

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)	↑ Specific Absorption
	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)	

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 μm), 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 μm qui résulte du grossissement de petites particules ou de l'évaporation de grosses particules.
- un mode grossier avec des diamètres supérieurs à 1 μm .

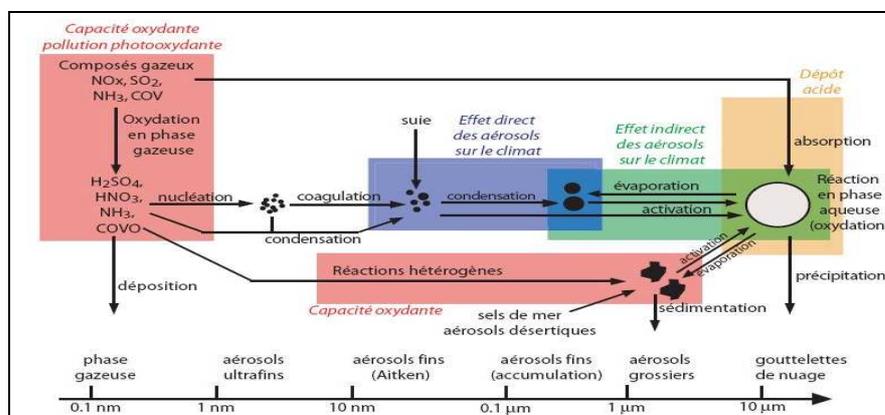


Fig. 1.2 : Schématisation des processus microphysiques affectant la granulométrie et la composition chimique des aérosols (IPCC, 2001).

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).

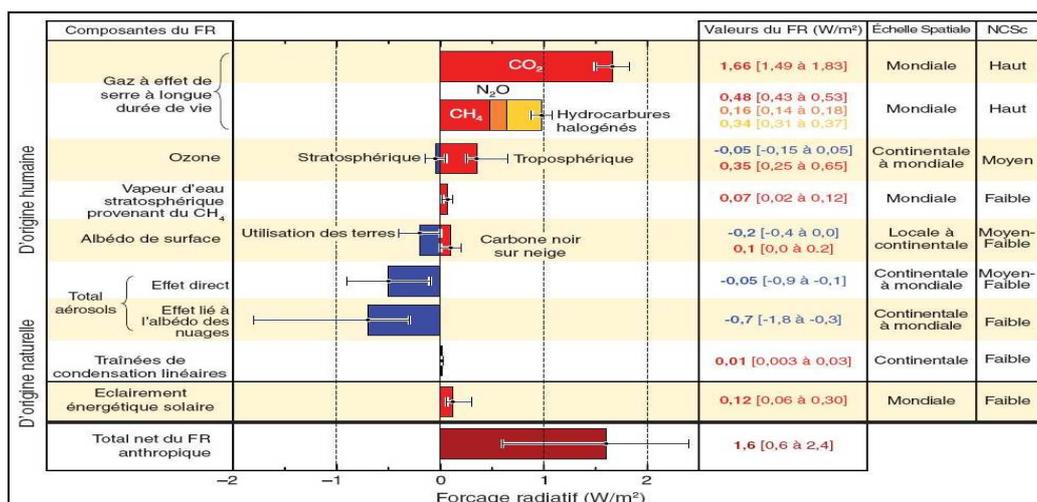


Fig. 1.3 : Forçage radiatif global moyen (W/m²) du système climatique en 2005 (IPCC, 2007).

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.

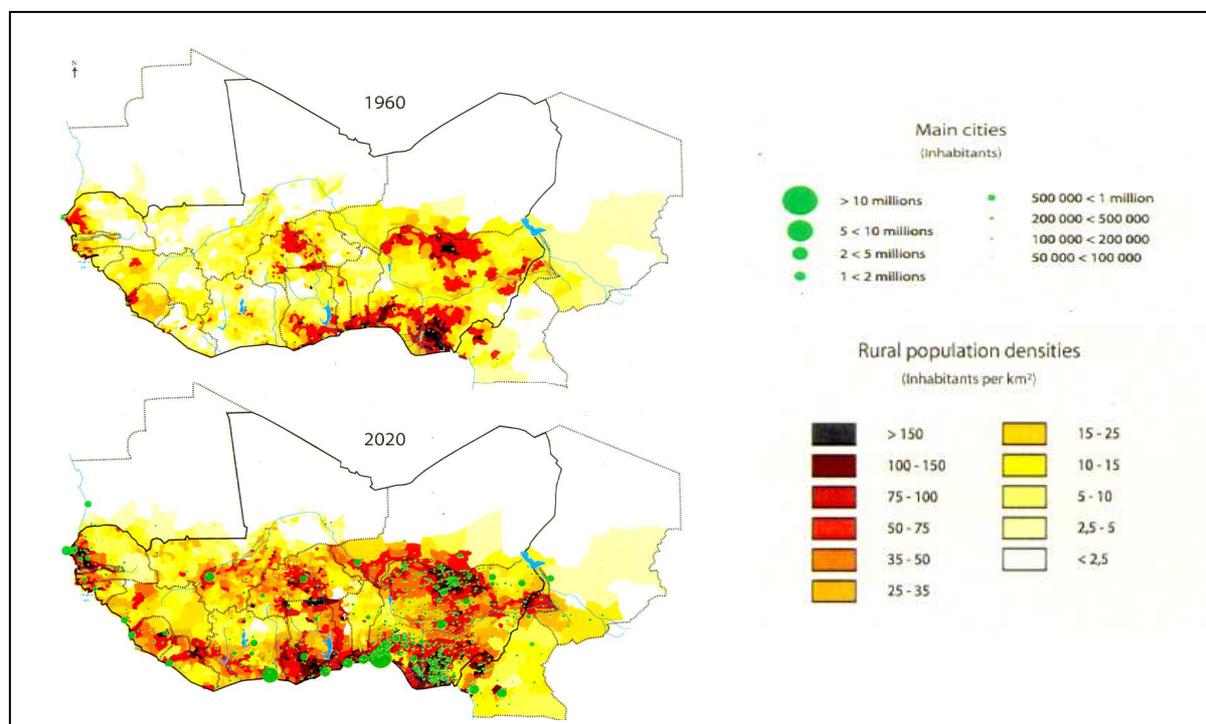


Fig. 1.4 : Population en Afrique de l'Ouest en 1960 et projection en 2020 (SWAC, 1999)

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.

