporte une analyse de la dérive.

Mesurages de COVT/COVNM

Les mesurages en continu de COVT, CH₄, COVNM (COV totaux, méthane, COV non méthaniques) sont effectués après prélèvement avec une sonde chauffée, filtration et transfert avec une ligne chauffée jusqu'à l'analyseur à ionisation de flamme.

Pour déterminer la concentration en COVNM, l'analyseur doit être équipé d'un four d'oxydation sélective. L'analyseur mesure alors les COVT et le CH₄, et la concentration en COVNM est déterminée par différence entre les concentrations de COVT et de CH₄.

Les mesurages sont donc effectués sur gaz humide.

NOTA : Les mesurages de COV totaux (COVT) sont effectués selon la norme NF EN 12619. La méthodologie de détermination des COVNM est définie dans la norme française XP X 43-554, le mesurage des COVNM étant une spécificité de la réglementation française.

La gamme de mesurage des analyseurs utilisés, ainsi que les caractéristiques des gaz pour étalonnage sont listées dans le Tableau 2.

Tableau 2: Analyseurs et caractéristiques des gaz pour étalonnage utilisés

Paramètres mesurés	Analyseurs Utilisés	Bouteilles / Certificats Concentration / Incertitude
O ₂	Analyseur multigaz PG250 Références : M-CF-15214 Gamme : 0-25% volume	N°13568 –N°0745/12P 10,011 % volume ± 0,015 % volume
CO	Analyseur multigaz PG250 Références : M-CF-15214 Gamme : 0-25% volume	N°13568 –N°0745/12P 899 ppm ± 2,7 ppm
NO / NO _x	Analyseur TEI 42iHL Références : M-CF-15142 Gamme : 0-100 ppm	N°94151 – N°0554/12P NO : 90,15 ppm ± 0,27 ppm NO _x : 92 ppm ± 1,8 ppm
CO ₂	Analyseur multigaz PG250 Référence : M-CF-15214 Gamme : 0-20% volume	N°13568 –N°0745/12P 10,035 % volume ± 0,02 % volume
COVT/COVNM	Analyseur JUM Référence : M-CF-15319	N°70104 – N°1533/11P N°32448 – N°7497 CH ₄ : 903,6 ppm ± 6,3 ppm COVT : 3000 ppm C ₃ H ₈ ± 11 ppm

Calibrages et contrôles de dérive des analyseurs de gaz :

Les analyseurs sont calibrés avant chaque série de mesurages, au moyen de gaz pour étalonnage raccordés au système SI d'unités. Il est effectué un contrôle de dérive en fin de série de mesurages avec ces mêmes gaz pour étalonnage. Ces opérations ont lieu à minima une fois par jour.

Les corrections de dérives s'appuient sur les règles établies dans les normes européennes NF EN 14789 (mesurage d'O₂), NF EN 14792 (mesurage de NO_x) et NF EN 15058 (mesurage de CO). Les référentiels prévoient une correction de la dérive lorsque la dérive au zéro ou au point d'échelle est comprise entre 2 et 5 % de la concentration du gaz pour étalonnage de point d'échelle, et une invalidation des données au-delà de 5 %.

Intervalle de confiance sur les résultats de méthodes normalisées

DI-0058	INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LES RESULTATS DE MESURES				
<i>Nota : ce document a été émis et est géré par DRC/ CARA / EMIS</i>					
<p>Les intervalles de confiance de reproductibilité I_{CR} sont calculés selon la norme NF X 43-331 : $I_{CR} = t.S_R$ à 95 % de niveau de confiance (t : coefficient de Student). A tout résultat de mesurage sera attaché un intervalle de confiance sous la forme $y \pm I_{CR}$ Les intervalles de confiance de reproductibilité donnés dans les tableaux du § 1 correspondent aux intervalles de confiance associés au résultat de mesurage sur gaz humide si le mesurage est réalisé sur gaz humide (exemple : COV) et à O_2 réel. Les mesures étant comparées aux VLE exprimées sur gaz sec et à O_2 de référence, il convient de combiner à ces intervalles de confiance, l'incertitude liée à la conversion sur gaz sec le cas échéant, et la conversion à O_2 de référence (excepté pour O_2, CO_2 et vapeur d'eau). Le calcul des incertitudes associées à ces conversions sont fournis aux § 2 et § 3 respectivement.</p>					
1. Intervalles de confiance associés aux mesures à O_2 réel, et sur gaz humide pour vitesse et COV					
INDICES PONDERAUX SELON NFX 44-052 ET NF EN 13284-1					
Concentration en mg/m_0^3	2,5 (0,3-6,8)	6,4 (3-19)	27 (9-49)	71 (51-125)	
I_{CR} en % de la concentration (+/-) CIL validation normes	73	63	23	17	
Ces intervalles de confiance sont probablement surestimés car déterminés à partir de résultats de mesurage de 30 minutes					
MESURES DE CONCENTRATIONS EN SO_2 PAR BARBOTAGE ET ANALYSE PAR CHROMATOGRAPHIE IONIQUE SELON NF EN 14791					
Concentration mg/m_0^3	Selon EN 14791	5	10	30	> 50
I_{CR} en % de la concentration (+/-)	(*)	120	69	29	21
Concentration mg/m_0^3	Selon CIL INERIS	-	10-20	20-50	>50
I_{CR} en % de la concentration (+/-)	(2010-2012)	-	40	23	21
(*) : $I_{CR}(C) = 0,089 C + 6$ en mg/m^3					
MESURES DE CONCENTRATIONS EN HCL SELON NF EN 1911					
Concentration en mg/m_0^3	Selon EN 1911	0,08	5	40	
I_{CR} en % de la concentration (+/-)		200	30	5	
Concentration mg/m_0^3	Selon CIL INERIS	-	-	16-49	
I_{CR} en % de la concentration (+/-)	(2010)	-	-	38	
NOTE : CIL INERIS 2010-2012 avec présence simultanée HCl et NH_3 : $I_{CR} = 110\%$ pour 5-30 mg/m_0^3					
MESURES DE CONCENTRATIONS EN HF SELON NFX 43-304					
Concentration en mg/m_0^3 équivt HF		5			
I_{CR} en % de la concentration (+/-)		30			

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée
 DI-0058-A.L-Applicable
 Seule la version électronique fait foi
 Mise en application le 10/04/2014

DI-0058

INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LES RESULTATS DE MESURES

MESURES DE CONCENTRATIONS EN NH₃ SELON NFX 43-303

Concentration en mg/m ³	7-40
I _{CR} en % de la concentration (+/-) Selon CIL INERIS (2010)	81

NOTE : CIL INERIS 2010-2012 avec présence simultanée NH₃ et HCl : I_{CR} = 112 % pour 2-32 mg/m³

MESURES DE CONCENTRATIONS EN MERCURE SELON NF EN 13211(DOC NF EN 13211)

Concentration en µg/m ³	4 à 10	40 à 100
I _{CR} en % de la concentration (+/-) Selon EN 13211	44	25
I _{CR} en % de la concentration (+/-) Selon CIL INERIS (2002-2007)	94	57

MESURES DE CONCENTRATIONS EN METAUX LOURDS SELON NF EN 14385

Composé	Concentrations en µg/m ³	I _{CR} en % (+/-)	Composé	Concentrations en µg/m ³	I _{CR} en % (+/-)
As	0,5-10	294	Ni	0,5-10	393
Cd	2-10	147	Pb	100-550	97
Co	0-5	253	Sb	1-25	122
Cr	1-100	447	Tl	0.05-60	385
Cu	10-100	106	V	0.01-7	270
Mn	1-20	155			

MESURES DE LA TENEUR EN VAPEUR D'EAU SELON NF EN 14790

Teneur en % volumique	5-10	10-20
I _{CR} en % de la teneur (+/-) Selon CIL INERIS (2010-2012)	21	14

MESURES DE CONCENTRATIONS EN PCDD/PCDF SELON NF EN 1948

Concentration en ng I-TEQ/m ³	0,035	12
I _{CR} en % de la concentration (+/-) Selon EN 1948	140	35,8

MESURES DE CONCENTRATIONS EN HAP SELON NFX 43-329 (CIL INERIS - DRC-01-23721-AIRE-685-JPo)

Composé	Concentrations en µg/m ³	I _{CR} en µg/m ³ (+/-)
Fluoranthène	30 - 1050	I _{CR} = 0,0006C ² - 0,1266C + 56,678
Indéno (1,2,3-c,d) pyrène	5 - 150	I _{CR} = 0,006C ² + 0,4966C + 5,4468
Benzo (g,h,i) pérylène	5 - 100	I _{CR} = 0,0048C ² + 0,7150C + 0,7014
Dibenzo (a,h) anthracène	1 - 25	I _{CR} = 0,4076C + 4,2936
Benzo (a) pyrène	5 - 300	I _{CR} = 0,2908C + 23,45
Benzo (k) fluoranthène	3 - 250	I _{CR} = 0,0082C ² + 0,8554C + 30,948
Benzo (b) fluoranthène	5 - 800	I _{CR} = 0,0004C ² + 0,9582C - 7,566
Benzo (a) anthracène	10 - 250	I _{CR} = 0,0018C ² + 0,2772C + 13,691

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée
DI-0058-A.L-Applicable

Seule la version électronique fait foi
Mise en application le 10/04/2014

DI-0058

INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LES RESULTATS DE MESURES

MESURES DE CONCENTRATIONS EN NO_x PAR ANALYSEURS A CHIMILUMINESCENCE SELON NF EN 14792

Concentration en mg/m ³ éq NO ₂	Selon EN 14792	50	100	> 200
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(*)	13	8,3	4,2
Concentration en mg/m ³ éq NO ₂	Selon CIL INERIS	10-160	200-500	
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(2013)	12	10	

(*) : $I_{CR}(C) = 0,038 C + 4,400$ en mg/m³

MESURES DE CONCENTRATIONS EN CO PAR ANALYSEURS A ABSORPTION INFRA-ROUGE SELON PR EN 15058

Concentration en mg/m ³	Selon EN 15058	5 - 15	50	80	> 200
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(*)	150 - 51	17	12	6
Concentration en mg/m ³	Selon CIL INERIS	15-30	30-120	130-220	
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(2013)	55	17	10	

(*) : $I_{CR}(C) = 0,029 C + 7,200$ en mg/m³

MESURES DE CONCENTRATIONS EN O₂ PAR ANALYSEURS PARAMAGNETIQUES SELON NF EN 14789

Concentration en %	Selon EN 15058	8 à 20	5 à 8	1 à 5
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(*)	3,8 à 3,2	4,3 à 3,8	10 à 4,3
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	Selon CIL INERIS (2013)	4,5-1,5	-	-

(*) : $I_{CR}(C) = 0,029 C + 0,070$ en % vol

MESURES DE COVT, COVNM, CH₄ SELON XP X 43-554, ET NF EN 12619

COVT						
Concentration en mg/m ³ éq C	Selon EN 12619	1 à 5	5 à 10	10 à 20	-	-
I _{CR} en % de la concentration (+/-)		50	30	20	-	-
Concentration en mg/m ³ éq C	Selon CIL INERIS	-	-	10-20	20-120	120-170
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(2013)	-	-	37	17	13
COVNM						
Concentration en mg/m ³ éq C	Selon CIL INERIS	-	-	10-20	20-140	-
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(2013)	-	-	64	24	-
CH ₄						
Concentration en mg/m ³ éq C	Selon CIL INERIS	-	-	10-60	-	
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(2013)	-	-	30	-	

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée
DI-0058-A-L-Applicable

Seule la version électronique fait foi

Mise en application le 10/04/2014

Page - 3 / 5 -

DI-0058

INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LES RESULTATS DE MESURES

MESURES DE CONCENTRATIONS EN CO₂ PAR ANALYSEURS PARAMAGNETIQUES SELON NF X 20-380

Concentration en % vol	Selon CIL INERIS	2 à 5	5-9
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	(2013)	10	6

MESURES DE CONCENTRATIONS EN SO₂ PAR ANALYSEURS A ABSORPTION IR ET UV (Doc Essais interlaboratoires - INERIS MAN-JPo 16CP09 -98/107.doc)

Concentration en mg/m ³	70	110	220	< 300
I _{CR} en % de la concentration (+/-)	46	33	16	13

MESURES DE VITESSE / DEBIT VOLUME AU MOYEN D'UN TUVE DE PITOT SELON LA NORME ISO 10780 ()

Vitesse en m/s	Selon norme EN ISO 16911-1	-	19-28
I _{CR} en % de la vitesse (+/-)		-	0,8-5,3
Vitesse en m/s	Selon CIL sur site (*)	13-15	-
I _{CR} en % de la vitesse (+/-)		5-10	-

(*) : Etude ADEME convention 0574C0013 - rapport DRC-08-71215-16636A (3 campagnes d'essais avec quatre laboratoires)

2. Incertitude de la concentration exprimée sur gaz sec

La concentration d'un composé exprimée sur gaz sec est donnée par :

$$C_{sec} = C_{hum} \frac{100}{100 - H_2O}$$

Où :

- C_{sec} est la concentration sur gaz sec
- C_{hum} est la concentration sur gaz humide
- H_{2O} est la teneur en vapeur d'eau du gaz.

L'incertitude associée à la concentration sur gaz sec est calculée selon l'équation suivante :

$$u^2(C_{sec}) = (C_{sec})^2 \times \left(\frac{u^2(C_{hum})}{(C_{hum})^2} + \frac{u^2(H_2O)}{(100 - H_2O)^2} \right)$$

Où :

- u(C_{sec}) est l'incertitude-type de la concentration sur gaz sec
- u(C_{hum}) est l'incertitude-type de la concentration sur gaz humide
- u(H_{2O}) est l'incertitude-type de la mesure d'humidité.

L'incertitude de la concentration sur gaz sec dépend donc de l'incertitude de la mesure effectuée sur gaz humide, et de l'incertitude de la mesure de l'humidité ; elle croit avec la teneur en humidité du gaz prélevé.

DI-0058

INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LES RESULTATS DE MESURES

3. Incertitude de la concentration exprimée à O₂ de référence

La concentration d'un gaz exprimée à une teneur de référence en oxygène est donnée par :

$$C_{O_2,ref} = C_{O_2,réel} \frac{20,9 - (O_{2,ref})_{sec}}{20,9 - (O_{2,mes})_{sec}}$$

Où :

- $C_{O_2,ref}$ est la concentration exprimée à la teneur en oxygène de référence $O_{2,ref}$
- $(O_{2,ref})_{sec}$ est la teneur en oxygène de référence sur gaz sec
- $C_{O_2,réel}$ est la concentration à la teneur en oxygène réelle des gaz $O_{2,réel}$
- $(O_{2,réel})_{sec}$ est la teneur en oxygène réelle de l'effluent sur gaz sec.

L'incertitude associée à la concentration sur gaz sec est calculée selon l'équation suivante :

$$u^2(C_{O_2,ref}) = (C_{O_2,ref})^2 \times \left(\frac{u^2(C_{O_2,réel})}{(C_{O_2,réel})^2} + \frac{u^2((O_{2,réel})_{sec})}{(20,9 - (O_{2,réel})_{sec})^2} \right)$$

Où :

- $u(C_{O_2,ref})$ est l'incertitude-type de la concentration exprimée à teneur en O₂ de référence
- $u(C_{O_2,réel})$ est l'incertitude-type de la concentration à oxygène réel
- $u((O_{2,réel})_{sec})$ est l'incertitude-type de la teneur en oxygène réelle de l'effluent sur gaz sec.

L'incertitude de la concentration exprimée à une teneur en oxygène de référence dépend donc de l'incertitude de la mesure effectuée à oxygène réel, et de l'incertitude de la mesure d'oxygène. Elle croît avec la teneur en oxygène du gaz prélevé.

2. MÉTHODES NON NORMALISÉES

2.1 MESURAGE DES PM

2.1.1 CONDITIONNEMENT DE L'AÉROSOL

Le conditionnement de l'aérosol a été réalisé par une dilution en deux étapes :

- un premier étage de dilution à l'air chaud par tube poreux. Ce mode de dilution a été précédemment utilisé par l'INERIS dans le cadre du projet Biohealth.
- un second étage de dilution à température ambiante par un diluteur à éjecteur.

Ce mode de dilution combinant le tube poreux au diluteur à éjecteur présente l'avantage de minimiser les pertes et d'obtenir des ratios de dilution stable. Il figure parmi les méthodes candidates de conditionnement de l'aérosol retenues dans le cadre du projet EN_PME_TEST coordonné par l'INERIS et visant à proposer et valider une méthode de mesure des émissions de particules issues des appareils de chauffage domestique utilisant la biomasse.

Les ratios de dilution ont été déterminés en continu pendant les essais grâce au mesurage du taux de CO₂ dans l'effluent en amont et en aval de la dilution.

2.1.2 PRÉLÈVEMENTS PAR IMPACTION MANUELLE

Un prélèvement par impacteur repose sur le principe de la classification inertielle suivant le diamètre aérodynamique des particules. Un étage d'impaction est constitué d'un ajutage dirigeant un flux d'air à haute vitesse contre une surface solide, entraînant une impaction des particules de taille supérieure à un certain diamètre de coupure qui ont le plus d'inertie, les autres qui ont moins d'inertie continuent leur chemin dans le flux d'air. La ségrégation de l'aérosol en plusieurs tranches granulométriques est obtenue par l'utilisation en cascade de plusieurs étages d'impaction. Chaque étage comporte une buse d'entrée et une surface d'impaction équipée d'un support de collecte, comme le montre la figure ci-après. La détermination des tranches granulométriques est obtenue par pesée différentielle de la masse de poussière collectée à chaque étage.

Le diamètre de l'aérosol mesuré est le diamètre aérodynamique, c'est-à-dire le diamètre de la sphère équivalente de masse volumique égale à 1 g/cm³ et ayant la même vitesse limite de chute dans l'air que la particule considérée. La courbe d'efficacité d'un impacteur (ou de tout autre système de séparation granulométrique comme les cyclones) est construite entre 0 et 100% d'efficacité de collecte des particules, exprimée en masse par diamètre aérodynamique.

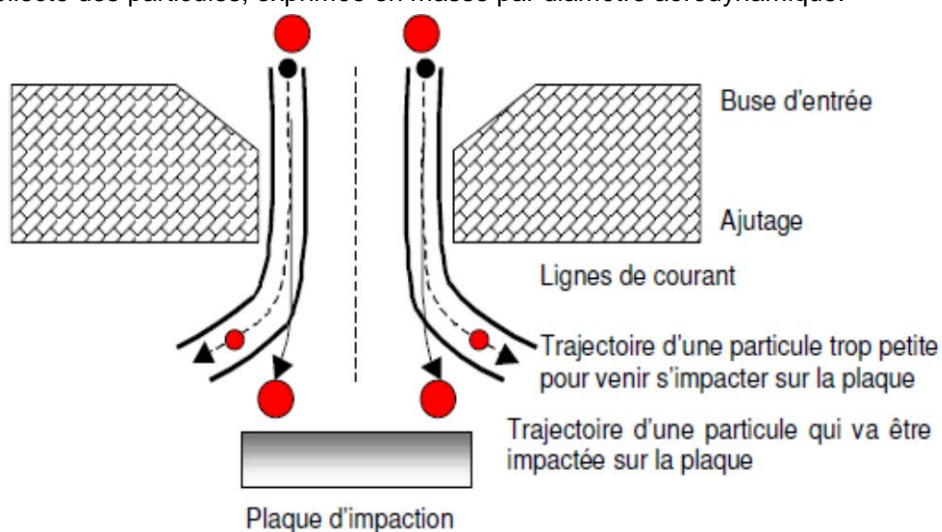


Figure 1 : Schéma de principe d'un étage d'impacteur (Renoux et Boulaud, 1998).

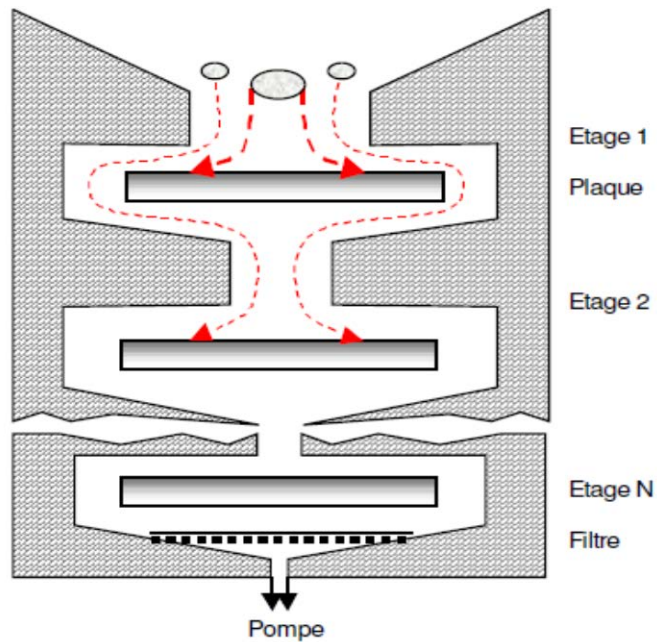


Figure 2 : Schéma de principe d'un impacteur en cascade (Renoux et Boulaud, 1998)

L'impacteur manuel utilisé ici est l'impacteur DEKATI qui, avec l'impacteur JOHNAS répondent aux exigences de la méthode de référence NF EN ISO 23210-1 qui s'applique aux émissions particulaires des sources fixes¹.



Figure 3 : Impacteur DEKATI

L'impacteur manuel Dekati permet une détermination de l'indice pondéral des fractions PM1, PM2.5 et PM10.

MESURAGES EN CONTINU AU MOYEN D'UN IMPACTEUR BASSE PRESSION À DETECTION ÉLECTRIQUE ELPI

L'ELPI combine un principe **aérodynamique** pour la classification en taille des aérosols avec un principe **électrique** pour le mesurage de la concentration des aérosols en temps réel.

Principe

Le principe de l'ELPI est proche de celui de l'impacteur manuel DEKATI à quelques différences près.

¹ NF EN ISO 23210-1, « Émissions de sources fixes - Détermination de la fraction massique PM10/PM2,5 dans les fumées - Partie 1 : mesurage à des faibles concentrations à l'aide d'impacteurs »
http://www.boutique.afnor.org/NEL5DetailNormeEnLigne.aspx?CLE_ART=FA139782&nivCtx=NELZNELZ1A10A101A107&aff=1737&ts=1504647

- Dans le cas de l'ELPI, après passage dans l'orifice d'entrée situé au sommet de l'instrument, les particules sont introduites au sein d'un chargeur unipolaire à effet couronne, qui a pour but de charger électriquement chaque particule. Par cette opération, le chargeur impose à l'aérosol étudié une loi de charge connue afin que les courants mesurés soient ensuite interprétables. Dans la configuration du chargeur établie pour l'appareil, le nombre de charges portées par les particules est fonction de leur diamètre. Les particules chargées sont ensuite transportées dans l'impacteur en cascade où elles se déposent suivant leur diamètre aérodynamique.
- L'ELPI est composé d'un maximum de 13 étages de collection dont les diamètres caractéristiques de coupure sont compris entre 0,007 μm et 10 μm , parmi lesquels huit se trouvent dans le domaine submicronique.
- Le pied de la rampe d'impacteurs est maintenu à basse pression (100 mbar), ce qui permet d'augmenter la vitesse des particules afin d'impacter les plus fines. Le dernier étage, muni d'un ajutage très étroit (diamètre faible donc forte accélération), collecte les particules mesurant quelques dizaines de nanomètres. Un impacteur classique fonctionnant à pression atmosphérique ne permet généralement pas d'étudier les particules dont la taille est inférieure à quelques centaines de nanomètres.
- Le comptage de l'ELPI est électrique. Chaque particule venant impacter sur un des plateaux lui communique sa charge électrique. Le flux de charge entre le plateau et le système de mesure (électromètre) provoque un courant électrique. Pour compter les particules de cette manière, il faut imposer à l'aérosol une loi de charge connue. C'est le rôle d'un chargeur à effet couronne placé à l'intérieur du granulomètre.

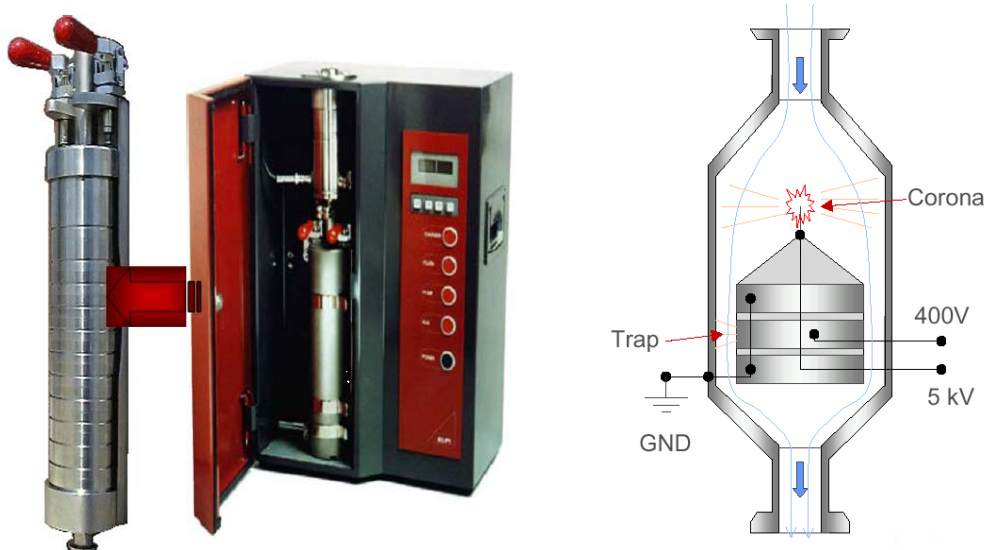


Figure 4 : Impacteur ELPI et ses étages de filtration

- Un calcul permet ensuite d'aboutir au nombre de particules collectées sur un étage donné et finalement, après prise en compte du débit de prélèvement (10 l/min), à la concentration en nombre de particules par unité de volume d'air. Le mesurage de courant induit à chaque étage étant réalisé en temps quasi réel, l'appareil ELPI a un temps de réponse caractéristique de l'ordre de la seconde, pour le mesurage de la concentration pour chaque canal de l'impacteur. Il délivre en temps réel la concentration et la distribution en taille des aérosols, exprimées en unité numérique et après calcul estimatif en unité massique.

MESURAGE DES COV SPECIFIQUES

Les prélèvements de COV spécifiques ont été réalisés sans conditionnement de l'effluent sur tubes Carbotrap 300 qui permettent de couvrir une large gamme de volatilité et de solubilité dans l'eau. L'objectif de ce prélèvement était dans un premier temps de réaliser une analyse screening de l'échantillon par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse afin d'identifier les composés présents, puis de quantifier les espèces jugées prioritaires c'est-à-dire celles apparaissant comme majoritaires, et celles présentant un intérêt en termes sanitaires.

MÉTHODES MISES EN ŒUVRE PAR IRSTEA

1. ANALYSEUR DE GAZ EMBARQUÉ

En fin de chaîne de mesure, on raccorde un analyseur de gaz Horiba OBS-2200, système de mesure embarquée des émissions de polluants gazeux dans les fumées. Il comprend des analyseurs résistants aux vibrations (1), un PC portable avec logiciel pour le pilotage du système (2) et l'enregistrement des données, des capteurs accessoires (capteur de température, pression et débit d'échappement, capteur de température, pression, humidité ambiante ...) et une gaine de prélèvement chauffée qui prélève une partie des gaz pour analyse. Les concentrations en CO et CO₂ des émissions du véhicule sont mesurées par un analyseur non-dispersif à absorption dans l'infrarouge chauffé (NDIR) sans extraction d'eau. La concentration de THC est mesurée par un analyseur à ionisation de flamme chauffé (FID) et celle des NOx par un détecteur à chimiluminescence chauffé (CLD). Le débitmètre Pitot permet la mesure du débit volumique des gaz d'échappements et une mesure est faite du contenu en eau des fumées. L'utilisation de l'appareil au cours de la campagne banc d'essai tracteur nous permet ainsi de le calibrer avant la campagne de mesure de terrain. Néanmoins, les appareils de référence pour la campagne banc d'essai tracteur sont les appareils utilisés par l'Ineris.

2. MESURE ET INCERTITUDE RELATIVE AU DÉBIT DE GAZ

L'analyseur Horiba dispose d'un tube de Pitot mesurant le débit en sortie de l'échappement. Cet appareil étant disposé en fin de chaîne de prélèvement pour les mesures sur banc, nous avons contrôlé la valeur annoncée. Pour cela, nous avons calculé le débit $q_{ex,c}$ par la méthode préconisée dans la réglementation avec le bilan carbone. On compare la valeur mesurée par le tube Pitot et à celle calculée par la formule simplifiée qui consiste à supposer la combustion complète:

Équation 1 :

$$q_{ex,c} = \frac{C_{fuel} \cdot w_c \cdot \dot{M}_{air}}{C_{CO_2} \cdot \dot{M}_{fuel}}$$

Où M_{fuel} et M_{air} sont les masses molaires du carburant et de l'air, et w_c est le ratio molaire de carbone dans le carburant, C_{fuel} et C_{CO_2} les consommations de carburant et concentration de CO₂ mesurées. Enfin, on calcule une troisième valeur de débit à partir de la concentration mesurée en oxygène dans les fumées.

Si la formule approchée ci-dessus donne des résultats très proches de la méthode réglementaire, on observe que les débits mesurés par le tube Pitot sont nettement inférieurs aux valeurs calculées. Les prélèvements effectués en amont de cette mesure absorbent une part non négligeable du débit de gaz, ce qui explique le déficit de débit observé sur Figure 5. C'est pourquoi nous avons conservé la méthode réglementaire pour le calcul du débit dans l'ensemble des résultats présentés.

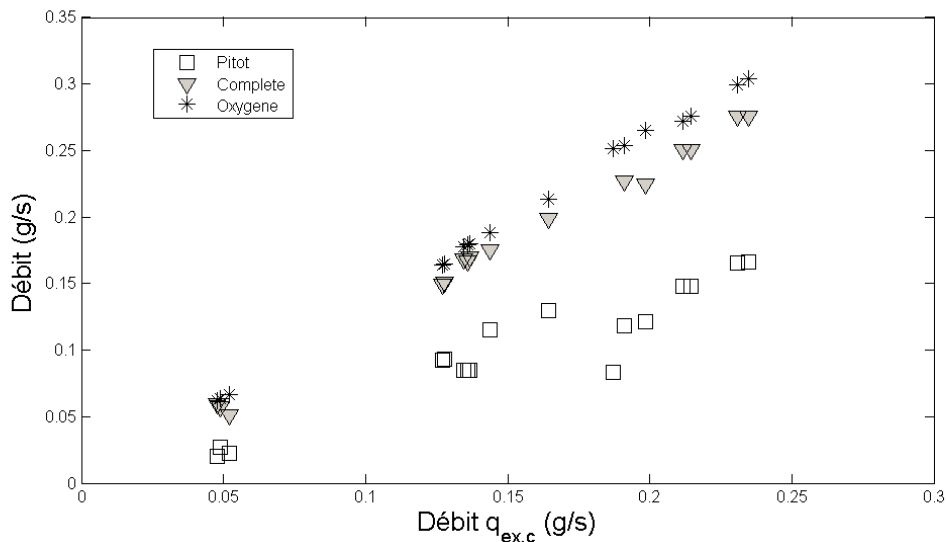


Figure 5 : Comparaison du débit mesuré par le tube Pitot en aval de la chaîne de prélèvement aux valeurs calculées selon la méthode réglementaire- Mesures effectuées sur le tracteur New Holland

3. MESURES ET INCERTITUDES RELATIVES AUX CONCENTRATIONS GAZEUSES

Dans la série de mesures effectuées sur le New Holland, les points de fonctionnement ont été répétés. Dans ce cas, on utilise le coefficient de variation (rapport de l'écart-type par la moyenne) pour quantifier la précision/reproductibilité des mesures sur un même cycle. Dans le Tableau 3, on présente le coefficient de variation moyen pour le tracteur Tier3b, pour lequel les mesures ont été répétées sur chaque point de fonctionnement.

Tableau 3- Coefficient de variation intra-cycle des mesures en fonction du polluant – mesures Tier3b

< 5%	5-15%	15-50%	50-75%
O ₂ , CO ₂ , NO _x , Température, Débit	CO, NO ₂ , CH ₄ , IP condensable, Dibenzo(a,h) anthracène	COVt, PM2.5, PM10, PMt, N(PM), Fluoranthène, Benzo (a) anthracène, Benzo (b) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Benzo (g,h,i) pérylène, Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	IP(solide) PM1, Benzo (k) fluoranthène

Pour les polluants réglementés (NO_x, CO, CH₄, CO₂), le coefficient de variation est en général plus faible que pour les autres polluants : ils deviennent beaucoup plus importants pour les polluants émis en très faible quantité : c'est le cas pour les COVt et les particules émis par le tracteur tier3b. C'est également le cas de la majorité des composés HAP, pour lesquels la dispersion des mesures est de l'ordre de 40 à 50%.

Une partie de l'incertitude de mesure réside aussi dans les appareils utilisés. Sur les composés gazeux conventionnels, on dispose de deux séries d'appareils, étalonnés sur des gaz étalons, qui sont similaires sur leur principe de mesure, mais différent par leur gamme de mesurage : l'un quantifie des concentrations diluées (série « Ineris ») tandis que l'autre mesure les concentrations en gaz non dilués (série « Irstea »).

Sur les Figure 6 et Figure 7, on compare aussi les valeurs fournies par ces deux appareils : elles sont exprimées en émissions massiques, avec un calcul du débit et des facteurs correctifs de volume de fumées et d'humidité identiques. Si les coefficients de corrélation entre les séries « Irstea » et « Ineris » sont très élevées, supérieurs à 0.98 sur l'ensemble des séries, les écarts de valeurs absolues sont nettement plus importants que les coefficients de variations intra-cycle présentés auparavant.

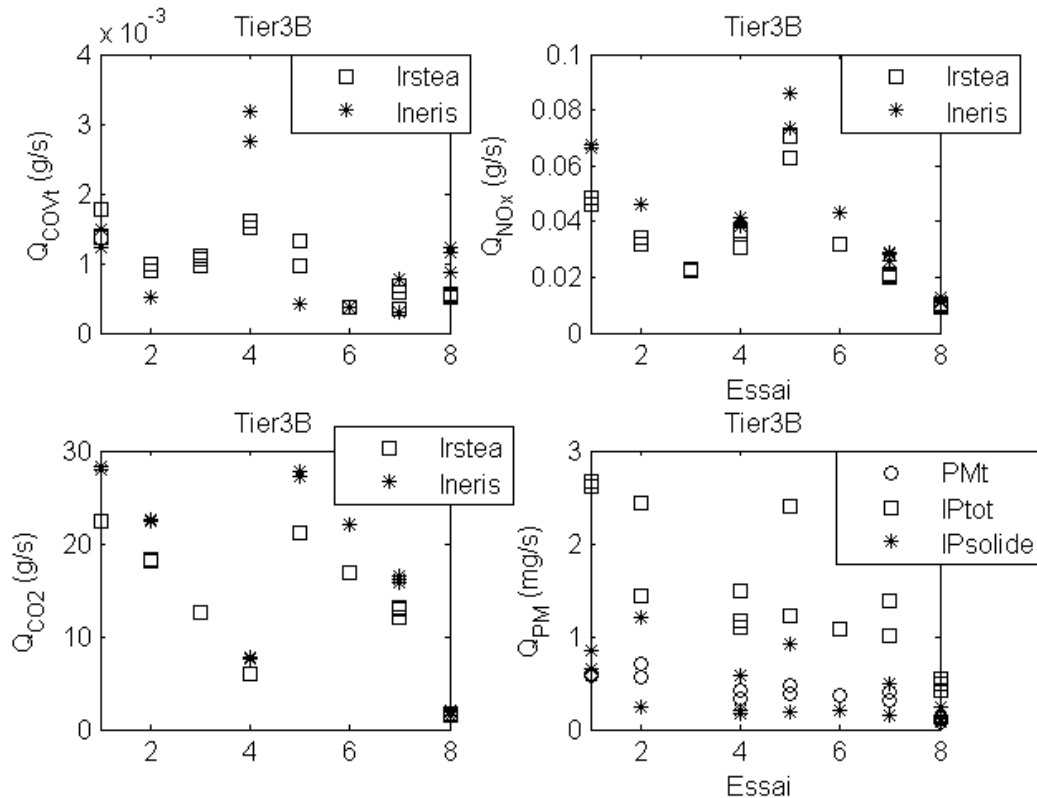


Figure 6- Mesures des débits de polluants réalisées pour le tracteur New Holland (Tier3b) pour chacun des points de fonctionnement testés

Ainsi :

- pour les émissions de CO₂, on observe un écart de 20% entre les résultats obtenus par les deux appareils.
- pour les émissions de NO_x, on observe un écart de 25 % entre les résultats obtenus par les deux appareils ;
- pour les émissions des COVt, on observe un écart de de 20% à 50 % entre les résultats obtenus par les deux appareils.

Excepté pour le CO₂, ces écarts restent inférieurs aux écarts inter-laboratoires mesurés lors du round-robin tests de mesures des émissions des voitures particulières, de 40% pour les NOx et de 60% pour les HC [18]. L'écart met en évidence l'intérêt des méthodes de mesures sur sacs pour la validation des enregistrements continus. Dans la suite de ce rapport, les valeurs de concentration de la série Ineris sont retenues pour le calcul des facteurs d'émission au banc et l'analyseur Irstea pour les mesures de terrain.

Sur ces figures, on compare également les méthodes de quantification de la phase particulaire. Pour le tracteur tier3b, les émissions de particules (PMt) sont très faibles et la dispersion intra-cycle des résultats est élevée : il en va de même pour les mesures d'IPsolide : on ne peut que constater que les deux séries sont dans le même ordre de grandeur (+40% pour les IP solides). Si la mesure des PMt souffre d'incertitudes du fait des faibles niveaux mesurés, le coefficient de variation des IPsolides est lui encore plus élevé. Les IP totaux valent deux à trois fois les valeurs d'émission de particules et les condensables constituent la majorité de la phase recueillie.

Sur le tracteur tier3a, les IPSolides sont toujours bien corrélés aux émissions de particules, mais ils sont plus faibles de 20%. La contribution de la phase condensable n'a pas pu être évaluée.

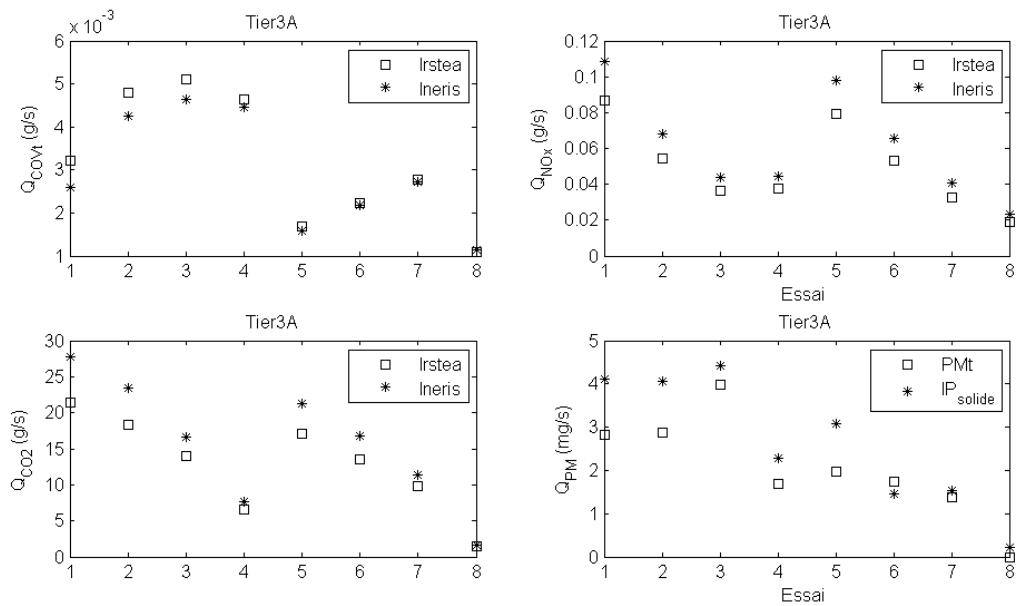


Figure 7- Mesures des débits de polluants mesurés pour le tracteur Massey Ferguson (Tier3A) sur les différents points de fonctionnement

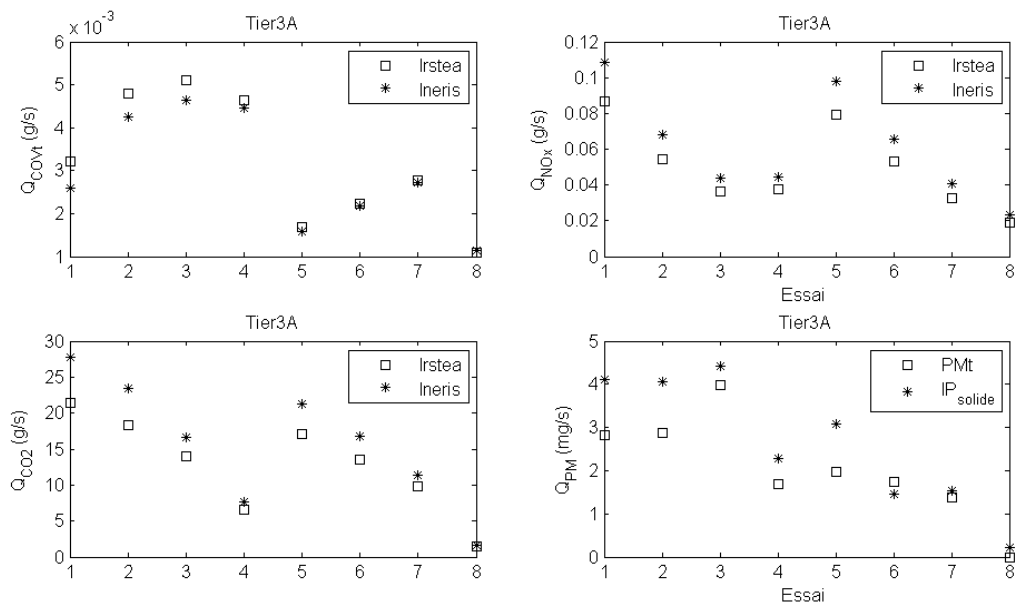


Figure 8- Mesures des débits de polluants mesurés pour le tracteur Massey Ferguson (Tier3A) sur les différents points de fonctionnement

ANNEXE C

ENSEIGNEMENTS EN TERMES DE MÉTROLOGIE ET STRATÉGIE DE MESURAGE SUITE À LA PREMIÈRE CAMPAGNE TRONÇONNEUSE

ENSEIGNEMENT EN TERMES DE MÉTROLOGIE ET DE STRATÉGIE DE MESURAGE

3.1 ENSEIGNEMENTS EN TERMES DE MÉTROLOGIE TIRÉS À PARTIR DE LA PREMIÈRE CAMPAGNE

Globalement, une bonne répétabilité des résultats a été obtenue en régime nominal sur l'ensemble des polluants. Il est donc envisageable, pour les campagnes suivantes de réduire le nombre d'essais afin d'étudier un plus grand nombre d'essais de démarrages.

3.1.1 MESURAGE DES COV

3.1.1.1 COVT ET COVNM

- S'agissant des de l'analyse en continu des COVT/ COVNM un problème de saturation analyseurs a empêché toute exploitation des données. Ceci a amené à prévoir, pour la réalisation des essais suivants suivantes, une dilution de l'effluent afin d'abaisser les niveaux de concentration à étudier.
- Les signaux de COVT et COVNM enregistrés lors des essais présentent des niveaux de concentrations très voisins, comme l'indique la Figure 9. Ceci indique que les concentrations en méthane sont très faibles et constantes pendant les essais. Le mesurage des COVNM ne paraît donc pas nécessaire pour les campagnes suivantes.

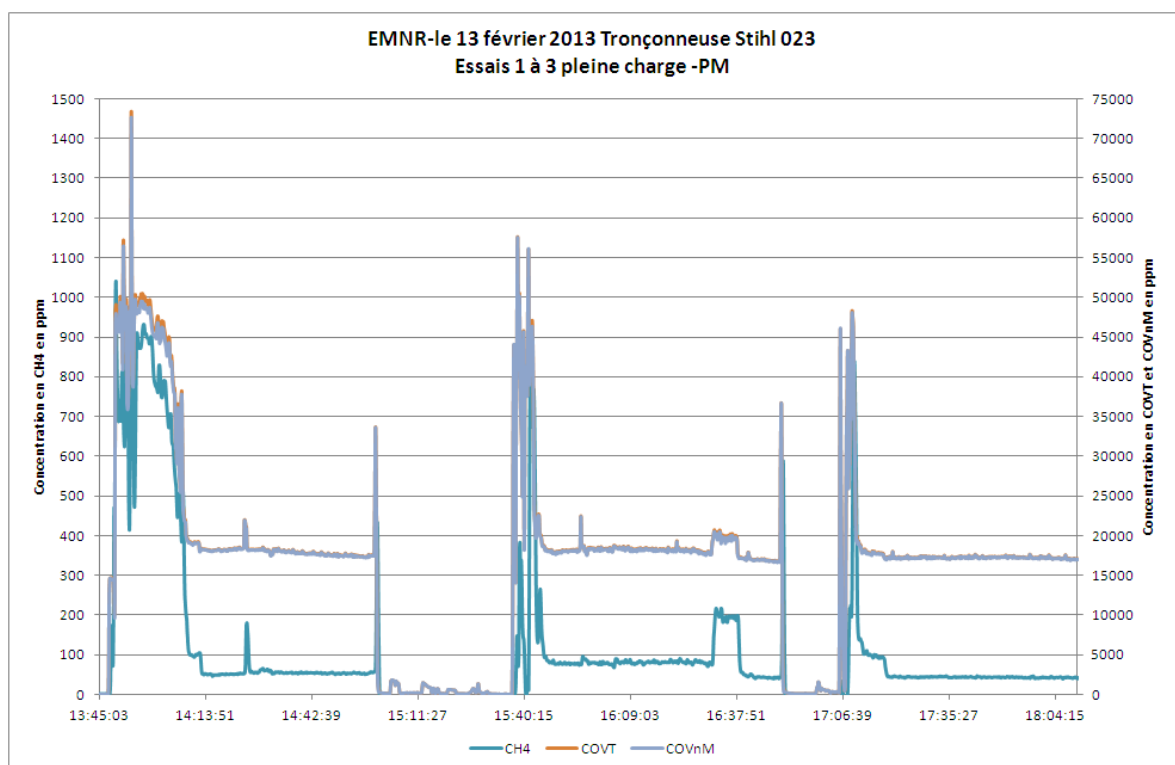


Figure 9 : Exemple de suivi des concentrations de COVT, COVNM et méthane obtenus en plein charge sur trois essais

3.1.1.2 COV SPECIFIQUES

S'agissant des prélèvements de COV_{spécifiques}, un problème de saturation du support de prélèvement ou des analyseurs a empêché toute exploitation des données. Ceci a amené à prévoir, pour la réalisation des campagnes de mesurage suivantes, une dilution de l'effluent afin d'abaisser les niveaux de concentration à étudier.

3.1.2 MESURAGE DU CO

S'agissant de l'analyse en continu du CO, un problème de saturation de l'analyseur a empêché toute exploitation des données. Ceci a amené à prévoir, pour la réalisation des essais suivants, une dilution de l'effluent afin d'abaisser les niveaux de concentration à étudier.

3.1.3 MESURAGE DES NO_x

La contribution du NO₂ aux concentrations de NO_x est de l'ordre de 25%. Un risque de perte de NO₂ dans la ligne de prélèvement est possible qui sous-estimerait la concentration globale en NO_x. Des résultats de mesurage incohérents conduisant à des concentrations négatives de NO₂, ont été observés systématiquement en régime ralenti. Ces résultats sont peut être dus à des corrections d'interférence du CO₂ inappropriées pour les faibles niveaux de concentrations de NO_x et CO₂ rencontrés pour cette configuration de ralenti.

3.1.4 MESURAGE DES PARTICULES ET HAP

3.1.4.1 PARTICULES

- Deux approches manuelles de caractérisation des émissions de particules ont été appliquées :
 - la mise en œuvre de la méthode TSP combinant un filtre qui collecte la fraction solide et des barboteurs à l'isopropanol qui collecte la fraction condensable.
 - la méthode par impaction qui prélève les PM10 et dans l'étage supérieur, la fraction de diamètre supérieur à 10 µm couplée à une dilution visant à provoquer la condensation des espèces organiques semi volatiles qui constituent la fraction dite « condensable » de l'aérosol. Si cette méthode n'est pas censée collecter les particules totales, le résultat obtenu en sommant la concentration en PM10 à la concentration de la fraction de diamètre supérieur à 10 µm permet d'approcher les TSP.

Comparer les résultats obtenus par ces deux approches permet de confirmer la pertinence du mode et des ratios de dilution choisis. Les résultats obtenus sur la tronçonneuse Stihl 023 indiquent une bonne cohérence entre les concentrations obtenues par les méthodes TSP (fractions solide et condensable) et par impaction manuelle après dilution, ce qui confirme la pertinence du mode et des ratios de dilution choisis.

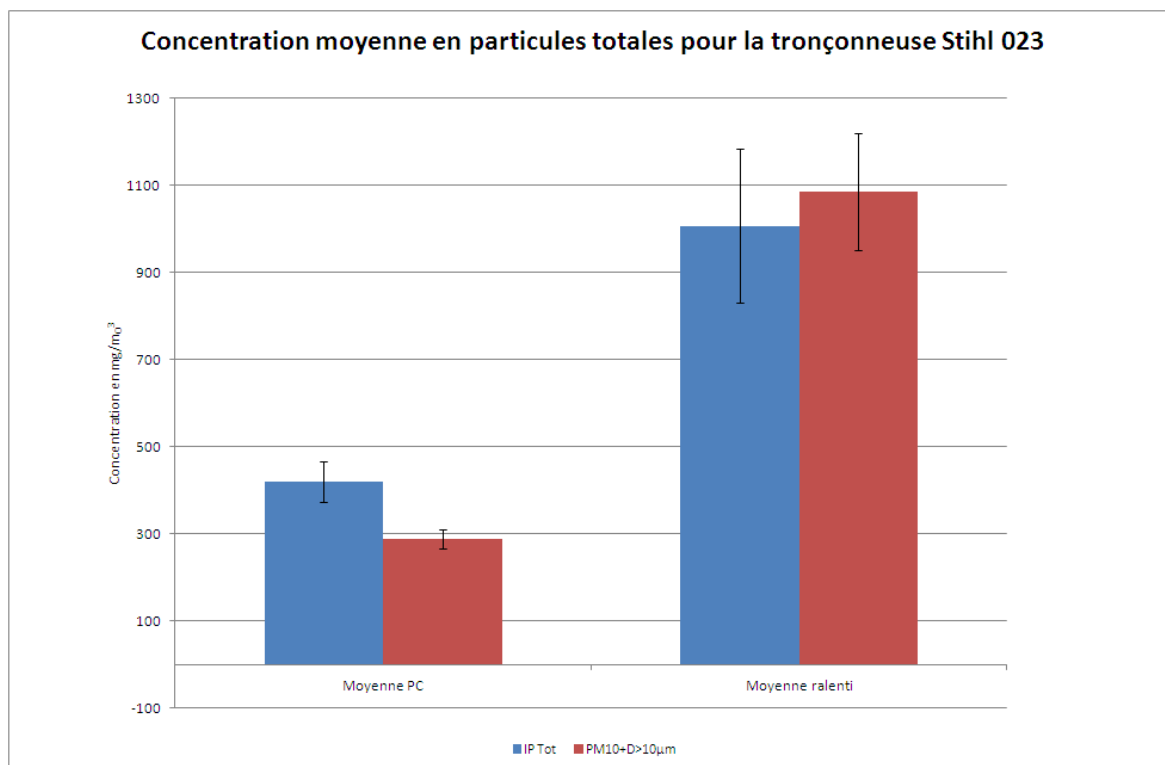


Figure 10 : Comparaison de la concentration moyenne en particules totales pour les différents régimes, campagne 1

- Contribution des dépôts dans la sonde aux concentrations en TSP et HAP

Dans la méthode de prélèvement des TSP et des HAP, le filtre plan est précédé d'une sonde chauffée dans laquelle des dépôts de poussières et de HAP peuvent avoir lieu pendant le prélèvement. La quantité de poussières et de HAP déposés est déterminée par rinçage de la sonde avec un solvant suivi d'une évaporation pour détermination de l'extrait sec dans le cas des poussières et analyse des HAP dans la solution de rinçage. La contribution de ces dépôts aux concentrations totales de TSP et de HAP a été déterminée au cours de la première campagne tronçonneuse afin d'évaluer la nécessité de réaliser les rinçages de sonde lors des campagnes suivantes.

La contribution des dépôts collectés dans le rinçage de sonde aux concentrations totales de HAP, en pleine charge, n'excède pas plus de 3% de la concentration totale, ce qui est faible. La prise en compte de ce rinçage dans le résultat pourra donc être négligée pour les essais en pleine charge. Elle n'excède pas plus de 1,5 % de la concentration totale de TSP en régime réduit. La prise en compte de ce rinçage dans le résultat TSP pourra donc être négligée pour les essais en régime réduit et en régime pleine charge pour lequel la fraction condensable est du même ordre de grandeur en absolu.

3.2 SYNTHÈSE

Lors de la première campagne, 5 essais en pleines charges, 3 essais au ralenti et 1 essai démarrage ont été étudiés pour chaque polluant. Les résultats obtenus ont montré une bonne répétabilité des résultats en pleine charge, une moins bonne répétabilité en régime ralenti. La bonne répétabilité des résultats obtenus en plein charge et le fait que le fonctionnement continu à pleine charge sur de longues périodes ne soit pas considéré comme le régime le plus représentatif, nous ont conduit à diminuer le nombre d'essais en pleine charge prévus pour les campagnes suivantes au profit de la réalisation d'essais de démarrage et à conserver le nombre d'essais en régime ralenti.

Les concentrations de CO, COVT et COV spécifiques sont très élevées et ont conduit à la saturation des analyseurs ou des supports de prélèvements lors de la première campagne.

Une dilution préalable des gaz à caractériser a donc été ajoutée pour la seconde campagne pour pouvoir quantifier ces paramètres.

Deux approches manuelles de caractérisation des émissions de particules ont été appliquées : la mise en œuvre de la méthode TSP (filtre et barboteur) collecte la fraction solide et la fraction condensable, et la méthode par impaction qui prélève les PM10 et dans l'étage supérieur, la fraction de diamètre supérieur à 10 µm couplée à une dilution visant à provoquer la condensation des espèces organiques semi volatiles qui constituent la fraction dite « condensable » de l'aérosol.

Les mesurages réalisés à partir de ces deux approches conduisent à des résultats cohérents, ce qui confirme la pertinence du mode et des ratios de dilution choisis.

La similarité observée entre les signaux des COVT et les COVNM ne rend pas nécessaire un mesurage des deux paramètres. **Le paramètre COVT apparaît donc suffisant dans ce contexte.**

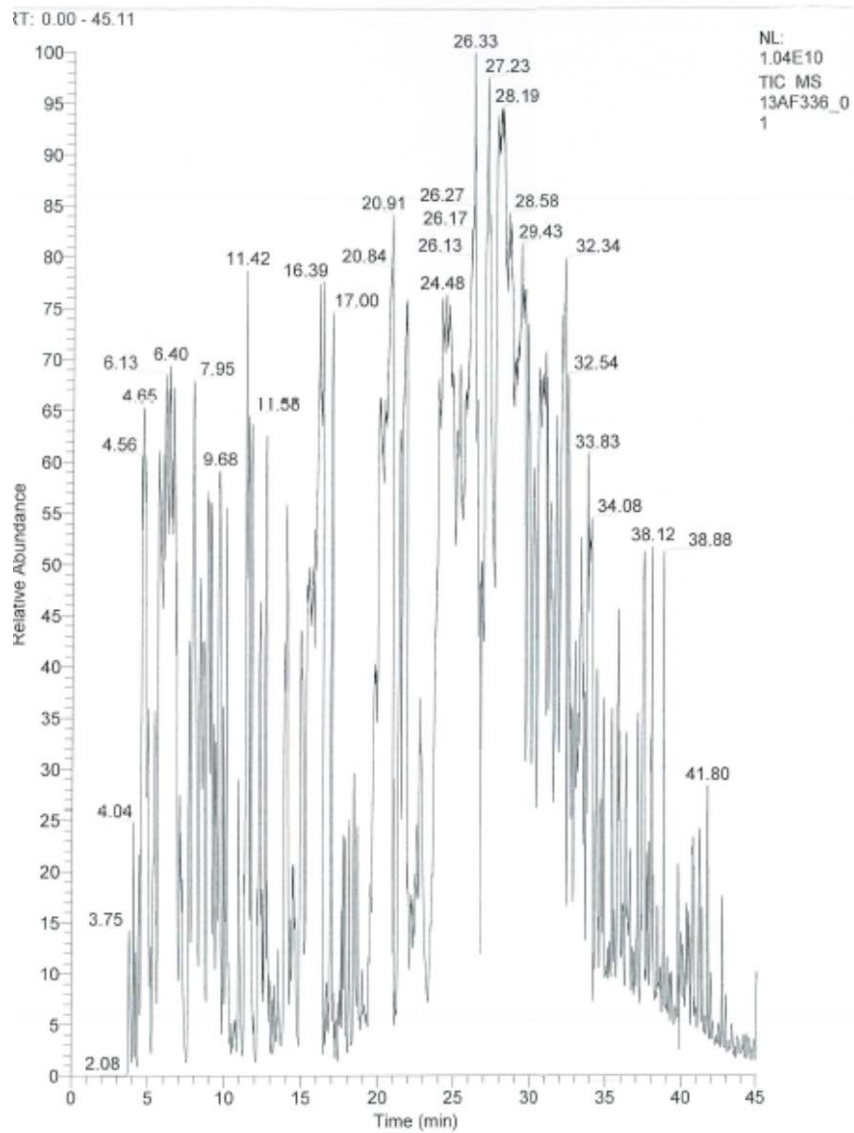
La contribution du NO₂ aux concentrations de NO_x est de l'ordre de 25%. Mais il est possible que ce ratio NO₂/NO_x soit supérieur car une part du NO₂ a pu être piégée dans les condensats présents dans la ligne de prélèvement. **La concentration globale de NO_x par voie de conséquence a pu être minimisée de quelques pourcents.**

Compte tenu des contributions du rinçage de sonde à la concentration totale déterminée pour les TSP et les HAP, **il n'est pas nécessaire de prendre en compte la contribution du rinçage dans la détermination des TSP.** Dans le cas des HAP, une nouvelle détermination de la contribution du rinçage à la concentration totale a été réalisée en régime ralenti uniquement.

ANNEXE D

Chromatogramme de l'analyse des COV spécifiques

Chromatogramme de l'analyse des COV spécifiques



ANNEXE E

Cartographie d'engins agricoles en activité
Statistiques de validation des essais transitoires réalisés
sur le tracteur New Holland
Détails sur les campagnes de mesures des émissions
polluantes sur le banc tracteur

CARTOGRAPHIE D'ENGINS AGRICOLES EN ACTIVITÉ

1. TRACTEUR AGRICOLE

Un tracteur a été équipé d'un dispositif d'enregistrement des données de moteur et prêté pendant 1 an à un agriculteur. Sur la Figure 11, on trace la cartographie des points de fonctionnement moteur correspondant aux différents usages réalisés pendant la campagne d'essai. Chaque point correspond au mode le plus fréquemment rencontré pendant l'activité concernée.

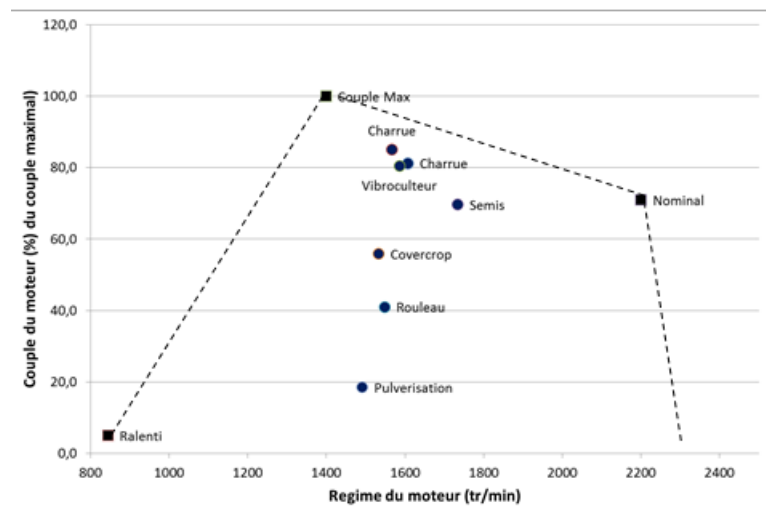
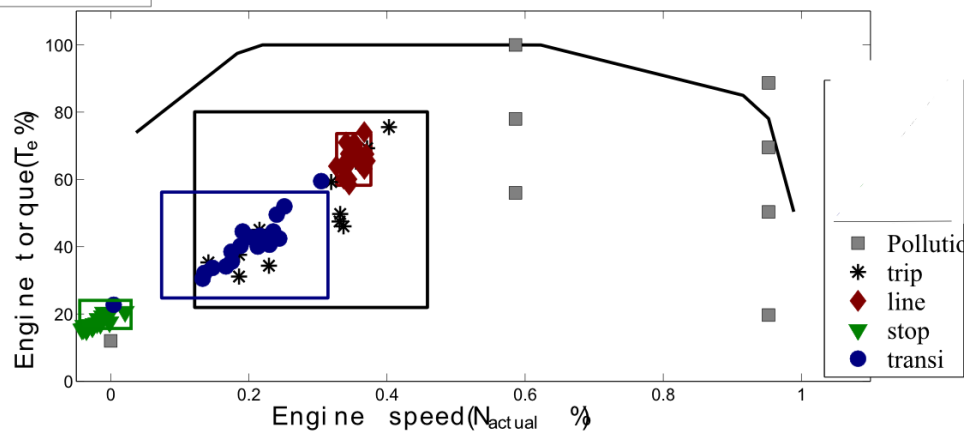


Figure 11- Représentation cartographique des points de fonctionnement d'un moteur de tracteur en fonction de l'activité : chaque point correspond à un outil agricole – d'après [10]

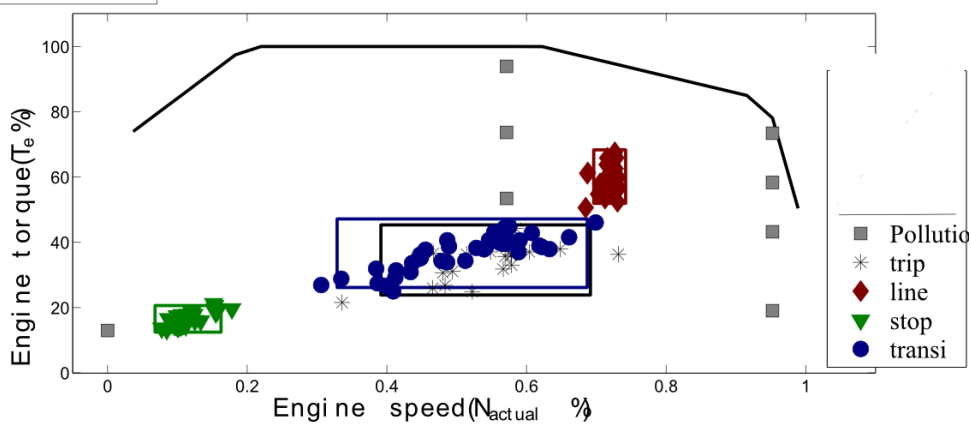
2. RÉCOLTEUSES DE BETTERAVE

Des engins de récoltes spécialisés pour la betterave ont été équipés d'un dispositif d'enregistrement des données moteur et suivies pendant toute une saison. À partir de ces données, un algorithme de traitement permet d'assigner à chaque seconde d'enregistrement un type d'activité : récolte pure (line), manœuvre et déplacement (transition), transport (trip), ralenti (stop). Ci-dessous, on retrouve une représentation cartographique des points de fonctionnement moyen par activité. Chaque point représente une journée de travail différente. Les points « pollution » en gris correspondent au cycle NRSC.

HOLMER



MOREAU



VERVAET

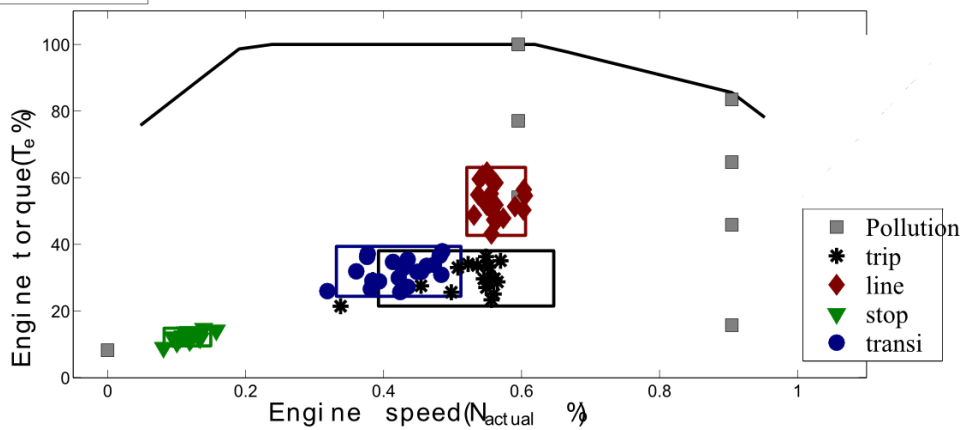


Figure 12- Cartographie des points de fonctionnement de 3 récolteuses de betterave pendant des chantiers de récolte- les points sont triés pour 4 activités différentes : les arrêts au ralenti (stop), la récolte proprement dite (line), le transport (trip) et le reste (transi)

On présente ces mêmes données sous forme de distribution des régimes et couples moteur. Ici, on ne présente que les données relatives à la machine Moreau sur une saison, environ 50h de fonctionnement). On trace une distribution pour chaque activité de conduite : (line : récolte, transport : trip, stop : ralenti et transition : repositionnement/manœuvre). En haut du mode de chacune des distributions figure le pourcentage de temps consacré à l'activité pendant la saison. 2 des activités pratiquées présentent un mode de fonctionnement du moteur caractéristique, avec un pic de forte fréquence et une faible dispersion autour de la valeur moyenne : il s'agit des activités « ralenti » et « récolte ».

Ces deux modes de fonctionnement représentent respectivement 80 % et 6 % de l'activité annuelle de ces engins. Le transport et les manœuvres se distribuent plus largement et représentent respectivement 2 et 11% de l'activité annuelle.

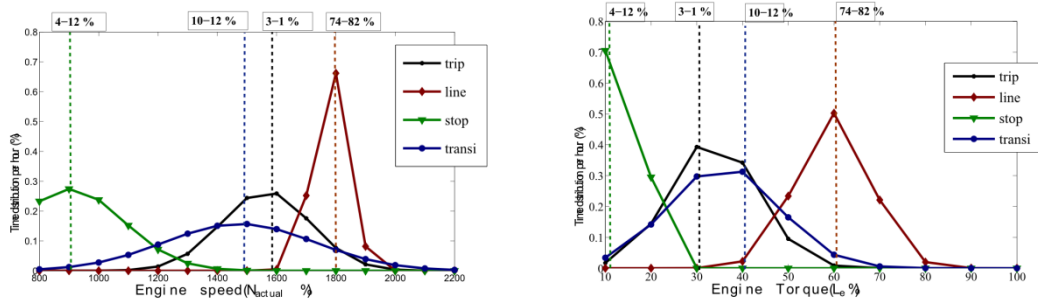


Figure 13- Distribution des régimes moteurs (à droite) et couple (à gauche) d'un moteur d'engin spécialisé dans la récolte

Si on agrège les séries de données des 3 récolteuses pour faire une distribution moyenne de la famille des moteurs « de récolteuse », on obtient la distribution résultante de la Figure 14. Chaque des pics observés sur la figure de droite (régime) correspond à un des moteurs. Les distributions résultantes sont plus « étalées » que celle machine prises isolément. Le fait d'agréger plusieurs types de réglages moteur justifie que le cycle d'essai « représentatif de cette famille » balaie des régimes et couples variés. Cependant, avec le calcul des écart-types des dérivées de couple et de régime, on montre que le balayage est beaucoup plus sévère que dans les conditions réelles.

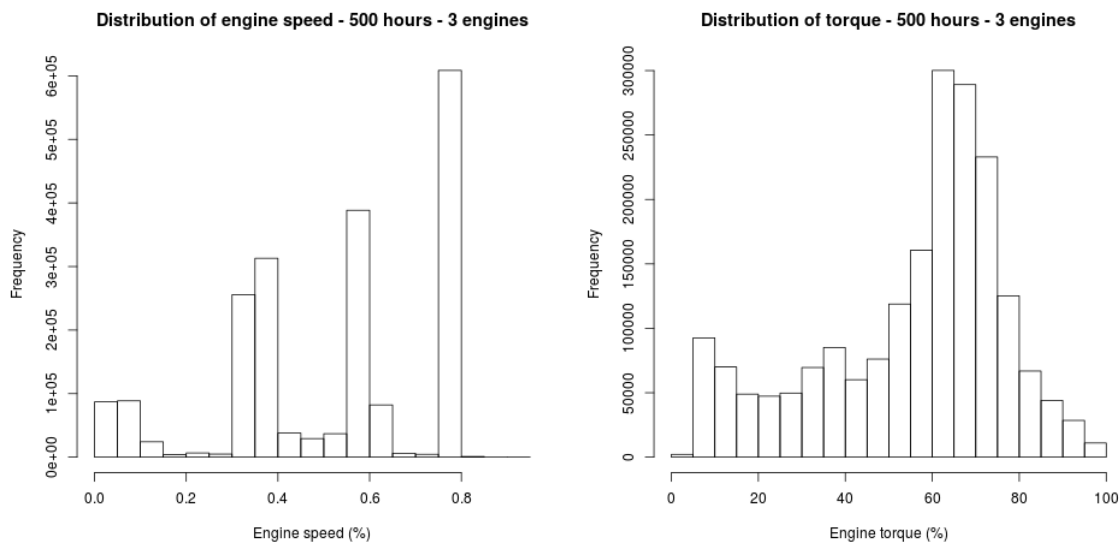


Figure 14- Distribution cumulée des points de fonctionnements de 3 moteurs d'engins dédiés à la récolte de produits agricoles

STATISTIQUES DE VALIDATION DES ESSAIS TRANSITOIRES RÉALISÉS SUR LE TRACTEUR NEW HOLLAND

Ci-dessous, on présente les valeurs limites autorisées par la réglementation sur l'erreur type de l'estimation (seey), la pente de la droite de régression (a1y), le coefficient de détermination (r2y) et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression (ay0) pour les cycles instationnaires. On calcule les valeurs mesurées sur les essais transitoires du tracteur tier3b.

Tableau 4- Statistiques de validation des essais instationnaires sur le tracteur New Holland (cycle US-EPA soft)

Tolérances	seey	5% regime max	10% couple max	10% pmax
		=110	=75,1	=12,50
	a1y	0.95-1.03	0.83-1.03	0.89-1.03
	r2y	>0.97	>0.85	>0.91
	ay0	<8.5	+/-20	+/- 4
nrtc_froid1	seey	326	50	11
	a1y	0,99	0,99	0,98
	r2y	0,96	0,96	0,95
	ay0	11	- 3	- 1
nrtc_froid2	seey	56	27	6
	a1y	1,00	1,00	1,00
	r2y	0,99	0,98	0,98
	ay0	- 0	- 1	- 0
nrtc_chaud1	seey	44	26	6
	a1y	1,00	1,00	1,00
	r2y	0,99	0,98	0,98
	ay0	- 7	0	0
nrtc_chaud2	seey	41	25	5
	a1y	1,00	1,00	1,00
	r2y	0,99	0,99	0,98
	ay0	- 16	0	0
nrtc_chaud3	seey	44	27	6
	a1y	1,00	1,00	1,00
	r2y	0,99	0,98	0,98
	ay0	- 12	- 0	0

Les statistiques sont établies sans suppression de points : quelques cycles ne respectent pas le critère sur la pente à l'origine mais le dépassement est faible. On revient dans les plages autorisées si on supprime les points de demande minimale et maximale de l'opérateur comme l'autorise la réglementation. Les infrastructures d'essai de l'Irstea ont donc permis de réaliser des cycles d'essai « d'aspect instationnaire » dans des conditions satisfaisantes. Néanmoins, ces essais ont portés sur des cycles qui ont dû être aménagés. Les limitations des infrastructures résident essentiellement dans l'impossibilité de réaliser n'importe quelle séquence de conduite, notamment les cycles normatifs et les séquences de transport trop sévères. La fréquence d'acquisition de certains appareils (mesures de régimes et couples) est également inférieure aux valeurs requises par la réglementation.

DÉTAILS SUR LES CAMPAGNES DE MESURES DES ÉMISSIONS POLLUANTES SUR LE BANC TRACTEUR

Ci-dessous, on récapitule les essais réalisés sur le tracteur tier3b. Les points identifiés par un zéro sont des essais ratés suite à un défaut de réglage.

Tableau 5- Déroulement de la première campagne d'essai tracteur Tier3b

Date	Heure	Point testés ou cycle	Tambiante (°C)	Pression ambiante (kPa)	Humidité ambiante (%)
04-12	09-49	0	12,6	102,4	50,6
04-12	11-12	0	13,3	102,4	49,6
04-12	13-33	0	15,2	102,4	42,3
04-12	14-42	3	15,5	102,4	42,2
04-12	15-52	3	15,5	102,4	43,3
04-12	16-52	3	15,4	102,4	44,0
05-12	09-10	0	14,6	102,3	51,8
05-12	10-12	0	14,6	102,4	49,2
05-12	11-03	0	15,3	102,3	46,9
05-12	13-07	4	16,4	102,2	34,7
05-12	14-05	4	16,8	102,1	34,2
05-12	14-56	4	16,8	102,0	32,3
05-12	15-47	7	16,1	101,9	36,8
05-12	16-39	7	16,0	101,9	38,3
06-12	09-41	0	15,1	102,3	38,8
06-12	10-41	0	15,8	102,4	34,3
09-12	14-08	8	13,8	102,4	44,1
09-12	15-14	8	14,2	102,4	43,6
09-12	16-04	8	14,0	102,5	43,7
10-12	09-23	1	10,1	102,7	47,2
10-12	10-10	1	11,1	102,7	46,1
10-12	13-42	7	14,1	102,7	41,8
10-12	14-43	5	14,8	102,7	40,5
10-12	15-30	5	15,7	102,7	38,8
10-12	16-18	6	15,2	102,7	39,4
11-12	09-38	2	10,1	102,5	45,2
11-12	10-27	2	10,8	102,5	43,6
16-12	08-32	US-EPA soft froid2	10,1	102,5	47,2
16-12	10-29	US-EPA soft chaud1	12,6	102,7	47,2
16-12	10-59	US-EPA soft chaud2	13,3	102,7	46,1
16-12	11-34	US-EPA soft chaud 3	15,2	102,7	41,8
17-12	08-42	US-EPA soft froid	10,1	102,7	40,5

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.