

**Seuil minimal d'émission
d'oxyde de carbone
en rapport avec l'émission
des oxydes d'azote
dans les gaz d'échappement
de véhicules au propane**



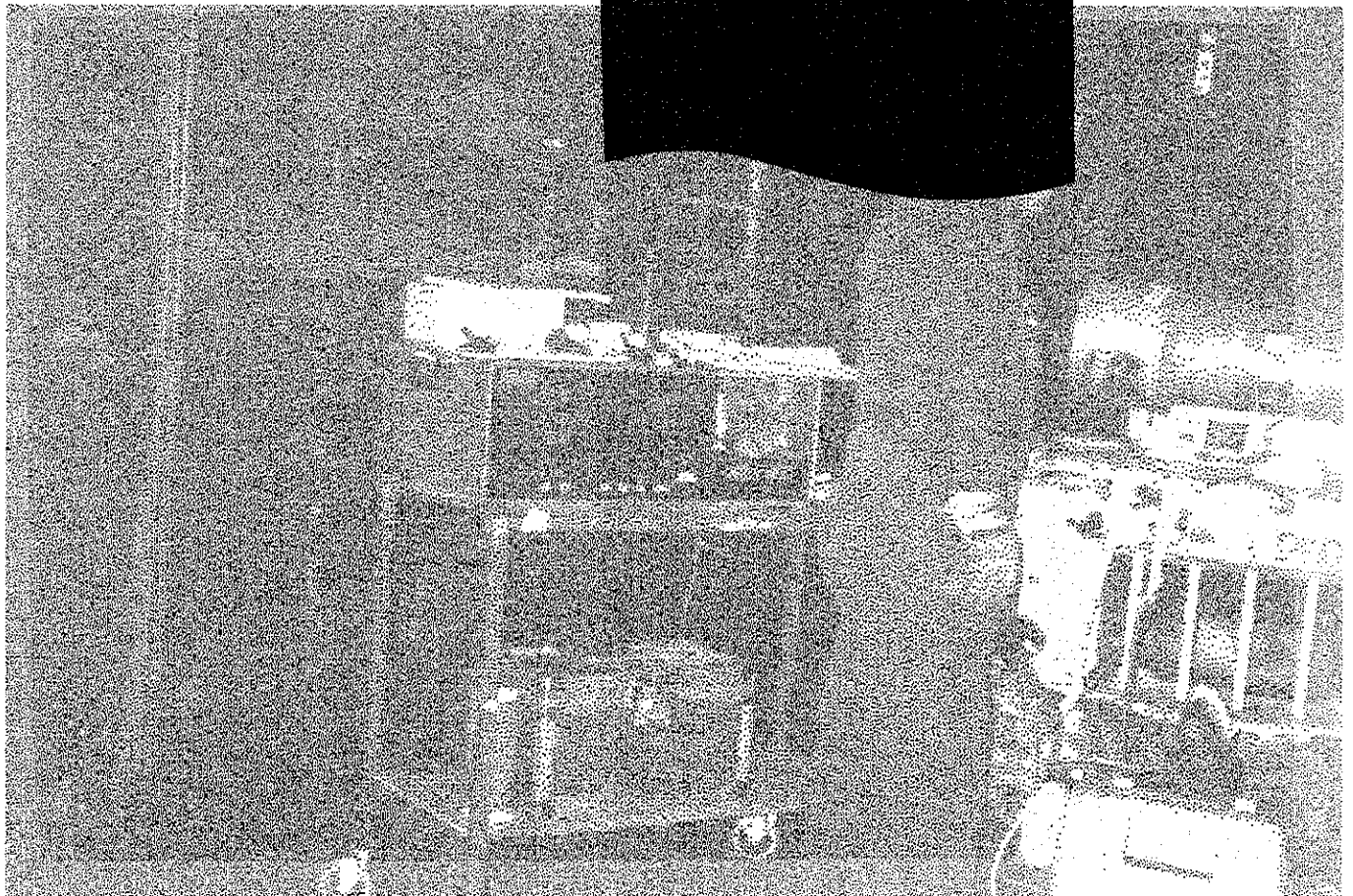
**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Brigitte Roberge

Mai 1999

R-218

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Seuil minimal d'émission
d'oxyde de carbone
en rapport avec l'émission
des oxydes d'azote
dans les gaz d'échappement
de véhicules au propane**

Brigitte Roberge,
Programme soutien analytique, IRSST

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

Table des matières

Page

1. Origine et contexte de l'étude	3
2. Cinétique de formation des oxydes d'azote	5
3. But de l'étude	7
4. Méthodologie et démarche	7
5. Résultats et discussion.....	9
6. Conclusion.....	13
7. Référence.....	14
Annexe : Résultats de tous les chariots lors de simulation de mise en charge	17

Liste des figures

Figure 1 : Concentrations de CO et des NOx dans les gaz de combustion	12
---	----

Liste des tableaux

Tableau 1 : Concentrations de CO et des NOx par rapport au régime du moteur.....	9
Tableau 2 : Moyenne (μ) des concentrations des NOx par plages de concentrations de CO.....	13

Depuis 1980, la problématique des véhicules à combustion interne alimentés au propane utilisés dans des bâtiments a été traitée sous divers volets. La première étude réalisée par l'Institut de recherche en santé et sécurité du travail a recommandé une concentration inférieure à 1 % en oxyde de carbone (CO) dans les gaz d'échappement. Malgré cette recommandation, des intervenants en santé au travail du Québec ont obtenu une faible réduction des valeurs d'exposition de travailleurs d'entreprises. Ils ont donc proposé un abaissement des émissions de CO sous la concentration de 0,3 %. L'expérience acquise avec les surfaceuses a démontré l'émergence des oxydes d'azote (NOx) lors de l'abaissement des émissions de CO sous ce niveau. Peu de publications présentent des résultats en NOx mesurés dans les gaz d'échappement en lien avec le CO sur une large population.

Le but de l'étude est de définir l'abaissement d'émission d'oxyde de carbone (CO) dans les gaz d'échappement des chariots élévateurs au propane sans entraîner une augmentation des concentrations d'oxydes d'azote. L'étude terrain a consisté à mesurer les concentrations d'oxyde de carbone, d'oxyde nitrique (NO) et de dioxyde d'azote (NO₂) dans les gaz d'échappement d'une population de chariots.

Les résultats de l'étude démontrent l'évolution du CO, NO et NO₂ en fonction du régime du moteur et des ajustements de la carburation (richesse du mélange). Ils confirment l'augmentation des NOx lors de l'abaissement du CO dans les gaz d'échappement. Leur composition en NOx est de 98 % en NO.

L'étude propose une conciliation entre les émissions de CO et des NOx en tenant compte de la santé et de la sécurité des travailleurs ainsi que de la performance des véhicules (levage des charges). Le suivi en CO et en NO₂ doit être effectué pour un contrôle de la qualité de l'air dans les aires de travail et de l'exposition des travailleurs. La gestion d'un programme d'entretien préventif des chariots et la ventilation générale sont des moyens de contrôle recommandés.

1. ORIGINE ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Au cours des dix dernières années, des études ont traité de la problématique des véhicules à combustion interne alimentés au propane¹⁻¹¹ utilisés dans des bâtiments commerciaux. Cette problématique a été couverte sous plusieurs thèmes : les intoxications à l'oxyde de carbone (CO) et au dioxyde d'azote (NO₂), la formation professionnelle des mécaniciens, l'élaboration d'un programme d'entretien préventif et la stratégie de mesure. Parmi ces thèmes, l'étude réalisée par l'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST), intitulée Stratégie de mesure du monoxyde de carbone émis par les chariots élévateurs au propane^{7,11} recommandait une concentration inférieure à 1 % d'oxyde de carbone (CO) dans les gaz d'échappement de ces

véhicules. Dans son édition de 1992, «l'American Conference Governmental Industrial Hygienists» (ACGIH) ¹² recommande cette concentration sous certaines conditions : un programme d'entretien préventif et une mise au point du système d'allumage basée sur la mesure des gaz d'échappement.

L'utilisation de véhicules alimentés au propane, tels les chariots élévateurs, constitue l'une des principales sources d'exposition à l'oxyde de carbone des travailleurs : les caristes et ceux dont les postes de travail sont situés dans les corridors de circulation des chariots. Les données de l'étude de l'IRSST ^{7, 11} démontrent que ces véhicules émettent des concentrations supérieures à 1 pour cent (%). En conséquence un suivi environnemental des aires de circulation des chariots est effectué par les intervenants en santé au travail du Québec, spécialement au cours de la saison froide. L'exposition de ces travailleurs à l'oxyde de carbone est également évaluée.

Le CO est un asphyxiant chimique reconnu sous forme d'un gaz inodore, incolore, sans saveur et non irritant ¹³. Compte tenu de sa toxicité et de son mode d'action sur l'organisme, la réglementation québécoise (Règlement sur la qualité du milieu de travail (RQMT) Annexe A ¹⁴) fixe la valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) pour une exposition à l'oxyde de carbone de huit (8) heures à 35 parties par million (ppm).

Par ailleurs, la contamination en oxyde de carbone des aires de travail peut dépasser la VEMP même avec l'application de la recommandation émise dans l'étude de l'IRSST ^{7, 11}. La ventilation dans l'entreprise, l'organisation des lieux physiques et celle du travail, la circulation des chariots, ainsi que la saison froide avec la fermeture des portes et des fenêtres contribuent à différents degrés à cette contamination. À la suite de ce constat, nous avons envisagé la possibilité d'abaisser les concentrations de CO dans les gaz d'échappement sous le seuil de 0,3 %, donc à une concentration moins élevée que celle recommandée dans l'étude. À l'opposé, les fabricants des carburateurs installés dans la majorité des chariots au propane suggèrent des concentrations variant entre 0,5 et 0,8 % ¹⁵ dans les gaz d'échappement et ce, quel que soit le régime du moteur sollicité (ralenti, vitesse de croisière et sous charge).

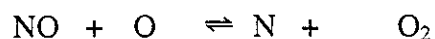
L'expérience acquise avec les surfaceuses à glace des patinoires intérieures laisse croire qu'un abaissement des émissions d'oxyde de carbone inférieures à 0,3 % entraîne la génération d'autres contaminants qui sont les oxydes d'azotes (NO_x) ^{4, 5, 9}. Ces derniers, (l'oxyde nitrique (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂)), sont des gaz irritants primaires pour les voies respiratoires ¹³. Ils agissent principalement au niveau du parenchyme pulmonaire. L'oxyde nitrique est moins toxique que le dioxyde d'azote ¹³, gaz rougeâtre à température normale plus lourd que l'air. Le dioxyde d'azote peut causer de l'œdème pulmonaire se manifestant, en général, 4 à 24 heures après l'exposition du

travailleur à ce contaminant ¹³. L'annexe A du RQMT fixe la VEMP à 25 ppm pour l'oxyde nitrique et à 3 ppm pour le dioxyde d'azote ¹⁴.

En pratique, les mécaniciens procèdent aux ajustements du système de carburation en tenant principalement compte de la performance du véhicule donc de la capacité de levage de charge et non en fonction des émissions des produits contenus dans les gaz d'échappement. L'entretien d'un véhicule à combustion interne alimenté au propane n'est pas complet si les produits générés par la combustion et émis dans les gaz d'échappement ne sont pas quantifiés et si l'équilibre entre ceux-ci n'est pas atteint. Il est donc important de connaître d'une part le mécanisme de formation de ces produits et leur évolution en relation avec les paramètres de combustion du moteur et d'autre part l'influence de ces paramètres sur les émissions de ces produits tout en assurant le maintien de la capacité nominale optimale du véhicule.

2. CINÉTIQUE DE FORMATION DES OXYDES D'AZOTE

Des études expérimentales et théoriques ¹⁶⁻²³ ont été réalisées afin de déterminer la cinétique de la formation des oxydes d'azote lors d'une combustion alimentée au propane. Selon ces études, les gaz d'échappement des moteurs à combustion interne alimentés au propane contiennent de l'oxyde nitrique (NO). Ce dernier est dû aux hautes températures générées lors de la combustion. Il s'oxyde en dioxyde d'azote en présence de l'oxygène de l'air ambiant ¹⁶⁻¹⁹. La principale source atmosphérique des oxydes d'azote est liée aux phénomènes de combustion dont 40 % sont dus aux moteurs à combustion interne ¹⁷. Différents modèles sont énoncés dans la littérature et font intervenir des espèces chimiques variées, tel l'oxygène et l'oxygène atomique, l'azote et l'azote atomique ainsi que le radical OH. Zeldovich et Kaufman, Eyzat et Guilbert ¹⁷ ont établi différents modèles de formation d'oxydes d'azote lors d'une combustion. Les étapes correspondant au modèle proposé par Zeldovich et Kaufman sont résumées comme suit :



Eyzat et Guilbert retiennent le schéma se limitant aux espèces moléculaires de l'azote et de l'oxygène, soit :



Selon les ajustements effectués au niveau du carburateur, un mélange pauvre (proportion de l'air et du carburant) est caractérisé par une plus grande quantité d'oxygène (O_2) non consommé dans les gaz d'échappement. Dans une situation de mélange pauvre, la concentration en oxyde de carbone peut être faible mais celle en oxyde nitrique, très importante. La formation de ce dernier contaminant est partiellement due à l'excédant d'oxygène non consommé lors de la carburation. Cette quantité d'oxygène réagit avec l'azote moléculaire (N_2) et avec certains additifs ajoutés dans le propane^{18, 22}. Donc, l'oxygène atomique résultant de la dissociation de la molécule d'oxygène réagit avec l'azote de l'air et forme de l'oxyde nitrique (NO)¹⁷ sous l'effet des températures élevées générées lors de l'exécution du travail sous charge (opération de levage de charges). L'oxyde nitrique est ultérieurement oxydé en dioxyde d'azote (NO_2) avec l'oxygène de l'air ambiant et l'abaissement de la température des gaz émis.

Très peu de publications¹⁶⁻²⁰ présentent des résultats en oxydes d'azote quant aux concentrations émises dans les gaz d'échappement des moteurs à combustion interne alimentés au propane. Elles rapportent des concentrations maximales de 4 400 ppm en oxydes d'azote. Elles ont été réalisées en laboratoire sur un très faible nombre de véhicules en fixant des paramètres au niveau des ajustements des systèmes d'allumage et de carburation ainsi qu'en appliquant une force connue à l'aide d'un dynamomètre.

L'étude de Charpenet et Ponsonnet¹⁶ s'est intéressée à l'évolution des concentrations en NO_x en fonction des principaux paramètres de fonctionnement du moteur : la richesse du mélange air carburant, l'avance initiale à l'allumage, l'utilisation de la charge maximale du chariot (capacité nominale) à l'aide d'une application d'une force mesurée par un dynamomètre. D'après ces auteurs, la concentration en NO_x est maximale dans les meilleures conditions de fonctionnement du moteur.

Selon ces études, la température de combustion, la richesse du mélange air/carburant, le degré de l'avance initiale à l'allumage et l'utilisation de la capacité nominale de la charge influencent les concentrations émises en oxydes d'azote. Les auteurs concluent que les concentrations en oxydes d'azote sont les plus élevées en présence d'un mélange pauvre (rapport air/carburant supérieur à 15 pour 1 ou λ supérieur à 1), avec une avance initiale à l'allumage supérieure aux spécifications des fabricants des composantes (supérieur à 20°) ou en utilisant plus de 50 % de la capacité nominale de la charge.

Afin d'agir sur les concentrations d'oxyde de carbone, il est donc important de tenir compte des concentrations des oxydes d'azote émis dans les gaz d'échappement par les chariots élévateurs au propane lors du travail en force ou sous charge. La génération de ces produits et leur évolution en

lien avec la variation des paramètres de combustion sont des facteurs à considérer en vue de l'abaissement de leurs concentrations respectives.

3. BUT DE L'ÉTUDE

Le but de l'étude est de définir un seuil minimal d'émission d'oxyde de carbone dans les gaz d'échappement des véhicules à combustion interne alimentés au propane sans entraîner une augmentation des concentrations d'oxydes d'azote. L'étude a consisté à déterminer la relation entre l'évolution des concentrations en NOx et en CO en fonction des ajustements possibles du système de carburation (richesse du mélange air carburant) lors de simulation de charge.

4. MÉTHODOLOGIE ET DÉMARCHE

L'étude de l'IRSST a été réalisée en collaboration étroite avec un mécanicien qui entretient les chariots élévateurs au propane d'une entreprise. Il s'agit d'une étude en situation réelle dans le milieu de travail sur différents chariots. L'étude a consisté à quantifier les émissions de CO et de NOx dans les gaz d'échappement. Les principaux paramètres de fonctionnement du moteur (avance initiale à l'allumage, état des différentes composantes du système d'allumage, etc.) n'ont pas été spécifiquement considérés. Seuls les ajustements au niveau du système de carburation (richesse du mélange) ont été retenus car ces ajustements sont d'exécution rapide avec une incidence directe sur les concentrations en CO et NOx.

Les mesures du CO, du NO et du NO₂ dans les gaz d'échappement ont été prises simultanément au même niveau dans le système d'échappement quand le moteur est mis sous charge et qu'il a atteint sa température optimale d'opération. La mesure du CO a servi de valeur de référence et a été effectuée à l'aide d'un instrument conçu pour l'analyse des contaminants émis dans les gaz d'échappement de véhicules à combustion interne lors de l'entretien des systèmes d'allumage et de carburation par un mécanicien. Cet instrument est fabriqué par Sun Electric Corporation, Illinois, modèle MGA 1400. Il répond aux spécifications BAR 90 du «California Bureau of Automotive Repair»²⁵. Il possède une exactitude inférieure à 5% de la lecture. Son système de détection est la spectroscopie dans la région de l'infrarouge et sa limite de détection de 0,01% (100 ppm) pour le CO. Les mesures de l'oxyde nitrique (NO) et du dioxyde d'azote (NO₂) ont été prises à l'aide d'un instrument conçu pour les émissions des contaminants suite à une combustion. Cet instrument est fabriqué par Ecom-AC America Ltd²⁶, Allemagne. Il possède une exactitude de 5 % de la lecture et une limite de détection de 1 ppm et ce, pour les deux systèmes de détection utilisés. Leurs systèmes de détection sont des piles électrochimiques à courant galvanique. Avant les interventions,

la réponse des deux instruments était vérifiée avec des gaz étalons selon les spécifications des fabricants.

Dix sept entreprises ont contribué à la réalisation de cette étude. Les essais ont été effectués sur 68 chariots. Les essais effectués sur cette population ont permis d'obtenir 213 mesures. La majorité des chariots composant la population de l'étude étaient équipés de système de carburation de marque Impco et le modèle le plus fréquemment rencontré de ce fabricant était le modèle CA-100.

Les mesures du CO, du NO et du NO₂ ont été prises en fonction des différents ajustements que le mécanicien effectuait au niveau du système de carburation de chacun des chariots. Ces ajustements effectués au niveau du carburateur affectent la richesse du mélange air/carburant et par conséquent, la performance du chariot en terme de capacité de levage. Ils doivent être effectués pour permettre l'atteinte de la capacité nominale de charge. Une technique de simulation sans charge est alors employée. Elle est couramment utilisée par les mécaniciens et exige que le moteur tourne à environ 2 000 révolutions par minute (RPM). En plus de cet équivalent de la vitesse moyenne de croisière, elle implique une sollicitation de la pompe hydraulique actionnant le mât, simulant ainsi l'application d'une force de soulèvement d'une charge. Les essais correspondent à la technique d'opération des utilisateurs des véhicules.

L'équilibre entre les gaz mesurés (CO, CO₂, O₂ et hydrocarbures) lors d'une mise au point du système de carburation décrit le bon état du chariot. Il doit être atteint et maintenu quel que soit le régime du moteur (ralenti, vitesse de croisière et sous charge). Il décrit l'état du chariot et des composantes de son système d'allumage. Les résultats obtenus par la mesure des concentrations des gaz contenus dans les émissions d'échappement fournissent au mécanicien des éléments de diagnostic (problèmes d'allumage, d'alimentation de richesse du mélange, etc.) lors d'un entretien. La fiche technique pour les mécaniciens lors de l'entretien des chariots au propane¹⁰ décrit les étapes de mise au point et les concentrations recommandées pour atteindre l'équilibre des gaz. Un bon entretien et mise au point des systèmes d'allumage et de carburation, effectués sur une base régulière, sont recommandés par les fabricants des pièces et les motoristes pour obtenir performance et longévité.

Pour chaque chariot, les ajustements du carburateur (richesse du mélange) ont été effectués pour entraîner un déséquilibre au niveau des concentrations des principaux gaz émis lors de la carburation conjointement à une technique de simulation de mise en charge. Ils ont permis d'obtenir différentes concentrations en oxyde de carbone et en oxydes d'azote sur un même chariot en modifiant la richesse du mélange air/carburant (mélange pauvre ou riche). Ces paramètres sont d'exécution rapide

et ont une incidence directe sur les concentrations de CO et des NOx. De plus, ils correspondent à la nature des tâches et aux conditions dans lesquelles elles sont exécutées par les utilisateurs.

Avant la prise des mesures, les mécaniciens des entreprises devaient procéder à un entretien des véhicules, en conformité avec la fiche technique ¹⁰. L'objectif de cette demande était de constituer une population de chariots en bonne condition et performants. Malgré cette exigence préalable, la principale difficulté rencontrée lors de cueillette de données était relative à l'état général de chariots; en effet, leur entretien du système d'allumage n'était pas effectué comme demandé et la mise au point du système de carburation n'était pas basée sur les concentrations recommandées des gaz émis ^{10, 24}.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats ont été traités de façon à déterminer un seuil minimal de concentration en oxyde de carbone dans les gaz d'échappement de chariots élévateurs alimentés au propane. Ce seuil doit entraîner une hausse minimale des concentrations en oxydes d'azote (NOx).

En premier lieu, quelques résultats ont été colligés en fonction du régime du moteur et ce, pour une richesse constante du mélange (ajustement du système de carburation) pour six chariots différents. Ils confirment la méthodologie utilisée quant à l'implication du régime du moteur sur la variation des émissions des gaz toxiques. Le tableau 1 donne les concentrations d'oxyde de carbone et des oxydes d'azote par chariot lorsque le moteur tourne au ralenti, à vitesse de croisière et en situation de mise en charge par une technique de simulation, pour une richesse constante du mélange.

Tableau 1 : Concentrations de CO et des NOx par rapport au régime du moteur

Chariot	Régime du moteur	Concentration		Chariot	Concentration	
		CO (%)	NOx (ppm)		CO (%)	NOx (ppm)
1	Ralenti	0,08	30	4	0,04	47
	Vitesse de croisière	1,89	103		0,05	2549
	Sous charge	0,87	2290		0,08	3295
2	Ralenti	1,66	31	5	0,29	226
	Vitesse de croisière	1,20	268		4,64	1000
	Sous charge	2,53	1361		6,91	803
3	Ralenti	0,10	13	6	0,30	90
	Vitesse de croisière	0,17	292		0,10	2509
	Sous charge	2,31	1329		0,05	3478

Selon ces résultats, un moteur qui tourne au ralenti (750 à 950 révolutions par minute) émet une quantité plus faible en NOx que lorsque le moteur tourne à vitesse de croisière (2 000 RPM). Avec l'augmentation du régime du moteur, la quantité émise en NOx est supérieure particulièrement avec la simulation de mise en charge (2 000 RPM plus sollicitation de la pompe hydraulique). Les résultats des chariots 1, 3, 4 et 6 illustrent ce constat.

En ce qui a trait aux émissions de CO lors de la simulation de mise en charge par rapport à la vitesse de croisière, trois situations sont observées : 1° une augmentation des concentrations émises de CO (chariots 2, 3 et 5), 2° un maintien de celles-ci (chariots 4 et 6) et enfin 3° une baisse de celles-ci (chariot 1). Cette différence de comportement s'explique par la condition générale des chariots et leurs ajustements initiaux. La fiche technique¹⁰ publiée par l'IRSST spécifie les étapes à suivre lors d'un entretien et mise au point de véhicules alimentés au propane. Ces travaux doivent tendre vers un maintien des concentrations de CO entre la sollicitation de la vitesse de croisière et la simulation de mise en charge. Donc après un entretien effectué selon les recommandations, les ajustements du système de carburation doivent permettre que les concentrations de CO soient similaires sous ces deux régimes de moteur et correspondre aux plages des concentrations recommandées^{10, 24}. Il est important que ces concentrations soient atteintes et maintenues car ces régimes sont utilisés pour l'exécution des tâches du chariot (transport et déplacement de charges). Les données des chariots 1, 2, 3 et 5 ne respectent pas cette spécification démontrant ainsi que l'entretien du système d'allumage et les ajustements des systèmes de carburation ne sont pas optimaux. Toutefois, malgré le maintien des concentrations de CO entre la vitesse de croisière et la simulation de mise en charge pour les chariots 4 et 6, les ajustements du carburateur n'entrent pas à l'intérieur des concentrations recommandées dans la fiche technique^{10, 24} (0,5 à 0,8 % en CO).

Quel que soit le comportement des émissions de CO, une relation entre les concentrations de CO et celles des oxydes d'azote est remarquée ; les émissions de NOx sont d'autant plus importantes que celles de CO sont basses pour une même richesse du mélange air carburant. Ainsi, lors de la simulation de mise en charge pour les chariots 4 et 6, les émissions en CO demeurent basses, voire sous les concentrations recommandées (<0,5 %) ^{10, 24}, et celles des NOx augmentent de façon marquée (3 295 et 3 478 ppm). Pour les chariots 1, 2 et 3, la simulation de mise en charge provoque une augmentation de concentrations en NOx mais de façon moins importante, les concentrations de CO étant supérieures à celles recommandées (entre 0,5 et 0,8 %). En effet, lors d'une situation correspondant à de très faibles émissions de CO conjointement à la simulation de mise sous charge, la quantité d'oxydes d'azote est supérieure par rapport à une situation où le moteur tourne à vitesse de croisière. Ce constat est confirmé par les résultats des chariots 1, 2, 4 et 6. En ce qui a trait au chariot 5, il y a une baisse de la concentration d'oxydes d'azote lors de la mise sous charge car les

concentrations émises en oxyde de carbone sont très élevées, soit près de 7 %. Les données de ce chariot démontrent de mauvais ajustements au niveau du système de carburation (vis de puissance).

Ces résultats tendent à démontrer : 1° que les concentrations d'oxyde de carbone et des oxydes d'azote varient selon le régime du moteur pour une même richesse du mélange donnée (ajustements du carburateur au niveau du papillon des gaz et de la vis de mélange), 2° que lors d'une simulation de la mise sous charge les concentrations en oxydes d'azotes sont beaucoup plus élevées par rapport au moment où le moteur tourne à vitesse de croisière ou au ralenti, 3° qu'il y a un lien entre les émissions de CO et des NOx.

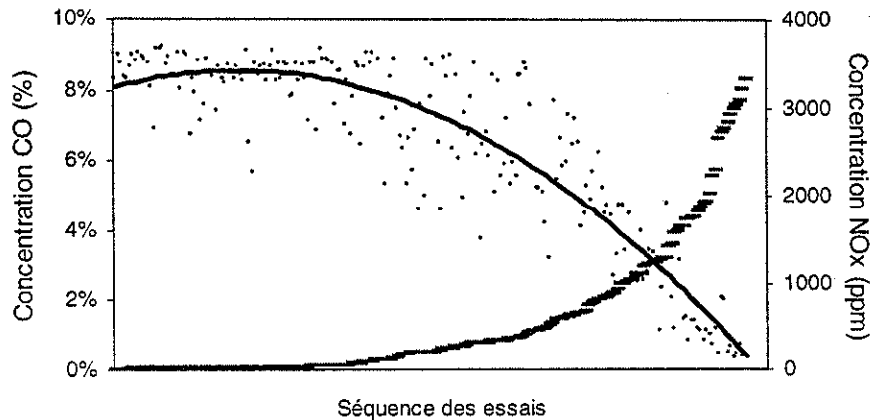
Comme le démontre cette série de résultats, la simulation de charge sollicitée est un facteur primordial dans la formation des NOx. Ce facteur est expliqué par la forte augmentation des températures de combustion ou carburation. Toutefois, la richesse du mélange air carburant est le facteur variable de l'étude et les mesures des gaz d'échappement ont été effectuées en jumelant ces deux facteurs déterminants. Ces résultats confirment les études consultées et la méthodologie utilisée.

Deuxièmement, les résultats ont été considérés pour l'ensemble des chariots élévateurs alimentés au propane, quelle que soit la marque du carburateur, quand leur moteur tourne à vitesse de croisière conjointement à une simulation de mise en charge. Ils correspondent à 213 mesures effectuées dans les gaz d'échappement de 68 chariots. Ils sont colligés à l'annexe 1 et représentés sous forme graphique à la figure 1.

Il est observé dans les gaz d'échappement de moteurs alimentés au propane : 1° que la composition des NOx dans les gaz d'échappement est majoritairement de l'oxyde nitrique (NO), soit 98 %, 2° que l'augmentation des concentrations des NOx est d'autant plus importante que les concentrations de CO sont basses et 3° qu'il y a un abaissement des concentrations de NOx ($\approx 3\ 500$ à $1\ 250$ ppm) en présence de concentrations en CO supérieures à 3 %.

Il existe une relation inverse entre les concentrations de CO et de NOx. L'ensemble des données représentées à la figure 1 confirme les résultats des études de Charpenet et Ponsonnet, Hori¹⁴⁻¹⁶.

Figure 1 : Concentrations de CO et des NOx dans les gaz de combustion



La séquence des essais représentés à la figure 1 est ordonnée en fonction des concentrations croissantes de CO. Chaque point de CO et son correspondant en NOx représentent les données d'une richesse du mélange pour un essai. Les concentrations de NOx sont représentées sous un nuage de points. La courbe de tendance pour les concentrations de NOx est polynomiale et répond à l'équation suivante :

$$Y = -0,1122x^2 + 9,5801x + 3219,7$$

Les résultats obtenus sont le reflet de la réalité des entreprises. En effet, les chariots faisant l'objet de l'étude n'avaient pas nécessairement subi un entretien préventif récent, tel que demandé, et pouvaient présenter des symptômes de mauvais fonctionnement ou mauvais état des composantes du système d'allumage (bougies, rupteurs, chapeau de l'allumeur, fils, etc.). Les variations des concentrations de ces gaz sont donc dépendantes de la condition des chariots. La condition générale des chariots explique les écarts entre les résultats (concentration de CO et de NOx) pour une richesse équivalente de mélange air carburant.

En regard de l'ensemble des données de l'étude, une conciliation entre les concentrations de CO et des NOx doit être privilégiée en tenant compte de la capacité nominale du chariot, entre autres. La technologie des systèmes d'allumage et de carburation retrouvée dans la population de chariots des entreprises québécoises au moment de l'étude permet d'agir uniquement sur les concentrations de CO (vis papillon et de mélange des gaz). Comme les résultats le démontrent, les concentrations des NOx sont en lien avec celles de CO. Par conséquent, les ajustements des concentrations CO ont une incidence également sur les concentrations de NOx, tout en tenant compte de l'entretien des

véhicules et leur condition. Donc la conciliation acceptable doit entraîner une hausse minimale des concentrations des NO_x.

Le tableau 2 suggère trois avenues de conciliation : ajustements des systèmes de carburation entre A) 0,5 et 0,8 % de CO dans les gaz d'échappement, B) entre 0,4 et 0,8 % de CO ou C) entre 0,3 et 0,8 % de CO. Ces moyennes correspondent à l'ensemble des résultats pour tous les chariots colligés à l'annexe 1.

Tableau 2 : Moyenne (μ) des concentrations des NO_x par plages de concentrations de CO

A			B			C		
Concentration de CO (%)	μ NO _x (ppm)	n	Concentration de CO (%)	μ NO _x (ppm)	n	Concentration de CO (%)	μ NO _x (ppm)	n
< 0,5 %	3 295	100	< 0,4 %	3 329	95	< 0,3 %	3 330	95
0,5 % \geq CO \leq 0,8 %	2 763	25	0,4 % \geq CO \leq 0,8 %	2 728	30	0,3 % \geq CO \leq 0,8 %	2 779	33
Différence des μ	532		Différence des μ	601		Différence des μ	551	

D'après les données du tableau 2, nous observons que les concentrations moyennes de NO_x sont du même ordre de grandeur (3 300 ppm) lorsque les concentrations de CO sont inférieures à 0,4 % ou inférieurs à 0,3 %. Par contre, la moyenne des données comprise entre 0,4 et 0,8 % est plus basse que celle entre 0,3 et 0,8 %. Bien que les concentrations recommandées soient comprises entre 0,5 et 0,8 %, la conciliation d'abaisser le niveau des concentrations de CO jusqu'à 0,4 % dans les gaz d'échappement serait acceptable en tenant compte de la ventilation générale dans les aires de circulation des chariots, du programme d'entretien préventif des véhicules, de l'exiguïté des lieux et de la nature des tâches de travail (chargement de remorques ou wagon).

Donc afin de minimiser l'impact sur la santé et sécurité des travailleurs, il serait acceptable de procéder aux ajustements du système de carburation à 0,4 % de CO, bien que les fabricants des pièces spécifient des ajustements entre 0,5 et 0,8 % et d'effectuer un suivi de l'exposition des travailleurs au CO et au NO₂, spécialement lors d'exécution de tâches en espace restreint. Dans cette perspective, la ventilation et un programme d'entretien préventif régulier demeurent des moyens de prévention à mettre en valeur.

6. CONCLUSION

Les résultats de l'étude confirment l'augmentation des NO_x lors de l'abaissement du CO dans les gaz d'échappement des chariots élévateurs au propane. De plus, les concentrations de CO et NO_x

varient selon le régime du moteur. La composition des NOx dans les gaz d'échappement est majoritairement de l'oxyde nitrique (NO) (98 %). La conciliation acceptable dans le contexte de la santé et sécurité des travailleurs se situerait entre 0,4 et 0,8% de CO tout en tenant compte que la ventilation de l'entreprise respecte les exigences minimales prévues par la réglementation québécoise et l'application régulière du programme d'entretien préventif.

Le développement technologique a permis de commercialiser des silencieux catalytiques. Toutefois, leur efficacité en situation terrain n'a pas été évaluée sur une population étendue de véhicules à combustion interne alimentés au propane (chariot élévateur, surfaceuse). D'autres techniques permettent de contrôler les NOx en intégrant une valve de recirculation des gaz (Valve EGR). Ce type de valve contribuerait à abaisser la température de combustion et réduire la formation des NOx. Il est également possible d'ajouter une pompe à air pour les surfaceuses dont le moteur tourne à 3 000 RPM où l'installation de la valve est difficilement réalisable.

7. RÉFÉRENCE

1. Lachance F., **Problématique des chariots élévateurs mus au propane**, CLSC Norman-Béthune, Santé au travail, décembre (1984).
2. Coulombe G., Carignan, N., Bernier, M., **Une lutte à gagner : Monoxyde de carbone (CO) et chariot élévateur au propane. Situations et solutions en quatre (4) modules**, modules I, III et IV, DSC Sainte-Croix, octobre (1991).
3. Coulombe G., Côté P., **L'entretien préventif des chariots élévateurs au propane : une approche exploratoire ; un projet pilote**, 14e Congrès de l'Association pour l'Hygiène Industrielle au Québec, Trois-Rivières, p 39-48, mai (1992).
4. Lévesque B., Dewailly E., Lavoie R., Prud'Homme D., Allaire S., **Carbon monoxide in indoor ice skating rinks : evaluation of absorption by adult hockey players**, Am J Public Health ;80(5) 594-598 (1990).
5. Legris, M., Allaire, S., Fiset, F., Roberge, L., Soulard, A., **La qualité de l'air dans les arénas s'améliore**, Travail et santé, 7 (3), p 14-18, (1991).
6. Roberge, B., Létourneau, C., Cammarata, D., **Stratégie d'évaluation du monoxyde de carbone émis par les chariots élévateurs mus au propane**, 16e Congrès de l'Association pour l'hygiène industrielle au Québec, Québec, p 197-203, mai (1994).
7. Roberge, B., Létourneau, C., Cammarata, D., **Stratégie de mesure du monoxyde de carbone émis par les chariots élévateurs au propane**, Rapport IRSST, Études et recherches, R-102, juin (1995).
8. **Histoire d'une intoxication au monoxyde de carbone causée par un chariot élévateur**, Préventex, 10 (2), p 6-8, Longueuil, Québec, (1993).

9. Hedberg, K., Hedberg, C., Iber, C., White, K.E., Osterholm, M., Jones, D.B.W., Flink, J.R., MacDonald, K.L., **An outbreak of nitrogen dioxide - Induced respiratory illness among ice hockey players**, JAMA, 262, (21), p 3014-3017, December (1989).
10. Roberge, B., Coulombe, G., Houle, M., **Fiche technique pour les mécaniciens lors de l'entretien des chariots au propane**, Fiche technique IRSST, Études et recherches, RF-102-1 août (1996).
11. Roberge, B., **Evaluation and Control of Carbon Monoxide Exposure from Propaned-Fueled Forklifts**, APPL.OCCUP.ENVIRON.HYG. 13(3) :183-191, March (1998).
12. **Industrial Ventilation, A Manual of Recommended Practice**, 21e édition, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, p 10-138, Cincinnati, Ohio, (1992).
13. Lauwerys, R., **Toxicologie industrielle et intoxication professionnelles**, 2e édition, p 258-269, Paris, (1982).
14. **Règlement sur la qualité du milieu de travail**, S-2.1, r.15, Éditeur officiel du Gouvernement du Québec, octobre (1994).
15. Service Manual Impco, Impco Carburateur Inc., **Master catalog**
16. Charpenet, L., Ponsonnet, L., **Teneurs en oxydes d'azote dans les produits de combustion d'un moteur à gaz à allumage commandé**, Entropie No 54, p 48-53, novembre-décembre, (1973).
17. Charpenet, L., Ponsonnet, L., **Méthodes d'analyse des oxydes d'azote contenus dans les gaz d'échappement des moteurs diesel et des moteurs à gaz à allumage commandé**, Analisis, Vol 2 No 5, p 383-391, mai (1973).
18. Eyzat, Guibet, **Étude théorique et expérimentale de la formation des oxydes d'azote dans les moteurs à combustion interne**, Revue de l'Institut français du pétrole, vol XXII, no 4, p 689-712, avril (1967).
19. Hori, M., **Experimental study of nitrogen dioxide formation in combustion systems**, Twenty-first Symposium (international) on combustion, The combustion Institute, p 1181-1188, (1986).
20. Wakelyn, N.T., Jachimowski, J., Wilson, C.H., **Experimental and analytical study of nitric oxide formation during combustion of propane in a jet-stirred combustor**, National Aeronautics and Space Administration, Scientific and technical Information Office, 1181, p 1-23, May (1978).
21. Takagi, T., Ogasawara, M., Daizo, M., Tatsumi, T., **NO_x formation from nitrogen in fuel and air during turbulent diffusion combustion**, Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, p 181-189, (1977).
22. De Soete, Feugier, **Connaissances actuelles sur les mécanismes de formation des principaux polluants dus à la combustion**, Revue de l'Institut français du pétrole, p 15-59, 20679, octobre. (1972).

-
23. Eyzat, Guibet, **Simulation de la formation d'oxyde nitrique au cours de la combustion dans un moteur**, Revue de l'Institut français du pétrole, Vol XXII, no 10, p 153-158, octobre (1967).
 24. Bouliane, P., Perron, F., Roberge, B., **Le monoxyde de carbone (CO) et les chariots élévateurs au propane**, Guide conjoint Association sectorielle transport entreposage (ASTE), CLSC Côte-des-Neiges, santé au travail, IRSST, juillet (1998).
 25. **BAR-90 Test Analyzer System Specifications**, Bureau of Automotive Repair, October (1991).
 26. **ECOM-AC User Manual**, ECOM America Ltd, 57p. Allemagne.

Annexe : Résultats de tous les chariots lors de simulation de mise en charge

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)		
3,0	10,66	0,01	3312	13	3325	18,24	99,6
5,3	9,22	0,02	3389	213	3602	20,86	94,1
4,0	10,26	0,02	3320	179	3499	18,54	94,9
1,3	11,84	0,02	3308	33	3341	16,58	99,0
0,7	12,14	0,02	3311	9	3320	16,12	99,7
4,1	10,00	0,03	3347	112	3459	19,33	96,8
2,5	10,96	0,03	3479	124	3603	17,53	96,6
1,9	11,28	0,03	3472	146	3618	17,17	96,0
1,9	11,18	0,03	3455	83	3583	17,17	97,7
4,1	10,25	0,04	3259	283	3542	17,90	92,0
3,2	10,70	0,04	3425	76	3501	17,60	97,8
1,5	11,78	0,04	3192	45	3237	16,76	98,6
4,4	9,69	0,04	3428	147	3575	19,85	95,9
1,1	12,20	0,04	2671	104	2775	16,71	96,3
5,0	9,67	0,05	3455	209	3664	18,32	94,3
2,3	11,31	0,05	3304	60	3364	17,41	98,2
2,5	11,21	0,05	3498	82	3580	17,67	97,7
1,0	11,87	0,05	2626	61	2687	16,35	97,7
1,1	11,75	0,05	3026	196	3222	15,42	93,9
2,5	11,02	0,05	3436	42	3478	16,85	98,8
1,5	11,81	0,05	3488	138	3626	15,84	96,2
1,4	11,86	0,05	3457	140	3597	15,88	96,1
4,3	10,04	0,05	3539	130	3669	19,49	96,5
0,2	12,44	0,05	3315	0	3315	15,71	100,0
3,3	10,60	0,05	3470	212	3682	18,32	94,2
1,5	11,62	0,05	3471	152	3623	16,67	95,8
1,9	11,51	0,05	3308	43	3351	11,05	98,7
4,8	9,55	0,06	2794	62	2856	19,94	97,8
4,8	9,55	0,06	2996	43	3039	19,90	98,6

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)		
4,9	9,38	0,06	3114	59	3173	20,51	98,1
5,1	9,53	0,06	3419	120	3539	20,43	96,6
5,1	9,55	0,06	3413	139	3552	20,38	96,1
2,6	11,23	0,06	3302	93	3395	11,69	97,3
4,7	9,81	0,06	3163	239	3402	19,85	93,0
1,2	11,89	0,06	3270	36	3306	16,55	98,9
1,3	11,62	0,06	3326	132	3451	16,59	96,4
3,2	10,57	0,06	3285	169	3454	18,09	95,1
2,7	11,05	0,06	3160	117	3277	17,72	96,4
2,8	10,98	0,06	3201	133	3325	17,85	96,3
1,6	11,78	0,06	3349	18	3367	15,80	99,5
2,1	10,40	0,06	2951	6	2957	16,40	99,8
2,5	11,07	0,06	3436	42	3478	16,80	98,8
3,9	10,12	0,06	3280	61	3341	19,18	98,2
1,6	11,49	0,06	3240	94	3334	16,90	97,2
6,1	8,95	0,07	2396	215	2611	21,64	91,8
6,6	8,50	0,07	3450	199	3634	22,21	94,9
3,2	10,68	0,07	2109	168	2277	18,12	92,6
2,6	10,93	0,07	3410	106	3516	17,72	97,0
2,2	11,20	0,07	3417	64	3481	17,27	98,2
2,3	11,12	0,07	3417	47	3464	17,40	98,6
1,4	11,63	0,07	3417	34	3451	16,62	99,0
2,0	11,37	0,07	3308	3	3311	17,94	99,9
2,7	10,98	0,07	3303	65	3368	17,64	98,1
3,0	10,88	0,08	3089	42	3131	18,07	98,7
3,1	10,79	0,08	3320	164	3484	18,18	95,3
3,1	10,78	0,08	3484	32	3516	18,21	99,1
3,2	10,72	0,08	3307	21	3328	18,25	99,4
1,4	11,57	0,08	3314	0	3314	16,51	100,0
0,9	11,88	0,08	3448	38	3486	15,99	98,9
3,0	10,88	0,08	30,89	42	3141	18,30	98,3

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NOx (ppm)		
3,6	10,41	0,08	3038	257	3295	18,72	92,2
4,6	9,83	0,08	3392	247	3639	19,76	93,2
3,0	10,65	0,08	3404	102	3506	18,04	97,1
2,6	10,96	0,08	3407	105	3512	17,79	97,0
0,6	12,28	0,08	3309	24	3333	15,05	99,3
0,9	12,10	0,09	3543	1	3544	16,10	100,0
0,8	12,11	0,09	3544	0	3544	16,10	100,0
2,6	10,89	0,09	3279	237	3516	17,70	93,3
1,1	11,68	0,09	3378	287	3665	16,48	92,2
1,9	11,36	0,09	2674	68	2742	17,18	97,5
2,5	11,04	0,09	3439	70	3509	17,59	98,0
1,2	10,18	0,09	2767	94	2861	17,64	96,7
2,6	10,99	0,10	3439	82	3521	11,69	97,7
2,6	11,08	0,11	3404	102	3506	11,67	97,1
1,4	11,40	0,12	3031	0	3031	16,28	100,0
0,4	12,31	0,13	3418	0	3418	15,82	100,0
0,4	12,29	0,13	3405	0	3405	15,79	100,0
1,6	11,37	0,14	3313	0	3313	16,04	100,0
2,9	10,98	0,14	2794	16	2810	11,90	99,4
1,0	11,78	0,15	2621	75	2696	16,34	97,2
1,4	11,60	0,16	2957	165	3122	16,55	94,7
0,9	11,98	0,16	3430	83	3513	16,07	97,6
0,7	11,98	0,17	3387	64	3451	16,04	98,1
0,1	12,36	0,20	2581	5	2586	15,60	99,8
0,8	11,83	0,21	3376	244	3620	16,03	93,3
8,8	5,81	0,21	3304	151	3455	25,00	95,6
0,5	12,28	0,21	3437	60	3497	14,90	98,3
1,9	11,09	0,26	3492	131	3623	17,00	96,4
0,5	12,18	0,27	3088	75	3163	14,70	97,6
0,5	12,19	0,28	3546	0	3546	15,71	100,0
0,4	12,16	0,30	3153	0	3153	15,70	100,0

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NOx (ppm)		
5,9	8,86	0,30	2786	100	2886	21,65	96,5
4,9	9,57	0,30	2073	73	2146	20,13	96,6
0,2	11,92	0,35	3308	35	3343	15,18	99,0
0,8	11,93	0,36	3331	214	3545	16,01	94,0
0,3	12,04	0,41	2962	27	2989	15,60	99,1
0,3	12,07	0,44	2105	29	2534	15,56	98,9
2,8	10,82	0,45	2565	107	2672	16,78	96,0
0,1	12,38	0,46	2114	0	2144	15,42	98,6
1,5	11,48	0,49	2590	45	2644	16,10	98,0
0,4	12,07	0,50	2969	73	3042	15,63	97,6
6,4	8,14	0,50	2213	80	2293	22,25	96,5
4,8	9,78	0,50	2652	92	2744	20,11	96,6
1,0	11,45	0,50	2827	16	2843	14,91	99,4
4,9	9,72	0,50	1939	70	2009	19,50	96,5
0,3	12,10	0,52	3544	0	3544	15,50	100,0
0,3	12,18	0,53	3448	44	3492	14,63	98,7
0,3	11,97	0,53	3119	0	3119	14,51	100,0
1,4	11,54	0,54	2867	42	2909	14,40	98,6
1,2	11,54	0,58	2562	50	2612	16,11	98,1
3,7	10,40	0,60	1780	72	1852	16,50	96,1
0,4	12,02	0,61	3308	31	3339	15,41	99,1
1,5	11,18	0,61	3538	39	3577	16,42	98,9
0,5	11,92	0,64	3392	214	3606	15,67	94,1
0,9	11,56	0,65	2377	171	2548	15,84	93,3
0,2	12,15	0,67	3373	2	3375	14,46	99,9
0,0	12,18	0,68	2424	1	2425	14,34	100,0
0,9	11,53	0,70	1854	119	1973	15,84	94,0
0,8	11,66	0,72	2882	71	2953	15,74	97,6
0,3	11,97	0,77	3319	0	3119	15,30	100,0
0,6	11,76	0,76	2688	0	2688	15,54	100,0
0,3	11,97	0,79	3515	0	3515	15,35	100,0

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)		
1,1	11,43	0,80	2377	99	2476	15,91	96,0
3,0	10,85	0,80	1412	90	1502	18,06	94,0
0,2	11,85	0,80	2507	69	2576	15,31	97,3
0,5	11,76	0,81	2663	53	2716	15,43	98,0
0,4	12,01	0,83	2439	1	2440	14,53	100,0
0,2	12,01	0,83	3375	2	3377	14,38	99,9
1,0	11,47	0,84	2045	11	2056	15,80	99,5
0,2	11,92	0,85	3313	0	3313	14,34	100,0
0,4	11,74	0,87	2355	5	2360	14,52	99,8
0,7	11,73	0,87	2168	61	2229	15,54	97,3
0,4	11,74	0,88	2873	0	2873	15,23	100,0
1,6	11,69	0,89	2069	55	2124	16,90	97,4
3,7	10,48	0,90	2167	53	2220	18,78	97,6
3,7	10,39	0,90	2332	40	2372	18,77	98,3
0,3	11,98	0,93	3378	0	3378	14,33	100,0
0,2	12,00	0,98	3379	3	3382	14,31	99,9
0,5	11,60	1,03	3482	18	3500	15,42	99,5
0,3	11,71	1,07	3423	12	3435	15,17	99,7
0,4	11,61	1,14	3038	5	3043	15,14	99,8
0,5	11,84	1,15	2060	23	2083	15,47	98,9
0,9	11,34	1,15	2232	73	2305	15,55	96,8
2,7	10,35	1,16	2022	67	2089	17,09	96,8
3,4	9,89	1,18	2045	6	2051	18,49	99,7
0,4	11,67	1,21	1626	49	1675	15,20	97,1
0,2	11,85	1,29	1259	21	1280	15,04	98,4
0,2	11,77	1,37	2178	0	2178	15,00	100,0
0,2	11,59	1,44	3073	0	3073	14,93	100,0
0,9	11,18	1,46	2169	14	2183	15,45	99,4
0,1	11,69	1,48	2630	18	2648	14,91	99,3
0,2	11,66	1,50	2333	12	2345	14,90	99,5
0,6	11,15	1,53	2348	38	2386	15,23	98,4

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NOx (ppm)		
0,2	11,51	1,59	2920	0	2920	14,85	100,0
0,2	11,57	1,60	2587	0	2587	14,86	100,0
0,2	11,39	1,61	2866	12	2878	14,88	99,6
0,2	11,51	1,64	2607	0	2607	14,89	100,0
0,6	11,23	1,65	1597	38	1635	15,11	97,7
1,3	10,76	1,71	1783	23	1806	14,96	98,7
0,3	11,19	1,87	2117	0	2117	14,81	100,0
1,6	9,94	1,90	1957	0	1957	21,41	100,0
0,3	11,28	1,95	2274	0	2274	14,69	100,0
0,3	11,16	2,00	1732	47	1779	14,67	97,4
0,3	11,27	2,01	2503	1	2504	14,66	100,0
0,3	11,16	2,07	2090	0	2090	13,86	100,0
2,6	10,98	2,08	1790	0	1790	11,41	100,0
0,3	11,06	2,14	1839	46	1885	14,61	97,6
0,4	11,17	2,17	1772	10	1782	13,88	99,4
2,7	9,84	2,19	945	62	1070	16,40	88,3
1,0	10,61	2,31	1299	27	1326	14,98	98,0
0,2	11,02	2,49	1886	1	1887	14,45	99,9
0,6	12,22	2,49	1886	8	1894	15,90	99,6
1,0	10,44	2,53	1361	0	1361	14,96	100,0
0,2	10,97	2,56	1802	0	1802	14,39	100,0
0,4	11,00	2,58	1094	7	1101	13,55	99,4
0,1	10,82	2,71	1066	0	1066	14,24	100,0
0,6	10,52	2,74	1005	9	1014	13,62	99,1
0,2	10,67	2,77	1586	0	1586	14,19	100,0
1,3	10,00	2,98	1023	17	1042	14,84	98,2
3,4	8,92	3,01	1087	33	1120	16,50	97,1
1,3	10,06	3,04	1356	9	1365	14,75	99,3
0,2	10,56	3,09	1339	0	1339	14,10	100,0
1,1	10,03	3,10	1233	0	1233	14,72	100,0
0,2	10,54	3,17	442	0	442	14,13	100,0

Concentration de gaz émis dans les gaz d'échappement						Rapport air carburant	Composition NO/NOx (%)
O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NOx (ppm)		
0,2	10,53	3,18	944	3	941	14,10	99,7
0,2	10,51	3,20	1410	0	1410	14,06	100,0
0,4	10,38	3,53	1889	17	1906	13,64	99,1
0,7	9,94	3,61	792	44	836	14,14	94,7
0,1	10,05	3,92	461	0	461	13,68	100,0
0,2	9,91	3,99	1428	11	1439	13,68	99,2
0,2	9,93	4,09	1244	11	1255	13,62	99,1
1,2	9,35	4,10	549	27	576	14,15	95,3
0,5	9,87	4,30	598	4	602	13,11	99,3
0,2	9,79	4,35	340	0	340	13,51	100,0
0,1	9,62	4,36	556	0	556	13,44	100,0
1,0	9,26	4,37	569	2	571	14,01	99,6
1,0	9,12	4,55	480	1	481	13,86	99,8
1,0	8,94	4,68	444	3	447	13,86	99,3
0,2	9,53	4,76	329	0	329	13,31	100,0
1,0	9,00	4,83	457	0	457	13,71	100,0
0,2	9,47	5,06	399	8	407	13,20	98,0
0,5	8,78	5,57	289	0	289	13,11	100,0
0,4	8,71	5,74	473	10	483	12,82	97,9
0,4	8,21	6,64	185	0	185	12,49	100,0
0,2	8,30	6,77	822	2	824	12,35	99,8
0,2	8,26	6,91	803	1	804	12,28	99,9
0,6	7,79	7,06	195	7	202	12,34	96,5
0,2	7,89	7,30	259	0	259	12,89	100,0
0,6	7,52	7,46	141	1	142	12,19	99,3
0,7	7,44	7,56	163	11	174	12,11	93,7
0,2	7,69	7,67	291	0	291	11,90	100,0
0,9	6,85	8,01	145	2	147	12,07	98,6
1,1	6,66	8,31	155	5	160	12,01	96,9