



HAL
open science

Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030 : élaboration d'inventaires et évaluation

Abé Yapo Eric-Michel Assamoi

► **To cite this version:**

Abé Yapo Eric-Michel Assamoi. Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030 : élaboration d'inventaires et évaluation. Planète et Univers [physics]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. Français. NNT: . tel-00585492

HAL Id: tel-00585492

<https://theses.hal.science/tel-00585492>

Submitted on 13 Apr 2011

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse III - Paul Sabatier

Discipline ou spécialité :

Physique-Chimie de l'Atmosphère

Présentée et soutenue par *Abé Yapo Eric-Michel ASSAMOI*

Le *Mardi 25 Janvier 2011*

Titre :

Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030 : élaboration d'inventaires et évaluation

JURY

Robert ROSSET, Professeur Univ. Paul Sabatier (Toulouse), Président

Hélène CACHIER, Maître de Conférences LSCE (Paris), Rapporteur

Claire GRANIER, Directeur de Recherches LATMOS (Paris), Rapporteur

Jean-Pierre LACAUX, Physicien LA (Toulouse), Examineur

Arona DIEDHIOU, Directeur de Recherches LTHE (Grenoble), Examineur

Didier HAUGLUSTAINE, Directeur de Recherches LSCE (Paris), Examineur

Paul ASSAMOI, Professeur Univ. Cocody (Abidjan), Invité

Catherine LIOUSSE, Chargée de Recherches LA (Toulouse), Directeur de thèse

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

Laboratoire d'Aérodologie (LA)

Directeur(s) de Thèse :

Catherine LIOUSSE

Rapporteurs :

Hélène CACHIER & Claire GRANIER

REMERCIEMENTS

Comment ne pas être en proie au doute lorsqu'on doit rédiger des remerciements à tous ceux et celles qui vous ont aidé dans la réalisation de ce travail. Au delà d'être un travail de recherche scientifique sanctionné par un diplôme, la thèse apparaît comme une grande aventure humaine. Aussi, je tiens à m'excuser auprès de toutes les personnes que je n'aurais pas explicitement mentionnées.

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse, Catherine Liousse, Responsable de l'Equipe « Emissions, Dépôts et Impacts » au sein du Laboratoire d'Aérodologie, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe pendant ces quatre années de thèse. Je tiens également à la remercier pour m'avoir communiqué sa grande passion pour le travail de recherche sur les émissions et les aérosols carbonés. Elle n'a pas hésité à me consacrer beaucoup de temps, avec toute son expertise, ses précieux conseils et ses explications qui m'ont permis de mener à bien ce travail de thèse qui s'est avéré passionnant.

Je tiens également à marquer ma gratitude à l'égard du Pr. Robert Rosset, qui a été « mon ange gardien » tout au long de cette thèse. Je profite de ces quelques mots, pour lui signifier tout le plaisir que j'ai eu à travailler avec lui. Sa disponibilité et ses encouragements m'ont été très précieux dans l'aboutissement de ce projet de thèse. Je tiens une fois de plus à le remercier pour avoir accepté de présider mon Jury de thèse.

Je profite aussi pour remercier tous les autres membres du Jury. Merci à mes rapporteurs, Mmes Hélène Cachier et Claire Granier dont les remarques et les différents échanges sur les inventaires d'émissions m'ont permis d'améliorer et d'approfondir ce travail. A Mrs Jean-Pierre Lacaux, Arona Diedhiou et Didier Hauglustaine qui ont accepté d'être tous membres de jury, je leur adresse toute ma gratitude pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également tout le personnel du Laboratoire d'Aérodologie pour m'avoir accueilli durant cette thèse, d'abord en la personne de son Directeur Franck Roux et également du Directeur de l'Ecole Doctorale SDU2E, Patrick Mascart. Je remercie tout particulièrement le service informatique du Laboratoire d'Aérodologie pour les nombreuses aides et les conseils

qu'ils ont pu me prodiguer lors de mon séjour. Il s'agit de Laurent Cabanas, Jérémy Leclercq, Didier Gazen et Juan Escobar. Mes remerciements et une appréciation toute particulière s'adressent à Bruno Guillaume qui a su m'initier et me guider tout au long de ma thèse sur la mise en œuvre et l'utilisation du modèle global TM5 : qu'il soit assuré de toute mon amitié. Un grand merci à Claire Delon, Jean-Pierre Lacaux, Corinne Jambert, Véronique Pont, Dominique Serça, Marc Mallet, Fabien Solmon, Corinne Galy-Lacaux, Eric Gardrat, Pierre Castera, Benjamin Guinot, Gaëlle Uzu, Fiona Tummon, Florent Malavelle, Thierno Doumbia, Marie Ouafou et Marcellin Adon pour le dynamisme et la bonne ambiance qui prévaut au sein de l'équipe « Emissions, Dépôts et Impacts ».

J'adresse ma filiale gratitude au Pr. Paul Assamoi, Directeur du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des fluides de l'Université de Cocody-Abidjan, ainsi qu'à toute ma famille pour leur support, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de mes études universitaires. Je tiens à les remercier infiniment pour m'avoir laissé choisir ma voie sans me critiquer, et de m'avoir fait confiance. Sans vous, rien n'aurait été possible. Merci pour votre soutien indéfectible et pour tout l'amour dont vous m'avez toujours entouré, sans lequel je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui. Ce travail vous est dédié.

Il me reste à remercier quelqu'un qui a été à mes côtés depuis le premier jour de cette aventure : Linda Okossi. Comment aurais-je fait sans toi ? Merci pour ton soutien quotidien et ta grande patience.

Je ne saurais terminer sans remercier mes amis de toujours qui m'ont soutenu durant toutes ces années : André Aoua Boua, Jean-Philippe Kobon-Monnet, Bakary Koné, Koré Dedy, Ghislain Azoda et Abdramane Dagnogo.

Pour conclure, je dirais simplement un grand merci à tous ceux ou celles qui ont contribué à mon épanouissement et au bon déroulement de cette thèse, par leurs conseils et leurs encouragements.

RESUME

Le climat régional et son évolution constitue une thématique majeure, tout particulièrement en Afrique, un continent témoin pour les changements climatiques et leurs différents impacts en termes de déforestation, de désertification et par suite, en termes de ressources vitales. Ces impacts multiples se répercutent sur de très nombreux secteurs d'activités : agronomie et rendement des cultures, écologie et écosystèmes, ressources en eau et hydrologie, qualité de l'air et de nombreux aspects sanitaires et socio-économiques connexes. La croissance démographique rapide que connaît le continent africain ces dernières décennies ainsi que l'exode rural, tendent de plus en plus à concentrer dans les mégapoles (e.g. Abidjan) une grande partie des activités nationales polluantes (transports, industries,...), en plus du développement des activités pétrolières et minières le long des côtes du Golfe de Guinée. De même, les combustions de biofuels sont largement répandues pour les besoins domestiques. Tout ceci contribue à des émissions anthropiques considérables et croissantes d'aérosols de combustion dont les inventaires sont encore largement bien mal connus sur le continent. L'objectif premier de cette thèse a permis de mettre en évidence et de mieux caractériser les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire associées à l'utilisation des véhicules deux roues en Afrique de l'Ouest. Les résultats ont mis en exergue de grandes différences sur les émissions, notamment celles portant sur le carbone organique primaire avec des émissions dans notre nouvel inventaire régional des deux roues supérieures à celles de tout le trafic dans les inventaires globaux existants selon un scénario bas dans 13 des 16 pays de notre étude. Par la suite, j'ai développé un nouvel inventaire d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire à l'échelle de l'Afrique pour l'année 2005, afin de réviser et de mettre à jour les données de l'inventaire global de Junker and Lioussé (2008). Les émissions 2005 en carbone suie (0,69 Tg) sont sensiblement égales à celle de l'inventaire global de Junker and Lioussé (2008) actualisé pour l'année 2005. Par contre, la différence est plus nette avec le carbone organique primaire où les émissions dans le nouvel inventaire sont, au moins, trois fois plus importantes que celles de Junker and Lioussé (2008). Par ailleurs, nous avons développé un inventaire à l'échelle de l'Afrique pour 2030 selon deux scénarios, REF et CCC. Globalement, les émissions du scénario CCC restent inférieures à celles du

scénario REF en 2030 avec des hausses de plus de 67% entre les années 2005 et 2030. Enfin, des tests de sensibilité ont été effectués sur l'année 2030, en considérant que les engins deux roues avaient tous des moteurs quatre temps au lieu des deux temps « actuels » en Afrique de l'Ouest et, en Afrique du Sud en appliquant les ratios de projections de la Pologne, typique de pays émergents. Ces hypothèses de travail ont permis de réduire considérablement les émissions futures, surtout dans le scénario CCC. Enfin, nous avons simulé les concentrations ambiantes à partir des données de nos nouveaux inventaires 2005 en utilisant le modèle global TM5. Il ressort des résultats 2005 que ce modèle peut simuler de manière satisfaisante les concentrations en zones rurales, moins bien en zones urbaines. Ces différences peuvent s'expliquer par un maillage trop grossier du modèle ($1^\circ \times 1^\circ$) et le site choisi (site trafic où les concentrations sont maximales). Du point de vue des épaisseurs optiques, le modèle fournit des ordres de grandeur satisfaisants avec cependant un positionnement encore imparfait des maxima en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale. Pour l'albédo de simple diffusion, nos résultats sont encourageants, sachant que le carbone suie et le carbone organique sont seuls pris en compte dans notre modèle global TM5.

ABSTRACT

Regional climate and its evolution is a major theme, particularly in Africa, a witness continent for climate changes and their various impacts in terms of deforestation, desertification and more generally in terms of vital resources. These different impacts apply to a number of activity sectors : agronomy and crop outputs, ecology and ecosystems, water resources and hydrology, air quality with various associated sanitary and socio-economic aspects. Rapid demographic growth over Africa in recent years together with rural depopulation result in the concentration in megapoles (e.g. Abidjan) of increasing parts of polluting national activities (transport, industries,...), further to oil and mining ones along the coasts of the Guinea Gulf. Also, biofuel combustions are largely used for domestic needs. All this results in large and increasing anthropogenic combustion aerosol emissions, the inventories of which are still largely unknown for Africa. A primary objective of this thesis is put into focus and improve the characterization of black carbon and primary organic carbon aerosols due to two-wheel vehicles in West Africa. Also, large differences have been observed between emissions, particularly ones bearing upon primary organic carbon due to such vehicles in our regional inventories vs. all traffic emissions in presently available global inventories in the “low” scenario for 13 over 16 countries. Next, I have developed a new regional inventory for black carbon and primary organic carbon emissions at Africa scale for the year 2005, so as to update the global inventory of Junker and Lioussé (2008). Our new 2005 emissions for black carbon (0.69 Tg) are about equal to those in the global inventory by Junker and Lioussé (2008) updated for 2005. Nevertheless, differences are larger for primary organic carbon for which our new emissions are three times over those from Junker and Lioussé (2008). Furthermore, we have developed a new emission inventory for Africa in 2030, according to two scenarios, REF and CCC. Generally, CCC emissions are lower than in scenario REF in 2030, with over 67% increase between 2005 and 2030. At last, sensitivity tests have been done considering that two-wheel vehicles will all be equipped with four-stroke engines instead of present two-stroke ones in West Africa, whereas in South Africa, future scenarios are now typical of emerging countries such as Poland. Such working assumptions have resulted in large reductions of future emissions, particularly in scenario CCC. We have simulated ambient

aerosol concentrations based on data issued from our new 2005 inventories, using the TM5 global model. From these 2005 results, TM5 which appears to be apt to satisfactorily simulate concentrations in rural zones, is not so successful in urban zones. Such differences can be attributed to too gross model resolution (1° by 1°) and the type of sources (traffic sources give high aerosol concentrations). As for optical thicknesses, TM5 gives satisfactory orders of magnitude, though with differences in the location of maxima in West and Central Africa. As for single scattering albedo, rather fine results are observed, when considering that only black carbon and organic carbon have been implemented in TM5.

ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AERONET	AERosol RObotic NETwork
AFRICACLEAN	Réseau pour la Qualité de l'Air en Afrique SubSaharienne
AMMA	Analyse Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
AOD	Aerosol Optical Depth
ATSR	Along Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BB	Biomass Burning
BC	Black Carbon
BOAD	Banque Ouest Africaine de Développement
CAD	Composition of Asian deposition
CCC	Carbon Constraint Case
CCN	Could Condensation Nuclei
CIESIN	Center for International Earth Science Information Network
COV	Composés Organiques Volatils
CTM	Chemical Transport Model
DDT	DichloroDiphénylTrichloroéthane
DEBITS	DEposition of BIogeochemically Trace Species
DHS	Demographic Health Survey
EC	Elemental Carbon
EDGAR	Emission Database for Global Atmospheric Research
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions
FRP	Fire Radiative Power
GBA	Global Burnt Area
GEIA	Global Emissions Inventory Activity
GES	Gaz à Effet de Serre

GICC	Gestion et Impacts du Changement Climatique
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GISS	Goddard Institute for Space Studies
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
IDAF	Igac Debits AFrica
IEA	International Energy Agency
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry
IMAGE	Integrated Model to Assess the Global Environment from Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP)
INDOEX	INDian Ocean EXperiment
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LA	Laboratoire d'Aérologie
LBA	Large Scale Biosphere
LOP	Long Observation Period
MESSAGE	Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impact from International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
MiniCAM	Mini-Climate Assessment Model from Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
NNPC	Nigerian National Petroleum Corporation
OC	Organic Carbon
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OCp	Organic Carbon Primary (carbone organique primaire)
ONU	Organisation des Nations Unies
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
ORISAM	ORganic and Inorganic Spectral Aerosol Modul
PIB	Produit Intérieur Brut
PM	Particulate Matter
POLES	Prospective Outlook on Long-term Energy Systems
POVA	POLLution dans les Vallées Alpines
RCP	Representative Concentration Pathways
REF	REFérence
SAFARI	Southern African Regional Science Initiative

SDU2E	Sciences De l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace
SOP	Short Observation Period
SSA	Single Scattering Albedo
SWAC	Sahel and West Africa Club
TC	Total Carbon
TM5	Transport Model (version 5)
TWG	Two-Wheel Gasoline
ZCIT	Zone de Convergence Inter-Tropicale

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	iii
ABSTRACT.....	v
ACRONYMES	vii
TABLE DES MATIERES.....	1
INTRODUCTION GENERALE.....	5
CHAPITRE 1 : L'AEROSOL DE COMBUSTION EN AFRIQUE.....	13
1.1. Introduction.....	14
1.2. Définition de l'aérosol de combustion.....	14
1.3. Le carbone et son « continuum »	15
1.4. Propriétés et impacts des aérosols de combustion.....	18
1.3.1. Propriétés des aérosols de combustion	18
1.3.2. Impacts des aérosols de combustion.....	25
1.4. Emissions des aérosols de combustion	28
1.4.1. Feux de biomasse.....	28
1.4.2. Combustibles fossiles et biofuels.....	31
1.5. Pourquoi développer maintenant l'étude des grandes villes en Afrique ?.....	33
1.6. Conclusion	36
CHAPITRE 2 : INVENTAIRE 2002 DES EMISSIONS DE CARBONE SUIE (BC) ET DE CARBONE ORGANIQUE PRIMAIRE (OCp) PAR LES DEUX ROUES EN AFRIQUE DE L'OUEST.....	39
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

CHAPITRE 3 : INVENTAIRES D’EMISSIONS DE CARBONE SUIE (BC) ET DE CARBONE ORGANIQUE PRIMAIRE (OCp) EN AFRIQUE EN 200575

3.1. Introduction.....	76
3.2. Inventaire d’émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) en Afrique pour l’année 2005.....	76
3.2.1. Méthodologie.....	76
3.2.2. Données de consommations.....	79
3.2.3. Emissions.....	98
3.3. Comparaison de mon nouvel inventaire avec les inventaires de Junker and Liousse (2008) et de Bond et al. (2004).....	114
3.3.1. Consommations.....	114
3.3.2. Emissions.....	117
3.4. Comparaison entre les émissions de combustibles fossiles et de biofuels et celles des feux de biomasse, de carbone suie et de carbone organique primaire.....	122
3.4.1. Carbone suie.....	122
3.4.2. Carbone organique primaire.....	123
3.4.3. Conclusion partielle.....	124
3.5. Conclusion.....	125

CHAPITRE 4 : INVENTAIRES D’EMISSIONS DE CARBONE SUIE (BC) ET DE CARBONE ORGANIQUE PRIMAIRE (OCp) EN AFRIQUE : PROJECTIONS 2030127

4.1. Introduction.....	128
4.2. Méthodologie de construction de l’inventaire 2030.....	128
4.2.1. Données de consommation.....	128
4.2.2. Le modèle POLES.....	129

4.2.3. Données utilisées pour l'élaboration de l'inventaire futur	131
4.3. Facteurs d'émissions	131
4.4. Résultats.....	132
4.4.1. Consommations	132
4.4.2. Emissions.....	135
4.5. Etude de sensibilité des émissions en 2030	141
4.5.1. Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique des deux roues en Afrique de l'Ouest en 2030.....	142
4.5.2. Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire en Afrique du Sud : nouvelle projection 2030	144
4.5.3. Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique des déchets animaux en Afrique de l'Ouest en 2030.....	148
4.5.4. Conclusion partielle	149
4.6. Comparaison de mon nouvel inventaire avec les inventaires de Junker and Lioussé (2008) et de l'IPCC (Lamarque et al., 2010).....	150
4.7. Conclusion	155

CHAPITRE 5 : SIMULATIONS AVEC LE MODELE ORISAM-TM5.....157

5.1. Introduction.....	158
5.2. Présentation générale du modèle de chimie-transport TM5	158
5.2.1. Généralités sur le modèle TM5.....	158
5.2.2. Bref descriptif du modèle TM5	158
5.2.3. Transport des polluants dans TM5	160
5.2.4. Dépôts chimiques dans TM5	160
5.2.5. Hygroscopicité et vieillissement des aérosols	162
5.3. Module d'aérosols ORISAM	163
5.4. Descriptif des simulations.....	163
5.5. Evaluation du modèle ORISAM-TM5 à l'échelle de l'Afrique	164
5.5.1. Distributions spatiales des aérosols carbonés en 2005	165
5.5.2. Distributions spatiales des aérosols carbonés en 2030	169
5.5.3. Zoom sur les concentrations de carbone suie et de carbone organique en quelques stations, pour 2005 et 2030	174
5.5.4. Estimations des propriétés radiatives des aérosols carbonés dans ORISAM-TM5.....	188
5.6. Conclusion	198

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	201
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	205
ANNEXES	225

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique représente une grande menace pour la croissance et le développement durable en Afrique (OCDE, 2007). L'Afrique est le continent qui contribue le moins aux émissions globales de gaz à effet de serre (GES). Pourtant, elle est particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique, notamment à cause de sa dépendance à l'égard des rendements de l'agriculture, de la pauvreté et du manque de capacités. Les effets du changement climatique (réduction de la production agricole, détérioration de la sécurité alimentaire, incidence accrue des inondations et de la sécheresse, propagation des maladies et augmentation du risque de conflits en raison de la raréfaction des terres et de l'eau) sont d'ores et déjà évidents. Des mesures doivent être prises pour réduire à l'avenir les niveaux d'émissions dans le monde et permettre à l'Afrique de s'adapter au changement climatique. Elles doivent tenir compte non seulement de la grande vulnérabilité de l'Afrique, mais également de ses besoins légitimes en matière de développement ainsi que de l'important surcoût financier créé par cette adaptation, soit entre 5 et 10 % du PIB du continent (IPCC, 2007). Les efforts doivent désormais porter en priorité sur l'intégration de l'adaptation dans la planification nationale et la mobilisation du soutien en faveur de la gestion du risque climatique en Afrique. Dans l'état actuel de nos connaissances, il est certes encore délicat d'évaluer la nature et l'ampleur de ces changements dans un futur proche (~2030) ou un avenir plus lointain (~2100), tout particulièrement pour ce qui concerne le régime des précipitations, bien plus que les températures elles-mêmes qui constituent les paramètres climatologiques par excellence. Depuis longtemps, les interactions homme-climat sont au cœur de nombreuses études, notamment l'hominisation de l'espèce humaine suite à l'extension des savanes en Afrique de l'Est et du Centre. Actuellement, se pose avec de plus en plus d'acuité, le problème inverse de modifications par l'homme de son environnement. Il y a là une thématique très peu abordée en général et encore quasiment inédite pour l'Afrique, comparativement à d'autres continents, Europe, Amérique du Nord et Asie. Mon projet de thèse s'inscrit dans cette approche exploratoire par la voie du développement et de mises à jour des inventaires d'émissions de particules carbonées de combustion,

suivies de la modélisation des concentrations ambiantes en aérosols carbonés et de leur évolution selon différents scénarios d'émissions et leurs impacts radiatifs, avec comparaison modèle-mesures. Cette voie « émissions » constitue clairement une approche directe et frontale à l'analyse de l'impact des activités humaines sur l'environnement en Afrique. En effet, elle incorpore nécessairement les effets d'urbanisation explosive, d'industrialisation, ainsi que l'exploitation accélérée des ressources minières et pétrolières, de même que le caractère de plus en plus intensif des pratiques agricoles qui affectent sévèrement le continent africain et sa région Ouest tout particulièrement.

Désormais on admet une rupture d'équilibre : la pollution ne peut plus être résorbée « naturellement » et progressivement, car elle perturbe les principaux cycles biochimiques et géochimiques de la biosphère. La pollution, fondamentalement, n'est rien d'autre que la face cachée ou plutôt trop longtemps ignorée de la production-consommation. Il s'agit ici, essentiellement, des rejets accompagnant tout processus de combustion. Les plus importantes sources de pollution sont les combustibles fossiles (diesel, pétrole) et les biofuels (bois, charbon) utilisés dans les secteurs industriel, domestique et le trafic. Ces combustions sont à l'origine d'importants rejets de particules dans l'atmosphère, dans l'eau et les sols. A cela, il faut ajouter l'usage intensif d'engrais chimiques et d'insecticides en agriculture, sans oublier les décharges « sauvages », les dépôts industriels de toutes sortes et les autres déchets toxiques. Il serait difficile de dresser une liste exhaustive de toutes les substances qui se dispersent dans l'atmosphère, les eaux douces, les mers et les sols. Dans les pays industrialisés, l'ampleur des dégâts causés à l'environnement a provoqué une prise de conscience de l'opinion publique, stimulée par les mouvements écologistes. Des mesures de prévention et de lutte pour réduire ou tout au moins stabiliser la pollution ont été envisagées à l'échelle internationale par les pays industrialisés. Ainsi, une politique de protection de l'environnement se met progressivement en œuvre. L'interdiction de certaines substances chimiques (l'une des premières et retentissantes interdictions fut celle du DDT), la distribution d'essence sans plomb, la réglementation portant sur les particules, une meilleure gestion des ressources (économies d'énergies) en sont quelques exemples. Conjointement, de nouvelles techniques de dépollution sont progressivement mises en place. A noter cependant que la pollution particulaire n'est étudiée de manière exhaustive que depuis une dizaine d'années, contrairement à la pollution photochimique, qui l'est depuis près de 30 ans. Néanmoins, vu l'importance du phénomène, nombre de réseaux d'observations et de campagnes de mesures ont vu leurs champs d'actions étendus aux particules. Parmi les réseaux d'observation, citons :

- IMPROVE aux Etats-Unis,
- DEBITS à l'échelle du globe avec plusieurs composantes : IDAF en Afrique, LBA en Amérique du Sud et CAD en Asie Orientale, Indonésie et Australie.
- EMEP en Europe.

Quant aux campagnes de mesures scientifiques récentes, des résultats importants sur les caractéristiques de l'aérosol ont été obtenus pendant : ESCOMPTE (en Méditerranée), INDOEX (en Asie), POVA (dans les Alpes) et AMMA (en Afrique) entre autres.

Les mécanismes agissant dans les pollutions particulières sont très complexes, car ils font intervenir de nombreuses réactions chimiques, la coexistence de différentes phases particulières (gaz-liquide-solide) avec une large gamme de tailles des particules. Aussi, le niveau de connaissance sur tous ces mécanismes n'est encore que partiel et l'investigation dans ce domaine (pollution atmosphérique particulière) apparaît pertinente et justifiée. En effet, les rapports successifs du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) reflètent le progrès des idées sur la question de l'attribution du changement climatique récent aux activités humaines et particulièrement aux aérosols. L'observation du réchauffement climatique à travers la prise en compte des sulfates et du carbone suie avait été évoquée dans le premier rapport IPCC de 1990 et plus récemment, la prise en compte de la plupart des aérosols (sulfates, carbone suie, carbone organique et poussières désertiques) est effective (2^{ème} rapport IPCC). Donc, même s'il est sensiblement plus complexe à évaluer que celui des gaz à effet de serre (GES), le rôle climatique des aérosols carbonés est maintenant également avéré. De plus, il est au centre de nombreux débats, depuis que Hansen et al. (2000) ont montré que pour réduire le réchauffement climatique, l'effort devrait porter à la fois sur les réductions d'émissions de GES mais également, sur les aérosols carbonés. Une étude plus récente a même suggéré qu'il serait plus efficace de réduire les émissions d'aérosols carbonés que celles des gaz à effet de serre (Jacobson, 2002), le temps de vie des aérosols étant sensiblement plus court que celui des GES.

Une étape importante a ainsi été franchie avec la mise en évidence de l'impact anthropique, à partir des études des variations des émissions dans le temps. Par exemple, au cours des 20^{ème} et 21^{ème} siècles, on a pu montrer que la croissance des activités anthropiques n'ont cessé d'augmenter la charge atmosphérique en particule (gaz aussi), comme le montre le graphe des émissions de carbone suie (BC) de 1860 à 1997 (figure 1).

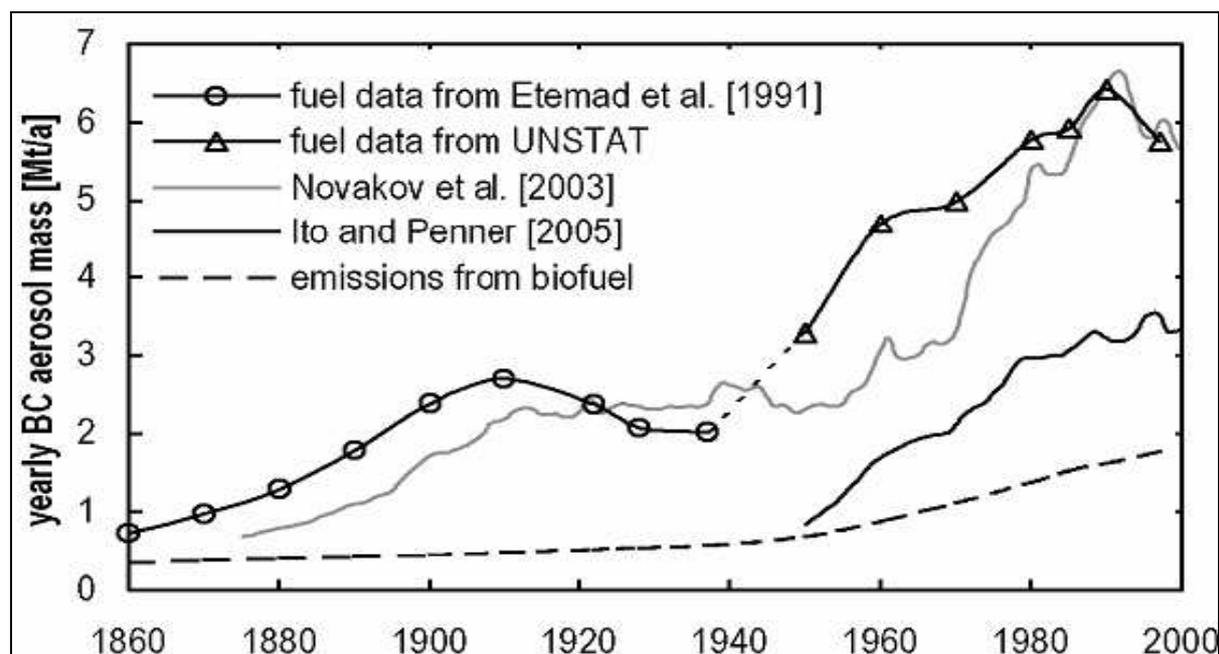


Fig. 1 : Inventaire d'émissions globales de carbone suie sur la période 1860-1997 (Junker and Liousse, 2008).

Par ailleurs, les inventaires existants à l'échelle globale (Bond et al, 2004 ; Junker and Liousse, 2008), sont construits à partir de données d'organismes internationaux (ONU et IEA). Les données de consommation en combustibles utilisées pour la construction de tels inventaires peuvent diverger selon les sources, et sont à l'origine de nombreuses incertitudes. Aussi, lors de la comparaison entre les données d'un organisme international (e.g. l'ONU) et d'un organisme régional africain de surveillance de la qualité de l'air (e.g. AFRICACLEAN) se rapportant à la consommation du carburant diesel dans certains pays africains, nous nous sommes rendu compte des écarts importants pouvant exister entre ces données de différentes origines (cf. figure 2). En tout état de cause, si les considérations précédentes portent pour l'essentiel sur le domaine global, il est aussi très clair qu'il convient maintenant d'adopter une approche plus régionale des inventaires d'émissions et de leurs effets, particulièrement pour les particules émises à durées de vie sensiblement plus courtes que les GES et donc, plus proches de leurs sources. Une telle approche régionale, encore quasiment inexistante, doit de toute urgence être développée pour l'Afrique, l'Afrique de l'Ouest notamment : c'est un objectif majeur de cette thèse.

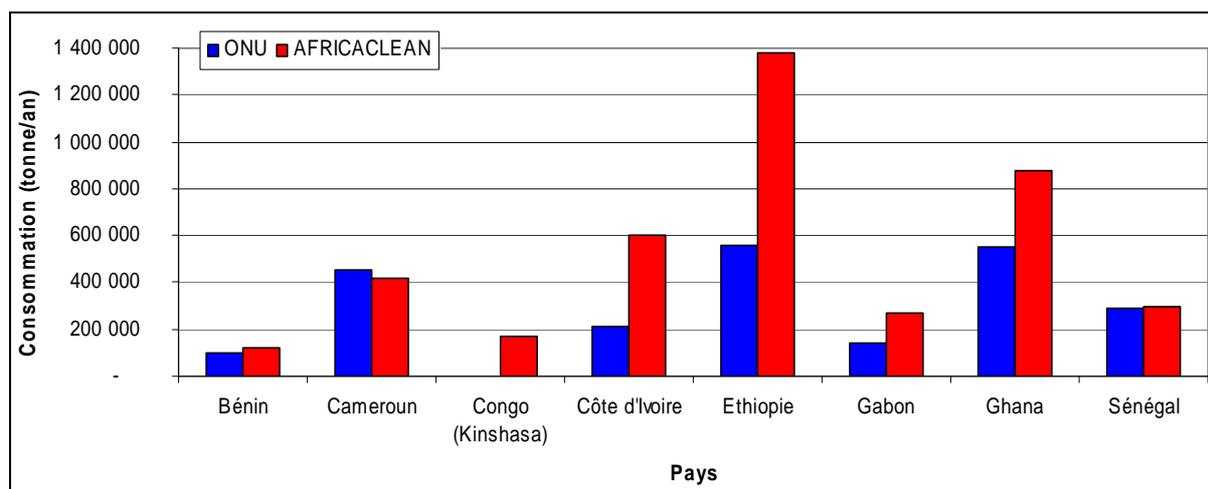


Fig. 2 : Consommations de diesel dans quelques pays africains en 2000 selon deux bases de données : celle de l'ONU (en bleu) et celle d'AFRICACLEAN (en rouge).

C'est dans ce contexte que s'inscrit mon travail de thèse se basant sur une problématique d'amélioration de la compréhension et une meilleure représentation du forçage anthropique dû aux aérosols de combustion, mais aussi une préoccupation de la qualité de l'air en Afrique. Les thèmes scientifiques abordés au cours de ces travaux permettent d'établir l'état de l'art dans le domaine des émissions d'aérosols de combustion (carbone suie et carbone organique primaire) et de mettre en exergue les insuffisances, des évaluations de leurs impacts sur notre environnement, lacunes qu'il convient de combler.

Ainsi, ce manuscrit est articulé autour de cinq chapitres. Après un **premier chapitre** qui fait le point sur les aérosols de combustion en Afrique (impact, émissions, etc), mon travail s'articule autour de deux axes complémentaires développés en 4 chapitres.

Le premier axe, focalisé sur le développement de nouveaux inventaires à l'échelle de l'Afrique pour le carbone suie et le carbone organique primaire, est composé de 3 chapitres. Le **chapitre 2** développe le premier volet consistant à l'amélioration de la caractérisation des émissions d'aérosols carbonés de combustion en Afrique. Aussi, à travers une étude régionale sur les véhicules à deux roues en Afrique de l'Ouest, nous avons quantifié les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire par ces engins pour l'année 2002. Cet inventaire a été comparé aux inventaires globaux existants (Bond et al., 2004 ; Junker and Lioussé, 2008), afin de montrer tout l'intérêt qu'il y a à prendre en compte les spécificités régionales dans la constitution de ces inventaires. Les **chapitres 3 et 4** s'attellent à la présentation des nouveaux inventaires d'émissions d'aérosols carbonés de combustion (carbone suie et carbone organique primaire) développés à l'échelle de l'Afrique pour toutes les sources de combustion (combustibles fossiles et biofuels).

Des intercomparaisons avec trois autres inventaires globaux disponibles (inventaires de Bond et al. (2004) ; Junker and Lioussé (2008) et IPCC (Lamarque et al. (2010)) sont également présentées.

Dans le **chapitre 3**, nous présentons le nouvel inventaire d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire en Afrique pour l'année 2005. Pour se faire, nous nous sommes servis des données de consommations de combustibles fossiles et biofuels issues de plusieurs sources de données (ONU, IEA, enquêtes-questionnaires,...), auxquelles nous avons associé des facteurs d'émissions qui, pour certains, ont été mis à jour. Un test de sensibilité portant sur la spatialisation des données d'émissions en Afrique du Sud, est également présenté.

Le **chapitre 4** présente l'inventaire pronostique des émissions en Afrique (2030) issu d'un modèle de simulations des besoins énergétiques POLES et, tenant compte de deux scénarios : un scénario de référence (REF) qui considère un statu quo de la société actuelle. En d'autres termes, les facteurs d'émissions utilisés en 2030 sont les mêmes que ceux utilisés en 2005. Par contre, le second scénario (CCC), plus contraignant, s'appuie sur le protocole de Kyoto pour limiter les émissions d'aérosols carbonés. Des tests de sensibilité ont été effectués pour les différents scénarios des inventaires 2030 afin d'illustrer l'impact des hypothèses avancées dans de tels travaux. Des modifications ont ainsi été faites sur les données d'Afrique du Sud et de l'Ouest et, sur la prise en compte des déchets animaux. En Afrique du Sud, les données de consommations qui ont permis la projection en 2030 ont été produites sur la base des ratios de consommations 2005/2030 d'un pays semi-développé, ce qui n'était pas le cas auparavant, l'Afrique du Sud étant classée dans le grand groupe « Afrique Sub-Saharienne » du modèle POLES comprenant tous les pays d'Afrique, à l'exception de quatre pays de l'Afrique du Nord (Algérie, Libye, Maroc et Tunisie). Pour le test en Afrique de l'Ouest, nous avons émis une hypothèse relative à ce que deviendraient les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire si tous les véhicules deux roues, actuellement majoritairement équipés de moteurs deux temps, étaient remplacés par des moteurs quatre temps. Enfin, le dernier test de sensibilité a porté sur la prise en compte des déchets animaux en tant que déchets végétaux afin de montrer leur fort impact sur les émissions, en particulier celles dues au carbone organique primaire.

Le deuxième axe de mon travail ne comporte qu'un seul chapitre : le **chapitre 5** qui porte sur les résultats du modèle global TM5, qui utilise comme données d'initialisation les inventaires qui viennent d'être développés aux chapitres 3 et 4 précédents pour les années 2005 et 2030. Je présente ici les cartes de distributions spatiales et temporelles de carbone suie et de carbone organique que j'ai obtenues. Pour l'année 2005, les concentrations de carbone suie et de carbone organique obtenues avec mon nouvel inventaire ont été comparées à celles obtenues à partir de

l'inventaire global de Junker and Lioussé (2008). Par ailleurs, les concentrations fournies par le modèle TM5 ont été comparées aux mesures effectuées lors d'observations et/ou de campagnes in situ (exemple AMMA). En fin, nous avons tenté d'évaluer les propriétés radiatives données par le modèle TM5 à travers une étude comparative avec les épaisseurs optiques et des albédos de simple diffusion du satellite MODIS et du réseau AERONET.

Pour terminer, les principaux résultats obtenus au cours de ce travail sont présentés dans une conclusion générale et les perspectives qui s'en dégagent sont évoquées.

En annexe à la thèse, notons que le « questionnaire sur les consommations de combustibles fossiles et de biofuels : réponse du Burkina Faso » est présenté et les données recueillies analysées succinctement. Une liste des pays d'Afrique et des secteurs d'activité qui ont été modifiés est jointe. Il y est également présenté tous les facteurs d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire de tous les combustibles fossiles et les biofuels par secteurs d'activités et par niveau de développement des pays. Une définition de ces combustibles fossiles et biofuels dans l'assertion de l'ONU a aussi été insérée. Enfin, les résultats relatifs aux concentrations de carbone suie et de carbone organique d'un test de sensibilité en Afrique du Sud (scénario NEW AFS) en 2005 ont été présentés.

CHAPITRE 1

L'AEROSOL DE COMBUSTION EN AFRIQUE

Sommaire

1.1. Introduction	14
1.2. Définition de l'aérosol de combustion	14
1.3. Le carbone et son « continuum »	15
1.4. Propriétés et impacts des aérosols de combustion	18
1.3.1. <i>Propriétés des aérosols de combustion</i>	18
1.3.2. <i>Impacts des aérosols de combustion</i>	25
1.4. Emissions des aérosols de combustion.....	28
1.4.1. <i>Feux de biomasse</i>	28
1.4.2. <i>Combustibles fossiles et biofuels</i>	31
1.5. Pourquoi développer maintenant l'étude des grandes villes en Afrique ?	33
1.6. Conclusion.....	36

1.1. Introduction

Ce chapitre rend schématiquement compte d'un état de l'art sur les aérosols carbonés (« black carbon » et carbone organique) en Afrique et répond également à la question de l'intérêt d'étudier cet aérosol sur le continent africain. Une première partie, consacrée à la définition de l'aérosol de combustion, est suivie par un descriptif général de leurs caractéristiques : composition chimique, hygroscopicité, propriétés optiques, granulométrie et impacts. Une troisième partie présente les émissions d'aérosols carbonés provenant des feux de biomasse et des combustibles fossiles et des biofuels. Enfin, le contexte spécifique d'une étude sur le continent africain est présenté dans la quatrième partie.

1.2. Définition de l'aérosol de combustion

Les aérosols de combustion sont émis par des sources de combustion de combustibles fossiles, de biofuels et de biomasse. Si une combustion (oxydation) parfaite transforme le carbone en gaz carbonique, la plupart des combustions incomplètes conduisent à l'émission de composés gazeux autres que le seul CO₂, ainsi qu'à l'émission de particules dites primaires : nous avons le carbone suie (« black carbon » ou BC) et du carbone organique primaire (OCp). Les polluants gazeux émis comprennent également des composés carbonés tels que le monoxyde de carbone (CO) et des composés organiques volatils (COV). Aussi par photochimie, les COV peuvent former des particules organiques dites d'origines secondaires ou SOA. Notons que le carbone organique peut également provenir des COV d'origine biogénique. Les concentrations en aérosols de combustion varient dans l'atmosphère avec le carbone organique toujours prépondérant par rapport au carbone suie. La définition et les techniques de mesures dans l'atmosphère des aérosols carbonés (composés de « black carbon » et de carbone organique) sont encore sujets à débats dans la communauté scientifique, encore amplifié par la découverte récente d'un type de carbone : le « brown carbon » capable d'absorber la lumière (Andreae and Gelencsér, 2006). La définition du carbone suie et du carbone organique s'appuie sur une grande variété de définitions basées sur les processus d'émissions, les caractéristiques morphologiques, leur composition chimique et les propriétés optiques. Etant donné que ces définitions ne sont pas généralement cohérentes entre elles, la terminologie est complexe. Nous présentons par la suite, un ensemble de définitions sur les différents termes se rapportant à l'aérosol de combustion.

1.3. Le carbone et son « continuum »

Dans ce paragraphe, nous mettrons en évidence les différences qui existent entre les noms donnés au carbone.

Lorsque la combustion est incomplète, deux phénomènes conduisent à la formation des aérosols de combustion :

- La dismutation du CO selon la réaction : $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$
- La polymérisation/déshydrogénation du combustible formant du carbone graphitique et l'action oxydante (e.g. par OH), à l'origine de l'agglomération à ce carbone graphitique d'un nombre croissant de cycles aromatiques véhiculés par des précurseurs gazeux (e.g. HAPs, C_2H_2).

Ainsi, les aérosols carbonés formés présentent une grande variété de structures, très compactes (e.g. fullerènes) ou très ouvertes (chaînes, structures fractales,...). Ces structures ne se distinguent pas entre elles de manière « tranchée », ce qui se traduit par leur plus ou moins grande densité et un contenu en carbone graphitique variable, à l'origine d'un « continuum » de leurs propriétés optiques et chimiques. L'aérosol carboné apparaît ainsi comme un mélange complexe de particules constituées d'un squelette de graphite associé à des fonctions C-O et des chaînes d'hydrocarbures localisées en surface (Cachier, 1998). La fraction carbonée totale (TC) se sépare en plusieurs composantes : le « black carbon » dont le carbone élémentaire ou graphitique et le carbone organique.

	Thermochemical Classification	Molecular Structure	Optical Classification
↑ Refractiveness	Elemental Carbon (EC)	<i>Graphene Layers (graphitic or turbostratic)</i>	Black Carbon (BC)
	Refractory Organics	<i>Polycyclic Aromatics, Humic-Like Substances, Biopolymers, etc.</i>	Colored Organics
	Non-Refractory Organics (OC)	<i>Low-MW Hydrocarbons and Derivatives (carboxylic acids, etc.)</i>	Colorless Organics (OC)
			↑ Specific Absorption

Fig. 1.1 : Classification et structure moléculaire des aérosols carbonés (Pöschl, 2003).

La distinction entre carbone élémentaire, « black carbon » et carbone organique est délicate. La séparation entre ces composés ne peut se faire chimiquement, car on ne connaît que 20 à 40% des structures moléculaires composant le carbone (Cachier, 1998). Faute de définition purement chimique, la définition de ces 3 éléments du carbone s'appuie sur leurs propriétés thermiques et/ou thermochimiques pour établir des distinctions dans le continuum carbone de la figure 1.1.

Le carbone suie se présente sous forme d'agrégats de sphérules faites de couches de graphène (cristal bidimensionnel de carbone dont l'empilement constitue le graphite), composé presque exclusivement de carbone, avec des quantités mineures d'autres éléments liés, en particulier l'hydrogène et l'oxygène. Cette définition ne prend pas en compte les substances organiques (huiles par exemple) souvent présentes dans ou sur les particules de combustion (mélange interne/externe). Le carbone suie est donc identifié comme une forme impure de carbone graphitique (White and Germer, 1941 ; Grisdale, 1953 ; Medalia and Rivin, 1982 ; Bockhorn, 1994). Si le carbone suie était totalement graphitique, il serait composé de carbone seul avec une structure de corps noir associé à une forte densité (figure 1.1), mais il n'en contient que 5 à 10% (Cachier, 1998). Le carbone élémentaire pur, est un matériau absolument inerte en conditions atmosphériques. Il ne peut être oxydé dans l'air qu'à des températures supérieures à 600° C.

Les particules de carbone suie sont des particules facilement identifiables par microscopie électronique du fait de leur morphologie particulière (Oberlin, 1989). Ces particules primaires (petites sphères de 10 à 50 nm de diamètre) ne persistent pas dans l'atmosphère, car elles se regroupent immédiatement pour former des agrégats qui constituent leur forme la plus stable (Wentzel et al., 2003). Lors des émissions de fumées, ces groupes ont tendance à former des structures ouvertes, ensuite transformées par les processus de vieillissement, incluant l'absorption de l'eau (Colbeck et al, 1990 ; Weingartner et al, 1997 ; Ruellan et al, 1999 ; Abel et al, 2003 ; Onischuk et al., 2003). Cependant, pour les particules associées à la combustion de biomasse, elles sont généralement présentes sous forme d'agrégats sphériques compacts qui semblent d'être plus résistants aux processus atmosphériques de vieillissement (Martins et al., 1998). Le carbone suie est en général considéré comme insoluble dans l'eau et les solvants organiques. Bien que cela soit certainement vrai pour les graphites purs, la plupart des particules issues de la combustion se comportent différemment (Medalia and Rivin, 1982). Les particules issues de la combustion de la biomasse contiennent également une large fraction soluble dans l'eau, y compris de substances absorbant la lumière (Hoffer et al., 2005 ; Decesari et al., 2006). Bien que la composition élémentaire moyenne des particules de

carbone suie soit généralement dominée par le carbone (typiquement de l'ordre 85-95%, C 3-8% O, H et 1-3% en poids dans divers types de particules de « black carbon » (Ebert, 1990 ; Clague et al., 1999 ; Grieco et al., 2000 ; Ferry et al., 2002)), elles peuvent être considérées comme un complexe tridimensionnel de polymères organiques avec capacité à transférer des électrons, plutôt que simplement une forme amorphe de carbone élémentaire (Chang et al., 1982). La fraction massique relativement faible de l'oxygène dans le carbone suie peut être « trompeuse », puisque cette fraction est en fait répartie en surface dans les divers groupes fonctionnels, de sorte qu'il ne se comporte pas en tant que carbone graphitique pur dans la plupart des processus atmosphériques. La quantité d'oxygène en surface de ces particules dépend des conditions de combustion, avec des régimes de combustion plus efficaces, avec une plus grande abondance d'oxygène et des structures à défauts à la surface de la particule (Chughtai et al., 2002 ; Su et al., 2004). Cette forme augmente ainsi la réactivité chimique des particules (y compris leurs propriétés thermochimiques) et leur caractère hydrophile dans l'atmosphère. Dans la littérature et selon Pöschl (2003), le carbone suie est appelé de différentes manières. Le terme « BC » est généralement utilisé quand on mesure le carbone suie par des méthodes optiques ou thermo-optiques, tandis que le terme « EC » est classiquement la dénomination préférentielle dans les classifications thermochimiques traitant de la composante réfractaire. Notons que dans certaines études, EC est également la partie graphitique. Sur le BC, on a vu qu'il existe des fonctions H et O. Le nombre de ses fonctions va varier avec le type de combustion et on va avoir une part significative de matières organiques (OC) adsorbées lors du refroidissement des produits de combustion, environ 10% d'atomes d'hydrogène et des traces de différents autres éléments comme l'oxygène ou l'azote piégés dans la structure graphitique du noyau carboné (Seinfeld and Pandis, 1998), des métaux également (cf. figure 1.1). Dans le « continuum » du carbone et de matières organiques, il est difficile de séparer le BC du OC. Diverses méthodes de mesures ont été développées et utilisées pour séparer les composantes de l'aérosol carboné, selon certaines de leurs propriétés caractéristiques (Rosen and Novakov, 1977 ; Ellis and Novakov, 1982 ; Cadle et al., 1983 ; Andreae et al., 1984 ; Gundel et al., 1984 ; Hansen et al., 1984 ; Heintzenberg, 1988 ; Hitznerberger et al., 1999 ; Schmid et al., 2001 ; Ten Brink et al., 2004). Notons qu'une complexité supplémentaire est apparue récemment indiquant que certains composés organiques, en plus du BC peuvent également contribuer à l'absorption de lumière. Ce dernier point a été prouvé lors de mesures chimiques en laboratoire ou lors de mesures directes de la dépendance spectrale de l'absorption de la lumière (Mukai and Ambe, 1986 ; Havers et al., 1998 ; Hoffer et al., 2005) : il s'agit du « Brown carbon » (Andreae and Gelencsér, 2006).

Une des méthodes les plus récentes qui permet la distinction entre BC et OC est la méthode thermo-optique. Même pour cette méthode, il est important de préciser que plusieurs protocoles existent avec des profils différents de température (Chow et al., 2001) avec de grandes incertitudes sur la séparation du BC de OC (Cachier et al., 2004 ; Watson et al., 2004). Aussi, le problème de la distinction entre espèces particulaires carbonées (« black carbon » et carbone élémentaire) est un réel problème, notamment pour les modélisateurs qui notent des différences de concentrations entre BC et EC en fonction de la technique de mesure : ces écarts sont de l'ordre de 2 à 3 avec les méthodes optiques/thermiques (Chow et al., 2001 ; Schmid et al., 2001 ; Currie et al., 2002 ; Jeong et al., 2004 ; Ten Brink et al., 2004 ; Watson et al., 2005 ; Hittenberger et al., 2006 ; Reisinger et al., 2008).

Dans la suite de notre exposé, nous utiliserons sans distinction le terme de carbone suie ou de « black carbon » (BC), et pour éviter toute confusion avec le graphite, on n'utilisera pas le terme EC (carbone élémentaire).

1.4. Propriétés et impacts des aérosols de combustion

Les aérosols de combustion contribuent à l'évolution du climat d'une part, en intervenant sur le bilan radiatif de la terre, et d'autre part, ils peuvent être nocifs pour la santé humaine. Ces deux notions sont directement liées aux caractéristiques physico-chimiques des aérosols. Avant de détailler les impacts des aérosols sur le climat et la santé humaine, il est donc important de rappeler brièvement les caractéristiques physico-chimiques des aérosols de combustion qui lui confèrent ses propriétés.

1.3.1. Propriétés des aérosols de combustion

Une fois en suspension, les aérosols de combustion continuent à évoluer en tailles et en compositions chimiques. Ces dernières se trouvent alors modifiées par de nombreux processus complexes dont les principaux sont la condensation d'espèces gazeuses, l'évaporation de certaines composantes de la phase particulaire, la coagulation avec d'autres particules et les réactions chimiques tant internes qu'externes aux particules. Tous ces éléments induisent des propriétés spécifiques aux aérosols de combustion que nous allons détailler.

1.3.1.1. Composition chimique

L'aérosol de combustion a une composition chimique liée aux types de sources, avec des ratios BC/OC variables. L'aérosol africain consiste en un mélange d'aérosols carbonés ou de combustion et de poussières, que ce soient en zones rurales et en zones urbaines. Dans ce contexte, depuis une vingtaine d'années, différents projets et programmes de recherche ont permis de mieux caractériser la composition chimique des aérosols de combustion sur le continent africain. Ces travaux ont d'abord eu lieu dans des zones fortement influencées par les feux de biomasse comme par exemple les programmes DECAFE (Dynamique Et Chimie de l'Atmosphère en Forêt Equatoriale) de 1986 à 1992, EXPRESSO (Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants) de 1994 à 1998, SAFARI (Southern African Regional Science Initiative, Ruellan et al., 1999) en 1992 et 2000 et plus récemment le programme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) de 2005 à 2008. DECAFE (Cachier et al., 1995 ; Lacaux et al., 1995 ; Lioussé et al., 1995, 1997) a permis de caractériser la composition chimique des aérosols lors des feux de savanes en Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire). De même en Afrique Australe pendant SAFARI en 2000, Posfai et al. (2003) ont obtenu des compositions très variables des aérosols contenus dans les différents types de panaches de feux de biomasse (feux du parc Kruger), pour différents sites de prélèvements. Ils ont ainsi mis en évidence la présence importante d'aérosols organiques (+65%) et de carbone suie (> 10 %). Récemment, ce même type d'expériences a eu lieu pendant la campagne AMMA (2006) en Afrique de l'Ouest pendant la LOP (Long Observation Period) et la SOP (Short Observation Period). Ainsi, les travaux de Pont et al. (2009) et Galy-Lacaux et al. (2008) ont montré qu'en saison sèche, les espèces majoritaires sont les poussières désertiques avec environ 40%, suivies des aérosols carbonés avec 30% pour le carbone organique et 20% pour le carbone suie. On retrouve de très faibles quantités de sulfates et de nitrates (10%).

De plus, des travaux ont été menés sur la pollution des capitales africaines. C'est le cas du programme POLCA (Pollution des Capitales Africaines) à Dakar et Bamako en cours aujourd'hui. Les mêmes types de sources ont été retrouvés (poussières désertiques, feux de biomasse) de même que celles liées aux trafics et aux feux domestiques. La caractérisation de l'aérosol a également été menée à Ouagadougou (Burkina Faso) où les mêmes types de résultats ont été obtenus dans l'ensemble des villes. A Ouagadougou, il ressort que quelle que soit la saison (saison sèche ou Harmattan et saison des pluies ou Mousson), les deux fractions (fine et grosse) présentent une composition chimique totalement différente l'une de l'autre. La fraction grossière est dominée à 85% par les poussières minérales, alors que dans la fraction fine, ce sont les espèces

carbonées qui prédominent alors que la fraction ionique est quasi-inexistante. L'abondance des 2 fractions carbonées et leur composition ($OC/BC = 4,1$) témoignent d'un impact majeur de combustions à émissions particulières riches en composés organiques qui peuvent être liées au trafic de mobylettes ou aux feux agricoles ou domestiques de faible intensité. Cet aérosol carboné fin est relativement plus abondant en carbone suie (rapport $OC/BC = 3,1$) lors de la période d'Harmattan, ce qui laisse supposer un mélange de sources légèrement différent. Les différents travaux montrent globalement que les caractéristiques de l'aérosol sont très dépendantes du type de mélange des sources.

1.3.1.2. Hygroscopicité

L'hygroscopicité est définie comme étant la capacité de certains aérosols (ici les aérosols de combustion) à favoriser la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Ces aérosols sont alors dits noyaux de condensation nuageuse (CCN). Cette hygroscopicité est très complexe, car elle dépend fortement de la taille des aérosols, de leur composition chimique et du caractère hydrophile/hydrophobe de chaque constituant chimique. De nombreux travaux ont porté sur la schématisation de la fonctionnalisation et par suite, de l'hygroscopicité des aérosols de combustion pour la source feux de biomasse. Les travaux de Rodgers et al. (1991) ont montré que 80 à 100% des particules submicroniques peuvent éventuellement agir en tant que noyaux de condensation, de même pour les feux de savane en Afrique de l'Ouest (Dinh et al., 1994). Si le comportement des noyaux de condensation des feux de biomasse peut être attribué à l'eau soluble dans les substances inorganiques (tels que le sulfate, nitrate, potassium, sodium, ammonium), les résultats de Ruellan et al. (1999) suggèrent que la grande quantité de teneur en eau soluble dans les matières organiques dans la phase particulaire peut également être responsable de ce comportement des particules en tant que noyaux de condensation. Pour la source trafic, Legrand (2000) a montré une grande variabilité des concentrations des CCN à 0,1% de sursaturation (entre 0,2% et 40% de l'aérosol atmosphérique) avec de fortes concentrations en CCN lors de la présence de nuages de basse altitude et de faibles concentrations lors de période de stabilité thermique ou de ciel dégagé.

Dans le même cadre d'idées, Novakov and Penner (1993) ont montré que certains aérosols organiques peuvent contribuer significativement à la masse totale des noyaux de condensation, particulièrement les aérosols organiques secondaires (Cruz and Pandis, 1997 ; Shulman et al., 1996 ; Saxena et al., 1995). Par contre, d'autres études ont montré que les composés organiques inhibaient la formation de gouttelettes (Jacobson et al., 2003).

D'une manière générale, lorsque l'atmosphère est chargée en particules hydrophiles, celles-ci jouent le rôle de noyaux de condensation. Pour les modélisateurs, schématiquement, le carbone suie est considéré comme essentiellement hydrophobe et le carbone organique plutôt hydrophile (Cooke et al., 1999 ; Solmon et al., 2006). A titre d'exemple, dans le modèle global TM5, 80% des particules sont supposées hydrophobes contre 20% hydrophiles pour le carbone suie. Par contre, pour le carbone organique, des proportions de 50% d'hydrophobes et 50% d'hydrophiles sont introduites (Guillaume et al., 2007). Toutefois, cette distinction entre aérosols carbonés hydrophiles et hydrophobes reste encore très complexe. Cette complexité de caractérisation des aérosols dépend notamment du vieillissement de ces aérosols qui se traduit par une fonctionnalisation accrue, augmentant de ce fait la proportion de noyaux hydrophiles. Mikhailov et al. (2001) ont également examiné l'interaction entre gouttelettes d'eau et particules de carbone suie. Afin d'estimer cette interaction, ils ont utilisé deux aérosols : du carbone suie supposé hydrophobe et du carbone suie hydrophile (après enrichissement superficiel en n-butanol). L'analyse par microscopie électronique a montré que la distribution granulométrique en carbone suie hydrophobe n'est pas modifiée de manière significative après interaction avec des gouttelettes d'eau, alors que celle de l'aérosol de suie hydrophile est modifiée, la taille moyenne ayant été réduite d'un facteur trois. Cette redistribution en tailles pourrait s'expliquer par la possibilité pour des particules d'être captées par des gouttelettes d'eau, s'y coagulant en augmentant progressivement la taille de la « nouvelle » particule et en favorisant la formation de nouvelles espèces (effet réacteur des gouttes). Ainsi, l'évaporation ultérieure de l'eau nuageuse donne des aérosols plus compacts qu'initialement au terme de ces processus complexes. Les connaissances sur les mécanismes physico-chimiques liés à l'hygroscopicité sont encore limitées et plusieurs modèles schématisent l'hygroscopicité des espèces carbonées :

- Pöschl et al. (2001) postulent la présence d'une (mono-)couche de benzo[a]pyrène (BaP) autour du carbone suie (condensation après oxydation en surface par l'ozone), qui rend l'aérosol hygroscopique.
- Liu et al. (2005) proposent un modèle à plusieurs couches hydrophiles autour des aérosols carbonés (noyaux de carbone suie et carbone organique), couches de sulfates rendant la particule hydrophile dans son ensemble (à partir de 10 couches de sulfates).

1.3.1.3. Granulométrie

La taille des particules affecte à la fois leur temps de résidence dans l'atmosphère et leurs propriétés physico-chimiques. C'est pourquoi on s'intéresse à la distribution à la fois en masse et en nombre du spectre granulométrique des aérosols. Ces deux distributions caractérisent différemment le même aérosol. La masse est concentrée dans les gros aérosols, tandis que le nombre porte plutôt sur les classes de petites tailles. Il existe plusieurs manières de décrire la distribution en taille des aérosols. On peut séparer le spectre de taille en intervalles fixes, et compter le nombre ou la masse des particules de diamètre situé dans cet intervalle (description sectionnelle). On peut aussi remarquer, expérimentalement, qu'il existe plusieurs modes dans la distribution granulométrique. Selon Seinfeld and Pandis (1998) et Whitby (1978), la granulométrie des aérosols couvre une très large gamme de tailles, du nanomètre jusqu'au dixième de millimètre. La taille de ces particules varie selon la nature de la source émettrice et les réactions physico-chimiques affectant ces aérosols (nucléation, coagulation et condensation de gaz vers les particules). Les populations d'aérosols comportent classiquement trois modes présentés sur la figure 1.2 :

- un mode nucléation constitué de particules ultra-fines (diamètres inférieurs à $0,1 \mu\text{m}$), les particules d'Aitken, issues de la « condensation » de gaz autour d'un noyau de condensation.
- un mode accumulation avec des diamètres compris entre $0,1$ et environ $1 \mu\text{m}$ qui résulte du grossissement de petites particules ou de l'évaporation de grosses particules.
- un mode grossier avec des diamètres supérieurs à $1 \mu\text{m}$.

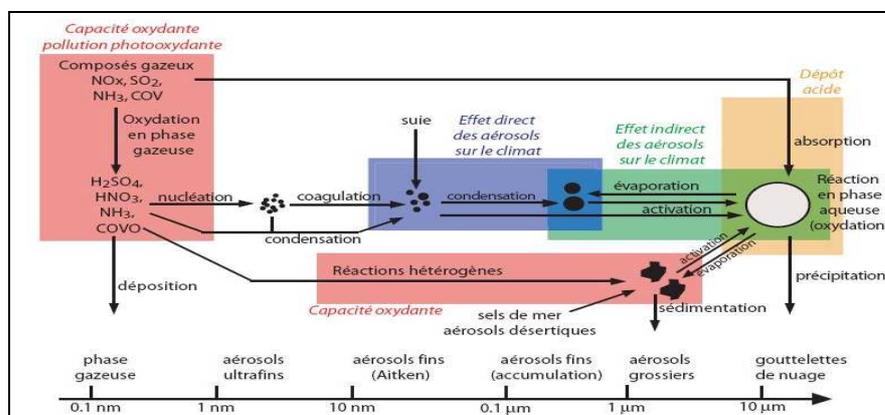


Fig. 1.2 : Schématisation des processus microphysiques affectant la granulométrie et la composition chimique des aérosols (IPCC, 2001).

Cette classification a été observée sur les aérosols en Afrique, notamment au Bénin pendant la campagne AMMA en 2006. Ainsi, Mallet et al. (2008) ont montré l'existence de ces trois modes avec les caractéristiques suivantes : un mode fin composé de particules de diamètre moyen $0,096 \mu\text{m}$, un mode accumulation ($0,8 \mu\text{m}$) et un mode grossier ($2 \mu\text{m}$).

1.3.1.4. Propriétés optiques

Les paramètres caractérisant les propriétés optiques de l'atmosphère sont directement liés, entre autres, à la concentration et à la composition chimique de l'aérosol. Cependant, ces deux éléments ne sont pas les seuls facteurs dans la détermination du pouvoir absorbant ou diffusant des aérosols de combustion. Les propriétés optiques des aérosols dépendent de leur forme, de leur taille et de leur état de mélange avec d'autres composés (Cachier, 1998). L'indice de réfraction m d'un aérosol est complexe, $m = n + i k$, la partie réelle n traduisant la diffusion et la partie imaginaire, l'absorption du rayonnement. Le tableau 1.1 regroupe un exemple d'ensemble des paramètres relatifs aux propriétés optiques du carbone suie et du carbone organique obtenu lors de la campagne Escompte pour un aérosol urbain.

Tableau 1.1 : Propriétés optiques de base des aérosols carbonés de combustion ($\lambda=550 \text{ nm}$) en zone urbaine tempérée (Mallet et al., 2003)

Aérosol	n	k	ω_0	$\sigma_{\text{ext}} (\text{m}^2/\text{g})$	Comportement qualitatif
Carbone suie	1,87	0,569	$0,33 \pm 0,03$	$8,52 \pm 0,48$	Absorbant
Carbone organique	1,55	0,005	$0,98 \pm 0,01^f$ $0,94 \pm 0,01^a$	$\sigma_{\text{ext}}^f = 1,6\sigma_{\text{ext}}^a$	diffusant

^f pour le mode fin (cf. granulométrie)

^a pour le mode d'accumulation (cf. granulométrie)

Cet indice de réfraction n dépend fortement de l'humidité (Mallet et al., 2008). Par ailleurs pour un aérosol, on détermine un coefficient d'extinction de la lumière Q_{ext} , somme d'un coefficient d'absorption Q_{abs} et d'un coefficient de diffusion Q_{diff} , suivant la relation :

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{diff}}$$

Le rapport entre Q_{diff} et Q_{ext} représente l'albédo de simple diffusion de la particule (ω_0). L'albédo de simple diffusion quantifie ainsi l'importance relative de la diffusion des aérosols relativement à leur absorption. Plus ce paramètre est proche de 0 et plus la particule est absorbante, plus il est proche de 1 et plus la particule est diffusante. L'albédo de simple diffusion est calculé par la formule :

$$\omega_0 = \frac{\int_{z_1}^{z_2} \rho(z) \times (\alpha_{\lambda, \text{diffusion}}^{\text{ext}}) dz}{\int_{z_1}^{z_2} \rho(z) \times (\alpha_{\lambda, \text{diffusion}}^{\text{ext}} + \alpha_{\lambda, \text{absorption}}^{\text{ext}}) dz} \quad (1)$$

où ω_0 est l'albédo de simple diffusion, z_1 et z_2 deux niveaux d'altitude dans la colonne d'atmosphère considérée, $\alpha_{\lambda, \text{diffusion}}^{\text{ext}}$ est la section efficace d'extinction ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) par diffusion et $\alpha_{\lambda, \text{absorption}}^{\text{ext}}$ par absorption, et ρ , la concentration en particules absorbantes et diffusantes ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

Ces valeurs de σ_{ext} (exemple dans le tableau 1.1) dépendent des propriétés optiques, de la taille de l'aérosol et du type de mélange (interne ou externe). C'est la théorie de Mie pour des particules ayant un paramètre de taille $\alpha = \pi d/\lambda$ proche de 1 ou $\alpha \gg 1$, qui nous intéresse. Par ailleurs, le dénominateur de la formule (1) représente l'épaisseur optique de l'aérosol (AOD) traduisant la capacité de l'aérosol dans la colonne atmosphérique d'interagir avec le rayonnement lumineux. Dans la pratique, le calcul de l'épaisseur optique se fait en deux étapes. Dans un premier temps, le coefficient d'extinction est calculé et dans un second temps, ce dernier est intégré sur les différentes niveaux verticaux du modèle considéré afin d'en déduire l'épaisseur optique selon la relation :

$$AOD = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_{\lambda}^{\text{ext}}(z) dz \quad \text{avec} \quad \sigma_{\lambda}^{\text{ext}} = \rho \times (\alpha_{\lambda, \text{diffusion}}^{\text{ext}} + \alpha_{\lambda, \text{absorption}}^{\text{ext}})$$

où AOD est l'épaisseur optique des aérosols, $\sigma_{\lambda}^{\text{ext}}$ le coefficient d'extinction (m^{-1}) et z_1 et z_2 deux niveaux d'altitude dans la colonne d'atmosphère considérée, $\alpha_{\lambda, \text{diffusion}}^{\text{ext}}$ est la section efficace d'extinction ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) par diffusion et $\alpha_{\lambda, \text{absorption}}^{\text{ext}}$ par absorption, et ρ , la concentration en particules absorbantes et diffusantes ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

Comme indiqué plus haut, le calcul des propriétés optiques est très sensible au type de mélange en composantes des aérosols. Ainsi, si l'on considère des particules toutes constituées chacune d'une seule espèce chimique, (mélange externe), les coefficients spécifiques d'extinction sont calculés séparément pour chaque particule et le coefficient relatif à l'ensemble des particules est la somme des coefficients individuels. Par contre, lorsque les particules sont constituées individuellement de plusieurs espèces chimiques, il s'agit de mélanges internes. Deux cas sont envisageables : soit il s'agit d'un mélange monophasé entre

plusieurs composés chimiques (mélange interne homogène), soit il s'agit d'un mélange multiphasés composé d'un noyau solide entouré d'une ou plusieurs couches sphériques. Ces configurations ont des impacts différents sur les propriétés optiques des aérosols et par suite, sur le forçage radiatif. Ainsi, Jacobson (2001) a montré que le forçage radiatif direct pourrait passer de $+0,27 \text{ W/m}^2$ en mélange externe à $0,54 \text{ W/m}^2$ en mélange interne homogène. Péré et al. (2009) ont testé les 3 mélanges d'aérosols (mélange externe, interne homogène et core-shell) pendant l'été 2003, caractérisé par des concentrations importantes en particules issues des feux de biomasse, en Europe de l'Ouest. Les auteurs ont montré que la configuration core-shell permettait de reproduire de manière satisfaisante les albédos de simple diffusion (SSA) mesurés par AERONET, contrairement à la configuration en mélange interne (resp. externe) qui surestimait (resp. sous-estimait) les observations. Dans ma thèse, nous utiliserons la configuration « mélange externe » (chapitre 5).

1.3.2. Impacts des aérosols de combustion

Les différents impacts concernent en particulier la santé publique et le changement climatique. Nous présenterons ainsi les différents enjeux de l'étude de tels impacts.

1.3.2.1. Impacts sur la santé

L'impact des aérosols sur le système respiratoire est fonction de leur taille et de leur composition chimique. Schématiquement, plus les particules sont fines, plus elles pénètrent profondément le système respiratoire (Nenmar et al., 2003 ; Nenmar et al., 2002 ; Berico et al, 1997). Ainsi, les fines particules (PM 2,5) jouent un rôle prépondérant dans la problématique de santé publique, car elles transitent par les voies respiratoires en entrée (nez et pharynx) pour atteindre les bronchioles et les alvéoles pulmonaires. Les particules de diamètre compris entre 4 et $10 \mu\text{m}$ ont un impact sur la région trachéo-bronchique et, les plus grosses particules ($> 10 \mu\text{m}$) sont quant à elles, efficacement piégées en entrée des poumons et éliminées par déglutition. Par ailleurs, du point de vue de la chimie, les aérosols de combustion, les HAP et les composés organiques solubles présentent un caractère inflammatoire avéré pour l'aérosol urbain (Ramgolam et al, 2009) et pour l'aérosol de feux de biomasse (Delfino et al., 2008).

1.3.2.2. Impacts climatiques

Le rôle des aérosols dans la problématique générale du changement climatique est désormais largement reconnu et documenté. Néanmoins, de grandes incertitudes quant à leurs impacts quantitatifs réels et leur paramétrisation subsistent.

* *L'effet radiatif*

L'effet radiatif direct de l'aérosol est lié à l'interaction directe des aérosols avec l'énergie solaire incidente et le rayonnement terrestre. Le niveau de compréhension des interactions climat/particules reste encore faible (IPCC, 2007). La figure 1.3 résume ainsi l'état de l'art actuel des connaissances sur les forçages radiatifs induits par les gaz à effet de serre et les différents types de particules, sur la période 1750-2005 (IPCC, 2007).

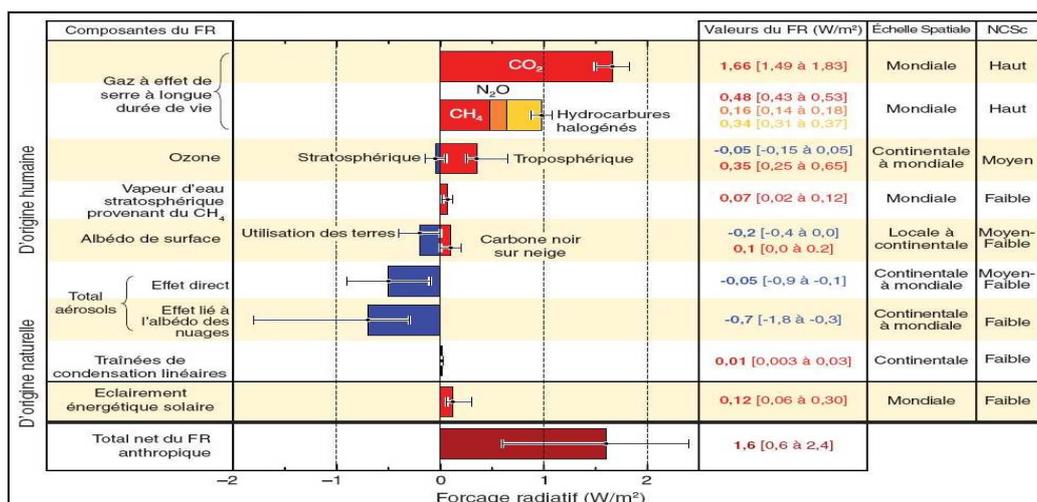


Fig. 1.3 : Forçage radiatif global moyen (W/m²) du système climatique en 2005 (IPCC, 2007).

Les premières estimations du forçage radiatif direct pour le carbone suie émis par les combustibles fossiles dans les modèles tri-dimensionnels étaient de l'ordre de +0,1 W/m² à +0,2 W/m² (Haywood and Shine, 1995 ; IPCC, 2001). Depuis lors, de plus fortes valeurs de forçage radiatif ont été proposées, considérant le carbone suie en mélange interne ou/et externe (+0,27 W/m² en mélange externe à +0,54 W/m² en mélange interne homogène) (Jacobson, 2001 ; Haywood and Ramaswamy, 1998 ; Chylek et al, 1995). Quant au carbone organique, ce n'est que récemment que son impact radiatif et son pouvoir diffusant favorisant le refroidissement de l'atmosphère (-0,1 W/m²) ont été montrés (Bond, 2001 ; IPCC, 2001;

Jacobson, 1999). L'aérosol carboné a donc une composition chimique aux propriétés opposées suivant la source d'émission et donc, la géographie. Ainsi, l'aérosol carboné peut être considéré comme ayant un rôle sur le changement climatique vu ses capacités de réchauffement ou de refroidissement de l'atmosphère.

Des expériences récentes ont été menées à Djougou (Nord du Bénin) durant la campagne AMMA pour évaluer le forçage radiatif direct des aérosols. Les auteurs (Mallet et al., 2008) ont montré sur l'exemple de la période de la saison sèche (du 17 au 24 Janvier 2006), l'existence de deux couches distinctes : de la surface jusqu'à 1 km d'altitude, on retrouve des aérosols de poussières et, entre 1,5 km et 4 km d'altitude, les particules issues de la combustion de biomasse. Ainsi, pour le forçage radiatif, ils ont obtenu sur leur période d'observation des réductions du flux incident de près de 61 W/m^2 dû à la couche de feux de biomasse. D'autres études (programme SAFARI) ont également montré des réductions du flux incident par les aérosols des feux de biomasse de 50 W/m^2 (Campbell et al., 2003) à Skukuza (Afrique du Sud) en septembre 2000. Des études similaires en Afrique Australe ont montré des réductions du forçage radiatif comprises entre 20 W/m^2 et 200 W/m^2 sur les côtes du Mozambique (Bergstrom et al., 2003) et de l'ordre de 60 W/m^2 (effets direct et semi direct) sur les côtes du Congo (Tummon et al., 2010). Ces résultats sont le fait des fortes proportions de OC diffusant par rapport à BC dans les feux de biomasse.

Par ailleurs, les aérosols peuvent également, en absorbant de façon plus ou moins importante le rayonnement solaire, modifier les profils de température et, par conséquent, influencer sur les conditions de formation des nuages, entraînant leur disparition ou modifiant leur extension géographique : c'est l'effet semi-direct (Hansen et al., 1997 ; Ackerman et al., 2000°. Cet effet a été étudié notamment lors de la campagne INDOEX sur l'Océan Indien (Lelieveld et al., 2001) ainsi que par Péré et al. (2009) durant la canicule de l'été 2003 en France.

Parallèlement à la reconnaissance de leurs effets radiatifs directs et semi-directs, on a vu que les aérosols carbonés en tant que noyaux de condensation (CCN) sont impliqués dans de nombreux processus microphysiques dans les nuages, dans la formation des gouttes d'eau nuageuse et des cristaux de glace : cela constitue l'effet indirect. Cet effet a des impacts sur la durée de vie et la teneur en eau des nuages (Penner et al, 2001), avec modification de l'albédo planétaire et donc, du flux lumineux incident en surface. L'impact de cet effet indirect des aérosols de combustion sur le bilan radiatif planétaire est complexe et les paramétrisations sont encore très simplifiées.

1.4. Emissions des aérosols de combustion

Le terme « émission » représente dans cette thèse les quantités de particules rejetées dans l'atmosphère par les différentes sources. La nature et la quantité des composés émis, ainsi que leur répartition géographique sont inhomogènes, puisque les émissions dépendent de plusieurs paramètres tels que le type de végétation, les combustibles utilisés, le niveau de développement des pays, la densité de population. En Afrique, on retrouve trois grands types de sources de l'aérosol de combustion :

- les feux de biomasse : feux de végétation (forêt, savane,...) liées aux pratiques culturelles, à l'élevage, à l'agriculture et à la déforestation.
- les biofuels : combustion de bois, charbon de bois, résidus agricoles, déchets animaux,... dans les secteurs d'activités domestiques et industrielles.
- les combustibles fossiles : sources d'énergies fossiles (essence, diesel,...) dans les secteurs du trafic, des industries et du domestique.

Ces émissions sont en constante augmentation pour les feux de biomasse, les biofuels et les combustibles fossiles, du fait de pratiques humaines elles-mêmes en constante augmentation, et du fait de l'accroissement démographique. Les émissions qui en découlent sont anthropiques pour la grande majorité. Aussi, dans notre travail de recherche, nous nous focaliserons sur les émissions anthropiques, bien que les émissions biogéniques sont à prendre aussi en compte pour le carbone organique (ce n'est pas l'objet de cette thèse).

1.4.1. Feux de biomasse

Depuis les années 1990, on a pu vérifier en Afrique l'importance des émissions liées à la combustion de biomasse. A titre d'exemple, on estime que sur 750 millions d'hectares de végétation brûlés chaque année, près de la moitié le sont en Afrique, contre 12 à 13 millions aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord (Calabri and Cisela, 1992). Liousse et al. (1996) ont montré que les combustions anthropiques de biomasse génèrent environ 46% des émissions de carbone suie et 55% des émissions de carbone organique primaire à l'échelle du globe. Les feux de biomasse en Afrique tirent leur origine de pratiques culturelles et d'activités liées au défrichage pour l'utilisation permanente de terres pour l'agriculture, l'élevage et l'élimination des résidus agricoles. Dans la plupart des inventaires globaux et

régionaux (Hao and Liu, 1994 ; GEIA ; EDGAR ; Liousse et al., 1996 ; Cooke and Wilson, 1996 ; Liousse et al., 2010 ; Mieville et al., 2010), la construction des inventaires de feux de biomasse est basée sur une approche « bottom-up », selon la formulation générale (Cachier et al., 1991) :

$$E(X) = M * EF(X)$$

avec E, les émissions en g, M, la quantité de biomasse brûlée en kg et EF, le facteur d'émission correspondant à l'aérosol X (e.g. BC et/ou OC) (en g/kgdm) dont on calcule les émissions.

De nombreuses incertitudes subsistent encore sur le calcul de telles émissions (Liousse et al., 2010 ; Mieville et al., 2010). Ainsi, le tableau 1.2 fournit le total des émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par les feux de biomasse à l'échelle du globe en 2000, sur la base de cinq inventaires.

Tableau 1.2. : Emissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par les feux de biomasse à l'échelle globale et en Afrique (valeurs en gras dans les parenthèses) en 2000.

	BC (en Tg/an)	OCp (en Tg/an)	Ratio BC/OCp
Bond et al. (2004)	3,3 (1,47)	25,01 (10,50)	0,13 (0,14)
AMMABB (Liousse et al., 2010)	3,6 (2,3)	27,2 (16,8)	0,13 (0,14)
Ito and Penner (2005)	5,4	34,6*	0,16
Generoso et al. (2003)	3,4	22,3*	0,15
Van der Werf et al. (2006)	2,3	18,5	0,12

* Ces valeurs ont été recalculées avec la relation $OM = OCp * 1,3$ (Liousse et al., 1996)

Les rapports BC/OCp sont sensiblement égaux, en dépit des différences entre les totaux d'émissions entre les cinq inventaires. Des études d'intercomparaisons entre plusieurs inventaires ont eu lieu ces 3 dernières années (Granier et al., 2010 ; Stroppiana et al., 2010), les différences pouvant être dues aux incertitudes sur la quantité de biomasse brûlée (M) et sur les facteurs d'émissions associés à chaque couvert végétal qui brûle. Pour les facteurs d'émissions, de nombreuses études expérimentales fournissent des valeurs de facteurs d'émissions selon le type de végétation brûlée (Michel et al., 2005 ; Liousse et al., 2004 ; Andreae and Merlet, 2001).

La quantité de biomasse, pour sa part, est calculée en tenant compte de la surface brûlée (A), de la densité de biomasse (B), de la fraction de biomasse au-dessus de la surface du sol (α) et de l'efficacité de brûlage (β), selon la relation :

$$M = A * B * \alpha * \beta$$

Pour le paramètre A, on évaluait dans les années 1990 entre 75% et 80% de la savane africaine qui brûlait chaque année, avec une incertitude d'un facteur 2 à 3 (Cooke and Wilson, 1996 ; Lioussé et al., 1996 ; Hao and Liu, 1994). Puis, l'estimation de ce paramètre a été qualitativement améliorée par l'utilisation de données satellitales, précisément à l'aide de cartes de pixels de feux issues des données des radiomètres ATSR (ESA) et AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) (Cooke et al., 1996). Ceci a permis une prise en compte améliorée de la temporalité des feux de biomasse. Dans un second temps, des cartes de surfaces brûlées par type d'écosystèmes ont permis une amélioration quantitative. Ces cartes proviennent de données de NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION, d'ATSR, GLOBSCAR, L3JRC, GBA2000 ou de MODIS à l'échelle globale (Michel et al., 2005 ; Lioussé et al., 2004 ; Tansey et al., 2004 ; Grégoire et al., 2002 ; Barbosa et al., 1999 ; Cahoon et al., 1992).

Pour le paramètre B (densité de biomasse), l'inhomogénéité des couverts végétaux est également source d'incertitudes. Généralement, on a recours à des cartes de classes de végétation et à leurs paramètres associés (densité de biomasse, efficacité de brûlage,...), comme par exemple les cartes UMD (Hansen et al., 2000) et GLC2000 (Bartholomé and Belward, 2005) dotées respectivement de 11 et 18 classes de végétation. Il existe une autre approche (Van der Werf et al., 2006) qui utilise un modèle de végétation dynamique pour tenir compte de la modification de la couverture végétale à haute résolution, mais également de l'impact des feux et des changements climatiques. Enfin, une nouvelle approche, encore en cours de développement, permet de réduire les incertitudes sur la détermination des quantités de biomasse brûlée à partir des données satellitales de FRP (Fire Radiative Power). Cette dernière fournit une information sur l'activité des grands feux visibles par satellite et est directement corrélée à la quantité de biomasse brûlée (Roberts et al., 2005 ; Wooster et al., 2005). Cette approche présente un grand intérêt dans la mesure où elle s'affranchit du type de végétation et donc de la densité de biomasse (paramètre B). Cependant, cette technique n'est pas encore totalement satisfaisante, car des différences persistent entre facteurs de conversion, à l'origine de résultats très différents sur les émissions. Notons que pour l'Afrique, il a été montré par différentes études de modélisation que l'inventaire AMMABB développé à partir

des données L3JRC et de la carte de végétation GLC pour les années 2000-2006 (Lioussé et al., 2010) donnait des résultats plus satisfaisants que d'autres inventaires existants (Tummon et al., 2010 ; Barret et al., 2010 ; Jason et al., 2010).

1.4.2. Combustibles fossiles et biofuels

Les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire par combustion de combustibles fossiles et de biofuels sont disponibles dans des inventaires aux échelles globales et régionales, mais ce n'est pas le cas de l'Afrique où seuls les inventaires globaux existent. Dans l'un de ces inventaires (Junker and Lioussé, 2008), à l'échelle de l'Afrique en 2000, les émissions de carbone suie étaient évaluées à 2,3 Tg pour les feux de biomasse (cf. tableau 1.2) contre 0,44 Tg pour les biofuels et 0,20 Tg pour les combustibles fossiles (cf. tableau 1.3) avec comme principales activités émettrices le trafic routier, les industries, les centrales thermiques et les combustions domestiques. Jusqu'à présent pour les combustibles fossiles et des biofuels, on s'intéresse essentiellement aux combustions domestiques et aux biofuels par le biais de la fabrication de charbon de bois (Brocard, 1996). Ces émissions sont calculées selon une approche « bottom-up » basée sur les données de consommations en combustibles fossiles/biofuels et des facteurs d'émissions correspondant. A l'échelle globale, les quantités de combustibles fossiles consommées sont recensées classiquement par deux organismes internationaux : l'ONU et l'IEA. Les facteurs d'émissions de carbone suie et de carbone organique sont très variables et dépendent de la technologie utilisée (véhicules à 2 ou 4 roues par exemple), du combustible (diesel, bois, ...), du secteur d'activité (trafic, industries, ...) et de la qualité de maintenance des installations (Junker and Lioussé, 2008, Bond et al., 2004) et donc, du pays ou de la région considéré(e). Ainsi, deux approches dans la construction des inventaires d'émissions relatifs au carbone suie et au carbone organique ont été développées à l'échelle mondiale. Il s'agit de l'inventaire de Bond et al. (2004) et celui de Junker and Lioussé (2008). Le tableau 1.3 présente les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire par les combustibles fossiles, selon ces deux inventaires globaux pour l'année 2000, à l'échelle du globe et pour l'Afrique.

Tableau 1.3 : Emissions de carbone suie et de carbone organique primaire par combustion de combustibles fossiles et de biofuels à l'échelle du globe et en Afrique (données en gras dans les parenthèses) en 2000.

	BC (en Tg/an)	OCp (en Tg/an)	Ratio BC/OCp
Bond et al. (2004)	4,6 (0,48)	8,86 (1,49)	0,52 (0,32)
Junker and Liousse (2008)	4,8 (0,64)	6,3 (1,08)	0,76 (0,59)

Contrairement aux émissions des feux de biomasse, les ratios BC/OCp varient d'un inventaire à un autre avec de fortes valeurs dans Junker and liousse (2008). Ceci montre que l'aérosol dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008) est plus absorbant que celui dans Bond et al. (2004). Par ailleurs, concernant le carbone suie, on note des différences d'un facteur 1,3 entre émissions dans les inventaires de Bond et al (2004) et Junker and Liousse (2008) pour l'Afrique, tandis qu'à l'échelle globale, les émissions sont sensiblement les mêmes. Par contre, pour le carbone organique primaire, les différences entre émissions sont du même ordre que celles du carbone suie à l'échelle régionale (Afrique), plus importantes à l'échelle globale selon ces deux inventaires. Ceci montre que les différences d'émissions à l'échelle régionale peuvent se compenser à l'échelle globale, ce qui traduit encore la nécessité de construire des inventaires régionaux et notamment un inventaire régional (Afrique) pour tenir compte au mieux de toutes les spécificités s'y rapportant.

Globalement, les différences observées proviennent essentiellement des facteurs d'émissions et de la méthodologie de construction des deux types d'inventaires. En effet, dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008), les émissions sont calculées en tenant compte des combustibles fossiles (e.g. diesel) et des biofuels (e.g. charbon, bois), pour trois secteurs d'activités (trafic, industrie, domestique) et pour trois niveaux de développement des pays (pays développés, semi développés et en voie de développement). Ce dernier est considéré comme un proxy du niveau de technologie du pays considéré pour le choix des facteurs d'émissions, ce qui nous donne un total de 9 facteurs d'émissions pour chaque combustible. Par contre, dans l'inventaire de Bond et al. (2004), les émissions sont calculées en tenant compte des combustibles fossiles et des biofuels, des secteurs d'activités (trafic, industrie, centrale thermique et domestique), lesquels dépendent eux-mêmes des technologies de combustion et des normes. On dénombre ainsi 22 couples combustibles/technologie dans le secteur industriel, 24 dans le secteur domestique et 13 dans le secteur du trafic routier. Bond et al. (2004) ont estimé des facteurs d'émission pour chaque couple, soit un total de 59 facteurs d'émissions pour chaque type d'aérosol considéré. Il est à souligner qu'en Afrique et au vu des manques de données, on rencontre des difficultés pour choisir les 9 facteurs d'émissions

dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008). Ce problème est évidemment accru dans l'inventaire de Bond et al. (2004) où la détermination des multiples facteurs d'émissions pose un réel problème d'obtention de données sur le continent africain. Par ailleurs, l'inventaire de Bond et al. (2004) ne tient pas compte de la durée de vie des technologies et de la qualité de leur maintenance, car il s'appuie essentiellement sur les facteurs d'émissions en pays industrialisés (pays développés). En outre, il y a un secteur « centrale thermique » différent du secteur industrie dans l'inventaire de Bond et al. (2004), ce qui n'est pas le cas dans Junker and Lioussé (2008) avec des facteurs d'émissions très différents dans ces deux secteurs. De fait, les différences de pratiques entre régions du monde peuvent conduire à des émissions très différentes pour une même source.

1.5. Pourquoi développer maintenant l'étude des grandes villes en Afrique ?

Depuis les années 2000, le changement climatique est devenu une problématique majeure, affectant inégalement les différentes régions de la Terre. Par ailleurs, la crise économique mondiale récente a montré que les décisions politiques ont des impacts sur l'ensemble des pays du monde bien que ressentie différemment selon les pays. Les scientifiques modélisent (nécessairement sous diverses hypothèses) les impacts des variations de concentrations en gaz à effet de serre et particules, notamment sur la température (IPCC, 2007). Ces approximations tiennent à la complexité du système océan-terre-atmosphère et de son évolution. L'année 2009 a marqué une période critique quant aux avancées sur le changement climatique, avec la conférence de Copenhague en Décembre. Cette conférence, qui succède au protocole de Kyoto qui devait prendre fin en 2012, a permis d'envisager de nouvelles contraintes d'émissions des gaz à effet de serre pour les pays développés. Il a également été envisagé l'application de contraintes à d'autres pays comme l'Inde, la Chine et le Brésil dont l'économie est en pleine croissance et qui devraient réduire dans le futur leurs émissions de gaz à effet de serre. Une question consiste à savoir où en est le continent africain vis-à-vis de ces débats quant à des mesures restrictives des gaz à effet de serre ? Avec une superficie de 30 millions de km², l'Afrique est sept fois plus étendue que l'Union Européenne et trois fois plus vaste que la Chine. Toutefois, en dépit de la diversité des peuples et des végétations, les différents pays africains présentent certaines caractéristiques communes importantes, notamment du point de vue des ressources naturelles et de l'agriculture, de faibles niveaux de revenus par habitant, et de la marginalisation dans les affaires politiques mondiales. Avec des niveaux élevés d'inégalités et une capacité limitée des gouvernements à fournir des services à

la majorité des populations, de nombreux Etats africains servent des intérêts particuliers, notamment là où la richesse minière et/ou pétrolière génère(nt) des ressources considérables. Hormis l'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud, les autres régions d'Afrique ont une industrialisation limitée, menacée par la puissance conquérante du secteur manufacturier chinois, avec sa capacité à produire de très grands volumes de marchandises à bas prix. Par conséquent, en termes d'économie mondiale, les pays africains se réduisent pour une large part à une source de matières premières et de produits agricoles. En ce qui concerne le changement climatique et avec les inventaires globaux actuels, l'Afrique se distingue aussi comme étant le continent qui a le moins contribué aux émissions de gaz à effet de serre et de particules. En 2005, c'est environ 29 Gt de dioxyde de carbone qui sont émis annuellement par les combustibles fossiles (pétrole et ses dérivés, le gaz naturel) à l'échelle du globe. En outre, plus des trois-quarts de la consommation d'énergie intervient dans les pays industrialisés de l'hémisphère Nord, en liaison avec une consommation d'énergie par habitant nettement supérieure à celle des pays de l'hémisphère Sud : 8,1 tonnes d'équivalent pétrole par habitant et par an ($\text{tep}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{hab}^{-1}$) en Amérique du Nord, 3,6 $\text{tep}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{hab}^{-1}$ en Europe à comparer aux 0,5 $\text{tep}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{hab}^{-1}$ en Afrique (Bouneau et al, 2007). Par exemple, en 2007, les émissions de CO_2 par habitant pour l'ensemble de l'Afrique s'élevaient à 1 tonne/hab de CO_2 contre une moyenne mondiale de 4,3 tonnes/hab. Plus précisément, les Etats-Unis émettent 19,9 tonnes/hab de CO_2 , l'UE₁₅ (les quinze pays de l'UE du début 2004) 6,9 tonnes/hab de CO_2 et la Chine, 3,2 tonnes/hab. L'Afrique du Sud est la seule exception en Afrique, avec une moyenne de 7,9 tonnes de CO_2 /habitant en 2004 (PNUD, 2007), un niveau très proche de ceux des pays développés, du fait de sa dépendance très forte au charbon pour la production d'électricité et la fabrication du pétrole (liquéfaction du charbon noir). Cependant, malgré les émissions de CO_2 en moyenne, l'Afrique constitue un continent témoin des changements climatiques et de ses différents impacts en termes de déforestation, de désertification et par suite, en termes de ressources vitales. Ces impacts multiples se répercutent sur de très nombreux secteurs d'activités : agronomie et rendement des cultures, écologie et écosystèmes, ressources en eau et hydrologie et de nombreux aspects sanitaires et socio-économiques connexes.

Aussi, la croissance démographique rapide du continent africain ces dernières décennies (cf. figure 1.4) ainsi qu'un fort exode rural, tendent de plus en plus à concentrer dans de grandes métropoles (e.g. Abidjan, Lagos) une grande partie des quelques activités nationales polluantes, en plus du développement des activités pétrolières et minières le long des côtes du Golfe de Guinée. De même, les combustions de bois, charbon, ... sont largement répandues

pour les besoins domestiques. Tout ceci contribue à des émissions anthropiques considérables et croissantes d'aérosols de combustion dont les inventaires sont très largement peu étudiés à l'échelle du continent.

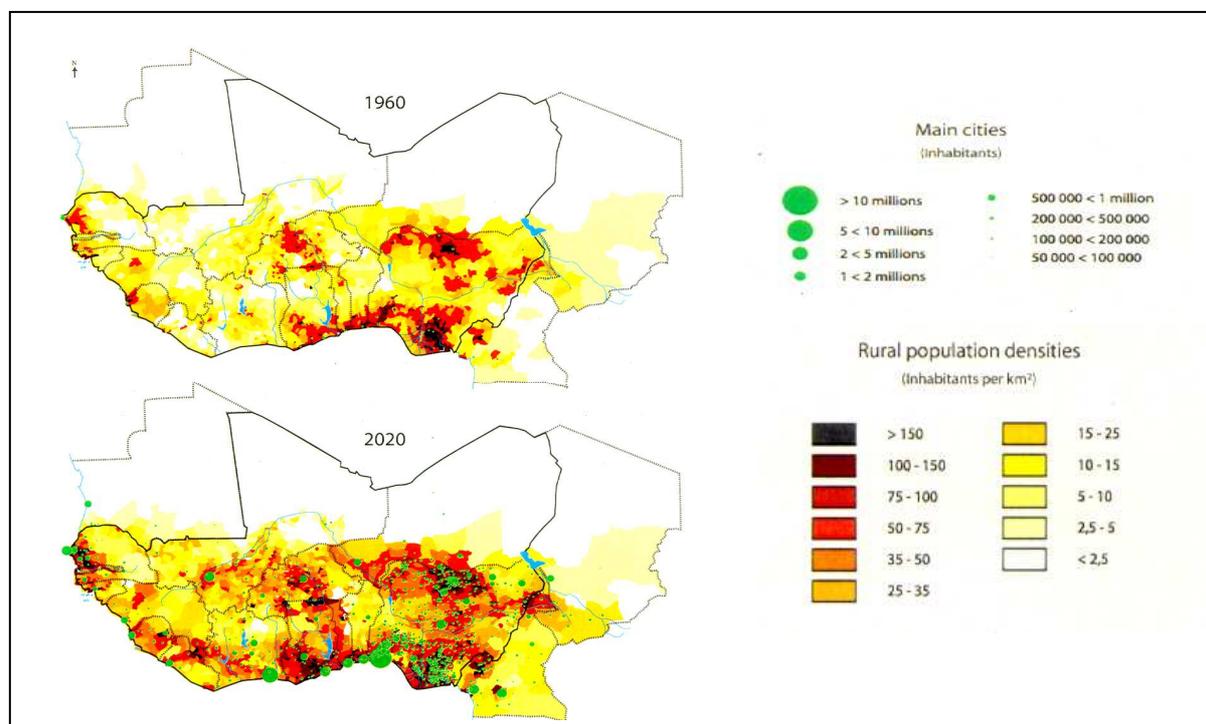


Fig. 1.4 : Population en Afrique de l'Ouest en 1960 et projection en 2020 (SWAC, 1999)

Par ailleurs, des mesures « surprenantes » de concentrations en carbone suie dans certaines capitales en Afrique, comparativement aux mesures dans les capitales d'autres pays au monde (e.g. Paris et Pékin) ont mis en évidence des niveaux de pollutions très élevés sur des sites de trafic routier dans les capitales africaines (Doumbia et al., 2011, Cachier et al., 2009). Le tableau 1.4 présente des exemples de concentrations en carbone suie mesurées dans 3 capitales africaines, comparées à celles de capitales de pays industrialisés.

Tableau 1.4 : Concentrations moyennes de carbone suie (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans différentes villes.

Type	Ville	Période	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Références bibliographiques
Trafic urbain	Dakar (Sénégal)	de Juin 2008 à Juillet 2009	5,7-15,4	Doumbia et al. (2011)
Trafic urbain	Bamako (Mali)	Avril 2008	$19,2 \pm 8,9$	Doumbia et al. (2011)
Trafic urbain	Cotonou (Bénin)	Mai 2005	$4,9 \pm 3,9$	Doumbia et al. (2011)
Trafic urbain	Paris (France)	d'Août à Octobre 1997	14 ± 7	Ruellan and Cachier (2001)
Trafic urbain	Pékin (Chine)	de Janvier 2003 à Août 2004	1,2-16,3	Guinot et al. (2007)

Ces résultats mettent en évidence des niveaux de pollution élevés dus au trafic routier mais aussi aux feux domestiques dans les capitales d'Afrique de l'Ouest (Cachier et al., 2009), du même ordre de grandeur que ceux dans les capitales des pays développés. Cela pose ainsi un problème aigu et pressant de qualité de l'air et de santé publique pour les populations urbaines, quand on sait que l'accès aux infrastructures médicales est encore limité en Afrique, contrairement aux pays développés.

1.6. Conclusion

Ce chapitre a pour but de présenter schématiquement et en bref les aérosols carbonés (carbone suie et carbone organique) en Afrique. La première partie de ce chapitre est relative aux aérosols carbonés de combustion (BC et OC), avec des définitions requises pour des raisons de clarté. Ensuite, la deuxième partie porte sur les propriétés et les impacts de tels aérosols. L'analyse des impacts de ces aérosols carbonés a montré que le carbone suie a tendance à accroître l'effet de serre (réchauffement), contrairement au carbone organique (OC) qui a plutôt tendance à refroidir l'atmosphère. Cependant, les incertitudes sur les valeurs des forçages radiatifs par ces aérosols sont encore très fortes (IPCC, 2007). Une meilleure compréhension globale du carbone suie et du carbone organique, ainsi que des fractions primaire/secondaire font partie des améliorations nécessaires à apporter à nos connaissances pour mieux quantifier leurs impacts environnementaux. Aussi, il est de plus en plus évident que la grande hétérogénéité d'émissions des aérosols carbonés oblige à des études spécifiques et régionales. En Afrique, certaines sources émettrices d'aérosols carbonés de combustion, font l'objet d'attention particulière du point de vue de la pollution urbaine : il s'agit des véhicules à deux roues les plus souvent largement utilisés comme moyen de transport en commun dans certains pays d'Afrique de l'Ouest (e.g. au Bénin). Le contexte socio-économique, ainsi que les émissions de tels engins et leur prise en compte dans les inventaires d'émissions globaux seront évoqués au chapitre 2. Par ailleurs, des valeurs d'émissions de carbone suie et de carbone organique ont été données à l'échelle globale et pour l'Afrique, tenant compte des sources de combustion (feux de biomasse et combustibles fossiles/biofuels). Ces valeurs sont variables d'un inventaire à un autre, illustrant ainsi toute la difficulté qu'il y a à caractériser les émissions et à posteriori, le choix à opérer pour les études de modélisation climatique. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est une réponse à notre intérêt pour l'Afrique. Ainsi la conjonction entre des niveaux de concentrations en aérosols très élevées associées à une urbanisation et une démographie

galopantes constituent indubitablement un signal fort sur les impacts sanitaires et socio-économiques affectant ces régions, qu'il convient d'étudier urgemment.

CHAPITRE 2

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. <i>Méthodologie</i>	42
2.2.2. <i>Résultats</i>	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 connaissons 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.

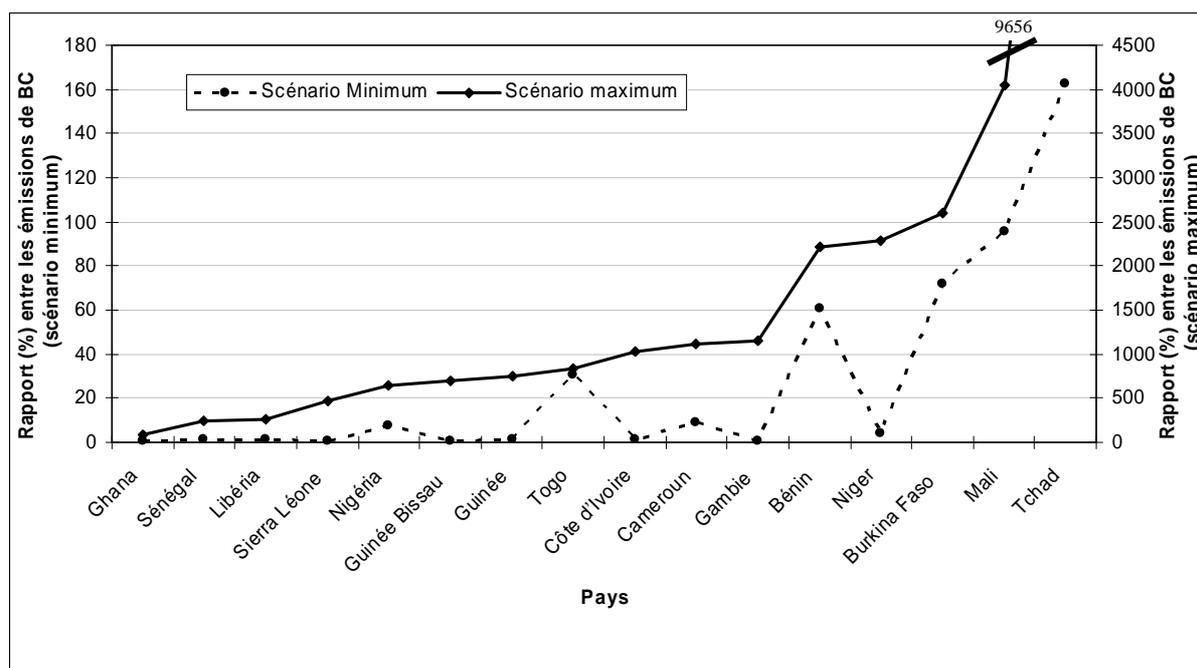


Fig. 2.5 : Rapport (en %) des émissions de carbone suie entre mon inventaire (deux roues) et l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (tout le trafic routier) dans les scénarios minimum et maximum en 2002

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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé dans le scénario bas (resp. haut).

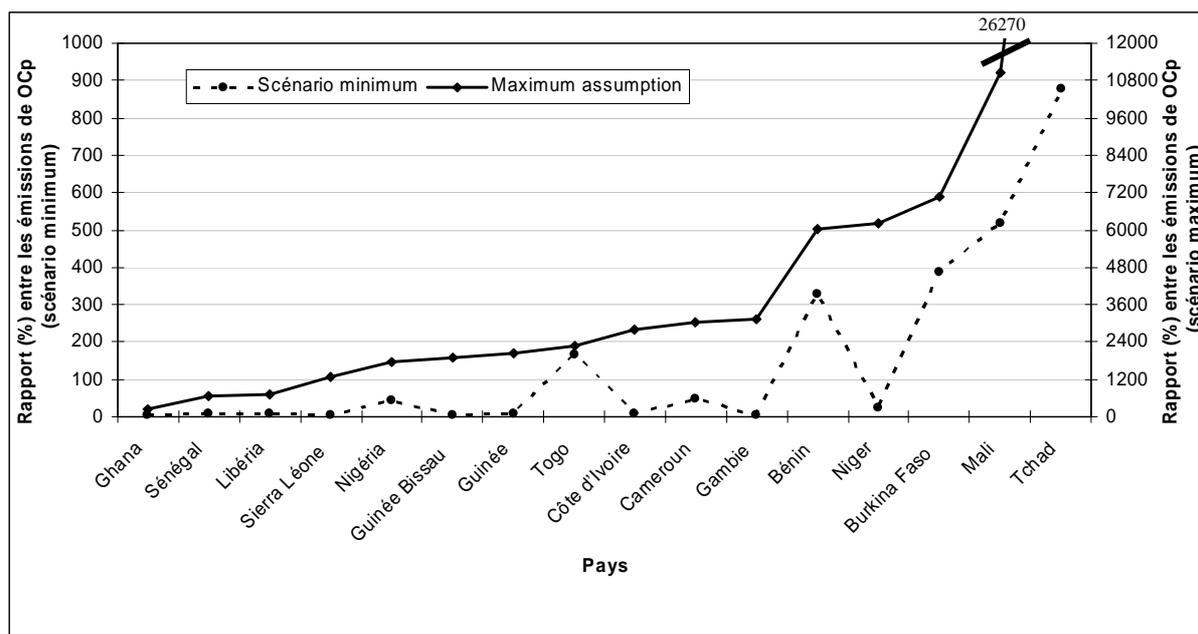


Fig. 2.6 : Rapport (en %) des émissions de carbone organique primaire entre mon inventaire (deux roues) et l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (tout le trafic routier) dans les scénarios minimum et maximum en 2002

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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (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 Lioussé (2008) pour 2002 à celles de notre inventaire. Ces « nouvelles » émissions ainsi que celles de Junker and Lioussé (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 Lioussé, 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 (Chantreau 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 (“Jakarta”) 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 Liousse (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 (Etissa 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 58 (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/VIS_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_{ij}

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: ρ = 750.1		8% oil: ρ = 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.

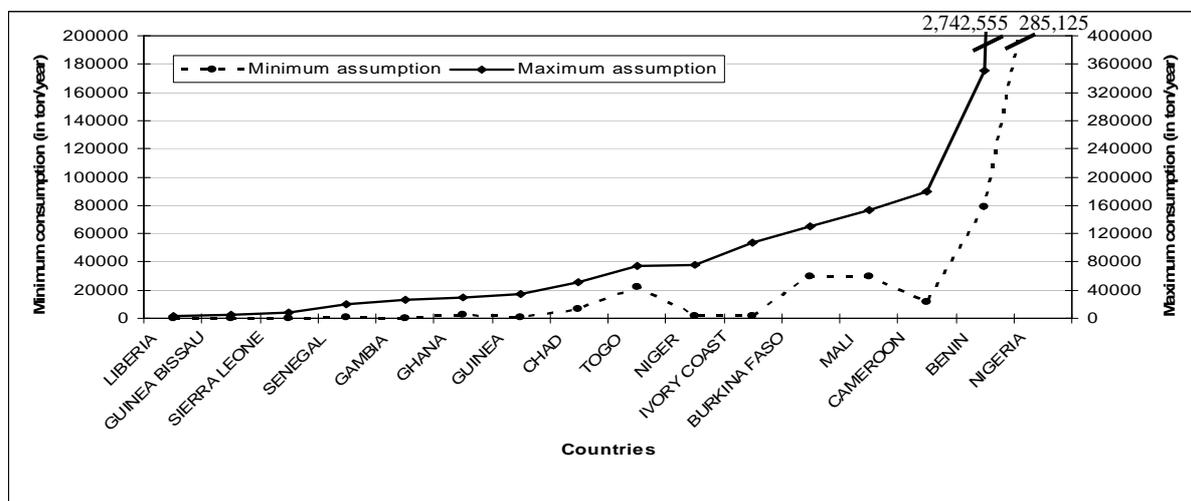


Fig. 1 : Two-wheel vehicles motor gasoline consumptions in 2002 in the minimum and maximum assumptions in the sixteen West African countries investigated.

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.

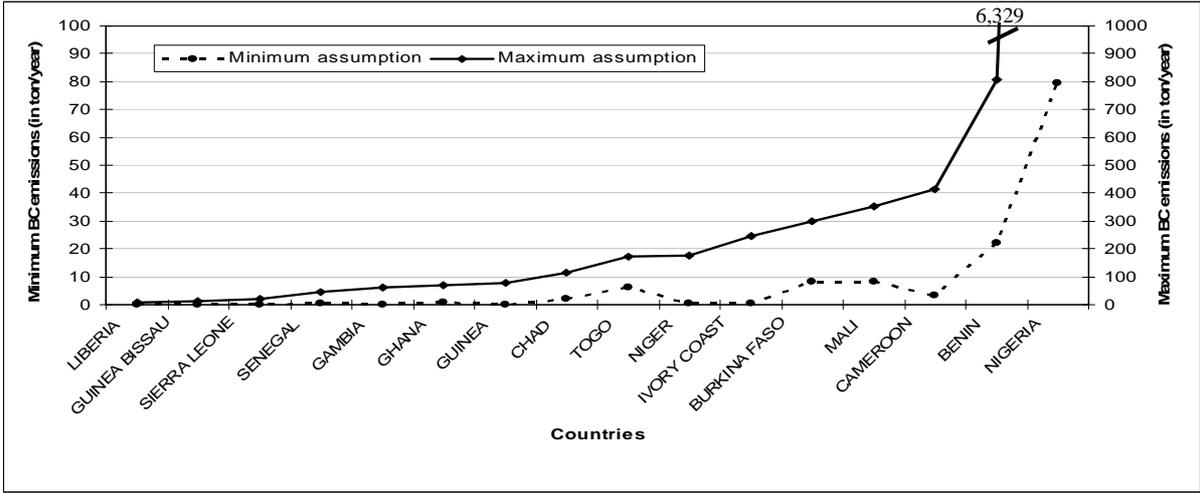


Fig. 2 : Total BC emissions for two-wheel vehicles in West Africa in the minimum and maximum assumptions in 2002.

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.

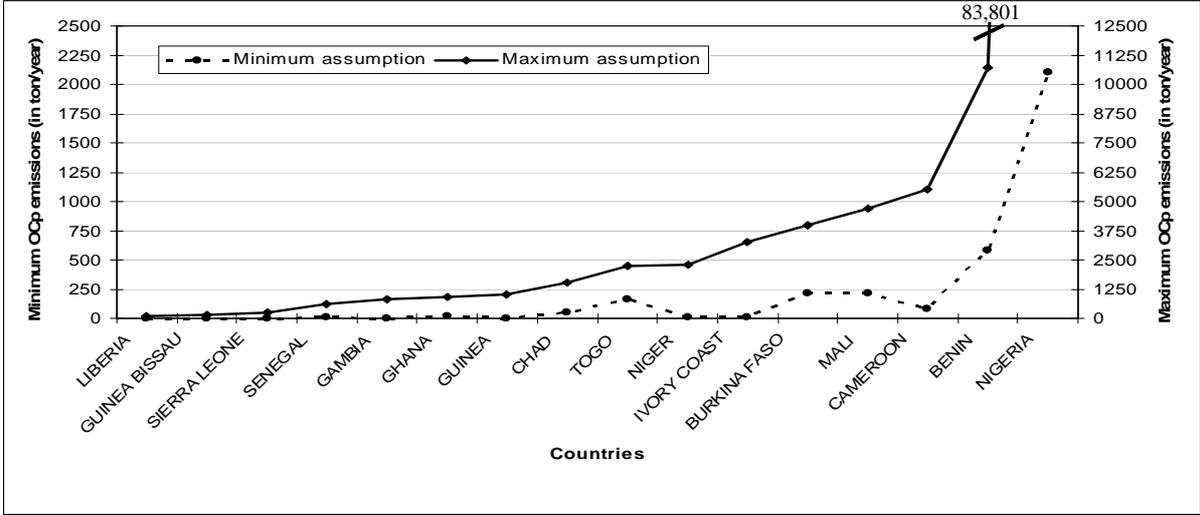


Fig. 3 : Total OCp emissions for two-wheel vehicles in West Africa in the minimum and maximum assumptions in 2002.

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 be 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

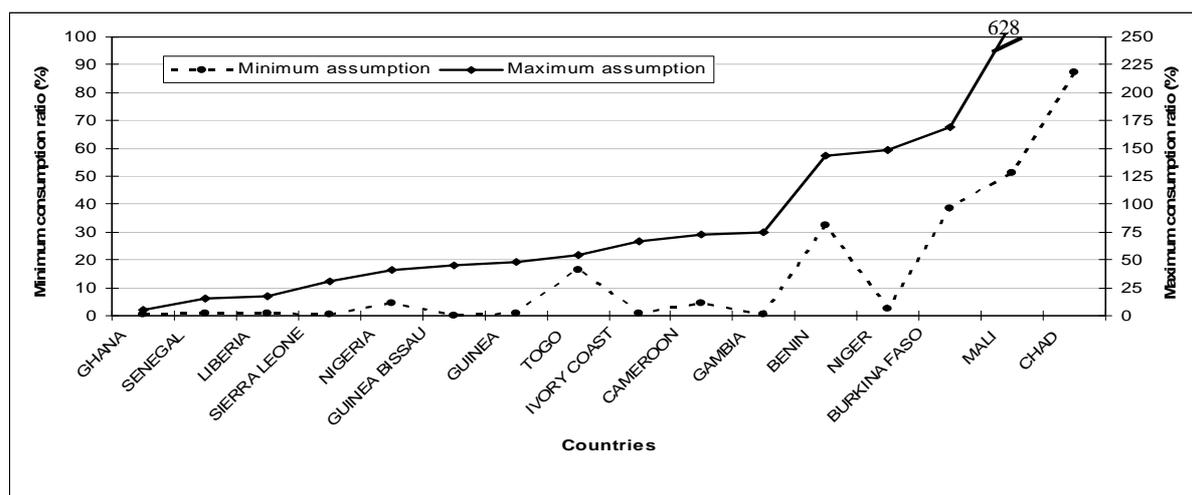


Fig. 4 : Ratios (in %) between two-wheel vehicle fuel and total vehicle road traffic fuel consumptions (United Nations database) in the minimum and maximum assumptions (year 2002).

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:

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

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.

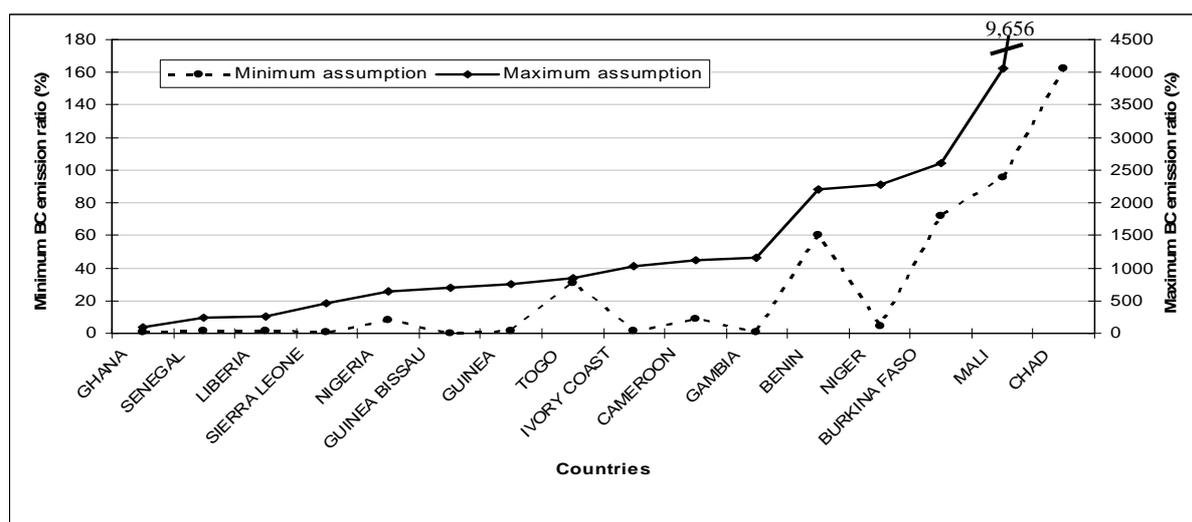


Fig. 5 : Ratios (in %) between two-wheel vehicle and total vehicle road traffic BC emissions (the latter from Junker and Liousse calculated for 2002) in the minimum and maximum assumptions for 2002.

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.

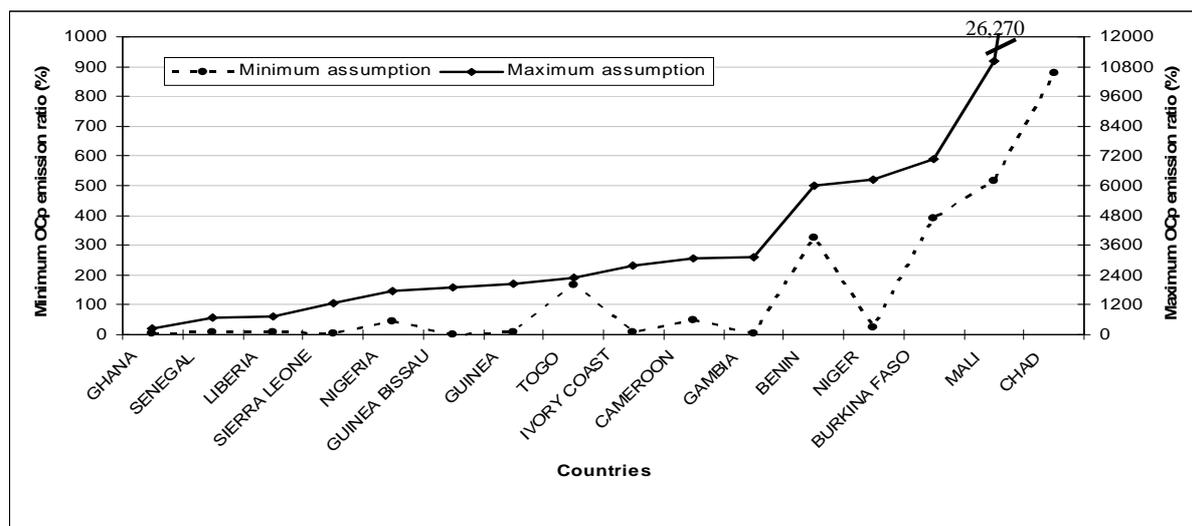


Fig. 6 : Ratios (in %) between two-wheel vehicle and total road traffic OCp emissions (the latter from Junker and Liousse calculated for 2002) in the minimum and maximum assumptions for 2002.

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.

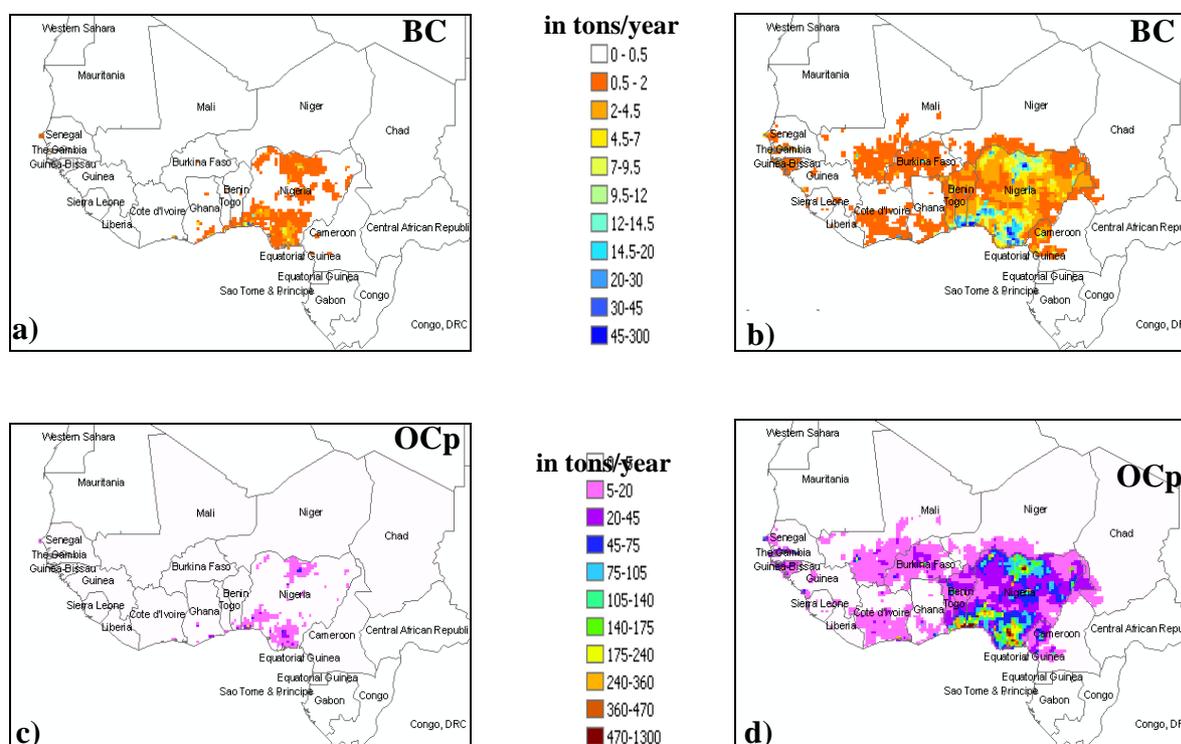


Fig. 7 : BC and OCp emissions in West Africa in 2002.

- 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/1999/09/16/1-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 zimidjan, 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/Kamdem.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.

Liousse, 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 Weahter, 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 tolerance 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.usherbrooke.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=1
1.

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.

CHAPITRE 3

INVENTAIRES D'EMISSIONS DE CARBONE SUIE (BC) ET DE CARBONE ORGANIQUE PRIMAIRE (OCp) EN AFRIQUE EN 2005

Sommaire

3.1. Introduction	76
3.2. Inventaire d'émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) en Afrique pour l'année 2005.....	76
3.2.1. <i>Méthodologie</i>	76
3.2.2. <i>Données de consommations</i>	79
3.2.3. <i>Emissions</i>	98
3.3. Comparaison de mon nouvel inventaire avec les inventaires de Junker and Lioussé (2008) et de Bond et al. (2004)	114
3.3.1. <i>Consommations</i>	114
3.3.2. <i>Emissions</i>	117
3.4. Comparaison entre les émissions de combustibles fossiles et de biofuels et celles des feux de biomasse, de carbone suie et de carbone organique primaire	122
3.4.1. <i>Carbone suie</i>	122
3.4.2. <i>Carbone organique primaire</i>	123
3.4.3. <i>Conclusion partielle</i>	124
3.5. Conclusion.....	125

3.1. Introduction

Dans le chapitre 2, l'importance d'une spécificité régionale a été démontrée en établissant un inventaire des émissions dues aux véhicules à deux roues. Dans le chapitre 3, nous allons « élargir » la notion de spécificité régionale en construisant un inventaire régional d'émissions d'aérosols carbonés pour l'année 2005 tenant compte de toutes les sources anthropiques. Ce nouvel inventaire 2005 sera ensuite comparé aux inventaires globaux existants (Bond et al., 2004 ; Junker and Lioussé, 2008). Des tests de sensibilité seront d'abord menés, nécessaires compte tenu des incertitudes sur les données, puis ensuite nous effectuerons une comparaison de l'inventaire nouvellement créé aux inventaires globaux existants.

3.2. Inventaire d'émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) en Afrique pour l'année 2005.

Dans cette 1^{ère} partie, les inventaires d'émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) que j'ai développés à l'échelle de l'Afrique pour l'année 2005 sont présentés. Ce travail est très important, dans la mesure où en Afrique, il existe des sources de pollutions spécifiques mal renseignées dans les inventaires globaux mais pourtant très émettrices (mélange essence-huile pour les engins à deux roues, vieilles voitures importées d'Europe,...) comme déjà montré au chapitre 2.

3.2.1. Méthodologie

On a vu au chapitre 1 que le choix de la méthodologie de Junker and Lioussé (2008) pour la construction des inventaires d'émissions nous imposait la détermination de 9 facteurs d'émissions seulement. Compte tenu du manque flagrant de mesures de facteurs d'émissions, la méthodologie de Junker and Lioussé (2008) m'a paru la plus adaptée pour l'élaboration de l'inventaire régional d'émissions des aérosols de combustion (carbone suie et carbone organique). La méthodologie de calcul des émissions est présentée sur la figure 3.1. Dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008), les données de consommations de biofuels et de combustibles fossiles proviennent de la base de données ONU. Pour le calcul des émissions, les facteurs d'émissions tiennent compte du combustible fossile ou du biofuel utilisé, du secteur d'activité et de la technologie via le niveau de développement du pays pour lequel trois niveaux sont considérés : les pays développés (e.g. la France), les pays semi développés (e.g. Afrique du Sud) et les pays en voie de développement (e.g. la Côte d'Ivoire). Il y a 33

principaux combustibles fossiles et biofuels de combustion dans la base de données de l'ONU. Par ailleurs, les activités industrielles, domestiques et celles liées au trafic constituent les secteurs pris en compte dans cet algorithme. Dans mon nouvel inventaire, j'ai introduit tout d'abord un nouveau secteur d'activité lié aux combustions dans les centrales thermiques (centrales fabriquant l'électricité à partir d'une source de combustion), comme c'est le cas dans l'inventaire de Bond et al. (2004). La séparation entre industries « classiques » et centrales thermiques vient du fait que ces deux technologies ont des facteurs d'émissions différents. A titre d'exemple, dans les pays en voie de développement, le facteur d'émission du carbone organique primaire pour le bois est de 2,16 g/kg dans le secteur industriel (Junker and Lioussé, 2008) contre 0,31 g/kg pour les centrales thermiques (Bond et al., 2004), soit un ratio de 7. Pour la différenciation entre industries et centrales thermiques, j'ai eu recours aux données d'un autre organisme international, à savoir l'Agence Internationale de l'Energie (IEA). Aussi, j'ai adapté l'algorithme de calcul des émissions (figure 3.1) en tenant compte des véhicules à deux roues et de la fabrication du charbon de bois (charcoal making). J'ai ensuite révisé entièrement toutes les données de consommation de combustibles fossiles et de biofuels, ainsi que les facteurs d'émissions utilisés dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008). Enfin, la densité de population qui était utilisée pour la spatialisation de ces émissions avait précédemment une résolution horizontale de 1° x 1° et datait de 1984 (GISS, 1984). Nous utilisons à présent des données de densité de population plus récentes (2005), avec une meilleure résolution spatiale (0,25° x 0,25°). La figure 3.1 présente l'algorithme général de calcul des émissions de carbone suie et de carbone organique primaire, ainsi que leurs spatialisations. Les cadres en pointillés de la figure traduisent les nouveautés que j'ai introduites dans mon travail, elles seront détaillées par la suite.

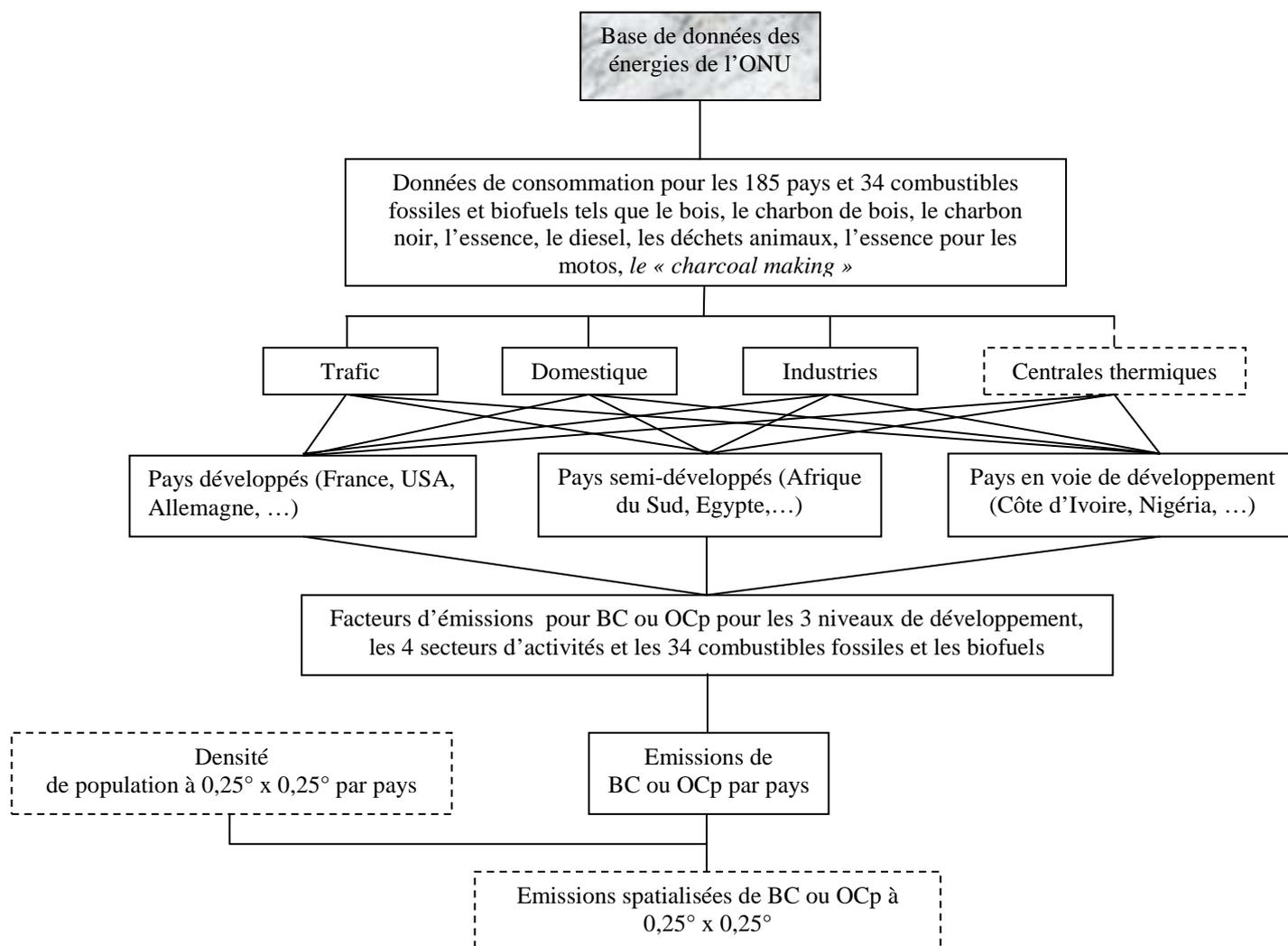


Fig. 3.1. : Algorithme de calcul des émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par pays et leurs spatialisations.

Dans cet algorithme, les émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) sont calculées suivant la relation :

$$Em(i,l) = \sum_{j,k} C(j,k,l) * EF(i,j,k,l)$$

où Em représente les émissions en g, C la consommation (fossil fuel ou biofuel) en kg et EF les facteurs d'émissions en g/kg. i représente le type d'aérosol (BC ou OCp), j le fuel considéré, k le secteur d'activité et l le pays avec son niveau de développement.

Les détails et la méthodologie des mises à jour sont décrits ci-après.

3.2.2. Données de consommations

Quatre sources de données ont permis d'élaborer une mise à jour des données de consommation provenant de la base de données ONU utilisée par Junker and Lioussé (2008) pour établir leur inventaire d'émissions à l'échelle du globe pour le carbone suie et le carbone organique primaire. Nous avons considéré les données de consommation en combustibles fossiles et biofuels :

- de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA, 2005),
- de l'inventaire des véhicules à deux roues (chapitre 2 et Assamoi and Lioussé, 2010) actualisé pour l'année 2005,
- de résultats d'un questionnaire que j'ai distribué dans différents pays africains et relatif aux données de consommations des combustibles fossiles et des biofuels,
- des travaux de recherche de Brocard (1996) et de Lioussé et al. (1996) que j'ai actualisés pour l'année 2005. Ces travaux traitaient des consommations du bois, du charbon de bois, ainsi que la fabrication du charbon de bois en Afrique.

a) Agence Internationale de l'Energie (IEA)

La base de données de l'IEA qui regroupent 4 secteurs d'activités (trafic, domestique, industrie et centrale thermique), présentés sur la figure 3.1 contre 3 (trafic, domestique et industrie où les centrales thermiques sont incluses dans les industries) dans la base de données de l'ONU, a permis une discrimination des données entre industries et centrales thermiques de la base de données de l'ONU. La méthodologie a consisté à évaluer la proportion de la consommation des combustibles fossiles et des biofuels des centrales thermiques dans la base de données de l'IEA par rapport à l'ensemble « industries et centrales thermiques ». Par la suite, nous avons supposé que cette proportion pourrait s'appliquer à la base de données ONU. C'est une hypothèse plausible, dans la mesure où ces deux organismes internationaux (l'ONU et l'IEA) disposent des mêmes sources de données, à savoir les administrations nationales. Ceci a été vérifié et validé au chapitre 2 pour les combustibles liquides dans le secteur du trafic où l'on notait peu de différences entre données de consommation de l'ONU et de l'IEA. Ainsi, la proportion liée à la consommation des centrales thermiques dans le total « industries et centrales thermiques » a été appliquée au secteur des industries de la base de données de l'ONU, afin d'en extraire la part due aux centrales thermiques et la « nouvelle » part due aux industries. Le tableau 3.1 fournit quelques exemples de données de

consommations du nouveau secteur des centrales thermiques à partir des données de l'IEA pour 2005 pour quelques pays africains.

Tableau 3.1. : Quelques exemples de modifications des valeurs de consommations de l'ONU (*en Gigagrammes*) sur la base des données de l'IEA pour les secteurs des industries et des centrales thermiques en 2005 de quelques pays d'Afrique.

Pays	Combustible fossile ^a	Secteur d'activité ^b	IEA		Consommation ONU (Gg)	
			Consommation (Gg)	Proportion %	New	Old
Algérie	DL	I	921	0,80	710,2	884,5
		PPLT	226	0,20	174,3	/
		<i>Total</i>	<i>1147</i>	<i>1</i>	<i>884,5</i>	<i>884,5</i>
Angola	DL	I	276	0,86	204,4	237
		PPLT	44	0,14	32,6	/
		<i>Total</i>	<i>320</i>	<i>1</i>	<i>237,0</i>	<i>237</i>
Bénin	DL	I	2	0,08	4,4	54,6
		PPLT	23	0,92	50,2	/
		<i>Total</i>	<i>25</i>	<i>1</i>	<i>54,6</i>	<i>54,6</i>
Côte d'Ivoire	DL	I	141	0,99	124,1	125
		PPLT	1	0,01	0,9	/
		<i>Total</i>	<i>142</i>	<i>1</i>	<i>125,0</i>	<i>125</i>
Nigéria	DL	I	34	0,09	41,3	468
		PPLT	351	0,91	426,7	/
		<i>Total</i>	<i>385</i>	<i>1</i>	<i>468,0</i>	<i>468</i>
Afrique du Sud	CL	I	10857	0,06	14 696,7	230981
		PPLT	159777	0,94	216 284,3	/
		<i>Total</i>	<i>170634</i>	<i>1</i>	<i>230 981,0</i>	<i>230981</i>

^a DL pour le diesel et CL pour le charbon noir (ou hard coal)

^b I pour les industries et PPLT pour les centrales thermiques.

Par ailleurs, il faut souligner que les données IEA nous ont permis également de prendre en compte l'Erythrée en tant que pays à part entière, ce qui n'était pas le cas dans la base de données de l'ONU, incomplète sur certains points. Cela est justifié par le nombre d'habitants de ce pays (4,5 millions en 2005) qui est plus important que celui d'une dizaine de pays en Afrique comme par exemple les 4,2 millions d'habitants en Centrafrique et les 3,3 millions d'habitants au Libéria en 2005 (World Bank, 2005).

b) Questionnaire sur les données de consommations en combustibles fossiles et en biofuels en Afrique

Notre deuxième source de données provient d'un questionnaire que nous avons distribué en 2007 en Afrique. En effet, lorsque j'ai débuté cette thèse, l'objectif principal était d'élaborer

un inventaire régional basé sur les données de consommation en combustibles fossiles et en biofuels issues d'enquêtes auprès des ministères concernés (transports, industries, mines et énergie,...) et/ou d'organismes régionaux (e.g. AfricaClean, Système d'Information Energétique (SIE)). Ce travail est apparu tout à fait pertinent au vu des différences relevées entre les données issues d'un organisme international tel que l'ONU et celles d'un organisme régional (AfricaClean par exemple) (cf. figure 1.2 de l'introduction générale). J'ai ainsi établi un questionnaire relatif aux données de consommation en combustibles fossiles et en biofuels pour les différents secteurs d'activités (industriel, domestique, trafic et centrales thermiques), afin de recouper les informations issues des différentes sources de données. Ce questionnaire, présenté en Annexe 1, a été envoyé à nos contacts et partenaires africains. Sur les 56 pays que compte l'Afrique, nous avons pu en contacter 27 avec 13 retours positifs à notre questionnaire. La figure 3.2 présente les pays ayant répondu favorablement à notre questionnaire (en bleu). A noter que c'est en Afrique de l'Ouest que nous avons eu le plus de retours positifs (cf. Annexe 2).



Fig. 3.2 : Carte géographique de l'Afrique : en bleu les pays qui ont répondu favorablement au questionnaire.

De manière plus détaillée, en Afrique du Nord, nous avons eu des réponses de l'Algérie, de l'Egypte et du Maroc. En Afrique de l'Ouest, sur 11 pays interrogés, nous avons obtenu 8 réponses dont celles du Bénin, du Burkina Faso, de la Côte d'Ivoire, du Mali, du Niger, du

Nigeria, du Sénégal et du Togo. Par contre, 6 questionnaires envoyés en Afrique du Centre et de l'Est sont restés sans réponse. Enfin, nous avons eu des réponses du Zimbabwe et de l'Afrique du Sud. Notons que les données obtenues à partir de ces questionnaires sont pour la plupart incomplètes, car tous les champs présents dans le questionnaire n'ont pas été remplis comme on peut le voir sur un exemple de retour de questionnaire en Annexe 1.

c) Inventaires des émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par les deux roues en Afrique de l'Ouest pour l'année 2005.

L'inventaire des consommations et des émissions d'aérosols carbonés de combustion (BC et OCp) liées aux deux roues a été élaboré pour l'Afrique de l'Ouest pour l'année 2002 (Chapitre 2 et Assamoi and Liousse, 2010). Nous avons dû étendre cet inventaire à l'année 2005, tenant compte du fait que les données sur le nombre d'engins à deux roues est très évolutif. Il a donc fallu déterminer le nombre de deux roues dans les 16 pays d'Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée Bissau, Côte d'Ivoire, Libéria, Mali, Niger, Nigéria, Sénégal, Sierra Léone, Tchad et Togo) en 2005. Comme cela a été souligné par les auteurs au chapitre 2 et dans Assamoi and Liousse (2010), les données sont quasi-inexistantes quant au nombre de deux roues en Afrique de manière générale et à tout le moins sont très différentes de celles obtenues pour 2002. Quand elles existent, elles sont sujettes à caution, dans la mesure où les valeurs divergent d'une source à une autre (Kumar and Barret, 2008 ; Godard and Ngabmen, 2002). Aussi, nous avons défini à partir des différentes sources de données, un intervalle d'incertitude quant au nombre de deux roues en Afrique de l'Ouest pour 2005. Comme dans Assamoi and Liousse (2010), nous nous sommes basés sur des données « directes ». Ces dernières ont été obtenues dans 3 pays. Il s'agit du Cameroun avec 66893 véhicules à deux roues (Kumar and Barrett (2008), Diaz Olvera et al. (2007), Institut National de la Statistique (2006), Godard and Ngabmen (2002)), du Nigéria avec 2223858 deux roues (pers. comm. Aminu Jalal en réponse à notre questionnaire) et du Togo avec 144108 engins à deux roues (Trans-Africa (2009), BOAD (2002), Godard and Ngabmen (2002)). Parallèlement à ces données « directes », nous avons utilisé des données « indirectes » issues du calcul de la proportion entre les personnes ayant un véhicule à deux roues et la population totale dans chaque pays, à partir des données DHS (2006) (cf. tableau 3.1). Par ailleurs, nous disposons de données sur le nombre de deux roues pour des années autres que celle de 2005 dans cinq pays (Bénin, Burkina Faso, Mali, Niger et Tchad). Nous avons ainsi procédé à une interpolation linéaire entre les données connues pour ces années pour en déduire le nombre de véhicules à deux roues en 2005. Ainsi au Bénin, le

nombre d'engins à deux roues a été évalué à 166000 (BOAD, 2002) en 2000 et 320000 en 2002 (Assamoi and Liousse, 2010). Au Burkina Faso, ce chiffre varie entre 300000 en 2002 (Assamoi and Liousse, 2010) et 600000 en 2008 (Afriquejet, 2008). Au Mali, on recensait 300000 deux roues en 2002 (Assamoi and Liousse, 2010) contre 450000 en 2007 (Ministère des Transports, 2008). Le nombre de deux roues en circulation au Niger est faible en comparaison aux pays précédents. On en dénombrait ainsi 4700 en 2000 (BOAD, 2002) et 5000 en 2002 (Assamoi and Liousse, 2010). Enfin au Tchad, les véhicules à deux roues seraient au nombre de 3640 en 1996 (Metschies, 1999) contre 32000 en 2008 (Trans-Africa, 2009). Le tableau 3.2 résume le nombre de véhicules à deux roues obtenues avec ces différentes sources en 2005.

Tableau 3.2. : Nombre de véhicules à deux roues en 2005.

Pays	Population ^b	Nombre de personnes par foyer ^c	Nombre de foyers qui ont un 2 roue (%) ^c	Nombre de foyers qui ont un 4 roue (%) ^c	Nombre de foyers ^c	Nombre de véhicules à deux roues en 2005	
						Evaluations directes et interpolations	DHS (2006)
Bénin	7867630	5,0	35,6	4,4	1573526	551000	560175
Burkina Faso	13933400	6,5	24,2	2,9	2143600	450000	518751
Cameroun	17795100	4,8	7,5	5,0	3707313	66893	278048
Côte d'Ivoire ^a	19244900	5,5	11,8	4,1	3499073	/	412891
Gambie ^a	1526140	/	/	/	/	/	/
Ghana ^a	21915200	4,0	2,1	5,4	5478800	/	115055
Guinée ^a	9220770	6,1	8,6	4,0	1511602	/	129998
Guinée Bissau ^a	1472630	/	/	/	/	/	/
Libéria ^a	3334220	5,0	1,7	2,1	666844	/	11336
Mali	11611100	5,7	29,7	3,8	2037035	390000	604999
Niger	13264200	6,1	5,6	2,0	2174459	5450	121770
Nigeria	141356000	5,0	15,1	9,6	28271200	2223858	4268951
Sénégal ^a	11281300	8,7	5,9	7,3	1296701	/	76505
Sierra Léone ^a	5106980	5,9	4,0	2,0	865590	/	34624
Tchad	10145600	5,4	4,3	1,5	1878815	24910	80789
Togo	5992080	5,4	10,4	2,5	1109644	144108	115403

^a Pays pour lesquels manquent des données sur le nombre de 2 roues.

^b Les données de population proviennent de World Bank (2005).

^c Les données proviennent de DHS (2006).

On a remarqué que les valeurs obtenues avec les données DHS (2006) étaient supérieures à celles obtenues avec les autres sources (évaluations directes et interpolations), sauf au Togo. Ainsi, nous avons considéré les valeurs de DHS (2006) comme celles de notre scénario maximum et les autres pour le scénario minimum, sauf au Togo où les valeurs ont dû être

inversées. Pour les 8 pays (la Côte d'Ivoire, la Gambie, le Ghana, la Guinée, la Guinée Bissau, le Libéria, le Sénégal et la Sierra Léone), nous ne disposons d'aucune donnée sur le nombre de deux roues en 2005 dans le scénario minimum. C'est le cas également pour la Gambie et la Guinée Bissau dans le scénario maximum. Pour pallier ce problème, nous avons considéré le ratio du nombre de deux roues et des quatre roues en 2005 donné par DHS (2006) et IRF (2007) (cf. tableau 3.3). Ainsi, la plus faible valeur du ratio, obtenue au Niger (0,13), a été appliquée à ces 8 pays dont on connaît le nombre de véhicules à 4 roues, afin de calculer le nombre de deux roues dans le scénario minimum en 2005. Pour compenser le manque de données en Gambie et en Guinée Bissau dans la configuration maximum, nous avons également utilisé le plus grand ratio (8,34 au Burkina Faso) pour déduire le nombre de deux roues en circulation en 2005 dans ces deux pays. Le tableau 3.3 présente le nombre de deux roues en 2005 dans les 16 pays d'Afrique de l'Ouest, ainsi que les ratios entre les nombres de véhicules à deux roues et à quatre roues dans chaque pays de notre étude.

Tableau 3.3. : Récapitulatif du nombre de 2 roues dans les 16 pays d'Afrique de l'Ouest dans les hypothèses minimum et maximum en 2005.

Pays	Nombre de véhicules à deux roues		Nombre de véhicules à 4 roues	Ratio 2 roues/4 roues		Nombre moyen de véhicules à deux roues
	minimum	maximum		minimum	maximum	
Bénin	551000	560175	69235	7,96	8,09	555588
Burkina Faso	450000	518751	62164	7,24	8,34	484376
Cameroun	66893	278048	185366	0,36	1,50	172471
Côte d'Ivoire	17978	412891	143462	0,13	2,88	215435
Gambie	10430	106217	12728	0,13	8,34	58323
Ghana	37076	115055	295855	0,13	0,39	76065
Guinée	7577	129998	60464	0,13	2,15	68788
Guinée Bissau	10398	98167	11764	0,13	8,34	54283
Libéria	72746	11336	14004	5,19	0,81	42041
Mali	390000	604999	77407	5,04	7,82	497500
Niger	5450	121770	43489	0,13	2,80	63610
Nigeria	2223858	4268951	2714035	0,82	1,57	3246405
Sénégal	11863	76505	94659	0,13	0,81	44184
Sierra Léone	14185	34624	17312	0,13	2,00	24404
Tchad	24910	80789	28182	0,88	2,87	52850
Togo	115403	144108	27741	5,19	4,16	129756

Afin de prendre en compte les incertitudes sur le nombre des véhicules à deux roues en circulation dans les 16 pays, nous avons établi une moyenne entre valeurs minimale et maximale du nombre de deux roues pour l'élaboration d'un inventaire 2005 unique à l'échelle de l'Afrique. Par ailleurs, Worou (2005) et Adjovi (1999) suggéraient respectivement que 50% et 40% des véhicules à deux roues en circulation étaient utilisés pour un usage public.

Dans notre logique de moyenne, nous avons donc considéré des proportions de 45% et 55% pour le nombre d'engins à deux roues à usage public et privé, respectivement. A ce nombre moyen de deux roues, nous avons associé les autres paramètres relatifs au scénario maximum (i.e. facteurs d'émissions, consommation journalière, densité du fuel,... : cf. tableau 2.2 au chapitre 2) pour le calcul de la consommation des véhicules à deux roues dans chaque pays selon la méthodologie décrite dans Assamoi and Liousse (2010). Comme spécifié dans cet article, les paramètres du scénario maximum sont ceux qui reflètent au mieux la réalité en Afrique, contrairement à ceux du scénario minimum qui reflètent plus les réalités de l'Europe. En effet, dans le scénario minimum, les facteurs d'émissions sont ceux des motos à deux temps d'Europe, le pourcentage du mélange essence/huile (2%) est celui préconisé par les fabricants européens des 2 roues et la consommation de 0,5 litre est celle d'un organisme français (ADEME).

Par ailleurs, dans notre algorithme, nous avons aussi introduit un « nouveau » combustible caractérisant le carburant des motos à deux temps issu du mélange essence et huile.

d) Actualisation des travaux de Brocard (1996) sur le charbon de bois et le bois

L'étude de Brocard (1996) a porté sur les émissions des combustions domestiques en Afrique de l'Ouest pour le charbon de bois et le bois (biofuels). Dans sa thèse, Brocard a donné la consommation en charbon de bois et en bois par habitant pour 1996. Ces données (Brocard, 1996), sont issues de questionnaires et d'enquêtes de terrain. A ce stade, nous avons émis une hypothèse « forte » : on a considéré que ces ratios de consommation de charbon de bois et de bois de chauffe par habitant obtenus par Brocard (pour 1996) sont les mêmes en 2005. Cette hypothèse revient à considérer que les habitants consomment les mêmes quantités de charbon de bois et de bois en 1996 qu'en 2005. Cela semble être une hypothèse « réaliste » car rien n'explique pourquoi il y aurait plus de repas par habitant en 2005 qu'en 1996. De plus, l'utilisation d'autres sources domestiques de cuisine n'a pas bouleversé les consommations en bois et en charbon de bois (e.g. butane) et la majeure partie de la population utilise toujours préférentiellement ces 2 combustibles. Ces ratios ont ainsi été appliqués aux données de population de 2005, afin d'extrapoler la consommation en charbon de bois et en bois dans les pays étudiés par Brocard (1996). Toutefois, dans certains pays où il n'existe aucune donnée, l'auteur a dû faire l'hypothèse d'utiliser le ratio de pays voisins. Pour éviter de nouvelles sources d'incertitudes et donc des erreurs supplémentaires, nous avons limité l'exploitation des données de Brocard (1996) aux pays où la proportion de consommation de biofuels par habitant est formellement connue. Ainsi, les données provenant directement de l'ONU

relatives à la consommation de charbon de bois et de bois ont donc été utilisées pour les autres pays. Le tableau 3.4 présente des exemples de données de consommations de charbon de bois et de bois obtenues à partir des données ONU (UN, 2005) et de Brocard (1996) actualisées pour l'année 2005 dans quelques pays d'Afrique.

Tableau 3.4. : Exemple de données de consommation (*en kilotonnes*) de charbon de bois et de bois en 2005 obtenues à partir de l'ONU (UN, 2005) et de Brocard (1996, mais actualisé).

		Charbon de bois (CH)	Bois (FW)
Bénin	ONU (2005)	40	3 700
	Brocard (1996) ^a	25	3 723
	Différences relatives (%) ^b	-37,5	0,6
Cameroun	ONU (2005)	362	5 757
	Brocard (1996) ^a	97	10 395
	Différences relatives (%) ^b	-73,2	80,6
Côte d'Ivoire	ONU (2005)	401	5 316
	Brocard (1996) ^a	849	6 789
	Différences relatives (%) ^b	111,7	27,7
Ghana	ONU (2005)	748	12 758
	Brocard (1996) ^a	1027	8213
	Différences relatives (%) ^b	37,3	-35,6
Togo	ONU (2005)	280	3488
	Brocard (1996) ^a	344	2037
	Différences relatives (%) ^b	22,9	-41,6

^a Les données de Brocard (1996) ont été actualisées pour l'année 2005.

^b les différences relatives (%) ont été calculées avec référence aux données ONU (2005).

Le tableau 3.4 montre que les données provenant de deux sources différentes peuvent être très différentes, avec des proportions très diverses. Par exemple en Côte d'Ivoire, la consommation de charbon de bois de Brocard (1996) est plus du double de celle donnée par l'ONU, tandis qu'au Bénin, la différence sur les données du bois entre ces deux sources de données est très réduite (0,6%). Au vu des différences qui existent entre ces deux sources de données, les valeurs de Brocard (1996) qui sont des valeurs issues d'enquêtes de terrain ont été utilisées préférentiellement dans la construction de mon nouvel inventaire.

e) Prise en compte des émissions liées à la fabrication du charbon de bois

Nous avons également pris en compte une nouvelle source d'émissions : le « charcoal making ». Le « charcoal making » est le processus de fabrication du charbon de bois à partir du bois, dans le secteur domestique. Ce procédé émet beaucoup de particules dans l'atmosphère, du fait de leur combustion incomplète (Lacaux et al., 1994 ; Brocard, 1996 ;

Liousse et al., 1996 ; Cachier, 1998), d'où l'importance d'en tenir compte. Nous avons supposé que 50% du bois servait à fabriquer du charbon de bois sur la base des résultats de Liousse et al. (1996). Cette nouvelle mise à jour présente un impact significatif sur la nouvelle répartition des consommations en combustibles, dans la mesure où on transfère la moitié de la consommation de bois au « charcoal making ». Tout comme les sources de feux domestiques, ces émissions sont spatialisées suivant la densité de population et leur temporalité est considérée constante tout au long de l'année.

3.2.2.1. Compilation des données des sources précédentes

Pour l'élaboration du nouvel inventaire, le mieux serait d'utiliser uniquement les résultats du questionnaire. Cependant, nous avons été confrontés au fait que les données issues du questionnaire sont partielles. Nous avons donc décidé de compléter cette source par toutes les autres données décrites au paragraphe précédent (cf. 3.2.2) y compris les données ONU, lesquelles ont servi à l'élaboration de l'inventaire de Junker and Liousse (2008). Par ailleurs, une autre difficulté est apparue du fait que certaines données de consommations provenaient de plusieurs sources (par exemple, la consommation de charbon de bois en Côte d'Ivoire provenait de l'ONU ainsi que du questionnaire et des travaux de Brocard (1996)). Nous avons décidé d'un ordre de « priorité » pour l'acceptation des données en fonction de l'importance et de la « fiabilité » de la source d'information. Nous avons considéré par priorité le questionnaire, les données de l'inventaire des deux roues (2005), les résultats de Brocard (1996) actualisés pour l'année 2005 et les données ONU. Il est à noter que nous aurions pu remplacer toutes les données ONU par celles de l'IEA, mais nous avons pu vérifier que ces deux organismes ont le même niveau d'informations pour l'Afrique, sauf pour les centrales thermiques. Néanmoins, les données de l'IEA ont servi à la prise en compte supplémentaire des centrales thermiques. C'est ainsi que nous avons pu produire un cadastre de consommations de combustibles fossiles et de biofuels par pays et par secteur d'activités.

3.2.2.2. Résultats sur les consommations

Je présente les résultats des consommations de combustibles fossiles et de biofuels en regroupant les pays par sous-région (Afrique du Nord, Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale, Afrique de l'Est et Afrique Australe). Le découpage utilisé est celui de la division de la population des Nations-Unies (ONU) et il a été préféré à celui des entités économiques

reconnues par l'Union Africaine (UA) car ces dernières présentent l'inconvénient de permettre le chevauchement de certaines entités entre elles (un pays pouvant appartenir à plusieurs entités). Une autre raison qui justifie ce choix tient au nombre important de ces entités (entre 8 et 10), pouvant rendre la lecture du rapport fastidieuse. Le corps du rapport est donc organisé par sous région, chaque partie sous-régionale pouvant se lire indépendamment des autres ou de façon complémentaire. Ainsi, les pays qui composent les 5 différentes régions d'Afrique sont :

- l'Afrique du Nord (8 pays) : l'Algérie, l'Égypte, la Libye, le Maroc, la Mauritanie, le Soudan, la Tunisie et le Sahara Occidental.
- l'Afrique de l'Ouest (15 pays) : le Bénin, le Burkina Faso, le Cap-Vert, la Côte d'Ivoire, la Gambie, le Ghana, la Guinée, la Guinée Bissau, le Libéria, le Mali, le Niger, le Nigéria, le Sénégal, la Sierra Léone et le Togo.
- l'Afrique Centrale (8 pays) : le Cameroun, la République Centrafricaine, la République du Congo, la République Démocratique du Congo (RDC-ex-Zaïre), le Gabon, la Guinée Equatoriale, Sao-Tomé & Principe et le Tchad.
- l'Afrique de l'Est (10 pays) : le Burundi, Djibouti, l'Erythrée, l'Éthiopie, le Kenya, l'Ouganda, le Rwanda, les Seychelles, la Somalie et la Tanzanie.
- l'Afrique Australe (15 pays) : L'Afrique du Sud, l'Angola, le Botswana, les Comores, le Lesotho, Madagascar, le Malawi, Îles Maurices, le Mozambique, la Namibie, le Swaziland, la Zambie, le Zimbabwe, La Réunion et les Îles de Ste Hélène.

Dans un premier temps, je présente les résultats du nouvel inventaire de consommations en combustibles fossiles et en biofuels pour 2005 et dans un second temps, je comparerais aux données de consommations des bases de données ONU et IEA.

A l'échelle de toute l'Afrique, la consommation de combustibles fossiles et de biofuels en 2005 est de 1318 Tg. Cette consommation se répartit entre 628 Tg de biofuels (48%) et 690 Tg de combustibles fossiles (52%). Du point de vue des secteurs d'activités, c'est dans le secteur domestique que l'on note les plus fortes consommations de combustibles fossiles et de biofuels. Ainsi, on relève 576,7 Tg dans le secteur domestique (44%), 388,9 Tg dans le secteur industriel (29%), 262,4 Tg dans les centrales thermiques (20%) et 89,8 Tg dans le secteur trafic (7%). L'analyse régionale de la répartition des consommations montre que la région Afrique Australe représente 33%, suivie de l'Afrique du Nord avec 26%. La troisième

région consommatrice est l'Afrique de l'Ouest avec 18%, suivie de l'Afrique de l'Est avec 16% enfin, l'Afrique Centrale avec 7%. La figure 3.3 présente les proportions de consommations de combustibles fossiles et de biofuels du nouvel inventaire par zone géographique en Afrique pour 2005. Il s'agit des données dans 4 secteurs d'activités : trafic, domestique, industrie et centrales thermiques.

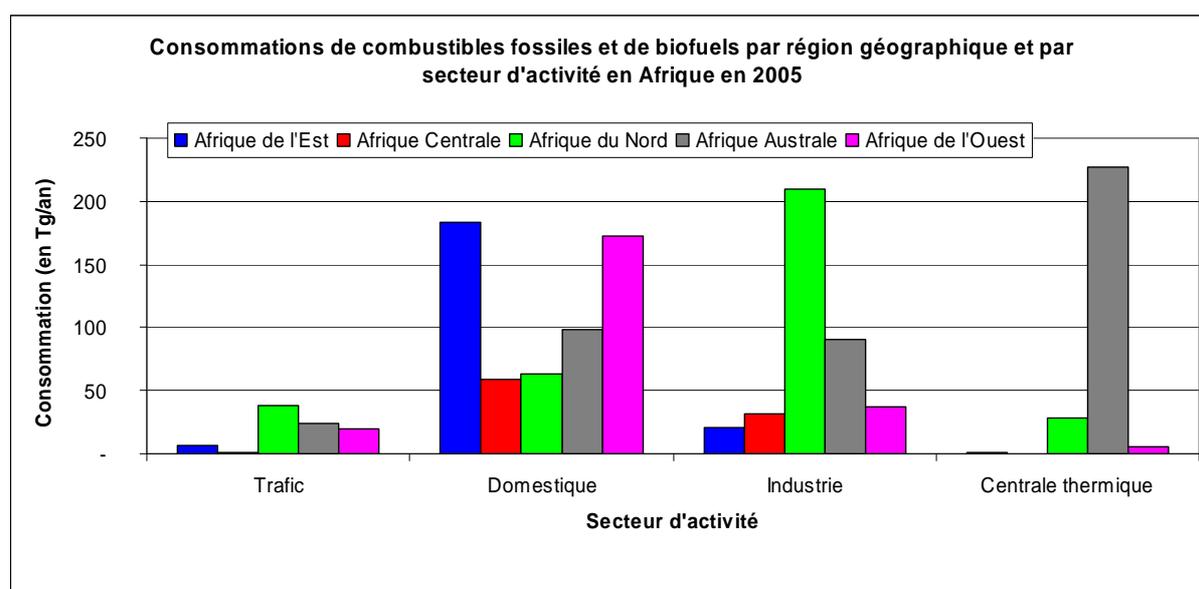


Figure 3.3 : Consommations de combustibles fossiles et de biofuels par région géographique et par secteur d'activité en Afrique en 2005.

Sur la figure 3.3, on constate que les consommations des régions d'Afrique varient d'un secteur d'activité à un autre. Ainsi, dans le secteur du trafic, c'est la région de l'Afrique du Nord qui a la plus grande consommation avec 38,6 Tg, soit 43% du total, suivie de l'Afrique Australe et de l'Ouest avec respectivement 23,2 Tg (26%) et 19,3 Tg (~22%). En nous intéressant au secteur domestique, c'est l'Afrique de l'Est qui avec ses 183,5 Tg (32%) est en tête, suivie de l'Afrique de l'Ouest avec 172,7 Tg (30%) et l'Afrique Australe avec 17% soit 98,7 Tg. Au niveau des industries, on observe une grande disparité entre les régions. Aussi, l'Afrique du Nord consomme plus de la moitié du total avec ses 237,183 Tg soit 54%, suivie de l'Afrique Australe avec 23% (90,559 Tg). Les autres régions consomment chacune moins de 10% du total. Enfin, concernant les centrales thermiques, l'Afrique Australe représente 87% de la consommation totale suivie de l'Afrique du Nord avec 11%. Quand aux 3 autres régions, elles représentent environ 2% du total de la consommation dans ce secteur.

Ces fortes disparités dans les secteurs des industries et des centrales thermiques s'expliquent par les différents niveaux de développement. En effet, le niveau de développement d'un pays

est étroitement lié à l'importance de son secteur industriel. En considérant les pays industrialisés (développés) de l'Europe Occidentale, on aurait tendance à voir de plus fortes valeurs de consommations dans les secteurs des industries et des centrales thermiques contrairement aux pays africains. Notons qu'en Afrique, il n'y a **aucun pays développé** en tenant compte d'une classification basée sur le Produit Intérieur Brut (PIB) (Junker and Lioussé, 2008). En effet, la majorité des pays africains (44 sur un total de 56 pays) sont des pays en voie de développement, les autres étant des pays semi développés (13/56 pays). De manière plus détaillée, on relève que sur les 15 pays que compte l'Afrique Australe, il y a 7 pays semi-développés. 4 pays sur 8 en Afrique du Nord sont semi-développés. Par contre, dans les 3 autres régions, il y a très peu de pays semi-développés : en Afrique de l'Est, seul un pays (Seychelles) sur les 10 fait partie des pays semi-développés. Il en est de même en Afrique Centrale où seul le Gabon est un pays semi-développé sur les 8 pays de la région. L'Afrique de l'Ouest apparaît comme la région la moins développée, tous les 14 pays de cette région étant des pays en voie de développement.

Les données de consommations en combustibles fossiles et en biofuels varient avec l'importance de la population, en particulier dans les secteurs du trafic et du domestique. En 2007 selon l'ONU (UN, 2007), la population d'Afrique de l'Ouest était de 281 millions d'habitants suivie de l'Afrique de l'Est avec 220 millions et l'Afrique du Nord avec 205 millions. L'Afrique Australe est en 4^{ème} position avec ses 156 millions d'habitants et l'Afrique Centrale avait 102 millions d'habitants. Aussi, dans le secteur domestique, l'Afrique de l'Est et l'Afrique de l'Ouest sont les plus grands consommateurs en combustibles fossiles et biofuels avec 62% du total de la consommation dans ce secteur. L'analyse des tendances de consommations est très complexe car d'autres facteurs sont à prendre en compte. Il s'agit entre autres d'indicateurs comme les tendances des marchés mondiaux, les importations, les exportations et dans certains cas les crises socio-politiques (par exemple les conflits armés en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale,...). Cette première analyse nous fournit une idée des comportements régionaux du point de vue des consommations. Par la suite, je présente une analyse détaillée tenant compte de la consommation des combustibles fossiles et des biofuels par région.

a) Afrique de l'Est

Dans cette région de l'Afrique, on dénombre 10 pays. Les consommations par secteurs sont de 6,859 Tg (soit 3%) dans le secteur du trafic, de 183,496 Tg (soit 86%) dans le domestique, de 20,448 Tg (soit 10%) dans le secteur industriel et de 1,264 Tg (soit 1%) dans les centrales

thermiques (cf. figure 3.3). Le tableau 3.5 présente les proportions entre les consommations de combustibles fossiles et de biofuels des pays de l'Afrique de l'Est en 2005, selon les différents secteurs d'activités.

Tableau 3.5. : Proportions de consommations des combustibles fossiles et des biofuels par pays et par secteur d'activité en Afrique de l'Est pour 2005.

Pays	Niveau de Développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Kenya	1	Trafic	40,8
Ethiopie	1	Trafic	26,3
Tanzanie	1	Trafic	20,5
Ouganda	1	Trafic	4,9
Erythrée	1	Trafic	1,7
5 autres pays	/	Trafic	5,8
Ethiopie	1	Domestique	40,5
Tanzanie	1	Domestique	25,3
Ouganda	1	Domestique	14,6
Kenya	1	Domestique	10,2
Erythrée	1	Domestique	0,3
5 autres pays	/	Domestique	9,1
Ethiopie	1	Industrie	45,3
Kenya	1	Industrie	30,9
Tanzanie	1	Industrie	19,6
Ouganda	1	Industrie	3,1
Erythrée	1	Industrie	0,04
5 autres pays	/	Industrie	1,1
Erythrée	1	Centrale thermique	50,0
Kenya	1	Centrale thermique	42,7
Tanzanie	1	Centrale thermique	7,1
Ethiopie	1	Centrale thermique	0,2
5 autres pays	/	Centrale thermique	/

* 1 pour les pays en voie de développement

Au vu du tableau 3.5, on peut souligner que les pays plus grands consommateurs dans le secteur du trafic sont le Kenya avec 40,8%, l'Ethiopie avec 26,3% et la Tanzanie avec 20,5%. Chacun des 5 pays restants représente moins de 5% de la consommation totale. Il ressort que c'est la bagasse qui est le biofuel le plus consommé, avec près de 47% du total, suivi par le diesel avec 28%. Dans le secteur domestique, ce sont l'Ethiopie avec 40,5%, la Tanzanie avec 25,3% et l'Ouganda avec 14,6% qui sont les plus grands consommateurs. Les fuels les plus utilisés sont le bois directement et indirectement le bois servant à la fabrication du charbon de bois (« charcoal making ») (40% pour chacun). Ces proportions sont identiques car selon notre hypothèse émise dans la partie 3.1.2, nous avons considéré que 50% du bois servait à la fabrication de charbon de bois (« charcoal making »).

Les pays plus grands consommateurs de combustibles au niveau des industries sont les mêmes qu'au niveau du trafic, à savoir l'Ethiopie avec 45,3%, le Kenya avec 30,9% et la Tanzanie avec 19,6%. Par ailleurs, ce sont les déchets animaux qui sont les plus utilisés dans ce secteur industriel, avec 43% de la consommation totale. L'Afrique de l'Est est une région très peu développée selon les PIB nationaux car il y a un seul pays semi-développé (Seychelles avec 100.000 habitants en 2005) et 9 pays en voie de développement qui composent cette région d'Afrique. Cela a pour conséquence une « faible » consommation d'électricité et donc peu de centrales thermiques.

Ainsi, seuls 4 pays disposent de centrales thermiques dans la région. Aussi, la consommation des centrales thermiques est due essentiellement à l'Erythrée (50,0% du total) et au Kenya (42,7% du total). On trouve ensuite la Tanzanie avec 7,1% et l'Ethiopie avec 0,2%. C'est le bois qui est le combustible le plus utilisé dans ce secteur avec 45% de la consommation. En résumé, ce sont les pays tels que l'Ethiopie, la Tanzanie et le Kenya/Ouganda qui sont les plus grands consommateurs dans cette région avec respectivement 40,3%, 24,5%, 13,4% et 13,1% du total de la consommation. Concernant les combustibles, ce sont le bois (35%) et les déchets animaux (18%) qui sont les plus utilisés. Le bois servant à la fabrication du charbon de bois (« charcoal making ») représente près de 34%.

b) Afrique Centrale

En Afrique Centrale, la figure 3.3 laisse transparaître une forte consommation dans le secteur domestique. Ce secteur représente 63% (58,7 Tg) de la consommation totale de la région suivie par le secteur industriel avec 34% (31,5 Tg). Le transport représente 2% (1,5 Tg) contre à peine 1% (0,5 Tg) pour les centrales thermiques. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'une région où la majorité des pays sont en voie de développement. Le tableau 3.6 présente les proportions des consommations de combustibles fossiles et de biofuels en Afrique Centrale en 2005, en fonction des différents secteurs d'activités.

Tableau 3.6. : Proportions des consommations de combustibles fossiles et de biofuels par pays et par secteur d'activité en Afrique Centrale en 2005.

Pays	Niveau de développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Cameroun	1	Trafic	48,7
Congo	1	Trafic	15,4
Gabon	2	Trafic	10,3
RDC (ex-Zaïre)	1	Trafic	10,0
Tchad	1	Trafic	9,4
3 autres pays	/	Trafic	6,3
RDC (ex-Zaïre)	1	Domestique	62,8
Cameroun	1	Domestique	23,9
Tchad	1	Domestique	5,0
Congo	1	Domestique	3,9
Gabon	2	Domestique	1,8
3 autres pays	/	Domestique	2,5
Gabon	2	Industrie	39,1
Congo	1	Industrie	23,4
Cameroun	1	Industrie	23,2
RDC (ex-Zaïre)	1	Industrie	13,8
Tchad	1	Industrie	0,4
3 autres pays	/	Industrie	0,1
Cameroun	1	Centrale thermique	30,6
Congo	1	Centrale thermique	28,0
RDC (ex-Zaïre)	1	Centrale thermique	26,9
Gabon	2	Centrale thermique	14,5
3 autres pays	/	Centrale thermique	/

* 1 pour les pays en voie de développement et 2 pour les pays semi-développés

De manière détaillée par secteurs d'activités (cf. tableau 3.6), on remarque que le Cameroun représente 48,7% des consommations totales dans le secteur du trafic. La proportion individuelle des autres pays ne dépasse pas 15%, sauf au Congo avec 15,4%. Cette consommation est essentiellement imputée au diesel à 42% et à l'essence à 33% de la consommation totale. Dans le secteur domestique, c'est la République Démocratique du Congo (ex-Zaïre) qui consomme près de 62,8% du total dans cette région. Le Cameroun apparaît en 2^{ème} position avec 23,9%, les autres pays ne dépassent guère 5%. C'est le bois qui est le plus utilisé dans cette région avec 36% du total de la consommation, suivi par les déchets animaux avec 22%. Quant au secteur des industries, notons que le Gabon est le seul pays semi-développé de la région, avec une forte activité industrielle à 39,1%. Le Congo et le Cameroun suivent avec des proportions respectives de 23,4 et 23,2%. Ce sont les déchets animaux qui sont le plus utilisés dans ce secteur d'activité avec 14% du total. Notons que les déchets animaux sont utilisés comme combustibles au même titre que le charbon dans les industries. Au niveau des centrales thermiques, la plus grande part de la consommation est

attribuée au Cameroun avec 30,6% du total suivi du Congo avec 28,0%, de la République Démocratique du Congo avec 26,9% et du Gabon avec 14,5%. Les combustibles fossiles et les biofuels les plus utilisés par l'industrie thermique sont la bagasse (57%) et le diesel (28%). Globalement, la République Démocratique du Congo et le Cameroun, avec respectivement 45% et 24% du total de la consommation dans cette région, apparaissent comme les plus grands consommateurs de combustibles fossiles et de biofuels.

c) Afrique du Nord

En Afrique du Nord, c'est le secteur industriel qui est plus grand consommateur de combustibles fossiles et de biofuels avec 209,3 Tg soit 62% du total contre 63,3 Tg (19%) pour le secteur domestique (cf. figure 3.3). Avec ses 38,6 Tg (11%), le secteur du trafic arrive en 3^{ème} position et enfin, on retrouve le secteur des centrales thermiques avec 27,9 Tg soit 8%. Ce constat est justifié par le fait que 4 des 8 pays de cette région sont des pays semi-développés. Le tableau 3.7 présente les proportions des consommations de combustibles fossiles et de biofuels des pays d'Afrique du Nord en 2005, en fonction des différents secteurs d'activités.

Tableau 3.7. : Proportions des consommations de combustibles fossiles et de biofuels par pays et par secteur d'activité en Afrique du Nord en 2005.

Pays	Niveau de développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Egypte	1	Trafic	44,3
Algérie	2	Trafic	20,5
Soudan	1	Trafic	17,3
Libye	2	Trafic	9,4
Maroc	2	Trafic	3,2
3 autres pays	/	Trafic	5,3
Soudan	1	Domestique	27,0
Egypte	1	Domestique	25,6
Maroc	2	Domestique	23,3
Algérie	2	Domestique	16,3
Libye	2	Domestique	2,0
3 autres pays	/	Domestique	5,9
Algérie	2	Industrie	41,6
Egypte	1	Industrie	33,9
Libye	2	Industrie	13,0
Soudan	1	Industrie	5,5
Maroc	2	Industrie	3,7
3 autres pays	/	Industrie	2,4

* 1 pour les pays en voie de développement et 2 pour les pays semi-développés

Pays	Niveau de développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Maroc	2	Centrale thermique	44,9
Egypte	1	Centrale thermique	19,8
Libye	2	Centrale thermique	19,0
Soudan	1	Centrale thermique	10,0
Algérie	2	Centrale thermique	4,3
3 autres pays	/	Centrale thermique	2,0

* 1 pour les pays en voie de développement et 2 pour les pays semi-développés

Le descriptif du tableau 3.7, nous révèle que dans le secteur du trafic, l'Égypte apparaît comme le pays le plus grand consommateur avec 44,3% des parts totales. L'Égypte est suivi de l'Algérie avec 20,5% et du Soudan avec 17,3%. Au niveau des combustibles, c'est le diesel qui est le plus utilisé avec 43% de la consommation totale, suivi par l'essence avec 24%. Le Soudan est le plus grand consommateur dans cette région au niveau du secteur domestique, avec une part de 27,0% du total. Il est suivi de près par l'Égypte avec 25,6% et le Maroc avec 23,3%. Dans ce secteur domestique, c'est le bois le plus consommé, avec une proportion de 32% de la consommation totale. Dans les industries, c'est l'Algérie qui avec ses 41,6% de la consommation totale est le 1^{er} consommateur de la région. Il est suivi par l'Égypte avec 33,9% et la Libye et ses 13,0%. En nous intéressant aux combustibles fossiles et aux biofuels, on constate que c'est le gaz naturel avec ses 19% qui est le plus utilisé dans les industries. Concernant les centrales thermiques, c'est le Maroc avec ses 44,9% qui est en première position des pays consommateurs de la région, suivi par l'Égypte avec 19,8% et la Libye avec 19,0%. Les combustibles les plus utilisés dans ce secteur sont le charbon noir (coal) avec 49% et le diesel avec 14% de la consommation totale. En somme, en ne faisant aucune distinction entre les différents secteurs d'activités, ce sont l'Égypte et l'Algérie les plus grands consommateurs en Afrique du Nord avec respectivement 32% et 31% et, le combustible le plus utilisé étant le gaz naturel avec 29%.

d) Afrique Australe

L'Afrique Australe, première région consommatrice de combustibles en Afrique, a une consommation de 227,5 Tg au niveau des centrales thermiques (cf. figure 3.3), ce qui représente 87% de la consommation totale des centrales thermiques en Afrique. En considérant l'Afrique Australe, le secteur des centrales thermiques représente 52% de la consommation de cette région. Le secteur domestique est le 2^{ème} secteur consommateur avec 98,7 Tg (soit 22%) suivi des 90,6 Tg (21%) du secteur industriel. Le trafic est le secteur le moins consommateur dans cette région avec 23,5 Tg (5%). Le tableau 3.8 présente les

proportions des consommations des combustibles fossiles et des biofuels des pays d'Afrique Australe en 2005, en fonction des différents secteurs d'activités.

Tableau 3.8. : Proportions des consommations des combustibles fossiles et des biofuels par pays et par secteur d'activité en Afrique Australe en 2005.

Pays	Niveau de développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Afrique du Sud	2	Trafic	75,8
Zambie	1	Trafic	4,5
Malawi	1	Trafic	4,4
Angola	1	Trafic	3,3
Zimbabwe	1	Trafic	2,5
Mozambique	1	Trafic	1,3
9 autres pays	/	Trafic	8,2
Afrique du Sud	2	Domestique	33,1
Mozambique	1	Domestique	18,7
Zimbabwe	1	Domestique	11,8
Zambie	1	Domestique	11,6
Angola	1	Domestique	8,2
Malawi	1	Domestique	3,6
9 autres pays	/	Domestique	13,0
Afrique du Sud	2	Industrie	77,5
Angola	1	Industrie	5,7
Zambie	1	Industrie	3,1
Zimbabwe	1	Industrie	2,9
Mozambique	1	Industrie	2,7
Malawi	1	Industrie	0,03
9 autres pays	/	Industrie	8,0
Afrique du Sud	2	Centrale thermique	98,2
Zimbabwe	1	Centrale thermique	1,2
13 autres pays	/	Centrale thermique	0,6

* 1 pour les pays en voie de développement et 2 pour les pays semi-développés

De manière plus détaillée, l'Afrique du Sud apparaît comme le pays le plus grand consommateur de cette région, quel que soit le secteur d'activité (cf. tableau 3.8). En effet, dans le secteur du trafic, l'Afrique du Sud représente 75,8% des consommations totales. Au niveau du secteur domestique, ce même pays représente 33,1% du total, suivi par le Mozambique avec 18,7%. Dans le secteur des industries, l'Afrique du Sud représente 77,5% des consommations totales. Ce pays apparaît comme le « seul » consommateur dans le secteur des centrales thermiques avec 98,2% de la consommation totale. Les combustibles les plus consommés dans le secteur du trafic sont l'essence et le diesel, pour respectivement 45% et 33% de la consommation totale. Au niveau de l'activité domestique, c'est le bois qui est le plus utilisé avec 30%. Par contre, c'est le charbon noir (coal) avec 18% et les déchets animaux avec 12% qui sont les plus consommés dans le secteur des industries. Au niveau des

centrales thermiques, c'est le charbon noir qui est majoritairement consommé (97%). Ainsi, l'Afrique du Sud est de loin le pays qui consomme le plus de combustibles fossiles et de biofuels dans cette région, avec 73% du total des consommations. On peut noter que le 2^{ème} pays consommateur de cette région est le Mozambique avec à peine 5%. La forte consommation en Afrique du Sud est due au charbon noir (55%), une spécificité de cette région.

e) Afrique de l'Ouest

Il s'agit de la région d'Afrique qui compte le plus grand nombre d'habitants avec ses 281 millions d'habitants contre 220 millions d'habitants en Afrique de l'Est en 2007 (ONU, 2007). Ceci dit, cette région consomme environ 172,7 Tg (74% du total) dans le secteur domestique, 37,1 Tg (16%) dans le secteur des industries, 19,3 Tg (8%) dans le secteur du trafic et 5,3 Tg (2%) dans le secteur des centrales thermiques. Le tableau 3.9 présente les proportions des consommations sectorielles de combustibles fossiles et de biofuels des pays de l'Afrique de l'Ouest en 2005.

Tableau 3.9. : Proportions des consommations des combustibles fossiles et des biofuels par pays et par secteur d'activité en Afrique de l'Ouest en 2005.

Pays	Niveau de Développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Nigéria	1	Trafic	65,9
Bénin	1	Trafic	7,9
Ghana	1	Trafic	5,7
Sénégal	1	Trafic	5,2
Côte d'Ivoire	1	Trafic	3,2
10 autres pays	/	Trafic	12,1
Nigéria	1	Domestique	61,9
Ghana	1	Domestique	9,6
Côte d'Ivoire	1	Domestique	5,7
Bénin	1	Domestique	3,0
Sénégal	1	Domestique	1,5
10 autres pays	/	Domestique	18,3
Nigéria	1	Industrie	66,3
Côte d'Ivoire	1	Industrie	15,0
Sénégal	1	Industrie	6,6
Ghana	1	Industrie	5,7
Bénin	1	Industrie	1,1
10 autres pays	/	Industrie	5,3

* 1 pour les pays en voie de développement

Pays	Niveau de Développement*	Secteur d'activité	Proportion (%)
Nigéria	1	Centrale thermique	40,3
Ghana	1	Centrale thermique	37,5
Sénégal	1	Centrale thermique	14,1
Côte d'Ivoire	1	Centrale thermique	6,5
Bénin	1	Centrale thermique	1,3
10 autres pays	/	Centrale thermique	0,3

* 1 pour les pays en voie de développement

Dans le tableau 3.9, un pays apparaît comme le plus grand consommateur de combustibles fossiles et de biofuels d'Afrique de l'Ouest. Il s'agit du Nigéria avec près de 65,9% de la consommation totale dans le secteur du trafic. Il représente également 61,9% des consommations au niveau domestique, 66,3% au niveau industriel et 40,3% au niveau des centrales thermiques. Dans ce dernier secteur, le Nigéria est suivi de près par le Ghana avec 37,5% de la consommation totale. Les combustibles fossiles et les biofuels les plus consommés sont l'essence et le diesel, avec respectivement 41% et 31% de la consommation totale de la région dans le secteur du trafic. Notons que le fuel dû aux véhicules à deux roues représente près de 14% de la consommation dans ce secteur d'activité. Dans le secteur domestique, ce sont les déchets animaux ainsi que le bois qui sont les plus utilisés avec respectivement des proportions de 35% et 29%. Par ailleurs, les déchets animaux sont très utilisés dans les industries en Afrique de l'Ouest, avec une proportion de près de 38% du total de la région. Au niveau des centrales thermiques, on constate que le diesel avec 25% et le fuel lourd avec 25% du total, sont les combustibles fossiles les plus utilisés. Tout comme l'Afrique du Sud en Afrique Australe, le Nigéria apparaît donc comme le leader de cette région au niveau des consommations, avec près de 62% de la consommation totale en Afrique de l'Ouest. Il est suivi par la Côte d'Ivoire avec à peine 7%. Les combustibles fossiles tels que les déchets animaux (32%) et les biofuels comme le bois (21%) sont les plus consommés dans cette région de l'Afrique.

3.2.3. Emissions

Notre analyse ci-dessus vient de mettre en exergue les spécificités de chaque région d'Afrique (e.g. l'utilisation très répandue du charbon noir en Afrique Australe comme on l'a vu également au chapitre 1 et, du bois et des déchets animaux en Afrique de l'Ouest). On relève aussi que les pays les plus grands consommateurs sont les pays les plus peuplés de leur région

(Nigéria (Afrique de l'Ouest) avec 141,4 millions d'habitants et l'Afrique du Sud (Afrique Australe) avec 46,9 millions d'habitants en 2005). Aussi, cette consommation devrait croître fortement car le nombre d'habitants estimés en 2020 par l'ONU devrait connaître en moyenne une augmentation relative (p/r à 2005) de l'ordre de 33%. On imagine déjà l'impact que de telles consommations de combustibles fossiles et de biofuels auront sur les émissions d'aérosols carbonés de combustion que nous allons à présent décrire.

En nous basant sur les relations de Junker and Lioussé (2008), nous avons calculé les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire en tenant compte des facteurs d'émissions propres à chaque combustible fossile ou biofuel considéré, du niveau de développement du pays et du secteur d'activité. Avant de présenter nos résultats, nous allons présenter la mise à jour à laquelle nous avons procédé sur les facteurs d'émissions issus de l'inventaire global de Junker and Lioussé (2008).

3.2.3.1. Facteurs d'émissions

Compte tenu de l'insertion de nouvelles données de consommations relatives à certains combustibles fossiles et aux biofuels (cf. partie 3.1.3), il a été nécessaire d'introduire les facteurs d'émissions des sources suivantes : « charcoal making », combustible des moteurs 2 temps des engins à deux roues et centrales thermiques. Le tableau 3.10 présente les valeurs des facteurs d'émissions estimés à partir de différentes références bibliographiques.

Tableau 3.10 : Facteurs d'émissions introduits dans le nouvel inventaire tenant compte de l'aérosol (BC ou OCp), du fuel, du secteur d'activité et du niveau de développement du pays.

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OCp) en g/kg
1	Domestique	CHM	BC	0,5063	OC	4,759
2	Domestique	CHM	BC	0,5063	OC	4,759
3	Domestique	CHM	BC	0,5063	OC	4,759
1	Centrale thermique	CL	BC	0,072	OC	0,2640
2	Centrale thermique	CL	BC	0,072	OC	0,2640
3	Centrale thermique	CL	BC	0,036	OC	0,132
1	Centrale thermique	DL	BC	0,10	OC	0,075
2	Centrale thermique	DL	BC	0,028	OC	0,021
3	Centrale thermique	DL	BC	0,02	OC	0,015

* Les niveaux de développement 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux pays en voie de développement, aux pays semi-développés et aux pays développés.

** CHM pour charcoal making, CL pour charbon noir (coal), DL pour diesel, BS pour bagasse, RF pour fuel lourd (residual fuel oil), OK coke-oven-coke, FW pour bois (fuelwood), FS pour feedstocks, OB pour others biofuels et TWG pour two-wheel gasoline (moteurs à 2 temps).

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OCp) en g/kg
1	Centrale thermique	BS	BC	0,103	OC	0,31
2	Centrale thermique	BS	BC	0,08	OC	0,26
3	Centrale thermique	BS	BC	0,08	OC	0,26
1	Centrale thermique	RF	BC	0,035	OC	0,035
2	Centrale thermique	RF	BC	0,009	OC	0,009
3	Centrale thermique	RF	BC	0,007	OC	0,007
1	Centrale thermique	OK	BC	0,072	OC	0,264
2	Centrale thermique	OK	BC	0,072	OC	0,264
3	Centrale thermique	OK	BC	0,036	OC	0,132
1	Centrale thermique	FW	BC	0,103	OC	0,31
2	Centrale thermique	FW	BC	0,08	OC	0,26
3	Centrale thermique	FW	BC	0,08	OC	0,26
1	Centrale thermique	FS	BC	0,015	OC	0,015
2	Centrale thermique	FS	BC	0,015	OC	0,015
3	Centrale thermique	FS	BC	0,003	OC	0,003
1	Centrale thermique	OB	BC	0,103	OC	0,31
2	Centrale thermique	OB	BC	0,08	OC	0,26
3	Centrale thermique	OB	BC	0,08	OC	0,26
1	Trafic	TWG	BC	2,31	OC	30,56
2	Trafic	TWG	BC	2,31	OC	30,56
3	Trafic	TWG	BC	0,28	OC	7,36

* Les niveaux de développement 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux pays en voie de développement, aux pays semi-développés et aux pays développés.

** CHM pour charcoal making, CL pour charbon noir (coal), DL pour diesel, BS pour bagasse, RF pour fuel lourd (residual fuel oil), OK coke-oven-coke, FW pour bois (fuelwood), FS pour feedstocks, OB pour others biofuels et TWG pour two-wheel gasoline (moteurs à 2 temps).

Les facteurs d'émissions du « charcoal making », extraits de Liousse et al. (1996), sont identiques pour les trois niveaux de développement. Ceci implique qu'on ne considère pas de différences de technologie dans la fabrication du charbon de bois dans les différents pays. Par ailleurs, les facteurs d'émissions des centrales thermiques dans les pays développés sont tirés de Bond et al. (2004). Pour les pays semi-développés et en voie de développement, les facteurs d'émissions des centrales thermiques ont été calculés sur la base des facteurs d'émissions de Bond et al. (2004) des pays développés, selon la même méthodologie que celle dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008). Les facteurs d'émissions du combustible pour les véhicules à deux roues (TWG) dans le trafic sont issus d'Assamoi and Liousse (2010) (cf. chapitre 2). Notons que la liste détaillée de tous les facteurs d'émissions relatifs au carbone suie et au carbone organique primaire est présentée en Annexe 3.

3.2.3.2. Nouvelle spatialisation

De manière générale, les données d'émissions de carbone suie (BC) et de carbone organique primaire (OCp) par pays sont spatialisées sur la base de la densité de population normalisée. Cette spatialisation se faisait jusque lors avec une résolution de 1° par 1° (GISS, 1984). Dans notre travail, nous avons utilisé une nouvelle spatialisation de la densité de population normalisée à une résolution horizontale de 0,25° par 0,25° (CIESIN, 2005). La figure 3.4 montre l'exemple des émissions de carbone organique primaire (OCp) de Junker and Lioussé (2008) respectivement spatialisées avec les anciennes (figure de gauche) et les nouvelles densités de population (figure de droite).

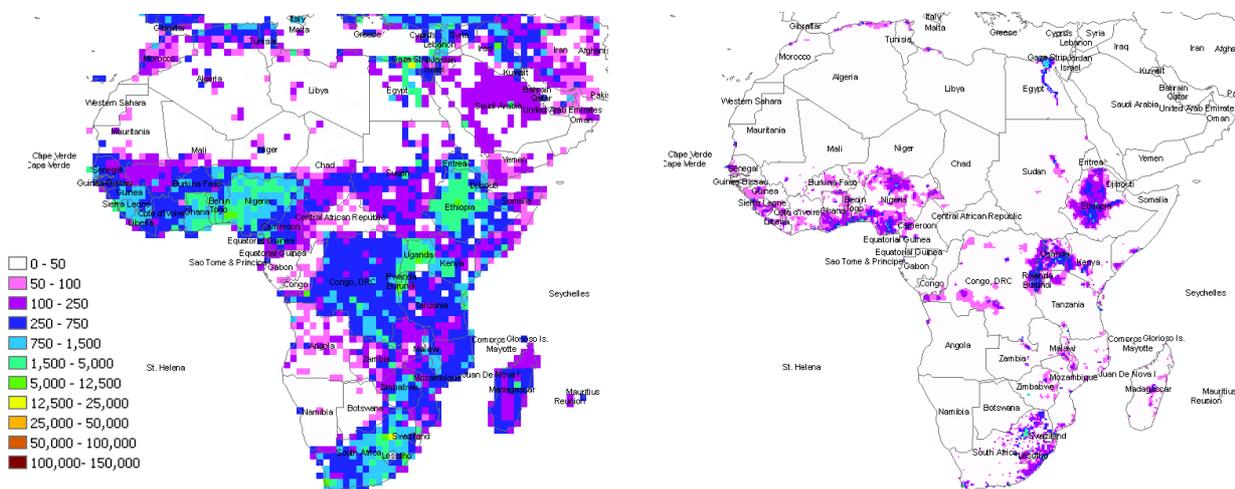


Fig. 3.4 : Emissions de carbone organique primaire en 2005 issues de l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) : à gauche avec l'ancienne résolution (1° x 1°), à droite avec la nouvelle résolution (0.25° x 0.25°).

Cette représentation graphique (figure 3.4) semble indiquer que les émissions sont plus fortes sur la carte à 1° x 1° par rapport à celle à 0,25° x 0,25°. Il est évident que les résultats de la modélisation issue de ces cadastres d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire avec la spatialisation à grande résolution (0,25° x 0,25°) devraient mieux représenter les concentrations hétérogènes observées en zones rurales et urbaines. C'est ce que nous étudierons au chapitre 5.

3.2.3.3. Résultats sur les émissions d'aérosols carbonés de combustion

Pour une meilleure lisibilité du document, je présenterai dans une première partie les résultats relatifs aux émissions de carbone suie (BC), puis, je passerai à ceux du carbone organique primaire (OCp). Notons que les résultats sur les émissions risquent d'être totalement différents de ceux des consommations. En effet, certains combustibles comme le gaz naturel est très consommé en Afrique du Nord par exemple, ne donnant pas lieu à des émissions en particules carbonées, les facteurs d'émissions s'y rapportant étant quasi-nuls.

3.2.3.3.1. Emissions de carbone suie (BC)

Globalement, les émissions de carbone suie par les combustibles fossiles et les biofuels en Afrique en 2005 s'élèvent à 0,69 Tg. Les émissions se répartissent entre 0,48 Tg de biofuels (70%) et 0,21 Tg de combustibles fossiles (30%). Du point de vue sectoriel, c'est dans le secteur domestique que les émissions sont les plus importantes avec 0,44 Tg (63%). Il est suivi par le secteur du trafic avec 0,15 Tg (22%), le secteur des industries avec 0,08 Tg (12%) et les centrales thermiques avec 0,02 Tg (3%). Cette répartition est différente de celle avec les données de consommation. En effet, la position des secteurs industriels et du trafic est inversée lorsqu'on considère les données de consommations mais par contre, le positionnement des secteurs domestiques et des centrales thermiques reste inchangé (à cause des faibles valeurs des facteurs d'émissions du gaz naturel).

Considérant chaque région, on constate que la région la plus émettrice en carbone suie est l'Afrique de l'Ouest avec 0,19 Tg (28%) suivie de l'Afrique Centrale avec 0,16 Tg (24%). La région Afrique Australe qui était la plus grande consommatrice de combustibles fossiles et de biofuels se retrouve en troisième position avec 0,15 Tg soit 21%. L'Afrique du Nord, quant à elle, émet 0,13 Tg (19%), en fin on retrouve l'Afrique Centrale avec 0,05 Tg (8%). Ce changement de classement s'explique en partie par le fait que l'Afrique Australe et l'Afrique du Nord sont majoritairement formées de pays semi-développés avec des facteurs d'émissions moins importants que ceux des autres régions, composées essentiellement de pays en voie de développement. On peut relever ainsi que le facteur d'émission du diesel dans le secteur du trafic est de 2 g/kg pour les pays semi-développés contre 5 g/kg pour les pays en voie de développement. A noter que les facteurs d'émissions ne sont pas toujours différents d'un pays semi-développé à un pays en voie de développement comme le montre l'exemple du charbon

de bois dont le facteur d'émission en carbone suie est fixé à 0,75 g/kg, quel que soit le niveau de développement du pays.

Pour la suite, nous procédons à une étude sectorielle et régionale des émissions de carbone suie considérant les cinq régions géographiques définies plus haut. La figure 3.5 présente les émissions de carbone suie par zones géographiques et par secteurs d'activités en Afrique en 2005.

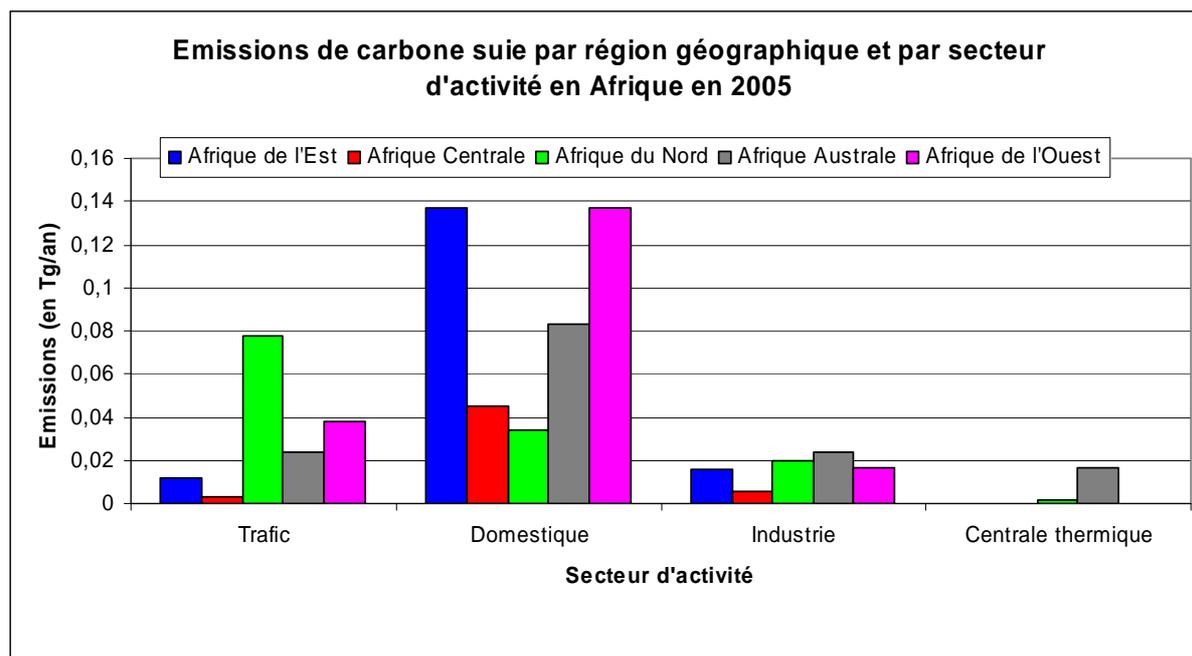


Fig. 3.5 : Emissions de carbone suie par région géographique et par secteur d'activité en Afrique en 2005.

Les émissions de carbone suie présentées sur la figure 3.5 montrent que chaque région présente un profil particulier, du point de vue du secteur d'activité dans lequel ses émissions sont les plus importantes. Considérant le secteur du trafic, c'est l'Afrique du Nord qui émet le plus de carbone suie avec la moitié des émissions de ce secteur qui lui sont imputée, soit 0,08 Tg (50%). Il est suivi par l'Afrique de l'Ouest avec 0,04 Tg (25%), l'Afrique Australe avec 0,02 Tg (16%) et l'Afrique de l'Est avec 0,01 Tg (8%). On retrouve en fin l'Afrique Centrale avec ses 0,003 Tg (2%). Cette classification des émissions de carbone suie dans ce secteur du trafic est sensiblement la même que celle des consommations, à part l'inversion entre la position de l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Australe due aux choix des facteurs d'émissions comme discuté. Au niveau du secteur domestique, les trois régions les plus émettrices en carbone suie sont également les plus consommatrices. Il s'agit de l'Afrique de l'Est et de

l'Afrique de l'Ouest avec sensiblement les mêmes proportions (31% soit environ 0,14 Tg) et, l'Afrique Australe avec 19% (soit 0,08 Tg). Du point de vue des industries, les différences des émissions en carbone suie entre les différentes régions sont moins marquées que pour les consommations. Cependant, c'est l'Afrique Australe qui émet le plus de carbone suie dans ce secteur avec 0,024 Tg (30%). L'Afrique du Nord émet 0,020 Tg (24%), suivie de l'Afrique de l'Est et de l'Afrique de l'Ouest avec sensiblement les mêmes émissions (0,016 Tg soit 20%).

Dans le secteur des centrales thermiques, le classement observé au niveau des consommations est le même que celui des émissions de carbone suie. C'est un secteur largement dominé par l'Afrique Australe avec 90% du total des émissions soit 0,016 Tg et ce, à cause du fuel employé (charbon noir-coal). L'Afrique du Nord n'a que 8%, soit 0,002 Tg. Enfin, les trois régions restantes représentent 2% des émissions de carbone suie dans ce secteur.

En résumé, on constate que les régions les plus développées (e.g. l'Afrique Australe et l'Afrique du Nord) présentent des émissions de carbone suie du même ordre de grandeur que celles des régions les moins développées, en particulier dans le secteur industriel. Cela vient du fait que les technologies utilisées dans ces régions sont plus « propres » (facteurs d'émissions faibles) et donc les fortes consommations dans ce secteur n'engendrent que très peu d'émissions de carbone suie. Après cette analyse, nous nous focaliserons sur chaque région pour mieux appréhender les spécificités régionales.

a) Afrique de l'Est

En Afrique de l'Est, la répartition des émissions par secteur d'activité est la suivante (figure 3.5). Le secteur domestique représente 83% (0,14 Tg) des émissions de carbone suie. Il est suivi par le secteur industriel avec 9% (0,016 Tg), le secteur du trafic avec 7% (0,012 Tg) et enfin, les centrales thermiques émettent moins de 0,1% (0,009 Tg) des émissions totales. Notons que ces tendances sont les mêmes que celles observées avec les données de consommations. De manière générale, les pays les plus émetteurs en Afrique de l'Est sont l'Ethiopie avec 40%, la Tanzanie avec 26%, le Kenya avec 14% et l'Ouganda avec 12%. Ces émissions sont en majorité dues à la combustion du bois dont les émissions représentent 40% des émissions totales dans cette région. On retrouve également les déchets animaux en fortes proportions (23%) quant à leur utilisation domestique.

b) Afrique Centrale

Globalement, cette région d'Afrique présente le même comportement que l'Afrique de l'Est, avec sensiblement les mêmes proportions d'émissions par secteur d'activité (figure 3.5). Cette

région, la moins émettrice en carbone suie (7% du total en Afrique), a son maximum d'émissions dans le secteur domestique avec 84% (0,045 Tg) du total des émissions de la région. Le secteur industriel arrive en 2^{ème} position avec 10% (0,005 Tg) suivi des 6% (0,003 Tg) du trafic. Enfin, les centrales thermiques émettent moins de 0,1% des émissions de carbone suie. Cette tendance est la même que celle relevée sur les données de consommations. Par contre, les proportions sont différentes, notamment dans le secteur domestique (84% pour les émissions vs. 64% pour les consommations) à cause de facteurs d'émissions relativement importants. Les pays les plus émetteurs en carbone suie sont les grands consommateurs. Il s'agit de la République Démocratique du Congo (ex-Zaire), dont les émissions avoisinent les 60% des émissions totales de la région. Il est suivi par le Cameroun avec 26%, tandis que les autres pays ont des proportions qui ne dépassent pas 5% du total. Du point de vue des sources les plus polluantes en carbone suie, ce sont les mêmes qu'avec les données de consommations. Il s'agit du bois (36%), des déchets animaux (33%) et des processus de fabrication du charbon de bois (20%) qui représentent 89% des émissions de carbone suie en Afrique Centrale.

c) Afrique du Nord

L'Afrique du Nord est une région où les émissions sont en majorité dues au secteur du trafic (0,08 Tg soit 59%) (figure 3.5). Le secteur domestique représente le quart des émissions (0,03 Tg soit 25%), tandis que les industries émettent près de 0,02 Tg (15%) du total. Les émissions dues aux centrales thermiques restent faibles, autour de 1% (0,001 Tg). Cette répartition est totalement différente de celle mentionnée pour les données de consommations. Pour rappel, le trafic qui était en troisième position au niveau des consommations, se retrouve être le premier secteur d'activité pour les émissions. En fait, les positions des secteurs trafic et industries ont été permutées. Ce changement de position vient du fait que la moitié des pays de cette région sont des pays semi-développés et donc, utilisent des technologies plus « propres » en émissions d'aérosols carbonés dans le secteur industriel. Notons que la spécificité de cette région est l'utilisation du gaz naturel, avec des émissions particulière quasi-nulles (0,001% du total), du fait de très faibles facteurs d'émissions (facteurs d'émissions relativement faibles ou nuls). Les pays les plus émetteurs de carbone suie sont les pays en voie de développement : dans cette région, il s'agit de l'Égypte dont plus de la moitié des émissions lui sont imputées (56%) et du Soudan avec 22% des émissions de la région. Le combustible responsable de ces « fortes » émissions est le diesel dont les émissions représentent 53% des émissions de

carbone suie. C'est un combustible essentiellement utilisé dans le secteur trafic. Le second combustible est le bois qui représente près de 13% du total des émissions.

d) Afrique Australe

Les émissions de carbone suie de l'Afrique Australe représentent 20% des émissions totales en Afrique, dominées par le secteur domestique avec 56% (0,083 Tg). On relève des proportions quasi-identiques entre les secteurs des industries et du trafic (~16% soit 0,024 Tg). Les centrales thermiques ont une part non négligeable dans les émissions de carbone suie (11%, soit 0,016 Tg) contrairement aux régions précédentes (figure 3.5). Cette répartition est très intéressante car on remarque que les émissions des centrales thermiques sont les plus faibles des 4 secteurs d'activités, contrairement aux données de consommations, où ce secteur était dominant. Cette nouvelle répartition s'explique par le fait que l'Afrique du Sud, le plus grand consommateur de la région, est un pays semi-développé avec des facteurs d'émissions relativement faibles pour les centrales thermiques, alors que les facteurs d'émissions dans le secteur domestique sont les mêmes pour tous les niveaux de développement. L'Afrique du Sud est le pays le plus émetteur de carbone suie avec plus de la moitié du total des émissions de la région (51%). Il est suivi de loin par le Mozambique avec 12% et le Zimbabwe, 10%. Plusieurs combustibles sont responsables de telles émissions. Il s'agit du charbon avec 27% du total, une spécificité de l'Afrique du Sud, des déchets animaux avec 21%, du bois de feu avec 18%, du diesel avec 14% et indirectement du « charcoal making » avec 10%.

e) Afrique de l'Ouest

L'Afrique de l'Ouest est entièrement composée de pays en voie de développement et, donc les facteurs d'émissions y sont maxima. De plus, on a vu que c'est la région la plus émettrice de carbone suie en Afrique, avec près de 28% des émissions totales dont 72% (0,14 Tg) sont dues au secteur domestique, 20% (0,037 Tg) au trafic, 8% (0,016 Tg) aux industries et environ 0,1% aux centrales thermiques (figure 3.5). L'importance des secteurs trafic et industries sont inversées par rapport aux données de consommations. Notons que cette nouvelle répartition est due aux choix des facteurs d'émissions du trafic, très importants par rapport à ceux des industries. Par ailleurs, du point de vue des pays d'Afrique de l'Ouest, le Nigeria est le premier pays producteur et exportateur de pétrole en Afrique émettant près de 65% du total des émissions de carbone suie dans cette région. La Côte d'Ivoire est le 2^{ème} pays émetteur loin derrière le Nigeria, avec à peine 6% du total. Quatre combustibles sont responsables de telles émissions pour plus de 75% du total. Par ordre décroissant d'émissions,

on a les déchets animaux avec 39%, le bois avec 23% et le diesel avec 16%. Les émissions dues à la fabrication du charbon de bois représentent 13% du total des émissions de la région.

f) Conclusion partielle

De manière générale, on constate que le pays le plus émetteur de carbone suie en Afrique est le Nigéria avec 0,13 Tg avec pour émissions majoritaires, les émissions du secteur domestique, plus précisément celles des combustions des déchets animaux et du secteur du trafic avec le diesel. Il est suivi par l'Afrique du Sud avec 0,08 Tg d'émissions de carbone suie dont la majorité est due aux combustions de charbon noir des secteurs domestiques et des centrales thermiques et, enfin l'Egypte avec 0,07 Tg dont le principal combustible est le diesel pour le trafic. Par ailleurs, cette étude a permis de mettre en évidence d'une part, les spécificités régionales (e.g. le charbon noir en Afrique du Sud et le diesel en Egypte). D'autre part, notons aussi que le fait de réduire les consommations de combustibles les plus utilisés tels que le gaz naturel mais dotés de facteurs d'émissions négligeables ne réduit pas les émissions de carbone suie. L'accent doit plutôt être mis sur l'acquisition de technologies plus récentes et modernes, afin d'abaisser les valeurs des facteurs d'émissions et de ce fait, les émissions elles-mêmes.

3.2.3.4.2. Emissions de Carbone Organique Primaire (OCp)

A l'échelle de l'Afrique, les émissions de carbone organique primaire dues aux combustibles fossiles et aux biofuels en 2005 sont évaluées à 4,02 Tg. Ces émissions sont essentiellement dues aux biofuels pour 93% (3,72 Tg) du total contre 7% (0,3 Tg) pour les combustibles fossiles. Les émissions de carbone organique primaire en Afrique en 2005 sont cinq fois plus importantes que celles du carbone suie (4,02 Tg contre 0,69 Tg). Cette grande différence entre émissions de carbone organique primaire et carbone suie s'explique par le fait que les combustions à basse température sont pour la plupart incomplètes, avec de faibles rapports BC/OCp (Junker and Lioussé, 2008 ; Bond et al., 2004).

La contribution entre biofuels et combustibles fossiles est la même que pour le carbone suie, avec des proportions plus marquées pour le carbone organique (93% pour les biofuels et le carbone organique contre 68% pour le carbone suie). L'analyse par secteur montre un positionnement inversé entre les secteurs du trafic et des industries au regard de l'analyse faite pour le carbone suie. En effet, c'est le secteur domestique qui est le plus grand émetteur de carbone organique primaire avec 3,12 Tg (78%). Il est suivi par le secteur industries avec 0,64

Tg (16%), le secteur trafic avec 0,20 Tg (5%) et les centrales thermiques avec 0,07 Tg (1%). L'analyse régionale est opérée en considérant les cinq régions définies précédemment. Ainsi, la région la plus émettrice de carbone organique primaire est la même que celle pour le carbone suie : l'Afrique de l'Ouest avec 1,44 Tg représente 36% du total des émissions. Elle est suivie par l'Afrique de l'Est avec 1,06 Tg (26%), l'Afrique Australe avec 0,08 Tg (19%), l'Afrique Centrale avec 0,039 Tg (10%) et l'Afrique du Nord avec 0,037 Tg (9%). Par comparaison au positionnement obtenu pour le carbone suie, on remarque que les positions de l'Afrique de l'Est et de l'Afrique Australe sont inversées, de même que celles de l'Afrique Centrale et de l'Afrique du Nord. Ce classement pourrait en partie s'expliquer par des facteurs d'émissions moins importants dans les régions (e.g. Afrique Australe et Afrique du Nord) où il y a des pays semi-développés peuplés. Cependant, même si les facteurs d'émissions sont plus faibles dans les pays semi-développés, ils semblent être compensés par de fortes consommations, d'où la troisième position de l'Afrique Australe. Pour la suite, nous nous focaliserons sur chaque région à travers une étude sectorielle. La figure 3.6 présente les émissions annuelles de carbone organique primaire par zones géographiques et par secteurs d'activités en Afrique pour 2005.

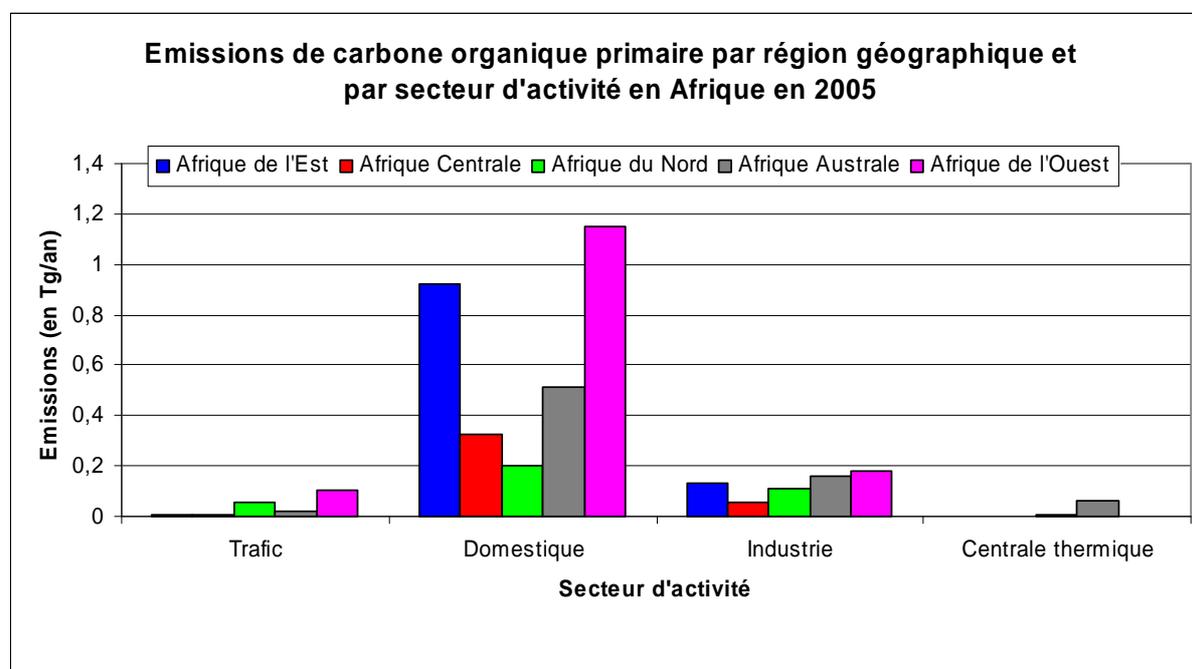


Fig. 3.6 : Emissions de carbone organique primaire par région géographique et par secteur d'activité en Afrique en 2005.

Il ressort de la figure 3.6 l'existence de grandes différences entre les émissions dues aux différentes régions d'Afrique dans chaque secteur d'activité. Ainsi, dans le secteur trafic, c'est l'Afrique de l'Ouest qui est la plus émettrice en carbone organique primaire avec une proportion qui dépasse la moitié de celle de toute l'Afrique dans ce secteur (0,11 Tg soit 54%). Viennent ensuite l'Afrique du Nord avec 0,06 Tg (28%), l'Afrique Australe avec 0,02 Tg (11%), l'Afrique de l'Est avec 0,01 Tg (5%) et l'Afrique Centrale avec 0,004 Tg (2%). Notons que l'importance relative de l'Afrique de l'Ouest apparaît pour les émissions de carbone organique alors que c'était l'Afrique du Nord qui était en 1^{ère} position pour les émissions de carbone suie. Cela est dû à la prise en compte des véhicules à deux roues qui ont de très forts facteurs d'émissions en carbone organique. L'importance relative des autres régions est la même pour le carbone suie et le carbone organique : notons que la différence entre l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique de l'Est est plus marquée pour le carbone organique primaire. Dans le secteur domestique, la classification est la suivante : l'Afrique de l'Ouest avec 1,15 Tg (37%), suivie par l'Afrique de l'Est avec 0,93 Tg (30%) et l'Afrique Australe avec 0,51 Tg (17%). L'Afrique Centrale et l'Afrique du Nord atteignent respectivement 0,33 Tg (11%) et 0,20 Tg (6%). Dans le secteur industriel, c'est encore l'Afrique de l'Ouest qui est la zone la plus émettrice avec 0,18 Tg (28%). L'Afrique Australe est en deuxième position avec 0,16 Tg (25%). Elle est suivie par l'Afrique de l'Est avec 0,13 Tg (20%), l'Afrique du Nord avec 0,11 Tg (18%) et l'Afrique Centrale avec 0,06 Tg (9%). Cette classification est différente de celle obtenue pour le carbone suie, excepté pour l'Afrique Centrale qui demeure la zone la moins émettrice d'Afrique dans le secteur des industries. Au niveau des centrales thermiques, ce sont les régions « semi-développées » qui se distinguent par leurs émissions. Nous retrouvons l'Afrique Australe avec 92% (0,06 Tg) des émissions en carbone organique primaire dans ce secteur et l'Afrique du Nord avec à peine 7% (0,005 Tg). Les autres régions considérées individuellement représentent moins de 0,5% des émissions dans ce secteur d'activité. Cet ordre de grandeur et ce classement sont les mêmes pour le carbone suie. Une fois de plus, en utilisant des technologies plus récentes qui font d'elles des zones économiquement très dynamiques avec pour résultante de plus fortes valeurs des PIB, les régions d'Afrique Australe et d'Afrique du Nord émettent de plus fortes quantités de carbone organique que les autres régions dans ce secteur (centrale thermique). Les régions constituées en majorité de pays en voie de développement comme l'Afrique de l'Ouest se distinguent au niveau des émissions de carbone organique primaire dans les secteurs du trafic, du domestique et des industries. Ceci est le résultat de « fortes » consommations associées à de forts facteurs d'émissions.

a) Afrique de l'Est

En Afrique de l'Est, on note l'importance des émissions en carbone organique primaire dans le secteur domestique (figure 3.6). Ce secteur représente 87% (0,93 Tg) du total des émissions de la région, une proportion encore plus importante qu'avec le carbone suie. Le 2^{ème} secteur émetteur est l'industrie avec 12% (0,13 Tg), suivi par le trafic avec près de 1% (0,09 Tg). Les centrales thermiques émettent très peu, avec moins de 0,05% (0,0002 Tg) du total des émissions. Ce sont les mêmes pays et les mêmes combustibles qui émettent le plus de carbone organique primaire que de carbone suie. Les pays les plus émetteurs sont l'Ethiopie avec 40% du total, la Tanzanie avec 28% et le Kenya avec 17%. En outre, soulignons une fois de plus, l'importance des émissions par la combustion des déchets animaux (45% du total des émissions) à ajouter aux 19% dûs à l'utilisation du bois.

b) Afrique Centrale

C'est la quatrième région émettrice de carbone organique primaire en Afrique en 2005 avec 84% (0,33 Tg) de ses émissions dans le secteur domestique, 15% (0,06 Tg) dans le secteur des industries, 1% (0,004 Tg) dans le trafic et moins de 0,05% (0,0005 Tg) dans les centrales thermiques (figure 3.6). Cette répartition est la même que celle observée avec le carbone suie, à part une augmentation relative des proportions dans le secteur industriel et une diminution dans le trafic. Deux pays sont à l'origine de ces émissions pour 89% : il s'agit de la République Démocratique du Congo (ex-Zaïre) (64%) et du Cameroun (25%). En ce qui concerne les combustibles mis en cause, on peut souligner de fortes émissions dues aux déchets animaux (56%) et au bois (15%). Notons que de fortes émissions de carbone organique primaire sont générées lors de la fabrication du charbon de bois (26%).

c) Afrique du Nord

Il s'agit de la région la moins émettrice en carbone organique primaire en 2005, ce qu'il convient de souligner par rapport aux analyses effectuées pour le carbone suie. La figure 3.6 montre que les émissions de cette région se répartissent en 54% (0,20 Tg) dans le secteur domestique, 30% (0,11 Tg) dans le secteur des industries, 15% (0,056 Tg) dans le trafic et 1% (0,005 Tg) dans les centrales thermiques. Cette répartition des émissions de carbone organique primaire est différente de celle du carbone suie où l'on notait que le trafic était le secteur le plus émetteur (dû au diesel), suivi du domestique et des industries. Au niveau des pays, c'est le Soudan (54%) et l'Egypte (24%) qui émettent plus des ¾ des émissions dans

cette région. Comme en Afrique de l'Est et en Afrique Centrale, les déchets animaux sont prépondérants, leurs émissions représentant 38% du total des émissions suivies du bois avec 14%. Cela est en partie dû aux forts facteurs d'émissions des déchets animaux (12,5 g/kg dans « tous » les secteurs d'activités) comparativement aux autres « combustibles » (e.g. 2,7 g/kg dans le domestique). La fabrication du charbon demeure un élément non négligeable du total des émissions de carbone organique primaire avec une proportion de près de 26%.

d) Afrique Australe

Le secteur domestique constitue le 1^{er} secteur émetteur de carbone organique primaire en Afrique Australe avec une proportion de 68% (0,51 Tg) du total des émissions de cette région (figure 3.6). Il est suivi par les industries et les centrales thermiques dont les émissions sont évaluées respectivement à 21% (0,16 Tg) et 8% (0,06 Tg) des émissions totales dans la zone. Les émissions émanant du trafic représentent environ 3% (0,02 Tg) des émissions totales en Afrique Australe. Les émissions dues aux industries sont supérieures à celles du trafic, ce qui n'est pas le cas pour le carbone suie. Ceci est lié au fait que les facteurs d'émissions dans le secteur industriel sont supérieurs à ceux du trafic, contrairement au carbone suie. En nous intéressant aux pays de cette région, on remarque que l'Afrique du Sud émet 39% de toutes les émissions dans cette zone. Quatre pays suivent l'Afrique du Sud, mais avec seulement des proportions comprises entre 10% et 20%. Il s'agit du Mozambique avec 17%, du Zimbabwe et de la Zambie avec 12% et enfin de l'Angola avec 10%. Les autres pays, quant à eux, ont des émissions qui n'atteignent pas 2%, excepté Madagascar avec 4%. Toutes ces fortes émissions de carbone organique primaire sont en majorité dues à la combustion des déchets animaux (51%), du charbon de bois pour 14% et du bois pour 11%. La fabrication de charbon de bois représente à peu près 19% du total des émissions dans cette zone géographique.

e) Afrique de l'Ouest

La figure 3.6 illustre le fait que l'Afrique de l'Ouest est la région la plus émettrice en carbone organique primaire en Afrique en 2005. La majorité de ces émissions de carbone organique primaire provient du secteur domestique (80% soit 1,15 Tg), comme c'était déjà le cas pour le carbone suie. Les secteurs industries, trafic et centrales thermiques ont des proportions très faibles comparativement au secteur domestique, avec respectivement 13% (0,18 Tg), 7% (0,11 Tg) et moins de 0,05%. La position des secteurs industries et trafic est inversée lorsqu'on considère les émissions de carbone suie. Cela s'explique par le fait que les combustibles qui sont les plus utilisés, ont des facteurs d'émissions dans le trafic supérieurs à

ceux des industries avec le carbone suie, mais c'est le contraire avec le carbone organique. On retrouve le Nigéria comme le pays le plus émetteur en carbone organique primaire avec des émissions avoisinant 72% des émissions totales de la région. La seconde place revient au Ghana avec des émissions de l'ordre de 8% des émissions totales en carbone organique. Contrairement au carbone suie, la Côte d'Ivoire se retrouve en 3^{ème} position (au lieu de 2^{ème}) avec 6% des émissions. Par ailleurs, les combustibles dont les émissions concourent à de tels résultats sont les déchets animaux avec 65% et le bois avec 9%. La fabrication du charbon de bois est non négligeable avec 16% des émissions. Il est important de souligner que les autres combustibles ont des proportions qui ne dépassent pas 2%, sauf pour le carburant des deux roues (TWG), une spécificité de l'Afrique de l'Ouest, avec des émissions de carbone organique de près de 6% des émissions totales dans la zone. Aussi, les deux roues apparaissent comme une spécificité en Afrique de l'Ouest dans la mesure où leurs émissions en carbone organique primaire s'élèvent à 77% du total des émissions dans le secteur du trafic contre 16% avec le carbone suie.

f) Conclusion partielle

Globalement, dans chacune des cinq régions considérées, ce sont les mêmes pays et les mêmes combustibles qui sont responsables des émissions de carbone organique primaire et de carbone suie. Cependant, le classement des pays les plus émetteurs vers les moins émetteurs que nous avons établi pour le carbone suie n'est pas le même que celui pour le carbone organique primaire. En effet, le Nigéria est toujours le pays le plus grand émetteur en Afrique avec 1,03 Tg. Cela est justifié en première analyse par le fait que le Nigéria a la plus importante population d'Afrique (148 millions d'habitants) (UN, 2007). Il est suivi par l'Ethiopie avec 0,43 Tg et la Tanzanie avec 0,3 Tg. En 4^{ème} et 5^{ème} position, on trouve l'Afrique du Sud et la République Démocratique du Congo (ex-Zaire) avec respectivement environ 0,3 Tg et 0,25 Tg. Toutes les régions d'Afrique présentent des répartitions différentes par secteurs d'activités, non seulement au regard des consommations, mais aussi des émissions. Le secteur dominant est le secteur domestique (78%), suivi du secteur industriel (16%). Le trafic arrive en 3^{ème} position (5%) et en fin on trouve les centrales thermiques (1%). Cette classification est due aux fortes émissions des biofuels (bois et déchets animaux) du secteur domestique. Cependant, ce classement est différent en Afrique Australe où les positions des secteurs des industries et des centrales thermiques sont inversées à cause des très faibles facteurs d'émissions des centrales thermiques comparativement à ceux des industries. Cette analyse par régions et par secteurs permet de déterminer où agir pour contrôler les

émissions (carbone suie et carbone organique), en donnant des informations permettant aux décideurs d'avoir une meilleure visibilité des politiques à venir, selon leurs possibles impacts.

3.2.3.3. Test de sensibilité tenant compte d'une nouvelle spatialisation des émissions en Afrique du Sud sur la base d'un inventaire régional de SO₂.

Pour effectuer ce test, nous nous sommes basés sur les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) spatialisées en fonction des secteurs d'activités (industriel, domestique et trafic) pour l'année 2000 en Afrique du Sud, dans le cadre de l'expérience SAFARI. La méthodologie pour générer nos fichiers de spatialisation (équivalent à la densité de population normalisée) est la même dans ces trois secteurs d'activités. Nous avons d'abord normalisé les émissions de SO₂ par activité en divisant les émissions en chaque point de grille par le total des émissions du secteur d'activité considéré. Ainsi, les coefficients obtenus seraient équivalents aux densités de population des fichiers du CIESIN (2005). Nous avons ensuite effectué une interpolation, afin que les coordonnées de cette nouvelle spatialisation (0,18° x 0,18°) correspondent à celle du CIESIN (0,25° x 0,25°). Enfin, nous avons spatialisé les nouvelles émissions par secteurs d'activité. La figure 3.7 présente les émissions de carbone organique primaire du secteur industriel avec la spatialisation CIESIN (à gauche) et celle issue du fichier SO₂ (à droite).

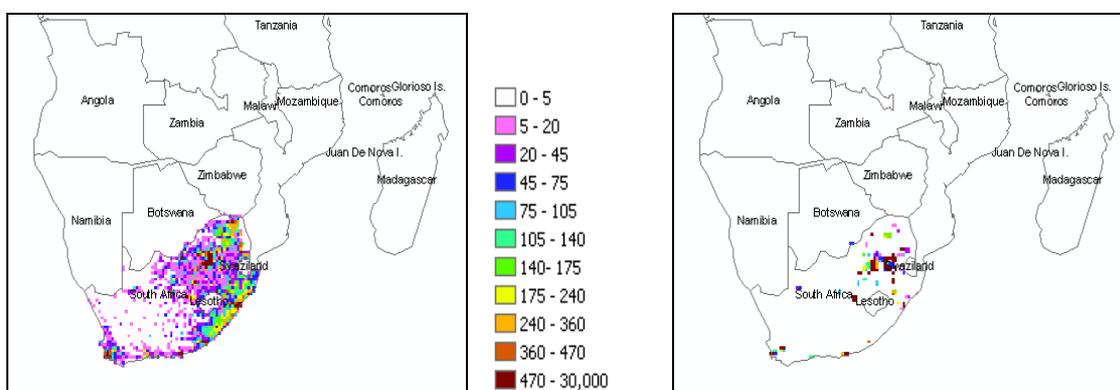


Fig. 3.7. : Emissions (en tonnes) de carbone organique primaire en Afrique du Sud en 2005 avec le nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011) : à gauche avec la spatialisation CIESIN (2005), à droite avec celle issue du fichier de SO₂.

Les points observés sur la figure 3.7 avec la densité de population du CIESIN (2005) sont plus nombreux car on utilise la densité de population comme clé de spatialisation. Par contre, avec le fichier SO₂, les points de grille représentés, peu nombreux semblent indiquer de manière plus précise l'emplacement des industries en Afrique du Sud. Ainsi, la figure 3.7 montre que

les émissions industrielles sont enfin bien localisées là où il y a des industries dans le fichier SO₂ par rapport au fichier CIESIN (2005). La principale conséquence est d'obtenir des valeurs très différentes aux points de grille selon le mode de spatialisation choisi. Par exemple, les valeurs maxima des émissions de carbone organique primaire en un point de grille sur la figure 3.7 sont de 295 tonnes avec l'ancienne spatialisation et de 27000 tonnes avec la nouvelle. Au chapitre 5, nous testerons ces nouvelles émissions spatialisées en Afrique du Sud avec le modèle global de climat TM5.

3.3. Comparaison de mon nouvel inventaire avec les inventaires de Junker and Lioussé (2008) et de Bond et al. (2004)

Nous allons d'abord effectuer une comparaison entre les données de consommations et dans une seconde partie, nous nous focaliserons sur les émissions (carbone suie et carbone organique). Pour nos comparaisons, nous nous sommes basés sur deux inventaires globaux : l'inventaire de Bond et al. (2004) relatif à l'année 2000 avec des données de consommations issues de la base de données IEA et celui de Junker et Lioussé (2008) actualisé pour l'année 2005, avec des données de consommations issues de la base de données ONU. Notons que par souci de simplicité, l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) signifiera dans ce texte l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) actualisé pour l'année 2005. Notons également que les données disponibles pour l'inventaire de Bond et al. (2004) sont des données détaillées de consommation et d'émissions selon le type de fuel (combustibles fossiles et biofuels) et selon le secteur d'activité (domestique, trafic et industrie), alors que l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) possède également des informations sur les consommations par pays et par combustible.

3.3.1. Consommations

La consommation totale en combustibles fossiles et en biofuels est de 1318 Tg dans le nouvel inventaire, contre 1232 Tg dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) actualisé pour l'année 2005 et de 758 Tg dans l'inventaire de Bond et al. (2004) pour l'année 2000. Cela montre une augmentation relative de 7% par rapport à l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) et de 74% par rapport à celui de Bond et al. (2004). L'écart entre le nouvel inventaire et celui de Bond et al. (2004) n'est pas négligeable : une des raisons peut être liée à l'année

considérée pour l'inventaire de Bond et al. (2004) qui est de 2000 tandis que le nôtre est de 2005. L'analyse détaillée de ce total montre que la consommation de combustibles fossiles et de biofuels est plus importante dans notre inventaire que dans les deux autres. En effet, la consommation des biofuels est passée de 536 Tg dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (respectivement 487 Tg dans Bond et al. (2004)) à 600 Tg dans le nouvel inventaire, soit une évolution relative de près de +12% par rapport à Junker and Lioussé (2008) (resp. +21% avec celui de Bond et al. (2004)). Le constat est plus marqué pour les combustibles fossiles. Leur consommation est passée de 696 Tg dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (resp. 261 Tg dans Bond et al. (2004)) à 718 Tg dans le nouvel inventaire, soit une évolution relative de 3% par rapport à l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (resp. 175% avec celui de Bond et al., 2004). Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'évolution des consommations de combustibles fossiles et de biofuels par secteurs d'activités. Nous avons regroupé les industries et les centrales thermiques, car cette discrétisation n'était pas présente dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008). La figure 3.8 présente les consommations totales par secteurs d'activités, tenant compte des combustibles fossiles et des biofuels en Afrique pour 2005.

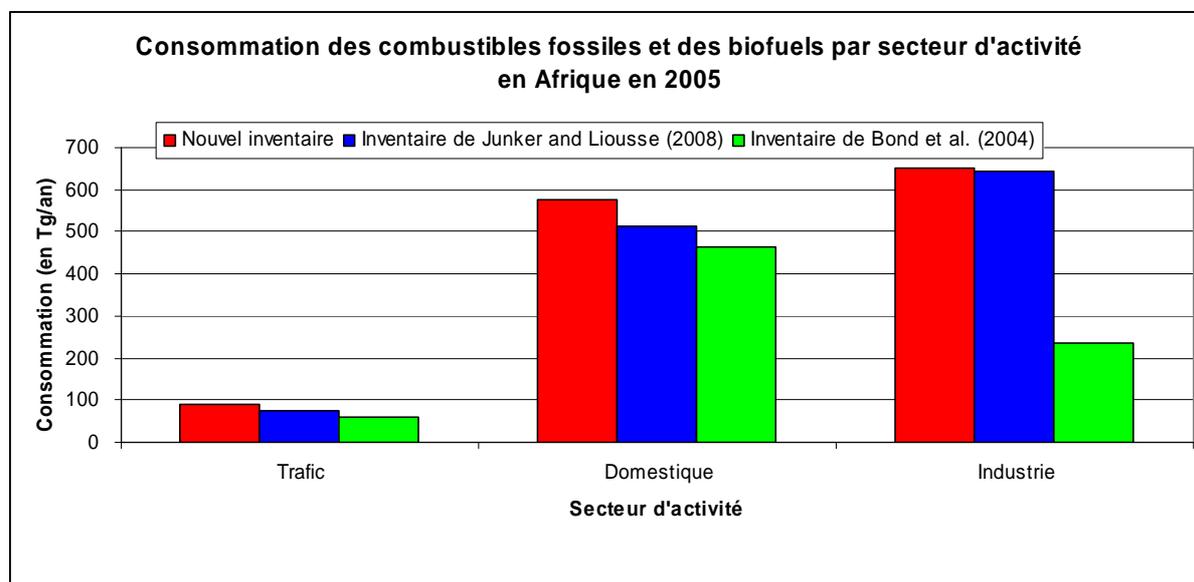


Fig. 3.8. : Consommations de combustibles fossiles et de biofuels en Afrique en 2005 : en rouge le nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011), en bleu l'ancien inventaire (Junker and Lioussé, 2008) et en vert, l'inventaire de Bond et al. (2004).

Quel que soit le secteur d'activité, les données de consommations dans le nouvel inventaire sont supérieures à celles des inventaires de Junker and Lioussé (2008) et de Bond et al.

(2004). Ainsi, dans le secteur trafic, on note une augmentation relative de 18% par rapport à l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) contre 49% par rapport à celui de Bond et al. (2004). L'augmentation est moins importante dans le secteur domestique : +13% par rapport à l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) et + 25% pour celui de Bond et al. (2004). A contrario, les différences sont beaucoup plus marquées dans les industries avec l'inventaire de Bond et al. (2004). On obtient une augmentation relative de 178% par rapport à l'inventaire de Bond et al. (2004) contre à peine 1% pour celui de Junker and Lioussé (2008). Cela montre que notre apport (mise à jour des données de consommations) dans l'élaboration du nouvel inventaire a généré une augmentation des données de consommation que ce soit par rapport à l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) ou celui de Bond et al. (2004).

Pour l'analyse plus détaillée par fuel et par pays, la comparaison ne se fera qu'avec l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) qui présente le même niveau de discrétisation des données. En Afrique, on note l'importance de 6 biofuels et de 28 combustibles fossiles, soit 34 combustibles parmi les 56 combustibles répertoriés dans la classification ONU. Sur les 6 biofuels, la moitié a subi des modifications. Il s'agit de hausses respectives de 37% et de 2296% des consommations en charbon de bois et en déchets végétaux respectivement et d'une baisse de 41% de la consommation de bois dans le nouvel inventaire. Cette valeur (2294% soit 17 kT à 407 kT) est due à la prise en compte des déchets animaux (domestique et industrie) au Niger et au Togo, sur la base des réponses au questionnaire, ce qui n'était pas le cas dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008). Par contre, la baisse de la consommation de bois dans le secteur domestique peut s'expliquer par la prise en compte du procédé de fabrication du charbon de bois (« charcoal making ») car nous avons considéré que 50% de la consommation de bois du secteur domestique est attribuée à ce processus de fabrication. Par ailleurs, au niveau des combustibles fossiles, 7 d'entre eux ont vu leurs consommations augmenter entre 5% pour le GPL et 408% pour le carburant pour avions (« aviation gasoline »). L'analyse par pays montre que l'on peut regrouper les pays selon trois tendances : les pays qui présentent une évolution positive de leur consommation, les pays sans aucune tendance et enfin ceux qui montrent une tendance négative. Le groupe des pays d'évolution négative est composé de 10 pays, avec des évolutions variant entre -39% en Guinée et -10% au Sénégal. Les pays à évolution positive sont au nombre de 25, et des variations oscillant entre +2% en Afrique du Sud et +159% en Guinée Bissau. Le Nigéria et la Côte d'Ivoire font partie de cette catégorie avec respectivement +12% et +15%. Globalement, les fortes différences entre notre nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011) et celui de Junker and Lioussé (2008) portent majoritairement sur les pays qui ont répondu à nos questionnaires, mais aussi

sur ceux pris en compte dans l'étude de Brocard (1996). Cela montre l'importance des priorités dans les choix des données dans les différentes mises à jour qui ont été effectuées.

3.3.2. Emissions

3.3.2.1. Carbone suie

Les différences entre les émissions de carbone suie issues du nouvel inventaire sont plus ou moins marquées par rapport aux inventaires globaux existants. En effet, les émissions de carbone suie en 2005 s'élèvent à 0,69 Tg dans le nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011), 0,68 Tg dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) et de 0,45 Tg dans l'inventaire de Bond et al. (2004) pour l'année 2000 en Afrique. La faible différence entre le nouvel inventaire et celui de Junker and Lioussé (2008) (~10 Gg/an) traduit une hausse de 1% contre 52% par rapport à l'inventaire de Bond et al. (2004). En séparant les biofuels des combustibles fossiles, on remarque que les émissions de biofuels sont passées de 0,46 Tg (resp. 0,31 Tg) dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (resp. Bond et al., 2004) à 0,47 Tg dans le nouvel inventaire, soit une hausse relative de 1% (resp. 53%). Les résultats sur les combustibles fossiles montrent que leurs émissions de carbone suie sont passées de 0,224 Tg (resp. 0,146 Tg) dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) (resp. Bond et al., 2004) à 0,218 Tg dans le nouvel inventaire soit une baisse de l'ordre de 3% par rapport à l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) et une hausse de 50% par rapport à celui de Bond et al. (2004). Cette analyse est différente de celle qui a été faite sur les données de consommations où les données du nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011) étaient plus fortes que celles des deux autres inventaires, quel que soit le combustible considéré. Cette différence de classification pour le carbone suie s'explique principalement par la création du secteur des centrales thermiques et des plus faibles facteurs d'émissions dans ce secteur par rapport au secteur industrie. C'est ce que nous pouvons relever sur la figure 3.9 qui présente les émissions totales en carbone suie par secteurs d'activités, tenant compte des combustibles fossiles et des biofuels en Afrique en 2005. Les données de l'inventaire de Bond et al. (2004) qui portent sur l'année 2000 ont été ajoutées.

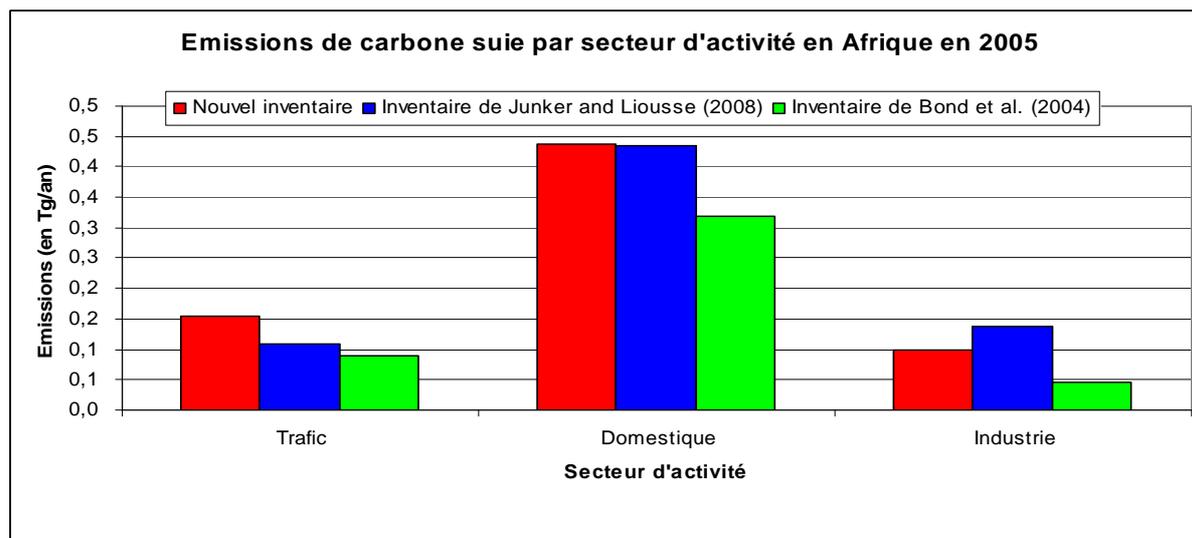


Fig. 3.9 : Emissions de carbone suie en Afrique en 2005 : en rouge le nouvel inventaire (Liousse et al., 2011), en bleu, l'ancien inventaire (Junker and Liousse, 2008) et en vert l'inventaire de Bond et al. (2004).

Sur la figure 3.9, il apparaît que les émissions de carbone suie dans le nouvel inventaire sont supérieures à celles de l'inventaire de Bond et al. (2004) et ce, quel que soit le secteur d'activité considéré. Dans la sectorisation du trafic, les émissions de carbone suie dans le nouvel inventaire sont supérieures à celles de Junker and Liousse (2008) (resp. Bond et al., 2004) de près de 41% (resp. 73%). Quant au domestique, la différence est peu marquée entre le nouvel inventaire et celui de Junker and Liousse (2008). Par contre, la différence est beaucoup plus marquée avec l'inventaire de Bond et al. (2004) (37%). Les émissions de carbone suie dans le secteur industriel ont diminué (resp. augmenté) de 27% (resp. 120%) dans le nouvel inventaire au regard de l'inventaire de Junker and Liousse (resp. Bond et al., 2004). Comme mentionné auparavant, les explications sur la baisse dans le secteur des industries vient des facteurs d'émissions dans le secteur des centrales thermiques. En effet, avec une différence de 1% entre les données de consommations des deux inventaires, on pourrait s'attendre à 1% de différence seulement au niveau des émissions. Ce n'est pas le cas, car la discrétisation entre industries et centrales thermiques (40% de la consommation totale du nouvel groupe « industrie ») a entraîné la prise en compte de nouveaux facteurs d'émissions plus faibles dans les centrales thermiques que dans le secteur industriel. Ainsi, le choix de ces nouveaux facteurs d'émissions appliquées à 40% de la consommation due aux centrales thermiques (contre 60% pour les industries) a réduit les émissions de carbone suie dans ce secteur d'activité. L'analyse fuel par fuel menée en comparant mon inventaire

(Lioussé et al., 2011) à celui de Junker and Lioussé (2008) montre que seules les combustions de déchets animaux, de charbon de bois et de déchets végétaux présentent des émissions de carbone suie en augmentation, respectivement de 19%, 37% et 2857%. Par contre, les émissions dues aux combustions de bois ont baissé de près de 40% dans le nouvel inventaire, tout comme pour les données de consommations, puisqu'on a prélevé la moitié du bois du secteur domestique pour fabriquer le charbon de bois. Notons que globalement, tenant compte à la fois des émissions dues au bois et à la fabrication de charbon de bois dans notre nouvel inventaire, une baisse est observée, de l'ordre de 6%. Par contre, au niveau des combustibles fossiles, 8 d'entre eux ont vu leurs émissions en carbone suie modifiées dans le nouvel inventaire. Aussi, la baisse des émissions de carbone suie porte sur 5 combustibles fossiles (de -16% pour le fuel lourd à -56% pour le charbon noir) et la hausse sur 3 combustibles (de +7% pour l'essence à +34% pour le diesel). Concernant les pays d'Afrique, les émissions de carbone suie n'ont pas varié dans 8 pays sur les 56 que compte l'Afrique. On enregistre des réductions d'émissions de carbone suie allant de -51% en Guinée à -4% au Burkina Faso et ce, dans 24 pays. Les 24 autres pays ont vu leurs émissions croître dans des proportions diverses. Ainsi, les émissions de carbone suie ont augmenté +3% au Kenya et jusqu'à +142% en Guinée Bissau. Les 3 pays (i.e. Afrique du Sud, Côte d'Ivoire et Nigéria) dont nous évoquons l'évolution des consommations, connaissent cette fois-ci des évolutions contrastées. En effet, pour l'Afrique du Sud, alors que sa consommation a augmenté de +2%, ses émissions de carbone suie ont baissé de 36% dans mon inventaire par rapport à celui de Junker and Lioussé (2008). Cette baisse des émissions de carbone suie dans mon nouvel inventaire est due à la prise en compte des centrales thermiques qui ont des facteurs d'émissions plus faibles que ceux utilisés dans les industries. A contrario, la Côte d'Ivoire et le Nigéria ont des émissions de carbone suie qui ont augmenté de +18% et +23% respectivement. Notons que les données de Bond et al. (2004) restent inférieures à celles de Junker and Lioussé (2008) et à mon inventaire (Lioussé et al., 2011).

3.3.2.2. Carbone organique primaire

A l'échelle de l'Afrique, en 2005, les émissions de carbone organique primaire ont été évaluées à 4,02 Tg dans le nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011), 1,12 Tg dans l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) et 1,31 Tg dans l'inventaire de Bond et al. (2004) pour l'année 2000. Les estimations entre les deux inventaires globaux sont du même ordre de grandeur. Notons qu'il peut y avoir des compensations dans les chiffres se traduisant par des

consommations plus importantes dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008) et des facteurs d'émissions plus grands utilisés dans l'inventaire de Bond et al. (2004). Ainsi, les plus fortes valeurs d'émissions dans l'inventaire de Bond et al. (2004) par rapport à celui de Junker and Liousse (2008) s'expliquent par des facteurs d'émissions nettement plus importants dans l'inventaire de Bond et al. (2004) malgré le fait que les consommations dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008) en 2005 soient près de 1,6 fois supérieures à celles de l'inventaire de Bond et al (2004) de 2000. Au regard de ces chiffres, il faut à présent souligner que les différences entre les totaux d'émissions des inventaires existants et le nouvel inventaire (Liousse et al., 2011) sont beaucoup plus marquées pour le carbone organique primaire que pour le carbone suie. Les différences relatives en carbone organique primaire sont de +258% par rapport à l'inventaire de Junker and Liousse (2008) contre +208% pour l'inventaire de Bond et al. (2004). En effectuant un zoom sur les combustibles, on se rend compte que l'impact est plus important pour les biofuels que pour les combustibles fossiles. En effet, les émissions de carbone organique primaire dues aux biofuels sont passées de 0,92 Tg (resp. 1,12 Tg) dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008) (resp. Bond et al., 2004) à 3,68 Tg dans le nouvel inventaire, soit une hausse relative de 302% (resp. 227%). Les résultats montrent également que les émissions de carbone organique des combustibles fossiles sont passées de 0,21 Tg dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008) (resp. 0,18 Tg dans Bond et al. (2004)) à 0,33 Tg dans le nouvel inventaire (Liousse et al., 2011), soit une hausse de l'ordre de +62% par rapport à l'inventaire de Junker and Liousse (2008) (resp. +85% par rapport à Bond et al. (2004)). L'analyse sectorielle des émissions de carbone organique primaire en 2005 en Afrique est présentée sur la figure 3.10. Les données de l'inventaire de Bond et al. (2004) relatives à l'année 2000 sont reportées également sur cette figure.

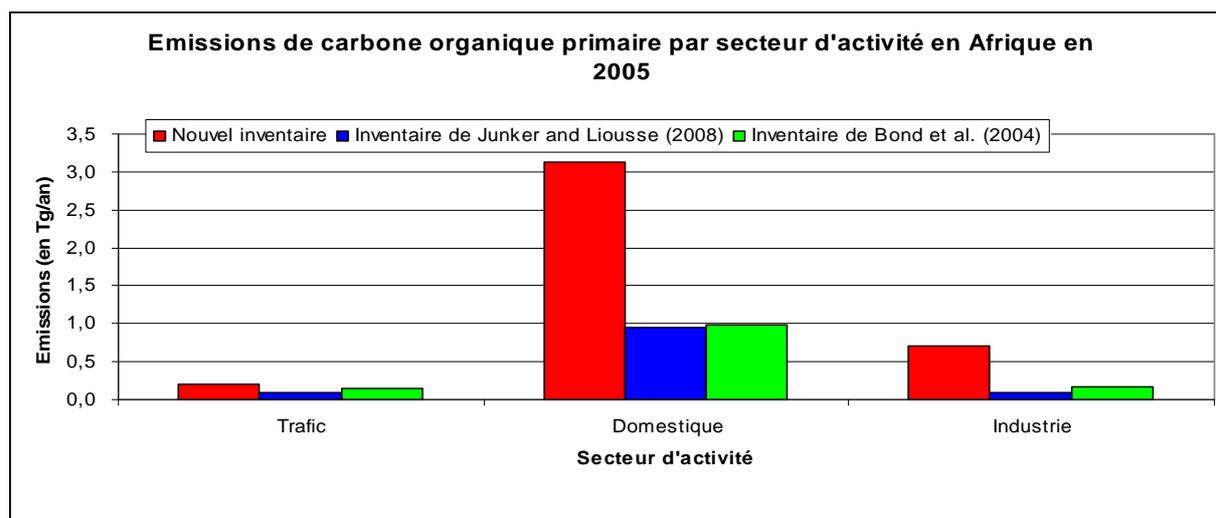


Fig. 3.10 : Emissions de carbone organique primaire en Afrique en 2005 : en rouge le nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011), en bleu l'ancien inventaire (Junker and Lioussé, 2008) et en vert l'inventaire de Bond et al. (2004).

En l'Afrique, quel que soit le secteur d'activité considéré, les émissions de carbone organique primaire du nouvel inventaire 2005 sont supérieures à celles de Bond et al. (2004) en 2000, elles mêmes supérieures à celles de Junker and Lioussé (2008) de 2005. Ce constat est différent de celui établi pour le carbone suie, dans la mesure où les émissions de carbone suie de Junker and Lioussé (2008) étaient supérieures à celles de Bond et al. (2004), quel que soit le secteur d'activité. Ces résultats mettent une fois de plus en évidence l'impact des deux méthodologies de construction des inventaires existants (cf. chapitre 1) d'une part, et d'autre part les grandes différences observées sur les facteurs d'émissions utilisés dans chaque inventaire qui modifie le rapport BC/OC. Dans le secteur trafic, les émissions de carbone organique primaire du nouvel inventaire sont supérieures à celles de Junker and Lioussé (2008) (resp. Bond et al., 2004) de près de 127% (resp. 27%). Dans le secteur domestique, la différence est marquée entre mon inventaire et celui de Junker and Lioussé (2008) (+232%), de même qu'avec celui de Bond et al. (2004) (+ 219%). Les émissions de carbone organique primaire du secteur industriel ont fortement augmenté, soit +633% (resp. +306%) dans le nouvel inventaire au regard de l'inventaire de Junker and Lioussé (resp. Bond et al., 2004). Sur les 4 biofuels qui ont subi des modifications dans leurs émissions de carbone suie (+19% pour les déchets animaux, +37% pour le charbon de bois, +2857% pour les déchets animaux et -40% pour le bois), on note que seuls 2 biofuels ont des émissions de carbone organique primaire modifiées : le charbon de bois (+37%) et le bois (-40%), avec les mêmes proportions que pour le carbone suie. Par ailleurs, trois combustibles fossiles voient leurs émissions

baisser et cinq autres augmenter. Les baisses relatives sont comprises entre -8% pour le charbon noir et -30% pour le « coke oven coke », tandis que les hausses s'échelonnent entre +7% pour l'essence et 408% pour le carburant pour avions légers. Il faut remarquer que ce sont les mêmes combustibles qui ont été modifiés pour le carbone suie. Concernant les émissions de carbone organique primaire dans chaque pays, on constate que 5 pays (Guinée, Sahara Occidental, Mauritanie, Sierra Leone et Guinée Equatoriale) ont vu leurs émissions de carbone organique primaire baisser, entre -19% pour la Guinée et -3% pour la Guinée Equatoriale. 48 autres pays ont des émissions qui ont augmenté et ce, entre +8% au Tchad et +1173% au Gabon. Il faut signaler que 28 de ces 48 pays ont des augmentations en carbone organique qui ont plus que doublé (> 100%). En outre, les fortes proportions en Afrique du Sud (+118%), en Côte d'Ivoire (+394%) et au Nigeria (+770%) sont le fait principalement de la prise en compte des 2 roues en Afrique de l'Ouest (i.e. Côte d'Ivoire et Nigéria), ainsi que les réponses à nos questionnaires pour ces deux pays.

3.4. Comparaison entre les émissions de combustibles fossiles et de biofuels et celles des feux de biomasse, de carbone suie et de carbone organique primaire

Comme nous l'avons rappelé en introduction, une des sources majeures d'émissions en Afrique de l'Ouest sont les feux de savane. Il convient à présent de savoir l'importance relative des émissions anthropiques relativement à celles des feux. Aussi, nous supposons qu'à priori, nos données d'émissions (trafic, domestique, industrie et centrale thermique) n'ont aucune saisonnalité, contrairement aux feux de biomasse (Guillaume et al., 2007). Ainsi, les données mensuelles d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire dans mon nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011) ont été obtenues en divisant par 12 nos valeurs d'émissions.

3.4.1. Carbone suie

Sur la figure 3.11, nous présentons les données d'émissions de carbone suie (combustibles fossiles et biofuels) dans mon inventaire (Lioussé et al., 2011), ainsi que les données d'émissions par les feux de biomasse pour toute l'Afrique en 2005, données extraites de la base de données du programme AMMA (Lioussé et al., 2010).

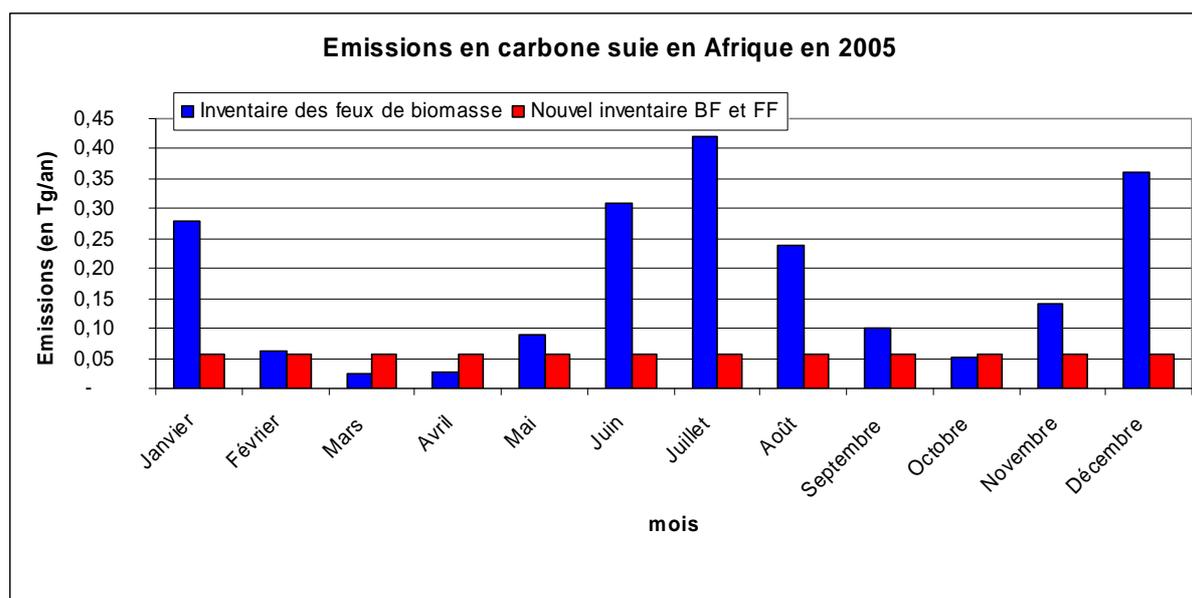


Fig. 3.11. : Comparaison entre émissions de carbone suie provenant de plusieurs sources en 2005 : en bleu l'inventaire de feux de biomasse d'AMMA (Lioussé et al., 2010) et en rouge le nouvel inventaire régional (Lioussé et al., 2011).

Les émissions annuelles de carbone suie issues des feux de biomasse sont évaluées à 2,11 Tg, tandis que mon nouvel inventaire propose 0,69 Tg pour les émissions par les combustibles fossiles et les biofuels. On constate que pendant la période de faible intensité des feux de biomasse (de Février à Mai et de Septembre à Novembre), les émissions de carbone suie des différentes sources sont du même ordre de grandeur. Pour les autres mois de l'année 2005, correspondant à une activité importante des feux de biomasse, les émissions de carbone suie dues aux feux de biomasse sont 4 fois plus importantes que celles des sources de combustion des combustibles fossiles et des biofuels (Lioussé et al., 2011).

3.4.2. Carbone organique primaire

La figure 3.12 présente les émissions de carbone organique primaire en 2005, tenant compte de deux inventaires : mon nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011) et l'inventaire des feux de biomasse extrait du programme AMMA (Lioussé et al., 2010).

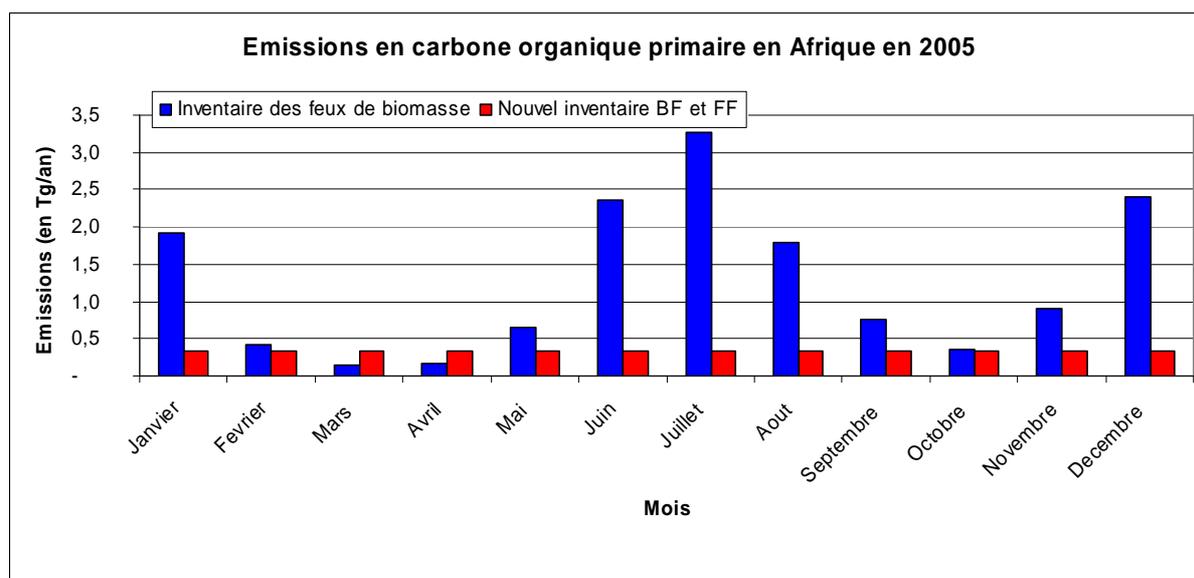


Fig. 3.12 : Comparaison entre émissions de carbone organique primaire provenant de plusieurs sources en 2005 : en bleu l'inventaire de feux de biomasse d'AMMA (Liousse et al., 2010) et en rouge le nouvel inventaire régional (Liousse et al., 2011).

A l'échelle du continent Africain, on constate que les émissions de carbone organique primaire sont de 4,02 Tg dans mon nouvel inventaire et de 15,15 Tg avec les feux de biomasse d'AMMA (pour rappel, les émissions de carbone organique étaient de 1,12 Tg dans l'inventaire de Junker and Liousse (2008)). La comparaison entre les émissions de carbone organique primaire de mon inventaire et celui des feux de biomasse (cf. figure 3.12) montre les mêmes résultats pour le carbone organique que pour le carbone suie : mêmes ordre de grandeur entre les émissions des deux sources pendant la faible activité des feux de biomasse (de Février à Mai et de Septembre à Novembre) et de plus fortes différences pendant la saison des feux de biomasse.

3.4.3. Conclusion partielle

Avec mon nouvel inventaire régional, on observe que les émissions des combustibles fossiles et des biofuels sont à présent du même ordre de grandeur que les émissions par les feux de biomasse pendant la période de faible activité des feux de biomasse (de Février à Mai et de Septembre à Novembre), ce qui n'était pas le cas avec les données de Junker and Liousse (2008). Des différences plus marquées sont observées en Janvier, de Juin à Août et en

Décembre, avec des émissions de carbone suie (resp. carbone organique) par les feux de biomasse 4 fois (resp. 6 fois) plus importantes que celles de mon nouvel inventaire.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un nouvel inventaire d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire à l'échelle de l'Afrique pour l'année 2005. Ce travail a permis de poursuivre les efforts dans l'harmonisation à une échelle régionale des inventaires d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire provenant des combustibles fossiles et des biofuels. La stratégie a été d'abord de procéder à une mise à jour des algorithmes de calculs des distributions spatiales de ces émissions. Pour cela, nous nous sommes servis des données de densité de la population du CIESIN (2005) qui ont permis une spatialisation de nos données à une résolution de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ contre $1^\circ \times 1^\circ$ précédemment. Par la suite, nous avons développé un nouvel inventaire africain tenant compte des spécificités régionales (engins à deux roues et fabrication du charbon de bois). Nous avons utilisé des données provenant de diverses sources (ONU, IEA, questionnaires, anciens travaux sur les inventaires réactualisés) qui ont servi à l'élaboration d'un inventaire cohérent d'émissions des aérosols carbonés en 2005 en Afrique. Ces travaux ont également permis de réviser les valeurs de facteurs d'émissions à partir de données récentes de la littérature (Junker and Lioussé, 2008 ; Bond et al, 2004) et d'introduire un nouveau combustible comme carburant des véhicules à deux roues « TWG » (Assamoi and Lioussé, 2010), ainsi que l'Erythrée comme « nouveau » pays à part entière. Par ailleurs, les centrales thermiques ont été ajoutées dans la sectorisation de ces émissions via les données de l'IEA. Il ressort de ce travail, que nos cinq régions géographiques d'Afrique présentent des comportements différents du point de vue des consommations, mais aussi des émissions. Cela est très marqué dans l'étude sectorielle, où l'Afrique de l'Ouest se distingue comme étant la région la plus émettrice de carbone suie et de carbone organique primaire. Ce résultat est cohérent avec le fait que l'Afrique de l'Ouest est la région la plus peuplée d'Afrique et ses 15 pays, sont tous des pays en voie de développement (facteurs d'émissions plus importants que ceux des pays développés et semi développés). En résumé, on constate que les pays semi-développés se distinguent surtout par leurs fortes émissions dans le secteur industriel et les centrales thermiques, tandis que les pays en voie de développement (44 pays sur 56) par de fortes émissions dans les secteurs domestique et trafic. Cela vient du fait de la différence des facteurs d'émissions, non seulement par secteurs d'activités mais aussi, par niveau de

développement des pays. Ce nouvel inventaire a été comparé à deux inventaires globaux : celui de Junker and Liousse (2008) actualisé pour l'année 2005 et celui de Bond et al. (2004) typique de l'année 2000. Du point de vue des émissions de carbone suie et de carbone organique primaire, les valeurs relevées dans mon nouvel inventaire sont supérieures à celles des deux autres inventaires globaux. Notons que les émissions de carbone organique primaire dans l'inventaire de Bond et al. (2004) relatif à l'année 2000 sont supérieures à celles de Junker and Liousse (2008) actualisé pour l'année 2005. Un autre type de comparaison a été fait entre mon nouvel inventaire de combustibles fossiles et de biofuels (Liousse et al., 2011) et l'inventaire des feux de biomasse (Liousse et al., 2010). Ce travail fait apparaître que mon inventaire présente les mêmes ordres de grandeur que celles des émissions par les feux de biomasse pendant les périodes intra-mousson africaines (entre Février et Mai et entre Septembre et Novembre) pour les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire. Pendant la période de feux intenses (de Novembre à Janvier dans l'hémisphère Nord et de Juin à Août dans l'hémisphère Sud), les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire par les feux de biomasse sont au moins 4 fois plus importantes que celles du nouvel inventaire (Liousse et al., 2011). Finalement, ce travail de développement de mon inventaire a mis en avant des problèmes de régionalisation des inventaires, pour traduire au mieux les réalités de terrain. Aussi, on peut conclure en mettant en avant que le développement des inventaires d'émissions de combustibles fossiles et de biofuels atteste toute l'importance de la régionalisation des inventaires d'émissions pour une incorporation ultérieure dans des inventaires globaux. Cette régionalisation a également mis en exergue les leviers socio-économiques sur lesquels les décideurs pourraient agir du point de vue des combustibles et des secteurs d'activités afin que les politiques de projections de consommations et d'émissions puissent juguler une pollution galopante.

CHAPITRE 4

INVENTAIRES D'EMISSIONS DE CARBONE SUIE (BC) ET DE CARBONE ORGANIQUE PRIMAIRE (OCp) EN AFRIQUE : PROJECTIONS 2030

Sommaire

4.1. Introduction	128
4.2. Méthodologie de construction de l'inventaire 2030.....	128
4.2.1. <i>Données de consommation</i>	128
4.2.2. <i>Le modèle POLES</i>	129
4.2.3. <i>Données utilisées pour l'élaboration de l'inventaire futur</i>	131
4.3. Facteurs d'émissions	131
4.4. Résultats	132
4.4.1. <i>Consommations</i>	132
4.4.2. <i>Emissions</i>	135
4.5. Etude de sensibilité des émissions en 2030.....	141
4.5.1. <i>Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique des deux roues en Afrique de l'Ouest en 2030</i>	142
4.5.2. <i>Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire en Afrique du Sud : nouvelle projection 2030</i>	144
4.5.3. <i>Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique des déchets animaux en Afrique de l'Ouest en 2030</i>	148
4.5.4. <i>Conclusion partielle</i>	149
4.6. Comparaison de mon nouvel inventaire avec les inventaires de Junker and Liousse (2008) et de l'IPCC (Lamarque et al., 2010).....	150
4.7. Conclusion.....	155

4.1. Introduction

De nos jours, où le problème du changement climatique s'impose, les moyens pour le contrôler ne sont pas vraiment maîtrisés. A cette fin, il convient de disposer de prévisions régionales des émissions de gaz et d'aérosols (notamment en carbone suie et en carbone organique primaire) à court et long terme, afin de quantifier leurs impacts sur le climat futur. Ce paragraphe a pour but de développer deux nouveaux inventaires du futur (REF et CCC) pour le carbone suie et le carbone organique primaire, suivant deux scénarios : l'un a été choisi pour la référence (noté REF) sans réglementation portant sur les émissions et l'autre, plus contraignant (noté CCC pour Carbon Constraint Case), avec un contrôle des émissions. Dans ce chapitre, nous détaillons d'abord la méthodologie de construction de ce nouvel inventaire 2030, ainsi que les premiers résultats obtenus. Nous présentons ensuite les résultats de comparaison avec le tout nouvel inventaire IPCC (Lamarque et al., 2010) et des tests de sensibilité sur le scénario le plus contraignant (CCC).

4.2. Méthodologie de construction de l'inventaire 2030

Ce travail sur les inventaires du futur fait suite à celui qui a démarré lors du post-doctorat de C. Junker en 2005 dans le cadre du projet GICC à Toulouse. Nous reprenons la méthodologie mise alors en place pour l'adapter/l'appliquer au nouvel inventaire africain que j'ai développé pour l'année 2005 pour générer l'inventaire 2030. Le calcul des émissions est basé sur la méthode de Junker and Lioussé (2008) présentée au chapitre 3 en considérant les trois secteurs d'activité (industrie, domestique et trafic) et les trois niveaux de développement des pays (développés, semi développés et en voie de développement). Ainsi, les 30 membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) sont les pays développés et la distinction entre pays semi-développés et en voie de développement se fait sur la base des produits intérieurs bruts (PIB) issus de l'ONU (Junker and Lioussé, 2008).

4.2.1. Données de consommation

Deux sources de données ont été utilisées pour estimer les données de consommations. Il s'agit des données de mon inventaire (chapitre 3) et des prévisions du modèle POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems) (Criqui, 2001).

4.2.2. Le modèle POLES

Le modèle POLES est un modèle global de simulation des besoins énergétiques. Il évalue les besoins énergétiques de manière récursive (année par année) en tenant compte du prix des énergies sur les marchés, des ajustements des réserves (stocks), de l'offre et de la demande dans le monde. Ce modèle, développé en liaison avec des programmes Européens, est opérationnel depuis 1997. Il a été utilisé, non seulement pour analyser les politiques des Etats de l'Union Européenne, mais aussi à des fins, plus généralement, de Recherche et d'Environnement. Il est également utilisé en France par le Ministère de l'Environnement. Ce modèle permet ainsi :

- d'avoir un aperçu détaillé à long terme (2030) sur les énergies mondiales en fonction de la demande, des stocks et des projections des prix dans les différentes régions du monde.
- de tenir compte des coûts d'abattement des émissions de CO₂, afin d'analyser les systèmes d'échanges d'énergie sous diverses configurations et règles du marché.
- l'amélioration des scénarios technologiques et l'analyse des progrès technologiques dans le contexte des contraintes d'émissions de CO₂.

Ce modèle intéresse les organisations internationales, les politiques et les analystes énergétiques dans le contexte des marchés mondiaux d'énergie et d'environnement. Ce modèle revêt un intérêt particulier pour nous dans la mesure où il fournit également les données de consommations « actuelles » (2005) et celles prévues pour les années 2010, 2020 et 2030 selon 2 scénarios : un scénario de référence (REF) et un scénario plus contraignant (CCC) basé sur le protocole de Kyoto (IPCC, 2001).

Le scénario de référence fournit une image de l'évolution des réserves énergétiques et de la demande dans les différentes régions du monde pour les 20 ans à venir, sur la base de fondements économiques (e.g. l'offre et la demande). Cette situation permet de connaître l'état énergétique du monde dans un contexte où les techniques économiques évoluent constamment. Ce scénario de référence ne prend pas en compte les énergies spécifiques et les politiques environnementales ou même les mesures liées au protocole de Kyoto (2000). C'est dans ce contexte que le scénario de référence a pour but d'identifier les éventuels problèmes et contraintes liés à une « société » en constant développement sans aucune contrainte sur ses émissions ; pour se référer à des appellations plus connues, ce scénario « REF » est du type « Business as Usual ».

Le scénario CCC est défini, quant à lui, par l'introduction de sanctions différenciées sur les émissions de carbone des grandes régions du monde sur la base d'un échancier. Plus précisément, les émissions de carbone sont fixées pour 2010 de manière à refléter les différences régionales dans l'application des objectifs de Kyoto (soit une diminution d'environ 20% de l'intensité énergétique des pays en 2012 par rapport à 2002 et la mise en oeuvre des engagements de réduction des émissions selon Kyoto pour l'Europe), pour parvenir à une réduction d'environ 10 Gt de carbone (soit 37 Gt de CO₂) au niveau mondial en 2030 par rapport au scénario de référence. Dans le cadre de ma thèse, je me suis focalisé sur l'année 2030 avec les deux scénarios REF et CCC ci-dessus.

Le modèle POLES différencie 21 types de fuels listés dans le tableau 4.1 qui sont répartis dans les trois secteurs d'activités présents dans Junker and Liousse (2008) : trafic, domestique et industrie.

Tableau 4.1 : Les 21 combustibles fossiles et biofuels* pris en compte dans le modèle POLES.

Hard coal	Gas-diesel oil	Coke-oven gas
Lignite/brown coal	Motor gasoline	Natural gas
Brown coal coke	Aviation gasoline	Refinery gas
Coke-oven coke	Jet fuel	Charcoal
Gas coke	Kerosene	Fuelwood
Peat	Liquifield petroleum gas	Feedstocks
Residual fuel oil	Blast furnace gas	Municipal wastes

* Les définitions exactes de ces 21 combustibles fossiles et biofuels sont présentées en Annexe 4.

Par ailleurs, 24 pays et 14 régions (tableau 4.2) sont pris en compte dans le modèle POLES.

Tableau 4.2 : Pays et régions considérés dans le modèle POLES.

Pays	Régions
Autriche	Europe Centrale
Belgique - Luxembourg	Union soviétique
Brésil	Golfe
Canada	Moyen Orient non producteurs
Chine	Afrique du Nord - OPEP (Algérie et Libye)
Danemark	Afrique du Nord – non OPEP (Maroc et Tunisie)
Egypte	Autres pays d'Europe de l'Ouest
Finlande	OCDE
France	Reste de l'Amérique Centrale

Pays	Régions
Allemagne	Reste de l'Europe Centrale
Grèce	Reste de l'Amérique du Sud
Inde	Reste de l'Asie du Sud
Irlande	Reste du Sud de l'Est de l'Asie
Italie	Afrique Sub-Saharienne
Japon	
Corée	
Mexique	
Pays-Bas	
Portugal	
Espagne	
Suisse	
Turquie	
Royaume-Uni	
USA	

Mon domaine d'étude spécifique étant l'Afrique, les régions d'intérêt ici (tableau 4.2 pays/régions en gras) regroupent à priori, tous les pays d'Afrique : les pays d'Afrique du Nord qui sont des membres de l'OPEP (Algérie et Libye), les pays d'Afrique du Nord non membres de l'OPEP (Maroc et Tunisie), l'Egypte et tous les autres pays de l'Afrique sont regroupés dans la région « Afrique Sub-Saharienne ».

4.2.3. Données utilisées pour l'élaboration de l'inventaire futur

Dans un premier temps, j'ai calculé les rapports de la consommation des différents combustibles par activité pour chaque scénario de 2030 par rapport à 2005 issus du modèle POLES. Dans un deuxième temps, j'ai appliqué ces rapports aux données sur les consommations des combustibles fossiles et des biofuels obtenues avec mon nouvel inventaire pour l'année 2005. Notons que dans mon inventaire, il existe un secteur d'activité « les centrales thermiques » qui n'existe pas dans POLES. J'ai donc appliqué le coefficient multiplicatif 2005/2030 du secteur industrie de POLES aux secteurs industries et centrales thermiques de mon inventaire.

4.3. Facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions prévues pour 2030 pour les combustibles dans les deux scénarios REF et CCC sont évalués comme suit :

- Dans le scénario REF, les facteurs d'émissions de l'année 2030 sont supposés égaux à ceux d'aujourd'hui (2005) pour les pays développés, semi développés et en voie de développement. Dans mon cas, j'ai utilisé les facteurs d'émissions définis dans le chapitre 3 (tableau 3.9).
- Dans le scénario CCC, l'évaluation des facteurs d'émissions est établie uniquement pour les pays semi-développés et les pays en voie de développement, les deux seuls niveaux de développement en Afrique. L'hypothèse qui a été retenue est la suivante : les facteurs d'émissions dans les pays semi-développés dans le scénario CCC pour 2030 sont égaux à ceux des pays développés en 2005 (cf. tableau 3.9 Chapitre 3 ; Junker and Liousse, 2008). Par ailleurs, les facteurs d'émissions des pays en voie de développement sont égaux à ceux des pays semi-développés en 2005 (Junker and Liousse, 2008 ; Cooke et al., 1999).

4.4. Résultats

La méthodologie décrite au paragraphe précédent a fourni de nouvelles projections globales des données de consommations en combustibles fossiles et biofuels, ainsi que les données d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire pour 2030 (pour les deux scénarios décrits plus haut). Nous présenterons les résultats obtenus pour 2030 (selon nos 2 scénarios) en décrivant la tendance entre les années 2005 (nouvel inventaire) et 2030 sur l'Afrique. Pour la spatialisation de nos données d'émissions, nous avons utilisé la densité de population décrite dans les chapitres précédents : celle du CIESIN (2005) pour l'année 2005.

4.4.1. Consommations

De même qu'avec l'inventaire 2005, une étude régionale sur les régions du chapitre 3 est effectuée pour évaluer les tendances des consommations pour chaque région. Le tableau 4.3 présente les évolutions des consommations par région entre 2005 et 2030, en Afrique.

Tableau 4.3 : Récapitulatif des consommations régionales en 2005 et en 2030, selon les scénarios REF et CCC.

Zone géographique	2005 (Tg)	2030 (Tg)		Evolution relative par rapport à 2005 (%)	
	NEW	REF	CCC	REF	CCC
Afrique de l'Est	212,1	629,3	629,6	197	197
Afrique Centrale	92,1	200,1	200,5	117	118
Afrique du Nord	339,1	478,1	574,6	41	69
Afrique Australe	440,3	2 562,8	2 577,5	482	485
Afrique de l'Ouest	234,3	670,6	683,1	186	192
TOTAL	1 317,8	4 540,9	4 665,4	245	254

Les consommations de combustibles fossiles et de biofuels en 2030 en Afrique sont évaluées respectivement à 4541 Tg et 4665 Tg dans les scénarios REF et CCC, soit une différence de 124 Tg (tableau 4.3). Ceci montre une augmentation de près de 3% des consommations dans le scénario CCC par rapport au scénario REF. Les faibles différences entre les deux scénarios REF et CCC peuvent s'expliquer pour partie, par le fait que la plupart des pays d'Afrique ne sont pas soumis aux décisions du protocole de Kyoto. Par ailleurs, on constate que la consommation en biofuels ne varie pas d'un scénario à l'autre en 2030 (1898 Tg), tandis que la consommation des combustibles fossiles s'élève à 2643 Tg dans le scénario REF et à 1767 Tg dans le scénario CCC, soit une différence relative de près de 35% (non montré ici). En nous intéressant aux combustibles fossiles responsables des différences entre les deux scénarios REF et CCC, on se rend compte qu'il s'agit surtout du gaz naturel (+2044% dans CCC par rapport au scénario REF). En outre, l'analyse par secteur d'activité en 2030 montre que la différence est la plus marquée dans le secteur industries où l'on note des consommations de 425 Tg et de 542 Tg dans les scénarios REF et CCC respectivement, soit une différence relative de 27%. Les autres secteurs d'activités sont peu impactés : 351 Tg (scénario REF) contre 354 Tg (scénario CCC) dans le secteur trafic (0,9%), 1779 Tg (scénario REF) contre 1785 Tg (scénario CCC) dans le secteur domestique (0,3%). Aucune différence n'est à relever dans le secteur des centrales thermiques où les consommations sont de l'ordre de 1985 Tg. En fait, c'est le gaz naturel, le plus consommé dans les industries dans le scénario CCC, qui est à l'origine de cette différence. A l'échelle des différentes régions, il existe peu de différences entre les scénarios CCC et REF, à l'exception de l'Afrique du Nord où la consommation est plus importante dans le secteur industrie dans REF. Cela s'explique par le fait que le modèle POLES, dans son algorithme de calcul des prévisions des données de consommations, comprend pour l'Afrique du Nord, des pays semi-développés (Algérie, Libye, Maroc et Tunisie) avec un « fort » développement industriel, et des pays en voie de

développement (Mauritanie, Sahara Occidental et Soudan). Ainsi, les différences d'évolutions entre données de consommations des pays semi développés et en voie de développement engendrent les écarts observés. Les pays concernés sont l'Algérie (+55%), la Libye (+32%) et la Tunisie (+50%), mais aussi l'Egypte (+31%).

Le tableau 4.3 présente également les évolutions relatives aux données de consommations entre 2005 et 2030 (REF et CCC). Les consommations en 2030 (tant REF que CCC) sont en moyenne 3,5 fois plus importantes que celles de 2005. A l'échelle de chaque région, on note que les consommations 2030 (REF et CCC) sont 3,0 fois plus importantes que celles de 2005 en Afrique de l'Est, 2,2 fois en Afrique Centrale, 1,5 fois en moyenne en Afrique du Nord, 5,8 fois en Afrique Australe et 2,9 fois en Afrique de l'Ouest. Ces écarts entre les années 2005 et 2030 s'expliquent par des consommations en combustibles fossiles (resp. biofuels) en 2030 en moyenne 6 fois (resp. ~ 3 fois) plus importantes que celles de 2005. Les secteurs d'activités les plus impactés par les différences sur les données de consommations entre 2005 et 2030 sont les centrales thermiques, le trafic et le domestique. En effet, les valeurs prévues en 2030 sont 7,6 fois plus importantes que celles de 2005 dans les centrales thermiques, 3,9 fois pour le trafic et 3,1 fois dans le secteur domestique. Dans les industries, les consommations 2030 sont en moyenne 1,2 fois plus importantes qu'en 2005. En somme, il s'agit majoritairement des combustibles fossiles des secteurs « centrales thermiques » et « domestiques » qui sont à l'origine des écarts entre les années 2005 et 2030. La figure 4.1 représente la distribution spatiale des données de consommations en combustibles fossiles et biofuels en Afrique, en 2005 et 2030, selon les deux scénarios REF et CCC.

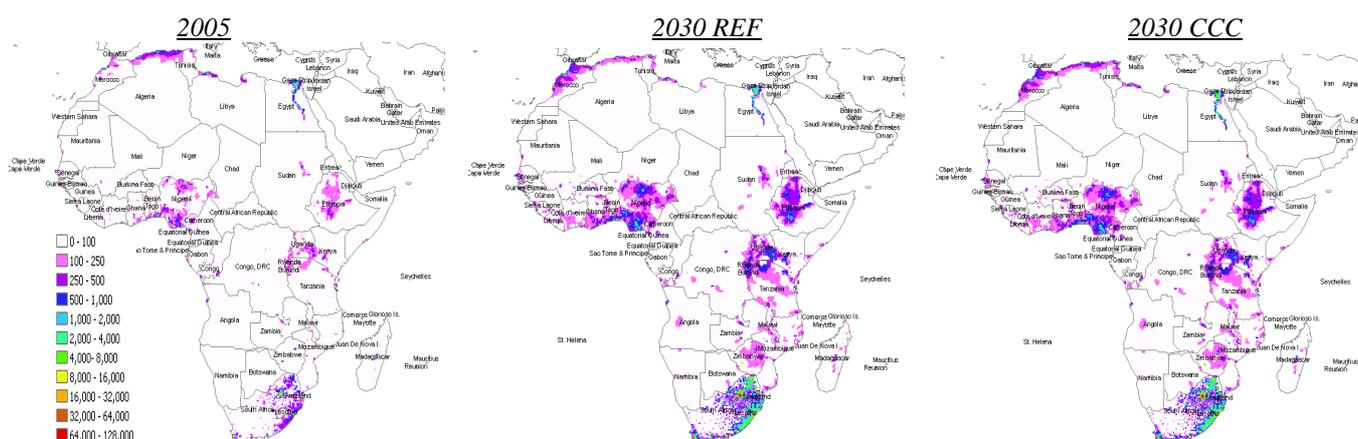


Fig. 4.1 : Consommations en combustibles fossiles et biofuels (en Gg) en Afrique en 2005 (à gauche) et en 2030, selon les scénarios REF (au centre) et CCC (à droite).

Sur la figure 4.1, on observe que les consommations se sont accrues en 2030 par rapport à 2005 près du Golfe de Guinée, en Afrique de l'Est et en Afrique du Sud comme on l'a vu également dans le tableau 4.3. L'analyse entre les données 2005 et celles de 2030 montre que les données de consommations baissent en 2030 (REF et CCC) dans 3 pays : Gabon (-56%), Algérie (-19%) et Libye (-17%) par rapport à l'année 2005. Les baisses constatées dans ces 3 pays sont dues à des diminutions prises en compte dans les inventaires en 2005 et non en 2030. Il s'agit essentiellement du « crude petroleum » (CR) et du « Natural Gas Liquid » (GL) qui se retrouvent en fortes proportions dans le secteur des industries en 2005 et qui représentent 86%, 66% et 57% de la consommation totale au Gabon, en Algérie et en Libye respectivement. Ces baisses ne sont pas répercutées dans les estimations des émissions de carbone suie et de carbone organique car les facteurs d'émissions s'y rapportant sont nuls. Par contre, dans les 53 autres pays d'Afrique, les données de consommations augmentent entre 2005 et 2030 (REF et CCC), de 46% dans le scénario REF (resp. 91% dans le scénario CCC) en Egypte jusqu'à 600% dans le scénario REF (resp. 604% dans le scénario CCC) en Afrique du Sud. La hausse des consommations en Egypte serait due, on l'a vu, au gaz naturel et au diesel, en moyenne 2,5 fois plus importantes en 2030 qu'en 2005, de même que le bois (+432%). Les fortes différences en Afrique du Sud entre 2005 et 2030 sont essentiellement imputées au diesel et au charbon noir (CL), avec des hausses de près de 88%.

4.4.2. Emissions

4.4.2.1. Carbone suie

Les émissions de carbone suie en 2005 et en 2030 sont présentées dans le tableau 4.4. Comme le montre ce tableau, les émissions de carbone suie en Afrique devraient atteindre 2,6 Tg en 2030 si aucune mesure de réglementation n'était prise (scénario REF), contre 1,9 Tg en tenant de contraintes sur les émissions de carbone (scénario CCC). Ceci se traduit par une baisse relative de près de 26% des émissions de carbone suie dans le scénario CCC par rapport à REF, contrairement à ce que nous avons relevé pour les données de consommations, avec des données du scénario CCC du même ordre de grandeur voire supérieures à celles de REF. De plus, on observe que ce sont les combustibles fossiles qui sont responsables de ces écarts entre les deux scénarios (REF et CCC). En effet, les émissions de carbone suie des combustibles fossiles sont estimées à 1,16 Tg (scénario REF) contre 0,56 Tg (scénario CCC) (52%), tandis qu'avec les biofuels l'écart est de l'ordre de 6% (1,46 Tg dans REF contre 1,37 Tg dans

CCC). On retrouve ainsi en proportions plus faibles dans CCC, les émissions dues au diesel (58%), au charbon noir (43%) et à l'essence (36%). Par ailleurs, quel que soit le secteur d'activité, les émissions de carbone suie du scénario CCC sont inférieures à celles du scénario REF. Dans le secteur trafic, les émissions de carbone suie en 2030 passent de 0,76 Tg dans le scénario REF à 0,35 Tg dans le scénario CCC (54%). Au niveau du secteur domestique, la différence est moins marquée, avec 1,43 Tg dans le scénario REF et 1,28 Tg dans le scénario CCC (10%). Pour les industries, les émissions de carbone suie diminuent de 21% entre les scénarios REF (0,28 Tg) et CCC (0,22 Tg), tandis que dans les centrales thermiques, les émissions ont été diminuées de 50% entre le scénario REF (0,14 Tg) et le scénario CCC (0,07 Tg). Ces proportions de variations obtenues dans chaque secteur d'activité pour le carbone suie sont différentes de celles obtenues avec les données de consommations. Pour rappel, les proportions étaient inférieures à 1% dans les secteurs trafic, domestique et centrales thermiques. La plus forte proportion était due aux industries avec 27%. Les différences entre les émissions de carbone suie des deux scénarios REF et CCC s'expliquent donc par des facteurs d'émissions plus faibles dans le scénario CCC que dans le scénario REF (cf. paragraphe 4.2 sur les facteurs d'émissions), en particulier dans les secteurs trafic, domestique et centrales thermiques. Comme pour les consommations, une étude régionale des émissions de carbone suie et ses tendances entre 2005 et 2030 (REF et CCC) est présentée dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Récapitulatif des émissions régionales de carbone suie en 2005 et en 2030, selon les scénarios REF et CCC.

Zone géographique	2005 (Tg)	2030 (Tg)		Evolution relative par rapport à 2005 (%)	
	Nouvel inventaire	REF	CCC	REF	CCC
Afrique de l'Est	0,16	0,54	0,45	226	173
Afrique Centrale	0,05	0,18	0,15	228	180
Afrique du Nord	0,13	0,40	0,26	205	97
Afrique Australe	0,15	0,76	0,51	418	244
Afrique de l'Ouest	0,19	0,73	0,56	282	190
TOTAL	0,69	2,61	1,93	278	180

L'analyse régionale des émissions de carbone suie dans le tableau 4.4 montre que les différences entre les scénarios REF et CCC sont faibles en Afrique Centrale et en Afrique de l'Est (15%), plus importantes en Afrique de l'Ouest (24%), en Afrique Australe (34%) et en Afrique du Nord (36%). Les plus fortes différences sont observées en Afrique du Nord et en Afrique Australe, ces deux régions étant composées « majoritairement » des pays semi

développés. Ainsi, les facteurs d'émissions pour ces pays dans le scénario CCC sont ceux des pays développés, entraînant une importante baisse des émissions CCC par rapport à REF. Au niveau des pays, on constate également que tous les pays ont des émissions de carbone suie dans le scénario CCC moins importantes que dans le scénario REF, comme on l'a vu au niveau des régions. Les différences relatives varient entre 48% en Egypte et 9% au Maroc. Parmi les pays les plus impactés, on retrouve le Sénégal (44%), la Libye (44%) et l'Afrique du Sud (40%) et parmi les moins impactés, la Somalie (10%), le Tchad (12%) et le Gabon (12%).

Le tableau 4.4 présente également les évolutions d'émissions de carbone suie entre les années 2005 et 2030 (REF et CCC). Les émissions de carbone suie en 2030 dans le scénario REF (resp. CCC) sont 3,8 fois (resp. 2,8 fois) plus importantes que celles en 2005. Soulignons que c'est en Afrique Australe que les émissions de carbone suie augmentent le plus entre 2005 et 2030, avec un ratio de 5,2 pour le scénario REF. Viennent ensuite l'Afrique de l'Ouest avec un ratio de 3,8 de 2005 à 2030 REF, l'Afrique de l'Est et l'Afrique Centrale (3,3 de 2005 à 2030 REF). Enfin, on retrouve l'Afrique du Nord avec des émissions en 2030 REF 3 fois supérieures à celles de 2005. En rapprochant ces chiffres obtenus avec le carbone suie de ceux des consommations, on réalise que les différences les plus faibles entre les années 2005 et 2030 sont relevées en Afrique du Nord (cf. tableaux 4.3 et 4.4) à cause de la présence de 4 pays semi développés sur les 8 qui composent cette région. L'augmentation des émissions de carbone suie en 2030 (REF et même CCC) par rapport à 2005 est le fait des combustibles fossiles, environ 6 fois plus importants en 2030 (REF) qu'en 2005. Les biofuels sont également en augmentation en 2030, mais en proportions moindres (x3). Les combustibles fossiles responsables de cette forte augmentation sont le charbon noir (+732%), le diesel (437%), l'essence (341%) et l'essence pour les deux roues (325%). Nous allons à présent rechercher les secteurs d'activités les plus impactés. Au niveau de ces secteurs, c'est celui des centrales thermiques (avec le charbon noir) qui présente la plus forte évolution. Ainsi, les émissions de carbone suie dans ce secteur en 2030 (REF) sont 7,8 fois plus importantes que celles de 2005. Il est suivi du secteur trafic (5,0) (avec le diesel, l'essence et l'essence pour les deux roues), des industries (3,4) et du domestique (3,3). La figure 4.2 illustre les émissions de carbone suie spatialisées en Afrique pour 2005 et pour 2030, selon les deux scénarios REF et CCC.

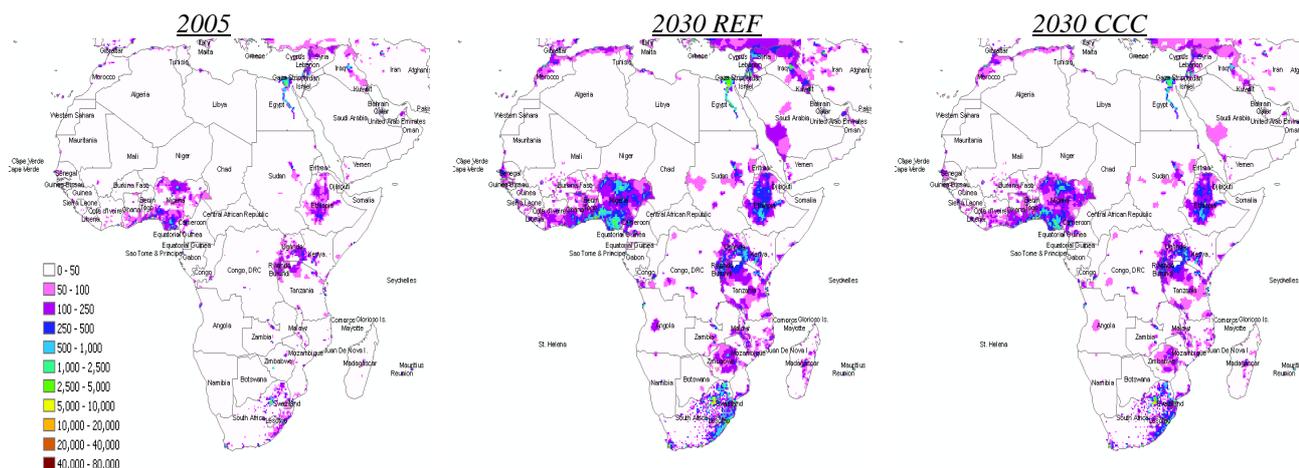


Fig. 4.2 : Emissions (en tonnes) de carbone suie en Afrique, en 2005 (à gauche) et en 2030, selon les scénarios REF (au centre) et CCC (à droite).

Comme pour les consommations, les émissions de carbone suie augmentent dans les pays qui bordent le Golfe de Guinée, en Afrique de l'Est et en Afrique du Sud. Cependant, une analyse quantitative montre que tous les pays d'Afrique ont des émissions en carbone suie qui augmentent entre 2005 et 2030 (REF et CCC). Ce constat est quelque peu différent de celui sur les données de consommations où 3 pays (Gabon, Algérie et Libye) connaissent une baisse par rapport à l'année 2005 et les 53 autres pays une hausse. Du point de vue des évolutions relatives, on relève des hausses comprises entre 133% (resp. 30%) en Libye et 560% (resp. 295%) en Afrique du Sud dans le scénario REF (resp. CCC) par suite, de la forte consommation de charbon noir des secteurs domestique, industrie et centrales thermiques et du diesel du trafic, du domestique et des industries. Le diesel fait partie des combustibles responsable de l'augmentation des émissions de carbone suie entre 2005 et 2030 dans la majorité des pays d'Afrique.

4.4.2.2. Carbone organique primaire

Les émissions de carbone organique primaire sont estimées pour 2030 à 13,1 Tg dans le scénario de référence (i.e. REF) contre 12,2 Tg dans le scénario CCC, plus contraignant (-7% du scénario CCC par rapport à REF). Notons que cette diminution de 7% est plus faible que celle portant sur le carbone suie (26%). Ceci serait lié aux réductions plus importantes entre les deux scénarios sur les facteurs d'émissions de carbone suie que ceux du carbone organique. On note que le rapport BC/OC est de 0,20 dans le scénario REF contre 0,16 dans le scénario CCC. La qualité de l'aérosol de combustion est donc également modifiée entre les

différents scénarios 2030 CCC et 2030 REF. Ceci aura un impact non négligeable sur les propriétés de l'aérosol.

Ce sont les combustibles fossiles qui sont responsables des écarts entre les deux scénarios (REF et CCC). En effet, les émissions de carbone organique primaire par les combustibles fossiles sont estimées à 1,75 Tg (scénario REF) contre 1,09 Tg (scénario CCC) (38%), tandis qu'avec les biofuels, on a 11,33 Tg dans REF contre 11,06 Tg dans CCC (2%). Ainsi, les combustibles fossiles responsables de ces écarts sont le diesel (à 58%), le charbon noir (44%) et l'essence (39%). Notons également que le bois (un biofuel) connaît une baisse de 15%. Ce constat est le même que celui relevé pour le carbone suie, avec approximativement les mêmes tendances. Au niveau des secteurs d'activités concernés par les différences entre les deux scénarios (REF et CCC), tous les secteurs d'activités sont impactés. La différence la plus faible entre les deux scénarios se situe dans le secteur industriel où les émissions sont de 1,97 Tg dans le scénario REF contre 1,90 Tg dans le scénario CCC (~3%). On trouve ensuite le secteur domestique avec une baisse d'environ 4%, soit 9,77 Tg dans le scénario REF contre 9,39 Tg dans le scénario CCC. Au niveau du trafic, les émissions de carbone organique primaire sont de 0,84 Tg dans le scénario REF contre 0,59 Tg dans le scénario CCC (29%). Les centrales thermiques représentent le secteur qui présente la plus forte baisse avec 49% (0,52 Tg dans REF vs. 0,27 Tg dans CCC). Comme on l'a vu plus haut, on observe des différences moins grandes qu'avec le carbone suie. Ce constat met en exergue le fait que les écarts entre facteurs d'émissions dans le scénario CCC et dans le scénario REF sont plus faibles pour le carbone organique que pour le carbone suie. Par la suite, une étude régionale des émissions de carbone organique primaire et ses tendances entre 2005 et 2030 est présentée dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Récapitulatif des émissions régionales de carbone organique primaire en 2005 et en 2030, selon les scénarios REF et CCC.

Zone géographique	2005 (Tg)	2030 (Tg)		Evolution relative par rapport à 2005 (%)	
	Nouvel inventaire	REF	CCC	REF	CCC
Afrique de l'Est	1,06	3,21	3,08	202	189
Afrique Centrale	0,39	1,19	1,15	203	194
Afrique du Nord	0,37	1,30	1,18	249	218
Afrique Australe	0,75	2,90	2,40	284	218
Afrique de l'Ouest	1,44	4,49	4,35	213	203
TOTAL	4,02	13,09	12,15	226	203

L'analyse région par région des émissions de carbone organique primaire dans le tableau 4.5 montre que les différences entre les scénarios REF et CCC sont faibles dans toutes les régions d'Afrique (< 10%) sauf en Afrique Australe (17%), cette région étant dominée par l'Afrique du Sud, pays semi développé comme on le verra par la suite. Ainsi, les facteurs d'émissions relatifs à ce pays dans le scénario CCC sont ceux des pays développés, entraînant un important écart entre les émissions (CCC par rapport à REF). Les baisses observées pour les émissions de carbone organique primaire dans chaque région l'ont été également pour le carbone suie mais pas pour les données de consommations (on avait sensiblement les mêmes valeurs dans les deux scénarios pour 2030). Tous les pays d'Afrique sans exception présentent des émissions qui diminuent en 2030 dans le scénario CCC comparativement au scénario REF, ce qui était déjà le cas pour le carbone suie. Les différences relatives varient entre 3% au Bénin et 29% en Afrique du Sud. Parmi les pays qui montrent de grands écarts entre les émissions de carbone organique primaire dans les deux scénarios, on peut mentionner la Libye (28%), l'Egypte (20%) et la Namibie (14%). Dans la liste des pays qui ont de faibles écarts sur leurs émissions entre les scénarios REF et CCC, on trouve le Maroc (4%), le Mali (6%) ainsi que le Burkina Faso (6%).

Par ailleurs, l'évolution des émissions de carbone organique primaire entre les années 2005 et 2030 (REF et CCC) sont présentées dans le tableau 4.5. On constate que les émissions en 2030 dans les scénarios REF et CCC sont en moyenne 3 fois plus fortes que celles de 2005. La tendance entre les années 2005 et 2030 montre que les émissions de carbone organique primaire dues aux biofuels sont en moyenne 3 fois plus importantes en 2030 (CCC et REF). Pour les combustibles fossiles, les émissions de carbone organique primaire en 2030 dans le scénario CCC (resp. REF) sont respectivement 4 (resp. 6) fois plus importantes que celles en 2005. Les combustibles fossiles responsables de ces différences sont le charbon noir (732% REF/2005), le diesel (436% REF/2005), l'essence (341% REF/2005) et le carburant pour véhicules à deux roues (325% REF/2005). Que ce soit pour le carbone suie ou le carbone organique primaire, ce sont les mêmes régions qui sont les plus touchées par les évolutions entre 2005 et 2030 : l'Afrique Australe (284% REF/2005) et l'Afrique du Nord (249% REF/2005). Ce sont les facteurs d'émissions des pays semi-développés de ces régions par leurs plus faibles valeurs qui sont à l'origine de ces écarts. Les émissions de carbone organique ont été spatialisées pour les années 2005 et 2030 (REF et CCC) sur la figure 4.3.

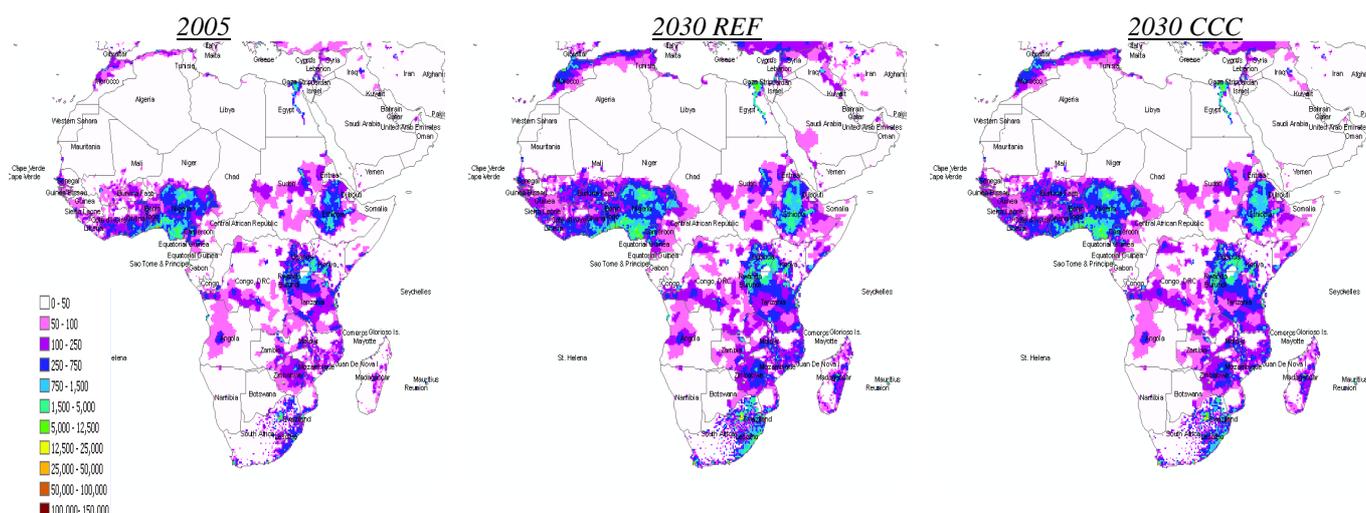


Fig. 4.3 : Emissions (*en tonnes*) de carbone organique primaire en Afrique en 2005 (à gauche) et en 2030, dans les scénarios REF (au centre) et CCC (à droite).

Comme c'était déjà le cas pour les consommations et les émissions de carbone suie, les émissions de carbone organique primaire augmentent entre les années 2005 et 2030 (REF et CCC) dans les pays qui bordent le Golfe de Guinée, en Afrique de l'Est, en Afrique du Nord et en Afrique du Sud. Cependant, une analyse quantitative fait apparaître que les émissions de carbone organique primaire dans tous les pays d'Afrique augmentent entre 2005 et 2030 (REF et CCC). A titre d'exemple dans le contexte des fortes évolutions, on citera des évolutions relatives de 397% (REF/2005) en Afrique du Sud dues essentiellement au diesel et au charbon comme c'est le cas avec le carbone suie. On également évoquer l'exemple du Burkina Faso qui a une augmentation de ces émissions de carbone organique en 2030 REF/2005 de +225%. Le diesel des secteurs du trafic et des industries est responsable de cette hausse. Il en est de même pour l'essence (trafic, domestique et industrie) et l'essence pour les véhicules à deux roues dans le secteur du trafic.

4.5. Etude de sensibilité des émissions en 2030

A l'issue du descriptif des inventaires 2030 REF et 2030 CCC pour le carbone suie et le carbone organique primaire, nous avons développé d'autres scénarios plausibles qui pourraient avoir un impact significatif sur le climat et la qualité de l'air. Ainsi, cette étude de sensibilité a porté dans un premier temps sur la prise en compte d'une mesure de réglementation portant sur le type de véhicules deux roues en circulation en Afrique de

l'Ouest. Dans un second temps, nous avons calculé de nouvelles émissions pour 2030 en Afrique du Sud en considérant cette fois, dans l'estimations des données de consommations, l'Afrique du Sud comme un pays semi développé et non classé dans le groupe de l'Afrique Sub-Saharienne comme le suggère le modèle POLES. Enfin, nous avons testé de nouveaux facteurs d'émissions pour les déchets animaux dont les émissions de carbone suie (resp. carbone organique) représentent 27% (resp. 54%) de celles de toutes l'Afrique en 2030 dans le scénario CCC. La prise en compte de ces trois modifications a donné lieu à un nouveau scénario du futur (2030), dénommé CCC*.

4.5.1. Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique des deux roues en Afrique de l'Ouest en 2030.

Pour ce test sur les émissions des véhicules deux roues, nous avons émis une hypothèse de travail qui suppose qu'en 2030, tous les véhicules deux roues en circulation auraient des moteurs quatre temps en Afrique de l'Ouest (les 16 pays de notre étude – cf. chapitre 2). Notons que nous avons considéré que la majorité des véhicules à deux roues en circulation avaient des moteurs à deux temps en 2005 (cf. chapitres 2 et 3). La 1^{ère} conséquence de cette nouvelle hypothèse pour 2030 apparait dans la modification des consommations des deux roues par la prise en compte d'une nouvelle valeur de la masse volumique du mélange essence-huile. En effet, les moteurs 4 temps ont un système distinct de lubrification, donc il n'est plus pertinent d'introduire un mélange essence-huile relativement à la combustion dans ces moteurs. La 2^{ème} conséquence porte sur les facteurs d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire de ces véhicules à deux roues, considérés plus faibles pour les moteurs à 4 temps que pour les 2 temps (tableau 4.6). Ainsi, les valeurs des facteurs d'émissions des deux roues à 2 temps sont 4 fois (resp. 8 fois) plus importants que ceux des moteurs à 4 temps pour le carbone suie (resp. le carbone organique primaire) dans les pays semi développés et en voie de développement.

Tableau 4.6 : Facteurs d'émissions des véhicules à deux roues à moteur 2 temps et à moteur 4 temps (Guinot et al., 2010 ; Junker and Liousse, 2008 ; Guillaume et al., 2007).

	EF (BC)		EF (OCp)	
	2 temps	4 temps	2 temps	4 temps
Pays en voie de développement	2,31	0,57	30,56	3,8
Pays semi-développés	2,31	0,57	30,56	3,8
Pays développés	0,28	0,57	7,36	3,8

Il ressort également de ces choix de facteurs d'émissions que les valeurs sont identiques pour les moteurs 4 temps, quel que soit le niveau de développement. De plus avec les moteurs 4 temps, on note que le rapport BC/OC en pays semi développés et en voie de développement a nettement été augmenté (de 0,08 à 0,15), traduisant ainsi une augmentation du pouvoir absorbant de l'aérosol de combustion, et une augmentation relative des espèces organiques provenant de la combustion incomplète.

* Résultats

Dans ce test de sensibilité, compte tenu du fait qu'il existe deux scénarios pour 2030 (2030 REF et 2030 CCC), nous devrions avoir deux nouveaux scénarios : 2030 REF* et 2030 CCC*. Nous ne présenterons ici que la comparaison entre émissions des scénarios 2030 CCC et 2030 CCC*. Le tableau 4.7 présente les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire en 2030 pour les engins deux temps (CCC) et quatre temps (CCC*).

Tableau 4.7 : Emissions (*en tonnes*) de carbone suie et de carbone organique primaire en 2030 pour les deux roues deux temps (scénario CCC) et quatre temps (scénario CCC*).

Pays	Emissions (en tonnes)			
	Carbone suie		Carbone organique primaire	
	CCC	CCC*	CCC	CCC*
Sénégal	773,50	188,28	10233,03	1255,21
Bénin	3741,12	910,64	49492,88	6070,90
Ghana	672,15	163,61	8892,15	1090,72
Guinée Bissau	53,60	13,05	709,15	86,98
Niger	37,00	9,01	489,48	60,04
Nigéria	15099,31	3675,36	199755,37	24502,38
Cameroun	454,19	110,55	6008,64	737,02
Mali	1059,19	257,82	14012,49	1718,81
Burkina Faso	1222,14	297,49	16168,27	1983,23
Côte d'Ivoire	2343,39	570,41	31001,77	3802,74
Togo	978,45	238,17	12944,28	1587,77
Guinée	103,26	25,13	1366,08	167,56
Libéria	65,51	15,95	866,60	106,30
Gambie	58,00	14,12	767,35	94,12
Tchad	169,13	41,17	2237,49	274,46
Sierra Léone	74,57	18,15	986,50	121,00
TOTAL	26904,51	6548,89	355931,54	43659,27

On note une baisse relative des émissions par les engins à deux roues (des moteurs 2 temps aux moteurs 4 temps) qui se chiffre à 76% pour le carbone suie et à 88% pour le carbone organique primaire, essentiellement due aux facteurs d'émissions. Rappelons que les émissions sont de 1,93 Tg pour le carbone suie et 12,15 Tg pour le carbone organique primaire dans le scénario CCC à l'échelle de toute l'Afrique. On constate ainsi que les émissions en carbone suie par les moteurs 2 temps représentent 1,4% du total des émissions, contre 2,9% pour le carbone organique primaire. En considérant à présent les moteurs 4 temps, ces émissions de carbone suie ne représentent que 0,3% du total des émissions en Afrique et 0,4% pour le carbone organique primaire. Les moteurs 4 temps permettent ainsi d'éliminer quasiment la pollution due aux engins à deux roues en Afrique.

4.5.2. Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire en Afrique du Sud : nouvelle projection 2030

On a vu au chapitre 4 que les projections futures des consommations de combustibles fossiles et de biofuels ne se sont pas faites en considérant l'Afrique du Sud en tant que pays semi-développé. En effet, dans le modèle POLES, l'Afrique du Sud est classée dans le groupe des pays de l'Afrique Sub-Saharienne, composé de pays en voie de développement. Dans notre algorithme par contre, les facteurs d'émissions choisis pour l'Afrique du Sud sont typiques d'un pays semi développé. La non concordance entre le niveau de développement considéré pour l'Afrique du Sud par POLES et les facteurs d'émissions explique le fait que nous avons décidé d'effectuer un test de sensibilité sur les conséquences de cette hypothèse du modèle POLES. Pour ce faire, nous avons appliqué le ratio des consommations 2005 sur 2030 CCC et 2005 sur 2030 REF d'un autre pays semi-développé afin d'obtenir de nouvelles données de consommation en Afrique du Sud. Nous avons testé les valeurs de deux pays semi-développés : un pays d'Amérique latine (Brésil) et un pays d'Europe de l'Est (Pologne). Ces nouveaux scénarios 2030 seront dénommés REF* et CCC*. Il est à noter que l'Afrique du Sud et la Pologne ont à peu près la même population (46,9 millions d'habitants en Afrique du Sud contre 38,2 millions d'habitants en Pologne en 2005) tandis qu'elle est bien plus élevée au Brésil (186,1 millions) (World Bank, 2005). Comme précédemment, les facteurs d'émissions choisis pour l'Afrique du Sud dans les scénarios 2005 et 2030 REF sont ceux des pays semi développés, et dans le scénario 2030 CCC, nous prenons les facteurs d'émissions des pays développés pour tenir compte des contraintes sur les émissions.

4.5.2.1. Consommations

Au niveau des consommations dans le nouveau scénario de référence (REF*), le total obtenu pour l'Afrique du Sud est de 1,22 Tg et de 0,78 Tg, sur la base des ratios du Brésil et de la Pologne respectivement. Ces valeurs sont moins fortes que la valeur de référence obtenue avec le ratio de l'Afrique Sub-Saharienne (SSA) (2,20 Tg), ce qui équivaut à des baisses relatives de 44% avec le coefficient du Brésil et de 65% avec celui de la Pologne. Par ailleurs, dans le nouveau scénario CCC*, les valeurs de consommation pour l'Afrique du Sud sont de 0,76 Tg (soit -66%) via le Brésil, de 0,79 Tg (soit -64%) via la Pologne contre 2,21 Tg initialement. On constate qu'il y a bien une diminution des consommations quelque soit le ratio du pays semi développé utilisé (Brésil ou Pologne) et le scénario (REF* ou CCC*). Les impacts sont importants dans le scénario REF*, et plus importants encore avec le ratio de la Pologne, ce qui traduit le fait qu'on attend moins de consommation en Pologne qu'au Brésil. Dans le scénario CCC*, les baisses constatées avec les deux pays sont quasi identiques. Cela s'explique par le fait que dans POLES, ces deux pays doivent avoir les mêmes coefficients d'abattement selon le protocole de Kyoto.

4.5.2.2. Emissions

Les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire sont présentées uniquement pour le scénario CCC. Le choix du scénario CCC plutôt que le scénario REF est basé sur le fait, qu'à priori, l'impact sur les émissions devrait être plus important dans le scénario CCC. Pour simplifier la lecture, nous utiliserons les termes Afrique Sub-Saharienne, Brésil et Pologne pour désigner les ratios utilisés pour ces « pays ».

a) Carbone suie

Le total des émissions de carbone suie en 2030 CCC en Afrique du Sud serait de 0,27 Tg avec le ratio de l'Afrique Sub-Saharienne (CCC), de 0,17 Tg avec le ratio du Brésil et 0,11 Tg avec le ratio de la Pologne (CCC*). Ceci représente des baisses relatives par rapport au scénario CCC, de 35% avec le coefficient du Brésil et de 59% avec celui de la Pologne. L'analyse par groupes de combustibles montre qu'avec le ratio de l'Afrique Sub-Saharienne, nous obtenons 0,04 Tg pour les biofuels et 0,23 Tg pour les combustibles fossiles. En se basant sur le Brésil (CCC*), les émissions de carbone suie dues aux biofuels sont de 1,00 Tg (+184% par rapport à CCC) et celles des combustibles fossiles de 0,07 Tg (-69% par rapport à CCC). Par contre

avec la Pologne, le constat est différent. Les émissions de carbone suie dues aux biofuels sont évaluées à 0,03 Tg (-18%) contre 0,08 Tg (-65%) pour les combustibles fossiles. Pour mieux comprendre et expliquer les constats ci-dessus, nous avons procédé à une analyse sectorielle et par combustible. Au niveau des biofuels, ce sont les émissions de bois et des déchets animaux des secteurs domestique et industriel qui sont plus fortes avec le ratio du Brésil qu'avec le ratio de la Pologne et de l'Afrique Sub-Saharienne : +183% avec le Brésil et -18% avec la Pologne par rapport aux valeurs de l'Afrique Sub-Saharienne. Par contre, au niveau des combustibles fossiles, la baisse avec la Pologne et le Brésil intervient sur le charbon noir (-67% et -76% respectivement) dans les secteurs domestiques, industriels et les centrales thermiques et sur le diesel (-67% et -55% respectivement dans le trafic, le domestique et les industries). L'analyse sectorielle, effectuée à présent, confirme ces premiers résultats en précisant les secteurs les plus impactés par ces nouvelles projections en Afrique du Sud. La figure 4.4 montre ainsi les émissions de carbone suie en Afrique du Sud en 2030 dans le scénario CCC, sur la base des projections de l'Afrique Sub-Saharienne, du Brésil et de la Pologne.

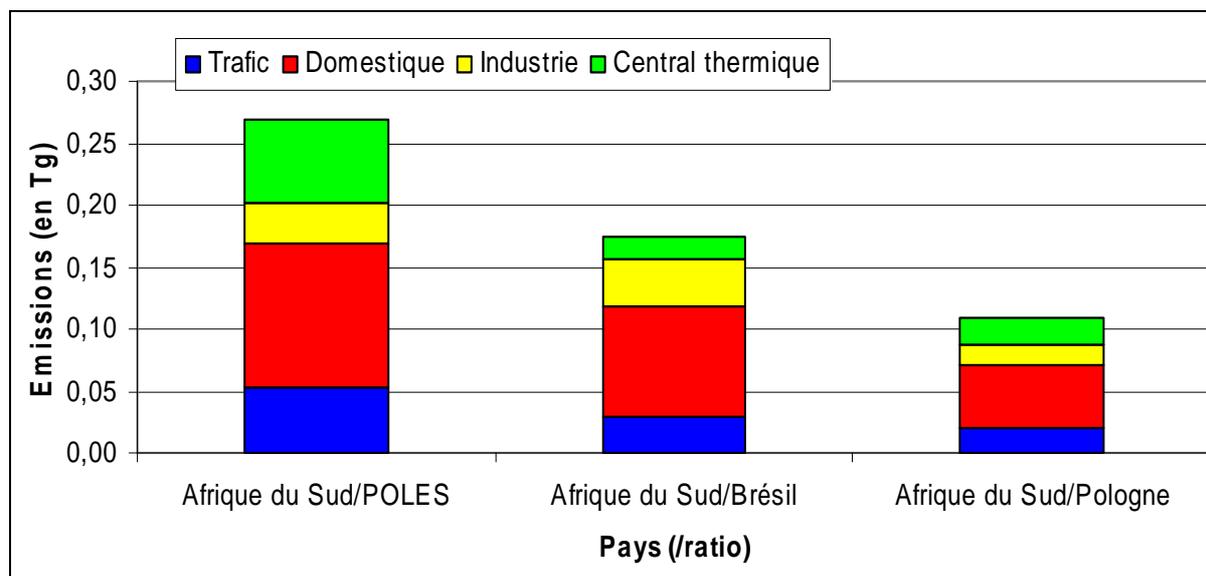


Fig. 4.4 : Emissions de carbone suie en Afrique du Sud en 2030, dans le scénario CCC avec les projections de l'Afrique Sub-Saharienne, du Brésil et de la Pologne.

Globalement, les émissions de carbone suie baissent dans tous les secteurs d'activités, que ce soit avec les ratios du Brésil ou ceux de la Pologne excepté le secteur industriel avec le Brésil (+19%). Les baisses constatées avec le ratio du Brésil sont comprises entre 25% dans le secteur domestique et 73% pour les centrales thermiques. Pour la Pologne, les baisses sont du

même ordre de grandeur d'un secteur d'activité à un autre : de 57% dans le domestique à 66% pour les centrales thermiques (avec une baisse de 67% avec le charbon noir). La hausse des émissions de carbone suie constatée dans le secteur industriel (+19%) avec le ratio du Brésil s'explique par le fait que malgré les efforts de réductions des émissions dans tous les secteurs d'activités, le Brésil (pays semi-développé) aura des développements industriels croissants pour faire face à une demande, elle aussi croissante (population en augmentation).

b) Carbone organique primaire

Les émissions de carbone organique primaire en 2030 en Afrique du Sud sont évaluées à 0,81 Tg dans le scénario CCC, 1,03 Tg avec le ratio du Brésil (+28% avec CCC*/CCC) et 0,43 Tg avec celui de la Pologne (-47% avec CCC*/CCC). Cela montre que les préconisations du protocole de Kyoto seraient plus efficaces sur le bilan énergétique en Pologne qu'au Brésil. Ce constat est le même avec les données de consommations et le carbone suie. Les émissions de carbone organique primaire par les biofuels en Afrique du Sud sont de 0,32 Tg, avec une augmentation avec le ratio du Brésil (0,90 Tg soit +183%) et à diminuer avec le ratio de la Pologne (0,26 Tg soit -18%). Les biofuels en cause sont le bois et les déchets animaux (les mêmes qu'avec le carbone suie) des secteurs domestique, industriel et des centrales thermiques : son évolution entre les scénarios CCC et CCC* est de +183% avec le Brésil et -18% avec la Pologne. Par contre, pour les combustibles fossiles, la tendance est à la baisse avec les ratios des deux pays (Brésil et Pologne). Ainsi, les émissions par les combustibles fossiles de 0,49 Tg en Afrique du Sud passent à 0,13 Tg avec le Brésil (-73%) et à 0,17 Tg avec la Pologne (-66%). Les combustibles fossiles, à savoir le diesel et le charbon noir, baissent respectivement de 55% et 76% en considérant le ratio du Brésil et de 67% avec celui de la Pologne, à rapprocher à la hausse avec le kérosène (+34%) dans le secteur des industries en Pologne. La tendance sur les données de biofuels et de combustibles fossiles avec les ratios du Brésil et de la Pologne pour le carbone organique primaire est la même que celle obtenue pour le carbone suie.

Par ailleurs, une analyse par secteur d'activité a été menée. La figure 4.5 montre les émissions de carbone organique primaire en Afrique du Sud en 2030 dans le scénario CCC sur la base des projections de l'Afrique Sub-Saharienne, du Brésil et de la Pologne.

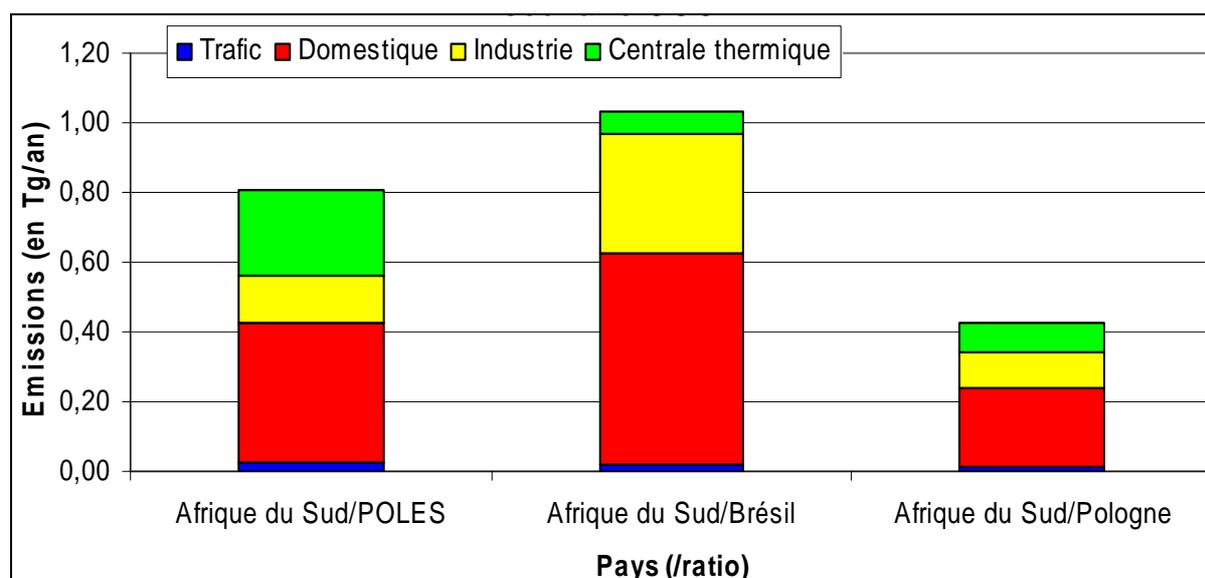


Fig. 4.5 : Emissions de carbone organique primaire en Afrique du Sud en 2030 dans le scénario CCC, avec les projections de l'Afrique Sub-Saharienne, du Brésil et de la Pologne.

Le constat général est celui d'une réduction des émissions de carbone organique primaire dans tous les secteurs d'activités via les ratios de la Pologne et du Brésil, excepté les secteurs industriel (+148%) et domestique (+54%) avec le ratio du Brésil (figure 4.6). La hausse constatée dans les secteurs industriel et domestique avec le ratio du Brésil est essentiellement due aux émissions de bois et de déchets animaux dans le scénario CCC*.

4.5.3. Test sur les émissions de carbone suie et de carbone organique des déchets animaux en Afrique de l'Ouest en 2030.

Ce test de sensibilité a été motivé par les émissions importantes dues aux déchets animaux surtout de carbone organique. Pour rappel, les émissions de carbone suie par les déchets animaux représentent 27% des émissions en Afrique en 2030 (CCC) tandis que celles du carbone organique primaire représentent 54%. Ces fortes émissions sont essentiellement dues aux fortes valeurs assignées aux facteurs d'émissions des déchets animaux (1 g/kg pour BC et 12,5 g/kg pour OCp pour les secteurs domestique et industriel quelque soit le niveau de développement du pays considéré, cf. Annexe 3). Ainsi, nous avons fait l'hypothèse d'une utilisation plus importante des déchets végétaux en lieu et place des déchets animaux dont les facteurs d'émissions sont nettement plus faibles que ces derniers et égaux à ceux du bois (cf.

Annexe 3). Les résultats obtenus à l'issue de ce test de sensibilité sont consignés dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Emissions de carbone suie et de carbone organique primaire par les déchets animaux et les déchets végétaux en Afrique en 2030 CCC.

	FF considéré*	REF	CCC
BC (Tg)	AW	0,52	0,52
	VW	0,44	0,37
OCp (Tg)	AW	6,55	6,55
	VW	1,32	1,11

* AW pour les déchets animaux et VW pour les déchets végétaux

Il ressort de ce tableau 4.8 que les baisses constatées sont conséquentes avec le carbone organique primaire : -83% dans CCC et -80% dans REF en considérant les déchets végétaux en remplacement des déchets animaux.

4.5.4. Conclusion partielle

Cette partie sur les tests de sensibilité a permis de mettre en exergue toute l'importance des mesures de restrictions sur les émissions dues aux engins à deux roues, ainsi que les ratios de projection qui sont utilisés pour la construction des inventaires du futur et le choix des facteurs d'émissions. Ainsi, en nous basant sur le scénario CCC, nous avons donc défini un scénario encore plus contraignant : le scénario CCC*. Ce nouveau scénario (CCC* qui sera testé dans le chapitre 5 suivant qui porte sur la modélisation) tient donc compte des émissions par les véhicules à deux roues et à 4 temps, d'un nouveau rapport de projection des données de consommations pour l'Afrique du Sud basé sur celui de la Pologne et le remplacement dans les combustions des déchets animaux par les déchets végétaux. Le tableau 4.9 résume les valeurs prises en compte lors du calcul des nouvelles émissions de carbone suie et de carbone organique primaire de ce nouveau scénario CCC*.

Tableau 4.9 : Emissions de carbone suie et de carbone organique primaire dans les scénarios CCC et CCC* Afrique en 2030.

	Scénario considéré*	BC (Tg)	OC (Tg)
Afrique (2030)	CCC	1,93	12,15
Véhicules à 2 roues	CCC	0,027	0,356
	CCC*	0,0065	0,044
Afrique du Sud	CCC	0,29	0,81
	CCC*	0,11	0,43
Déchets animaux	CCC	0,52	6,55
	CCC*	0,37	1,11
Afrique (2030)	CCC*	1,58	6,02

4.6. Comparaison de mon nouvel inventaire avec les inventaires de Junker and Liousse (2008) et de l'IPCC (Lamarque et al., 2010)

Nous avons comparé les résultats de notre nouvel inventaire (Liousse et al., 2011) et celui de Junker and Liousse (2008) (mis à jour pour l'année 2005) à ceux des inventaires élaborés pour le prochain exercice IPCC et relatifs aux années 2005 et 2030. A cette fin, nous avons pris en compte 3 scénarios d'émissions de l'IPCC désignés RCP pour «profils représentatifs d'évolution de concentration» : un profil haut ($>8,5 \text{ W/m}^2$), un profil intermédiaire ($\sim 4,5 \text{ W/m}^2$) et le profil bas ($\sim 3 \text{ W/m}^2$ puis déclin). Le tableau 4.10 résume le descriptif des scénarios IPCC liés aux profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) choisis dans notre étude, leurs références, ainsi que les modèles avec lesquels ils ont été obtenus.

Tableau 4.10 : Les scénarios IPCC et leurs références bibliographiques

Scénario	Forçage radiatif	Concentration	Publication - modèle
RCP 8.5	$> 8,5 \text{ W/m}^2$ en 2100	$> \sim 1370$ équiv. $-\text{CO}_2$ en 2100	Riahi et al. (2007) - MESSAGE
RCP 4.5	$\sim 4,5 \text{ W/m}^2$ au niveau de stabilisation après 2100	~ 650 équiv. $-\text{CO}_2$ (au niveau de stabilisation après 2100)	Clarke et al. (2007) - MiniCAM
RCP 3-PD ² (2.6)	Pic à $\sim 3 \text{ W/m}^2$ avant 2100 puis déclin	Pic à ~ 490 équiv. $-\text{CO}_2$ avant 2100 puis déclin	Van Vuuren et al. (2006, 2007) - IMAGE

4.6.1. Résultats

4.6.1.1. Carbone suie

Les émissions de carbone suie ont été évaluées à l'échelle de l'Afrique, mais aussi à l'échelle mondiale pour 2005 et 2030 avec notre inventaire (Liousse et al., 2011), l'inventaire de Junker and Liousse (2008) et IPCC (Lamarque et al., 2010). Notons que pour l'année 2030,

l'inventaire Lioussé et al. (2011) comprend mon inventaire sur l'Afrique et des projections de l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) pour le reste du monde. Le tableau 4.10 résume les valeurs obtenues, ainsi que les évolutions relatives. Les valeurs sont également reportées sur la figure 4.6.

Tableau 4.11 : Emissions de carbone suie (*en téragrammes*) en Afrique et dans le monde pour 2005 et 2030.

	BC (Tg)	2005			2030		
		Afrique	Monde	%	Afrique	Monde	%
Junker and Lioussé (2008)	OLD	0,68	5,36	12,7	/	/	/
Lioussé et al. (2011)	REF	0,69	5,37	12,9	2,61	13,91	18,8
	CCC				1,93	6,95	27,8
	CCC*				1,58	6,60	23,9
Lamarque et al. (2010)	RCP 2,6	0,56	5,59	10,0	0,56	4,41	12,7
	RCP 4,5	0,61	5,52	11,1	0,96	5,37	17,9
	RCP 8,5	0,61	5,21	11,7	0,69	4,30	15,9

Les émissions de carbone suie à l'échelle de l'Afrique entre 2005 et 2030 augmentent avec notre inventaire (Lioussé et al., 2011) et restent quasi-constantes avec l'inventaire IPCC (Lamarque et al., 2010). Il en est de même à l'échelle du globe. Cette tendance observée dans les scénarios IPCC (Lamarque et al., 2010) peut s'expliquer par les fortes contraintes imposées pour atteindre les objectifs radiatifs en W/m^2 fixés par les RCP. Comme l'illustre la figure 4.6, les pentes entre 2005 et 2030 que l'on observe dans Lioussé et al. (2011) sont beaucoup plus fortes que dans l'IPCC. Les émissions de nos inventaires (2030 REF, 2030 CCC et 2030 CCC*) sont par conséquent plus importantes que dans l'IPCC (RCP 2,6, RCP 4,5 et RCP 8,5). Ainsi, les émissions de notre inventaire (Afrique) dans le scénario REF sont en moyenne 3,5 fois plus importantes que celles de l'IPCC (Lamarque et al., 2010), tandis que celles du scénario CCC (resp. CCC*) sont 2,6 fois (resp. 2,1 fois) plus importantes qu'IPCC (Lamarque et al., 2010). Par ailleurs, on note que le scénario RCP 4,5 présente de plus importantes émissions que les scénarios RCP 8,5 suivi du scénario RCP 2,6 et ce, jusqu'en 2030. Cette description est cohérente avec la définition des trois scénarios IPCC. Il ressort également de ce tableau que les émissions en 2005 sont du même ordre de grandeur, quel que soit l'inventaire. De même, les proportions des émissions en Afrique par rapport au reste du monde obtenues avec nos inventaires (~12,8%) ont le même ordre de grandeur que celles des scénarios IPCC (~10,9%). Notons que la proportion des émissions de carbone suie en Afrique

par rapport au globe (dernière colonne tableau 4.11) est bien plus importante en 2030 qu'en 2005.

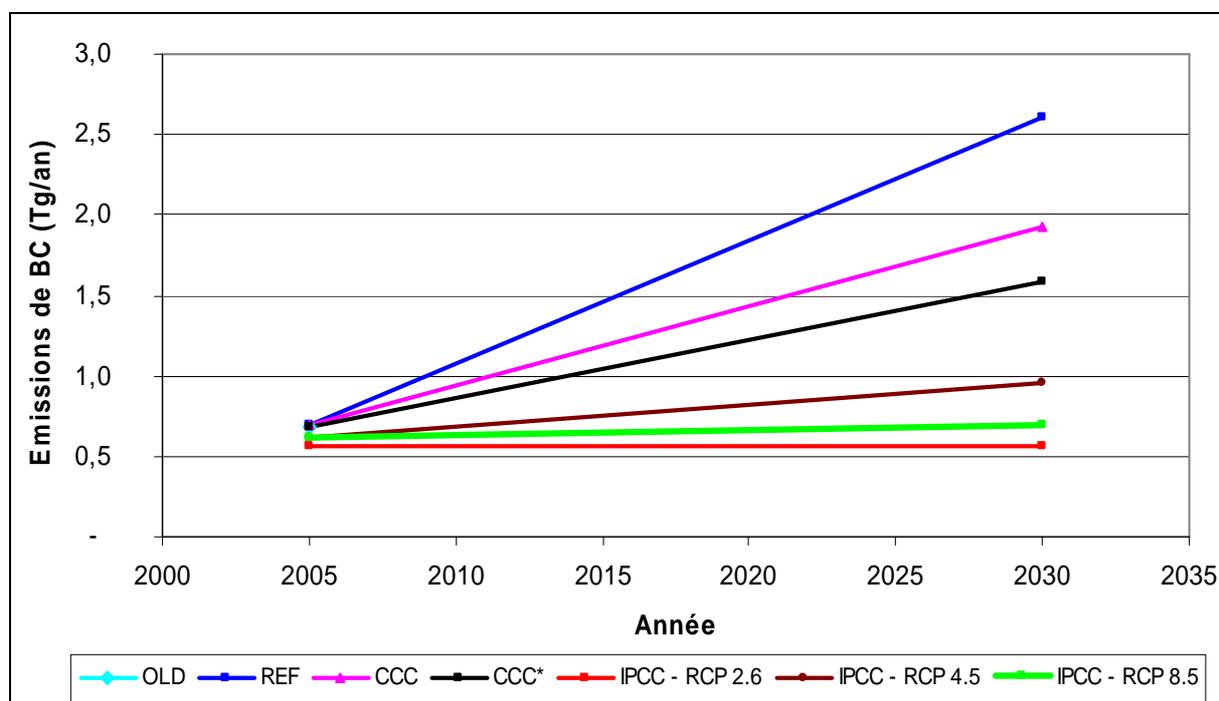


Fig. 4.6 : Evolution des émissions de carbone suie en Afrique entre 2005 et 2030 selon Junker and Liousse (2008) (bleu ciel), Liousse et al. (2011) (bleu foncé, rose et noir) et IPCC (Lamarque et al., 2010) (marron, vert et rouge).

Une analyse scénario par scénario montre que l'écart entre les proportions en Afrique (p/r au monde) est plus conséquent lorsqu'on considère le scénario 2030 CCC de Liousse et al. (2011) (28%). Les émissions à l'échelle globale ont beaucoup diminué (plus de la moitié) tandis qu'au niveau de l'Afrique, la diminution est moindre, d'où hausse de la proportion de l'Afrique. Ce résultat est donc la résultante des forts coefficients d'abattement appliqués aux pays les plus émetteurs de particules selon le protocole de Kyoto, en particulier les pays développés.

4.6.1.2. Carbone organique primaire

Les émissions de carbone organique primaire ont été évaluées à l'échelle de l'Afrique ainsi que dans le monde, pour les années 2005 et 2030 via trois inventaires : notre inventaire

(Lioussé et al., 2011), l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) actualisé pour l'année 2005, et IPCC (Lamarque et al., 2010). Elles sont présentées dans le tableau 4.12 et sur la figure 4.7.

Tableau 4.12 : Emissions de carbone organique primaire (*en téragrammes*) en Afrique et dans le monde, en 2005 et 2030.

	OC (Tg)	2005			2030		
		Afrique	Monde	%	Afrique	Monde	%
Junker and Lioussé (2008)	OLD	1,12	6,90	16,3	/	/	/
Lioussé et al. (2011)	REF	4,02	9,86	40,7	13,09	27,78	47,1
	CCC				12,15	21,02	57,8
	CCC*				6,02	14,89	40,4
Lamarque et al. (2010)	RCP 2,6	2,00	13,82	14,5	2,29	13,49	17,0
	RCP 4,5	2,17	13,76	15,7	3,34	13,22	25,3
	RCP 8,5	2,13	12,82	16,6	2,77	11,04	25,1

Le tableau 4.12 montre que les émissions en Afrique augmentent entre les années 2005 et 2030 avec notre inventaire (Lioussé et al., 2011) et celui de l'IPCC (Lamarque et al., 2010). A l'échelle du monde, les émissions avec l'inventaire Lioussé et al. (2011) augmentent entre les années 2005 et 2030, tandis que celles de l'IPCC (Lamarque et al., 2010) diminuent. Ceci montre que les scénarios IPCC (Lamarque et al., 2010) auraient tendance à réduire fortement les émissions dans les pays industrialisés en 2030, et non pas dans les pays d'Afrique qui ne sont pas concernés par les accords du protocole de Kyoto. Une analyse détaillée en Afrique montre que les émissions en 2005 sont différentes entre les inventaires IPCC (Lamarque et al., 2010) et les autres (Lioussé et al., 2011 ; Junker and Lioussé, 2008) avec un facteur de 1,5 à 2 de différence (tableau 4.12 et figure 4.7). L'importance relative des émissions en carbone organique en Afrique par rapport à celles du monde sont également très différentes entre nos inventaires et ceux de l'IPCC (40% versus 16% - tableau 4.12). Les émissions de carbone organique obtenues avec le scénario CCC* sont en moyenne 2,2 plus importantes que celles des scénarios IPCC. Ce rapport est plus grand avec les scénarios REF et CCC avec 4,7 et 4,3 respectivement mettant en évidence l'impact du scénario CCC* pour le carbone organique. Le choix du facteur d'émission des déchets animaux et des déchets végétaux pour le carbone organique et le carbone suie aura donc un impact important (cf. tableau 4.8).

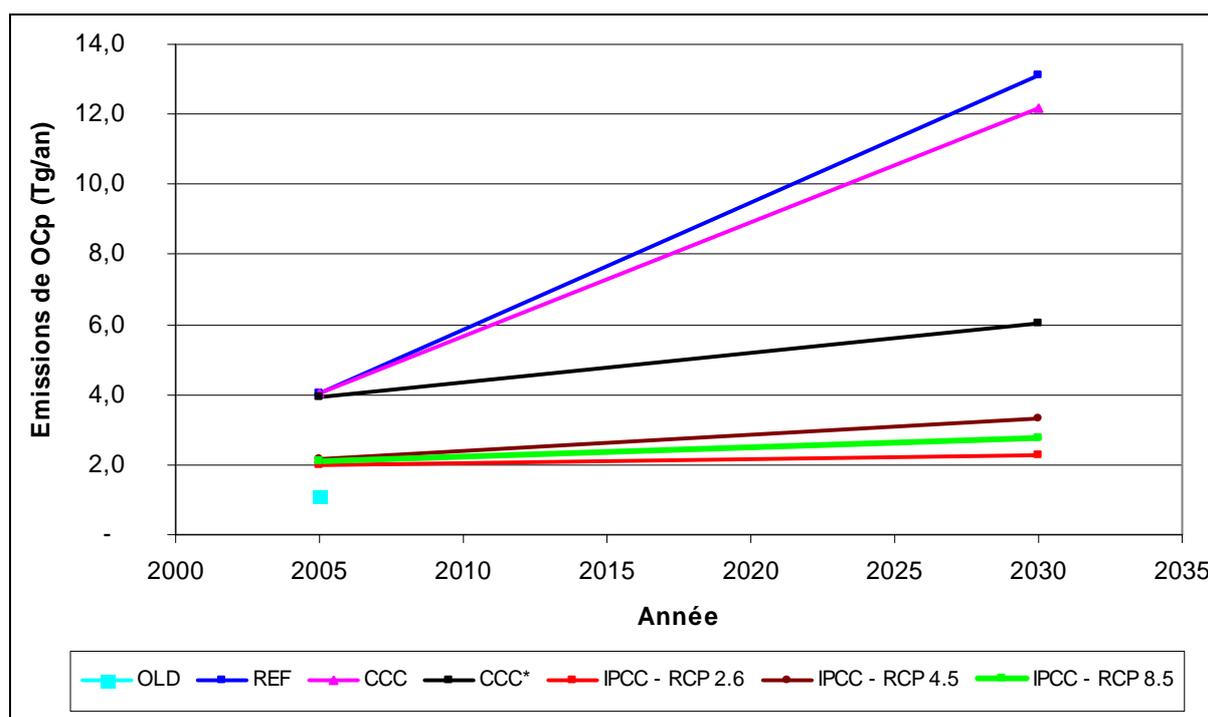


Fig. 4.7 : Evolution des émissions de carbone organique primaire en Afrique entre 2005 et 2030 selon Junker and Lioussé (2008) (bleu ciel), Lioussé et al. (2011) (bleu foncé, rose et noir) et IPCC (Lamarque et al., 2010) (marron, vert et rouge).

Les augmentations relatives entre 2005 et 2030 sont plus faibles dans l'ensemble des inventaires IPCC que dans les scénarios de Lioussé et al. (2011). Notons que l'abattement maximum (CCC*) apporté aux émissions de Lioussé et al. (2011) fournit une tendance d'émissions quasiment similaire au profil proposé dans le scénario RCP 4,5 de l'IPCC (Lamarque et al., 2010). Ce constat était différent de celui établi pour le carbone suie où il n'y avait aucune convergence entre les scénarios IPCC et ceux de Lioussé et al. (2011). En effectuant le même travail de mise à jour des inventaires (données de consommations, facteur d'émissions et projections en 2030) dans tous les pays du monde, les émissions que ce soit pour le carbone suie ou le carbone organique devraient augmenter, réduisant ainsi la proportion des émissions dues à l'Afrique.

4.6.2. Conclusion partielle

La comparaison entre notre inventaire (Lioussé et al., 2011), l'inventaire de Junker and Lioussé (2008) mis à jour pour l'année 2005 et ceux de l'IPCC (Lamarque et al., 2010) montre des résultats très intéressants pour le carbone suie : en 2005, les valeurs sont sensiblement les mêmes pour tous les inventaires, mais en 2030 de grandes différences

apparaissent. Les évolutions entre 2005 et 2030 proposées par les différents inventaires sont elles mêmes très différentes. Pour le carbone organique, les valeurs sont très différentes en 2005 ainsi qu'en 2030. Notons que la pente de notre « meilleur » scénario CCC* est proche de celle du « moins bon » scénario RCP 4,5 proposé par IPCC (Lamarque et al., 2010). Ceci souligne l'importance des inventaires développés pour l'année 2005. Aussi, les grandes différences entre les évolutions des émissions proposées par les différents inventaires mettent en avant le rôle clé des abattements (e.g. scénario CCC*).

4.7. Conclusion

Ce chapitre a permis de développer un inventaire du futur à l'échelle de l'Afrique pour 2030. Dans l'élaboration de notre inventaire 2030, nous avons eu recours aux données de notre inventaire régional sur l'Afrique relatif à l'année 2005, projeté en 2030 sur la base des ratios des données de consommations entre les années 2005 et 2030 pour chaque combustible répertorié dans le modèle POLES, selon deux scénarios. Il s'agit tout d'abord d'un scénario de référence (REF) qui traduit une constante dans le temps des comportements observés en 2005 et un autre (CCC) plus contraignant, qui tient compte des mesures restrictives imposées par le protocole de Kyoto en 2000 dont les émissions ont été spatialisées avec la densité de population de 2005 (la densité de population de 2030 est en cours de mise en forme). Ce travail a fait ressortir toute l'importance du contrôle des émissions effectué entre les différents scénarios. Les estimations des émissions de carbone suie en 2030 sont comprises entre 2,61 Tg (REF) et 1,93 Tg (CCC) et, entre 13,09 Tg (REF) et 12,15 Tg (CCC) pour le carbone organique primaire. Par ailleurs, les tendances entre les années 2005 et 2030 (REF et CCC) sont à la hausse sur toute l'Afrique. Cependant, cette hausse est beaucoup plus importante pour le carbone suie (180% dans CCC et 278% dans REF) que pour le carbone organique (226% dans CCC et 203% dans REF). Au niveau de chaque pays, cette tendance à la hausse des émissions de carbone suie et de carbone organique primaire est variable. Cela pourrait s'expliquer au Gabon par le fait que les données de consommations obtenues pour 2030 dans les deux scénarios (REF et CCC) sont plus faibles que celles de 2005. Des tests de sensibilité ont été ensuite effectués en Afrique de l'Ouest sur les véhicules deux roues, en Afrique du Sud en considérant que les ratios de projections devaient être ceux d'un pays semi développé (Brésil ou Pologne) ainsi que sur les déchets animaux. Le fait de considérer que les véhicules deux roues soient dotés de moteurs quatre temps en 2030 au lieu de deux temps de 2005, a permis de baisser les émissions de carbone organique de plus de 76% dans les 16 pays

considérés en Afrique de l'Ouest. En Afrique du Sud, notre hypothèse a eu pour conséquence de baisser les émissions en utilisant les ratios de la Pologne et du Brésil de plus de 35% pour le carbone suie et de près de 47% pour le carbone organique primaire via la Pologne. Avec le carbone organique primaire, le ratio du Brésil a plutôt engendré une hausse des émissions de 28%. En attendant que le modèle POLES propose des ratios de projection typique de l'Afrique du Sud en tant que pays semi développé, nous avons testé les ratios de projections de la Pologne et du Brésil. La prise en compte des déchets végétaux à la place des déchets animaux (dernier test de sensibilité) a permis une baisse des émissions de carbone suie (29%) et plus conséquente avec le carbone organique primaire (83%) dans CCC* (vs. CCC). Une question qui se pose est celle de savoir quel inventaire nous allons retenir pour nos études de modélisation. Celui de la Pologne a été choisi car il proposait, d'une part, les réductions les plus fortes et d'autre part, les populations de ces 2 pays (ie. Afrique du Sud et Pologne) sont quasi-identiques. Enfin, nos inventaires de 2030 ont été comparés à ceux de l'IPCC (Lamarque et al., 2010). Tous les inventaires considérés (IPCC et les nôtres) présentent des émissions croissant entre 2005 et 2030 à l'échelle de l'Afrique, mais toutefois avec des pentes différentes, excepté dans le scénario CCC* doté d'une pente proche de celle du scénario 4,5 de l'IPCC. Ces résultats, très intéressants, nous amènent à nous demander ce que seraient les concentrations ambiantes issues de ces inventaires. Ainsi, au chapitre suivant, nous présentons les résultats issus de la modélisation avec les inventaires de Junker and Lioussé (2008) et Lioussé et al. (2011), résultats que nous comparerons aux mesures disponibles.

CHAPITRE 5

SIMULATIONS AVEC LE MODELE ORISAM-TM5

Sommaire

5.1. Introduction	158
5.2. Présentation générale du modèle de chimie-transport TM5.....	158
5.2.1. Généralités sur le modèle TM5	158
5.2.2. Bref descriptif du modèle TM5.....	158
5.2.3. Transport des polluants dans TM5.....	160
5.2.4. Dépôts chimiques dans TM5	160
5.2.5. Hygroscopicité et vieillissement des aérosols.....	162
5.3. Module d'aérosols ORISAM	163
5.4. Descriptif des simulations	163
5.5. Evaluation du modèle ORISAM-TM5 à l'échelle de l'Afrique.....	164
5.5.1. Distributions spatiales des aérosols carbonés en 2005	165
5.5.2. Distributions spatiales des aérosols carbonés en 2030	169
5.5.3. Zoom sur les concentrations de carbone suie et de carbone organique en quelques stations, pour 2005 et 2030	174
5.5.4. Estimations des propriétés radiatives des aérosols carbonés dans ORISAM-TM5.....	188
5.6. Conclusion.....	198

5.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats des simulations que j'ai effectuées pour modéliser le transport et les impacts des aérosols carbonés à l'échelle du continent africain, prenant en compte les spécificités régionales des émissions développées aux chapitres précédents (chapitres 3 et 4). Les résultats des simulations pour l'année 2005 ont été comparés aux mesures disponibles en certains sites.

5.2. Présentation générale du modèle de chimie-transport TM5

5.2.1. Généralités sur le modèle TM5

Le modèle TM5 correspond à la version 5 récente du modèle TM (Transport Model) et reprenant plusieurs concepts et paramétrisations déjà présents dans le modèle TM3 (Krol et al., 2005). Le modèle TM, initialement développé par Heimann et al. (1995), a été largement utilisé dans plusieurs études globales de chimie atmosphérique. Nous citerons par exemple l'impact des hydrocarbures sur la chimie atmosphérique (Houweling et al., 1998) et les émissions de méthane lors de simulations 1978-1993 (Dentener et al., 2003). On peut également citer l'étude de Peters et al. (2002) sur les comparaisons entre l'ozone modélisé et les données satellitales sur des colonnes atmosphériques. Récemment, Guillaume et al. (2007) ont étudié les aérosols, leurs émissions et la formation des aérosols organiques secondaires avec un zoom sur les aérosols carbonés (carbone suie et carbone organique) en Europe. De plus, Liousse et al. (2010) ont montré les impacts des aérosols de combustion issus des feux de biomasse en Afrique de l'Ouest.

5.2.2. Bref descriptif du modèle TM5

Le modèle TM5 est un modèle off-line (CTM) qui utilise les données météorologiques du modèle du Centre Européen (ECMWF pour European Centre for Medium range Weather and Forecast, <http://www.ecmwf.int/data/era/html>). Le modèle TM5 a une résolution de $6^{\circ} \times 4^{\circ}$ (longitudexlatitude) sur le globe, avec possibilité de zoom à une résolution de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ sur une zone particulière d'intérêt. Afin d'assurer la conservation de la masse entre ces deux domaines, une résolution intermédiaire à $3^{\circ} \times 2^{\circ}$ (longitudexlatitude) a été incorporée pour tenir compte de la dépendance de la résolution de certains paramètres, également pour générer

des conditions aux frontières du domaine $1^\circ \times 1^\circ$ relaxante et éviter ainsi une transition trop brutale entre les domaines $6^\circ \times 4^\circ$ et local ($1^\circ \times 1^\circ$). Dans ce travail, le zoom à $1^\circ \times 1^\circ$ a porté sur l'Afrique. Par ailleurs, le modèle présente une même structure verticale à 25 niveaux, de 1010 hPa à 0.47 hPa avec 5 niveaux dans la couche limite atmosphérique. Les 25 niveaux du modèle TM5 sont compatibles avec les 60 niveaux hybrides de pression du modèle du Centre Européen. En outre, le modèle TM5 utilise les paramètres atmosphériques suivants :

- composantes horizontales du vent
- pression
- température
- humidité
- teneur en eau liquide des nuages
- teneur en glace des nuages
- couverture nuageuse (% de la maille)
- paramètres de convection nuageuse
- précipitations (en mm/jour), avec distinction entre les pluies convectives et stratiformes
- résistance aérodynamique du sol

Les différents processus physico-chimiques pris en compte dans le modèle TM5 représentés sur la figure 5.1 sont décrits dans les paragraphes suivants.

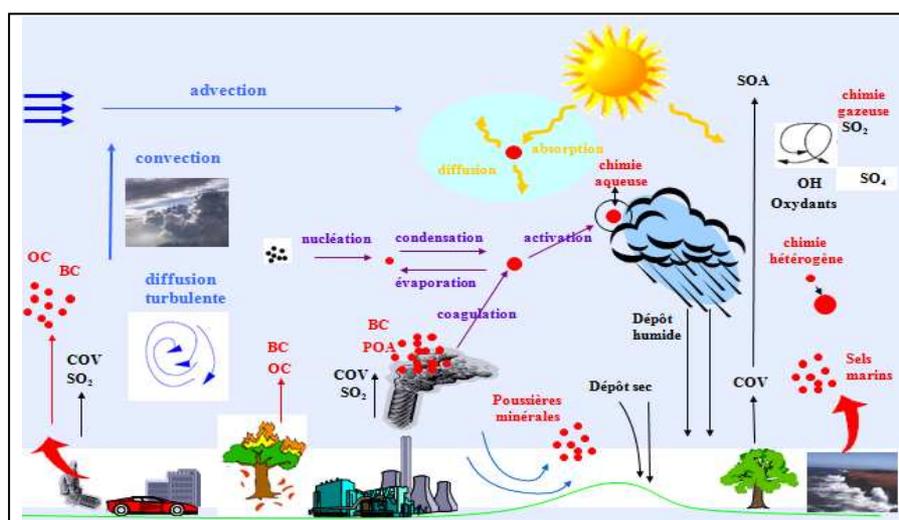


Fig. 5.1 : Processus physico-chimiques dans l'atmosphère.

5.2.3. Transport des polluants dans TM5

5.2.3.1. Advection

L'algorithme est issu du schéma d'advection de Russel and Lerner (1981). Dans cette formulation, on exprime l'évolution du rapport de mélange χ d'une espèce chimique donnée, ainsi que ses 3 dérivées spatiales :

$$\frac{\partial\chi}{\partial x}, \frac{\partial\chi}{\partial y} \text{ et } \frac{\partial\chi}{\partial z}$$

Chaque pas de temps est subdivisé en 9 intervalles et un schéma traitant des moments de second ordre (Prather, 1986) est mis en œuvre pour le transport dans la stratosphère.

5.2.3.2. Diffusion et convection

Le transport vertical par convection (profonde et peu profonde) due aux cumulus a été paramétrisé selon les hypothèses Tiedtke (1989). Ce schéma détermine pour tout point de la surface, la présence statistique d'un nuage sur la colonne atmosphérique à la verticale de ce point. Selon qu'il y a ou non nuage, les composantes d'entraînement, de déentraînement, ainsi que la subsidence au sommet du nuage sont paramétrisées à partir des paramètres de la convection nuageuse des champs météorologiques importés dans TM5. La paramétrisation de la diffusion verticale de Holstag and Boville (1993) est utilisée dans la couche limite atmosphérique. Par contre, dans la troposphère libre, c'est la formulation de Louis (1979) qui est utilisée. En effet, cette différenciation vient du fait que dans la couche limite atmosphérique, le cisaillement vertical est nettement plus important que dans l'atmosphère libre.

5.2.4. Dépôts chimiques dans TM5

5.2.4.1. Dépôt sec

Le dépôt sec des aérosols carbonés (cf. figure 5.1) suit le schéma de Ganzeveld et al. (1998) dont l'équation au premier ordre a pour formulation :

$$\frac{\partial C_k^{\text{depot}}}{\partial t} = \frac{V_d}{h_k} C_k$$

où C_k est le rapport de mélange au niveau k , V_d la vitesse de dépôt sec et h_k , l'épaisseur de la couche atmosphérique dans laquelle se trouve le niveau k .

Jusqu'à présent, la vitesse de dépôt sec V_d était supposée constante (0,1 cm/s). Récemment, V_d est déterminée avec plus de précision sur la base des 3 résistances suivantes :

- la résistance aérodynamique R_a , fonction de la turbulence dans la couche limite. Ce paramètre est calculé à partir de la stabilité de la couche limite du modèle, de la vitesse du vent et de la rugosité de surface.
- la résistance quasi-laminaire R_b contrôlée par la diffusion moléculaire
- la résistance de surface R_c qui combine les processus de captation par les différents types de surface.

Ainsi, pour une surface hétérogène, R_b et R_c sont calculées séparément pour les fractions d'eau liquide, de neige et de végétation dans chaque maille du modèle.

5.2.4.2. Dépôt humide

Le dépôt humide (cf. figure 5.1) tient compte de deux types de pluies, les pluies d'origines convective et stratiforme. Il est judicieux d'introduire cette distinction car les vitesses ascensionnelles sont sensiblement plus élevées dans les nuages cumuliformes qu'au sein des nuages stratiformes, augmentant la proportion de dépôt humide par les nuages cumuliformes (Xing and Chameides, 1990). Au vu de l'importance des variations verticales du contenu en eau pour le traitement du dépôt humide (Xing and Chameides, 1990), ces variations verticales sont calculées via la formulation de Tiedke (1989), les champs du modèle du Centre Européen donnant accès aux quantités d'eau précipitées au sol (en mm/jour).

Dans les nuages stratiformes, le lessivage des aérosols suit le même schéma que celui des gaz, sauf que les aérosols sont solubles à 100% (aérosols hydrophiles) (Roelofs and Lelieveld, 1995) avec une diffusion moléculaire de valeur moyenne 10^{-6} cm²/s (Seinfeld and Pandis, 1998). Sous le nuage, on suppose une distribution granulométrique log-normale des aérosols (Jaenicke, 1998), ainsi que les gouttelettes de rayon moyen 0,02 cm. Ces hypothèses conduisent à adopter un coefficient de lessivage de $0,05$ s⁻¹ (Dana and Hales, 1976). Pour les pluies convectives, le dépôt humide suit la formulation de Guelle et al. (1998). Pour traduire

les différences entre vitesses ascensionnelles au sein d'un nuage, l'efficacité du lessivage est considérée différemment selon que l'on est au sommet ou à la base du nuage. Ainsi, dans la partie basse du nuage (Pression > 700 hPa), on considère que le lessivage est de 50% (i.e. 50% de la masse des espèces chimiques est entraînée vers le sommet du nuage). Par contre, dans la partie haute du nuage (Pression < 700 hPa), la convection profonde lessive 100% de la masse entraînée vers le sommet. Il faut préciser que c'est la composante hydrophile de l'aérosol qui est capté lors de ce processus dont le descriptif se trouve au paragraphe suivant.

5.2.5. Hygroscopicité et vieillissement des aérosols

L'hygroscopicité est la capacité d'un aérosol à capter l'eau par condensation. Les aérosols sont plus ou moins hygroscopiques et cette hygroscopicité complexe, dépend de plusieurs facteurs. Elle dépend en particulier de la taille, de la composition chimique des aérosols et du caractère hydrophile/hydrophobe de chaque type d'aérosol. Il s'agit d'une propriété très importante dans les interactions aérosols-nuages car, plus une particule est hygroscopique et plus elle agira avec efficacité en tant que noyau de condensation nuageuse. Dans le modèle TM5, nous avons adopté la même répartition hydrophobe/hydrophile pour l'aérosol carboné que dans Cooke et al. (1999). Dans l'initialisation du modèle TM5, nous supposons 80% de particules hydrophobes contre 20% d'hydrophiles pour le carbone suie. Pour le carbone organique, des proportions de 50% d'hydrophobes et 50% d'hydrophiles sont considérées. Ces ratios évoluent dans le temps selon l'hypothèse suivante : on considère un taux de conversion constant des aérosols carbonés primaires, dont la masse de chaque espèce primaire (carbone suie ou carbone organique primaire) dans chaque bin (classe de diamètre) vérifie l'équation :

$$\begin{cases} \frac{\partial A_{i,k}^{hb}}{\partial t} = -\frac{1}{T_c} A_{i,k}^{hb} \\ \frac{\partial A_{i,k}^{hl}}{\partial t} = -\frac{\partial A_{i,k}^{hb}}{\partial t} \end{cases}$$

où $A_{i,k}^{hl}$ représente la fraction hydrophile de l'aérosol carboné dans le bin k et $A_{i,k}^{hb}$, la fraction hydrophobe de l'aérosol carboné dans ce bin k . T_c est le temps caractéristique de conversion hydrophobe/hydrophile des aérosols carbonés primaires, soit 1 jour dans nos simulations selon l'hypothèse de Cooke et al., 1999. C'est un paramètre sensible du modèle, car la

fraction hydrophile est la fraction qui sera lessivée (cf. paragraphe précédent). Ainsi, plus le temps de conversion (T_c) est élevé et plus la particule demeurera hydrophobe et donc, plus son temps de résidence dans l'atmosphère sera long.

5.3. Module d'aérosols ORISAM

Le module d'aérosols ORISAM (ORganic and Inorganic Spectral Aerosol Module) est présenté de manière détaillée dans Guillaume et al. (2007), Cousin et al. (2005), Liousse et al. (2005) et Bessagnet et al. (2004). Deux versions de ce module ORISAM ont été couplées au modèle TM. La première version tient compte de l'évolution physico-chimique des aérosols répartie par classes de diamètres (bins) et modélise explicitement la formation des aérosols organiques secondaires. La deuxième version plus simplifiée, est celle que nous avons utilisée. L'évolution physico-chimique, ainsi que la formation des aérosols ne sont pas incorporées ici pour mon propos : il s'agit du mode traceur. Notons que quatre traceurs (BC hydrophile, BC hydrophobe, OC hydrophile et OC hydrophobe) ont été considérés dans nos simulations et six classes de diamètres (sections ou bins) sont prises en compte suivant le schéma sectionnel de Warren and Seinfeld (1985). Les différentes classes de tailles considérées sont : [0,04-0,126 μm], [0,126-0,4 μm], [0,4-1,265 μm], [1,265-4 μm], [4-12,649 μm] et [12,649-40 μm]. Les distributions en tailles du carbone suie et du carbone organique prises en compte en tant que données d'entrée du modèle sont basées sur les mesures récentes obtenues lors de la campagne Escompte (2001) pour un aérosol urbain (Cachier et al., 2004). Ainsi, deux modes log-normaux sont considérés : un dans le mode fin de diamètre moyen 0,23 μm et un autre (2,5 μm) dans le mode grossier. 100% du carbone suie et 90% du carbone organique sont injectés dans le mode fin. Les 10% restants du carbone organique sont dans le mode grossier. Pour information, le choix du mode traceur constitue un gain sensible de temps de calcul. Ainsi, les simulations pour une année entière durent en moyenne 3 jours seulement avec un système à 4 processeurs.

5.4. Descriptif des simulations

Les simulations ont porté sur la période du 15 Décembre 2004 au 1^{er} Janvier 2006. Trois simulations ont été effectuées pour l'année 2005 et trois autres pour l'année 2030 utilisant des données de feux de biomasse et de combustibles fossiles/biofuels. Pour les feux de biomasse,

c'est l'inventaire AMMABB de 2005 (Liousse et al., 2010) qui a été choisi pour nos 6 simulations à l'échelle du globe, pour les années 2005 et 2030. Les émissions par les combustions de combustibles fossiles et de biofuels sont décrites dans le tableau 5.1. Notons que la dénomination de chaque simulation relatif aux différents inventaires à tester y est mentionné.

Tableau 5.1 : Descriptif des simulations et choix des inventaires des combustibles fossiles et des biofuels relatifs aux aérosols carbonés (carbone suie et carbone organique) sur l'Afrique pour 2005 et pour 2030.

Année	Combustibles fossiles et biofuels	Noms des simulations
2005	Nouvel inventaire 2005 (Liousse et al., 2011)	NEW
	Ancien inventaire 2005 (Junker and Liousse, 2008)	OLD
	Nouvel inventaire 2005 avec une modification de la spatialisations des émissions en Afrique du Sud (Liousse et al., 2011)	NEW AFS
2030	Nouvel inventaire 2030 avec scénario REF (Liousse et al., 2011)	REF
	Nouvel inventaire 2030 avec scénario CCC (Liousse et al., 2011)	CCC
	Nouvel inventaire 2030 avec scénario CCC + modification des projections des données en Afrique du Sud suivant les coefficients donnés pour la Pologne + modification des 2 roues en Afrique de l'Ouest (2 temps → 4 temps) (cf. chapitre 4)	CCC*

Les émissions des combustibles fossiles et des biofuels de l'inventaire de Junker and Liousse (2008) actualisées pour les années 2005 et 2030, ont été utilisées sur les régions autres que l'Afrique. L'élaboration des projections de l'inventaire de Junker and Liousse (2008) pour l'année 2030 a été élaborée à l'aide des ratios donnés par le modèle POLES pour les 21 combustibles et les pays/régions du monde (Chapitre 4) sur les données de consommations pour 2005 et 2030.

5.5. Evaluation du modèle ORISAM-TM5 à l'échelle de l'Afrique

Dans ce qui suit, je présenterai d'abord les distributions spatiales de concentrations en carbone suie et en carbone organique pour les mois de Janvier et de Juillet, pour les différentes simulations en 2005 et en 2030 (tableau 5.1). Une étude comparative des concentrations en carbone suie et en carbone organique a également été faite entre les simulations et les mesures disponibles sur différents sites, pour l'année de simulation 2005. La seconde partie sera consacrée aux propriétés radiatives des aérosols de combustion. Les

épaisseurs optiques et les albédos de simple diffusion simulés ont été confrontés aux données de satellites tels que MODIS (550 nm) et des mesures in situ du réseau AERONET (440 nm).

5.5.1. Distributions spatiales des aérosols carbonés en 2005

Dans cette partie, nous présentons les concentrations de carbone suie et de carbone organique (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) obtenues pour 2005, à partir de notre nouvel inventaire (NEW) et de l'ancien inventaire (OLD) en Janvier et Juillet sur l'Afrique.

5.5.1.1. Carbone suie

Les distributions spatiales des concentrations de carbone suie (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) en surface obtenues à partir du nouvel et de l'ancien inventaire en Janvier 2005 et Juillet 2005 sont présentées sur la figure 5.2. Globalement, tout comme dans Liousse et al. (2010), les maxima de concentrations sont situées dans les zones de feux de biomasse : en Janvier en Afrique de l'Ouest et en Juillet en Afrique Centrale. Cependant, on constate une différence dans l'extension longitudinale des concentrations le long des pays du Golfe de Guinée en Janvier et le long de l'équateur en Juillet.

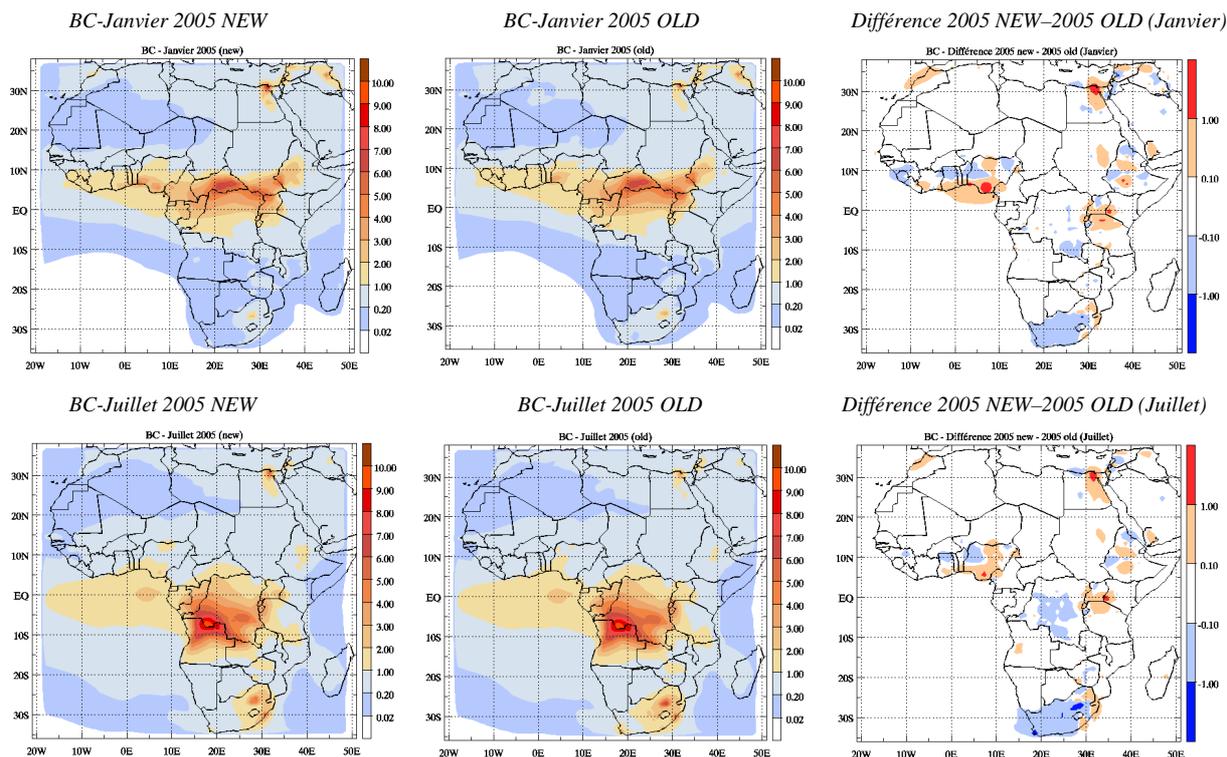


Fig. 5.2 : Distributions spatiales des concentrations de carbone suie (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en Janvier 2005 (en haut) et en Juillet 2005 (en bas) obtenues à partir du nouvel inventaire (à gauche) et de l'ancien inventaire (au centre). Les différences de concentration (new-old) sont également présentées sur la figure de droite.

Les augmentations sont mises en évidence plus clairement sur les cartes présentant les différences entre les concentrations de carbone suie issues du nouvel et de l'ancien inventaire en Janvier et en Juillet 2005 (cf. figure 5.2). Une faible augmentation des concentrations est observée le long du Golfe de Guinée, en particulier au Nigéria, de l'ordre de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette augmentation se retrouve également en Afrique de l'Est (Ethiopie, Kenya et Tanzanie) et en Afrique du Nord (Egypte). Cette faible augmentation était prévisible, car on a vu dans le chapitre 3 que les émissions de carbone suie sont peu différentes dans les deux inventaires (NEW et OLD). A contrario, une légère baisse des concentrations de carbone suie est constatée en Afrique du Sud, proche de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces différences en Afrique du Sud sont essentiellement dues aux émissions industrielles de carbone suie qui baissent de 36% dans le nouvel inventaire 2005 par rapport à l'ancien (OLD), conséquence de la prise en compte des centrales thermiques, associée à des facteurs d'émissions plus faibles que ceux des industries.

5.5.1.2. Carbone organique

Les distributions spatiales des concentrations en carbone organique (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en 2005 obtenues respectivement à partir du nouvel inventaire et de l'ancien en Janvier et Juillet, sont présentées sur la figure 5.3. Dans un premier temps, et tout comme pour le carbone suie et les simulations précédentes (Lioussé et al., 2010), on note que les maxima de concentrations se situent dans les zones de feux de biomasse d'Afrique de l'Ouest en Janvier et d'Afrique Centrale en Juillet 2005. De plus, les concentrations de carbone organique sur ces zones de feux ne changent pas entre les deux simulations, car c'est le même inventaire de feux de biomasse qui a été utilisé.

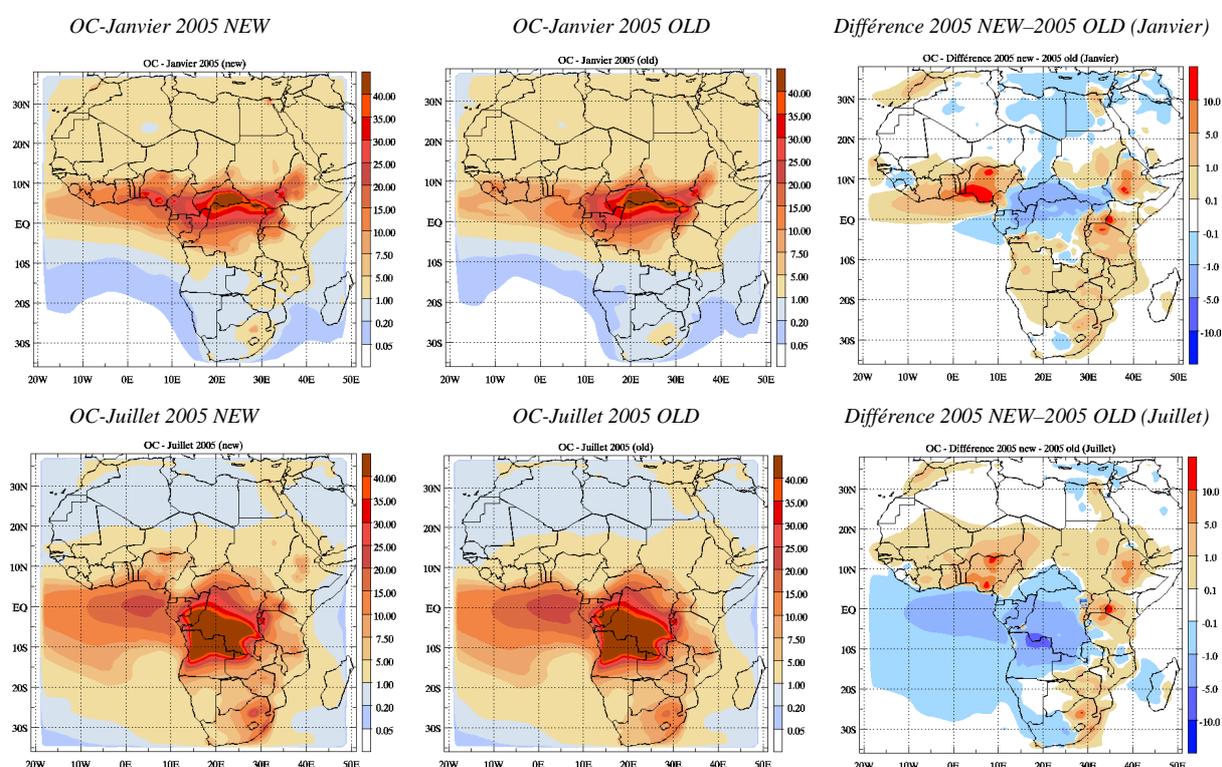


Fig. 5.3 : Distributions spatiales des concentrations en carbone organique (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en Janvier 2005 (en haut) et en Juillet 2005 (en bas) obtenues à partir du nouvel inventaire (à gauche) et de l'ancien inventaire (au centre). Les différences entre les concentrations (new-old) sont également présentées sur les figures de droite.

Dans un deuxième temps, en comparant les deux simulations (NEW et OLD), on relève une forte augmentation des concentrations de carbone organique le long du Golfe de Guinée et en Afrique du Sud, en Janvier et en Juillet avec le nouvel inventaire. La figure 5.3 relative aux

écarts de concentrations obtenues à partir des deux simulations confirme cette forte augmentation en Afrique de l'Ouest, principalement au Nigéria, au Bénin et au Togo. Ces hausses de plus de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenues avec le nouvel inventaire sont essentiellement dues à la prise en compte des émissions par les véhicules à deux roues dans ces pays. Notons également que les trois pays d'Afrique de l'Est (Ethiopie, Kenya et Tanzanie) qui avaient connu de faibles hausses en carbone suie ($+1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) voient également leurs concentrations en carbone organique augmenter de plus de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces écarts de concentrations s'expliqueraient par les différences entre les nouveau et ancien inventaires d'émissions de carbone organique. En Ethiopie, au Kenya et en Tanzanie, ce sont les biofuels (déchets animaux et bois) des secteurs domestique et industrie qui sont responsables des différences. Des hausses de plus $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ apparaissent également à Johannesburg, contrairement aux résultats obtenus avec le carbone suie où on relevait plutôt une légère baisse. Cette hausse est due aux fortes émissions par les déchets animaux des secteurs domestique et industriel, du fait de leurs forts facteurs d'émissions ($12,5 \text{ g}/\text{kg}$ à comparer par exemple au $4,76 \text{ g}/\text{kg}$ du charbon noir du secteur domestique).

5.5.1.3. Conclusion partielle

On observe un accroissement des niveaux de pollution en carbone suie et en carbone organique en Afrique de l'Ouest, principalement le long du Golfe de Guinée (du Nigéria au Sénégal) avec le nouvel inventaire. Les résultats obtenus ont montré que le carbone suie et le carbone organique ont des réponses différentes dans les simulations. Les niveaux de concentrations simulées sont d'un ordre de grandeur inférieur à ceux des feux de biomasse d'Afrique Centrale pour le carbone suie, mais à présent comparables pour le carbone organique. Les différences sont en effet très faibles pour le carbone suie contrairement au carbone organique. Cela s'explique en partie par des inventaires anthropiques qui eux aussi présentent très peu de différences pour le carbone suie ($0,68 \text{ Tg}$ contre $0,69 \text{ Tg}$), beaucoup plus pour le carbone organique ($1,12 \text{ Tg}$ contre $4,02 \text{ Tg}$). L'augmentation du niveau de pollution concerne également trois pays d'Afrique de l'Est (Ethiopie, Kenya et Tanzanie) de même que l'Egypte (surtout en carbone suie) et l'Afrique du Sud (surtout en carbone organique). Ce constat s'explique par les différentes mises à jour des données de consommation relatives essentiellement au diesel, au bois et aux déchets animaux, ainsi que

les facteurs d'émission (cf. chapitre 3) dans le nouvel inventaire qui ont favorisé l'augmentation des émissions, particulièrement en carbone organique.

Par ailleurs, les résultats obtenus avec le scénario NEW AFS (modification de la spatialisation en Afrique du Sud - cf tableau 5.1) et présentés en Annexe 5, ont permis une modification des concentrations en Afrique du Sud, et même dans d'autres pays. Par exemple, les concentrations en carbone suie et carbone organique en Afrique du Sud ont baissé avec la nouvelle spatialisation en zone source (Johannesbourg) d'au moins 30%, tandis qu'en zones reculées (Louis Trichardt), on relève plutôt une hausse des concentrations comprise entre 39% et 149%. La comparaison entre les concentrations simulées par le modèle TM5 et les mesures disponibles (paragraphe suivants) permettra de mettre en évidence que les modifications en Afrique du Sud ont des répercussions jusqu'en Afrique de l'Ouest (e.g. au Nigéria).

5.5.2. Distributions spatiales des aérosols carbonés en 2030

Dans cette partie, nous présenterons les concentrations de carbone suie et de carbone organique (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) obtenues pour 2030 à partir des trois scénarios du futur (REF, CCC et CCC*) de Janvier et Juillet, à l'échelle du continent africain. Dans la suite de notre analyse, nous présenterons une étude comparative entre concentrations obtenues à partir du scénario REF et CCC d'une part, et REF et CCC* d'autre part.

5.5.2.1. Carbone suie

Les distributions spatiales des concentrations de carbone suie (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) en surface obtenues à partir des simulations REF, CCC et CCC* en Janvier 2030 et Juillet 2030 sont présentées sur les figures 5.4.

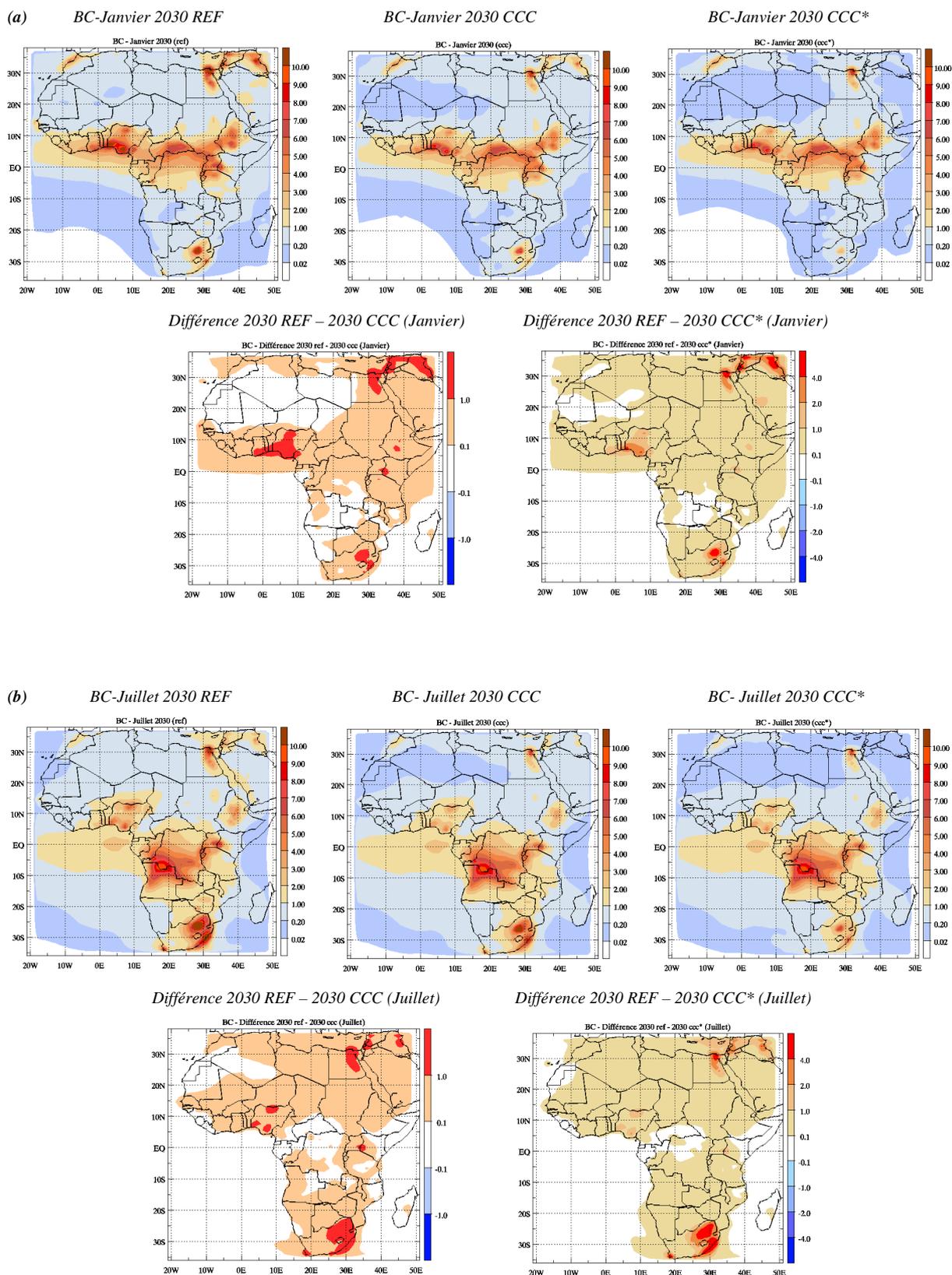


Fig. 5.4 : Distributions spatiales des concentrations de carbone suie (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en Janvier 2030 (a) et Juillet 2030 (b) obtenues sur la base de l’inventaire REF (à droite), CCC (au centre) et CCC* (à gauche). Les différences entre concentrations (REF-CCC et REF-CCC*) sont également présentées.

Dans toutes nos simulations (REF, CCC et CCC*), ce sont uniquement les émissions anthropiques qui ont été modifiées ; les émissions des feux de biomasse étant celles de 2005. Le premier constat est qu'on observe les mêmes niveaux de concentrations de carbone suie, tant sur les zones de feux de biomasse que sur les zones anthropiques en 2030, ce qui n'était pas le cas en 2005. L'analyse des résultats montre que les maxima des concentrations en carbone suie se situent aux mêmes endroits en 2030 et en 2005 : Golfe de Guinée (Afrique de l'Ouest), Afrique Centrale et Afrique du Sud (cf. figures 5.4 a et b). A l'échelle de l'Afrique, on note que les concentrations de carbone suie en 2030 (REF) sont en moyenne 3 fois plus fortes que celles de 2005. L'analyse de l'effet des régulations imposées dans les scénarios se fera à partir de deux comparaisons entre REF et CCC et entre REF et CCC*. Les concentrations obtenues à partir des inventaires REF et CCC montrent que les concentrations avec l'inventaire REF sont supérieures à celles de l'inventaire CCC ce qui est normal au vu des contraintes sur les émissions CCC. Cependant, ces différences sont faibles et comprises entre $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec de plus fortes valeurs (plus de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dans le Golfe de Guinée (Nigéria, Bénin, Togo), en Egypte et en Afrique du sud. Par contre, les réglementations plus restrictives (moins d'émissions qu'avec le scénario CCC) incluses dans le scénario CCC* font que les différences entre les concentrations de carbone suie obtenues à partir des inventaires REF et CCC* sont plus importantes que celles avec CCC au Nigéria, en Egypte et en Afrique du Sud ($> 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de différence). Notons qu'ailleurs, les mêmes différences sont observées avec CCC et CCC* par rapport à REF. Ces différences dans ces 3 pays sont significatives, vu les ordres de grandeur des concentrations observées sur le carbone suie (figure 5.4). Rappelons que parmi les émissions des différents combustibles (chapitre 3), ces différences sont principalement dues au diesel avec une baisse de plus de 50% dans CCC et CCC* par rapport à REF, alors qu'il représente 65% des émissions totales de carbone suie en Egypte, 39% au Nigéria et 21% en Afrique du Sud dans le scénario REF. On note aussi l'importance du charbon noir qui baisse de 50% dans le scénario CCC par rapport à REF, en remarquant qu'il représente 67% du total des émissions de carbone suie en Afrique du Sud.

5.5.2.2. Carbone organique

La figure 5.5 présentent les distributions spatiales des concentrations de carbone organique (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) en surface pour 2030, obtenues sur la base des inventaires REF, CCC et CCC* pour Janvier et Juillet.

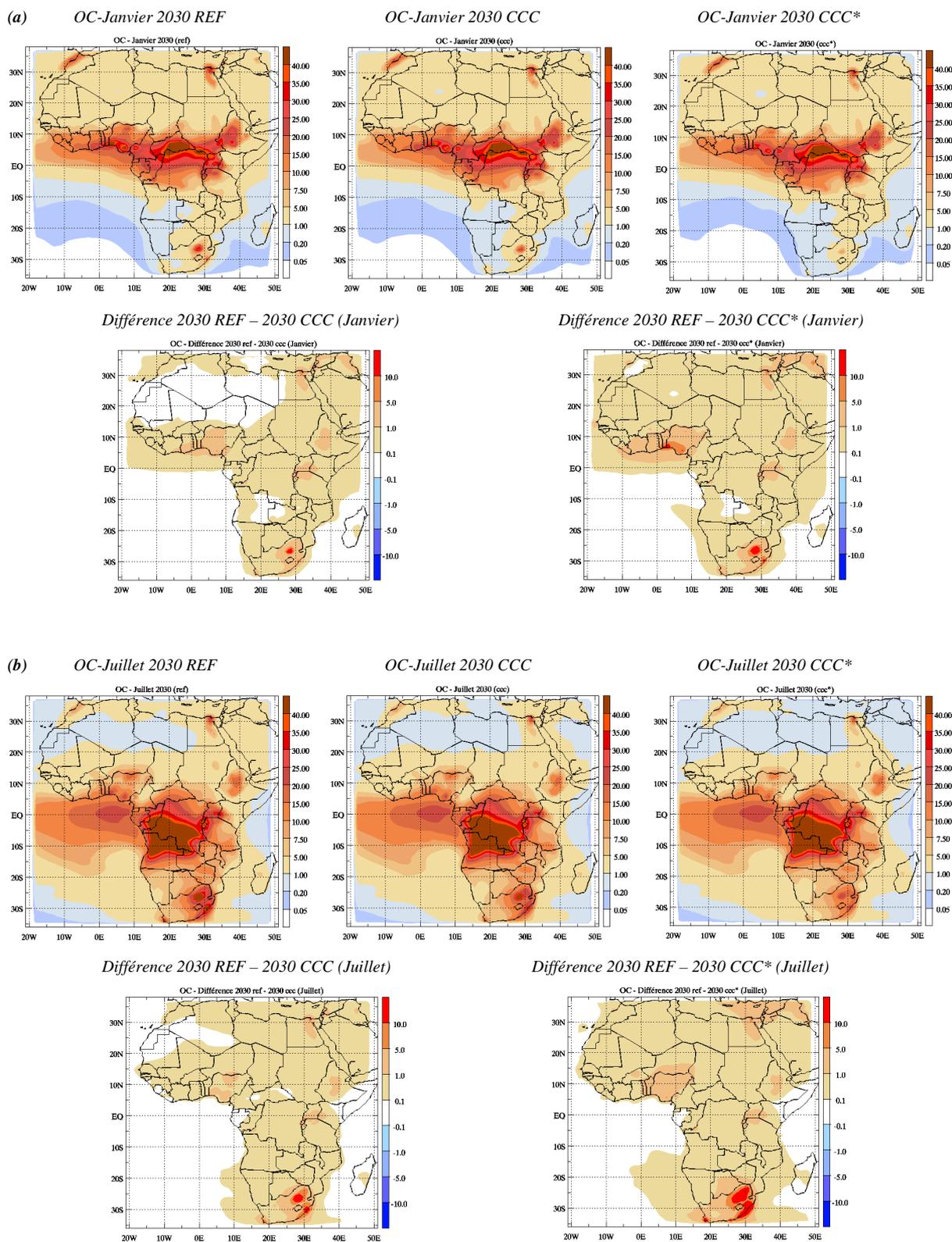


Fig. 5.5 : Distributions spatiales des concentrations de carbone organique (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en Janvier 2030 (a) et en Juillet 2030 (b) 2030 obtenues à partir de l’inventaire REF (à droite), CCC (au centre) et CCC* (à gauche). Les différences entre concentrations (REF-CCC et REF-CCC*) sont également présentées.

Rappelons que les fortes valeurs de concentrations en carbone organique relevées en Afrique de l'Ouest en Janvier et en Afrique Centrale en Juillet sont le fait des feux intenses de biomasse. Les mêmes observations sont faites pour le carbone organique et pour le carbone suie dans les trois scénarios REF, CCC et CCC*. En effet, les mêmes niveaux de concentration en carbone organique sont constatés sur le Golfe de Guinée, en Afrique du Sud et sur les zones de feux de biomasse. Ainsi, les concentrations de carbone organique sur les zones anthropiques d'Afrique de l'Ouest en 2030 sont 2 fois plus importantes que celles de 2005. De plus, les maxima de concentrations de carbone organique sont localisés aux mêmes endroits en 2030 et en 2005 (Golfe de Guinée, Afrique du Sud et Afrique Centrale). Par la suite, les concentrations de carbone organique obtenues avec le scénario REF restent supérieures à celles obtenues dans les scénarios CCC et CCC*. Ainsi, que ce soit en Janvier ou en Juillet 2030, les différences entre les concentrations en carbone organique dans les différentes simulations (REF, CCC et CCC*) sont principalement localisées dans les mêmes pays que pour le carbone suie : au Nigéria et en Egypte ($\sim 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en Afrique du Sud ($> 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ailleurs, les différences sont faibles, comprises entre $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En nous intéressant aux combustibles responsables de ces différences au niveau des inventaires, on note que ce sont les mêmes combustibles que pour le carbone suie (diesel et charbon noir), sauf au Nigéria où, il faut prendre en compte l'essence pour les véhicules à deux roues, qui représente 15% des émissions totales au Nigéria, avec une baisse de 88% dans le scénario CCC* par rapport aux scénarios REF et CCC.

5.5.2.3. Conclusion partielle

L'inventaire REF a généré des concentrations de carbone suie et de carbone organique supérieures à celles de CCC et CCC* sur tout le continent africain en 2030. Globalement, les augmentations de concentrations en carbone suie et en carbone organique sont du même ordre de grandeur que celles sur les zones des feux de biomasse. De plus, on observe la même localisation des maxima de concentrations en 2005 qu'en 2030. Cependant, les différences entre les concentrations de carbone suie et de carbone organique dans les différentes simulations pour 2030 restent faibles (entre $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sauf dans 3 pays, Nigéria, Afrique du Sud et Egypte. Notons que ce sont les inventaires anthropiques qui sont à l'origine de ces écarts, plus précisément les émissions diesel qui baissent considérablement entre les inventaires REF et CCC/CCC*. On constate aussi que le charbon noir en Afrique du Sud et le

carburant pour deux roues motorisées au Nigéria ont permis l'amplification de la baisse constatée. Ces résultats mettent ainsi en évidence l'impact des scénarios du futur et des différentes restrictions imposées aux émissions dont l'effet serait l'atténuation de la pollution en Afrique.

5.5.3. Zoom sur les concentrations de carbone suie et de carbone organique en quelques stations, pour 2005 et 2030

5.5.3.1. Présentation générale des sites retenus

La comparaison des concentrations de carbone suie et de carbone organique entre les résultats de modélisation et les données issues de mesures in situ est présentée dans cette partie. Par la suite, une distinction sera faite entre sites ruraux et sites urbains, de même que ceux qui disposent ou non de mesures de concentrations. On dispose de mesures de carbone suie et de carbone organique aux 6 sites ci-après, sauf à Banizoumbou (Niger), Djougou (Bénin) et Lamto (Côte d'Ivoire), où nous n'avons de données de concentrations que pour le carbone suie :

- Bamako au Mali (12,6° N ; 8,0° W)
- Banizoumbou au Niger (13,5° N ; 2,6° W)
- Cotonou au Bénin (6,4° N ; 2,4° E)
- Dakar au Sénégal (14,7° N ; 17,4° W)
- Djougou au Bénin (9,8° N ; 1,6° E)
- Lamto en Côte d'Ivoire (6,2° N ; 5,0° W)
- Ouagadougou au Burkina Faso (12,4° N ; 1,5° W)

Par ailleurs, nous avons retenu également 3 sites sans aucune mesure. Ce sont des sites intéressants au vu de leur localisation. En effet, ces sites se situent dans des régions où les concentrations présentent des différences importantes entre le nouvel et l'ancien inventaire entre 2005 et 2030 (cf. figures 5.4 et 5.5). Ce sont :

- Lagos au Nigéria (6,5° N ; 3,4° E)
- Brazzaville au Congo (4,3° S ; 15,3° E)
- Johannesburg en Afrique du Sud (26,2° S ; 28,1° E)

Notons qu'en chaque site, nous présenterons les données de carbone suie et de carbone organique pour l'ensemble des simulations de 2005 et de 2030 (tableau 5.1).

5.5.3.2. Résultats relatifs aux sites retenus

Dans cette partie, nous proposons de répondre à la question suivante : est ce que les modifications ayant abouties à l'élaboration des nouveaux inventaires en 2005 et en 2030 ont un impact sur les concentrations simulées aux sites urbains. Si tel est le cas, les ordres de grandeur des concentrations obtenues sont t-elles en accord avec les mesures sur site ?

a) Sites urbains

* Mesures disponibles

La figure 5.6 présente l'évolution annuelle des concentrations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de carbone suie et de carbone organique à Bamako (Mali), à Cotonou (Bénin) et à Dakar (Sénégal) issues du modèle ORISAM-TM5 pour 2005 et 2030. Les mesures obtenues pour l'année 2005 y figurant, remarquons que nous ne nous attendons pas à ce que le modèle reproduise exactement les valeurs mesurées, car il s'agit de valeurs maximales en un site trafic qui correspondent à un point de mesure dans la ville. Ce qui importe ici, c'est l'ordre de grandeur et la tendance de ce paramètre.

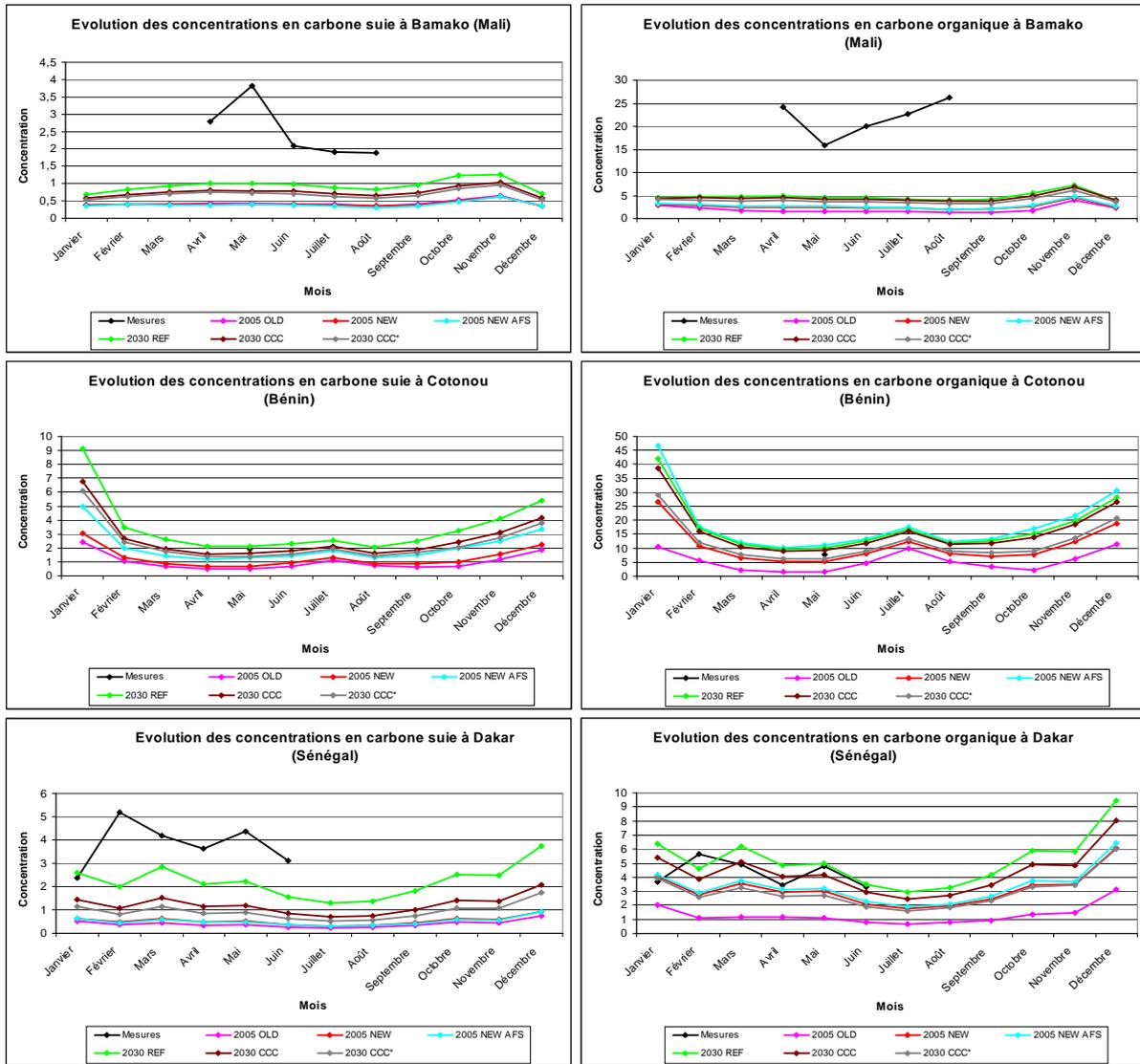


Fig. 5.6 : Evolution des concentrations annuelles (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de carbone suie et de carbone organique pour les années 2005 et 2030, pour les inventaires et les mesures (en noir), à Bamako (Mali), Cotonou (Bénin) et Dakar (Sénégal).

On relève deux types d'évolutions. Les villes où les concentrations varient selon une forme parabolique avec l'impact des feux de biomasse en début et en fin d'année, et les villes où les concentrations sont quasi-constantes toute l'année, sauf en fin d'année. Les concentrations simulées pour 2005 (NEW, NEW AFS et OLD) et 2030 (REF, CCC et CCC*) fournissent des valeurs moyennes qui diffèrent d'une ville à une autre, avec des concentrations de carbone organique toujours plus importantes que celles en carbone suie. Le tableau 5.2 présente les concentrations moyennes annuelles de carbone suie et de carbone organique des 6 simulations pour 2005 et 2030. Les rapports BC/OC ont été ajoutés.

Tableau 5.2 : Concentrations moyennes annuelles de carbone suie et de carbone organique pour 2005 et 2030 à Bamako, Cotonou et Dakar.

	2005			2030			Mesures		
	BC	OC	BC/OC	BC	OC	BC/OC	BC	OC	BC/OC
Bamako	0,4	2,4	0,17	0,8	4,4	0,18	2,5	21,8	0,11
Dakar	0,5	2,6	0,19	1,5	4,2	0,36	3,8	4,3	0,88
Cotonou	1,4	11,5	0,12	2,8	15,1	0,19	1,9	7,6	0,25

Au regard des concentrations de carbone suie et de carbone organique simulées en 2005 et 2030, Cotonou apparaît comme la ville la plus polluée, avec des concentrations de carbone suie deux fois plus importantes que celles des deux autres capitales, et trois fois plus importantes relativement au carbone organique. Par contre, en considérant les mesures sur les sites de trafic, c'est la capitale du Mali (Bamako) qui est la plus polluée avec un très faible ratio BC/OC, suivie de Cotonou. La raison tient au nombre important de deux roues à Bamako et à Cotonou, qui associés à de fortes valeurs de facteurs d'émissions pour le carbone organique donnent ces faibles ratios BC/OC. En outre, le niveau de pollution des capitales à partir des simulations et des mesures tient sans doute aussi à la résolution du modèle ($1^\circ \times 1^\circ$), qui favorise la dilution des concentrations. Il y a aussi la prise en compte de toutes les sources anthropiques dans tous les secteurs d'activités des inventaires utilisés lors des simulations, contrairement aux mesures qui reflètent la pollution d'un site « trafic ». Enfin, que ce soit avec les simulations ou les mesures, Dakar a les plus forts ratios BC/OC en 2005 et 2030, les émissions de diesel y étant prépondérantes (66% des émissions de BC contre 18% pour OC dans REF au Sénégal sont dues au diesel), occasionnant de relativement plus fortes émissions de carbone suie que de carbone organique, vu les facteurs d'émissions (e.g. $EF_{BC} = 5 \text{ g/kg}$ et $EF_{OC} = 2,5 \text{ g/kg}$ dans le trafic pour le diesel) qui pondèrent ces valeurs.

A1) Carbone suie

En 2005, les concentrations obtenues à Cotonou et à Dakar avec le nouvel inventaire (NEW) sont plus élevées qu'avec l'ancien inventaire (OLD) (figure 5.7). Par contre, à Bamako, les concentrations obtenues avec le nouvel inventaire (NEW) sont plus faibles que celles de l'ancien inventaire (OLD). Les évolutions relatives sont inférieures à 6% à Bamako, comprises entre +16% en Juillet et +46% en Octobre à Cotonou, et entre 24% en Décembre et 41% en Avril à Dakar. Par ailleurs, les concentrations de carbone suie mesurées sont plus importantes que celles simulées avec le nouvel inventaire. Les différences relatives donnent des valeurs de plus de 80% à Bamako, 64% à Cotonou (une seule mesure disponible) et 72%

à Dakar entre les mesures et les concentrations issues du nouvel inventaire. Ceci montre que le modèle ne peut pas reproduire les niveaux de concentrations de carbone suie comme évoqué pour les sites trafic caractérisés par des pics de pollution dus aux circulations routières et aux activités domestiques dans la journée. Pour clore notre analyse sur l'année 2005, notons qu'une hausse relative en moyenne de 64% entre concentrations simulées sur la base des scénarios NEW et NEW AFS (modification de la spatialisation en Afrique du Sud, tableau 5.1) est observée à Cotonou, tandis qu'ailleurs, la différence est faible (3% à Bamako et à Dakar). La raison tient à la situation géographique de Cotonou. En effet, Cotonou se situe à 6,4°N, tandis que les deux autres villes sont à des latitudes de 12,6° N et 14,7° N. Ainsi, les flux de mousson favoriseraient le transport des aérosols depuis l'Afrique du Sud jusqu'à Cotonou, contrairement à Dakar et Bamako qui subissent les flux d'harmattan. Cela se justifie également par la « perméabilité » du front intertropical (FIT), comme établi pendant la campagne AMMA (Barret et al., 2008).

En 2030, la simulation qui génère les plus fortes concentrations de carbone suie est : REF, suivie de CCC et de CCC*. Les concentrations simulées avec les inventaires 2030 (REF, CCC et CCC*) sont toujours supérieures à celles obtenues du nouvel inventaire 2005 NEW. Vu que les différents scénarios de 2005 sous-estimaient les concentrations observées, on réalise que les concentrations 2030 tendent à mieux reproduire les concentrations des mesures 2005 ! Les concentrations obtenues dans le scénario REF (resp. CCC*) sont en moyenne trois fois (resp. deux fois) supérieures à celles obtenues avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) aux trois sites. Ceci signifie que si l'on tient compte des réglementations, alors elles auront un effet significatif sur la qualité de l'air dans les villes.

A2) Carbone organique

En 2005, les concentrations de carbone organique issues du nouvel inventaire (NEW) sont plus élevées que celles obtenues avec l'ancien inventaire (OLD) à Bamako, à Cotonou, ainsi qu'à Dakar. Aussi, les évolutions relatives varient entre +7% en Janvier et 72% en Mai à Bamako, entre +26% en Juillet et +268% en Octobre à Cotonou et, entre +92% en Décembre et 213% en Mars à Dakar. Globalement, les concentrations mesurées dans ces trois villes donnent des valeurs supérieures à celles simulées avec le nouvel inventaire (NEW), sauf en Janvier 2005 à Dakar (+9%). Les différences relatives entre les concentrations simulées avec le nouvel inventaire (NEW) par rapport aux mesures donnent des valeurs comprises entre 84% et 93% à Bamako, 32% à Cotonou (une seule mesure disponible) et entre 14% et 51% à Dakar. Ceci montre que le modèle ne parvient pas à reproduire les niveaux de concentrations

en carbone organique à Bamako, mais se rapproche de celles obtenues à Cotonou et à Dakar. Par ailleurs, comme pour le carbone suie, on observe de grandes différences entre concentrations simulées avec les inventaires NEW et NEW AFS (modification de la spatialisation en Afrique du Sud, tableau 5.1) de près de 79% à Cotonou contre seulement ~5% à 6% à Bamako à Dakar.

En 2030, le classement des scénarios par ordre de concentrations décroissantes est identique à celui obtenu pour le carbone suie : REF, CCC et CCC* avec de fortes valeurs de concentrations en carbone organique plus proches de celles mesurées en 2005, sauf à Bamako où les différences restent grandes (88% par rapport aux mesures). Ces résultats mettent en évidence l'importance des niveaux de pollution dans certaines capitales africaines, avec tous les problèmes qui en découlent (problèmes de santé publique notamment). Les différences relatives entre les concentrations obtenues avec les scénarios CCC et CCC* sont d'environ -12% à Bamako, -26% à Cotonou et -32% à Dakar. Ces résultats sont surprenants, car l'impact différentiel entre CCC et CCC* reste moins important à Bamako et Cotonou qu'à Dakar. La réponse probable à ce constat semble venir du fait que la substitution des engins à deux roues ayant un moteur à deux temps aux véhicules à moteur à 4 temps, aurait un impact plus important sur les pays « limitrophes » des pays ayant un parc conséquent de 2 roues. En effet par exemple, à Lomé (Togo avec 129756 deux roues en 2005), l'impact est de 18% tandis qu'il est de 26% à Cotonou (Bénin avec 555588 deux roues en 2005). Cependant, les comparaisons entre concentrations simulées avec les inventaires de 2030 (REF et CCC*) et le nouvel inventaire 2005 (NEW) montrent que les valeurs obtenues avec l'inventaire REF sont en moyenne 1,7 fois supérieures à celles du nouvel inventaire 2005 (NEW) aux trois sites. Par contre, les concentrations simulées avec le scénario CCC* sont proches de celles obtenues avec le nouvel inventaire 2005 (NEW). Ainsi, en remplaçant les moteurs deux temps par des moteurs quatre temps des véhicules à deux roues (CCC*), on améliorera considérablement la baisse du niveau de concentrations dans le futur. Ce constat est en phase avec le programme initié par l'Union Européenne depuis 2005 au Bénin qui finance le remplacement des 2 temps par des 4 temps.

* Mesures non disponibles

Comme évoqué, en début de paragraphe (p. 180), nous considérons trois sites sans où il est important d'apprécier les impacts des changements d'émissions anthropiques. Nous présentons ainsi sur la figure 5.7, l'évolution annuelle des concentrations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de

carbone suie et de carbone organique dans les villes de Johannesburg (Afrique du Sud), Lagos (Nigeria) et Brazzaville (Congo). Le choix de Johannesburg est lié non seulement aux fortes émissions observées en Afrique du Sud, mais aussi aux nouvelles données d'émissions (spatialisation améliorée dans le scénario NEW AFS, cf tableau 5.1). Brazzaville a été choisie en raison de sa localisation en zone de feux intenses de biomasse en été (Juillet-Août-Septembre) de l'hémisphère Nord. La ville de Lagos a été retenue en raison des fortes concentrations de polluants carbonés observées au Nigéria dans le nouvel inventaire (cf. figures 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4).

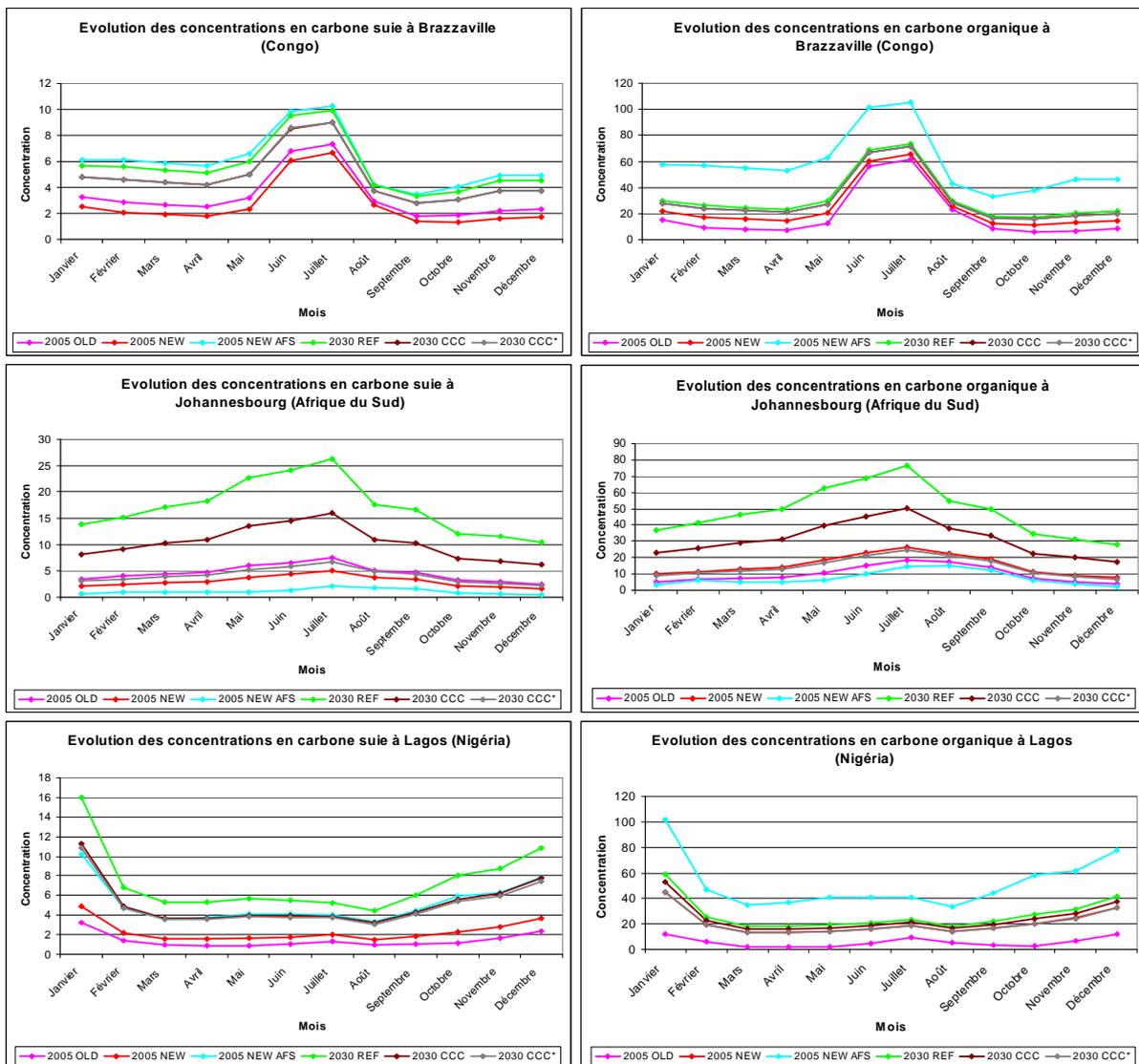


Fig. 5.7 : Evolution des concentrations annuelles (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de carbone suie et de carbone organique durant les années 2005 et 2030 entre différents inventaires, à Johannesburg (Afrique du Sud), Lagos (Nigeria) et Brazzaville (Congo).

A Brazzaville et à Johannesburg, on observe des concentrations quasi-constantes en cours d'année, sauf entre Juin et Juillet, du fait de l'impact des feux de biomasse. Lagos, capitale du Nigéria, connaît de fortes valeurs de concentrations en aérosols en Janvier-Février et en Novembre-Décembre. On retrouve bien l'influence des feux de biomasse pendant l'hiver de l'hémisphère Nord. De manière détaillée, les concentrations simulées en 2005 (NEW, NEW AFS et OLD) et en 2030 (REF, CCC et CCC*) donnent des valeurs moyennes qui diffèrent d'une ville à une autre, avec des concentrations moyennes en carbone organique cinq fois plus importantes que celles en carbone suie. Le tableau 5.3 présente les concentrations moyennes annuelles de carbone suie et de carbone organique des six simulations pour 2005 et 2030, ainsi que les rapports BC/OC.

Tableau 5.3 : Concentrations moyennes annuelles de carbone suie et de carbone organique à Lagos, Johannesburg et Brazzaville.

	2005			2030		
	BC	OC	BC/OC	BC	OC	BC/OC
Brazzaville	4	33,8	0,12	5,1	30,7	0,17
Johannesbourg	2,9	10,9	0,27	10,5	31,3	0,34
Lagos	3	26	0,12	5,8	24	0,24

Le constat pour ce qui est des évolutions de concentrations de carbone organique entre 2005 et 2030 est différent de celui évoqué aux sites urbains précédents. Tandis que les concentrations de carbone suie augmentent entre 2005 et 2030, les concentrations de carbone organique baissent, sauf à Johannesburg. Globalement, le ratio BC/OC augmente entre 2005 et 2030, traduisant la part de plus en plus importante du carbone suie. Toutefois, en 2005, Brazzaville apparaît comme la ville la plus polluée en carbone suie et en carbone organique tandis qu'en 2030, c'est Johannesburg qui présente des niveaux de concentrations de carbone suie deux fois plus élevées que ceux de Brazzaville et Lagos.

A1) Carbone suie

Les concentrations 2005 obtenues avec le nouvel inventaire (NEW) sont plus importantes que celles obtenues avec l'ancien inventaire (OLD) à Lagos, contrairement à Brazzaville et Johannesburg. Les différences relatives entre les concentrations obtenues avec le scénario NEW par rapport au scénario OLD sont comprises entre -30% en Avril et -10% en Juillet à Brazzaville, entre -39% en Février et -27% en Août à Johannesburg et entre +47 en Juillet et +98% en Octobre à Lagos. Par ailleurs, à Johannesburg, les concentrations simulées dans le

scénario NEW sont plus élevées que celles obtenues avec l'inventaire NEW AFS (> 50%). Ce résultat est cohérent avec les émissions calculées via les deux spatialisations car les émissions de carbone suie sont évaluées à Johannesburg à 787 tonnes dans le scénario NEW, contre 35 tonnes dans le scénario NEW AFS.

En 2030, les concentrations de carbone suie les plus élevées sont issues du scénario REF, suivi du scénario CCC et du CCC*. Les différences relatives entre concentrations simulées avec les scénarios CCC et CCC* sont quasi-nulles à Brazzaville (< 0,5%). Ces faibles écarts s'expliquent par le fait que le Congo (donc Brazzaville) n'est pas concerné par les modifications apportées dans l'élaboration du scénario CCC*. On constate également que les écarts entre ces deux scénarios (CCC et CCC*) sont faibles à Lagos. (< 5%). Considérant les émissions relatives aux scénarios CCC et CCC*, on constate que les émissions de carbone suie dans CCC sont plus importantes de 4% que celles de CCC*. Par contre, les écarts sont plus conséquents à Johannesburg (entre -62% et -56%). Cette forte différence à Johannesburg est expliquée par la baisse des émissions domestiques et industrielles (charbon noir et bois) en Afrique du Sud dans le scénario CCC*. Toutefois, les concentrations simulées avec les inventaires 2030 (REF, CCC et CCC*) restent supérieures à celles obtenues avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) tout au long de l'année. Les concentrations de carbone suie obtenues ainsi avec le scénario REF (resp. CCC*) sont en moyenne 4 fois (resp. 2 fois) plus importantes que celles obtenues avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) aux trois sites. Ceci montre que malgré les hausses de concentrations entre 2005 et 2030, des restrictions sur les émissions seront efficaces, surtout avec la prise en compte de l'Afrique du Sud en tant que pays semi développé.

A2) Carbone organique

En 2005 (figure 5.8), les concentrations de carbone organique issues du nouvel inventaire (NEW) sont plus importantes que celles avec l'ancien inventaire (OLD) dans les trois villes (Brazzaville, Johannesburg et Lagos). Les différences entre concentrations issues de ces deux inventaires (NEW et OLD) sont variables en cours d'année. Ainsi, les différences relatives varient respectivement entre +6% en Juillet et +103% en Avril à Brazzaville, entre +30% en Août et +100% en Décembre à Johannesburg et enfin entre +99% en Juillet et +746% en Octobre à Lagos. Ces différences illustrent toute l'importance des mises à jour que j'ai effectuées sur les inventaires anthropiques en Afrique. Par ailleurs, on observe de grandes différences entre les concentrations simulées avec les inventaires NEW et NEW AFS. Toutefois, ce n'est qu'à Johannesburg que les concentrations simulées avec le nouvel

inventaire (NEW) sont supérieures à celles obtenues avec l'inventaire NEW AFS (> 33%), comme pour le carbone suie. Ce résultat est cohérent avec les émissions de carbone organique calculées à Johannesburg, soit 3127 tonnes dans le scénario NEW et 172 tonnes dans le scénario NEW AFS. Dans les deux autres villes, les nouvelles concentrations obtenues (NEW AFS) sont plus importantes que celles obtenues à partir de l'inventaire NEW, de plus de 60% à Brazzaville et 115% à Lagos. Les différences entre ces deux simulations tiennent à la spatialisation. Ceci montre que le transport, de même que les dépôts (humide et sec), sont à l'origine de ces observations aux sites éloignés de Johannesburg. Ainsi, on constate que Lagos et Brazzaville sont sous l'influence de Johannesburg.

En 2030, les différences entre les concentrations de carbone organique simulées à partir des deux inventaires CCC et CCC* sont fortes à Johannesburg (plus de 40%). Par contre, à Lagos, ces différences ne dépassent guère 20%. On n'observe aucune différence à Brazzaville, ce qui est normal car les modifications apportées dans le scénario CCC* n'affectent que l'Afrique du Sud. De manière générale, on remarque que les différences entre les trois inventaires du futur sont faibles à Brazzaville (< 10%), un peu plus importantes à Lagos (< 25%) et significatives à Johannesburg, la ville la plus impactée par les contrôles et les mesures de restrictions sur les émissions. Ce classement est une conséquence directe des modifications introduites dans l'inventaire CCC et CCC* par rapport à REF. En effet, en 2030, l'Afrique du Sud, pays semi développé dans notre scénario CCC*, est doté des mêmes facteurs d'émissions que ceux des pays développés, tandis que le Congo et le Nigéria ont des facteurs d'émissions typiques de pays semi-développés (tout comme dans CCC). Par ailleurs, les comparaisons entre les concentrations simulées avec l'inventaire CCC* et avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) montrent que les valeurs obtenues avec l'inventaire CCC* sont sensiblement égales à celles obtenues avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) à Johannesburg et Lagos. C'est un résultat très intéressant qui montre que des réglementations appliquées strictement peuvent réduire considérablement les concentrations de carbone organique en 2030, jusqu'à atteindre à nouveau les niveaux simulés de 2005.

b) Sites ruraux

Dans cette partie, nous nous intéressons à 3 sites ruraux présentés précédemment (cf. 5.4.4.1). Il s'agit de Banizoumbou (Niger), Djougou (Bénin) et Lamto (Côte d'Ivoire) qui sont distants de leurs capitales de 54 km pour Banizoumbou-(Niamey), 327 km pour Djougou-(Cotonou) et 148 km pour Lamto-(Abidjan). Notre objectif est d'estimer si les changements anthropiques et la pollution urbaine (cf. paragraphes précédents) ont un impact sur ces sites ruraux. La figure

5.8 montre l'évolution annuelle des concentrations (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) en carbone suie et en carbone organique au cours des années 2005 et 2030, sur la base des différents inventaires (cf. tableau 5.1). Les valeurs obtenues, issues de la modélisation, sont comparées aux mesures.

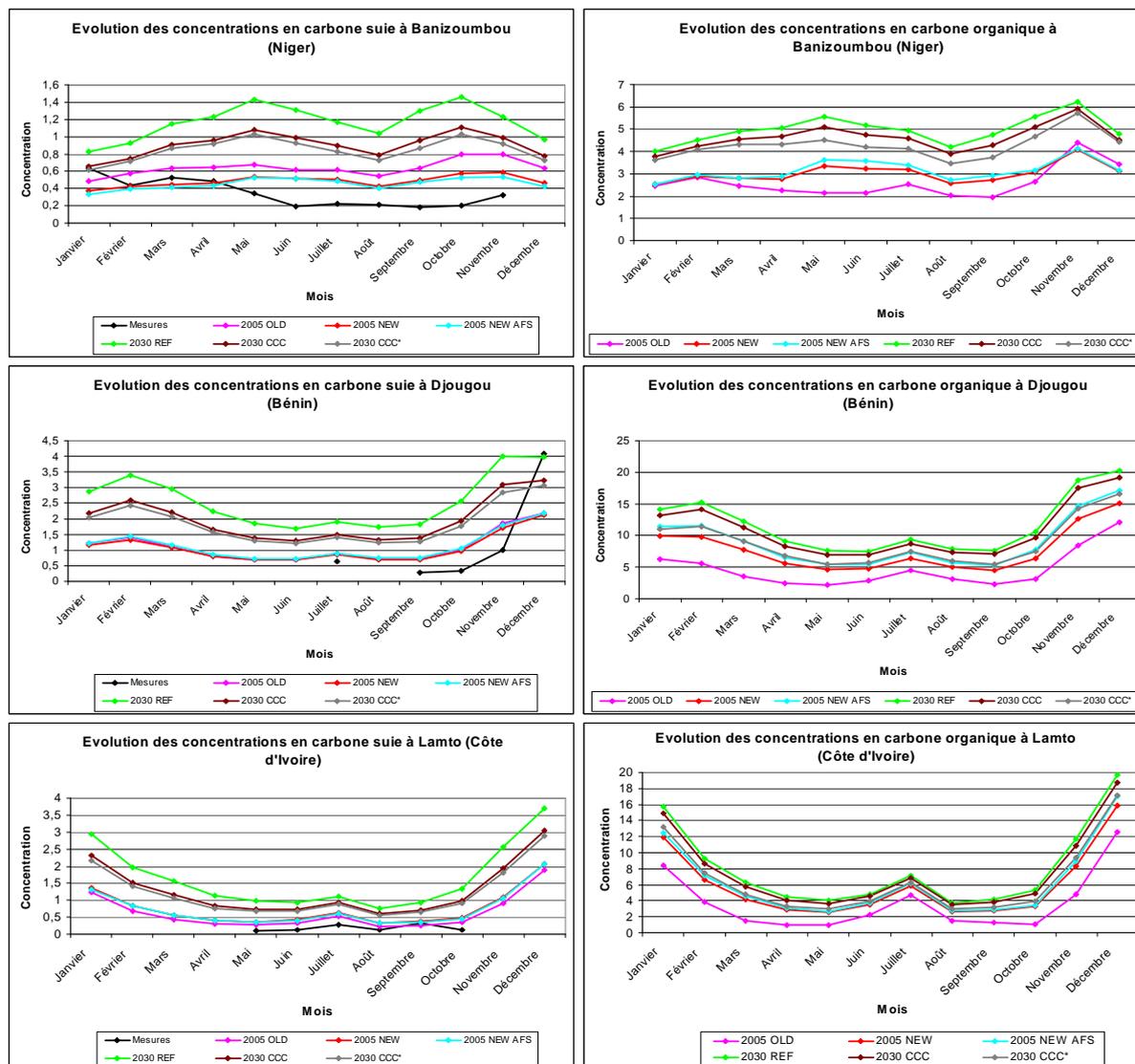


Fig. 5.8 : Evolution des concentrations annuelles (*en $\mu\text{g}/\text{m}^3$*) de carbone suie (à gauche) et de carbone organique (à droite) durant les années 2005 et 2030 sur la base des inventaires, à Djougou (Bénin), Banizoumbou (Mali) et Lamto (Côte d'Ivoire). Comparaison avec les mesures (en noir).

Sur la figure 5.8, on relève deux types d'évolutions des concentrations. Djougou et Lamto ont des concentrations qui sont modulées par la saison des feux de biomasse, avec des valeurs maximales en Janvier-Février, et en Novembre-Décembre. Les concentrations au site de Banizoumbou sont plutôt sous influence anthropique (biofuels tout particulièrement), avec

une faible contribution des feux de biomasse. Le tableau 5.4 présente les concentrations moyennes annuelles de carbone suie et de carbone organique pour les 6 simulations de 2005 et 2030, ainsi que les rapports BC/OC.

Tableau 5.4 : Concentrations moyennes annuelles de carbone suie et de carbone organique à Banizoumbou, Djougou et Lamto.

	2005			2030			Mesures		
	BC	OC	BC/OC	BC	OC	BC/OC	BC	OC	BC/OC
Banizoumbou	0,5	2,9	0,17	1	4,6	0,22	0,3	/	/
Djougou	1,1	7,1	0,15	2,1	10,5	0,20	1,3	/	/
Lamto	0,7	5,2	0,13	1,4	7,4	0,19	0,2	/	/

Au vu des concentrations de carbone suie et de carbone organique, c'est Djougou qui est le site le plus pollué, suivi de Lamto et de Banizoumbou. Ainsi, les sites ruraux sont impactés par la pollution urbaine en différentes proportions. Ceci montre que la localisation des sites par rapport aux vents dominants est très important, car par exemple Djougou est non seulement sous l'influence des vents de mousson qui transporte la pollution depuis Cotonou, mais aussi des vents d'Est qui advectent les aérosols de combustion des feux de biomasse. En outre, les rapports BC/OC sont sensiblement égaux aux 3 sites en 2005 et en 2030, avec cependant une légère hausse de ces ratios de 2005 à 2030. Cette hausse s'explique par des concentrations de carbone suie en augmentation de près de 100% entre 2005 et 2030 par rapport aux hausses du carbone organique (~48%), modifiant ainsi la qualité de l'aérosol et plus tard sa réponse radiative (particule plus absorbante). Notons que les concentrations simulées sont du même ordre de grandeur que les mesures de concentrations de carbone suie, alors qu'avec le carbone organique, les différences sont conséquentes (tableau 5.4).

A1) Carbone suie

En 2005, les concentrations de carbone suie obtenues avec le nouvel inventaire (NEW) sont inférieures à celles obtenues avec l'ancien inventaire (OLD) à Banizoumbou (20%) et Djougou (4%), tandis qu'on observe l'inverse à Lamto (25%). Vu les distances qui séparent ces sites ruraux de leurs capitales, on peut évoquer le fait que la pollution urbaine a un impact sur les sites ruraux. Les concentrations obtenues en 2005 à partir des inventaires NEW et NEW AFS sont sensiblement les mêmes en chaque site, pour le carbone suie et pour le carbone organique (<8%). Par ailleurs, en 2030 les plus fortes concentrations de carbone suie sont obtenues avec l'inventaire REF, suivies des concentrations obtenues par les scénarios

CCC et CCC*. Les différences entre les concentrations simulées à partir des scénarios CCC et CCC* sont faibles sur les trois sites (moins de 7%), mettant ainsi en évidence que les dispositions prises pour la substitution des véhicules quatre temps aux véhicules deux temps ont peu d'impact sur les concentrations rurales en carbone suie. Cependant, les concentrations simulées avec nos trois inventaires du futur (REF, CCC et CCC*) restent largement supérieures à celles obtenues en 2005. En effet, les concentrations avec le scénario REF (resp. CCC*) sont en moyenne 2,4 fois (resp. 1,7 fois) supérieures à celles avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) aux trois sites. Les mesures de restrictions (CCC et CCC*) ont donc un impact avéré sur les sites ruraux de 2005 à 2030.

A2) Carbone organique

L'analyse faite sur le carbone organique est analogue à celle du carbone suie. En 2005, les concentrations avec le nouvel inventaire (NEW) sont supérieures à celles de l'ancien inventaire (OLD), en proportions diverses aux trois sites, à l'exception des mois de Novembre et Décembre à Banizoumbou (~ -8%). Les différences entre les concentrations NEW et OLD sont observées en général toute l'année, avec des valeurs inférieures à 55% en Mai pour Banizoumbou, comprises entre 25% en Décembre et 123% en Avril à Djougou, et entre 24% en Juillet et 218% en Octobre à Lamto. Par contre, les différences entre les concentrations NEW et NEW AFS restent faibles à Banizoumbou et Lamto (<6%), mais atteignent 16% à Djougou. Pour plus de précision, nous avons quantifié l'impact de ces deux simulations (NEW et NEW AFS) sur les sites urbains susceptibles de les influencer. Nous obtenons des impacts faibles à Abidjan et à Niamey (< 15%) et de plus forts impacts à Cotonou (79%), ce qui est cohérent avec nos résultats relevés précédemment à Djougou.

En 2030, les différences de concentrations issues des simulations dans les deux scénarios du futur (REF et CCC) sont inférieures à 8% aux trois sites. De plus, la comparaison entre résultats obtenus à partir des inventaires CCC et CCC* donnent des différences inférieures à 20% aux 3 sites (7% pour Banizoumbou, 14% pour Lamto et 19% pour Djougou). Ces valeurs montrent que les différences sont bien liées au nombre de véhicules à deux roues en circulation dans le pays (cf. tableau 3.3 du chapitre 3). Ainsi, plus il y a de véhicules deux roues et plus l'impact dans le scénario CCC* est grand.

Les concentrations obtenues avec les trois scénarios 2030 restent cependant supérieures à celles de 2005. Ainsi, les concentrations de carbone organique sur les 3 sites obtenues avec l'inventaire REF (resp. CCC*) sont en moyenne 1,5 fois (resp. 1,2 fois) plus importantes que celles obtenues avec le nouvel inventaire 2005 (NEW). Les valeurs de 2030 (REF, CCC et

CCC*), proches de celles de 2005, peuvent expliquer le faible impact des sites urbains sur les sites ruraux (impact plus faible que pour le carbone suie où REF est 2,4 fois (resp.) 1,7 fois plus important que 2005 NEW), ainsi que les concentrations de 2030 qui sont du même ordre de grandeur que celles des feux de biomasse de 2005.

5.5.3.3. Conclusion partielle

Au vu de l'ensemble des résultats relatifs à l'évolution des concentrations de carbone suie et de carbone organique, on constate que nous pouvons regrouper ces sites en 3 grands groupes de même profil. Le premier groupe concerne les pays du Golfe de Guinée, avec la particularité de présenter un maximum de concentration en saison sèche (Décembre à Février). Cette période correspond à une intense activité des feux de brousse allumés souvent par les agriculteurs pour préparer leurs champs de cultures. Le deuxième groupe concerne les pays Sahéliens (au-delà de 15°N). Il s'agit du Mali, du Burkina Faso et du Niger. Ces pays se caractérisent par des concentrations en aérosols carbonés qui varient peu de Janvier à Septembre et augmentent fortement (près de 75%) jusqu'en Octobre pour revenir en Décembre aux valeurs de Janvier peu impactées par les feux de biomasse. Le troisième groupe rassemble les pays d'Afrique Centrale et Australe. Il s'agit du Cameroun, du Congo et de l'Afrique du Sud où on observe des pics de concentrations d'aérosols autour de la période allant de Mai à Août, qui correspond à la saison sèche de l'hémisphère Sud associée à d'intenses feux de végétation ruraux.

Les concentrations simulées avec le nouvel inventaire ont donné des résultats satisfaisants par rapport aux mesures pour les sites ruraux, moins bons pour les sites urbains pour de nombreuses raisons que nous avons évoquées. Nos résultats ont également mis en exergue l'impact de la pollution urbaine des villes africaines affectant les zones rurales. Certaines villes, de même que certains sites tels que Cotonou, Dakar, Lagos et Lamto, apparaissent en tant que zones où les restrictions d'émissions ont un fort impact, à tel point que les concentrations de carbone organique obtenues en 2030 (scénario CCC* du tableau 5.1) pourraient diminuer et égaler celles de 2005. En conclusion, on a pu voir que ces inventaires gouvernement dans une certaine mesure les concentrations d'aérosols en Afrique et, auront certainement un impact sur leurs propriétés radiatives.

5.5.4. Estimations des propriétés radiatives des aérosols carbonés dans ORISAM-TM5

Je présente dans cette partie le calcul des épaisseurs optiques (AOD) et de l'albédo de simple diffusion (SSA) sur la base des résultats du modèle TM5. Le calcul de ces deux paramètres a été développé et les relations correspondantes présentées au chapitre 1. Les paramètres utilisés pour le calcul des AOD et du SSA sont présentés dans le tableau 5.5. Il s'agit de l'albédo de simple diffusion (SSA) et de la section efficace d'extinction α_{λ}^{ext} relative à l'absorption et à la diffusion de particules hydrophiles et hydrophobes. Leur détermination pour les particules hydrophiles et hydrophobes s'est faite sur la base des valeurs extraites de Solmon et al. (2006).

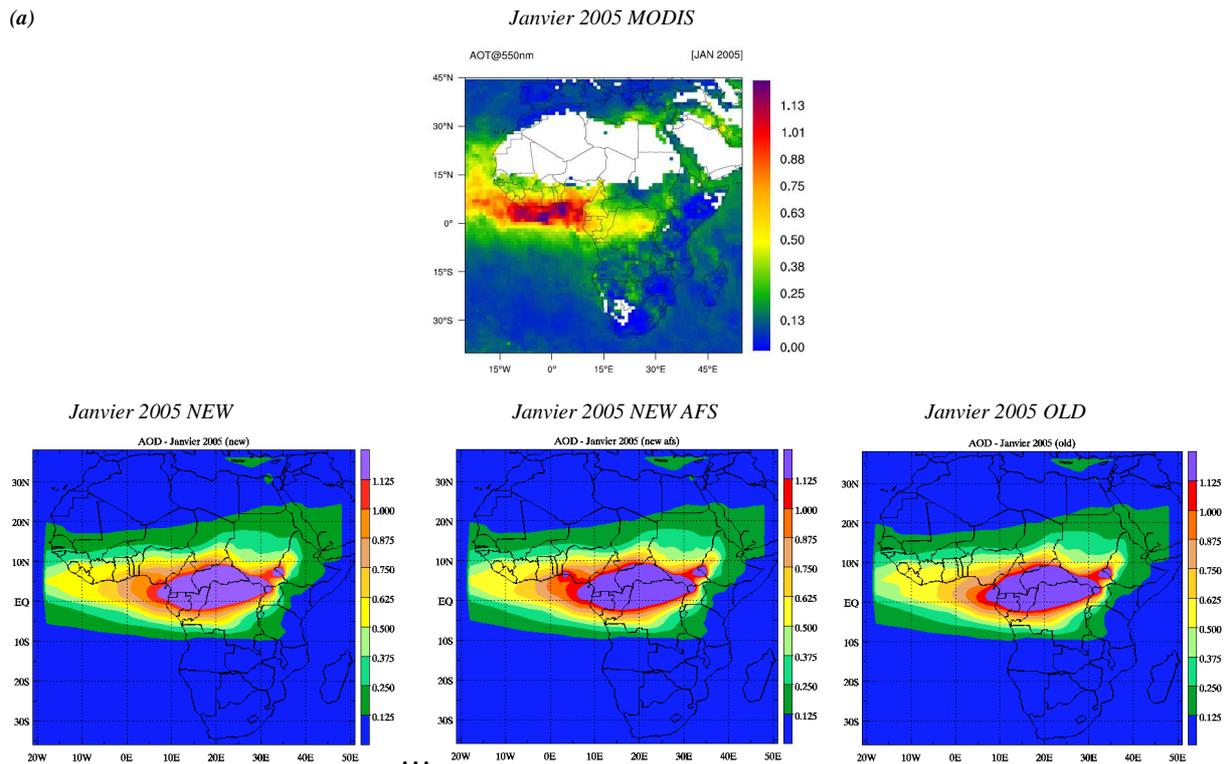
Tableau 5.5 : Paramètres utilisés pour le calcul de l'épaisseur optique et de l'albédo de simple diffusion à 550 nm du carbone suie et du carbone organique (Solmon et al., 2006).

	SSA	$\alpha_{\lambda, \text{diffusion}}^{ext}$		$\alpha_{\lambda, \text{absorption}}^{ext}$	
		Particules hydrophiles	Particules hydrophobes	Particules hydrophiles	Particules hydrophobes
BC	0,39	4,67	3,70	5,90	5,90
OC	0,92	4,50	2,48	0,22	0,22

5.5.4.1. Epaisseurs optiques (AOD)

Les distributions spatiales des AOD simulées avec ORISAM-TM5 ont été comparées aux distributions spatiales des AOD observées par le satellite MODIS en 2005 pour les mois de Janvier et de Juillet à la longueur d'onde de 550 nm (cf. figure 5.9). Il s'agit des AOD obtenues à partir des simulations relatives aux scénarios NEW, NEW AFS et OLD.

(a)



(b)

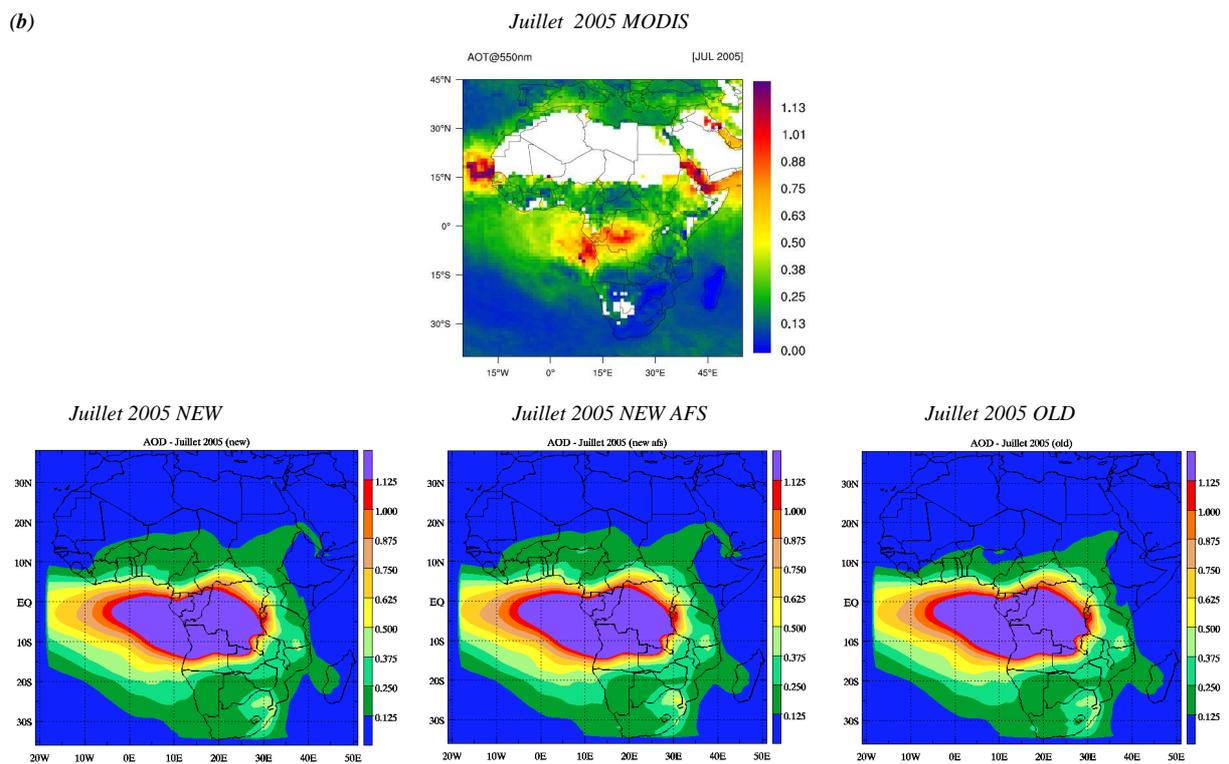


Fig. 5.9 : Comparaison pour les mois de Janvier 2005 (a) et Juillet 2005 (b) entre AOD issues du satellite MODIS et AOD simulées par ORISAM-TM5 : NEW, NEW AFS et OLD à 550 nm.

Du point de vue des localisations, les fortes valeurs d'AOD données par le satellite MODIS sont réparties le long du Golfe de Guinée en Janvier (essentiellement sur mer) et en Afrique Centrale en Juillet. Des travaux antérieurs ont montré que les modèles ne parvenaient pas à reproduire les pics du Golfe de Guinée. Ces défauts de localisation sont récurrents dans les études de modélisation des propriétés radiatives. En effet, Malavelle et al. (2010), avec un modèle climatique régional (RegCM) ont procédé à une étude régionale des propriétés optiques des aérosols en Afrique de l'Ouest. Ils ont montré que l'extension des maxima des épaisseurs optiques sur l'Océan Atlantique (Golfe de Guinée) n'est pas bien reproduite par le modèle régional. Les mêmes limitations ont été observées par Liou et al. (2010) sur le Golfe de Guinée avec le modèle ORISAM-TM4. La question posée ici est de savoir si un « meilleur » inventaire anthropique peut permettre une meilleure reproduction des pics sur le Golfe de Guinée. Avant de répondre à cette interrogation, rappelons que pour les trois simulations pour lesquelles nous avons calculé les AOD, les données d'émissions de feux de biomasse sont identiques. Ainsi, les différences observées sont uniquement dues aux émissions anthropiques et donc, aux modifications effectuées par l'élaboration de nos nouveaux inventaires (NEW et NEW AFS avec une meilleure spatialisation). Dans notre étude, les AOD simulées sont du même ordre de grandeur que celles de MODIS. On relève que les valeurs maximales d'AOD simulées avec le modèle ORISAM TM5 sont observables sur les régions de feux de biomasse, que ce soit en Janvier ou en Juillet. De nouveau, on n'observe pas la même localisation des pics d'AOD avec le modèle ORISAM TM5 et le satellite MODIS sauf avec le scénario NEW AFS. Les raisons de ce mauvais positionnement des maxima d'AOD malgré l'amélioration des inventaires anthropiques sont diverses et concernent aussi bien le modèle que le satellite MODIS. Ainsi, les grandes dispersions d'AOD simulées sur les régions à fortes émissions de feux de biomasse et les plus faibles valeurs sur le Golfe de Guinée peuvent être expliquées par :

- Le dépôt (humide et/ou sec), qui pourrait être sous-estimé dans le modèle.
- La faible intensité du vent dans la couche limite (de la surface à 850 hPa), entraînant un faible transport longitudinal.
- La prise en compte partiel des aérosols en les réduisant uniquement au carbone suie et au carbone organique dans les simulations (absence de poussières désertiques et de sulfates).
- La mauvaise reconstitution des AOD par MODIS due à la présence de nuages (e.g. sur la ZCIT).

Plus précisément, les comparaisons entre les AOD des simulations NEW, NEW AFS et OLD (figure 5.10) montrent peu de différences entre les simulations NEW et OLD, contrairement à NEW AFS dans laquelle les AOD augmentent sur le Golfe de Guinée. Cela est dû vraisemblablement aux fortes concentrations d'aérosols transportés depuis l'Afrique du Sud jusqu'à ces latitudes (Golfe de Guinée). Quant à la figure 5.10, elle présente les AOD simulées avec le modèle ORISAM-TM5 pour 2030, en Janvier et en Juillet dans nos 3 simulations définies précédemment (REF, CCC et CCC*).

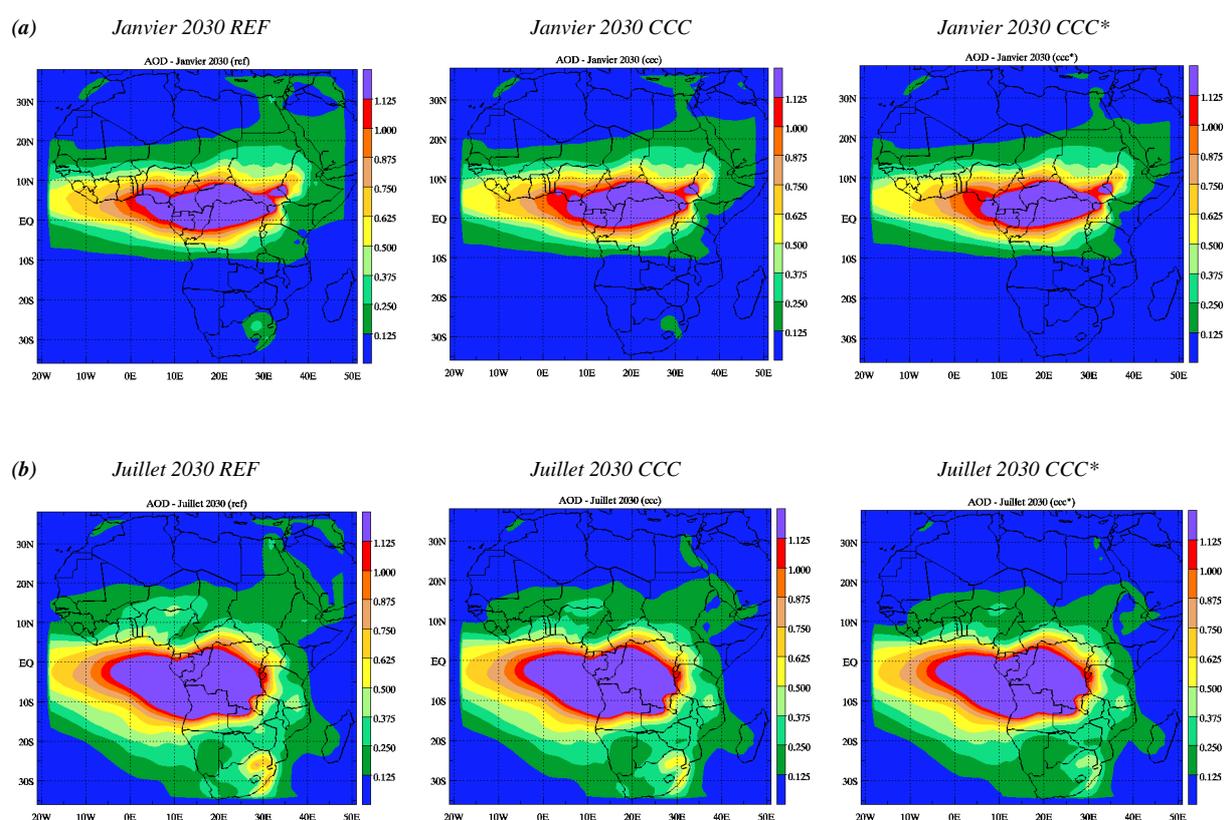


Fig. 5.10 : Comparaison entre les AOD simulées par ORISAM-TM5 en 2030 (REF, CCC et CCC*) pour les mois de Janvier (a) et de Juillet (b) à 550 nm.

Comme on pouvait s'y attendre, les trois simulations présentent les mêmes fortes valeurs d'AOD sur les zones de feux de biomasse en 2030 et dans les simulations de 2005 (NEW, NEW AFS et OLD). Par contre, les valeurs d'AOD près des côtes guinéennes et en Afrique du Sud ont augmenté de 50% entre les simulations 2005 (NEW) et les projections de 2030 (REF). Les simulations CCC et CCC* avec des émissions régulées permettent de diminuer les AOD sur le littoral Ouest Africain, particulièrement en Afrique du Sud (-34% par rapport à REF). (cf. figure 5.10). Il ressort également de l'analyse de la figure 5.10, qu'avec les AOD

simulées en 2030 (surtout avec 2030 REF), on retrouve de fortes valeurs d'AOD sur le Golfe de Guinée, plus proches de celles observées par le satellite MODIS en 2005. Ceci est intéressant car en cohérence avec les résultats précédents qui ont montré que les concentrations simulées de carbone suie en 2030 étaient du même ordre de grandeur que les mesures de 2005. Pour mieux évaluer l'impact des différents inventaires sur les AOD, nous présentons sur la figure 5.12 les valeurs d'AOD simulées par TM5 à 440 nm pour le mode fin ($PM_{2.5}$), pour les années 2005 et 2030, que nous comparons aux AOD mesurées dans le réseau AERONET. Nous avons sélectionné six sites dont quatre en Afrique de l'Ouest (Banizoumbou, Dakar, Djougou et Ilorin) et deux en Afrique Australe (Mongu et Skukuza) avec les caractéristiques suivantes :

- Banizoumbou au Niger ($13,5^{\circ}$ N ; $2,6^{\circ}$ W)
- Dakar au Sénégal ($14,7^{\circ}$ N ; $17,4^{\circ}$ W)
- Djougou au Bénin ($9,8^{\circ}$ N ; $1,6^{\circ}$ E)
- Ilorin au Nigéria ($8,32^{\circ}$ N ; $4,34^{\circ}$ E)
- Mongu en Zambie ($15,25^{\circ}$ S ; $23,15^{\circ}$ E)
- Skukuza en Afrique du Sud ($24,99^{\circ}$ S ; $31,59^{\circ}$ E)

Contrairement aux résultats sur les données de concentrations et comme pour les données MODIS, l'épaisseur optique AERONET tient compte de toutes les particules de la colonne atmosphérique, notamment les aérosols issus des feux de biomasse que l'on retrouve entre 850 hPa et 500 hPa (Mallet et al., 2009). La variabilité spatio-temporelle des épaisseurs optiques montre donc que les atmosphères rencontrées ont des concentrations en aérosols très variables, avec de fortes valeurs d'épaisseurs optiques qui permettent de situer les moments d'intenses feux de biomasse.

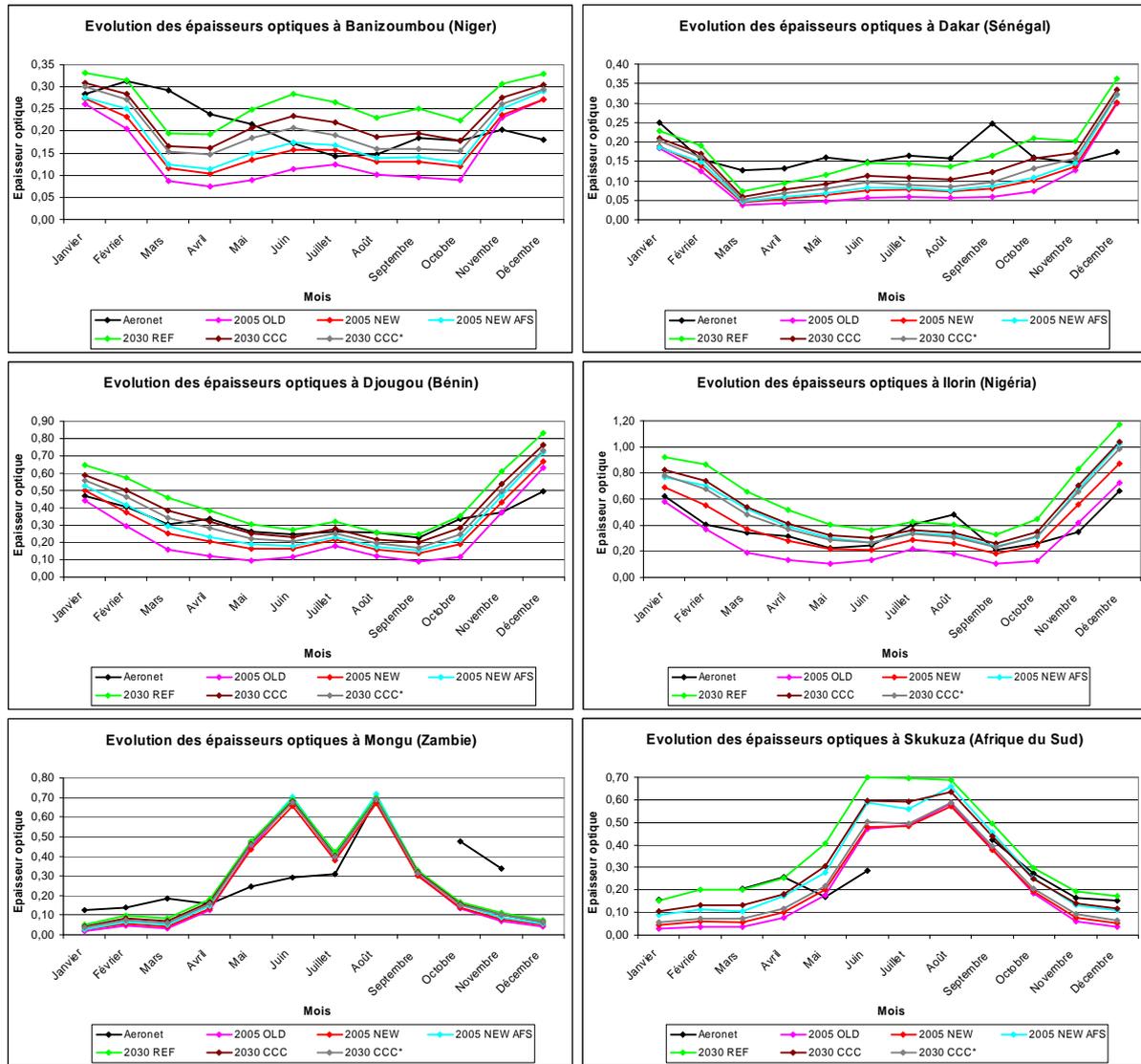


Fig. 5.11 : Evolution des épaisseurs optiques (AOD) à 440 nm simulées par le modèle ORISAM-TM5 en 2005 (NEW, NEW AFS et OLD) et en 2030 (REF, CCC et CCC*). Comparaison avec les épaisseurs optiques du mode fin du réseau AERONET.

Comme attendu, les épaisseurs optiques calculées avec nos inventaires 2005 et 2030 présentent une forte variabilité interannuelle d'un site à un autre. Cela correspond d'une part à la variabilité des émissions des feux de biomasse avec des maxima entre Juin et Aout dans l'hémisphère Sud (Mongu et Skukuza) et entre Janvier-Février et Novembre-Décembre dans l'hémisphère Nord (Banizoumbou, Dakar, Djougou et Ilorin). Les émissions anthropiques doivent également avoir un impact et c'est ce que nous allons étudier à présent, dans la mesure où les émissions de feux de biomasse sont constantes pour toutes nos simulations. Les épaisseurs optiques simulées avec le nouvel inventaire 2005 (NEW) sont systématiquement supérieures à celles obtenues avec l'ancien inventaire (OLD) aux quatre sites de l'hémisphère

Nord. Les écarts relatifs sont en moyenne de +26% à Banizoumbou, +23% à Dakar, +39% à Djougou et +62% à Ilorin. Par contre, à Mongu et Skukuza, il y a peu d'écart entre épaisseurs optiques obtenues avec les inventaires NEW et OLD. La comparaison entre épaisseurs optiques obtenues à partir de l'inventaire NEW AFS et NEW montre que le premier inventaire (NEW AFS) présente des épaisseurs optiques plus élevées que celles de l'inventaire NEW sur tous les 6 sites comme pour MODIS. Les différences les plus fortes entre épaisseurs optiques relevées en utilisant ces deux inventaires sont obtenues à Skukuza en Afrique du Sud, avec près de 85% de différence entre Janvier et Avril. Les épaisseurs optiques simulées en 2005 avec les différents scénarios (NEW, NEW AFS et OLD) sont la plupart du temps inférieures à celles du réseau AERONET au cours de l'année 2005, sauf en Décembre où les valeurs sont comparables (< 7% sauf à Skukuza avec 66%). Les écarts maxima entre épaisseurs optiques simulées (NEW) et celles du réseau AERONET se situent à Ilorin (109%). De manière générale, les écarts entre les différents scénarios peuvent s'expliquer par les autres sources influant sur le contenu atmosphérique en aérosols. A Banizoumbou et Djougou, les poussières désertiques, non incluses dans ces simulations peuvent expliquer ces écarts. A Mongu et Skukuza, en plus des poussières désertiques, on doit ajouter les sulfates non pris en compte dans la modélisation et qui pourraient expliquer les différences. Cependant hors périodes des feux de biomasse, le nouvel inventaire permet d'obtenir des AOD proches de celles des mesures. Il est intéressant de noter qu'une étude similaire a été effectuée par Liou et al. (2010) sur les sites de Djougou (Bénin) et Banizoumbou (Niger), avec le même inventaire de feux de biomasse et l'inventaire anthropique de 2005 OLD. Dans cette étude, les épaisseurs optiques simulées par le modèle TM4 (version antérieure au nôtre mais plus complet du point de vue de la chimie) ont été comparées à celles du réseau AERONET pour les modes fins et grossiers. Le modèle TM4 arrive à reproduire les variations mensuelles des épaisseurs optiques, mais avec toutefois des valeurs inférieures à celles obtenues à Djougou. Par contre à Banizoumbou, les valeurs obtenues avec le modèle TM4 sont supérieures à celles mesurées d'Avril à Octobre. Les résultats avec notre modèle TM5 sont différents de ceux obtenus avec TM4. En effet, le modèle TM5 n'arrive pas à reproduire les variations d'épaisseurs optiques (scénarios NEW et OLD). En outre, pour les mois de Novembre et de Décembre, les épaisseurs optiques obtenues à partir des scénarios 2005 NEW et 2005 OLD sont supérieures à celles mesurées à Banizoumbou et Djougou. Ces différences entre résultats des deux modèles s'expliquent par une chimie plus complète intégrée dans TM4, ainsi qu'un modèle radiatif couplé.

En 2030, les plus fortes valeurs d'épaisseurs optiques sont obtenues avec le scénario REF, suivi du scénario CCC et CCC*. Les différences entre épaisseurs optiques pour ces trois scénarios du futur sont variables en cours d'année et par site. Par exemple à Mongu, les différences entre les deux scénarios extrêmes (REF et CCC*) n'excèdent pas 28%, tandis qu'elles sont comprises entre 15% et 65% à Skukuza. Ce constat est normal pour Skukuza, car les émissions ont été fortement réduites en Afrique du Sud dans le scénario CCC*, tandis qu'à Ilorin (Nigéria), c'est la conjugaison de la modification des deux roues 2 temps et le transport des aérosols depuis l'Afrique du Sud qui en sont la cause. Comparativement aux données de 2005, on réalise que les épaisseurs optiques calculées à partir des inventaires NEW AFS et CCC* sont sensiblement égales. Les scénarios proposés à partir des modifications et de l'élaboration des inventaires ont un réel impact sur les concentrations ambiantes des aérosols, et donc, sur les épaisseurs optiques. Notons pour terminer les AOD obtenues avec le scénario du futur, REF et CCC notamment, sont plus proches de celles du réseau AERONET.

5.5.4.2. Albédo de simple diffusion (SSA)

Les variations de l'albédo de simple diffusion en 2005 et 2030 ont été présentées sur la figure 5.12 pour les 6 sites du réseau AERONET considérés dans la section précédente.



Fig. 5.12 : Evolution de l'albédo de simple diffusion (SSA) simulées par le modèle ORISAM-TM5 en 2005 (NEW, NEW AFS et OLD) et en 2030 (REF, CCC et CCC*).

Les albédos de simple diffusion calculés à partir de nos inventaires 2005 et 2030 présentent une faible variabilité interannuelle d'un site à un autre, avec des valeurs globalement comprises entre 0,65 et 0,85. Les maxima obtenus des albédos de simple diffusion s'observent en périodes de fortes émissions par les feux de biomasse avec des maxima entre Juin et Août dans l'hémisphère Sud (Mongu et Skukuza) et de Janvier à Février et de Novembre à Décembre dans l'hémisphère Nord (Banizoumbou, Dakar, Djougou et Ilorin). C'est une situation normale, car le rapport BC/OC est plus faible lors d'épisodes de feux de biomasse comparativement à celui qui prévaut pour les émissions anthropiques. De manière générale, les différences entre SSA obtenues à partir des 6 simulations (NEW, NEW AFS, OLD, REF,

CCC et CCC*) sont faibles pendant les périodes d'intenses de biomasse, car les 6 simulations ont toutes incorporé les mêmes données d'inventaires de feux de biomasse.

Ces albédos de simple diffusion (2005 et 2030) présentent le même profil d'évolution annuelle aux sites d'un même hémisphère. Les deux sites de l'hémisphère Sud (Mongu et Skukuza) ont des valeurs d'albédo de simple diffusion qui croissent de Janvier à Août et décroissent ensuite. Par contre, aux 4 autres sites (Banizoumbou, Dakar, Djougou et Ilorin) de l'hémisphère Nord, les valeurs d'albédo de simple diffusion décroissent jusqu'en Juillet-Août, pour augmenter ensuite jusqu'en Décembre. En se rappelant que les modifications sur le nouvel inventaire (NEW) ont surtout permis d'augmenter les valeurs d'émissions de carbone organique (cf. chapitre 3) par rapport à l'ancien inventaire (OLD) (de 1,12 Tg à 4,02 Tg avec OCp contre 0,68 Tg à 0,69 Tg avec BC), entraînant l'accroissement de l'albédo de simple diffusion lié à la diffusivité élevée du carbone organique. C'est ce qu'on vérifie avec les fortes valeurs de SSA du scénario 2005 NEW. Les albédos de simple diffusion calculés à partir du nouvel inventaire 2005 (NEW) sont faiblement plus importants que ceux obtenues avec l'ancien inventaire (OLD), en proportions diverses en tous sites, excepté à Skukuza. Les différences relatives maximales atteignent 12% en Mai à Banizoumbou, 8% en Octobre à Dakar, 14% en Mai à Djougou, 21% en Mai à Ilorin, 10% en Janvier à Mongu et 11% en Mars à Skukuza. En dehors des périodes de feux de biomasse, des différences plus nettes apparaissent et sont dues aux contributions anthropiques incluses dans les nouveaux inventaires. Certes, les différences entre les inventaires de 2005 sont faibles, de même que celles entre les inventaires de 2030, mais les plus fortes valeurs de SSA ont été obtenues en 2005 (NEW et NEW AFS, cf. figure 5.12).

L'évolution annuelle de l'albédo de simple diffusion issue du réseau AERONET montre des similitudes aux sites de Banizoumbou, Dakar et Ilorin. Ces similitudes se caractérisent par une hausse de l'albédo de simple diffusion de Janvier à Mars, suivi d'une quasi-constance jusqu'en Octobre, avant une baisse jusqu'en Décembre. Les trois autres sites (Djougou, Mongu et Skukuza) présentent des évolutions d'albédo de simple diffusion différentes. Les valeurs de SSA obtenues à partir des simulations des inventaires 2005 (NEW et NEW AFS) se rapprochent le plus des données AERONET (valeurs comprises entre 0,85 et 1), les plus fortes valeurs étant obtenues pour l'inventaire NEW AFS du fait des plus fortes valeurs du ratio BC/OC (début chapitre 5). On remarque que la plus faible valeur d'albédo de diffusion des 6 stations du réseau AERONET (0,85) correspond à la plus forte valeur de nos 6 inventaires, ce qui montre les écarts entre SSA simulés et les données AERONET. Néanmoins, ce résultat est satisfaisant dans la mesure où nos simulations ne prennent pas en

compte les poussières désertiques et les sulfates dont le rôle diffusant est avéré (IPCC, 2001). Leur prise en compte devrait permettre une augmentation des valeurs de SSA qui améliorerait ces résultats. Deux autres éléments ne sont pas incorporés dans le modèle TM5, qui ont aussi leur importance. Il s'agit des aérosols carbonés en tant que mélanges internes ou/et externes (Guillaume et al., 2007 ; Jacobson, 2001) et la variabilité des propriétés optiques des aérosols carbonés selon leur structure dans nos calculs (Mallet et al., 2005).

Reprenant les travaux de Liousse et al. (2010), on retrouve le même constat général qu'avec les épaisseurs optiques : le modèle TM5 (scénarios 2005 NEW et 2005 OLD) n'arrive pas à reproduire l'évolution de l'albédo de simple diffusion mesuré par le réseau AERONET, contrairement au modèle TM4. Cependant, notre modèle TM5 (scénario 2005 NEW) surestime les épaisseurs optiques en Décembre à Banizoumbou, comme c'est le cas avec le modèle TM4. Par contre à Djougou, le constat est différent. Le modèle TM4 surestime l'albédo de simple diffusion en Mai, Juillet et Novembre, tandis que c'est en Novembre et Décembre avec TM5. On pourrait ainsi avancer que notre version (TM5) donne de meilleurs résultats sur les albédos de simple diffusion que sur les épaisseurs optiques, par comparaison avec le modèle TM4.

5.6. Conclusion

Le modèle ORISAM-TM5 a été évalué à l'échelle de l'Afrique sur toute l'année 2005. Les premiers résultats relatifs aux concentrations de carbone suie et de carbone organique simulées par ORISAM-TM5 ont montré des niveaux de concentrations simulées comparables aux mesures sur sites ruraux et des résultats plus différenciés dans les villes. La principale raison tient à la résolution trop faible du modèle ($1^\circ \times 1^\circ$), qui ne permet pas de décrire les pics de pollution rencontrés aux sites trafic des villes africaines. Ainsi, cette pollution apparaît comme un phénomène « sous-maille » encore mal décrit par les modèles. Cependant, l'initialisation avec le nouvel inventaire anthropique (Liousse et al., 2011) a permis d'améliorer les niveaux de concentrations simulées en les rapprochant sensiblement de ceux mesurés. En 2030, les concentrations simulées sont supérieures à celles de 2005 dans les configurations REF et CCC. Par contre, en certains sites, le scénario CCC* a permis d'obtenir des concentrations sensiblement égales et même parfois inférieures à celles de 2005. Ce travail met ainsi en évidence l'intérêt et l'importance des mesures de réglementations des taux de polluants dans l'amélioration de la qualité de l'air et du bien-être des populations. Enfin, nous avons étudié les propriétés radiatives des aérosols carbonés en Afrique. Il apparaît que

les comparaisons entre épaisseurs optiques (AOD) simulées avec le modèle ORISAM-TM5 et celles de MODIS sont encourageantes. Les intensités maximales sont bien représentées, mais par contre, il y a un souci quant à la localisation de ces maxima sur le Golfe de Guinée en Janvier et le long des côtes d'Afrique Centrale en Juillet. La question qui se pose à présent est la suivante : le nouvel inventaire serait-il encore insuffisant ? Rappelons que dans cette simulation, nous n'avons pas pris en compte les poussières désertiques et les sulfates. Toutefois, on relève qu'en augmentant les émissions anthropiques, on obtient des localisations améliorées se rapprochant de celles de MODIS. Les simulations 2030 et leurs inventaires viennent le confirmer. En outre, les réglementations (CCC et CCC*) ont un impact sensible sur les propriétés radiatives, à travers le nombre de particules et la qualité de l'aérosol, plus ou moins absorbant. Ainsi, les prises en compte de scénarios peuvent ou non favoriser le réchauffement de l'atmosphère. Par ailleurs, les résultats obtenus avec le scénario NEW AFS améliorent nettement la position du maximum des AOD vues par MODIS par rapport au nouvel inventaire 2005 (NEW). Ceci montre l'importance d'une meilleure spatialisation des émissions en Afrique du Sud et son impact sur le Golfe de Guinée. D'autres problèmes peuvent bien sûr être à l'origine de ces différences entre simulations et mesures (MODIS), comme ceux évoqués par Malavelle et al. (2010) et Tummon et al. (2010), liées aux problèmes de modélisation (transport, dépôt sec/humide entre autre) et/ou de données satellitales (obtention de données en cas de couverture nuageuse importante telle que dans la ZCIT).

Les comparaisons in situ avec les données du réseau AERONET (440 nm) se sont montrées satisfaisantes, même si globalement, le modèle TM5 n'arrive pas à reproduire les variations d'épaisseurs optiques au niveau voulu, de même que l'albédo de simple diffusion au cours de l'année 2005 telles que mesurées (AERONET). Par ailleurs, notre nouvel inventaire 2005 (NEW) a montré peu de différences avec l'ancien inventaire (OLD) sur les épaisseurs optiques. Par contre, avec l'albédo de simple diffusion, le nouvel inventaire fournit de meilleurs résultats par rapport aux mesures. Ces résultats encourageants, montrent que des efforts doivent être encore faits pour l'amélioration des inventaires d'aérosols carbonés utilisés par la communauté internationale car ils gouvernent non seulement les concentrations atmosphériques mais également les propriétés radiatives (AOD) et le pouvoir absorbant de l'aérosol. Le scénario 2030 REF dans lequel les SSA montrent que l'aérosol est plus absorbant que celui dans le scénario 2030 CCC (avec régulations) en est un exemple.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le but de mon travail de thèse s'inscrit dans la thématique générale des inventaires d'émissions des aérosols carbonés de combustion. Ce travail a permis d'étudier les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire, depuis leurs émissions jusqu'à leurs impacts à travers des paramètres tels que l'épaisseur optique et l'albédo de simple diffusion. Ce travail s'inscrit dans le contexte africain et intéresse l'Afrique de l'Ouest tout particulièrement. C'est un domaine géographique encore beaucoup trop « transparent » pour les études de ce genre menées dans la communauté internationale telle qu'elle s'exprime dans la littérature scientifique, comparativement à d'autres continents : tels que l'Europe, l'Amérique du Nord, l'Asie. Tout ceci s'est fait en dépit d'une urbanisation galopante (population très jeune), de migrations de grande ampleur en interne et à l'international, des exploitations minières et pétrolières en grande extension, une industrialisation croissante, mais aussi des croissances peu ou mal contrôlées, des décharges hors contraintes qui déterminent une pollution particulière assez explosive. Ma thèse, qui se place donc dans un domaine très rapidement et fortement évolutif, présente un caractère inédit et même, exploratoire. En particulier, le recours à des scénarios d'émissions particulières et des impacts associés permet, au moins partiellement, de remédier au manque de données sûres, en nombres suffisants et validées.

La première partie de mon travail a permis de mettre en évidence et de mieux caractériser les émissions de carbone suie et de carbone organique primaire associées à l'utilisation des véhicules deux roues en Afrique de l'Ouest, mode de transport des personnes et des biens essentiel, et largement répandu dans la plupart de ces pays. Nous avons développé une nouvelle approche pour le calcul des consommations annuelles de ces engins dans les 16 pays de notre étude. Nous nous sommes basés sur le nombre de deux roues dans chaque pays et, à partir de leur consommation journalière (liée elle-même à leur utilisation- privé ou public), nous avons évalué leur consommation annuelle. Ce fut une tâche assez lourde et délicate, compte tenu du manque flagrant de données sur le sujet. Les nombreuses incertitudes sur les sources (Diaz Olvera et al., 2007; Agossou, 2004; Godard and Ngabmen, 2002) ont conduit à

développer deux scénarios. Cette étude a également permis de prendre en compte des facteurs d'émissions spécifiques aux véhicules à deux roues sur la base des données collectées lors la phase intensive de la campagne AMMA en Mai 2005 à Cotonou (Bénin). Les résultats ont mis en exergue dans un premier temps une sous-estimation des données de consommations attribuée à l'ensemble de trafic (données ONU), principalement dans les pays où sévit l'essence de contrebande (e.g. Bénin et Togo), mais aussi dans les pays où les deux roues sont majoritaires (e.g. Burkina Faso et Mali). En outre, de grandes différences ont été relevées sur les émissions, notamment celles du carbone organique primaire où les émissions des deux roues sont supérieures à celles des autres engins motorisés du trafic, en considérant le scénario bas dans 13 des 16 pays de notre étude. Ceci montre qu'il faut absolument, non seulement tenir compte des deux roues en tant que spécificité régionale forte, mais aussi réviser les inventaires globaux incorporant des données d'émissions du trafic routier. Les deux roues n'étant pas les seuls engins à mettre en cause quant aux fortes émissions du trafic routier, ce travail a été étendu aux véhicules autres que les deux roues.

J'ai ainsi développé un nouvel inventaire d'émissions de carbone suie et de carbone organique primaire à l'échelle de l'Afrique pour l'année 2005, afin de réviser et de mettre à jour les données de consommations de l'inventaire global de Junker and Liousse (2008), ainsi que les facteurs d'émissions. Je me suis servi des données de l'ONU, de l'IEA et de questionnaires spécifiques que j'ai envoyés à nos partenaires d'Afrique, de mon inventaire sur les émissions des deux roues (Assamoi and Liousse, 2010) et des travaux de Brocard et al. (1996) que nous avons actualisés pour l'année 2005. Une première analyse des données a permis l'introduction de l'Erythrée comme pays à part entière, d'une nouvelle sectorisation (ajout des centrales thermiques), des carburants des engins à deux roues et de la fabrication du charbon de bois. Les facteurs d'émissions ont pu être mis à jour avec ces changements. Les émissions de 2005 pour toute l'Afrique que j'ai ainsi obtenues sont évaluées à 0,69 Tg pour le carbone suie et 4,02 Tg pour le carbone organique primaire. Les émissions du carbone suie (0,69 Tg) sont donc sensiblement égales à celles de l'inventaire global de Junker and Liousse (2008) actualisé pour l'année 2005 (0,68 Tg). Par contre, la différence est plus nette avec le carbone organique primaire où les émissions dans le nouvel inventaire sont, au moins, trois fois plus importantes que celles de Junker and Liousse (2008). Par ailleurs, les émissions de carbone suie et de carbone organique en 2005 dans mon nouvel inventaire sont également largement supérieures à celles de l'inventaire global de Bond et al. (2004) relatif à l'année 2000. Notons que les émissions de carbone organique primaire dans l'inventaire de Bond et al. (2004) en

2000 sont plus élevées que celles de Junker and Lioussé (2008) de 2005. Cela montre que les facteurs d'émissions dans l'inventaire de Bond et al. (2004) sont relativement plus importants que ceux de Junker and Lioussé (2008) et l'impact des différentes méthodologies de construction des inventaires.

Il est important de noter que nous disposons à présent de valeurs d'émissions avec notre nouvel inventaire anthropique qui sont comparables à celles des feux de biomasse en dehors des périodes de feux intenses (Février à Mai et Septembre à Novembre). Pour finir, nous avons spatialisé nos inventaires sur la base des densités de population en Afrique en 2005 à la résolution de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (CIESIN, 2005) contrairement à l'ancienne résolution $1^\circ \times 1^\circ$ relative à l'année 1984 (GISS, 1984).

En demeurant toujours dans la thématique des inventaires, mais dans un sens prospectif, nous avons établi un inventaire à l'échelle de l'Afrique pour 2030, selon deux scénarios REF et CCC. Pour se faire, nous avons utilisé les données de notre nouvel inventaire 2005, auquel nous avons appliqué les résultats du modèle socio-économique POLES (Criqui, 2001). Ce travail a fait ressortir toute l'importance des contrôles d'émissions effectués selon différents scénarios. Globalement, les émissions du scénario CCC restent inférieures à celles du scénario REF en 2030. Les tendances observées entre les années 2005 et 2030 font apparaître des hausses de taux d'émission supérieures à 180%. Une intercomparaison entre notre nouvel inventaire (Lioussé et al., 2011), celui de Junker and Lioussé (2008) et ceux de l'IPCC (Lamarque et al., 2010) a montré une équivalence des données d'émissions 2005 pour le carbone suie. Pour l'année 2030, les taux d'émissions restent largement supérieures à ceux de l'IPCC et ce, quel que soit l'aérosol carboné considéré.

Globalement, entre 2005 et 2030 la tendance révélée par nos chiffres d'inventaire présente une croissance plus forte que celle de l'IPCC, excepté pour le scénario CCC* qui a un profil similaire à celui du scénario RCP 4,5 de l'IPCC pour le carbone organique.

Enfin, des tests de sensibilité ont été effectués en Afrique de l'Ouest sur les véhicules deux roues en admettant que les engins deux roues avaient tous des moteurs 4 temps au lieu des 2 temps répertoriés auparavant, et en Afrique du Sud en considérant ce pays comme un pays semi développé contrairement aux hypothèses dans le modèle POLES, ainsi qu'en considérant les déchets végétaux en lieu et place des déchets animaux. Ces hypothèses de travail ont permis de réduire considérablement les émissions futures, surtout dans le scénario CCC*.

Enfin, ces résultats nous ont conduit à tenter de reproduire les concentrations ambiantes à partir des données de nos nouveaux inventaires 2005. Des simulations sur la base

d'inventaires pronostics ont également été faites. Pour cela, nous avons utilisé le modèle global de chimie transport TM5. Il ressort des résultats 2005 que le modèle parvient à simuler de manière satisfaisante les concentrations en zones rurales. Les résultats en zones urbaines sont plus contrastés. Les différences observées semblent s'expliquer par la maille encore trop grossière du modèle ($1^\circ \times 1^\circ$). Du point de vue des épaisseurs optiques et des albédos de simple diffusion, les sorties du modèle comparées aux valeurs fournies par le satellite MODIS et les données du réseau AERONET les sous estime. Cependant, nos résultats sont encourageants, quand on sait que ce sont uniquement le carbone suie et le carbone organique qui sont pris en compte dans le modèle global TM5. Par ailleurs, les projections ont montré que les émissions de 2030 seraient « nécessaires » pour reproduire les concentrations mesurées de même que les AOD mesurées.

Au terme de ce travail, un constat s'impose : des insuffisances entachent les modèles de la génération actuelle mais aussi les données d'initialisation. Les efforts devraient porter sur les inventaires afin de prendre en compte les émissions des « gaz flaring » qui constituent, à priori, une source non négligeable des émissions dans le Golfe de Guinée (le Nigéria est le premier pays exportateur de pétrole en Afrique). Ces émissions ne sont, jusqu'à maintenant, prises en compte dans aucun inventaire. Un autre chantier est à développer : celui de la modélisation multi-échelle, du local au régional afin de mieux prendre en compte les problèmes de pollution. Notons que nos inventaires sont actuellement en test dans le modèle climatique régional RegCM. Enfin, la mise en place des nouveaux inventaires va permettre des calculs plus précis des impacts liés à la pollution. L'impact radiatif va être calculé en termes de réchauffement/refroidissement de l'atmosphère avec le modèle de Wang and Penner (2010). Par ailleurs, l'impact sur la santé sera étudié via un module qui est en construction pour tester ces inventaires et différents scénarios sur la qualité de l'air afin de montrer toute l'importance des émissions urbaines sur les risques biologiques et épidémiologiques encourus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abel, S. J., Haywood, J. M., Highwood, E. J., Li, J., and Buseck, P. R., 2003. Evolution of biomass burning aerosol properties from an agricultural fire in southern Africa. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 4 PP., doi:200310.1029/2003GL017342.
- Ackerman, A. S., Toon, O. S., Stevens, D. E., Heymsfield, A. J., Ramanatahn, V. and Welton, E. J., 2000. Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*. Vol. 288, pp. 1042-1047.
- 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=55412B72506EFB124201C4666F32B11E1246367218654.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>.
- Afriquejet, 2008. Available from : <http://www.afriquejet.com/encyclopedies/ville>
- 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.
- Akhter, M. S., Chughtai, A. R., and Smith, D. M., 1985. The structure of hexane soot — I. Spectroscopic studies, *Appl. Spectrosc.*, 39, pp. 143–153.
- Alander, T., Antikainen, E., Raunemaa, T., Elonon, E., Rautiola, A. and Torkkell, K., 2005. Particle emissions from a small two-stroke engine: effects of fuel, lubricating oil, and exhaust after treatment on particle characteristics. *Aerosol Science and Technology*. Vol. 39, pp. 151-161.
- Andreae, M. O., Andreae, T. W., Ferek, R. J. and Raemdonck, H., 1984. Long-range transport of soot carbon in the marine atmosphere, *Science of the Total Environment*, 36, pp. 73–80.
- Andreae, M. O. and Merlet, P., 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 15, pp. 955–966.

- Andreae, M. O. and A. Gelencser, 2006. Black carbon or brown carbon? the nature of light-absorbing carbonaceous aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 6(10), pp. 3131–3148.
- 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.
- Barbosa, P. M., Grégoire, J-M. and Pereira, J. M. C., 1999. An Algorithm for Extracting Burned Areas from Time Series of AVHRR GAC Data Applied at a Continental Scale, *Remote Sensing of Environment*, 69(3), 253-263.
- Barret, B., Ricaud, P., Mari, C., Atti, J. L., Bousserez, N., Josse, B., Le Flochmoen, E., Livesey, N. J., Massart, S., Peuch, V. H., Piacentini, A., Sauvage, B., Thouret, V. and Cammas, J. P., 2008. Study of the transport pathways in the African upper troposphere during the monsoon season based upon the assimilation of spaceborne CO observations in a CTM. , *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 3231-3246.
- Barret B., Williams, J. E., Bouarar, I., Yang, X., Josse, B., Law, K., Pham, M., Le Flochmoen, E., Liousse, C., Peuch, V. H., Carver, G. D., Pyle, J. A., Sauvage, B., van Velthoven, P., Schlager, H., Mari, C., and Cammas, J.-P., 2010. Impact of West African Monsoon convective transport and lightning NO_x production upon the upper tropospheric composition: a multi-model study, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, doi:10.5194/acp-10-5719-2010.
- Bartholome, E. and Belward, A.S., 2005. GLC2000 : a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26(9), 1959-1977.
- Baumbach, G., Vogt, U., Hein, K. R. G., Oluwole, A. F., Ogunsole, 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.
- Bergstrom, R. W., Pilewskie, P., Schmid, B. and Russell, P. B., 2003. Comparison of Measured and Predicted Aerosol Radiative Effects during SAFARI 2000, *J. Geophys. Res.*, 108, D138474, doi:1029/2002JD002435.
- Berico, M., Luciani, A. and Formignani, M., 1997. Atmospheric aerosol in an urban area – measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessment. *Atmos. Environ.* 31(21), 3659–3665.
- Bessagnet B., Hodzic A., Vautard R., Beekmann M., Cheinet S., Honoré C., Liousse C. and Rouil L., 2004. Aerosol modelling with CHIMERE - preliminary evaluation at the continental scale. *Atmos. Environ.* 38, 2803-2817.
- 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.

- Bockhorn, H. (Ed.), 1994. Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models, Berlin & New York, Springer-Verlag, 596 p.
- Boko, G. M. J., Bunch, M. J., Suresh, V. M. and 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.
- Bond, T.C., 2001. Spectral dependence of visible light absorption by carbonaceous particles emitted from coal combustion, *Geophysical Research Letters* 28 (21): 4075-4078.
- Bond, T. C., Streets, D. G., Yarber, K. F., Nelson, S. M., Woo, J. H., and Klimont, Z., 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, *J. Geophys. Res.*, 109, D14203, doi:10.1029/2003JD003697.
- Bouneau, S., David, S., Loiseaux, J-M. and Méplan, O., 2007. Construction d'un monde énergétique en 2050. *Ann. Phys. Fr.*, Vol. 34, N°1 2009, pp. 1–101.
- Brocard, D., 1996. Emissions atmosphériques des combustions domestiques: Etude des processus et d'termination des sources à l'échelle régionale et globale en Afrique, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- 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.
- Cachier, H., Lioussé, C., Buat-Menard, P. and Gaudichet, A., 1995. Particulate content of savanna fire emissions. *Journal of Atmospheric Chemistry*. Vol 22(1), pp. 123-148.
- Cachier, H., 1998. Carbonaceous combustion aerosols. In: *Atmospheric particles* (eds R. M.Harrison and R.Van Grieken). John Wiley and Sons Ltd, New York . 295–348.
- Cachier H., Sciare, J., Guinot, B., Sarda-Estève, R., Oikonomou, K, Lioussé, C., Galy-Lacaux, C. and Gardrat, E., 2004. Thermo-optical separation of the aerosol Black and Organic carbon fractions: is a consensus possible? 8th International conference on carbonaceous particles in the atmosphere, Vienna (Austria).
- Cachier, H., Pertuisot, M-H., Sarda-Estve, R., Garane, A-J. and Diallo, A., 2009. Pollution atmosphérique particulaire à Ouagadougou (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres métropoles (Paris, Pékin, le Caire). Colloque sur la toxicologie environnementale et agroalimentaire dans l'espace francophone. Sousse (Tunisie). 8 au 11 Novembre.
- Cadle, S. H., Groblicki, P. J., and Mulawa, P. A., 1983. Problems in the sampling and analysis of carbon particulate, *Atmos. Environ.*, 17, 593–600..

- Cadle, S. H., Mulawa, P., Groblicki, P., Laroo, C., Ragazzi, R. A., Nelson, K., Gallagher, G. and 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.
- Cahoon, D. R., Stocks, B. J., Levine, J. S., Cofer, W. R. and O'Neill, K. P., 1992. Seasonal distribution of African savanna fires. *Nature*, 359, 812-815.
- Calabri, G. and Cisela, W. M., 1992. Global wildland fire statistics. FO Misc/92/4, FAO, Rome, 48 pp.
- Campbell, J., Welton, E. J., Spinhirne, J. D., Ji, Q., Tsay, S.-C., Piketh, S. J., Barenbrug, M. and Holben, B. N., 2003. Micropulse lidar observations of tropospheric aerosols over northeastern South Africa during the ARREX and SAFARI-2000 dry season experiments, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JD002563.
- CCIC (Comite 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
- Chang, S. G., Brodzinsky, R., Gundel, L. A. and Novakov, T., 1982. Chemical and catalytic properties of elemental carbon, in: *Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle*, edited by: Wolff, G. T., and Klimisch, R. L., Plenum Press, New York, pp. 159–181.
- Chantereau, C. and 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>.
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen, J. E. and Hofmann, D. J., 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-430.
- 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.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Crow, D., Lowenthal, D. H. and Merrifield, T. M., 2001. Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements. *Aerosol Sci. Technol.* 34(1), 23-34.
- Chughtai, A. R., Kim, J. M. and Smith, D. M., 2002. The effect of air/fuel ratio on properties and reactivity of combustion soots, *J. Atmos. Chem.*, 43, 21–43.
- Chung, S.H. and Seinfeld, J. H., 2002. Global Distribution and Climate Forcing of Carbonaceous Aerosols, *Journal of Geophysical Research*, 107 (D19), 4407, doi:10.1029/2001JD001397.
- Chylek, P., Videen, G. and Ngo, D., 1995. Effect of black carbon on the optical

- properties and climate forcing of sulfate aerosols, *J. Geophys. Res.*, 100, 16325-16332.
- 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/>.
 - Clague, A. D. H., Donnet, J., Wang, T. K. and Peng, J. C. M., 1999. A comparison of diesel engine soot with carbon black, *Carbon*, 37, 1553–1565.
 - Colbeck, I., Appleby, L., Hardman, E. J. and Harrison, R. M., 1990. The optical properties and morphology of cloud-processed carbonaceous smoke. *J. Aerosol Sci.*, 21, pp. 527-538.
 - Cooke W.F., Koffi B. and Grégoire J.-M., 1996. Seasonality of biomass burning in Africa from remote sensing data and application to a global chemistry model. *J. Geophys. Res.* 101(15), 21051-21065.
 - Cooke, W. F. and Wilson, J. J. N., 1996. A global black carbon aerosol model. *J. Geophys. Res.* 101. 19,395-19,409.
 - Cooke, W. F., Liousse, C., Cachier, H. and Feichter, J. 1999. Construction of a $1^\circ \times 1^\circ$ fossil-fuel emission dataset for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model. *J. Geophys. Res.* 104, 22137–22162. doi:10.1029/1999JD900187.
 - Cousin, F., Liousse, C., Cachier, H., Bessagnet, B., Guillaume, B. and Rosset, R., 2005. Aerosol modelling and validation during Escompte 2001, *Atmos. Env.* 39 (8), 1539-1550.
 - Criqui, P., 2001. Prospective Outlook on Long-term Energy Systems (POLES). <http://www.upmf-grenoble.fr/iepe>.
 - Cruz, C. N. and Pandis, S. N., 1997. A study of the ability of pure secondary organic aerosol to act as cloud condensation nuclei, *Atmos. Environ.*, 31, 2205–2214.
 - Currie, L. A., Benner Jr., B. A., Kessler, J. D., Klinedinst, D. B., Klouda, G. A., Marolf, J. V., Slater, J. F., Wise, S. A., Cachier, H., Cary, R., Chow, J. C., Watson, J., Druffel, E. R. M., Masiello, C. A., Eglinton, T. I., Pearson, A., Reddy, C. M., Gustafsson, O., Quinn, J. G., Hartmann, P. C., Hedges, J. I., Prentice, K. M., Kirchstetter, T. W., Novakov, T., Puxbaum, H., and Schmid, H., 2002. A critical evaluation of interlaboratory data on total, elemental, and isotopic carbon in the carbonaceous particle reference material, NIST SRM 1649a, *J. Res. Natl. Inst. Stan.*, 107, 279–298.
 - Czerwinski, J., Comte, P., Napoli, S. and Wili, P., 2002. Summer cold start and nanoparticulates of small scooters. SAE Technology Paper 2002-01-1096.

- Dana, M. T. and Hales, J. M., 1976. Statistical aspects of the washout of polydispers aerosols, *Atmos. Environ.*, 10, pp. 45-50.
- Decesari, S., Fuzzi, S., Facchini, M. C., et al., 2006. Characterization of the organic composition of aerosols from Rondônia, Brazil, during the LBA-SMOCC 2002 experiment and its representation through model compounds, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 375–402. Available from: <http://www.atmos-chem-phys.net/6/375/2006/>.
- Delfino, R.J., Brummel, S., Wu, J., Stern, H., Ostro, B., Lipsett, M., Winer, A., Street, D.H., Zhang, Tjoa, T. and Gillen D.L., 2008. The relationship of respiratory and cardiovascular hospital admissions to the southern California wildfires of 2003. *Occup Environ Med.* doi: 10.1136/oem.2008.041376.
- Dentener, F., Weele, M. V., Krol, M., Houweling, S. and Velthoven, P. V., 2003. trends and inter-annual variability of methane emissions derived from 1979-1993 global CTM simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, 3, pp. 73-88.
- 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^e colloque de l'Association de Science Régionale De Langue Française (ASRDLF). Grenoble-Chambéry, France, July 11-13. Available from : http://halshs.archivesouvertes.fr/docs/00/17/57/29/PDF-/Diaz_Plat_Pochet_Sahabana.pdf.
- Dinh, P. V., Lacaux, J. P. and Serpolay, R., 1994. Cloud-active particles from African savanna combustion experiments. *Atmospheric Research*, vol. 31, pp., 41-58.
- Dombia, T., Liousse, C., Ndiaye, A., Galy-Lacaux, C., Diop, B., Yoboué, V., Gardrat, E., Castera, P. and Sigha, L. Real time Black Carbon measurements in West Africa urban sites. In preparation to *Atmospheric Environment*, 2011.
- Ebert, L. B., 1990. Is soot composed predominantly of carbon clusters?, *Science*, 247, 1468–1471.
- Ellis, E. C. and Novakov, T., 1982. Application of thermal analysis to the characterization of organic aerosol particles, *Science of the Total Environment*, 23, 227–238.
- 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. and 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., Ovrebø, S. and 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.
- Ferry, D., Suzanne, J., Nitsche, S., Popovitcheva, O. B. and Shonija, N. K., 2002. Water adsorption and dynamics on kerosene soot under atmospheric conditions, *J. Geophys. Res.*, 107, 4734, doi:10.1029/2002JD002459.
- 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.
- Galy-lacaux, C., Laouali, D., Descroix, L., Gobron, N. and Lioussé, C., 2008. Long term precipitation chemistry and wet deposition in a remote dry savanna site in Africa (Niger). *Atmos. Chem. Phys.* 8, 5761–5812.
- Ganzeveld, L., Lelieveld, J. and Roelofs, G.-J., 1998. A dry deposition parameterization for sulfur oxides in a chemistry and general circulation model. *J. Geophys. Res.* 103, 5679–5694.
- Generoso, S., Bréon, F.-M., Balkanski, Y., Boucher, O. and Schulz, M., 2003. Improving the seasonal cycle and interannual variations of biomass burning aerosols sources. *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1211– 1222.
- GISS (Goddard Institute for Space Studies), 1984. Global Distribution of 1984 Population Density at 1° x 1° Resolution. Available from: <http://data.giss.nasa.gov/landuse/people.html>
- Godard, X. and Ngabmen, H., 2002. Z comme zémidjan, 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.
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Van der Gon, H. D., Frost, G., Heil, A., Kaiser, J. W., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J.-F., Lioussé, C., Masui, T., Meleux, F., Mieville, A., Ohara, T., Raut, J.-C., Riahi, K., Schultz, M., Smith, S. J., Thompson, A., van Aardenne, J., Van der Werf, G. R. and van Vuuren, D. P., 2010. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions at global and regional scales during the 1980-2010 period. Submitted to *Climatic Change*.
- Grégoire, J.-M., Tansey, K. and Silva, J. M. N., 2002. The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOTVEGETATION imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 24(6), 1369–1376.

- Grieco, W. J., Howard, J. B., Rainey, L. C. and Vander Sande, J. B., 2000. Fullerenic carbon in combustion-generated soot, *Carbon*, 38, 597–614.
- Grisdale, R. O., 1953. The formation of black carbon, *J. Appl. Phys.*, 24, 1082–1091.
- Guelle, W., Balkanski, Y., Dibb, J., Schulz, M. and Dulac, F., 1998. Wet deposition in a global size-dependent aerosol transport model. 2, Influence of the scavenging scheme on ²¹⁰Pb vertical profiles, surface concentrations, and deposition. *J. Geophys. Res.* 103, 38875–28891.
- Guillaume, B., Liousse, C., Rosset, R., Cachier, H., Bessagnet, B., Velthoven, P. V. and Poisson, N., 2007. Global modelling of internally mixed size-resolved inorganic/organic aerosols with a focus on carbonaceous components. *Tellus*, B, 9, 283–302.
- Guillaume, B. and Liousse, C., 2009. Development of carbonaceous aerosol emission inventories for fossil fuel over Europe with focus on traffic at national and regional scales. *Journal of Geophysical Research*, in review.
- Guinot, B., Liousse, C., Cachier, H., Guillaume, B., et al., 2010. New emission factor estimates for biofuels and mobile sources. Submitted to *Atmospheric Environment*.
- Gundel, L. A., Dod, R. L., Rosen, H. and Novakov, T., 1984. The relationship between optical attenuation and black carbon concentration for ambient and source particles, *Science of the Total Environment*, 36, 197–202.
- Gwilliam, K., 2003. Urban transport in developing countries. *Transport Reviews*, vol. 23, pp., 197-216.
- Hansen, A. D. A., Rosen, H. and Novakov, T., 1984. The aethalometer – an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *Science of the Total Environment*, 36, 191–196.
- Hansen, J., Sato, M. and Ruedy, R., 1997. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research*. Vol 102, pp. 6831-6864.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A. and Oinas, V., 2000. Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 97, pp. 9875-9880. doi:10.1073/pnas.170278997.
- Hao, W. M. and Liu, M-H., 1994. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.8, No. 4, 495-503.
- Havers, N., Burba, P., Klockow, D. and Klockow-Beck, A., 1998. Characterization of humic-like substances in airborne particulate matter by capillary electrophoresis, *Chromatographia*, 47, 619–624, 1998a.
- Haywood, J. M. and Shine, K. P., 1995. The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 603-606.

- Haywood, J. M. and Ramaswamy, V., 1998. Global Sensitivity Studies of the Direct Radiative Forcing Due to Anthropogenic Sulfate and Black Carbon Aerosols, *J. Geophys. Res.* 103(D6):6043-6058.
- Hegerl, G. C., Crowley, T. J., Allen, M., Hyde, W. T., Pollack, H. N., Smerdon, J. and Zorita, E., 2007. Detection of Human Influence on a New, Validated 1500-Year Temperature Reconstruction. *Journal of Climate*, Vol. 20, pp. 650-666. doi: 10.1175/JCLI4011.1
- Heimann M., 1995. The global atmospheric tracer model TM2. Technical report no.10. Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Hamburg, Germany.
- Heintzenberg, J., 1988. A processor-controlled multisample soot photometer, *Aerosol Sci. Tech.*, 8, 227–233, 1988.
- Hitzenberger, R., Jennings, S. G., Larson, S. M., Dillner, A., Cachier, H., Galambos, Z., Rouc, A. and Spain, T. G.: Intercomparison of measurement methods for black carbon aerosols, *Atmos. Environ.*, 33, 2823–2833, 1999.
- Hitzenberger, R., Petzold, A., Bauer, H., Ctyroky, P., Pouresmaeil, P., Laskus, L., and Puxbaum, H., 2006. Intercomparison of thermal and optical measurement methods for elemental carbon and black carbon at an urban location, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 6377–6383.
- Hoffer, A., Gelencser, A., Guyon, P., Kiss, G., Schmid, O., Frank, G., Artaxo, P. and Andreae, M. O., 2005. Optical properties of humiclike substances (HULIS) in biomass-burning aerosols, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5, 7341–7360.
- Holtslag, A. A. M. and Boville, B., 1993. Local versus non local boundary-layer diffusion in a global climate model. *J. Climate*, 6, pp. 1825-1842.
- Houweling, S., Dentener, F. and Lelieveld, J., 1998. The impact of non-methane hydrocarbon compounds on tropospheric photochemistry. *J. Geophys. Res.* 103, 10673–10696.
- IEA (International Energy Agency), 2000. *Energy Statistics of Non-OECD Countries*, Paris.
- IEA (International Energy Agency), 2005. *Energy Statistics of Non-OECD Countries*, Paris. Available from: <http://www.iea.org/stats/>
- Ikeda, Y., Nakajima, T. and 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).
- Institut National de la Statistique, 2006. Available from: <http://www.statistics-cameroon.org/pdf/CEC2006F.pdf>.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I in The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. The Physical Science Basis, in: Contribution of Working Group I at the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN 978 0521 88009-1 Hardback; 978 0521 70596-7 Paperback.
- IRF (International Road Federation), 2009. World Road Statistics. Data 2002-2007. Available from : http://www.irfnet.org/files-upload/files/P2_WRS_2007.pdf
- Ito, A. and Penner, J. E., 2005: Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870–2000. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB2028, doi:10.1029/2004GB002374.
- Jacobson, M. Z., 1999. *Fundamentals of Aerosol Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge. 526–537.
- Jacobson M.Z., 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols, *Nature*, 409, 695–697.
- Jacobson, M. Z., 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming, *J. Geophys. Res.*, 107, 4410, doi:10.1029/2001JD001376.
- Jacobson, M. Z., 2003. Development of mixed-phase clouds from multiple aerosol size distributions and the effect of the clouds on aerosol removal. *J. Geophys. Res.*, 108(D8), 4245, doi:10.1029/2002JD002691.
- Jason, E. W., Scheele, R., van Velthoven, P., Bouarar, I., Law, K., Josse, B., Peuch, V.-H., Yang, X., Pyle, J., Thouret, V., Barret, B., Liousse, C., Hourdin, F., Szopa, S. and Cozic, A., 2010. Global Chemistry Simulations in the AMMA Multimodel Intercomparison Project. *American Meteorological Society*. Vol 91, Issue 5; pp 611–624.
- Jeong, C.-H., Hopke, P. K., Kim, E. and Lee, D.-W., 2004. The comparison between thermal-optical transmittance elemental carbon and Aethalometer black carbon measured at multiple monitoring sites, *Atmos. Environ.*, 38, 5193–5204.
- Junker, C. and 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. and 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/Kamdem.pdf>.
- Kiehl, J.T. and Briegleb, B .P., 1993. The relative rol of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*. 260. 311-314.
- Koch D., 2001. The transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM, *J. Geophys. Res.*, 106, 20311–20332.
- Krol, M., Houweling, S., Bregman, B., Van den Broek, M., Segers, A., van Velthoven, P., Peters, W., Dentener, F. and Bergamaschi, P., 2005. The tow-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications.
- Kumar, A. and Barrett, F., 2008. Stuck in Traffic: Urban Transport in Africa. Africa Infrastructure Country Diagnostic (AICD) report. Available from : <http://siteresources.worldbank.org/EXTAFRUSUBSAHTRA/Resources/Stuck-in-Traffic.pdf>.
- Lacaux, J. P., Brocard, D., Lacaux, C, Delams, R, Brou, A, Yoboué, V. and Koffi, M., 1994. Traditional charcoal making : an important source of atmospheric pollution in the African tropics, *Atmospheric Research*, 35, 71-76.
- Lacaux, J. P., Brustet, J. M., Delmas, R., Menaut, J. C., Abbadie, L., Bonsang, B., Cachier, H., Baudet, J., Andreae, M. O. and Helas, G., 1995. Biomass burning in the tropical savannas of Ivory Coast: An overview of the field experiment fire of savannas (FOS/DECAFE 91). *Journal of Atmospheric Chemistry*. Vol. 22, N° 1-2, pp. 195-216.
- Lamarque, J.-F., G. P. Kyle, M. Meinshausen. K. Riahi, S. J. Smith, D. P. van Vuuren, A. Conley and F. Vif, 2010. Global and regional evolution of short-lived radiatively-active gases and aerosols in the Representative Concentration Pathways. Submitted for publication in *Climatic Change*, (under revision). Special Issue on RCPs
- Le Bris, E., 1991. Crise urbaine et effets urbains de la crise : le cas de l'Afrique Noire. *Espaces et sociétés*, n° 65, pp. 61-81.
- Legrand C., 2000. Instrumentation pour la mesure des noyaux de condensation de nuages aux faibles sursaturations critiques. Application à l'arosol urbain en région toulousaine. Thse de Doctorat de l'Universit de Toulouse 3. 127 p.

- Lelieveld, J., Crutzen, P. J., Ramanathan, V., Andreae, M. O., Brenninkmeijer, C. A. M., Campos, T., Cass, G. R., Dickerson, R. R., Fischer, H., de Gouw, J. A., Hansel, A., Jefferson, A., Kley, D., de Laat, A. T. J., Lal, S., Lawrence, M. G., Lobert, J. M., Mayol-Bracero, O. L., Mitra, A. P., Novakov, T., Oltmans, S. J., Prather, K. A., Reiner, T., Rodhe, H., Scheeren, H. A., Sikka, D. and Williams, J., 2001. The indian ocean experiment : widespread air pollution from South and Southeast Asia. *Science*. Vol 291, pp. 1031-1036.
- 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. and 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.
- Liousse, C., Devaux, C., Dulac, F. and Cachier, H., 1995. Aging of savanna biomass burning aerosols: Consequences on their optical properties. *Journal of Atmospheric Chemistry*. Vol 22(1), pp. 1-17.
- Liousse, C., Penner, J. E., Chuang, C., Walton, J. J., Eddleman, H. and Cachier, H., 1996. A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols, *J. Geophys. Res.*, 101(D14), 432.
- Liousse, C., Dulac, F., Cachier, H. and Tanre, D., 1997. Remote sensing of carbonaceous aerosol production by African savanna biomass burning. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. Vol. 102(D5), pp. 5895-5911.
- Liousse, C., Andreae, M. O., Artaxo, P., Barbosa, P., Cachier, H., Grégoire, J. M., Hobbs, P., Lavoué, D., Mouillot, F., Penner, J. E. and Scholes, M., 2004. Deriving Global Quantitative Estimates for Spatial and Temporal Distributions of Biomass Burning Emissions, In: *Emissions of Atmospheric Trace Compounds*, ed: Granier C., Artaxo P. and Reeves C., 544, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Liousse C., Michel C., Bessagnet B., Cachier H. and Rosset, R., 2005. 0D-Modelling of Carbonaceous Aerosols over Greater Paris focusing on the organic particle formation. *J. Atmos. Chem.* 51 (2), 207-221.
- Liousse, 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., Jambert, 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 Weahter, Climate and Impacts, Ouagadougou (Burkina Faso), 20-24 July.*

- Liousse, C., Guillaume, B., Grégoire, J. M, Mallet, M., Galy, C., Pont, V., Akpo, A., Bedou, M., Castéra, P., Dungall, L., Gardrat, E., Granier, C., Konaré, A., Malavelle, F., Mariscal, A., Mieville, A., Rosset, R., Serça, D., Solmon, F., Tummon, F., Assamoi, E.-M., Yoboué, V. and Van Velthoven, P., 2010. Updated African biomass burning emission inventories in the frame of the AMMA-IDAF program, with an evaluation of combustion aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(3), 7347–7382.
- Liousse, C., Assamoi, E.-M., Criqui, P., Guillaume, B. and Rosset, R. African anthropogenic emissions : an unexpected relative importance in 2030. In preparation to *Geophys. Res. Lett.*, 2011.
- Liu X., Penner, J.E. and Herzog, M., 2005. Global modeling of aerosol dynamics: Model description, evaluation, and interactions between sulfate and nonsulfate aerosols. *J. Geophys. Res.* 110, D18206, doi:10.1029/2004JD005674.
- Louis, J. F., 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary Layer Meteor.*, 17, pp. 187-202.
- Mage, D., Ozolins, G., Peterson, P., Webster, A., Orthofer, R., Vandeweerd, V. and Gwynne, M., 1996. Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment*, vol. 30, No 5, pp., 681-686.
- Malavelle, F., Pont, V., Mallet, M., Solmon, F., Johnson, B., Leon, J-F. and Liousse, C., 2010. Simulation of aerosol radiative effects over West Africa during DABEX and AMMA SOP-0. In review *Journal of Geophysical Research*.
- Mallet, M., Roger, J. C., Despiiau, S., Dubovik, P. and Putaud, J. P., 2003. Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE, *Atmospheric Research*, 69, 73-97.
- Mallet, M., Pont V. and Liousse C., 2005. Modelling of strong heterogeneities in aerosol single scattering albedos over a polluted region, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09807, doi:10.1029/2005GL022680.
- Mallet, M., Pont, V., Liousse, C., Gomes, L., Pelon, J., Osborne, S., Haywood, J., Roger, J., Dubuisson, P., Mariscal, A., Thouret, V. and Goloub, P., 2008. Aerosol direct radiative forcing over djougou (northern Benin) during the African monsoon multidisciplinary analysis dry season experiment (special observation period-0), *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2007JD009419.
- Martins, J. V., Hobbs, P. V., Weiss, R. E. and Artaxo, P., 1998. Sphericity and morphology of smoke particles from biomass burning in Brazil, *J. Geophys. Res.*, 103, 32051–32057.
- McGranahan, G. and Murray, F., 2003. Air pollution & health in rapidly developing countries. In *Earthscan* (Ed.), 227 p.
- Medalia, A. I. and Rivin, D., 1982. Particulate carbon and other components of soot and carbon black, *Carbon*, 20, 481–492.

- Metschies, G.P., 1999. Prix et taxation des carburants. GTZ. 96 p. Available from : <http://www.international-fuel-prices.com/downloads/FuelPrices1999French.pdf>
- Michel, C., Lioussé, C., Grégoire, J.-M., Tansey, K., Carmichael, G. R. and Woo, J.-H., 2005. Biomass burning emission inventory from burnt area data given by the SPOT-VEGETATION system in the frame of TRACE-P and ACE-Asia campaigns. *J. Geophys. Res.*, 110, D09304, doi:10.1029/2004JD005461.
- Mieville, A., Granier, C., Lioussé, C., Guillaume, B., Mouillot, F., Lamarque, J.-F., Grégoire, J.-M., and Pétron, G., 2010. Emissions of gases and particles from biomass burning using satellite data and an historical reconstruction, *Atmos. Environ.*, 44, 1469–1477, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.01.011.
- Mikhailov, E. F., Vlasenko, S. S., Krämer, L. and Niessner, R., 2001. Interaction of soot aerosol particles with water droplets: influence of surface hydrophilicity, *J. Aerosol Sci.*, 32, 697–711.
- Ministère des Transports (Mali), 2008. Transport routier Malien : rapport du conseil des Ministres du 11 décembre 2008.
- Mukai, H. and Ambe, Y., 1986. Characterization of a humic acid-like brown substance in airborne particulate matter and tentative identification of its origin, *Atmos. Environ.*, 20, 813–819.
- Myhre, G., Stordal, F., Restad, K. and Isaksen, I., 1998. Estimates of the direct radiative forcing due to sulfate and soot aerosols, *Tellus, Ser. B*, 50, 463-477.
- Nenmar, A., Hoet, P. H. M., Vanquickenborne, B., Dinsdale, D., Thomeer, M., Hoylaerts, M. F., Vanbilloen, H., Mortelmans, L. and Nemery, B., 2002. Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*, 105, pp. 411-414.
- Nenmar, A., Hoet, P. H. M., Dinsdale, D., Vermeylen, J., Hoylaerts, M. F., Nemery, B., 2003. Diesel exhausts particles in lung acutely enhance experimental peripheral thrombosis. *Circulation*, 107, 1202-1208.
- NNPC (Nigerian National Petroleum Corporation), 2005. Annual Statistical Bulletin. Available from : <http://www.nnpcgroup.com/performance/index.php>.
- Novakov, T. and Penner, J. E., 1993. Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei Concentrations, *Nature*, 365, 823–826.
- Nuti, M.P., 1998. Emissions from two-stroke engines. Society of Automotive Engineers, Warrendale.
- Oberlin, A., 1989. High-resolution TEM studies of carbonization and graphitization, in: *Chemistry and Physics of Carbon*, edited by: Thrower, P. A., M. Dekker, New York, pp. 21–142.

- OCDE (Organisation de la Coopération et du Développement Economiques), 2006. Les dynamiques démographiques. Available from : <http://www.oecd.org/dataoecd/7-42/39803778.pdf>
- OCDE (Organisation de la Coopération et du Développement Economiques), 2007. Forum pour le partenariat avec l'Afrique unité de soutien : l'Afrique et le changement climatique. Available from : www.oecd.org/dataoecd/21/22/40109866.pdf
- Onischuk, A. A., di Stasio, S., Karasev, V. V., Baklanov, A. M., Makhov, G. A., Vlasenko, A. L., Sadykova, A. R., Shipovalov, A. V. and Panfilov, V. N., 2003. Evolution of structure and charge of soot aggregates during and after formation in a propane/air diffusion flame, *J. Aerosol Sci.*, 34, 383-403.
- 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/articles69320-Ouedraogo.pdf>.
- Penner, J. E., Chuang, C. C., Grant, K., 1998. Climate forcing by carbonaceous and sulfate aerosols, *Clim. Dyn.*, 14, 839–851.
- Penner, J. E., Andreae, M. O., Annegarn, H., Barrie, L., Feichter, J., Hegg, D., Jayaraman, A., Leaitch, R., Murphy, D., Nganga, J. and Pitari, G., 2001. Aerosols, their Direct and Indirect Effects, in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C. A., Cambridge University Press, New York, 881.
- Peters, W., Krol, M., Dentener, F., Thompson, A. M. and Lelieveld, J., 2002. Chemistry-transport modelling of the satellite observed distribution of tropical tropospheric ozone. *Atmos. Chem. Phys.*, 2, pp. 103-120.
- Péré, J. C., Mallet, M., Bessagnet, B. and Pont, V., 2009. Evidence of the aerosol core-shell mixing state over Europe by using CHIMERE simulations and AERONET inversions, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09807, doi:10.1029/2009GL037334.
- PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement), 2007. Rapport mondial sur le développement humain 2007/2008. La lutte contre le changement climatique : un impératif de solidarité humaine dans un monde divisé. Available from : http://hdr.undp.org/en/media/HDR_20072008_FR_Complet_rev.pdf
- Pont, V., Mallet, M., Liousse, C., Gomes, L., Malavelle, F., Solmon, F., Galy-Lacaux, C., Gardrat, E. and Castéra P., 2009. Mixing of dust and carbonaceous aerosols: three concepts of chemical scheme from AMMA dry season experiment (SOP 0 - January 2006) at Djougou (Benin). Third International AMMA Conference on Predictability of the West African Moosoon Weahter, Climate and Impacts, Ouagadougou (Burkina Faso), 20-24 July.

- Pöschl U., Letzel T., Schauer C. and Niessner R., 2001. Interaction of ozone and water vapour with spark discharge soot aerosol coated with benzo[a]pyrene: O₃ and H₂O adsorption, benzo[a]pyrene degradation and atmospheric implications. *J. Phys. Chem.A.* 105, 4029-4041.
- Pöschl, U., 2003. Aerosol particle analysis: challenges and progress, *Anal. Bioanal. Chem.*, 375, 30–32.
- Posfai, M., Anderson, J. R., Buseck, P. R., and Sievering, H., 1999. Soot and sulfate aerosol particles in the remote marine troposphere, *J. Geophys. Res.*, 104, 21 685–21 693.
- Prather, M., 1986. Numerical advection by conservation of second order moments. *J. Geophys. Res.*, 91, pp. 6671-6681.
- Ramgolam, K., Favez, O., Cachier, H., Gaudichet, A., Marano, F., Martinon, L. and Baeza-Squiban, A., 2009. Size-partitioning of an urban aerosol to identify particle determinants involved in the proinflammatory response induced in airway epithelial cells. *Particle and Fibre Toxicology* 2009, 6:10. doi:10.1186/1743-8977-6-10.
- Reisinger, P., Wonaschütz, A., Hitzenberger, R., Petzold, A., Bauer, H., Jankowski, N., Puxbaum, H., Chi, X. and Maenhaut, W., 2008. Intercomparison of measurement techniques for black or elemental carbon under urban background conditions in wintertime: Influence of biomass combustion, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 884–889.
- Roberts, G., Wooster, M. J., Perry, G. L. W., Drake, N., Rebelo, L-M. and Dipotso, F., 2005. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Part 2 - application to southern Africa using geostationary SEVIRI Imagery, *Journal of Geophysical Research*, 110 (D21111), doi:10.1029/2005-JD006018.
- Rodgers, C. F., Hudson, J. G., Zielinska, B., Tanner, R. L., Hallet, J. and Watson, J. G., 1991. Cloud condensation nuclei from biomass burning. *Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications*, edited by J. S. Levine. MIT Press, Cambridge, Mass. pp., 431-438.
- Roelofs, G. J. and Lelieveld, J., 1995. Distribution and budget of ozone in the troposphere calculated with a chemistry-general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 100, pp. 20983-20998.
- Rosen, H. and Novakov, T., 1977. Raman-scattering and characterization of atmospheric aerosol particles, *Nature*, 266, 708–710.
- Ruellan, S., Cachier, H., Gaudichet, A., Masclet, P. and Lacaux, J. P., 1999. Airborne aerosols over central Africa during the experiment for regional sources and sinks of oxidants (EXPRESSO), *Journal of Geophys. Res.*, 104, 30 673–30 690.
- Ruellan, S. and Cachier, H., 2001. Characterisation of fresh particulate vehicular exhausts near a Paris high flow road. *Atmospheric Environment*, 35, pp., 453-468.

- Russell G. and Lerner J., 1981. A new finite-differencing scheme for the tracer transport equation. *J. Appl. Meteor.*, 20, pp. 1483-1498.
- 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.
- Saxena, P., Hildemann, L. M., McMurry, P. H. and Seinfeld, J. H., 1995. Organics alter hygroscopic behavior of atmospheric particles, *J. Geophys. Res.*, 100, 18755–18770.
- Schmid, H., Laskus, L., Jürgen Abraham, H., Baltensperger, U., La vanchy, V., Bizjak, M., Burba, P., Cachier, H., Crow, D., Chow, J., Gnauk, T., Even, A., Ten Brink, H. M., Giesen, K. P., Hitzenberger, R., Hueglin, C., Maenhaut, W., Pio, C., Carvalho, A., Putaud, J. P., Toom-Sauntry, D. and Puxbaum, H., 2001. Results of the “carbon conference” international aerosol carbon round robin test stage I, *Atmos. Environ.*, 35, 2111–2121.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., 1998. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, J. Wiley, New York, Chichester, xxvii, 1326 pp.
- Shulman, M., Jacobsen, M. C., Charlson, R. J., Synovec, R. E. and Young, T. E., 1996. Dissolution behavior and surface tension effects of organic compounds in nucleating cloud droplets, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 277–280.
- Solmon, F., Giorgi, F. and Liousse, C., 2006. Development of a regional anthropogenic aerosol model for climate studies: application and validation over a European/African domain. *Tellus* 58B, 51–72.
- Spezzano, P., Picini, P., Cataldi, D., Messale, F. and 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.
- Stroppiana, D., Brivio, P. A., Grégoire, J-M., Liousse, C., Guillaume, B., Granier, C., Mieville, A. and Chin, M., 2010. Comparison of global monthly CO emission maps derived from remotely sensed burned area datasets. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 10. 17657-17697.
- Su, D. S., Müller, J. O., Jentoft, R. E., Rothe, D., Jacob, E. and Schlögl, R., 2004. Fullerene-like soot from EuroIV diesel engine: consequences for catalytic automotive pollution control, *Topics in Catalysis*, 30–31, 241–245.
- SWAC (Sahel and West Africa Club), 1999. Pour préparer l'avenir de l'Afrique de l'Ouest, une vision à l'horizon 2020 : étude des perspectives à long terme en Afrique de l'Ouest, Club du Sahel/OCDE, Paris.

- Tansey, K., Grégoire, J-M., Stroppiana, D., Sousa, A., Silva, J. M. N., Pereira, J. M. C., Boschetti, L., Maggi, M., Brivio, P. A., Fraser, R., Flasse, S., Ershov, D., Binaghi, E., Graetz, D. and Peduzzi, P., 2004. Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 109, D14S03, doi:10.1029/2003JD003598.
- Ten Brink, H., Maenhaut, W., Hitzenberger, R., Gnauk, T., Spindler, G., Even, A., Chi, X., Bauer, H., Puxbaum, H., Putaud, J. P., Tursic, J. and Berner, A., 2004. INTERCOMP2000: The comparability of methods in use in Europe for measuring the carbon content of aerosol, *Atmos. Environ.*, 38, 6507–6519.
- Tiedtke M.A., 1989. A comprehensive mass-flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models, *Mon. Weath. Rev.*, 117, 1779-1800.
- 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. and Jeng, F. T., 2000. Air pollutant emission factors from new and in-use motorcycles. *Atmospheric Environment*, vol. 34, pp., 4747-4754.
- Tummon, F., Solmon, F., Liousse, C. and Tadross, M., 2010. Simulation of the direct and semi-direct aerosol effects on the southern Africa regional climate during the biomass burning season, *J. Geophys. Res.*, 115(D19), doi:10.1029/2009JD013738.
- UN (United Nations), 2002. Energy Statistics Database. Available from : <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3aMO%3btrID%3a1221>.
- UN (United Nations), 2004. World Population Prospects, 2004. Energy Statistics Database.
- UN (United Nations), 2005. World Population Prospects, The 2005 Revision, Vol. I, Comprehensive Tables (United Nations publication, Sales No. E.05.XIII.5), ESA/P/WP/2005, www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005wup.htm.
- UN (United Nations), 2007. Population Mondiale. Available from : <http://perspective.-usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=1&codeStat=SP.POP.TOTL&anneeStat1=2007&grandesRegions=10&codetheme2=2&codeStat2=x&mode=carte&afficheNom=aucun&langue=fr&noStat=11>.
- Vallius, M.J., Ruuskanen, J., Mirne, A. and Pekkanen, J., 2000. Concentrations and estimated soot content of PM1, PM2.5 and PM10 in a subarctic urban atmosphere. *Environmental Science and technology*. Vol 34, pp. 1919-1925.
- Van Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S. and Jr., A. F. A., 2006. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.*, 6(11), 3423–3441.

- Volckens, J., Olson, D. A., Hays, M. D., 2008. Carbonaceous species emitted from handheld two-stroke engines. *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp., 1239-1248.
- Wahlin, P., Palmgren, F. and Van Dingenen, R., 2001. Experimental studies of ultrafine particles in streets and the relationship to traffic. *Atmospheric Environment*. Vol 35, pp. 63-69.
- Wane, H. R., 2001. Urban mobility and emissions : towards accurate standards for sub-Saharan Africa. A research program and results on a Sahelian case : the district of Bamako.
- Wang, M. and Penner, J. E., 2010. Cirrus clouds in a global climate model with a statistical cirrus cloud scheme. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5449-5474.
- Warren, D. R. and Seinfeld, J. H., 1985. Simulation of aerosol size distribution evolution in systems with simultaneous nucleation, condensation, and coagulation. *Aerosol Science and Technology* 4(1), pp.31-43.
- Watson, J. G., Chen, L. W. A. and Fung, K., 2004. Factors affecting the quantification of elemental carbon, 8th International conference on carbonaceous particles in the atmosphere, Vienna (Austria).
- Watson, J. G., Chow, J. C. and Chen, L.-W. A., 2005. Summary of organic and elemental carbon/black carbon analysis methods and intercomparisons, *Aerosol Air Qual. Res.*, 5, 65–102.
- Weingartner, E., Burtscher, H. and Baltensperger, U., 1997. Hygroscopic properties of carbon and diesel soot particles, *Atmos. Environ.*, 31, 2311–2327.
- Wentzel, M., Gorzawski, H., Naumann, K. H., Saathoff, H. and Weinbruch, S., 2003. Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols, *J. Aerosol Sci.*, 34, 1347–1370.
- Whitby K.T., 1978. The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos. Environ.*, 12, pp. 135-159.
- White, A. H. and Germer, L. H., 1941. The structure of black carbon, *J. Chem. Phys.*, 9, 492–502.
- Wooster, M. J., Roberts, G., Perry, G. L. W. and Kaufman, Y. J., 2005. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *J. Geophys. Res.*, 110 (D24311), doi:10.1029/2005JD006318.
- World Bank, 2002. Data population in Africa in 2002. Available from : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=1&codeStat=SP.POP.TOTL&anneeStat1=2002&grandesRegions=10&codetheme2=2&codeStat2=x&mode=carte&afficheNom=aucun&langue=fr&noStat=11>.

- World Bank, 2005. Data population in 2005. Available from : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=1&codeStat=SP.POP.TOTL&anneeStat1=2005&grandesRegions=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.
- Xing, L. and Chameides, W.L., 1990. Model studies of the impact of chemical inhomogeneity on SO₂ oxidation in warm stratiform clouds, *J. Atmos. Chem.*, 13, pp. 13971-13979.
- Yang, H.-H., Hsieh, L.-T., Liu, H.-C. and Mi, H.-H., 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from motorcycles. *Atmospheric Environment*, vol. 39, pp., 17-25.
- Zhou, W. and Shun-Hua, Y., 1998. Effects of two new lubricants on the mutagenicity of scooter exhaust particulate matter. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis.*, vol 414 (1-3), pp. 131-137.

ANNEXES

Annexe 1 : Questionnaire sur les consommations de combustibles fossiles et de biofuels : réponse du Burkina Faso.	226
Annexe 2 : Liste des pays d’Afrique et des secteurs d’activités qui ont été modifiés.....	233
Annexe 3 : Liste détaillée des facteurs d’émissions de carbone suie et de carbone organique par fuel/biofuel, secteur d’activité et niveau de développement des pays. ...	235
Annexe 4 : Définition des combustibles fossiles et des biofuels selon la classification ONU	243
Annexe 5 : Concentrations en carbone suie et en carbone organique en Janvier 2005 et Juillet 2005 dans le scénario NEW AFS.....	245

Annexe 1 : Questionnaire sur les consommations de combustibles fossiles et de biofuels : réponse du Burkina Faso.

Notice explicative sur le questionnaire de déclaration des productions et consommations de fuels et de biofuels pour l'élaboration d'un inventaire national des émissions d'aérosols carbonés pour l'année 2005.

But de l'enquête

La présente enquête a pour but de recueillir des informations détaillées sur les productions et consommations de fuels et biofuels issus du trafic routier, des industries et des pratiques domestiques. A terme, l'objectif vise à améliorer l'inventaire des émissions anthropiques d'aérosols de combustion en Afrique afin de caractériser l'impact de ces aérosols sur la qualité de l'air et sur le bilan radiatif.

Contexte du travail

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse effectuée par Eric-Michel ASSAMOI (CÔTE D'IVOIRE) au sein de l'équipe « Emissions, Dépôts et Impacts » du Laboratoire d'Aérodologie de l'Université Paul Sabatier à Toulouse (France). Cette thèse est encadrée par Catherine LIOUSSE et Jean-Pierre LACAUX et s'intitule « **Climat régional en Afrique et impacts anthropiques** ». Son contexte est le suivant :

« Le climat régional est une thématique majeure, tout particulièrement en Afrique qui est un continent témoin des changements climatiques et des différents impacts en termes de déforestation, de désertification et par suite, en termes de ressources vitales. Ces impacts mul-

tiples se répercutent sur de très nombreux secteurs d'activités : agronomie et rendement des cultures, écologie et écosystèmes, ressources en eau et hydrologie, qualité de l'air et de nombreux aspects socio-économiques connexes. La croissance démographique rapide que connaît le continent africain ces dernières décennies ainsi que l'exode rural, tendent de plus en plus à concentrer dans les mégalopoles (e.g. Abidjan, Lagos) une grande partie des activités nationales polluantes (transports, industries, ...), en plus du développement des activités pétrolières et minières le long des côtes du Golfe de Guinée. De même, les combustions de biofuels sont largement répandues pour des besoins domestiques. Tout ceci contribue à des émissions anthropiques considérables et croissantes d'aérosols de combustion dont les inventaires sont encore largement peu connus sur le continent ».

Problématique

Notre étude porte principalement sur les aérosols carbonés composés de carbone suie et de carbone organique. Son intérêt est justifié par le fait que la réduction des émissions de ces aérosols pourrait s'avérer plus rapidement efficace qu'une restriction sur les gaz à effet de serre (Hansen et al., 2002) en termes de réduction du réchauffement climatique. Depuis les années 1990, des mesures de restriction ont été prises dans le domaine industriel (nouvelles technologies moins polluantes), ainsi que pour le transport routier (FAP¹) surtout dans les pays développés de l'hémisphère nord. Par contre en Afrique, les émissions ne sont pas contrôlées et il existe même des sources de pollution spécifiques mal renseignées dans les inventaires et pourtant très efficaces (mélange de comburant huile-essence, vieilles voitures importées du continent européen, ...).

Les inventaires existants utilisent des données globales qui sont peu fiables. En comparant les données des Nations Unies de fuels fossils et de biofuels des pays africains et celles de l'organisme régional AfricaClean, on peut montrer qu'il existe de grandes différences entre les deux jeux de données : la figure 1 présente l'exemple de la consommation de diesel qui en Côte d'Ivoire, par exemple, est sous-estimée à près de 200% par les Nations-Unies !

¹ Filtre à particules

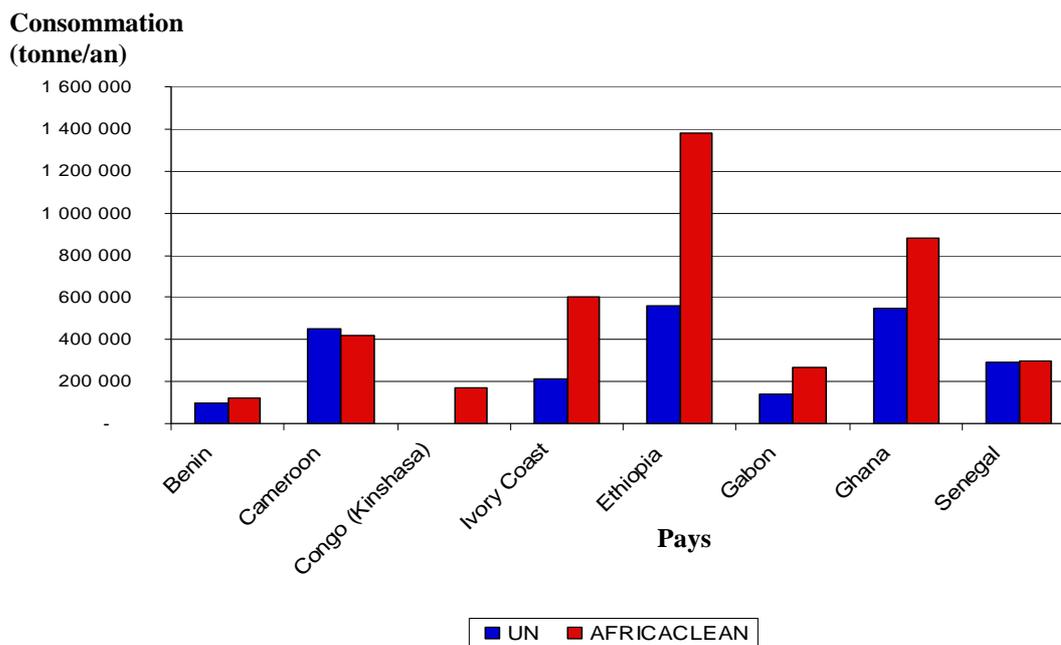


Figure 1 : Consommations de diesel de certains pays africains en 2000 : comparaison des données des Nations-Unis (en bleu) et des données AfricaClean (en rouge).

Une quantification plus précise de ces émissions en Afrique paraît donc primordiale. Nous nous focaliserons sur 3 secteurs où ces émissions sont particulièrement mal évaluées. Il s'agit du **trafic routier** et des secteurs **industriel** et **domestique**.

Acquis

L'équipe EDI² du laboratoire d'aérodynamique a une compétence internationalement reconnue dans le domaine des inventaires d'émissions d'aérosols carbonés à l'échelle globale (Lioussé et al., 1996; Cooke et al., 1999; Junker and Lioussé, 2006) ainsi qu'à l'échelle régionale, en Asie (Michel et al., 2005), en Afrique (Konaré et al., 2007) et en Europe (Guillaume and Lioussé, 2007). Cette forte dynamique de recherche s'insère dans le cadre du réseau international ACCENT-GEIA³. Il est à noter que plusieurs algorithmes de calcul ont été développés permettant de calculer les émissions régionales et globales de 1860 à 2100. Les émissions sont calculées sur la base des quantités de consommations des différents combustibles sur lesquelles, on applique un facteur d'émission (EF)⁴ propre à chaque combustible.

² Emissions, Dépôts et Impacts

³ Global Emissions Inventory Activity

⁴ facteur d'émission (EF) : c'est la quantité (en gramme) de particules carbonées émises dans l'atmosphère lorsqu'on brûle 1 kg de combustible

Ces inventaires ont pour finalité d'être utilisés en modélisation atmosphérique, entre autre pour des scénarii futurs à l'échelle globale et régionale, et tout particulièrement pour une problématique de climat régional en Afrique en collaboration avec l'ICTP⁵ de Trieste.

Votre participation est essentielle

Votre participation à la présente enquête, sur la base du seul volontariat est essentielle pour garantir la qualité de l'exploitation ultérieure de cette enquête, en termes de pollution de l'air et de qualité de vie. Il est très important que les renseignements soient aussi exacts et fiables que possible. Il s'agit pour nous de développer un inventaire d'émission spécifique à l'Afrique et de pouvoir construire ses développements futurs.

Réponse et retour

S'il vous plait, veuillez remplir et retourner le présent questionnaire le plus tôt possible pour des soucis d'exploitation des données. En cas de questions sur cette enquête ou si vous avez besoin d'aide pour remplir le questionnaire, vous pouvez communiquer avec les responsables suivants :

Eric-Michel ASSAMOI	assem@aero.obs-mip.fr	00 33 5 61 33 27 13
Catherine LIOUSSE	lioc@aero.obs-mip.fr	00 33 5 61 33 27 66
Abdourahamane KONARE	konarea@yahoo.com	00 225 07 11 41 74

Questionnaire

Ce questionnaire comporte 4 tableaux regroupant les 3 secteurs d'investigation suivant : le trafic routier, les industries et le secteur domestique.

Les informations demandées portent sur les quantités de consommation annuelle, mais également sur les quantités de production, d'exportation, d'importation et des stocks à des dates précises (1^{er} janvier et 31 décembre de l'année considérée, **2005**). Au niveau du trafic routier, nous aurons besoin en plus du nombre de véhicules en circulation pour deux périodes (avant 2001 et après 2001), afin d'adapter leurs émissions aux normes en vigueur durant ces périodes.

Nous vous remercions par avance de votre collaboration

TRAFIC ROUTIER (2005)

		NOMBRE DE VEHICULES DONT LA DATE DE MISE EN CIRCULATION EST :	
		Avant 2001 (en 2000)	Après 2001 (en 2005)
Véhicules	Diesel	10775	18252
	Essence	32325	54756
Camions (trucks)	Diesel	7360	14071
	Essence	0	0
Cars, Bus	Diesel	2660	3965
	Essence	0	0
Motos, mobylettes		63830	167389
Autres (spécifier)	Diesel	2567	5707
	Essence	292	569

Source : Direction Générale des Transports Terrestres et Maritimes (DGTMM)

CARBURANTS LIES AU PARC AUTOMOBILE						
	Production	Exportation	Importation	Consom- mation	Stock 01/01/20 05	Stock au 31/12/2005
Diesel	0	0	172 061 t	41 554 tep		
Essence	0	0	99 860 t	100947 tep		
Huile						
Autres (spécifier)						

Source:

- Statistiques Ministère des Mines, des Carrières et de l'Energie, Burkina Faso, 2007.
- Société Nationale Burkinabé d'Hydrocarbures (SONABHY).

NB :

- Les importations sont fonction du stock de chaque produit, malheureusement les données sur les stocks aux périodes indiquées n'ont pu être obtenues jusque là.
- Les importations de gasoil comprennent la part du transport et la part de l'industrie.
- tep : tonne équivalent pétrole.

INDUSTRIES (2005)

		FUELS COMBUSTIBLES					
		Production	Exportation	Importation	Consom- Mation	Stock au 01/01/2005	Stock au 31/12/2005
SOLIDES	Charbon	0	0	0	0	0	0
	Lignite	0	0	0	0	0	0
	Bois						
	Charbon de bois						
	Bağasse						
	Déchets animaux						
	Déchets végétaux						
	Autre (spécifier)						
LIQUIDES	Diesel				77 172 tep		
	Essence	0	0		0		
	kérosène	0	0		0	0	0
	GPL	0	0	0	0	0	0
	Fioul lourd	0	0	38 860 t	24 520 tep		
	Autre (spécifier)						
	DDO (Distillate Diesel Oil)	0	0	6 700 t	82 827 tep		

Source:

- Statistiques Ministère des Mines, des Carrières et de l'Energie, Burkina Faso, 2007
- Société Nationale Burkinabé d'Hydrocarbures (SONABHY)

SECTEUR DOMESTIQUE (2005)

		FUELS COMBUSTIBLES					
		Production	Exportation	Importation	Consommation	Stock au 01/01/2005	Stock au 31/12/2005
SOLIDES	Charbon de bois		0	0	201517 t		
	Charbon		0	0	0	0	0
	Bois		0	0	4247966 t		
	Autre (spécifier)						
LIQUIDES	Fioul domestique				0		
	Essence				0		
	Autre (spécifier) : pétrole lampant	0		16604 t	40115 tep		

Source : Statistiques Ministère des Mines, des Carrières et l'Énergie, Burkina Faso, 2007

NB :

- Pour le secteur domestique, il n'y a que le charbon de bois, le bois et gaz butane. A titre d'information, la consommation de gaz en 2005 était de 7285 tep dans le secteur domestique.

Ont travaillé pour les données ci-dessus :

- Bernard NANA, étudiant en thèse de doctorat à l'Université de Ouagadougou, « Modélisation de la pollution atmosphérique et gestion de la qualité de l'air urbaine à Ouagadougou, Burkina Faso » bernard.nana@univ-ouaga.bf
-
- Tizane DAHO, étudiant en thèse de doctorat à l'Université de Ouagadougou, « Contribution à l'étude de l'utilisation des huiles végétales et leurs dérivés dans les moteurs Diesel et les brûleurs : Cas de l'huile de coton » tizane_daho@univ-ouaga.bf

Annexe 2 : Liste des pays d'Afrique et des secteurs d'activités qui ont été modifiés

PAYS	Secteurs d'activités*		
	Trafic	Domestique	Industrie
ALGERIA	REG	REG	REG
ANGOLA	UN	UN	UN
BENIN	REG	REG	UN
BOTSWANA	UN	UN	UN
BURKINA_FASO	REG	REG	REG
BURUNDI	UN	UN	UN
CAFRREP	UN	UN	UN
CAMEROON	REG	UN	UN
CAPEVERDE	UN	UN	UN
CHAD	REG	UN	UN
COMOROS	UN	UN	UN
CONGO	UN	UN	UN
DJIBOUTI	UN	UN	UN
EGYPT	REG	UN	UN
EQUINEA	UN	UN	UN
ETHIOPIA	UN	UN	UN
GABON	UN	UN	UN
GAMBIA	UN	UN	UN
GHANA	REG	UN	UN
GUINEA	REG	UN	UN
GUINEA-BS	REG	UN	UN
IVORYCST.	REG	REG	REG
KENYA	UN	UN	UN
LIBERIA	REG	UN	UN
LIBYA	UN	UN	UN
MADAGASCAR	UN	UN	UN
MALAWI	UN	UN	UN
MALI	REG	UN	UN
MAURITANI	UN	UN	UN
MAURITIUS	UN	UN	UN
MOROCCO	REG	REG	REG
MOZAMBIQU	UN	UN	UN
NAMIBIA	UN	UN	UN
NIGER	REG	UN	UN
NIGERIA	REG	REG	REG
REUNION	UN	UN	UN
RWANDA	UN	UN	UN
SAFRICA	UN	UN	UN
SAOTOME&	UN	UN	UN

* REG correspond aux données qui ont été modifiées lors de notre travail tandis que UN renvoie aux données de l'ONU (cf. inventaire de Junker and Lioussé, 2008)

PAYS	Secteurs d'activités*		
	Trafic	Domestique	Industrie
SENEGAL	REG	UN	UN
SEYCHELLS	UN	UN	UN
SOMALIA	UN	UN	UN
STHELENA	UN	UN	UN
SUDAN	UN	UN	UN
SWAZILAN	UN	UN	UN
TANZANIA	UN	UN	UN
TOGO	REG	UN	UN
TUNISIA	UN	UN	UN
UGANDA	UN	UN	UN
W.SAHARA	UN	UN	UN
ZAIRE	UN	UN	UN
ZAMBIA	UN	UN	UN
ZIMBABWE	UN	UN	UN

* REG correspond aux données qui ont été modifiées lors de notre travail tandis que UN renvoie aux données de l'ONU (cf. inventaire de Junker and Liousse, 2008)

Annexe 3 : Liste détaillée des facteurs d'émissions de carbone suie et de carbone organique par fuel/biofuel, secteur d'activité et niveau de développement des pays.

* Les niveaux de développement 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux pays en voie de développement, aux pays semi-développés et aux pays développés.

** Les codes ONU des fuels/biofuels sont détaillés en Annexe 4

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
1	Trafic	AV	BC	0,1	OC	1,14
1	Domestique	AV	BC	0,1	OC	1,14
1	Industrie	AV	BC	0,1	OC	1,14
2	Trafic	AV	BC	0,1	OC	1,14
2	Domestique	AV	BC	0,1	OC	1,14
2	Industrie	AV	BC	0,1	OC	1,14
3	Trafic	AV	BC	0,1	OC	1,14
3	Domestique	AV	BC	0,1	OC	1,14
3	Industrie	AV	BC	0,1	OC	1,14
1	Trafic	AW	BC	1	OC	12,5
1	Domestique	AW	BC	1	OC	12,5
1	Industrie	AW	BC	1	OC	12,5
2	Trafic	AW	BC	1	OC	12,5
2	Domestique	AW	BC	1	OC	12,5
2	Industrie	AW	BC	1	OC	12,5
3	Trafic	AW	BC	1	OC	12,5
3	Domestique	AW	BC	1	OC	12,5
3	Industrie	AW	BC	1	OC	12,5
1	Trafic	BB	BC	1,58	OC	2,29
1	Domestique	BB	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	BB	BC	1,1	OC	1,1
2	Trafic	BB	BC	0,82	OC	1,19
2	Domestique	BB	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	BB	BC	0,298	OC	0,29
3	Trafic	BB	BC	0,46	OC	0,66
3	Domestique	BB	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	BB	BC	0,149	OC	0,14

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
1	Trafic	BC	BC	1,58	OC	2,29
1	Domestique	BC	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	BC	BC	1,1	OC	1,1
2	Trafic	BC	BC	0,82	OC	1,19
2	Domestique	BC	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	BC	BC	0,298	OC	0,29
3	Trafic	BC	BC	0,46	OC	0,66
3	Domestique	BC	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	BC	BC	0,149	OC	0,14
1	Trafic	BF	BC	0,81	OC	2,43
1	Domestique	BF	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	BF	BC	0,72	OC	2,16
2	Trafic	BF	BC	0,675	OC	2,02
2	Domestique	BF	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	BF	BC	0,6	OC	1,8
3	Trafic	BF	BC	0,675	OC	2,02
3	Domestique	BF	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	BF	BC	0,6	OC	1,8
1	Trafic	BG	BC	6,40E-05	OC	0
1	Domestique	BG	BC	0,000116	OC	0
1	Industrie	BG	BC	1,10E-05	OC	0
2	Trafic	BG	BC	6,40E-05	OC	0
2	Domestique	BG	BC	0,000116	OC	0
2	Industrie	BG	BC	1,10E-05	OC	0
3	Trafic	BG	BC	6,40E-05	OC	0
3	Domestique	BG	BC	0,000116	OC	0
3	Industrie	BG	BC	1,10E-05	OC	0
1	Trafic	BK	BC	1,58	OC	2,29
1	Domestique	BK	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	BK	BC	1,1	OC	1,1
2	Trafic	BK	BC	0,82	OC	1,19
2	Domestique	BK	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	BK	BC	0,298	OC	0,29
3	Trafic	BK	BC	0,46	OC	0,66
3	Domestique	BK	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	BK	BC	0,149	OC	0,14
1	Trafic	BP	BC	0,3	OC	2,71
1	Domestique	BP	BC	0,67	OC	6,07
1	Industrie	BP	BC	0,134	OC	1,21
2	Trafic	BP	BC	0,3	OC	2,71
2	Domestique	BP	BC	0,67	OC	6,07
2	Industrie	BP	BC	0,134	OC	1,21
3	Trafic	BP	BC	0,3	OC	2,71
3	Domestique	BP	BC	0,67	OC	6,07
3	Industrie	BP	BC	0,134	OC	1,21

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
1	Trafic	BS	BC	0,41	OC	1,22
1	Domestique	BS	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	BS	BC	0,72	OC	2,16
1	Centrale thermique	BS	BC	0,103	OC	0,31
2	Trafic	BS	BC	0,33	OC	1,02
2	Domestique	BS	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	BS	BC	0,6	OC	1,8
2	Centrale thermique	BS	BC	0,08	OC	0,26
3	Trafic	BS	BC	0,33	OC	1,02
3	Domestique	BS	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	BS	BC	0,6	OC	1,8
3	Centrale thermique	BS	BC	0,08	OC	0,26
1	Trafic	CH	BC	0,75	OC	2,25
1	Domestique	CH	BC	0,75	OC	2,25
1	Industrie	CH	BC	0,75	OC	2,25
2	Trafic	CH	BC	0,75	OC	2,25
2	Domestique	CH	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	CH	BC	0,75	OC	2,25
3	Trafic	CH	BC	0,75	OC	2,25
3	Domestique	CH	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	CH	BC	0,75	OC	2,25
1	Trafic	CHM	BC	0	OC	0
1	Domestique	CHM	BC	0,5063	OC	4,759
1	Industrie	CHM	BC	0	OC	0
2	Trafic	CHM	BC	0	OC	0
2	Domestique	CHM	BC	0,5063	OC	4,759
2	Industrie	CHM	BC	0	OC	0
3	Trafic	CHM	BC	0	OC	0
3	Domestique	CHM	BC	0,5063	OC	4,759
3	Industrie	CHM	BC	0	OC	0
1	Trafic	CL	BC	0,57	OC	1,11
1	Domestique	CL	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	CL	BC	1,1	OC	1,1
1	Centrale thermique	CL	BC	0,072	OC	0,264
2	Trafic	CL	BC	0,37	OC	0,72
2	Domestique	CL	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	CL	BC	0,298	OC	0,29
2	Centrale thermique	CL	BC	0,072	OC	0,264
3	Trafic	CL	BC	0,2	OC	0,39
3	Domestique	CL	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	CL	BC	0,149	OC	0,14
3	Centrale thermique	CL	BC	0,036	OC	0,132

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
1	Trafic	DL	BC	5	OC	2,5
1	Domestique	DL	BC	0,35	OC	0,25
1	Industrie	DL	BC	1	OC	0,75
1	Centrale thermique	DL	BC	0,1	OC	0,075
2	Trafic	DL	BC	2	OC	1
2	Domestique	DL	BC	0,09	OC	0,07
2	Industrie	DL	BC	0,28	OC	0,21
2	Centrale thermique	DL	BC	0,028	OC	0,021
3	Trafic	DL	BC	1	OC	0,5
3	Domestique	DL	BC	0,07	OC	0,05
3	Industrie	DL	BC	0,2	OC	0,15
3	Centrale thermique	DL	BC	0,02	OC	0,015
1	Trafic	FS	BC	0,15	OC	0,73
1	Domestique	FS	BC	0,15	OC	0,73
1	Industrie	FS	BC	0,15	OC	0,015
1	Centrale thermique	FS	BC	0,015	OC	0,73
2	Trafic	FS	BC	0,15	OC	0,73
2	Domestique	FS	BC	0,15	OC	0,73
2	Industrie	FS	BC	0,15	OC	0,015
2	Centrale thermique	FS	BC	0,015	OC	0,07
3	Trafic	FS	BC	0,03	OC	0,07
3	Domestique	FS	BC	0,03	OC	0,07
3	Industrie	FS	BC	0,03	OC	0,003
3	Centrale thermique	FS	BC	0,003	OC	0,73
1	Trafic	FW	BC	0,36	OC	1,22
1	Domestique	FW	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	FW	BC	0,72	OC	2,16
1	Centrale thermique	FW	BC	0,103	OC	0,31
2	Trafic	FW	BC	0,3	OC	1,02
2	Domestique	FW	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	FW	BC	0,6	OC	1,8
2	Centrale thermique	FW	BC	0,08	OC	0,26
3	Trafic	FW	BC	0,3	OC	1,02
3	Domestique	FW	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	FW	BC	0,6	OC	1,8
3	Centrale thermique	FW	BC	0,08	OC	0,26
1	Trafic	GG	BC	6,40E-05	OC	0
1	Domestique	GG	BC	0,000116	OC	0
1	Industrie	GG	BC	1,10E-05	OC	0
2	Trafic	GG	BC	6,40E-05	OC	0
2	Domestique	GG	BC	0,000116	OC	0
2	Industrie	GG	BC	1,10E-05	OC	0
3	Trafic	GG	BC	6,40E-05	OC	0
3	Domestique	GG	BC	0,000116	OC	0
3	Industrie	GG	BC	1,10E-05	OC	0

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
1	Trafic	GK	BC	1,58	OC	2,29
1	Domestique	GK	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	GK	BC	1,1	OC	1,1
2	Trafic	GK	BC	0,82	OC	1,19
2	Domestique	GK	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	GK	BC	0,298	OC	0,29
3	Trafic	GK	BC	0,46	OC	0,66
3	Domestique	GK	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	GK	BC	0,149	OC	0,14
1	Trafic	JF	BC	1	OC	0,45
1	Domestique	JF	BC	1	OC	0,45
1	Industrie	JF	BC	1	OC	0,45
2	Trafic	JF	BC	1	OC	0,45
2	Domestique	JF	BC	1	OC	0,45
2	Industrie	JF	BC	1	OC	0,45
3	Trafic	JF	BC	1	OC	0,45
3	Domestique	JF	BC	1	OC	0,45
3	Industrie	JF	BC	1	OC	0,45
1	Trafic	KR	BC	0,03	OC	0,02
1	Domestique	KR	BC	0,03	OC	0,02
1	Industrie	KR	BC	0,03	OC	0,02
1	Centrale thermique	KR	BC	0	OC	0
2	Trafic	KR	BC	0,03	OC	0,02
2	Domestique	KR	BC	0,03	OC	0,02
2	Industrie	KR	BC	0,03	OC	0,02
2	Centrale thermique	KR	BC	0	OC	0
3	Trafic	KR	BC	0,03	OC	0,02
3	Domestique	KR	BC	0,03	OC	0,02
3	Industrie	KR	BC	0,03	OC	0,02
3	Centrale thermique	KR	BC	0	OC	0
1	Trafic	LB	BC	1,58	OC	2,29
1	Domestique	LB	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	LB	BC	1,1	OC	1,1
2	Trafic	LB	BC	0,82	OC	1,19
2	Domestique	LB	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	LB	BC	0,298	OC	0,29
3	Trafic	LB	BC	0,46	OC	0,66
3	Domestique	LB	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	LB	BC	0,149	OC	0,14
1	Trafic	LP	BC	0,0002	OC	0,02
1	Domestique	LP	BC	0,0002	OC	0,02
1	Industrie	LP	BC	0,0002	OC	0,02
2	Trafic	LP	BC	0,0002	OC	0,02
2	Domestique	LP	BC	0,0002	OC	0,02
2	Industrie	LP	BC	0,0002	OC	0,02

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
3	Trafic	LP	BC	0,0002	OC	0,02
3	Domestique	LP	BC	0,0002	OC	0,02
3	Industrie	LP	BC	0,0002	OC	0,02
1	Trafic	MO	BC	0,15	OC	0,73
1	Domestique	MO	BC	0,15	OC	0,73
1	Industrie	MO	BC	0,15	OC	0,73
2	Trafic	MO	BC	0,15	OC	0,73
2	Domestique	MO	BC	0,15	OC	0,73
2	Industrie	MO	BC	0,15	OC	0,73
3	Trafic	MO	BC	0,03	OC	0,1
3	Domestique	MO	BC	0,03	OC	0,1
3	Industrie	MO	BC	0,03	OC	0,1
1	Trafic	MW	BC	0,81	OC	2,43
1	Domestique	MW	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	MW	BC	0,72	OC	2,16
2	Trafic	MW	BC	0,675	OC	2,02
2	Domestique	MW	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	MW	BC	0,6	OC	1,8
3	Trafic	MW	BC	0,675	OC	2,02
3	Domestique	MW	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	MW	BC	0,6	OC	1,8
1	Trafic	NG	BC	6,40E-05	OC	0
1	Domestique	NG	BC	0,000116	OC	0
1	Industrie	NG	BC	1,10E-05	OC	0
2	Trafic	NG	BC	6,40E-05	OC	0
2	Domestique	NG	BC	0,000116	OC	0
2	Industrie	NG	BC	1,10E-05	OC	0
3	Trafic	NG	BC	6,40E-05	OC	0
3	Domestique	NG	BC	0,000116	OC	0
3	Industrie	NG	BC	1,10E-05	OC	0
1	Trafic	OB	BC	0,81	OC	1,22
1	Domestique	OB	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	OB	BC	0,72	OC	2,16
2	Trafic	OB	BC	0,675	OC	1,02
2	Domestique	OB	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	OB	BC	0,6	OC	1,8
3	Trafic	OB	BC	0,675	OC	1,02
3	Domestique	OB	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	OB	BC	0,6	OC	1,8
1	Trafic	OG	BC	6,40E-05	OC	0
1	Domestique	OG	BC	0,000116	OC	0
1	Industrie	OG	BC	1,10E-05	OC	0
2	Trafic	OG	BC	6,40E-05	OC	0
2	Domestique	OG	BC	0,000116	OC	0
2	Industrie	OG	BC	1,10E-05	OC	0

Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
3	Trafic	OG	BC	6,40E-05	OC	0
3	Domestique	OG	BC	0,000116	OC	0
3	Industrie	OG	BC	1,10E-05	OC	0
1	Trafic	OK	BC	0,57	OC	1,11
1	Domestique	OK	BC	2,28	OC	4,76
1	Industrie	OK	BC	1,1	OC	1,1
1	Centrale thermique	OK	BC	0,072	OC	0,264
2	Trafic	OK	BC	0,37	OC	0,72
2	Domestique	OK	BC	2,28	OC	4,76
2	Industrie	OK	BC	0,298	OC	0,29
2	Centrale thermique	OK	BC	0,072	OC	0,264
3	Trafic	OK	BC	0,2	OC	0,39
3	Domestique	OK	BC	1,39	OC	2,92
3	Industrie	OK	BC	0,149	OC	0,14
3	Centrale thermique	OK	BC	0,036	OC	0,132
1	Trafic	OS	BC	5	OC	2,5
1	Domestique	OS	BC	0,35	OC	0,25
1	Industrie	OS	BC	1	OC	0,75
2	Trafic	OS	BC	2	OC	1
2	Domestique	OS	BC	0,09	OC	0,07
2	Industrie	OS	BC	0,28	OC	0,21
3	Trafic	OS	BC	1	OC	0,5
3	Domestique	OS	BC	0,07	OC	0,05
3	Industrie	OS	BC	0,2	OC	0,15
1	Trafic	PT	BC	0,3	OC	2,71
1	Domestique	PT	BC	0,67	OC	6,07
1	Industrie	PT	BC	0,134	OC	1,21
2	Trafic	PT	BC	0,3	OC	2,71
2	Domestique	PT	BC	0,67	OC	6,07
2	Industrie	PT	BC	0,134	OC	1,21
3	Trafic	PT	BC	0,3	OC	2,71
3	Domestique	PT	BC	0,67	OC	6,07
3	Industrie	PT	BC	0,134	OC	1,21
1	Trafic	PU	BC	0,81	OC	1,22
1	Domestique	PU	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	PU	BC	0,72	OC	2,16
2	Trafic	PU	BC	0,675	OC	1,02
2	Domestique	PU	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	PU	BC	0,6	OC	1,8
3	Trafic	PU	BC	0,675	OC	1,02
3	Domestique	PU	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	PU	BC	0,6	OC	1,8

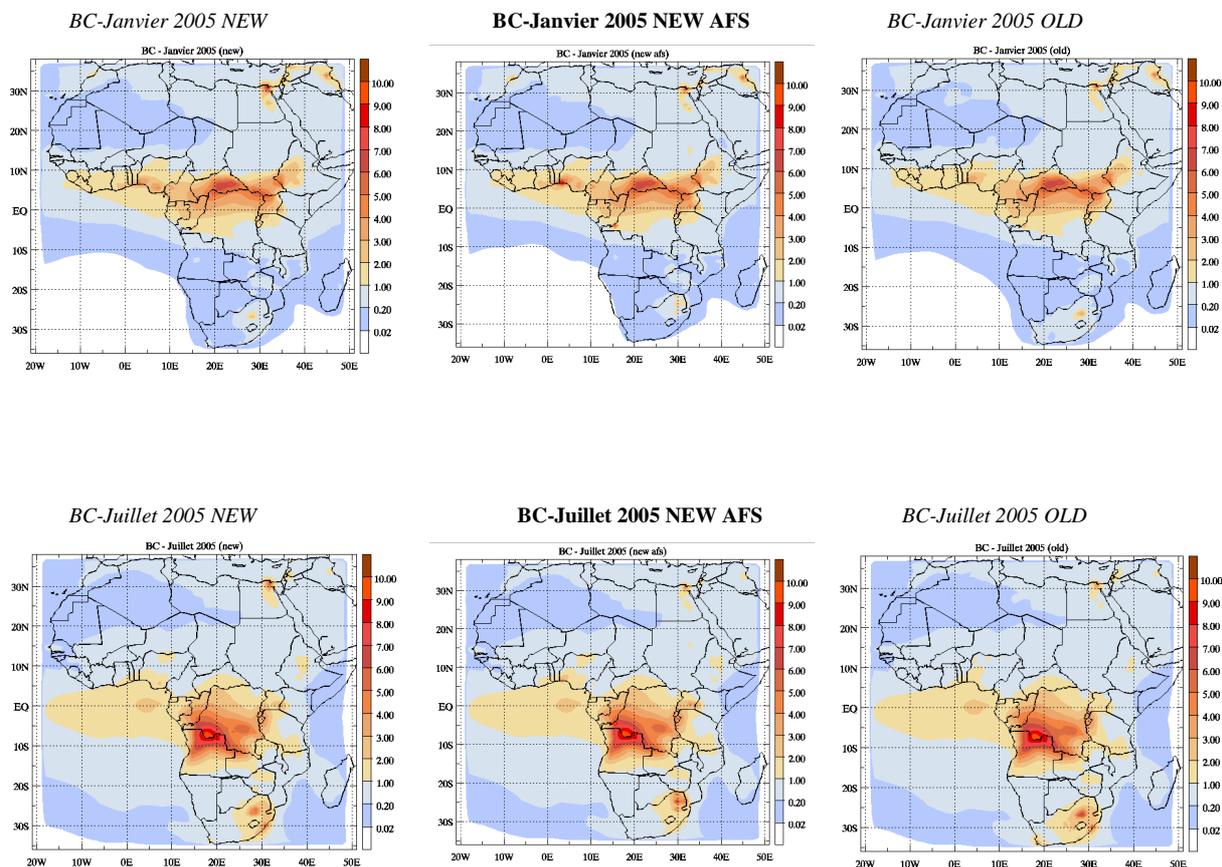
Niveau de développement*	Secteur d'activité	Code ONU des fuels/biofuels**	Aérosol	EF (BC) en g/kg	Aérosol	EF (OC) en g/kg
1	Trafic	RF	BC	5	OC	2,5
1	Domestique	RF	BC	0,35	OC	0,25
1	Industrie	RF	BC	1	OC	0,75
1	Centrale thermique	RF	BC	0,035	OC	0,035
2	Trafic	RF	BC	2	OC	1
2	Domestique	RF	BC	0,09	OC	0,07
2	Industrie	RF	BC	0,28	OC	0,21
2	Centrale thermique	RF	BC	0,009	OC	0,009
3	Trafic	RF	BC	1	OC	0,5
3	Domestique	RF	BC	0,07	OC	0,05
3	Industrie	RF	BC	0,2	OC	0,15
3	Centrale thermique	RF	BC	0,007	OC	0,007
1	Trafic	RG	BC	6,40E-05	OC	0
1	Domestique	RG	BC	0,000116	OC	0
1	Industrie	RG	BC	1,10E-05	OC	0
2	Trafic	RG	BC	6,40E-05	OC	0
2	Domestique	RG	BC	0,000116	OC	0
2	Industrie	RG	BC	1,10E-05	OC	0
3	Trafic	RG	BC	6,40E-05	OC	0
3	Domestique	RG	BC	0,000116	OC	0
3	Industrie	RG	BC	1,10E-05	OC	0
1	Trafic	TW	BC	2,31	OC	30,56
2	Trafic	TW	BC	2,31	OC	30,56
3	Trafic	TW	BC	0	OC	0
1	Trafic	VW	BC	0,81	OC	1,22
1	Domestique	VW	BC	0,9	OC	2,7
1	Industrie	VW	BC	0,72	OC	2,16
2	Trafic	VW	BC	0,675	OC	1,02
2	Domestique	VW	BC	0,75	OC	2,25
2	Industrie	VW	BC	0,6	OC	1,8
3	Trafic	VW	BC	0,675	OC	1,02
3	Domestique	VW	BC	0,75	OC	2,25
3	Industrie	VW	BC	0,6	OC	1,8

Annexe 4 : Définition des combustibles fossiles et des biofuels selon la classification ONU.

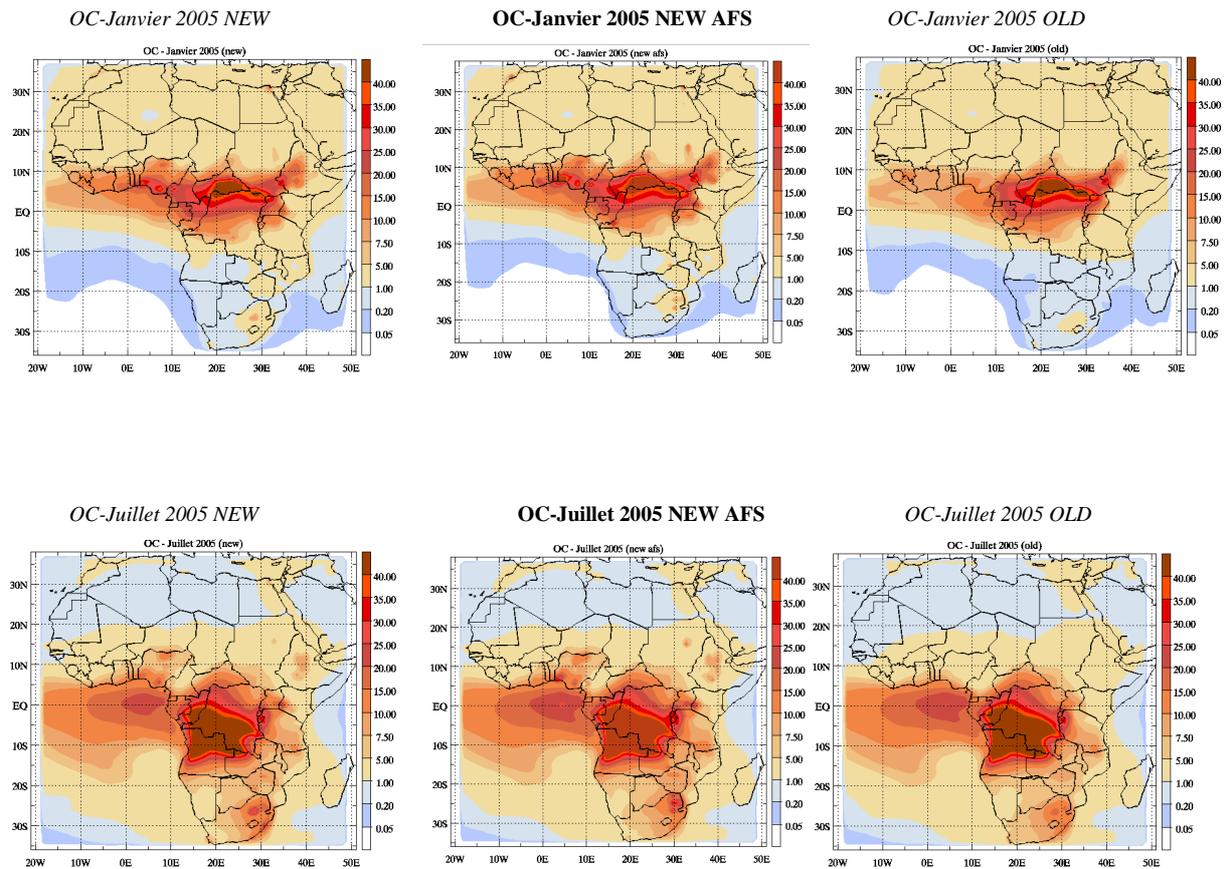
COMBUSTIBLE FOSSILE OU BIOFUEL	CODE ONU	STATUT
Animal wastes	AW	Biofuel Combustion
Biofuels	BF	Biofuel Combustion
Bagasse	BS	Biofuel Combustion
Charcoal (charbon de bois)	CH	Biofuel Combustion
Fuelwood	FW	Biofuel Combustion
Municipal wastes	MW	Biofuel Combustion
Other biofuels	OB	Biofuel Combustion
Pulp and paper wastes	PU	Biofuel Combustion
Residual fuel oil (fuel lourd)	RF	Biofuel Combustion
Refinery gas	RG	Biofuel Combustion
Vegetal wastes	VW	Biofuel Combustion
Aviation gasolene	AV	Fossil Fuel Combustion
Lignite (brown coal) briquettes	BB	Fossil Fuel Combustion
Hard coal (patent fuel) briquettes	BC	Fossil Fuel Combustion
Blast furnace gas (gaz des hauts fourneaux)	BG	Fossil Fuel Combustion
Brown coal coke	BK	Fossil Fuel Combustion
Peat briquettes (tourbe)	BP	Fossil Fuel Combustion
Hard coal	CL	Fossil Fuel Combustion
Gas-diesel oil	DL	Fossil Fuel Combustion
Feedstocks	FS	Fossil Fuel Combustion
Gasworks gas	GG	Fossil Fuel Combustion
Gas coke	GK	Fossil Fuel Combustion
Jet fuel	JF	Fossil Fuel Combustion
Kerosene	KR	Fossil Fuel Combustion
Lignite / brown coal	LB	Fossil Fuel Combustion
Liquefied petroleum gas (GPL)	LP	Fossil Fuel Combustion
Motor gasolene	MO	Fossil Fuel Combustion
Natural gas	NG	Fossil Fuel Combustion
Coke-oven gas	OG	Fossil Fuel Combustion
Coke-oven coke	OK	Fossil Fuel Combustion
Oil shale	OS	Fossil Fuel Combustion
Peat	PT	Fossil Fuel Combustion

COMBUSTIBLE FOSSILE OU BIOFUEL	CODE ONU	STATUT
Alcohol	AL	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Bitumen / Asphalt	BT	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Crude petroleum	CR	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Geothermal	EG	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Hard coal past	CLP	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Hydro	EH	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Lubricants	LU	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Naphta	NP	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Natural gas liquids	GL	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Natural gas liquids, not elsewhere specified	MP	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Natural gasolene	NT	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Nuclear	EN	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Other non-commercial	NC	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Other petroleum products	PP	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Peat past	PTP	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Petroleum coke	PK	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Petroleum wax	PW	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Plant condensate	CD	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Steam and hot water	ST	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Thermal	ET	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Total electricity	EL	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Uranium	UR	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
White spirit / industrial spirit	WS	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion
Wind	EW	Fossil Fuel or Biofuel No Combustion

Annexe 5 : Concentrations en carbone suie et en carbone organique en Janvier et Juillet 2005 dans le scénario NEW AFS.



Annexe 4a : Distributions spatiales des concentrations de carbone suie (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en Janvier 2005 (en haut) et en Juillet 2005 (en bas) obtenues à partir du nouvel inventaire (à gauche), de l'inventaire avec une nouvelle spatialisation sur l'Afrique du Sud (au centre) et de l'ancien inventaire (à droite).



Annexe 4b : Distributions spatiales des concentrations de carbone organique (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en surface en Janvier 2005 (en haut) et en Juillet 2005 (en bas) obtenues à partir du nouvel inventaire (à gauche), de l'inventaire avec une nouvelle spatialisation sur l'Afrique du Sud (au centre) et de l'ancien inventaire (à droite).