

INVENTAIRE 2002 DES EMISSIONS DE CARBONE SUIE (BC) ET DE CARBONE ORGANIQUE PRIMAIRE (OCp) PAR LES DEUX ROUES EN AFRIQUE DE L'OUEST

Sommaire

2.1. Introduction	40
2.2. Développement de l'inventaire 2002 des émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par les deux roues en Afrique de l'Ouest	42
2.2.1. Méthodologie.....	42
2.2.2. Résultats	48
2.3. Conclusion.....	53
2.4. Article.....	55

2.1. Introduction

Les processus démographiques, économiques, politiques ont transformé de manière progressive les sociétés d'Afrique subsaharienne. En moyenne, moins de 40% de la population actuelle en Afrique est urbaine, contrairement aux pays d'Amérique latine, d'Europe ou d'Amérique du Nord où cette proportion atteint 75% (UN, 2004). Cependant, ce sont les pays africains qui connaissent les taux de croissance démographique urbaine les plus élevés, de l'ordre de 5% par an et ce, malgré le ralentissement des migrations d'origine rurale et l'amorce d'une transition démographique. Par exemple en Afrique en 1950, on recensait une seule ville de plus d'un million d'habitants alors qu'en 2020, le continent africain devrait en compter près d'une centaine (OCDE, 2006). A ce rythme à l'échelle du monde, le cap des 7 milliards d'êtres humains sera atteint en 2012 et celui de 9 milliards serait dépassé en 2045. Cette même année 2045 : l'Afrique compterait 1,9 milliard habitants, l'Afrique subsaharienne, 1,7 milliard dont 0,6 milliard en Afrique de l'Ouest (OCDE, 2006). Ce rapide accroissement démographique a bouleversé profondément l'espace urbain avec une forte densification des centres villes et surtout, le développement étendu d'habitats « spontanés » en périphérie des grandes villes. Ces zones, dépourvues d'infrastructures et de service de base, sont le siège de désordres, avec des superficies de ces « villes » qui croissent sensiblement plus rapidement que la population (Le Bris, 1991). Cette croissance anarchique des villes en Afrique de l'Ouest et le long du Golfe de Guinée, est symptomatique de la pauvreté, laquelle tient à la fois de la crise économique dès la fin des années 70 et de l'adoption de politiques macro-économiques controversées (privatisation et réduction des dépenses publiques). La capacité d'action de l'Etat et des collectivités locales est de plus en plus limitée, eu égard aux besoins croissants des villes en services et infrastructures. Ainsi, la situation des transports urbains illustre ce manque de moyens qui touche tous les acteurs (privés et publics). En effet, le réseau routier est généralement peu développé et en mauvais état. Le trafic routier (parc automobile, fuels,...) est globalement de mauvaise qualité, entraînant une pollution importante de l'air. Les entreprises publiques de transport ont disparu dans la plupart des villes d'Afrique de l'Ouest, du fait de la conjonction des effets de politiques macro-économiques reposant sur le retrait de l'Etat, de l'absence d'une politique de transport cohérente et d'approximations dans la gestion de ces entreprises. Fortement incitée par les projets sectoriels de transport, la dérégulation s'est donc imposée, encourageant le développement d'une offre privée majoritairement artisanale. Celle-ci a concurrencé dans un premier temps les entreprises publiques rescapées, jusqu'à assurer la quasi-totalité de l'offre

actuelle de transport public. Sans véritable alternative et dans un contexte de forte demande de transport public, la diffusion rapide de l'offre artisanale s'appuie également sur une absence d'obligation de service public, tout en tirant avantage d'un cadre réglementaire opaque appliqué de manière très lâche par les autorités. De façon générale, dans ce système peu encadré, les opérateurs exploitant des véhicules de grande capacité sont de plus en plus concurrencés par des structures de plus petite taille, mais plus souples. C'est dans ce contexte que dans plusieurs villes d'Afrique de l'Ouest, une nouvelle forme de transport public artisanal est apparue et tend à s'imposer rapidement, celle des taxi-motos, avec différentes appellations selon les pays. Ainsi, il s'agit des zémidjans au Bénin, Oléyia au Togo, Okada au Nigeria, Kabu-Kabu au Niger et Bendskin au Cameroun (Diaz Olvera et al., 2007 ; Godard and Ngabmen, 2002). Ces taxis-motos sont une source très intense de polluants dans ces pays d'Afrique de l'Ouest. Ce phénomène des taxi-motos est apparu au Bénin à la fin des années 80 et a franchi les frontières politiques pour s'implanter dans les états voisins du Nigéria, du Togo et du Niger (Agoussou, 2003). La plupart de ces véhicules à deux roues sont des engins ayant un moteur à 2 temps qui utilisent un mélange d'essence et d'huile comme carburant. Ce type de véhicules à deux roues émettent de grandes quantités de polluants gazeux et de particules carbonées, du fait non seulement de l'essence de mauvaise qualité utilisée (Wane and al., 2001; Diallo, 2001), mais aussi de la combustion incomplète de ce mélange à cause, en partie, de la présence d'huile. Ce carburant, utilisé par la majorité des engins à deux roues, provient essentiellement de la contrebande d'essence à partir du Nigéria, comme on peut le voir sur la figure 2.1 qui met également en évidence les différents moyens pour l'acheminement de ces hydrocarbures frelatés. Ce commerce illicite d'hydrocarbures, est très lucratif et sert au ravitaillement de la majorité des véhicules en circulation (2 comme 4 roues).



Fig. 2.1 : Réseaux d'approvisionnement en carburants de contrebande en provenance du Nigéria, par motos, voitures et pirogues.

La pollution due à cette activité augmente au fil des années du fait de la hausse de la densité de population en zones urbaines et de la nécessité d'accroître les moyens de transports. La

question est de savoir si les émissions des engins à deux roues sont bien recensées dans les inventaires globaux, car ne faisant pas l'objet d'inventaires régionaux. Les inventaires globaux fournissent des données de consommations d'essence pour l'ensemble du trafic sans distinction du type de véhicule. Par ailleurs, un seul facteur d'émission sera choisi par type de fuel ne distinguant pas non plus le type de véhicule (Cooke et al., 1999; Junker and Liousse, 2008; Bond et al., 2004). Ainsi, l'aspect spécifique que je développe dans ce chapitre est le problème de la pollution atmosphérique particulaire (carbone suie et carbone organique primaire), causée non seulement par l'augmentation du trafic par les véhicules à deux roues, mais aussi par l'utilisation généralisée d'essence de mauvaise qualité. Dans ce chapitre, je présente le premier volet de mon travail de thèse qui porte sur l'élaboration d'un inventaire des aérosols carbonés (carbone suie et carbone organique primaire) issus des véhicules à deux roues dotés de moteurs à deux temps en Afrique de l'Ouest, pour l'année 2002. Dans un premier temps, j'expose en détail la méthode utilisée pour la création de cet inventaire des deux roues, puis je rappelle les principaux résultats de cette étude. La publication de ces travaux est présentée en section 2.4.

2.2. Développement de l'inventaire 2002 des émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par les deux roues en Afrique de l'Ouest

2.2.1. Méthodologie

Ce travail de développement des inventaires de carbone suie et de carbone organique primaire des deux roues pour l'année 2002 a porté sur 16 pays, dont 14 en Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée Bissau, Libéria, Mali, Niger, Nigeria, Sénégal, Sierra Léone et Togo) et 2 en Afrique Centrale (Cameroun et Tchad). Pour des raisons de simplification, nous avons utilisé le terme « Afrique de l'Ouest » pour caractériser l'ensemble de ces 16 pays. Pour le calcul des émissions de carbone suie et de carbone organique primaire des véhicules deux roues, nous nous sommes basés sur une approche de type « bottom-up ». Cette approche consiste à calculer les émissions pays par pays, à partir des données de consommations du fuel considéré et des facteurs d'émissions associés. Pour rappel, les véhicules à deux roues et à deux temps utilisent un mélange d'essence et d'huile comme carburant. La formulation du calcul des émissions est la suivante :

$$E_{i,j} = C_i \times EF_{i,j}$$

où $E_{i,j}$ sont les émissions totales (en g), C_i la consommation de carburant (essence et huile mélangés en kg) et $EF_{i,j}$, les facteurs d'émissions (en g/kg) pour le pays i et l'aérosol carboné j (BC ou OCp).

Il existe de nombreuses incertitudes sur la détermination des données de consommation C_i et des facteurs d'émissions $EF_{i,j}$. Afin de prendre en compte ces incertitudes, nous avons défini deux cas extrêmes (un cas minimum et un cas maximum) avec différentes hypothèses qui sont évoquées par la suite.

2.2.1.1. Détermination de la consommation

La consommation annuelle de carburant par les deux roues dans chaque pays a été calculée en se basant sur le nombre de deux roues (distinction faite entre les taxi-motos et les autres véhicules à 2 roues compte tenu de leurs émissions différentes, à priori), leur consommation journalière, le nombre de jours de circulation de tels engins pendant une année et la masse volumique du carburant utilisé, selon la relation :

$$C = NV \times c \times NJ \times \rho$$

où C est la consommation annuelle des véhicules à deux roues (en kg/an) dans chaque pays, NV le nombre de véhicules à deux roues en circulation, c la consommation journalière d'un véhicule à deux roues (en m^3 /jour/véhicule), NJ le nombre de jours de circulation des véhicules à deux roues en une année (en jour/an) et ρ la masse volumique du mélange essence-huile (en kg/m^3). J'examine ci-après, ces différents facteurs qui seront différenciés suivant les scénarios minimum et maximum.

a) Nombre de véhicules deux roues

En Afrique, les véhicules à deux roues sont utilisés comme moyen de transport en commun (taxi-motos) et/ou à usage privé (figure 2.2). Les taxi-motos ont une consommation beaucoup plus importante, à priori, que celle des engins à deux roues à usage privé. Ainsi, dans ce travail, une distinction a été établie entre les deux roues à usage privé et à usage public (taxi-motos). Six pays sont concernés par cette distinction, du fait de l'implantation et de la généralisation du phénomène des taxis-motos. Il s'agit du Bénin, du Cameroun, du Niger, du Nigeria, du Tchad et du Togo.



Fig. 2.2 : Véhicules deux roues utilisés dans le transport public (taxi-motos), pour les personnes et les biens à Cotonou (Bénin).

Cependant, la différenciation entre le nombre des engins à deux roues qui ont une utilisation publique ou privée peut constituer un handicap du fait des risques importants de double comptage. C'est une situation délicate mais assez incontournable, d'autant plus que les études sur les deux roues sont rares en Afrique. De plus, lorsque des données sur le nombre de deux roues et leur possible utilisation en tant que taxi-motos ou à usage strictement privatif sont disponibles, elles sont disparates et sujettes à caution (Diaz Olvera et al., 2007; Agossou, 2004; Godard and Ngabmen, 2002), du fait notamment d'informations peu claires sur la méthodologie de comptage de ces engins. Aussi, nous avons élaboré deux scénarios (bas et haut) pour lesquels nous avons adopté les ratios suivants : 40%/60% et 50%/50% (Worou, 2005) pour le pourcentage de véhicules à deux roues d'usage privé/public. Ainsi, les ratios ci-dessus seront utilisés pour qu'on obtienne le plus bas (resp. le plus) nombre de taxi-motos dans le scénario bas (resp. scénario haut). Par exemple, si *le nombre total des engins à deux roues était connu* (aucune distinction entre deux roues privé/public), on utilise le ratio 40%/60% dans le scénario bas et celui de 50%/50% dans le scénario haut. Au contraire, si *le nombre des taxi-motos est connu*, le ratio de 50%/50% est utilisé dans le scénario bas afin de minimiser le total du nombre des véhicules à deux roues et celui de 40%/60% le sera pour scénario haut. Cette différenciation a permis effectivement d'obtenir des valeurs minimales et maximales du nombre de véhicules à deux roues en circulation conformément à nos scénarios bas et haut. Par ailleurs, pour le nombre de véhicules à deux roues, les principales sources de données sont les suivantes : IRF (2009) ; Trans-Africa (2009) ; Kumar and Barrett (2008) ; Diaz Olvera et al. (2007) ; Institut National de la Statistique (2006) ; Boko et al. (2003) ; Godard and Ngabmen (2002) ; World Bank (2002), ainsi que le site de Surveillance de la Santé et des Populations (DHS, 2006). Comme indiqué plus haut, l'ensemble de ces données

fournit des estimations très différentes. Au vu des données, les plus fortes valeurs ont été fournies par DHS (2006). Nous avons ainsi utilisé le ratio 50%/50% pour maximiser le nombre des taxis-motos et de ce fait, la consommation totale des engins à deux roues. Par conséquent, pour le scénario bas, nous nous sommes basés sur les données issues des autres publications citées.

- Dans le scénario bas, les publications citées plus haut ont permis d'obtenir le nombre des véhicules à deux roues dans huit sur les 16 pays de notre étude. Il s'agit des pays suivants : Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Mali, Niger, Nigeria, Tchad et Togo. Dans les huit autres pays où nous ne disposions d'aucune donnée, le nombre de deux roues a été calculé. Nous avons ainsi utilisé le rapport entre les nombres des engins à deux roues et ceux des voitures des 8 pays où nous disposions de données sur les deux roues. Pour être cohérent avec le terme de « scénario bas », c'est le rapport minimum (i.e. celui du Niger (0,1)) qui a été retenu pour calculer le nombre de deux roues dans ces huit pays restants pour lesquels nous ne disposions que du nombre des véhicules à 4 roues (tableau 1 de l'article, ci-joint).
- Dans le scénario haut, le nombre des véhicules à deux roues de 14 pays sur les 16 a été fourni par DHS (2006) (tableau 2 de cet article). C'est en Gambie et en Guinée Bissau que nous ne connaissions pas le nombre des 2 roues en circulation. Ainsi, la méthode utilisée lorsque les données étaient absentes dans le scénario bas a été appliquée à ces deux pays. Aussi, pour être cohérent avec le scénario haut, c'est le maximum du rapport entre les nombres des engins à deux roues du scénario haut et ceux des voitures des 14 autres pays qui a été utilisé : il s'agit de la valeur 8,3 obtenu pour le Burkina Faso.

Le tableau 2.1 résume les nombres des véhicules à deux roues qui ont été utilisés dans les scénarios minimum et maximum en 2002 Dans les 16 pays d'Afrique de l'Ouest.

Tableau 2.1 : Récapitulatif du nombre des véhicules à deux roues dans les 16 pays selon les scénarios minimum et maximum.

	Scénario minimum			Scénario maximum		
	Motos à usage public (moto-taxis)	Motos à usage privé	Nombre total de véhicules à deux roues en circulation	Motos à usage public (moto-taxis)	Motos à usage privé	Nombre total de véhicules à deux roues en circulation
Bénin	160000	160000	320000	253220	253220	506440
Burkina Faso	0	300000	300000	0	471490	471490
Cameroun	21165	31747	52912	129902	129902	259804
Tchad	12800	19200	32000	36307	36307	72614
Gambie	0	1171	1171	0	97202	97202
Ghana	0	27641	27641	0	107494	107494
Guinée	0	5709	5709	0	122740	122740
Guinée Bissau	0	199	199	0	16476	16476
Côte d'Ivoire	0	13474	13474	0	387790	387790
Libéria	0	1284	1284	0	10394	10394
Mali	0	300000	300000	0	552666	552666
Niger	2500	2500	5000	54810	54810	109620
Nigéria	523600	785400	1309000	1983174	1983174	3966348
Sénégal	0	8754	8754	0	70750	70750
Sierra Léone	0	1539	1539	0	30782	30782
Togo	45000	45000	90000	53475	53475	106950

b) Nombre de jours de circulation hebdomadaire des véhicules à deux roues

Les deux roues ont une utilisation quotidienne, soit comme moyen de transport en commun, soit comme moyen de déplacement personnel. A partir de ce constat, le nombre de jours par semaine d'utilisation des deux roues a été fixé à 5 jours dans le scénario bas et à 7 jours dans le scénario haut. Ces chiffres correspondent, pour le premier (5 jours) au nombre de jours ouvrés dans la semaine et pour le second, au nombre de jours dans une semaine. En outre, ces chiffres sont résumés dans le tableau 2.2 qui présente les paramètres utilisés pour évaluer la consommation des véhicules à 2 roues à 2 temps pour les deux types de scénarios.

c) Consommation journalière des véhicules à deux roues

Faute de données concrètes et fiables publiées quant à la consommation journalière des deux roues (secteurs privés et publics) en Afrique de l'Ouest et plus généralement en Afrique, nous avons adopté pour référence les données d'une étude de l'ADEME (2005) en France. En bref, cela revient à adopter pour l'Afrique, une consommation de 0,5 litre/jour (resp. 1 litre/jour) pour les deux roues d'usage privatif dans le scénario bas (resp. haut). Par contre, pour les taxis-motos (usage public en Afrique), une enquête menée par un correspondant local auprès d'une dizaine de chauffeurs de taxis-motos à Cotonou (Bénin) a fourni des données de consommations comprises entre 2 et 4 litres pour la consommation journalière de ces engins.

Le chiffre maximum de 4 litres/jour, retenu pour le scénario haut, a également été validé par Kaffo et al. (2007). Les données de consommations journalières par les deux roues dans les deux scénarios (minimum et maximum) ont été présentées dans le tableau 2.2.

d) Densité du carburant pour les véhicules à deux roues

La plupart des deux roues en circulation en Afrique de l'Ouest ont des moteurs à deux temps qui fonctionnent avec un mélange carburant/huile (Worou, 2005). A partir des données des constructeurs d'engins à deux roues, la proportion d'huile peut varier entre 2 et 4%. Des mesures pratiquées sur des motos à Cotonou (Bénin) ont montré que ces proportions atteignaient 8% et même parfois plus (Boko et al., 2003; Diallo, 2001; Jüttner et al., 1995). Les proportions de mélange carburant/huile de 2% et de 8% ont donc été retenues et appliquées à l'ensemble des 16 pays de notre étude pour les scénarios bas et haut respectivement. Ainsi, la densité résultante du mélange carburant/huile utilisée ici est une densité moyenne entre les carburants SP95 et SP98, et les huiles utilisées pour les moteurs deux temps ont permis d'avoir les valeurs de $750,1 \text{ kg/m}^3$ pour le scénario bas et de $757,8 \text{ kg/m}^3$ pour le scénario haut (cf. tableau 2.2).

2.2.1.2. Choix des facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions, on l'a vu, dépendent fortement de la technologie utilisée, du fuel et de l'espèce émise considérés (Junker and Liousse, 2008; Bond et al., 2004). Les facteurs d'émissions du carbone suie et du carbone organique primaire du mélange carburant/huile provenant des véhicules à deux roues et à deux temps ont été mesurés in situ lors de la campagne AMMA de Mai 2005 à Cotonou (Bénin) et POLCA en Décembre 2009 à Dakar (Sénégal). La figure 2.3 montre une mesure de facteur d'émissions à Dakar (Sénégal) en 2009.



Fig. 2.3 : Mesure des facteurs d'émissions de véhicules à deux roues à Dakar (Sénégal) en 2009.

Les valeurs obtenues sont de 2,31 g/kg pour le carbone suie contre 30,56 g/kg pour le carbone organique primaire (Guinot et al., 2010). Ces valeurs, en accord avec d'autres valeurs de la littérature (Volckens et al., 2008 ; Nuti, 1998), ont été retenues dans le scénario haut et appliquées à l'ensemble des 16 pays de notre étude. Ces fortes valeurs de facteurs d'émissions sont imputables à la présence d'huile dans le mélange essence/huile, laquelle génère de grandes quantités d'imbrûlés (Alander et al., 2005). Par contre pour le scénario bas, nous avons choisi d'utiliser les valeurs de la littérature des pays développés : Guillaume and Liousse (2009) et Bond et al. (2004). Les deux premières sources nous ont fourni les valeurs de 0,28 g/kg pour le carbone suie et 7,36 g/kg pour carbone organique primaire tandis que Bond et al. (2004) nous donnaient 0,71 g/kg pour le carbone suie et 16,25 g/kg pour le carbone organique primaire. Pour notre scénario bas, nous avons donc choisi les plus petites valeurs de facteurs d'émissions (i.e. 0,28 g/kg pour le carbone suie et 7,36 g/kg pour carbone organique primaire).

Tableau 2.2 : Résumé des autres caractéristiques dans les scénarios minimum et maximum.

	Scénario minimum		Scénario maximum	
	Motos à usage privé	Motos à usage public (moto-taxis)	Motos à usage privé	Motos à usage public (moto-taxis)
Nombre de jours de circulation des deux roues par semaine	5		7	
Consommation journalière (en litre))	0,5	2,0	1,0	4,0
Densité du carburant (en kg/m ³)	2% d'huile: $\rho = 750,1$		8% d'huile: $\rho = 757,8$	
Facteurs d'émission (en g/kg)	BC = 0,28 OCp = 7,36		BC = 2,31 OCp = 30,56	

2.2.2. Résultats

Dans cette section, sont présentées les principales conclusions de l'étude, les résultats détaillés figurant dans la publication, ci-jointe.

2.2.2.1. Consommations

Les consommations des deux roues varient entre 0,003 Tg au Libéria et 2,7 Tg au Nigéria dans le scénario haut, contre 20 tonnes en Guinée Bissau et 0,3 Tg au Nigéria dans le scénario bas. Pour les 16 pays, le total de la consommation est de 0,5 Tg dans le scénario bas et de 4,0

Tg dans le scénario haut. Ces données ont été comparées à celles de l'essence (MO pour « motor gasoline ») du trafic routier fourni par les deux organismes internationaux, l'ONU pour l'année 2002 et l'IEA pour l'année 2000. Le tableau 2.3 présente les proportions de la consommation de carburant des véhicules à deux roues dans les scénarios minimum et maximum comparativement aux données de l'IEA pour 2000 et de l'ONU pour 2002.

Tableau 2.3 : Proportion de la consommation de fuels des véhicules à deux roues dans les scénarios minimum et maximum comparativement aux données de l'IEA pour 2000 et de l'ONU pour 2002.

	Scénario minimum.	Scénario maximum	Scénario minimum.	Scénario maximum
	IEA		ONU	
Consommation (%)	5	45	6	47

Cette comparaison montre que la proportion de la consommation des deux roues sur le trafic total dans les 16 pays de notre étude est la même au regard des bases de données de l'IEA en 2000 et de l'ONU en 2002 et ce, quelque soit les scénarios. Pays par pays, on relève que les consommations de fuels par les deux roues dans le scénario haut sont supérieures à celles de l'ensemble du trafic routier données par l'ONU pour 5 pays : il s'agit du Bénin, du Niger, du Burkina Faso, du Mali et du Tchad, respectivement pour 144%, 149%, 169%, 264% et 628%. Le trafic de carburant de contrebande en provenance du 1^{er} pays exportateur de pétrole en Afrique (Nigéria) pourrait tout à fait expliquer ces grandes différences dans les pays limitrophes comme au Bénin et au Niger ; cette essence de contrebande étant vendue ostensiblement en bord de routes, comme illustré sur la figure 2.4. Par contre, au Burkina Faso, au Mali et au Tchad, où à priori il n'y aurait pas d'essence de contrebande, ce sont probablement les données ONU qui sous-estiment la consommation régulière et officielle de carburant par de tels engins.



Fig. 2.4 : Stand de vente d'essence pour véhicules deux temps aux abords d'une route à Cotonou (Bénin)

2.2.2.2. Emissions

a) Carbone suie (BC)

Les émissions de carbone suie dans le scénario haut s'établissent entre 6,7 tonnes au Libéria et 6329 tonnes au Nigeria, sur un total de 9206 tonnes dans l'ensemble des 16 pays. Par contre, dans la configuration basse, ces émissions varient entre 0,01 tonne en Guinée Bissau et 80 tonnes au Nigéria, sur un total de 132 tonnes. Les émissions de carbone suie dans notre étude ont été comparées à celles de l'ensemble du trafic routier dans les deux inventaires globaux de Junker and Liousse (2008) que j'ai adaptées aux données de consommations de l'ONU de 2002 et de Bond et al. (2004), selon la formule :

proportion d'émissions (%) = (émissions des deux roues dans notre étude (minimum ou maximum)) / émissions de tout le trafic routier issues de Junker and Liousse calculées pour 2002) * 100

Les émissions en carbone suie par les deux roues de notre étude représentent 10% (resp. 728%) des émissions de Junker and Liousse (2008) pour 2002 dans le scénario bas (resp. haut). Le constat est sensiblement le même avec Bond et al. (2004), avec des proportions de 12% (resp. 835%) dans le scénario bas (resp. scénario haut). Une analyse pays par pays montre que dans le scénario haut, les émissions de carbone suie par les deux roues des 16 pays sont supérieures à celles du trafic routier de Junker and Liousse (2008) mises à jour pour ces mêmes pays pour l'année 2002, sauf au Ghana où la proportion est de 84% (cf. figure 2.5). Ceci reflète la différence entre les facteurs d'émissions retenus. Ainsi, le facteur d'émissions de carbone suie dans notre étude est de 15 fois supérieur à celui de Junker and Liousse (2008) dans le scénario haut, à l'origine d'importantes différences entre les émissions dans ces deux études.

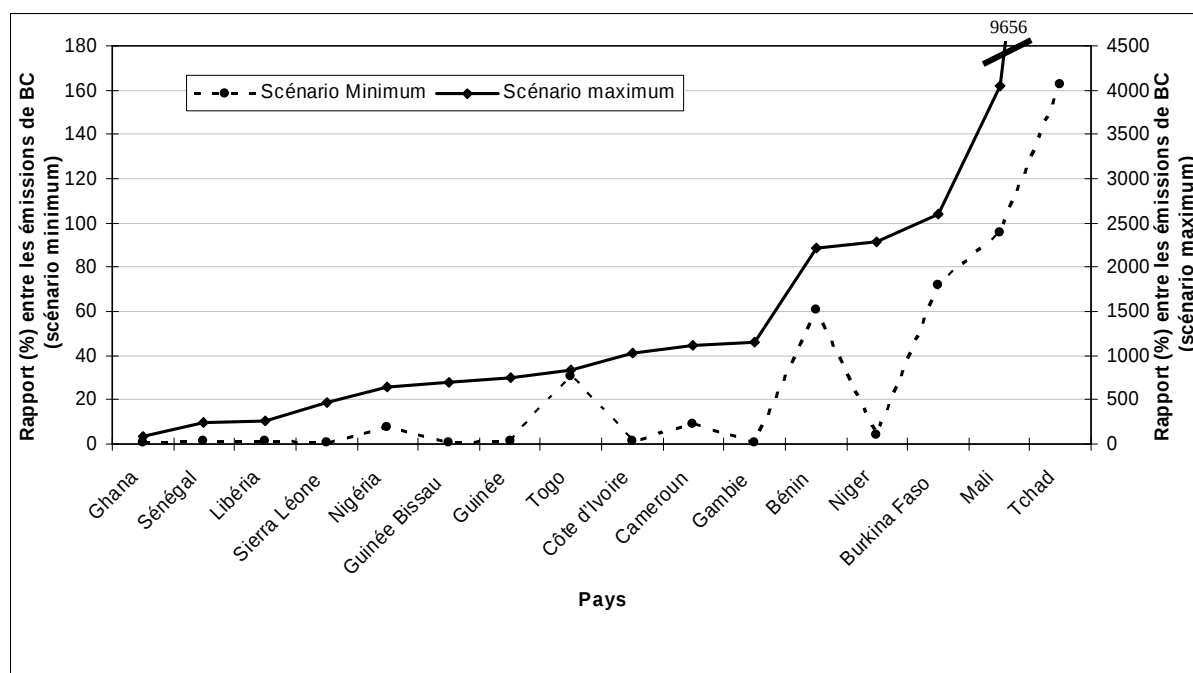


Fig. 2.5 : Rapport (en %) des émissions de carbone suie entre mon inventaire (deux roues) et l'inventaire de Junker and Liousse (2008) (tout le trafic routier) dans les scénarios minimum et maximum en 2002

b) Carbone organique primaire (OCp)

Les émissions de carbone organique primaire dans le scénario haut sont comprises entre 88 tonnes au Libéria et 83801 tonnes au Nigeria, dans le scénario haut. Par contre, dans le scénario bas, les valeurs d'émissions de carbone organique primaire varient entre 0,1 tonne en Guinée Bissau et 2098 tonnes au Nigéria. Les émissions totales de carbone organique primaire par les deux roues dans les 16 pays de notre étude s'élèvent à 3470 tonnes (scénario bas) contre 121885 tonnes (scénario haut). Comme pour le carbone suie, les émissions de carbone organique primaire dans notre étude ont été comparées à celles du trafic routier des deux inventaires globaux (Junker and Liousse (2008) mis à jour pour 2002 et Bond et al. (2004)). Ces comparaisons montrent que les émissions par les deux roues dans notre étude représentent 56% (resp. 1980%) des émissions de Junker and Liousse (2008) pour 2002 dans le scénario bas (resp. haut). Le constat est différent avec Bond et al. (2004), où on observe des proportions de 21% (resp. 751%) dans le scénario bas (resp. scénario haut). La comparaison avec Bond et al (2004) est meilleure que celle avec Junker and Liousse (2008) pour 2002. Cela se justifie par le fait que les facteurs d'émission du carbone organique primaire de Bond et al (2004) pour le trafic routier sont supérieurs à ceux de Junker and Liousse (2008). Par ailleurs, la figure 2.6 présente le rapport des émissions de carbone organique primaire entre

mon inventaire des deux roues et l'inventaire de Junker and Liousse (2008) relatif à tout le trafic routier dans les scénarios minimum et maximum en 2002. Ce zoom pays par pays montre que dans le scénario bas, 5 pays (Bénin, Burkina Faso, Mali, Tchad et Togo) ont des émissions en carbone organique primaire par les deux roues supérieures à celles de tout le trafic dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008). Le constat est encore plus impressionnant dans le scénario haut où tous les pays sans exception présentent des émissions par les deux roues supérieures à celles de tout le trafic dans Junker and Liousse (2008) pour 2002 (figure 2.6). Les proportions sont importantes et dépassent 200% dans tous les pays, avec par exemple, des émissions en carbone organique primaire par les 2 roues 11 fois plus importantes que celles du trafic routier donné par l'inventaire global de Junker and Liousse (2008) au Mali. Ce sont les différences entre facteurs d'émissions qui sont les causes de tels écarts. Ainsi, les facteurs d'émissions dans notre étude sont 10 (resp. 42) fois supérieurs à ceux de Junker and Liousse dans le scénario bas (resp. haut).

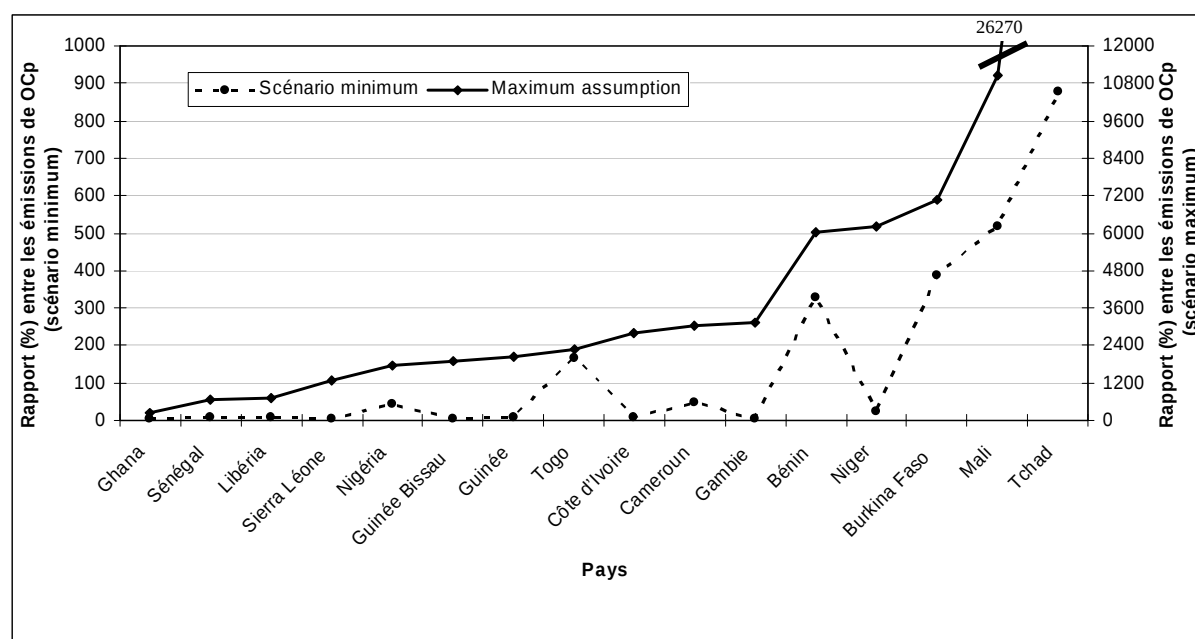


Fig. 2.6 : Rapport (en %) des émissions de carbone organique primaire entre mon inventaire (deux roues) et l'inventaire de Junker and Liousse (2008) (tout le trafic routier) dans les scénarios minimum et maximum en 2002

Les résultats précédents, qu'il s'agisse des consommations ou des émissions, ont mis l'accent sur la part prépondérante des émissions par les deux roues relativement à l'ensemble du trafic dans l'inventaire global de Junker and Liousse (2008) mis à jour pour 2002 et dans celui de Bond et al. (2004) pour 2000, particulièrement pour le carbone organique primaire. Nous

avons par la suite évalué ce que seraient les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire dans l'inventaire global de Junker and Liousse (2008), dans le cas où il n'inclurait pas les émissions dues aux véhicules à deux roues. Ainsi, de nouvelles émissions en carbone suie et en carbone organique primaire pour le trafic en Afrique de l'Ouest ont été recalculées comme si les données de l'inventaire de Junker and Liousse (2008) ne tenaient pas compte des émissions par les engins à deux roues. Nous avons donc sommé les données de l'inventaire de Junker and Liousse (2008) pour 2002 à celles de notre inventaire. Ces « nouvelles » émissions ainsi que celles de Junker and Liousse (2008) ont été spatialisées sur la base des densités de population pour l'année 2005 (CIESIN, 2005), à une résolution plus fine que celle qui était utilisée auparavant ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$ au lieu de $1^\circ \times 1^\circ$). Ces nouvelles émissions (figure 7 de l'article ci-joint), mettent en évidence la présence de « hotspots » dans les pays le long du Golfe de Guinée et l'importance du Nigeria quant au bilan des émissions d'aérosols carbonés en Afrique de l'Ouest.

2.3. Conclusion

Mon étude a permis de mettre en évidence et de sensiblement mieux caractériser (compte tenu des très nombreuses incertitudes), les émissions des particules de combustion (carbone suie et carbone organique primaire) par les deux roues en Afrique de l'Ouest. Ainsi, ce travail s'appuie sur la prise en compte du nombre de deux roues et leur consommation annuelle dans les différents pays de la région. Rappelons que les données sont très rares, partielles et assez peu fiables sur le sujet, et quand bien même elles existent, des différences très sensibles sont à relever selon la source (Diaz Olvera et al., 2007; Agossou, 2004; Godard and Ngabmen, 2002) : d'où un travail d'examen critique très complexe. Aussi, pour agir au mieux, deux scénarios ont été élaborés pour tenir compte des types de données et de la gamme d'incertitudes qui les entachent. Par ailleurs, de nouveaux facteurs d'émissions réalistes mesurés lors de la campagne AMMA en 2005 à Cotonou (Bénin) pour les deux roues deux temps (taxis-motos) ont été introduits dans notre analyse. Les résultats ont ainsi mis en évidence des données de consommations importantes en carburant pour les deux roues, principalement dans les pays où sévit l'essence de contrebande (e.g. Bénin et Togo), mais également dans les pays où les deux roues sont majoritaires (Burkina Faso et Mali). En outre, l'importance du choix de facteurs d'émission spécifiques s'est révélée primordiale pour l'évaluation des émissions de carbone suie et de carbone organique primaire. Aussi, les grandes différences avec les inventaires globaux (Junker and Liousse, 2008 ; Bond et al.,

2004), notamment celles sur les émissions de carbone organique primaire montrent qu'il faut absolument, non seulement tenir compte des deux roues en tant que spécificité régionale forte, mais aussi, plus généralement réviser les inventaires globaux incorporant des données d'émissions du trafic routier. Soulignons que dans la méthodologie que nous proposons, nous avons avancé deux hypothèses (minimum et maximum) : les paramètres du scénario maximum semblent plus proches de la réalité quotidienne des « conditions de vie » en Afrique de l'Ouest. En effet, les paramètres utilisés dans le scénario haut, tels que les facteurs d'émissions des taxi-motos, les proportions du mélange essence-huile, le nombre approximatif des deux roues en circulation sont entre autres des paramètres qui ont été mesurés en Afrique de l'Ouest. A contrario, les paramètres utilisés dans le scénario minimum, typiques des « conditions de vie » de l'Europe, seraient pertinents quant à une réduction des émissions dues aux engins à deux roues en Afrique de l'Ouest. Ce travail pourrait ainsi fournir un premier élément d'expertise pour les politiques urbaines et environnementales des pays en Afrique de l'Ouest vu l'importance des émissions des moteurs à deux temps comparativement à ceux à quatre temps. Les moteurs à quatre temps contrairement aux deux temps n'utilisent pas de mélange essence huile donc émettent moins de polluant et d'aérosols de combustion. Dans l'étude de Leong et al. (2002), ces auteurs ont montré que les émissions de benzène des moteurs 2 temps sont 5 fois plus importantes que celles des moteurs 4 temps. Czerwinski et al. (2002) ont montré également que généralement les véhicules 2 temps émettent de plus grandes quantités de nanoparticules que les moteurs 4 temps et que les PM des gaz d'échappement de ces engins sont hautement mutagènes (Zhou and Shun-Hua, 1998). Enfin, Ouedraogo (2005), Findings (2002), Diallo (2001), Chen et al. (2003), Tsai et al. (2000) et Leong et al. (2002) ont montré que les véhicules à 4 temps étaient moins polluants que les véhicules à 2 temps en aérosols carbonés, CO et hydrocarbures. En dépit de la contribution des véhicules 2 temps aux émissions de PM et à leurs effets sur la santé, il existe un manque flagrant d'informations sur les particules issues des pots d'échappement des véhicules 2 temps, particulièrement quant à leur structure, leur composition et leur morphologie. Néanmoins, les autorités Béninoises, conscientes des problèmes environnementaux et de santé publique ainsi créés (EPA, 2005 ; McGranahan and Murray, 2003), ont pour projet le remplacement de 10% des véhicules deux temps par des véhicules à 4 temps grâce à un financement de l'Union Européenne.

Notons que les deux roues ne sont pas les seuls engins à mettre en cause quant aux fortes émissions du trafic routier car d'autres types de véhicules à moteur (e.g. voitures, camions) s'approvisionnent aussi avec de l'essence frelatée (figure 2.7). Par ailleurs, une contribution

intense aux rejets de particules (PM) en zones urbaines est également attribuée aux véhicules diesel (Wahlin et al., 2001), les particules fines et ultrafines étant largement générées par combustion dans les moteurs diesel (Vallius et al., 2000).



Fig. 2.7 : Approvisionnement en carburant d'un automobiliste au Bénin.

A cela, il convient de tenir compte des véhicules très âgés parfois en circulation dans ces pays. En effet, l'âge moyen des véhicules en Afrique est de 12 ans contre 6 en France (ADEME, 2005). Par la suite, ce travail sera donc étendu aux véhicules autres que les deux roues et plus généralement aux autres sources de combustions (combustibles fossiles et biofuels) pour montrer toute l'importance du trafic et des autres secteurs d'activités (e.g. industries, domestiques) sur les émissions urbaines (chapitre 3).

2.4. Article

Ces principaux résultats sont repris et détaillés dans l'article suivant :

ASSAMOI, E-M. and LIOUSSE, C. (2010): A new inventory for two-wheel vehicle emissions in West Africa for 2002. *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp 3985-3996, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.048.

A new inventory for two-wheel vehicle emissions in West Africa for 2002

Eric-Michel Assamoi^{1,2} and Catherine Liousse^{1,2}

¹ Université de Toulouse ; UPS ; LA (Laboratoire d'Aérodologie) ; Toulouse, FRANCE

² CNRS ; LA (Laboratoire d'Aérodologie) ; Toulouse, FRANCE

14, Avenue Edouard Belin

31400 Toulouse, FRANCE

Abstract

Rather surprisingly, urban atmospheric particulate levels in West Africa compare with measured concentrations in Europe and Asia megacities (Liousse et al., 2009). This pollution mainly derives from road traffic emissions with, in some capitals (e.g. Cotonou), the strong contribution of two-wheel vehicles. Two key questions arise: are presently available emission inventories (e.g. Junker and Liousse, 2008; Bond et al., 2004) able to account for these emissions? And, if not, how can we remedy this? The aim of this paper is to develop a methodology to estimate emissions produced by two-wheel vehicles in West Africa for 2002 in a context where reliable information is hardly available. Fuel consumption ratios between two-wheel engines (in this work) and all vehicles issued from UN database (<http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3aMO%3btrID%3a1221>) are as high as 169%, 264% and 628%, for Burkina Faso, Mali and Chad respectively, indicating that this global database does not properly account for regional specificities. Moreover, emission factors for black carbon (BC) and primary organic carbon (OCp) have been measured for two-stroke engines in Benin (Guinot et al., 2010), giving significantly higher values than in Europe. This is particularly true for OCp, and consequently the calculated emissions for two-stroke engines are also significantly larger than total road traffic previously estimated in global inventories (Junker and Liousse (2008) with United Nations database for 2002; Bond et al., 2004). The ensuing discussion illustrates the importance of two-stroke engines in the West Africa transport sector and the strong need for inventory updating.

1. Introduction

Air pollution is a major issue emerging in Africa, though until recently, it has been largely underestimated or even not considered in global studies (Diaz Olvera et al., 2007; McGranahan and Murray, 2003; Findings, 2002; Mage, 1996). In fact, it is a critical issue affecting large, rapidly growing African cities (Cadle et al., 2001; Tsai et al., 2000; Ikeda et al., 1998). Rapid urban growth has a large impact on air quality due to increased traffic emissions. This is especially true in developing countries, mainly due to the high proportions of poorly-maintained engines, large numbers of two-stroke vehicles and poor fuel quality (Gwilliam, 2003; Baumbach et al., 1995). This is particularly the case in West and North Africa where the transport sector is a major contributing factor to urban pollution (Yang et al., 2005; Chen et al., 2003; Findings, 2002; Leong et al., 2002). Moreover, the transport sector in West Africa is largely unorganized (Godard and Ngabmen, 2002). Firstly, road networks are critically underdeveloped and generally in bad condition, with asphalted roads only in downtown areas. Secondly, as a result of strong policy deregulation, public transport companies have progressively collapsed in most towns, mainly to the exclusive benefit of private enterprises. In this context, two-stroke motorbikes have been for the purposes of small-scale public transport in this region. This phenomenon first appeared in the late 1980's in Benin, and spread

thereafter to neighbouring countries, Niger, Nigeria, Cameroon, Chad and Togo (Trans-Africa, 2009; Sahabana, 2006; Agossou, 2003) and is now of widespread use throughout West Africa. Generally these motorcycle-taxis have two-stroke engines (Ouedraogo, 2005; BOAD, 2002; Findings, 2002; Diallo, 2001) and are heavily polluting (BOAD, 2002; Findings, 2002). They are used for transporting both people and goods and are known under different names: zemidjan in Benin, oleyia in Togo, bendskin in Cameroon, okada in Nigeria, kabu-kabu in Niger and boda-boda in Uganda (Diaz Olvera et al., 2007; Godard and Ngabmen, 2002). Motorcycle-taxi use is also strongly favoured by massive oil smuggling out of Nigeria, which renders the price of petrol much cheaper than that officially sold at gas stations. The Benin government has estimated that smuggled oil amounts to about 75% of national hydrocarbon consumption (Chantereau and Kpoledji, 2006). In the year 2005, the Nigerian National Petroleum Corporation (NNPC) estimated losses at a level of 661,810 tons compared to a loss of 396,880 tons in 2004, thus annual increases in estimated losses of up to 264,920 tons (67%). The large losses are attributed to the high incidence of pipeline vandalism across Nigeria as revealed by 2005 statistics (NNPC, 2005).

In addition, the number of two-wheel vehicles in West Africa is growing very rapidly, as illustrated by the recent construction of a motorcycle assembly factory in Burkina Faso. Also, motorcycles ("Jakartas") from Asia (mainly from Indonesia) have recently begun to be imported into the West African market. These motorbikes are very popular, since they cost approximately half the price of European ones (Godard and Ngabmen, 2002). Unfortunately statistics on the numbers of two-wheel vehicles are few and poorly documented. These factors explain why motorcycle-taxi emissions are only poorly, or not at all considered in official global or regional inventories. Clearly, however, there is a strong need to consider their emissions in such inventories because their widespread use in the region. The lack of official data though, is a considerable limiting factor and various assumptions need to be made when producing emissions estimates. The objective of this paper is to develop detailed inventories of particulate black carbon (BC) and primary organic carbon (OCp) emitted by two-wheel vehicles in West Africa for the year 2002, with a special focus on motorcycle-taxis. The methodology is described in part 2, with the results obtained in part 3. These new ad hoc emission inventories for West Africa are then compared to previous inventories (Junker and Lioussé (2008) methodology used with United Nations data for the year 2002; and Bond et al., (2004)) for this region.

2. Methodology

Fourteen West African countries (Benin, Burkina Faso, Gambia, Ghana, Guinea, Guinea Bissau, Ivory Coast, Liberia, Mali, Niger, Nigeria, Senegal, Sierra Leone and Togo) and two Central African countries (Cameroon and Chad) are considered. For simplification, we classified these sixteen countries under the same label "West Africa".

BC and OCp emissions from two-wheel vehicles are calculated using a bottom-up procedure. Let us note that two-wheel vehicles are all considered to be two-stroke engines (Ouedraogo, 2005; BOAD, 2002; Findings, 2002; Diallo, 2001) and that these vehicles use a mixture of motor gasoline and oil. Emissions are estimated using the following relationship :

$$E_{i,j} = C_i \times EF_{i,j}$$

where $E_{i,j}$ is the total emissions (in g), with C_i the total fuel consumption (in kg), and $EF_{i,j}$ emission factors (in g/kg), for country i and aerosol species j (BC or OCp), respectively.

There are many uncertainties in terms of the determination of the C_i and $EF_{i,j}$ parameters. In order to provide an envelope covering the range of this uncertainty two extreme cases, a minimum and a maximum, were developed using different assumptions regarding emission factors and fuel consumption calculations. Different values of two-wheel vehicles, proportion of motorcycle-taxis, number of traffic-days per week, daily fuel consumption and fuel density were used in each assumption.

2.1. Fuel consumption estimates C_i

2.1.1. Estimates of the number of two-wheel vehicles for 2002

Estimates of the numbers of two-wheel vehicles are issued from the literature for eight countries (Benin, Burkina Faso, Cameroon, Chad, Mali, Niger, Nigeria and Togo), though only few studies on two-wheel vehicles are available in Africa (Etitisa et al., 2008; Spezzano et al., 2008; Lindén et al., 2008; Fanou et al., 2006; Chen et al., 2003; Tsai et al., 2000). Due to the scarcity of data regarding two-wheel vehicle traffic in West Africa, much effort has been devoted to collect data in each country from respective national public departments. However, even when such data are available, they are highly disparate and thus questionable (Diaz Olvera et al., 2007; Agossou, 2004; Godard and Ngabmen, 2002). For example, no clear information about the methodology of data collection for the numbers of such vehicles is available. Uncertainties regarding these values are partly due to the fact that two-wheel vehicles are not subject to any technical controls in the countries considered in this study. Also, vehicles with motors smaller than 50 cm³ require no registration, another strong reason why the total number of such vehicles is largely unknown. In contrast, in most developed countries all two-wheel vehicles must be legally registered. For example, in France, the Netherlands and Belgium, two-wheel vehicles have needed to be registered since July 2004, September 2005 and September 2009 respectively (<http://www.senate.be/www/?Mival=/publications/viewPubDoc&TID=503-49877&LANG=fr>). Two-wheel vehicles in West Africa are not only for private use but, in six of the sixteen countries (Benin, Cameroon, Chad, Niger, Nigeria and Togo) they are widely used for public transportation as well (Trans-Africa, 2009). For the ten other countries, no publications regarding the use of motorcycles as taxis are available. It is thus assumed that all two-wheel vehicles are used for private purposes only, even though motorcycle taxis do perhaps exist in some of these countries. In terms of the proportion of two-wheel vehicles currently used as motorcycle-taxis, data are only available from Benin. Worou (2005) suggests that between 45% and 50% of two-wheel vehicles in Cotonou (the capital of Benin) are used as motorcycle-taxis. Adjovi (1999) suggests that 40,000 of a total of 100,000 two-wheel vehicles were used as motorcycle-taxis in Benin in 1998, a ratio of 40%. Since data were only available for Benin, this data were also used for the other five countries where the use of motorcycle-taxis is prevalent. In our assumptions, we opted for a range of 40% and 50% of two-wheel vehicles being motorbike-taxis. It is important to note that there is a risk for double counting of two-wheel vehicles. Given that in many cases these vehicles are not declared officially as motorcycle-taxis and that others may be used as taxis only on a part-time basis, the proportion between privately-used two-wheel vehicles and motorcycle taxis may be questionable.

In eight of our sixteen countries (Benin, Burkina Faso, Cameroon, Chad, Mali, Niger, Nigeria and Togo), "direct" estimates of the total number of motorbikes used as taxis can be obtained from literature (Table 1). In Cameroon, the Land Transport Ministry gives a total figure of 52,912 motorcycles for the whole country (Institut National de la Statistique, 2006). Diaz Olvera et al. (2007) and Godard and Ngabmen (2002) suggest a number of 22,000 motorcycle-taxis in the single city of Douala, Cameroon. However, a recent study by Kumar and Barrett (2008) questions this value, due to unclear methodology. These authors suggest a figure closer to 10,000 motorcycles in Douala, using data from the same Ministry of Transport. We choose a value of 52,912 for the total number of two-wheel vehicles in Cameroon. Thus, using a ratio of 50% (40%) as assumed above, we obtain a reasonable value of approximately 26,456 (21,165) for the number of motorcycle-taxis in Cameroon.

For Togo, Akakpo (1998) quotes a total of 8,000 motorcycle-taxis in 1996, whereas Godard and Ngabmen (2002) estimate that between 10,000 and 20,000 vehicles circulated in 1997. The West African Development Bank (BOAD, 2002) suggests a value of 45,000 motorcycle-taxis for the year 2002. This value is consistent with the other two references (Godard and Ngabmen, 2002; Akakpo, 1998) and taking into account the 50% (40%) ratio between taxis and private vehicles, the total number of two-wheel vehicles in 2002 is 90,000 (112,500)*.

In Nigeria, information about two-wheel vehicle numbers in 2002 is issued from A. Jalal. (Director General of the National Automotive Council of Nigeria) based on internal reports. There are

* Indeed, based on the number of motorcycle-taxis in Akakpo (1998), one obtains an increase of 37,000 (45,000 - 8,000) motorcycle-taxis between 1996 and 2002, equivalent on the average to an increase of the order of 6,000 motorcycle-taxis per year. Applying this increase, then one gets 14,000 (8,000 + 6,000) motorcycle-taxis in 1997, which is consistent with the values of Godard and Ngabmen (2002).

approximately 1,309,000 two-wheel vehicles in Nigeria with 654,500 (523,600) used as motorcycle-taxis considering the 50% (40%) ratio. In Benin, the BOAD (2002) gives estimates of 160,000 motorcycle-taxis. This corresponds to a total of 320,000 (400,000) two-wheelers considering the 50% (40%) ratio.

In Chad, there are an estimated 32,000 two-wheel vehicles in circulation (Trans-Africa, 2009). Under the 50% (40%) ratio, we obtain values of 16,000 (12,800) used as motorcycle-taxis. Finally, for Niger, the BOAD (2002) suggests a figure of 2,500 motorcycle-taxis. Thus, there are a total of 5,000 (6,250) two-wheel vehicles with the 50% (40%) ratio. For Burkina Faso and Mali, no data is available suggesting the use of motorcycle-taxis, however, the total numbers of two-wheel vehicles is still significant. In Burkina Faso, Ouedraogo (2005) suggests that there are 120,000 two-wheel vehicles with cubic capacity over 50 cm³. On the other hand, CCIC (2008) suggests a total of 300,000 two-wheel vehicles. We chose to use the latter value (300,000), including all types and cylinder of two-wheel vehicles. For Mali information regarding the number of two-wheel vehicle for 2002 is derived from O. Koita (University of Bamako-Mali), based on internal reports. This data suggests about 300,000 two-wheel vehicles in Mali.

Table 1 summarizes the total number of two-wheel vehicles used for motorcycle-taxis and for private-use for the year 2002 in Benin, Cameroon, Niger, Nigeria, Togo and Chad. The total number of two-wheelers from Burkina-Faso and Mali has also been included.

Table 1

Numbers of two-wheel vehicles in 2002, issued from literature. Values in bold were obtained from the literature, and values highlighted in grey were used in the minimum assumption.

	Population*	Total number of four-wheel vehicles **	motorcycl e-taxis	non-motorcycle -taxis	Total number of two-wheel vehicles	Ratio two/four wheel vehicles	motorcycl e-taxis	non-motorcycle -taxis	Total number of two-wheel vehicles	Ratio two/four wheel vehicles
			40%	60%			50%	50%		
NIGER	11,940,800	58,256	2,500	3,750	6,250	0.1	2,500	2,500	5,000	0.1
CHAD	9,118,890	25,330	12,800	19,200	32,000	1.3	16,000	16,000	32,000	1.3
CAMEROON	16,627,400	173,202	21,165	31,747	52,912	0.3	26,456	26,456	52,912	0.3
TOGO	5,553,170	25,709	45,000	67,500	112,500	4.4	45,000	45,000	90,000	3.5
BENIN	7,112,930	62,594	160,000	240,000	400,000	6.4	160,000	160,000	320,000	5.1
NIGERIA	131,336,000	2,521,651	523,600	785,400	1,309,000	0.5	654,500	654,500	1,309,000	0.5
BURKINA FASO	10,606,700	56,501	/	/	300,000	5.3	/	/	300,000	5.3
MALI	12,664,000	70,711	/	/	300,000	4.2	/	/	300,000	4.2

* Population was given by World Bank (2002)

** Four-wheel vehicles given by DHS (2006) are added to calculate the ratio of two:four-wheel vehicles

To compensate for the lack of official and reliable information, estimates of the total number of two-wheel vehicles have been made using data from several sources. Thus, in parallel to the “direct” values obtained (described above), “indirect” estimates of the numbers of two-wheel vehicles were obtained for most countries using data from Demographic Health Surveys reports (DHS, 2006). As an example, for Niger, the 2006 DHS report mentions that 5.6% of all households have at least one motorcycle. With a total of 2 million households, this results in a total of approximately 100,000 two-wheel vehicles. This value is much higher than the one suggested by the BOAD (2002) (5,000-6,250). Similar methodology was applied to the other countries investigated, except for Gambia and Guinea Bissau where DHS (2006) does not give any information. Values obtained using DHS (2006) data are, in all cases, considerably higher than “direct” values obtained from the literature. We therefore considered a range of values for the number of two-wheel vehicles: a minimum assumption (using “direct” values taken from the literature) and a maximum assumption (using values taken from the 2006 DHS study). Values for the minimum and maximum assumptions are gathered in Tables 1 and 2 respectively. Values in bold in table 1 were used in the minimum assumption. This choice is as follows: when we have the number of motorcycle-taxis, the minimum values are found using the 50% ratio. Whereas when only the total number of two-wheel vehicles is known (for example for Chad, Cameroon and Nigeria), we considered the ratio of 40:60% (taxi:private use).

Table 2

Numbers of two-wheel vehicles in 2002 issued from calculation in the maximum assumption using population data, number of persons per household, households with motorcycles, households with four-wheel vehicles and the total number of households.

Country	Population*	Number of persons per household	Households with motorcycles (%)	Households with cars (%)	Households	Total number of		Ratio two/four-wheel vehicles
						two-wheel vehicles	four-wheel vehicles**	
GUINEA BISSAU	1,368,530	/	/	/	/	16,476	1,985	8.3
GAMBIA	1,391,380	/	/	/	/	97,202	11,711	8.3
LIBERIA	3,056,860	5.0	1.7	2.1	611,372	10,394	12,839	0.8
SIERRA LEONE	4,540,320	5.9	4.0	2.0	769,546	30,782	15,391-19,130	2.0-1.6
TOGO	5,553,170	5.4	10.4	2.5	1,028,365	106,950	25,709	4.2
BENIN	7,112,930	5.0	35.6	4.4	1,422,586	506,440	62,594	8.1
GUINEA	8,705,980	6.1	8.6	4.0	1,427,210	122,740	57,088	2.2
CHAD	9,118,890	5.4	4.3	1.5	1,688,683	72,614	25,330	2.9
SENEGAL	10,432,700	8.7	5.9	7.3	1,199,161	70,750	87,539	0.8
MALI	10,606,700	5.7	29.7	3.8	1,860,825	552,666	70,711	7.8
NIGER	11,940,800	6.1	5.6	2.0	1,957,508	109,620	39,150-58,256	2.8-1.9
BURKINA FASO	12,664,000	6.5	24.2	2.9	1,948,308	471,490	56,501	8.3
CAMEROON	16,627,400	4.8	7.5	5.0	3,464,042	259,804	173,202	1.5
IVORY COAST	18,074,900	5.5	11.8	4.1	3,286,345	387,790	134,740	2.9
GHANA	20,474,900	4.0	2.1	5.4	5,118,725	107,494	276,411-400,522	0.4-0.3
NIGERIA	131,336,000	5.0	15.1	9.6	26,267,200	3,966,348	2,521,651	1.6

* Population was given by World Bank (2002)

** Number of four wheel-vehicles given by IRF (2007) and DHS (2006) are added in order to calculate the ratio of two:four-wheel vehicles.

As mentioned above, data are missing for certain countries. In terms of the minimum assumption, there are eight West African countries (Gambia, Ghana, Guinea, Guinea Bissau, Ivory Coast, Liberia, Senegal and Sierra Leone) for which no “direct” estimates are available. Therefore, the number of two-wheelers was estimated using two parameters: the ratio of two:four-wheel vehicles and the total number of four-wheel vehicles (cars, pick-ups, buses, etc) according to data from IRF (2007) and DHS (2006). As seen in table 1, which presents these data, the lowest ratio of two:four-wheel vehicles is obtained for Niger (0.1). This value was selected for the minimum assumption when calculating the number of two-wheelers for all the countries where “direct” data are missing. These data are displayed in Table 3.

Table 3

Number of two-wheel vehicles for the year 2002 in the minimum assumption.

Country	Population*	Total number of		Ratio two/four-wheel vehicles
		two-wheel vehicles	four-wheel vehicles**	
GUINEA BISSAU	1,368,530	199	1,985	0.1
GAMBIA	1,391,380	1,171	11,711	0.1
SIERRA LEONE	4,540,320	1,539	15,391-19,130	0.1
LIBERIA	3,056,860	1,284	12,839	0.1
GUINEA	8,705,980	5,709	57,088	0.1
GHANA	20,474,900	27,641	276,411-400,522	0.1
SENEGAL	10,432,700	8,754	87,539	0.1
IVORY COAST	18,074,900	13,474	134,740	0.1

* Population was given by World Bank (2002)

** Number of four wheel-vehicles given by IRF (2007) and/or DHS (2006) are added to calculate the total number of two-wheel vehicles. We consider the minimum value of four-wheel vehicles to calculate the number of two-wheel vehicles.

DHS (2006) does not give any information for Gambia and Guinea Bissau. Thus in the maximum assumption the highest ratio of two:four-wheel vehicles, 8.3 for Burkina Faso, (IRF, 2007; DHS, 2006); was then selected to calculate the numbers of two-wheel vehicles in these two countries. Table 2 summarizes all our selected values used in the maximum case. Finally, the numbers of two-wheel vehicles for our 16 countries in the minimum and maximum assumptions are presented in table 4.

Table 4

Numbers of two-wheel vehicles for our 16 countries in the minimum and maximum assumptions.

	Minimum assumption			Maximum assumption		
	Motorcycle-taxis	Non-motorcycle-taxis	Total number of two-wheel vehicles	Motorcycle-taxis	Non-motorcycle-taxis	Total number of two-wheel vehicles
BENIN	160,000	160,000	320,000	253,220	253,220	506,440
BURKINA FASO	0	300,000	300,000	0	471,490	471,490
CAMEROON	21,165	31,747	52,912	129,902	129,902	259,804
CHAD	12,800	19,200	32,000	36,307	36,307	72,614
GAMBIA	0	1,171	1,171	0	97,202	97,202
GHANA	0	27,641	27,641	0	107,494	107,494
GUINEA	0	5,709	5,709	0	122,740	122,740
GUINEA BISSAU	0	199	199	0	16,476	16,476
IVORY COAST	0	13,474	13,474	0	387,790	387,790
LIBERIA	0	1,284	1,284	0	10,394	10,394
MALI	0	300,000	300,000	0	552,666	552,666
NIGER	2,500	2,500	5,000	54,810	54,810	109,620
NIGERIA	523,600	785,400	1,309,000	1,983,174	1,983,174	3,966,348
SENEGAL	0	8,754	8,754	0	70,750	70,750
SIERRA LEONE	0	1,539	1,539	0	30,782	30,782
TOGO	45,000	45,000	90,000	53,475	53,475	106,950

2.1.2. Number of traffic-days per week for two-wheel vehicles

Two-wheel vehicles are the main mode of transport in the large West African capitals, e.g. Bamako in Mali, Cotonou in Benin and Ouagadougou in Burkina Faso (DHS, 2006; Bultynck, 1999). We assume two values for the number of days these vehicles circulate, a minimum value of five days per week and a maximum value of seven days per week (cf. Table 5). These assumptions seem plausible, since the minimum number of days worked is usually five (Monday to Friday); and the maximum that can be worked is seven. For example, in Benin, motorcycle-taxi drivers have to pay motorcycle owners every night from Mondays to Saturdays, but are allowed to operate on their own on Sundays (Sahabana, 2006).

2.1.3. Daily fuel consumption

To estimate daily two-wheel vehicle consumption, one needs to consider their usage, whether private or in public transport. For this purpose, minimum and maximum assumptions are again considered. For private transport, values of fuel consumption and distances traveled by two-wheel vehicles, are tentatively based on European data (ADEME, 2005), since no data are available for Africa. It must be kept in mind that these values are based on a context in which fuel quality is controlled, two-wheel vehicles are generally in good condition and road infrastructure is well maintained. In African countries, however, this situation is very different and fuel consumption is likely considerably higher. For our minimum assumption, European fuel consumption by two-wheel vehicles less than 125 cm³ was selected. These vehicles travel on average 4,000 km/year with average consumption of 3.4 l/100 km, corresponding to a total of 136 liters per year. Considering the minimum case of 5 days per week (minimum assumption in Table 5) resulting in 260 days of circulation per year, we obtain a daily fuel consumption of 0.5 liters per day. Fuel consumption for private transport in the maximum case is

based on consumption by “large” European two-wheel vehicles (over 125 cm³) traveling 8,000 kilometers per year with an average consumption of 4.5 l/100 km (ADEME, 2005), corresponding to a daily consumption of 1 liter per day. Table 5 summarizes these data. Average fuel consumption of motorcycle-taxis used for public transport in West Africa were estimated by Kaffo et al. (2007) as 4 liters per day. This is the only data available and this value will be adopted for daily consumption for public transport in the maximum assumption (Table 5). No value has been found to be used in the minimum assumption. There is a factor of 2 difference between fuel consumption of two wheel-vehicles for private use between our two assumptions (0.5 liter in the minimum case vs. 1 liter in the maximum). Therefore, this factor of 2 will be kept for two-wheel vehicle fuel consumption in the public transport sector, resulting in a value of 2 liters/day in the minimum assumption. All fuel consumption values are shown in Table 5.

2.1.4. Fuel density

As mentioned above, most two-wheel vehicles in the 16 West African countries investigated have two-stroke engines (Ouedraogo, 2005; Findings, 2002; BOAD, 2002; Diallo, 2001; Bultynck, 1999) operated with mixtures of gasoline and oil. For gasoline, we have adopted an average fuel density (unleaded 95 and 98) of 747.50 kg/m³ (<http://www.total.mu/os/content-/NT000357FE.pdf>). For oil, an average of 875.75 kg/m³ is used in the mixture for two-stroke engines (Z 2-stroke, racing 2-stroke, sport 2-stroke and scooter 2-stroke) (http://www.lubrifiants.total.fr/lub/lubfrancetotal.nsf/Vs_OPM-/2C8C5CDFB5467392C1257521004EFB1D?OpenDocument). According to manufacturer’s instructions, the proportion of oil to gasoline can vary between 2 and 8% (Boko et al., 2003; Diallo, 2001; Jüttner et al.; 1995). With 2% as a minimum ratio typical of European conditions, we get a density of 750.1 kg/m³ against 757.8 kg/m³ for the maximum 8% ratio observed in some African countries (Diallo, 2001). Again these values are shown in Table 5.

2.2. Emission factor estimates EF_{i,j}

Aerosol emissions heavily depend on emission factors, which in turn are dependent on technologies and fuels used (Junker and Liousse, 2008; Bond et al., 2004). In Guillaume and Liousse (2009), emission factors of 0.28 g/kg and 7.36 g/kg are used for typical European two-stroke two-wheel vehicles for BC and OCp respectively. In Bond et al. (2004), emission factors of 0.71 g/kg for BC and 16.25 g/kg for OCp are used. Emission factors for two-stroke motorcycles were directly measured during the AMMA campaign (Guinot et al., 2010) in May 2005 in Cotonou (Benin). These emission factors are 2.31 g/kg and 30.56 g/kg, for BC and OCp respectively (Guinot et al., 2010). Such high values are in agreement with Nuti (1998) and Volckens et al. (2008) who have shown that high particle emissions result from gasoline-oil mixtures used in two-stroke vehicles under incomplete combustion. Thus, the emission factors measured in Benin indicate the high level of carbonaceous particles emitted during combustion by two-wheelers. These emission factors (i.e. 2.31 g/kg and 30.56 g/kg) have been used in the maximum assumption and those of Europe (i.e. 0.28 g/kg and 7.36 g/kg) of Guillaume and Liousse (2009) in the minimum case, and applied to all countries in our study. These values are displayed in Table 5.

Table 5

Other characteristics in the minimum and maximum assumptions.

	Minimum assumption		Maximum assumption	
	non-motorcycle-taxis	motorcycle-taxis	non-motorcycle-taxis	motorcycle-taxis
Number of traffic day(s) per week	5		7	
Daily consumption (in liter)	0.5	2.0	1.0	4.0
Fuel density (in kg/m ³)	2% oil: $\rho = 750.1$		8% oil: $\rho = 757.8$	
Emission factors (in g/kg)	BC = 0.28 OCp = 7.36		BC = 2.31 OCp = 30.56	

2.3. New emission spatialization

Emissions were calculated for each country and then spatialized according to population densities. For this purpose, we use a new census from CIESIN (2005) with higher $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ resolution. Such increased spatial resolution is clearly an asset in air quality modeling.

3. Results

3.1. Two-wheel vehicle fuel consumption in the minimum and maximum assumptions

Fig. 1 shows total motor gasoline consumption (in tons per year) of two-wheel vehicles for 2002, based on the minimum and maximum assumptions applied in each of our sixteen countries. Countries are ranked according to increasing fuel consumption according to the maximum assumptions. In this classification, maximum fuel consumption ranges from 2,875 tons in Liberia to 2,742,555 tons in Nigeria. In the minimum case, total consumption range from 20 tons to 285,125 tons, for Guinea Bissau and Nigeria, respectively. On the whole, in all 16 countries and for both assumptions, total fuel consumption ranges from 471,665 tons (minimum) to 3,988,931 tons (maximum). Total fuel consumption in the 16 countries in the maximum assumption is eight times greater than in the minimum case.

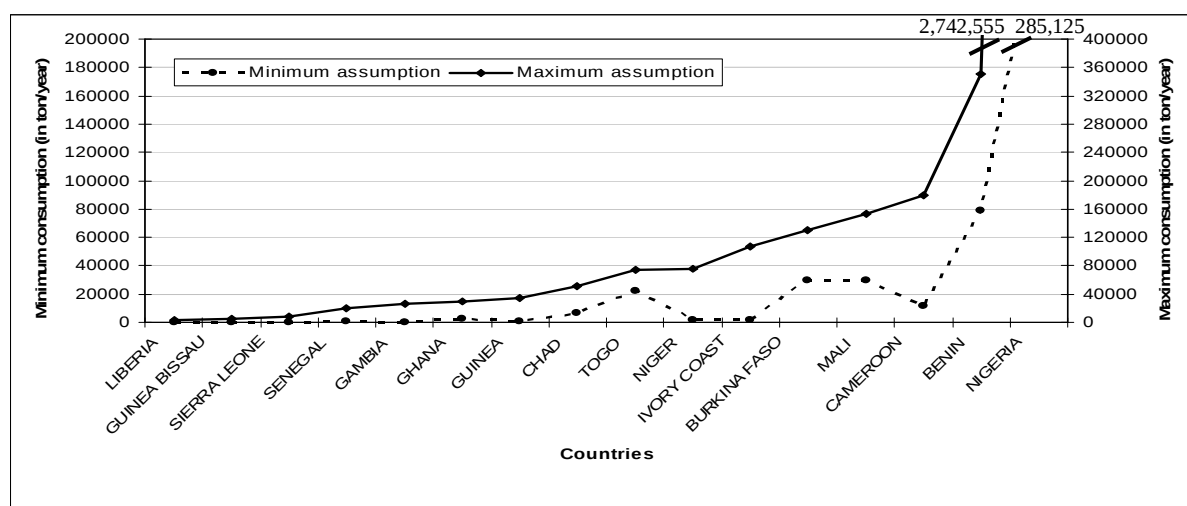


Fig. 1 : Two-wheel vehicles motor gasoline consumptions in 2002 in the minimum and maximum assumptions in the sixteen West African countries investigated.

Comparing differences between estimated fuel consumption in the maximum and minimum assumptions, we get values ranging from 2,748 tons to 2,457,430 tons in Liberia and Nigeria, respectively. Furthermore, and as expected, we find that the relative differences between the maximum and minimum cases are higher in countries where the numbers of two-wheel vehicles are only estimated (over 91%), whereas these differences are lower (over 70%) in countries where these values are available.

3.2. Emissions

Annual West African BC and OCp combustion particle emissions in 2002 for two-wheel vehicles were calculated using our adjusted fuel consumption estimates through the relationship in section 2.

3.2.1. BC emissions

Fig. 2 shows total two-wheel vehicle BC emissions in the minimum and maximum assumptions in each of the 16 countries. These estimates are ranked from smallest to largest according to the maximum values.

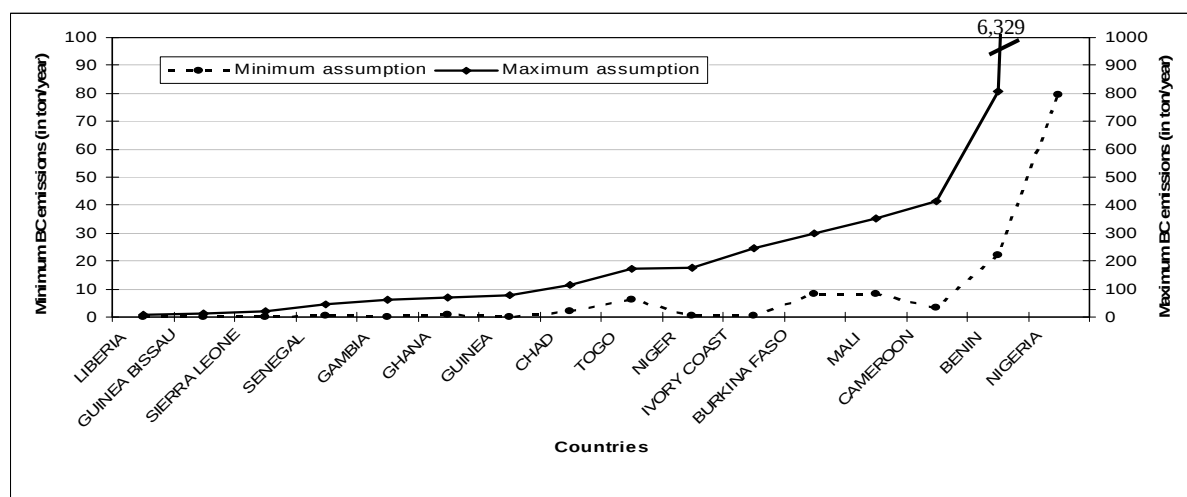


Fig. 2 : Total BC emissions for two-wheel vehicles in West Africa in the minimum and maximum assumptions in 2002.

BC emissions are 6.7 and 6,329 tons, respectively for Liberia and Nigeria in the maximum case. In the minimum case, values range from 0.01 tons for Guinea Bissau to 80 tons for Nigeria. In all 16 countries, total BC emissions are 132 tons and 9,206 tons, in the minimum and maximum assumptions respectively, a difference of 9,074 tons. Differences between the maximum and minimum assumptions for BC emissions vary from 6.6tons in Liberia to 6,249 tons in Nigeria. The relative differences amount to almost 100% (over 99.5%) in countries where the numbers of two-wheel vehicles are only estimated, whilst these difference are approximately 98% in the other countries. Total BC emissions in the 16 countries in the maximum assumption are on average seventy times greater than in the minimum case. As mentioned in the previous paragraph, there is a factor of eight between the maximum and minimum assumptions in terms of fuel consumption. In addition, there is also a factor eight difference between BC emission factors used in the two cases. This appears coherent with the significant differences in emissions observed between the two assumptions.

3.2.2. OCp emissions

OCp emissions are considerably higher than those for BC. Fig. 3 shows that OCp emissions vary between 88 tons in Liberia compared to 83,801 tons in Nigeria in the maximum case. In the minimum case, values range from 0.1 tons for Guinea Bissau to 2,098 tons for Nigeria.

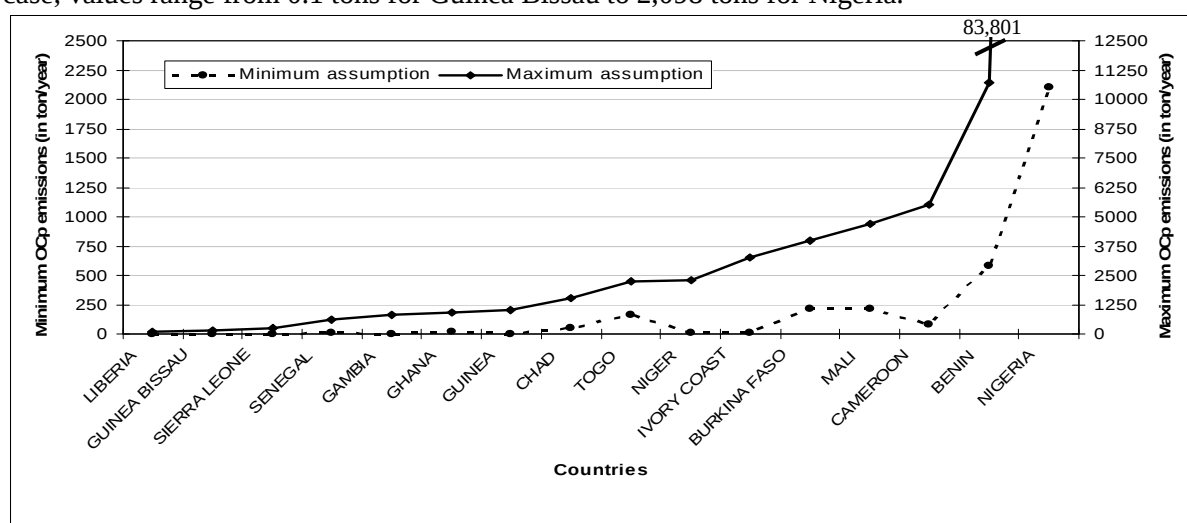


Fig. 3 : Total OCp emissions for two-wheel vehicles in West Africa in the minimum and maximum assumptions in 2002.

The smallest difference between the maximum and minimum assumptions for OCp emissions are 87 tons in Liberia compared to a maximum of 81,703 tons in Nigeria. On average, a difference of 99.5% is obtained in countries where the numbers of two-wheel vehicles have only been estimated, as compared to a value of 95% in countries where these values were available. Total emissions in all 16 countries amount to 3,470 and 121,885 tons, in the minimum and maximum cases, respectively, corresponding to a difference of 118,415 tons. Total OCp emissions for the 16 countries in the maximum assumption are on average thirty five times greater than in the minimum one. This is again a result of the difference in fuel consumption and emission factors values used in the two assumptions. The OCp emission factor value used in the maximum case is 4 times larger than in the minimum one.

4. Discussion

4.1. Generalities

For emission purposes, total fuel consumption estimates appear more critical than the total number of two-wheel vehicles assumed. Indeed, under our two assumptions, motorcycle-taxis consume four times more fuel on a daily basis than private two-wheel vehicles, as shown in Table 5. In Fig. 1, some of the 16 countries have fewer two-wheel vehicles, but consume more fuel than countries with greater numbers of such vehicles. For example, in the maximum assumption in Cameroon, there are 259,803 two-wheel vehicles, and fuel consumption in the maximum case is 179,642 tons. In comparison, in Ivory Coast, where the estimated number of two-wheel vehicles is much greater (387,789 vehicles), fuel consumption is much lower (107,256 tons only). Similar results are obtained for Mali and Burkina Faso. This is a result of motorcycles being used mostly for private purposes in these countries (thus consuming much less fuel than countries where the use of motorcycle-taxis is prevalent). Let us note that the use of motorbike-taxis is not directly related to the total population (see Table 2), but rather on other factors, such as the socio-political situation, economical crisis, war, geographical situation, etc. In all figures, countries have been ranked from smallest to largest in terms of fuel consumption (i.e. from smallest to largest emitters) based on the maximum assumption. Among countries where the numbers of two-wheel vehicles are available, Chad consumed the least amount of fuel (and thus is the smallest BC/OCp emitter), whilst Nigeria is the largest fuel consumer (with ensuing largest BC and OCp emissions) in the maximum assumption. In other countries where the numbers of two-wheel vehicles could only been estimated, Guinea Bissau has the lowest fuel consumption (smallest BC and OCp emitter), whilst Ivory Coast is the largest consumer (and BC and OCp emitter) in the maximum assumption. This classification is different considering the minimum assumption: Liberia consumed the least amount of fuel (and thus is the smallest BC and OCp emitter), whilst Ghana is the largest fuel consumer (with ensuing largest BC and OCp emissions). Overall, in both minimum and maximum assumptions, two-wheel vehicle emissions are largest in Burkina Faso, Mali, Cameroon, Benin and Nigeria.

4.2. Comparison of two-wheel vehicles against global road traffic consumptions

We now discuss the results of a comparison between our two-wheel vehicle fuel consumption estimates and road traffic fuel consumption data for motor gasoline from the UN (2002) and IEA (2000) databases. Comparisons with IEA (Bond et al., 2004) and our results are carried out on total road traffic (motor gasoline fuel consumptions) in all 16 West African countries, whereas the comparison with UN data (2002) is made on a country by country level.

Fig. 4 displays the ratios between two-wheel vehicle fuel consumption in our two assumptions against fuel consumption values given by the UN (2002). This consumption ratio is computed using the following relationship:

consumption ratio (%) = (two-wheel consumption in our study (minimum or maximum)) / all traffic consumption for UN database in 2002) * 100

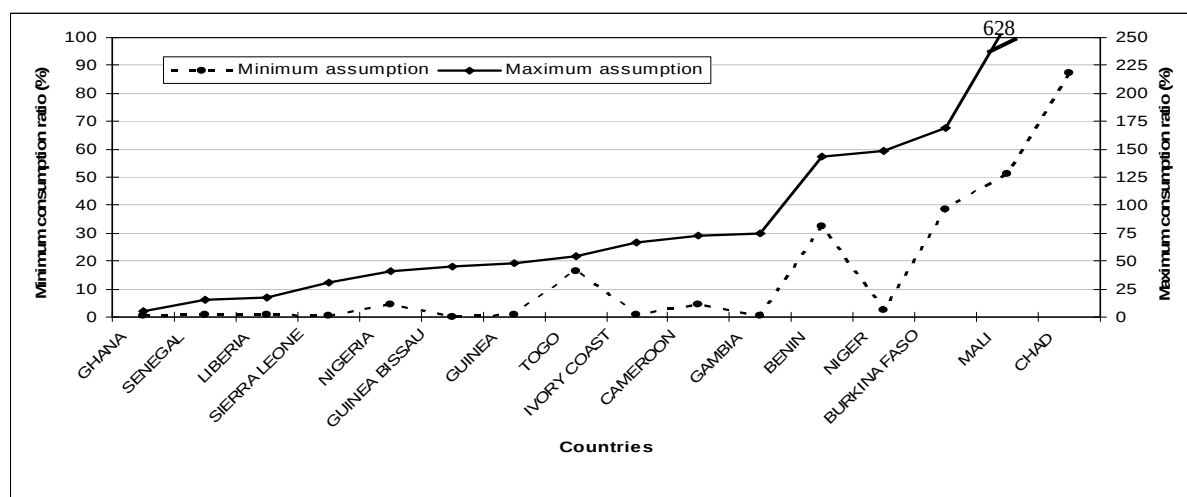


Fig. 4 : Ratios (in %) between two-wheel vehicle fuel and total vehicle road traffic fuel consumptions (United Nations database) in the minimum and maximum assumptions (year 2002).

Considering all 16 countries, these ratios vary between 6% (total in our min. case/total UN) and 47% (total in our max./total UN). Now considering the comparison with IEA database (not presented in detail here), ratios vary from 5% to 45%, in the minimum and maximum assumptions respectively (Table 6). It is important to note that the IEA data are for the year 2000. Importantly, however, these ratios are of similar orders of magnitude between the two global databases, both UN and IEA.

Table 6

Consumption and emission percentages, for the minimum and maximum assumptions respectively vs. Bond et al. (2004) for the year 2000 and Junker and Liousse (2008) calculated for the year 2002.

	Minimum. assumption	Maximum assumption	Minimum assumption	Maximum assumption
	Bond et al. (2004) values		Junker and Liousse (2008) values	
Consumption (%)	5	45	6	47
BC emissions (%)	12	835	10	728
OCp emissions (%)	21	751	56	1980

On a country by country basis, under the minimum assumption, the comparison between our data and the UN data, 11 out of the 16 countries have ratios below 5% and it is only Mali (51%) and Chad (87%) that exceed a ratio of 40%. In the maximum assumption, these ratios vary between 5% in Ghana to 628% in Chad, with nine countries having ratios above 50%. Of these nine countries, Togo has the lowest ratio (54%), indicating that more than half of total traffic fuel consumption result from two-wheelers. In Benin, Niger, Burkina Faso and Mali, these values are even higher, 144%, 149%, 169% and 264%, respectively. The contraband petrol sold in Nigeria, Benin and Togo is likely not accounted for in databases produced by international organizations such as the UN and IEA. The problem of contraband gasoline is relevant for all vehicles, requiring a similar investigation to be carried out for other vehicle types (e.g. cars and trucks). Finally, our results strongly stress the importance of two-wheel vehicle fuel consumption in West Africa (particularly in Benin, Niger, Burkina Faso, Mali and Chad), also raising the serious question of representative data collection.

4.3. Comparison of road traffic BC and OCp emissions: this study vs. global inventories

BC and OCp emissions estimates from our study were compared with other data from global emission inventories. We considered the Bond et al. (2004) inventory for total traffic BC and OCp emissions in West Africa for the year 2000 as well as the global Junker and Liousse (2008) inventory. However, the

Junker and Liousse (2008) inventory covers only up to the year 1997. In order to make a more suitable comparison, we applied the Junker and Liousse (2008) methodology (using their BC and OCp emissions factors for traffic) to motor gasoline consumption estimates obtained from the UN database (UN, 2002) for the year 2002. BC and OCp traffic road emissions were calculated for each country. For clarity, these new data will be called “Junker and Liousse calculated for 2002”. For comparison, we present emission ratios (in %) for both assumption cases (minimum and maximum) for each country. This ratio is calculated using the following formula:

emission ratio (%) = (two-wheel emission (BC or OCp) in our study (minimum or maximum)) / all traffic emissions (BC or OCp) from Junker and Liousse calculated for 2002) * 100

4.3.1. BC comparisons

As shown in table 6, throughout our West African domain, ratios of total BC emissions in our study versus those of Junker and Liousse calculated for 2002 amount to 10% in the minimum assumption compared to 728% in the maximum one. Similar ratios can be found when comparing these total BC emissions with those from Bond et al. (2004) for 2000: 12% in the minimum assumption and as much as 835% in the maximum one.

Figure 5 displays ratios between BC two-wheel vehicle and total vehicle road traffic emissions (the latter from Junker and Liousse calculated for 2002) in the minimum and maximum assumptions for 2002 on a country by country basis.

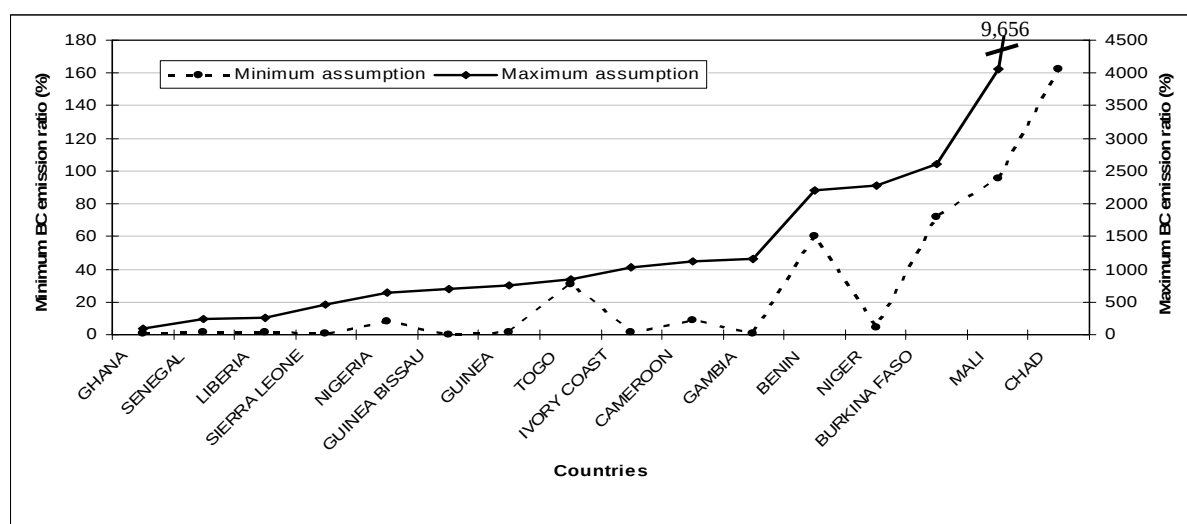


Fig. 5 : Ratios (in %) between two-wheel vehicle and total vehicle road traffic BC emissions (the latter from Junker and Liousse calculated for 2002) in the minimum and maximum assumptions for 2002.

In the low assumption, two-wheel vehicle BC emissions in Benin, Burkina Faso and Mali are roughly half of all road traffic emissions provided by Junker and Liousse calculated for 2002. The BC emission ratio is largest in Chad where the ratio is 162%. In the maximum assumption, all countries have two-wheel vehicle BC emissions at least two times greater than the total road traffic emissions estimated by Junker and Liousse calculated for 2002, except for in Ghana where the ratio is 84%. This reflects the large difference in motor gasoline emission factors used, with those of the minimum assumption (0.28 g/kg) being about twice as large as those used by Junker and Liousse (2008) (0.15 g/kg). For comparison, BC emission factors in the maximum assumption are about 15 times larger than in Junker and Liousse (2008). Such significant differences result in considerably larger emissions. Similar differences can also be found between this study and Bond et al. (2004).

4.3.2. OCp comparisons

Table 6 shows the ratios between two-wheel vehicle (minimum and maximum assumptions) and all road traffic OCp emissions for 2002. Total OCp emissions for 2002 in all 16 countries amount to 56% (1980%) of total road traffic emissions from Junker and Liousse calculated for 2002, compared to 21% (751%) of the estimates of Bond et al. (2004) for 2000, in the minimum (maximum) assumption. As can be seen, OCp emissions in Bond et al. (2004) are 2.6 times higher than in Junker and Liousse calculated for 2002. These differences are related to different fuel consumption values and emission factors used; with those utilized by Bond et al. (2004) being higher than those used in Junker and Liousse (2008) calculated for 2002. Indeed, OCp emission factors in Bond et al. (2004) include high values for two-stroke engines whereas Junker and Liousse (2008) do not. Figure 6 displays similar ratios between our study and values from Junker and Liousse calculated for 2002 for each country for the minimum and maximum assumptions.

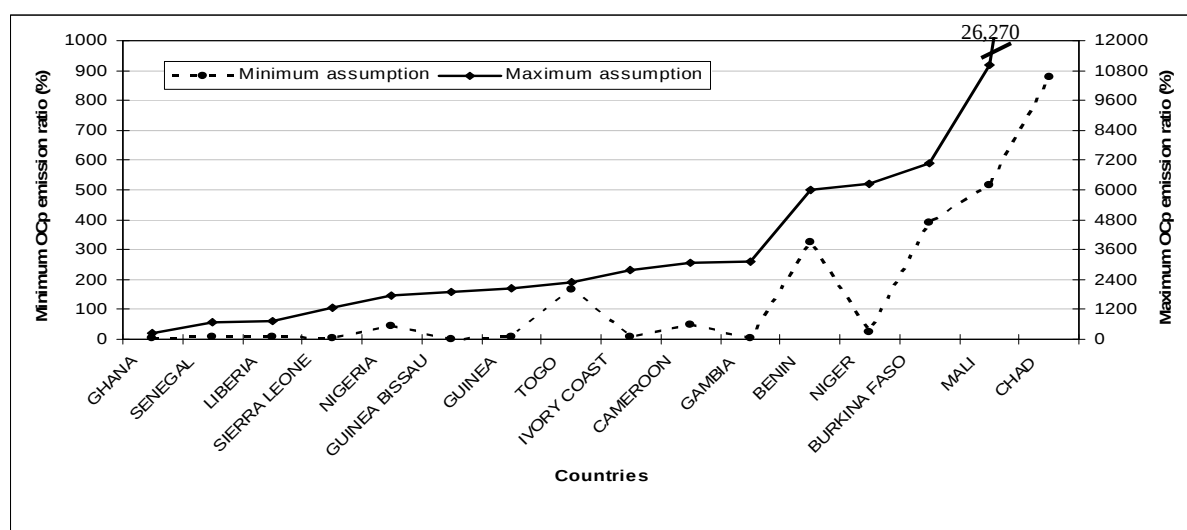


Fig. 6 : Ratios (in %) between two-wheel vehicle and total road traffic OCp emissions (the latter from Junker and Liousse calculated for 2002) in the minimum and maximum assumptions for 2002.

In the minimum case, five countries (Togo, Benin, Burkina Faso, Mali and Chad) display OCp two-wheel vehicle emissions greater than total road traffic emissions (more than 100%). This is even more marked in the maximum assumption, in which all countries show two-wheel vehicle emissions at least twice as large as total traffic emissions (more than 200%), and amounting to as much as 100 times greater in Mali (11,031%) and Chad (26,270%). It is clear that large differences exist between our present inventory and that of Junker and Liousse calculated for 2002, both in the minimum and maximum cases. This is due to the high OCp emission factors adopted for two-wheel vehicles in our study. For motor gasoline, there is a factor of 10 (42) differences in OCp emission factors between our minimum (maximum) assumption and that of Junker and Liousse calculated for 2002. This is attributable to significant quantities of oil mixed with gasoline, effectively taken into account here in the emission factors, but not by Junker and Liousse (2008). If no regulation or control of the fuel:oil mixture is enforced, higher emissions yet still could be expected: in our maximum assumption, average mixtures with 8% oil have been adopted, but values of up to 20% have been measured (Boko et al., 2003). Plans are underway, however, in Benin to replace about 10% of all two-stroke motorcycle taxis with new, less polluting four-stroke motorcycles (Ouedraogo, 2005; Findings, 2002; Diallo, 2001).

Finally, we have shown that BC and OCp emissions in West Africa due to two-wheel vehicles represent a large part and sometimes even exceed the total road traffic emissions of Junker and Liousse calculated for 2002. This is particularly true for OCp where even in our minimum assumption, two-wheel vehicle emissions in five countries (Togo, Benin, Burkina Faso, Mali and Chad) are greater than those for total road traffic.

One question remains, however, assuming that the UN fuel consumption database and the BC and OCp emissions inventories of Junker and Liousse calculated for 2002 did not include two-wheel vehicles, what values would we obtain when taking into account our present results? One answer can be found in Fig. 7 which displays BC and OCp emissions at high resolution ($0.25^\circ \times 0.25$), for Junker and Liousse calculated for 2002 (left) and when adding our maximum BC and OCp emission estimates to Junker and Liousse calculated for 2002 (right). Fig. 7 shows emission hotspots in the Gulf of Guinea, clearly highlighting the importance of Nigeria and other West African capitals.

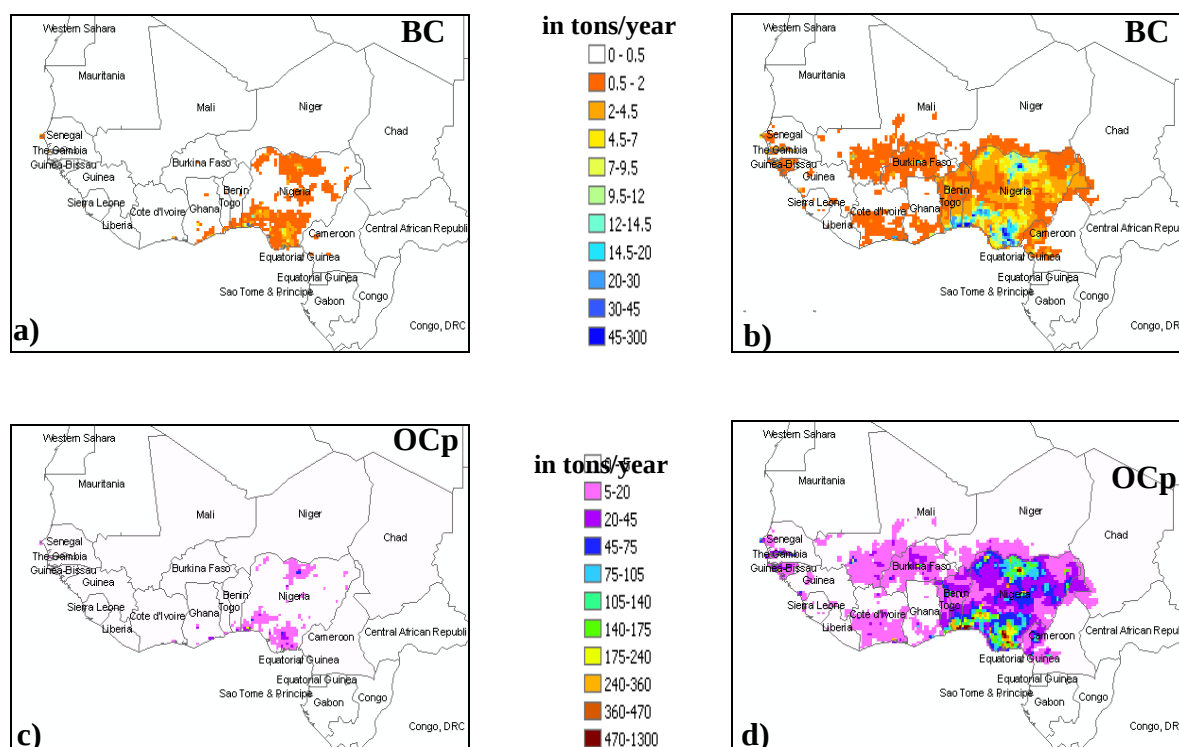


Fig. 7 : BC and OCp emissions in West Africa in 2002.

- a and c: Junker and Liousse calculated for 2002

- b and d: our maximum assumption for two-wheel vehicles added to Junker and Liousse calculated for 2002.

It is more likely that our maximum assumption is closer to reality in West Africa, since the emission factor values used in our maximum assumption were directly measured in West Africa (e.g. Benin), while those quoted in the minimum assumption were derived from European studies (Guillaume and Liousse, 2009; Guinot et al., 2010). Furthermore, parameters such as daily fuel consumption and fuel density in our minimum assumption are for clean European vehicles, whereas the ones used in the maximum assumption were again derived from observations undertaken in West Africa.

5. Conclusion

Due to their ease of use, good performance and low cost, two-stroke engines are of increasingly used throughout West Africa. Unfortunately these vehicles are strong emitters of combustion particles. This study has focused on two-wheel vehicle emissions in West Africa, highlighting the importance and significance of this source. This is particularly the case in countries such as Benin and Togo, where the hydrocarbon market is dominated by oil smuggled out of Nigeria, but also in countries where high percentages of two-wheel vehicles are used in the public transport sector (Burkina Faso and Mali). Due to a general lack of reliable data, this preliminary study has been carried out based on several assumptions, for example, in terms of fuel consumption and emission factor values. In spite of large efforts to collect further, new data from the sixteen countries investigated, many uncertainties still remain. Moreover, this region is rapidly evolving, thus requiring constant updating. Future work is

needed to generate more accurate regional estimates. A new area of high anthropogenic emissions is seen to emerge in developing West African countries.

In our proposed methodology, we have put forward two assumptions, a minimum and a maximum one. We consider that the maximum assumption more closely reflects the reality in West Africa, because the parameters used in the minimum one are more relevant to cleaner, Western Europe conditions. In this context, we have obtained large differences between our present regional emission estimates and those from global inventories, the differences being greater between Junker and Liousse calculated for 2002 and our study than between Bond et al. (2004) and this study. The difference is greatest for OCp. These results emphasize the urgent need to take two-wheel vehicle emissions into account in the West African region, since they contribute a large proportion of total road traffic emissions. Improvements in other African anthropogenic emission inventories (e.g. motor gasoline vehicles using smuggled fuels, biofuel, diesel consumption, industries, etc) are still ongoing, also using regional data obtained through direct local enquiries. Field campaigns for counting vehicle numbers, estimating emission factors, etc need to be organized in the various West African countries. This study has also highlighted the significant abundance of OCp emissions from motorcycles, with ensuing severe impacts upon local public health (EPA, 2005; McGranahan and Murray, 2003). This work has strongly demonstrated the importance of the various factors required for assessing road traffic emissions, and to highlight the necessity of local governments for establishing regulatory policies aiming at reducing air pollution.

Acknowledgements

Gridded population density data were obtained from the Center for International Earth Science information Network (CIESIN), United Nations Food and Agriculture Programme (FAO) and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). We wish to thank A. Jalal and O. Koita for two-wheel vehicle data for Nigeria and Mali respectively. We also thank Bruno Guillaume for useful discussions in the development of this work, Robert Rosset for continuous support and valuable comments on the manuscript and Fiona Tummon for English corrections. We also thank the referees for their valuable comments, which have led to the improved quality of this paper.

References

- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), 2005. *Motocycles, cyclomoteurs. Energie et environnement*. Available from : www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=55412B72506EFB-124201C4666F32B11E1246367218654.pdf.
- Adjovi, E.V., 1999. L'essence frelatée asphyxie Cotonou. *Courrier International.com*. Hebdo n° 463. Available from : <http://www.courrierinternational.com/article/1999/09/16/l-essence-frelatee-asphyxie-cotonou>.
- Agossou, N., 2003. La diffusion des innovations : l'exemple des zémijan dans l'espace Béninois. *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 47, n°130, pp., 101-120.
- Agossou, N., 2004. Dynamique spatiale à Port-Novo : les effets de la diffusion des produits pétroliers Kpayo. *CAIRN*, vol. 33, pp., 211-218.
- Akakpo, A.M., 1998. Le rôle de la ville de Lomé dans les transports urbains. *Urban Transport Policy. A Sustainable Development Tool*. Balkema, Rotterdam, pp., 517-521.
- Baumbach, G., Vogt, U., Hein, K.R.G., Oluwole, A.F., Ogunsola, O.J., Olaniyi, H.B., et al., 1995. Air pollution in a large tropical city with a high traffic density- results of measurements in Lagos, Nigeria. *The Science of the Total Environment*, vol. 169, pp., 25-31.
- BOAD, West African Development Bank, 2002. *Rapport de l'atelier régional sur l'impact du transport urbain à deux roues et ses perspectives de développement dans les pays de l'UEMOA (Bénin, Niger et*

Togo). Lome, Togo, November 14-15. Available from : http://www.boad.org/assets/pdf/Dossier_2roues.pdf.

Bond, T.C., Streets, D.G., Yarber, K.F., Nelson, S.M., Woo, J.H., Klimont, Z., 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, D14203, doi:10.1029/2003JD003697.

Boko, G.M.J., Bunch, M.J., Suresh, V.M., Kumaran, T.V., 2003. Air pollution and respiratory diseases in African big cities: the case of Cotonou in Benin. *Proceedings of the third International Conference on Environment and Health (ICEH)*, Chennai, India, December 15-17. pp., 32-43.

Bultynck, P., 1999. Etude de cas : Etude sur la qualité de l'air à Ouagadougou. Retrieved March 15, 2007 from http://www.cleanairnet.org/ssa_fr/1444/articles-37244_pdf.pdf.

Cadle, S.H., Mulawa, P., Groblicki, P., Laroo, C., Ragazzi, R.A., Nelson, K., Gallagher, G., Zielinska, B., 2001. In-use light-duty gasoline vehicle particulate matter emissions on three driving cycles. *Environmental Science and Technology*, vol. 35, pp., 26-32.

CCIC, Comité Consultatif International du Coton, 2008. Technologies pour le développement du Coton. 67^{ème} plénière. Burkina Faso, November 17-21. Available from : http://www.ccic67.bf/docs/brochure_ccic67.pdf

CIESIN, Center for International Earth Science Information Network, SEDAC, Socioeconomic Data and Applications Center, FAO, United Nations Food and Agriculture Programme, CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2005. Gridded Population of the World: Future Estimates (GPWFE). Available from : <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/>.

Chantereau, C., Kpoledji, C., 2006. L'épineuse question de l'approvisionnement en produits pétroliers. *Benin Expansion. Newsletter*, No. 22, pp., 6. Available from : <http://www.izf.net/upload/Guide-Benin/Acmc/benin22.pdf>.

Chen, K.S., Wang, W.C., Chen, H.M., Lin, C.F., Hsu, H.C., Kao, J.H., Hu, M.T., 2003. Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions. *The Science of the Total Environment*, vol. 312, pp., 113-122.

DHS (Demographic Health Survey), 2006. DHS Final Reports. Available from : http://www.measuredhs.com/pubs/browse_region.cfm.

Diallo, M., 2001. Two-stroke engine two-wheel vehicles and the issue of the leaded gasoline phase-out: the study case of Burkina Faso and of Western African countries as users of 2-wheel vehicles. *Clean Air Initiative. Regional conference on the suppression of lead in gasoline in Sub-Saharan Africa*. Dakar, Senegal, June 26-28. Available from : http://www.cleanairnet.org/ssa/1414/articles-36194_Diallo_pdf.pdf.

Diaz Olvera, L., Plat, D., Pochet, P., Sahabana, M., 2007. La diffusion des motos-taxis dans l'Afrique urbaine au sud du Sahara. XLIII^{ème} colloque de l'Association de Science Régionale De Langue Française (ASRDLF). Grenoble-Chambéry, France, July 11-13. Available from : http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/17/57/29/PDF/Diaz_Plat_Pochet_Sahabana.pdf.

EPA, OAQPS, 2005. Review of the national ambient air quality standards for particulate matter: policy assessment of scientific and technical information. EPA-452/R-05-005a.

Etissa, D., Mohr, M., Schreiber, D., Buffat, P.A., 2008. Investigation of particles emitted from modern 2-stroke scooters. *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp., 183-195.

Fanou, L., A., Mobio, T.A., Creppy, E.E., Fayomi, B., Fustoni, S., Moller, P., Kyrtopoulos, S., Georgiades, P., Loft, S., Sanni, A., Skov, H., Ovrebo, S., Autrup, H., 2006. Survey of air pollution in Cotonou, Benin-air monitoring and biomarkers. *The Science of the Total Environment*, vol. 358, pp., 85-96.

Findings, 2002. Urban Air Quality in Cotonou. International Bank for Reconstruction and Development (World Bank), No 214, 4 p. Available from : http://www.cleanairnet.org-ssa/1414/articles-36210_pdf.pdf.

Godard, X., Ngabmen, H., 2002. Z comme zemidjan, ou le succès des taxi-motos. Godard X., *Les transports et la ville en Afrique au sud du Sahara. Le temps de la débrouille et du désordre inventif*. Paris, Karthala-Inrets, coll. Economie et Développement. pp., 397-406.

Guillaume, B., Liousse, C. Development of carbonaceous aerosol emission inventories for fossil fuel over Europe with focus on traffic at national and regional scales, in revision in *Journal of Geophysical Research*, 2009.

Guinot, B., Liousse, C., Cachier, H., Guillaume, B., et al., New emission factor estimates for biofuels and mobile sources. Submitted to *Atmospheric Environment*, 2010.

Gwilliam, K., 2003. Urban transport in developing countries. *Transport Reviews*, vol. 23, pp., 197-216.

Ikeda, Y., Nakajima, T., Sher, E., 1998. Air pollution from small two-stroke engines and technologies to control it. In: Sher, E. (Ed.), *Handbook of air Pollution from Internal Combustion Engines. Pollutant Formation and Control*. Academic Press, New York, pp., 441-476 (Chapter 13).

IEA (International Energy Agency), 2000. *Energy Statistics of Non-OECD Countries*, Paris.

Institut National de la Statistique, 2006. Available from : <http://www.statistics-cameroon.org/pdf/CEC2006F.pdf>.

IRF (International Road Federation), 2009. *World Road Statistics. Data 2002-2007*. Available from : http://www.irfnet.org/files-upload/files/P2_WRS_2007.pdf

Junker, C., Liousse, C., 2008. A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860-1997. *Atmospheric Chemistry Physics*, 8, pp., 1-13.

Jüttner, F., Backhaus, D., Matthias, U., Essers, U., greiner, R., Mahr, B., 1995. Emissions of two- and four-stroke outboard engines-I. Quantification of gases and VOC. *Water Research*, Vol. 29, No 8, pp., 1976-1982.

Kaffo, C., Kamdem, P., Tatsabong, B., Diebo, L.M., 2007. L'intégration des "motos-taxis" dans le transport public au Cameroun ou l'informel à la remorque de l'état: une solution d'avenir au problème de mobilité et de l'emploi urbain en Afrique Sub-Saharienne. Colloque International scientifique et technique (Le taxi, premier transport à la demande, solution d'avenir pour les mobilités urbaines) organisé par l'Institut pour la veille en mouvement. Lisbonne, Portugal. September, 20-21. Available from : <http://www.ville-en-mouvement.com/taxi/telechargements/Kamdern.pdf>.

Kumar, A., Barrett, F., 2008. Stuck in Traffic : Urban Transport in Africa. *Africa Infrastructure Country Diagnostic (AICD) report*. Available from : <http://siteresources.worldbank.org/EXTAFR-SUBSAHTRA/Resources/Stuck-in-Traffic.pdf>.

Leong, S.T., Muttamara, S., Laortanakul, P., 2002. Influence of benzene emission from motorcycles on Bangkok air quality. *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp., 651-661.

Lindén, J., Thorsson, S., Eliasson, I., 2008. Carbon monoxide in Ouagadougou, Burkina Faso – A comparison between Urban Background, Roadside and In-traffic Measurements. *Water Air Soil Pollut*, vol. 188, pp., 345-353.

Lioussé, C., Galy-Lacaux, C., Assamoi, E.-M., Ndiaye, N., Diop, B., Cachier, H., Doumbia, T., Gueye, P., Yoboue, V., Lacaux, J.-P., Guinot, B., Guillaume, B., Rosset, R., Castéra, P., Gardrat, E., Zouiten, C., Lambert, C., Diouf, A., Koita, O., Baeza, A., Annesi-Maesano, I., Didier, A., Audry, S. and Konaré, A., 2009. Integrated focus on West African cities (Cotonou, Bamako, Dakar, Ouagadougou, Abidjan, Niamey): Emissions, Air Quality and Health Impacts of Gases and Aerosols. Third International AMMA Conference on Predictability of the West African Moosoon Weather, Climate and Impacts, Ouagadougou (Burkina Faso), 20-24 July.

Mage, D., Ozolins, G., Peterson, P., Webster, A., Orthofer, R., Vandeweerd, V., Gwynne, M., 1996. Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment*, vol. 30, No 5, pp., 681-686.

McGranahan, G., Murray, F., 2003. Air pollution & health in rapidly developing countries. In *Earthscan* (Ed.), 227 p.

NNPC (Nigerian National Petroleum Corporation), 2005. Annual Statistical Bulletin. Available from : <http://www.nnpcgroup.com/performance/index.php>.

Nuti, M.P., 1998. Emissions from two-stroke engines. Society of Automotive Engineers, Warrendale.

Ouedraogo, Z.A., 2005. Project Pilote de Lutte Contre La Pollution de L'air à Ouagadougou. Clean Air Initiative : workshop on the finalization phase on leaded gasoline and urban air quality in Central and Western Africa, Dakar, Senegal, June 14-15. Available from : http://www.cleanairnet.org/ssa/1414/articles-69320_Ouedraogo.pdf.

Sahabana, M., 2006. Les motos-taxis à douala et leur perception par les pouvoirs publics: entre tolérance d'un secteur pourvoyeur d'emplois et de transport et volonté d'éradiquer une activité incontrôlable. Second international meeting CIDEGEF/city management. Evolution institutional and governance in the transport system in Sub-Saharan Africa, Douala, November 20-24, 15 p. Available from : www.cidegef.refer.org/douala/SAHABANA.doc.

Spezzano, P., Picini, P., Cataldi, D., Messale, F., Manni, C., 2008. Particle- and gas-phase emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from two-stroke, 50-cm³ mopeds. *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp., 4332-4344.

Trans-Africa, 2009. Aperçu du transport public en Afrique Subsaharienne. Available from : http://www.uitp.org/knowledge/pdf/transafrica_fr.pdf

Tsai, J.H., Hsu, Y.C., Weng, H.C., Lin, W.Y., Jeng, F.T., 2000. Air pollutant emission factors from new and in-use motorcycles. *Atmospheric Environment*, vol. 34, pp., 4747-4754.

UN (United Nations), 2002. Energy Statistics Database. Available from : <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3aMO%3btrID%3a1221>.

Volckens, J., Olson, D.A., Hays, M.D., 2008. Carbonaceous species emitted from handheld two-stroke engines. *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp., 1239-1248.

World Bank, 2002. Data population in Africa in 2002. Available from : <http://perspective.usher-brooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=1&codeStat=SP.POP.TOTL&anneeStat1=2002&grand>

esRegions=10&codetheme2=2&codeStat2=x&mode=carte&afficheNom=aucun&langue=fr&noStat=11.

Worou, C.T., 2005. Pollution atmosphérique au Bénin: cas de Cotonou. Etats des lieux, evaluation des actions d'atténuation et perspectives. Clean Air Initiative: workshop on the finalization phase on leaded gasoline and urban air quality in Central and Western Africa, Dakar, Senegal, June 14-15. Available from : http://www.cleanairnet.org/ssa/1414/articles-69320_Worou.pdf.

Yang, H.-H., Hsieh, L.-T., Liu, H.-C., Mi, H.-H., 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from motorcycles. Atmospheric Environment, vol. 39, pp., 17-25.