

Emission in situ des engins de terrassement

Version mise en ligne en 2013

1. Unité fonctionnelles

Trois unités fonctionnement peuvent être identifiées pour les émissions des engins :

- kg/h : débit massique horaire : quantité émise par heure de fonctionnement
- kg/L : facteur d'émission : quantité émises par litre de fuel consommé
- kg : quantité émise par engin pour atelier ou chantier donné avec prise en compte des usages

2. Présentation des process donnant un ICV

2.1 Mode d'utilisation des engins

Au sein d'un chantier de terrassement, chaque engin accomplit de manière coordonnée un ensemble de tâches spécifiques. Chaque tâche nécessite pour l'engin la réalisation d'une succession d'usages élémentaires qui sont traduites par des fortes variations des paramètres moteurs. Il est donc important pour appréhender le caractère dynamique des émissions de présenter les différents usages propres à chaque engin.

La figure 1 présente en fonction des usages les principaux polluants : les oxydes d'azotes (NO, NO₂, traces de N₂O), le monoxyde et dioxyde de carbone (CO et CO₂), les hydrocarbures imbrûlés et les particules solides (PM).

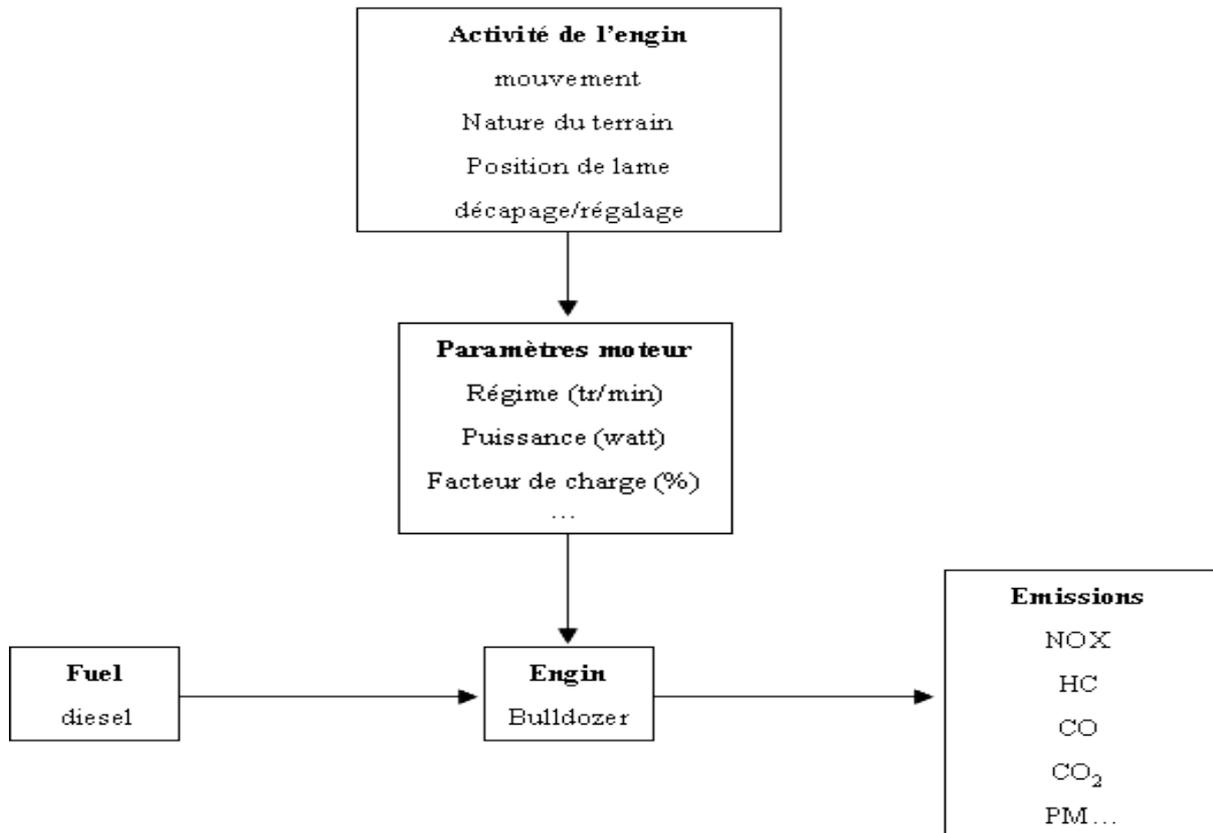


Figure 1 : mode de production des émissions dans le cas d'un bulldozer

La majeure partie des engins étudiés appartiennent au parc des engins de l'entreprise Guintoli. Ils étaient instrumentés lors d'une campagne de mesures des émissions in-situ sur un chantier autoroutier de l'A89 (liaison La Tour de Salvagny-Balbigny). Les principaux usages identifiés pour chaque type d'engin sont données dans les figures de 1 à 10 :

2.1.1. Engins fixes



Engin	Usages
Pelle 924	attente déplacement finition charge assainissement

Figure 2 : La pelle 924 lors d'un creusement de tranchée.



Figure 3 : La pelle 944 en phase de production.

Engin	Usages
Pelle 944	attente déplacement finition réglage carreau production



Figure 4 : La pelle 974 en cours de chargement d'un dumper.

Engin	Usages
Pelle 974	attente déplacement carreau production

2.1.2. Engins mobiles



Figure 5 : dumper A25 en cours de chargement.

Engin	Usages	Détail usages
A 725	attente transport déballe déplacement	plat descente faible montée faible monté forte descente forte
A 25	attente transport déballe déplacement	plat descente faible montée faible monté forte descente forte Patinage vide matériaux



Figure 6 : Dumper rigide 770E en stationnement.

Engin	Usages
770	attente transport déballé déplacement

2.1.3. Engins semi-mobiles



Figure 7 : Bulldozer D6R équipé de scarificateurs en cour de régalage.

Engin	Usages
Bull D6	attente déplacement régalage décapage



Figure 8 : Bulldozer D10T en cours de ripage.

Engin	Usages
Bull D10	attente déplacement ripage pousse assainissement



Engin	Usages
Scaper	attente déplacement chargement transport étalage

Figure 9 : Scaper 631 en cours de décapage.



Engin	Usages	Détail usages
Niveleuse	attente	plat plat piste plat réglage
	déplacement	plat scarifié montée
	pistes	montée piste
	réglage	montée réglage montée scarifié
	scarification	descente descente piste descente réglage Descente scarifié

Figure 10 : Niveleuse 14 M en train de régler.



Engin	Usages
Compacteur	attente déplacement compactage avec vibration compactage sans vibration

Figure 11 : Compacteur V5 instrumenté pour le suivi des émissions.

2.2 Analyse des inventaires

Des inventaires d'émissions des engins non routiers existent dans de nombreux pays, le premier en date étant apparu sans doute aux Etats-Unis où les données d'inventaire remontent à l'année 1970 [US EPA, 2009]. Un inventaire de référence pour l'Europe est tenu par l'IIASA avec le modèle GAINS [IIASA, site web]. Mais pour construire ces inventaires, les émissions affectées aux engins non routiers sont soit calquées sur les limites réglementaires d'émission, soit fondées sur des mesures au banc moteur, à partir de régimes stabilisés et dans des conditions contrôlées. De plus, les composés non réglementés tels que les HAP ne figurent pas.

Les données utilisées sont celles liées à l'utilisation du transport et à la production amont d'énergie (mix Français).

Système : transports	Emissions directes	Production d'énergie
Référence FD P 01 015 (2006)	X	X
ICV travaux		

Tableau 1. Données environnementales disponibles concernant le transport

Cas particulier du transport par tombereau : Ce transport étant en réalité un fonctionnement d'engins, certains flux issus du fascicule FDP 01-015 peuvent être modifiés par l'utilisateur de la donnée pour prendre en compte les résultats de mesure obtenus lors d'expérimentations en vraie grandeur sur sites de chantiers de terrassement.

3. Données disponibles

3.1 Issues des engins fixes

Les facteurs d'émission unitaires suivants ont été déterminés pour les principaux usages considérés dans les figures de 1 à 10 [Capony, 2013] :

Tableau 1 : Facteurs d'émission unitaires des engins fixes étudiés.

Engins instrumentés			
Emissions	Pelle 924	Pelle 944	Pelle 974
	Attente	Attente	Attente
CO ₂ (kg h ⁻¹)	20 ± 4	40 ± 30	30 ± 20
CO (g h ⁻¹)	40 ± 20	90 ± 50	170 ± 70
NOx (g h ⁻¹)	190 ± 20	230 ± 60	220 ± 70
HC (g h ⁻¹)	1,0 ± 0,4	3,0 ± 0,5	16 ± 3
	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}
CO ₂ (kg h ⁻¹)	60 ± 10	110 ± 20	150 ± 30
CO (g h ⁻¹)	40 ± 20	80 ± 20	170 ± 60
NOx (g h ⁻¹)	260 ± 50	340 ± 60	600 ± 100
HC (g h ⁻¹)	1,1 ± 0,6	4 ± 9	20 ± 20
	Finition	Finition	Carreau
CO ₂ (kg h ⁻¹)	60 ± 10	100 ± 20	160 ± 25
CO (g h ⁻¹)	70 ± 30	90 ± 20	200 ± 100
NOx (g h ⁻¹)	210 ± 20	340 ± 50	650 ± 90
HC (g h ⁻¹)	5 ± 1	2 ± 4	80 ± 50
	Charge	Réglage	Production
CO ₂ (kg h ⁻¹)	62 ± 8	110 ± 20	160 ± 30
CO (g h ⁻¹)	50 ± 20	100 ± 30	200 ± 100
NOx (g h ⁻¹)	250 ± 20	330 ± 50	640 ± 90
HC (g h ⁻¹)	0,5 ± 0,7	1 ± 2	60 ± 50
	Assainis^{mt}	Carreau	
CO ₂ (kg h ⁻¹)	63 ± 9	110 ± 20	
CO (g h ⁻¹)	50 ± 20	80 ± 20	
NOx (g h ⁻¹)	260 ± 30	340 ± 50	
HC (g h ⁻¹)	3 ± 2	10 ± 10	
		Production	
CO ₂ (kg h ⁻¹)		120 ± 20	
CO (g h ⁻¹)		80 ± 30	
NOx (g h ⁻¹)		360 ± 50	
HC (g h ⁻¹)		4 ± 8	

3.2 Issues des engins semi-mobiles

Tableau 2 : Facteurs d'émission unitaires des engins semi-mobiles étudiés

Engins instrumentés					
Emissions	Bull D6	Bull D10	Compacteur	Niveleuse	Scraper 631
	Attente	Attente	Attente	Attente	Attente
CO ₂ (kg h ⁻¹)	13 ± 2	34 ± 5	4 ± 1	27 ± 1	50 ± 10
CO (g h ⁻¹)	60 ± 50	130 ± 50	60 ± 3	130 ± 90	170 ± 50
NO _x (g h ⁻¹)	180 ± 20	580 ± 60	20 ± 9	214 ± 5	430 ± 70
HC (g h ⁻¹)	0,4 ± 0,3	10 ± 5	1 ± 2	7 ± 4	2 ± 6
	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}
CO ₂ (kg h ⁻¹)	24 ± 6	130 ± 70	11 ± 4	87 ± 8	200 ± 100
CO (g h ⁻¹)	100 ± 50	700 ± 400	50 ± 40	290 ± 10	800 ± 800
NO _x (g h ⁻¹)	100 ± 30	800 ± 200	30 ± 10	250 ± 25	800 ± 400
HC (g h ⁻¹)	0,1 ± 0,2	12 ± 6	1 ± 2	15 ± 10	30 ± 50
	Régilage	Ripage	Comp.	Piste	Chargement
CO ₂ (kg h ⁻¹)	42 ± 10	260 ± 30	17 ± 9	100 ± 40	300 ± 100
CO (g h ⁻¹)	200 ± 100	600 ± 100	80 ± 30	500 ± 200	800 ± 300
NO _x (g h ⁻¹)	140 ± 40	1 000 ± 100	20 ± 20	400 ± 200	1 000 ± 400
HC (g h ⁻¹)	0,7 ± 0,8	1 ± 2	5 ± 6	15 ± 15	100 ± 50
	Décapage	Pousse	Comp. vib.	Réglage	Transport
CO ₂ (kg h ⁻¹)	43 ± 5	300 ± 20	42 ± 7	100 ± 30	200 ± 100
CO (g h ⁻¹)	70 ± 30	700 ± 100	400 ± 200	500 ± 200	700 ± 500
NO _x (g h ⁻¹)	150 ± 20	1 200 ± 100	100 ± 20	250 ± 70	800 ± 400
HC (g h ⁻¹)	0,1 ± 0,2	1 ± 2	5 ± 6	30 ± 30	70 ± 80
				Scarification	Etalage
CO ₂ (kg h ⁻¹)				130 ± 40	100 ± 60
CO (g h ⁻¹)				700 ± 300	600 ± 300
NO _x (g h ⁻¹)				350 ± 100	500 ± 300
HC (g h ⁻¹)				70 ± 30	50 ± 20

3.3 Issues des engins mobiles

Tableau 3 : Facteurs d'émission unitaires des engins mobiles étudiés

Engins instrumentés			
Emissions	Dumper A25	Dumper 725	Dumper 770
	Attente ou charge	Attente ou charge	Attente ou charge
CO ₂ (kg h ⁻¹)	40 ± 25	25 ± 20	50 ± 20
CO (g h ⁻¹)	200 ± 300	160 ± 120	220 ± 100
NO _x (g h ⁻¹)	400 ± 200	270 ± 50	360 ± 100
HC (g h ⁻¹)	3 ± 3	8 ± 9	3 ± 8
	Transport	Transport	Transport
CO ₂ (kg h ⁻¹)	120 ± 40	80 ± 20	230 ± 170
CO (g h ⁻¹)	300 ± 500	600 ± 100	900 ± 700
NO _x (g h ⁻¹)	600 ± 100	370 ± 70	900 ± 800
HC (g h ⁻¹)	8 ± 2	6 ± 2	50 ± 60
	Déballe	Déballe	Déballe
CO ₂ (kg h ⁻¹)	60 ± 20	30 ± 20	70 ± 60
CO (g h ⁻¹)	110 ± 60	200 ± 200	300 ± 400
NO _x (g h ⁻¹)	420 ± 90	260 ± 60	400 ± 200
HC (g h ⁻¹)	7 ± 1	7 ± 9	5 ± 12
	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}	Déplace^{mt}
CO ₂ (kg h ⁻¹)	130 ± 30	90 ± 10	180 ± 120
CO (g h ⁻¹)	400 ± 300	700 ± 300	800 ± 900
NO _x (g h ⁻¹)	600 ± 100	310 ± 70	700 ± 600
HC (g h ⁻¹)	2 ± 3	7 ± 3	25 ± 50

3.4 Issues de l'Inventaire

Les mesures réalisées sur chantier de terrassement ont pour avantage de rendre compte des émissions réelles des engins. Elles intègrent aussi bien l'influence de l'environnement dans lequel l'activité se développe (état de la piste, dénivellation du terrain, visibilité, etc.), de l'état d'usure de l'engin (généralement moins de 10 ans d'usage), de l'usage particulier qui en est fait ainsi que de l'expérience du conducteur. Tous ces paramètres contribuent à renforcer la représentativité des données obtenues. Cependant, ces paramètres sont limités au typologie d'engins étudiés et aux usages observés lors des campagnes terrain.

4. Bibliographie sur les émissions des engins de terrassement:

Au cours des vingt dernières années, une prise de conscience s'est établie à l'échelle internationale sur l'impact des polluants émis par les engins non routiers sur l'environnement. En Europe, comme aux USA et Japon, les constructeurs d'engins non routiers sont davantage contraints de certifier leurs nouveaux modèles en relation avec les normes de limitation des émissions polluantes [directive 2004/26 CE]. La législation européenne est de plus en plus sévère sur les rejets des moteurs diesels. Les normes d'émissions Euro se succèdent (Euro I, II - V) [Courtois, 2005]. Les méthodes d'essai des moteurs ont été améliorées, par exemple, les essais en cycle stationnaire ECE R49 ont été remplacés par deux nouveaux tests : un cycle transitoire (ETC) avec démarrage à chaud et à froid et un cycle en mode stabilisé (ESC) avec démarrage à chaud, couvrant les conditions de conduite typiques dans l'Union Européenne (UE) et sur les autres grands marchés mondiaux. L'opacité des fumées est également mesurée par un essai spécifique (ELR) [Courtois, 2005].

Cependant, ces tests ne reflètent pas les conditions réelles d'utilisation des engins [Armas, 2009]. Il est donc nécessaire d'obtenir des données d'émissions basés sur une méthode de mesure in-situ qui tient en compte la topologie variable des sites de production et des conditions météorologiques. Aujourd'hui, il est difficile d'obtenir des informations quantitatives sur ces émissions à part quelques bases de données récentes [Capony, 2013 ; OFEV ; CARB, 2009].

Dans un chantier de terrassement, les engins fonctionnent souvent en conditions transitoires [Lindgren, 2004]. En fonction de la typologie du terrain et des tâches réalisées par l'engin, le régime moteur subit des fortes variations : ralenti, accélération, décélération qui dépendent de la charge appliqué sur celui-ci. Ces variations influent de façon importante sur la composition du gaz d'échappement [Courtois, 2005].

La connaissance de la consommation et des émissions des engins fonctionnant en diesel en conditions transitoires est importante pour les constructeurs d'engins. La non prise en compte de l'effet des conditions transitoires amène à sous-estimer la consommation du fuel et les émissions des polluants. Ces erreurs influenceront les données statistiques de quantification des émissions et par la suite fausseront les conclusions tirées des éco-comparateurs basés sur la méthodologie de l'ACV [Wrisberg, 2002].

De manière générale, l'activité d'un engin de terrassement fonctionnant au gasoil génère des émissions polluantes telles que : le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azotes (NO_x), les hydrocarbures (HC), le monoxyde de carbone (CO) ainsi que des particules ultrafines. **Le rapport air/carburant ou son inverse la richesse du mélange carburé agit directement sur ces émissions.** Des études de Benajes (2000) et Bane (2002) ont montré qu'une instabilité de ce rapport air/carburant apparaît en conditions transitoires de fonctionnement du moteur (e.g. lors des variations de la charge du moteur). La consommation du carburant et le niveau des émissions en conditions transitoires diffèrent de ceux en conditions stabilisés. Plusieurs facteurs ont été identifiés pour expliquer cette différence. Parmi ces facteurs, le turbocompresseur et le régulateur mécanique. Ces études ont montré que durant les conditions transitoires du régime et du couple (contre charge) le

turbocompresseur et le régulateur mécanique mettent plus de temps pour revenir aux conditions stabilisés de fonctionnement. Hansson et al. (2003) ont ainsi trouvé que le rendement du carburant d'un tracteur agricole diminue lorsque les conditions transitoires s'intensifient.

5. Références :

Armas, 2009 : Armas O., Lapuerta M., Mata C., Perez D., Online emissions from a vibrating roller using an ethanol-diesel blend during a railway construction. *Energy Fuel* (23), 2989–96, 2009.

Bane, 2002 : Bane B. R., A comparison of steady state and transient emissions from a heavy-duty diesel engine – Thèse de l'université de West Virginia, soutenue en 2002.

Benajes, 2000 : Benajes J., Luján J., Serrano J., Predictive modelling study of the transient load response in a heavy-duty turbocharged diesel engine. *Society of Automotive Engineers*, SAE Technical Paper Series No. 2000-01-0583, 2000.

CARB, 2009 : California Air Resources Board, *Almanac Emission Projection Data* (2009), (<http://www.arb.ca.gov/ei/emissiondata.htm>)

Capony, 2013 : Capony A. « Evaluation environnementale d'un chantier de terrassement - mise au point d'un outil paramétrable de mesures d'émissions relatives aux engins de terrassement », thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, soutenue le 10 janvier 2013.

Courtois, 2005 : Courtois B., Le Brech A., Diebold F., Lafon D., Moteur diesel et pollution en espace confiné, *Hygiène et sécurité du travail*, INRS, 4^e trimestre, 2005.

Hansson, 2003 : Hansson P., Lindgren M., Nordin M., Pettersson O., A methodology for measuring the effects of transient loads on the fuel efficiency of agricultural tractors. *Applied Engineering in agriculture* 19 (3), 251-257, 2003.

IIASA : <http://gains.iiasa.ac.at/gains/EUR/index.login?logout=1>

Lindgren, 2004 : Lindgren M., Hansson P.A., Effects of Transient Conditions on Exhaust Emissions from two Non-road Diesel Engines, *Biosystems Engineering* 87 (1), 57-66, 2004.

OFEV, 1980-2020 : Office fédérale de l'environnement, (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air.html>)

US-EPA, 1991 : United States Environmental Protection Agency, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Nonroad Mobile Sources. AP-42 Volume II (4th Edition, 1989; Supplement A, 1991) <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors> (mars 2019)

Wrisberg, 2002 : Wrisberg N., Udo de Haes H., Analytical tools for environmental design and management in a systems perspective. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht (2002), The Netherlands.

6. Auteurs et relecteurs

Auteurs	Adrien Capony (Guintoli) , Mohamed Sennoune (Université d'Orléans)
Relecture d'experts	Chantal Proust (Université d'Orléans), Bogdan Muresan-Paslaru (IFSTTAR),
Relecture bureau	Laurent Château (ADEME), Agnès Jullien (IFSTTAR)
Date de mise en ligne, version finale	Janvier 2014