

Caractérisation in-situ des dynamiques d'émissions des engins de terrassement en fonction des paramètres moteur

Mohamed SENNOUNE^{1*}, Aziza ABID¹ et Mohamed MANSOURI²

¹ *Université Sultan Moulay Slimane, Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Khouribga, Laboratoire d'Ingénierie des Procédés et Optimisation des Systèmes Industriels, BP 77, Bd Béni Amir, Khouribga 25000, Maroc*

² *Université Hassan 1^{er} Settat, Faculté des Sciences et Techniques de Settat, Laboratoire d'Ingénierie, Mécanique, Management Industriel et Innovation, Avenue de l'université, BP 577, Route de Casa, Settat, Maroc*

* Correspondance, courriel : mohamed.sennoune@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des paramètres moteur des engins de terrassement sur les émissions de composés chimiques gazeux dans les conditions réelles d'utilisation des engins. Pour atteindre cet objectif, les émissions de trois machines clés de terrassement ont été soigneusement examinées. Chaque machine est représentative de l'une des trois grandes catégories constitutives des engins de terrassement : fixe, semi-mobile et mobile. Un dispositif embarqué de mesure des émissions a été fixé sur les engins de terrassement. Il comprend un tube de Pitot, un analyseur de gaz et un ordinateur portable pour l'enregistrement des paramètres mesurés. Les résultats obtenus montrent que les différents paramètres moteur varient de manière significative avec l'activité de la machine. En fonction de la topologie du site, les variations du régime moteur et de son facteur de charge entraînent des variations significatives des émissions de CO₂, indiquant ainsi leur rôle central dans le contrôle de la consommation de carburant et de la production de gaz à effet de serre. Dans l'ensemble, les résultats obtenus mettent en évidence le fait que les faibles régimes moteur et/ou facteurs de charges ne parviennent pas à limiter la consommation de carburant et donc la réduction des émissions. En effet, il apparaît nécessaire de promouvoir l'utilisation de l'engin dans un large spectre de paramètres moteur selon chaque usage et chaque catégorie d'engins.

Mots-clés : *émissions, paramètres moteur, engins de terrassement, conditions d'utilisation in-situ.*

Abstract

In situ evaluation of earthwork machinery emissions following engine parameters

This paper aims answering at the following question : What is the impact of engine parameters on the in-situ emissions of gaseous chemical compounds? To reach this goal, the emissions of three key earthwork machines were carefully examined. Each machine is representative of one of the three major categories constitutive of the earthwork machinery : fixed, semi mobile and mobile. An on-board emission measurement device has been fixed on earthwork machines. It includes a pitot tube, a gas analyzer and a laptop for recording the measured parameters. The results show that the different engine parameters varied significantly with the

machine activity. Along with the site configuration, engine parameters variations led to significant variations in CO₂ emissions thus indicating their central role in controlling the consumption of fuel and greenhouse gas production. Overall, gained results highlighted the fact that lower engine speed and/or load factors do not manage to limit the fuel consumption and thus reduce the emissions. Instead, it appears critical to promote rational use of engines parameters in a broader-spectrum of values according to every particular machine category and use.

Keywords : *emissions, engine parameters, earthwork machines, in-situ working conditions.*

1. Introduction

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. Les engins de terrassement font partie des véhicules non routiers pour lesquels ces émissions dans les conditions réelles d'utilisation ne sont pas entièrement quantifiées. Jusqu'en 2010, les données sur les émissions étaient obtenues à partir de cycles en régime stationnaire consistant en plusieurs modes de paramètres moteur fixes. Cependant, ces tests ne reflètent pas les conditions réelles d'utilisation des engins. 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 [1 - 4]. Aujourd'hui, il est difficile d'obtenir des informations quantitatives sur ces émissions à part quelques bases de données récentes [5, 6]. D'après des recherches récemment publiées [3, 7, 8], les activités de terrassement figurent souvent parmi les principaux contributeurs aux gaz à effet de serre. Cela signifie que pendant la phase de construction des infrastructures routières et en fonction de la topologie du terrain, la part des émissions de GES émises par les activités de terrassement peut être relativement élevée par rapport à celle liée aux transports routiers. De manière générale, l'activité d'un engin de terrassement fonctionnant au gazoil 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 agit directement sur ces émissions. Des études [9, 10] ont montré qu'une instabilité de ce rapport apparaît en conditions transitoires de fonctionnement du moteur (par exemple, 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. La connaissance de la consommation de carburant 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 de carburant 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 [11]. Dans un chantier de terrassement, les engins fonctionnent souvent en conditions transitoires [12]. En fonction de la topologie du terrain et des tâches réalisées par l'engin, le régime moteur subit des fortes variations : ralenti, accélération, décélération qui dépendent de la charge appliquée sur celui-ci. Ces variations influent de façon importante sur la composition du gaz d'échappement [13]. Le présent travail a pour objectif d'évaluer l'effet des variations du régime moteur et de son facteur de charge (proportion de la puissance fournie) sur les émissions des polluants gazeux. Sachant que ces deux paramètres peuvent évoluer de manière couplée, nous chercherons, lorsque possible, à identifier leur contribution propre aux émissions. Pour atteindre cet objectif, les émissions de trois machines clés de terrassement ont été soigneusement examinées. Chaque machine est représentative de l'une des trois grandes catégories constitutives des engins de terrassement : fixe, semi-mobile et mobile. Il est essentiel de préciser que les résultats obtenus sont spécifiques aux engins suivis, aux conditions locales de roulement et à la configuration particulière du terrain lors des essais. Ils ne permettent pas une comparaison avec d'autres résultats d'émission obtenus avec d'autres configurations (engins et modes d'utilisation).

2. Matériel et méthodes

2-1. Système embarqué de mesure des émissions

Un dispositif embarqué a été fixé sur les engins de terrassement de manière à ne pas interférer avec le panache des émissions tout en limitant la longueur entre la sortie du tuyau d'échappement et les analyseurs (par exemple, sur le toit de la cabine). Un tapis de carrière d'environ 1 cm d'épaisseur ainsi qu'une mousse expansée d'environ 10 cm ont été utilisés pour amortir chocs et vibrations. L'arrimage à l'engin est effectué à l'aide de sangles à cliquet. A l'intérieur du dispositif, on trouve les équipements et appareillages décrits en **Figure 1**. Un analyseur de gaz d'échappement (O_2 , CO_2 , CO , NO_x et HC) de marque CAPELEC 3200, de faible poids (environ 7 kg) et d'encombrement (400 x 180 x 289 mm). La fréquence des mesures est de 0,5 Hz, ce qui permet de rendre compte des phases d'accélération et de décélération des engins. Le CAPELEC 3200 est lié à une sonde de prélèvement des gaz de forme « U » en cuivre ($\varnothing_{int.} = 6$ mm, $\varnothing_{ext.} = 8$ mm) centrée dans le tuyau d'échappement. Un transmetteur de pression permet de lire la différence de pression totale-statique mesurée au moyen d'un tube Pitot de type L placé dans l'axe du tuyau d'échappement en face de l'écoulement. Pour introduire le tube de Pitot, un trou est percé dans le tuyau d'échappement à 100/150 mm de la sortie. Un boîtier d'acquisition centralise les données de température et de pression dynamique. Il est piloté au moyen d'un ordinateur portable embarqué. Un boîtier wifi permet de collecter les mesures en direct et à distance. Enfin, un transformateur 12 V DC/220 AC qui permet de convertir le courant continu de la batterie en courant alternatif pour les appareils.

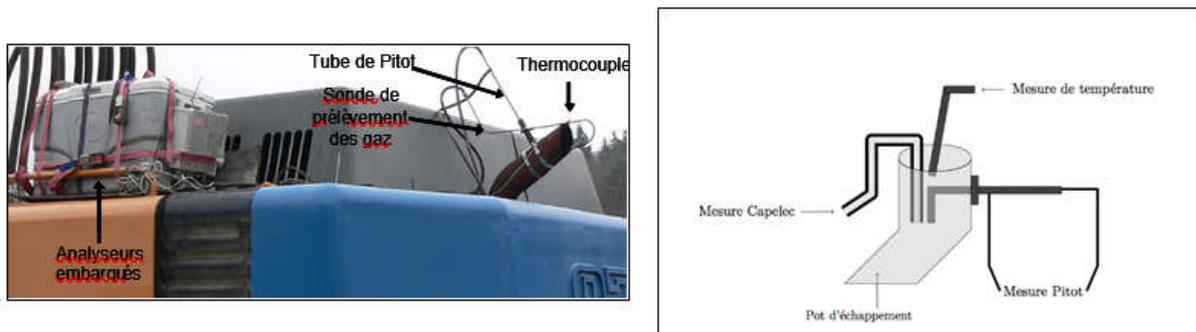


Figure 1 : Dispositif embarqué de mesure des émissions

2-2. Dépouillement des mesures d'émissions

2-2-1. Analyse de données

Afin d'assurer le traitement des données brutes (plusieurs milliers de valeurs ont été enregistrés par paramètre mesuré et par engin), un programme sous *Scilab* a été développé. Il permet de :

- calculer les flux massiques (en $Kg.h^{-1}$) des différents polluants émis, de leurs moyennes et écart types,
- donner les flux en fonction des paramètres moteur d'une part, et en fonction des tâches réalisées d'autre part.

L'obtention des résultats se fait en un temps relativement court.

2-2-2. Calcul des flux

Le calcul des flux des émissions à la sortie d'échappement fait intervenir, entre autres, la température (T) et la pression dynamique (P_{dyn}) des gaz. Pour calculer la vitesse des gaz, on utilise le théorème de Bernoulli :

$$v \approx 0,85 \sqrt{\frac{2P_{\text{dyn}}}{\rho}} \quad (1)$$

v étant la vitesse des gaz intégrée sur une section droite du tuyau d'échappement (en $m.s^{-1}$) et ρ masse volumique des gaz (en $Kg.m^{-3}$).

La masse volumique ρ est à son tour déterminée à partir des fractions volumiques (f) des composés émis (i) :

$$\rho^{\circ} = \frac{M_{H_2O}}{V^{\circ}} f_{H_2O} + \frac{(1-f_{H_2O})}{V^{\circ}} \sum_i (f_{i_{\text{sec}}} M_i) \quad (2)$$

M et V sont la masse et volume molaire exprimées en $Kg.mol^{-1}$ et $m^3.mol^{-1}$ respectivement. L'exposant " $^{\circ}$ " indique que les valeurs correspondent aux conditions normales de pression et de température.

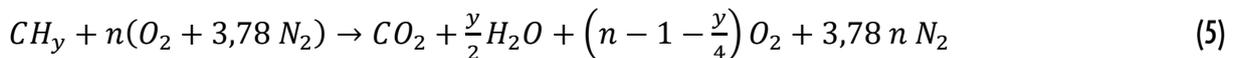
Après correction de la température et de la pression des gaz au point de mesure :

$$\rho = \rho^{\circ} \frac{P}{P^{\circ}} \frac{T^{\circ}}{T} \quad (3)$$

P et T sont la pression totale (dynamique + statique) (en Pascal) et la température (en K) à proximité du point de collecte de gaz.

La fraction volumique d'eau est déterminée à partir des mesures sur gaz sec obtenues avec l'analyseur multigaz CAPELEC 3200 et de l'Équation de combustion pour un moteur diesel :

$$f_{H_2O} = \frac{f_{CO_2 \text{ sec}}}{\frac{2}{y} + f_{CO_2 \text{ sec}}} \quad (4)$$



avec, $y = 17/8$. Ces relations supposent que la composition du carburant reste relativement inchangée et possède pour formulation $C_{16}H_{34}$, relativement bien représenté par du cétane.

Le débit total des fumées est donné en fonction de la vitesse des gaz et le diamètre D de l'échappement :

$$Q_{\text{total}} = v \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

avec, Q_{total} exprimé en $m^3.s^{-1}$.

Cette dernière grandeur est alors calculée aux conditions normales de pression et de température en se limitant à la fraction sèche des gaz :

$$Q_{\text{sec}}^{\circ} = Q_{\text{total}} \frac{P}{P^{\circ}} \frac{T^{\circ}}{T} (1 - f_{H_2O}) \quad (7)$$

Finalement, les flux massiques E (ici exprimées en $Kg.s^{-1}$) sont déterminés au moyen de l'Équation suivante :

$$E_i^{\circ} = f Q_{\text{sec}}^{\circ} \frac{M_i}{V^{\circ}} \quad (8)$$

2-3. Choix des engins

Dans un chantier de terrassement, trois catégories d'engins sont généralement rencontrées : des engins mobiles pour le transport des matériaux d'un site à un autre (cas des dumpers), des engins fixes utilisés principalement pour l'excavation (cas des pelles) et des engins semi-mobiles pour les travaux de préparation, de mise en place (cas du bulldozer, niveleuse, compacteur etc.). En fonction de la taille du chantier, de la cubature journalière de terrassement et des conditions particulières du terrain, le nombre et le type d'engins sont susceptibles d'être modifié (utilisation de scrapers à la place de dumpers). Pour réduire cette variabilité, la notion d'*ateliers* est souvent utilisée par les terrassiers. L'atelier est l'unité de travail autour de laquelle s'organise un chantier de terrassement. Un atelier se compose souvent d'une pelle (force d'excavation) et d'un certain nombre d'engins de transport et de mise en place qui lui sont attribués selon les caractéristiques du chantier. Dans ce travail, on s'intéresse à trois catégories d'engins représentant près de 85 % des engins pouvant prendre part aux grands chantiers de terrassement ; il s'agit de la pelle, le dumper et le bulldozer. En période de fonctionnement, chaque engin accomplit de manière coordonnée un ensemble de tâches spécifiques. Chaque tâche nécessite un ensemble d'usages de l'engin qui visent à préparer et/ou mettre en forme le terrain de sorte à atteindre les critères d'exigence propres aux différentes phases du chantier. Il est donc important pour appréhender le caractère dynamique des émissions de présenter les différents usages propres à chaque engin. Le **Tableau 1** présente les principaux modes d'usages des trois engins étudiés. Des usages particuliers, non répertoriés, peuvent s'avérer nécessaires suivant les travaux à réaliser ; toutefois, les usages considérés rendent compte de la plus grande part d'activité de chaque engin.

Tableau 1 : Usages des engins étudiés

Engin	Type	Modes d'usages
	Bulldozer D6	Ralenti Déplacement Régalage Décapage
	Dumper 25	Attente ou charge Transport Déballe Déplacement
	Pelle 924	Attente Déplacement Finition charge assainissement

Les caractéristiques des engins sont données dans le **Tableau 2**. Les trois engins choisis ont des consommations moyennes horaires comparables.

Tableau 2 : Caractéristiques des engins étudiés

Type d'engin	Modèle	Poids (tonne)	Puissance (kW)	Consommation (L.h ⁻¹)
Bulldozer D6	CAT D6R 3LGP	17-20	149	15-25
Pelle 924	LIEBHERR D934 S	25	130	20-25
Dumper 25	VOLVO A25E	25	227	20-35

2-4. Choix des variables moteur suivies

Les performances fonctionnelles des moteurs à combustion tels que le couple, la puissance développée, la consommation de carburant, les émissions à l'échappement, etc., et par conséquent celles des engins de terrassement sont communément suivies en faisant varier le régime moteur et le facteur de charge [14]. Dans le cadre de cette étude, on cherche à évaluer la contribution de la variation du régime moteur et de son facteur de charge aux émissions de polluants mesurées in-situ.

3. Résultats et discussion

3-1. Paramètres moteur et modes d'usage

Au sein du parc de terrassement, les engins fonctionnent dans un environnement où les contraintes appliquées sur le moteur sont très importantes. Les variations du régime moteur et de son facteur de charge comme le montre le **Tableau 3** sont nombreuses et traduisent la réponse du moteur aux variations des conditions de travail et des modes d'usage. En général, le bulldozer D6 présente des fortes variations inter-usages du régime et de son facteur de charge et au sein même d'un seul usage (le décapage par exemple). Cependant, dans le cas de la pelle 924 et du dumper 25, ces deux paramètres ne présentent pas des variations inter-usages mais seulement au sein d'un usage donné. Ceci est causé principalement par les différentes contraintes appliquées sur le moteur dues à la nature du terrain, conducteur, etc. Dans le cas du dumper 25, au cours de son déplacement par exemple, les fortes variations du régime moteur et de son facteur de charge sont dues à la nature du terrain (pente, orniérage, etc.) et au type de conduite (vitesse, rapport).

Tableau 3 : Valeurs moyennes de régime moteur et de facteur de charge des engins étudiés pour chaque mode d'usage (moyenne \pm variation)

Paramètres moteur	Engins instrumentés		
	Pelle 924	Bulldozer D6	Dumper 25
Régime (tr/min) Facteur de charge (%)	Attente 650 \pm 50 21 \pm 3	Attente 872 \pm 2 11 \pm 0	Attente ou charge 1659 \pm 33 72 \pm 14
Régime (tr/min) Facteur de charge (%)	Déplacement 1140 \pm 207 77 \pm 23	Déplacement 1932 \pm 24 46 \pm 2	Déplacement 1657 \pm 314 69 \pm 15
Régime (tr/min) Facteur de charge (%)	Finition 1151 \pm 93 76 \pm 15	Régalage 1134 \pm 9 25 \pm 0,5	Déballe Non défini 66 \pm 19
Régime (tr/min) Facteur de charge (%)	Charge 1095 \pm 139 83 \pm 9	Décapage 1817 \pm 12 67 \pm 1	Transport 1462 \pm 290 73 \pm 14
Régime (tr/min) Facteur de charge (%)	Assainissement 1119 \pm 76 83 \pm 13		

Afin de mettre en évidence l'impact des variations des paramètres moteur sur les quantités moyennes des gaz émis, on a fait le choix de comparer deux niveaux de facteur de charge : (i) faibles charges (< 50 %) et fortes charges (> 50 %), et (ii) trois niveaux de régime moteur : régime faible, régime moyen et régime fort. Les résultats présentés correspondent à une durée d'utilisation des engins de deux jours.

3-2. Cas de la pelle

La pelle est principalement utilisée pour la construction des dispositifs d'assainissement ou pour les finitions (réalisation fine des profils et géométrie du sol). La pelle présente généralement des paramètres moteurs relativement stables. Hormis les phases de ralenti, elle est utilisée par défaut à forte puissance (for régime, fort facteur de charge). La **Figure 2** montre un exemple d'évolution temporelle du régime moteur et de son facteur de charge. Les fluctuations observées dans l'intervalle de temps [0,14 - 0,22 h] et à partir de 0,4 h correspondent à des séries d'accéléérations effectuées par le conducteur pour déplacer et repositionner l'engin.

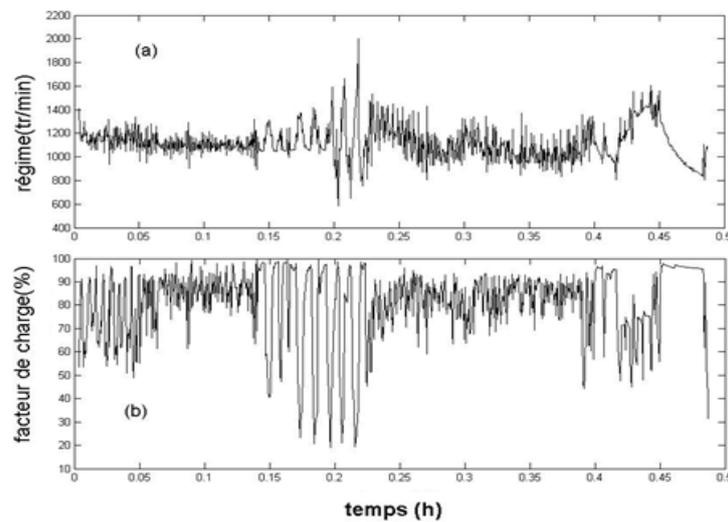


Figure 2 : Exemple d'évolution temporelle du régime moteur (a) et de son facteur de charge (b) dans le cas de la pelle 924

La réponse du moteur est due à des contraintes externes (résistance du matériau excavé, charge du godet) et des variations d'usage (déplacement, charge, assainissement). On observe sur la **Figure 3** que l'utilisation de l'engin à faible ou à forte charge influence énormément les flux de CO₂ et des NO_x émis. En effet, l'augmentation du facteur de charge se traduit par une élévation de la quantité de carburant injectée dans les cylindres. L'augmentation de la température dans les zones riches en carburant de la chambre de combustion favorise la formation de CO₂ et des NO_x.

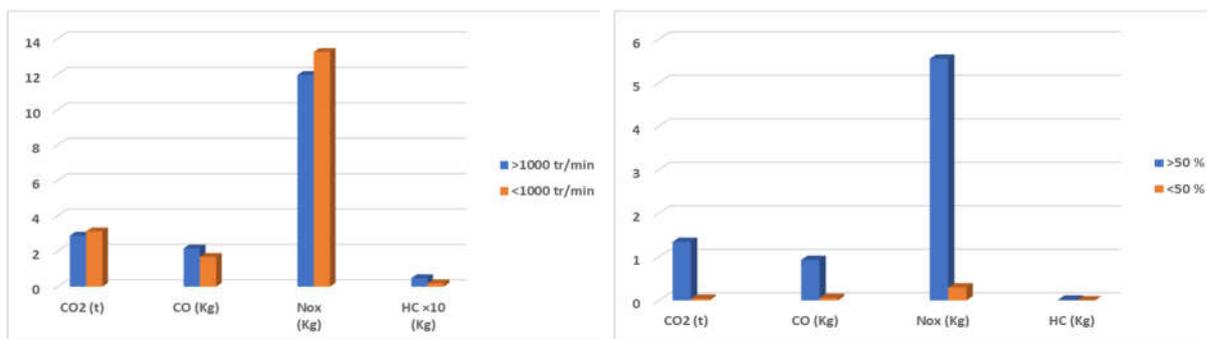


Figure 3 : Quantités de gaz émis à l'échappement de la Pelle 924 en fonction du régime moteur (à gauche) et de son facteur de charge (à droite)

Dans le cas des pelles, les accélérations du moteur servent principalement à se déplacer. A l'exception du mode ralenti (engin en attente de Dumper à charger), la quantité de carburant injectée dans la chambre de combustion est la même pour tous les modes d'usages. Dans ce cadre, la réponse de la pelle à des variations instantanées de charge provoquerait des variations de régime traduites par les accélérations. L'instabilité engendrée dans le système d'injection (pression d'injection, taux de remplissage) peut alors produire un mélange hétérogène et donc à des variations de température expliquant la formation des pics de CO. Les émissions de HC restent cependant faibles malgré des pics de HC qui sont proportionnelles aux pics de CO dus comme déjà dit à une combustion légèrement partielle.

3-3. Cas du Dumper

Le Dumper est utilisé dans le transport des matériaux en interne du chantier de terrassement pour équilibrer les volumes de déblais et de remblais. La **Figure 4** présente un exemple d'évolution temporelle du régime moteur et de son facteur de charge. Le caractère très variable de ces deux paramètres met en évidence l'influence de la nature du terrain (pente, orniérage, etc.) et le type de conduite. On observe que la plupart des plages de régime sont utilisées.

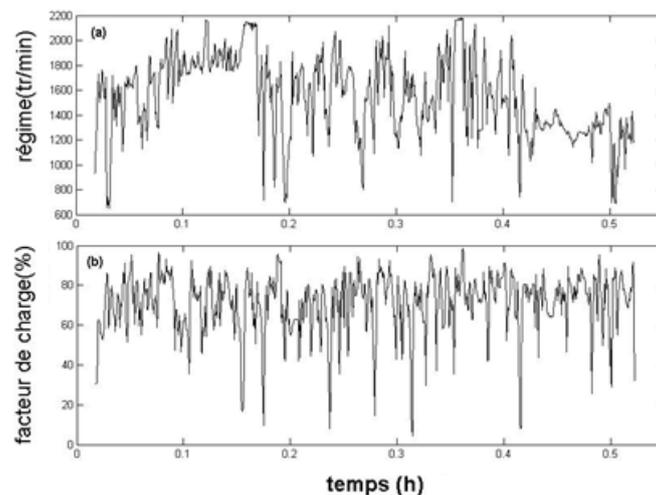


Figure 4 : Exemple d'évolution temporelle du régime moteur (a) et de son facteur de charge (b) dans le cas du Dumper 25

Les engins mobiles se distinguent des autres catégories d'engins (semi-mobiles et fixes) en ce qu'ils présentent de fortes variations des émissions (**Figure 5**), mais qui sont surtout à relier aux paramètres terrain comme l'état de la piste, les pentes, etc. Les émissions de CO₂ et des NO_x suivent les variations du régime moteur et son facteur de charge, mais néanmoins, on peut conclure qu'elles dépendent principalement du facteur de charge et peu du régime moteur. En effet, la nature de la piste et plus précisément la pente fait varier la charge appliquée sur le moteur. Dans le cas des Dumper, les accélérations sont peu fréquentes. Toutefois, les montées de pentes et les moments de départ avec benne chargée peuvent engendrer de fortes accélérations afin de produire la puissance nécessaire. Ces accélérations sont à l'origine des émissions de CO et HC qui sont produits dans des conditions moteur éloignées du fonctionnement nominal.

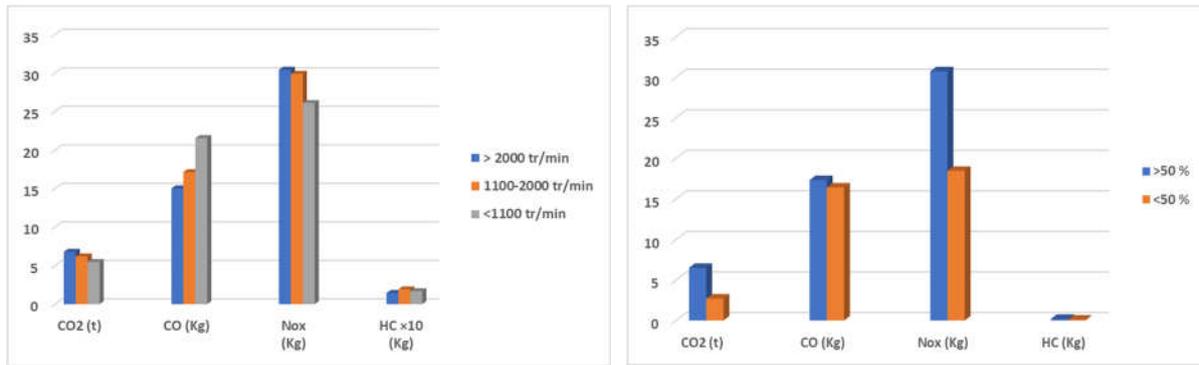


Figure 5 : Quantités de gaz émis à l'échappement du Dumper 25 en fonction du régime moteur (à gauche) et de son facteur de charge (à droite)

3-4. Cas du Bulldozer

Le bulldozer est un engin polyvalent qui est capable de réaliser plusieurs tâches de natures différentes. La **Figure 6** présente la variation du régime moteur et de son facteur de charge durant deux modes d'usages différents : mise en place d'un merlon ou ce qu'on appelle le décapage, et l'étalement du matériau appelé autrement le régilage. Les paliers qui séparent les variations des pics correspondent à des cycles d'attente (moteur au ralenti). Dans le cas du bulldozer, le facteur de charge et le régime moteur présentent des évolutions similaires. Lors du régilage, cet engin effectue plusieurs aller/retour afin d'étaler le matériau d'apport et qui nécessitent une série d'accélération. L'hypothèse qu'une diminution de la température dans la chambre de combustion due probablement à une combustion incomplète (ou autrement dit à un faible ratio air/carburant) est envisageable. En mode décapage, l'engin fonctionne à régime maximal et à plein charge. L'engin travaille à lame baissée pour extraire le matériau tout en se déplaçant, ce qui oblige le conducteur à maintenir à fond l'accélérateur durant ce temps. Les contraintes appliquées sur le moteur sont de plus en plus intenses au fur et à mesure que la benne se remplit. Par conséquent, le facteur de charge devient important.

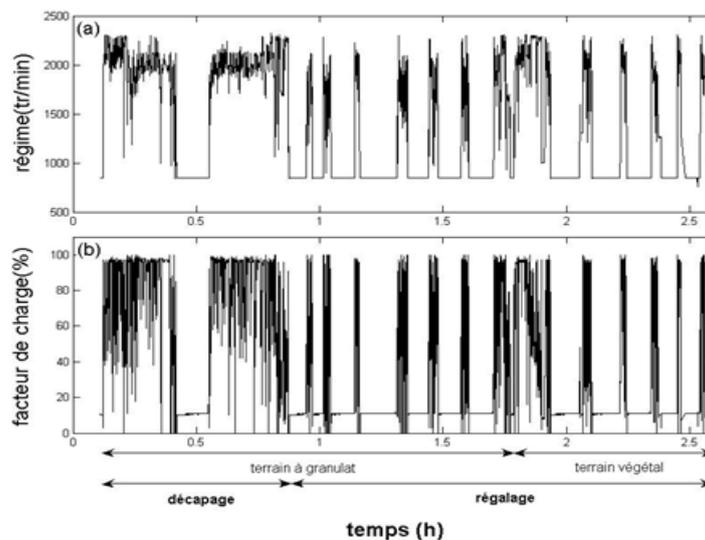


Figure 6 : Exemple d'évolution temporelle du régime moteur (a) et de son facteur de charge (b) dans le cas du Bulldozer D6

Comme le montre la **Figure 7**, on observe que les émissions de CO₂ (consommation de carburant) sont fortement modulées par le régime moteur et le facteur de charge : les plus forts régimes et facteurs de charge

gènèrent les plus fortes émissions. L'évolution des NOx ne permet pas de conclure sur l'influence du régime moteur sur la formation de ce polluant, toutefois, on observe que les émissions des Nox sont plus fortes à faibles régimes et à faibles facteurs de charge.

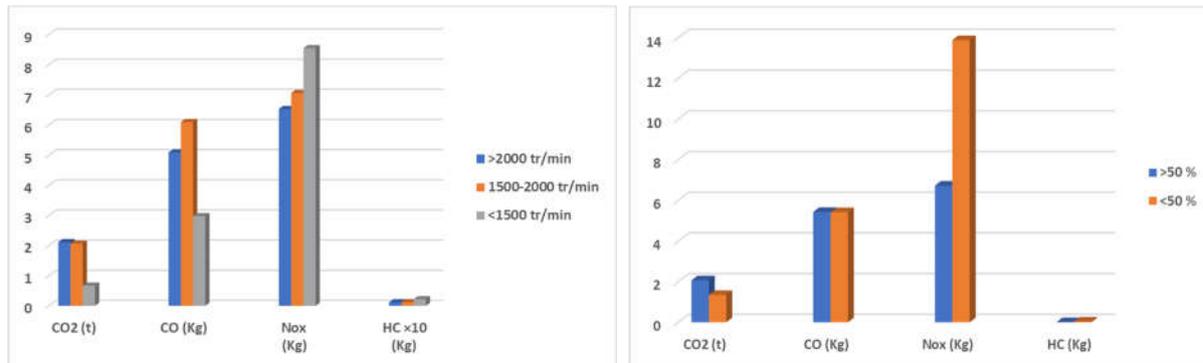


Figure 7 : Quantités de gaz émis à l'échappement du Bulldozer D6 en fonction du régime moteur (à gauche) et de son facteur de charge (à droite)

Hormis la pelle 924, qui fonctionne toujours en statique et à forte charge, les quantités moyennes émises de CO concerne les engins mobiles (Bulldozer 6 et le Dumper 25) et semble liés principalement aux variations du régime moteur. Néanmoins, les émissions de CO présentent un comportement complexe pour lequel le régime moteur décrit difficilement la dynamique observée. La nature de la combustion influence fortement la formation de ce polluant. Les accélérations brutales conduisent à un déficit en air et par conséquent augmentent la quantité de carburant dans la chambre de combustion, produisant une combustion incomplète et une augmentation de la concentration en CO. Les émissions de HC restent cependant faibles malgré des pics de HC qui sont proportionnelles aux pics de CO dus comme déjà dit à une combustion légèrement partielle. D'une manière générale, on constate aussi que les faibles régimes et/ou facteurs de charges des moteurs ne parviennent pas à limiter la consommation de carburant et donc la réduction des émissions. En effet, il apparaît nécessaire de promouvoir l'utilisation de l'engin dans un large spectre de paramètres moteur selon chaque usage et chaque catégorie d'engins. Une bonne corrélation de type $NO_x \text{ (kg)} = 4 \text{ CO}_2 \text{ (t)}$ relie le CO_2 (proportionnel à la consommation diesel) et les NOx.

4. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que les paramètres moteur choisis varient significativement selon l'activité de l'engin. Ces variations provoquent des fortes émissions de CO_2 , ce qui explique leur contribution au contrôle de la consommation du carburant et à la production des gaz à effet de serre. Cependant, il faut noter que les faibles régimes et/ou facteurs de charges des moteurs ne parviennent pas à limiter la consommation de carburant et donc la réduction des émissions. Une bonne corrélation de type $NO_x \text{ (kg)} = 4 \text{ CO}_2 \text{ (t)}$ relie le CO_2 (proportionnel à la consommation diesel) et les NOx. Pour le CO, hormis la pelle 924, qui fonctionne la plupart du temps en statique et à forte charge, on peut constater que l'émission de ce gaz concerne les engins mobiles (Bulldozer 6 et le Dumper 25) et semble lié principalement aux variations du régime moteur. Néanmoins, le CO présente un comportement complexe pour lequel le régime moteur décrit difficilement la dynamique observée. Les émissions de HC restent très faibles et sont proportionnelles aux émissions de CO dus à une combustion légèrement partielle.

Références

- [1] - M. FU, Y. GE, Y., J. TAN, T. ZENG, T. and B. LIANG, "Characteristics of typical non-road machinery emissions in China by using portable emission measurement system", *Science of the Total Environment*, 437 (2012) 255 - 261
- [2] - P. LIJEWSKI, J. MERKISZ, P. FUC, M. KOZAK and L. RYMANIAK, "Air Pollution by the Exhaust Emissions from Construction Machinery under Actual Operating Conditions", *Applied Mechanics and Materials*, 390 (2013) 313 - 319
- [3] - K. BARATI and X. SHEN, "Operational level emissions modelling of on-road construction equipment through field data analysis", *Automation in Construction*, 72 (3) (2016) 338 - 346
- [4] - T. CAO, T. D. DURBIN, R. L. RUSSELL, D. R. COCKER, G. SCORA, H. MALDONADO and K. C. JOHNSON, "Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment", *Atmospheric Environment*, 147 (2016) 234 - 245
- [5] - Office Fédérale de l'Environnement (1980-2020), <http://www.bafu.admin.ch/luft/00596/06906/offroad-daten/index.html?lang=fr>, consulté le mois de Novembre 2018
- [6] - California Air Resources Board (CARB), Almanac Emission Projection Data (2012), <http://www.arb.ca.gov/ei/emissiondata.htm>, consulté le mois de Novembre 2018
- [7] - J. M. BARANDICA, G. FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, A. BERZOSA, J. A. DELGADO and F. J. ACOSTA, "Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects", *Journal of Cleaner Production*, 57 (2013) 79 - 91
- [8] - C. S. J. KARLSSON, S. MILIUTENKO, A. BJÖRKLUND, U. MÖRTBERG, B. OLOFSSON and S. TOLLER, "Life cycle assessment in road infrastructure planning using spatial geological data", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (8) (2017) 1302 - 1317
- [9] - B. R. BANE, "A comparison of steady state and transient emissions from a heavy-duty diesel engine", Thèse de l'université de West Virginia, (2002)
- [10] - J. BENAJES, J. LUJAN, J. SERRANO, "Predictive modelling study of the transient load response in a heavy-duty turbocharged diesel engine", Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series N° 2000-01-0583, (2000)
- [11] - N. WRISBERG, H. UDO HAES, "Analytical tools for environmental design and management in a systems perspective", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (2002)
- [12] - M. LINDEGREN, P. A. HANSSON, "Effects of Transient Conditions on Exhaust Emissions from two Non-road Diesel Engines", *Biosystems Engineering*, 87 (1) (2004) 57 - 66
- [13] - B. COURTOIS, A. LE BRECH, F. DIEBOLD, D. LAFON, Moteur diesel et pollution en espace confiné, Hygiène et sécurité du travail', INRS, (2005)
- [14] - J. B. HEYWOOD, *Internal Combustion Engine fundamentals*, McGraw-Hill, NewYork, (1988)