CHAPITRE V :

ESTIMATION DES FLUX D'EMISSION

Les données expérimentales, acquises au cours des reconstitutions des feux de savane en chambre de combustion, nous ont permis de paramétrer et initialiser les calculs de simulations à l'aide du modèle thermochimique dynamique développé. Les compositions simulées des produits formés sont, à l'exception des oxydes d'azote, en bon accord avec celles expérimentalement obtenues. Ainsi, nous avons pu évaluer les réelles capacités d'un tel modèle à prédire la nature et la quantité des différents produits formés en relation avec les transformations chimiques liées à la combustion mise en jeu. Connaissant le mode de combustion, il nous est par conséquent possible de déterminer la quantité simulée des différents composés produits correspondants. Autrement dit, le modèle donne accès aux facteurs de transformation de la matière végétale qui sont spécifiques à chaque mode de combustion. Pour les gaz et les particules atmosphériques, ces facteurs sont classiquement appelés les facteurs d'émission.

Il en découle que si nous connaissons la quantité des herbes de savane brûlées, nous pouvons estimer les flux d'émission des composés produits aussi bien en phase gazeuse qu'en phase solide. La comparaison de ces estimations avec celles actuellement établies à partir des données expérimentales issues des feux naturels nous permettra de vérifier la capacité du modèle, paramétré à l'échelle du laboratoire, à prédire les flux des composés phénoménologiquement produits aux échelles régionale ou globale.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les facteurs d'émission de certains composés ou éléments d'intérêt, spécifiques au smoldering "pur" et flaming "pur". Ensuite, nous établirons les différents flux annuels d'émission des feux de savane correspondants.

1. Facteurs d'émission spécifiques à chaque mode de combustion :

Par définition, le facteur d'émission représente la quantité de matière de chaque composé produit par unité de végétal brûlé, généralement exprimée en g élément/kg végétal brûlé. Or, pour réaliser nos simulations, nous avons utilisé une masse normative de 1 kg de combustible, tout le végétal étant entièrement consommé. Pour un composé donné, on peut donc facilement convertir sa teneur simulée, exprimée en moles de composé par kilogramme de combustible, en facteur d'émission correspondant.

Les simulations ont été réalisées à partir uniquement du Loudetia mort pour le smoldering "pur". En ce qui concerne le flaming "pur", nous l'avons simulé à la fois avec du Loudetia mort et du SAFARI.

Le Loudetia mort a été collecté à Lamto (Côte d'Ivoire) alors que SAFARI a été cueilli à Kruger Park (Afrique du Sud). Compte tenu de leurs caractéristiques écologiques respectives, on peut considérer qu'ils représentent deux herbes permettant d'évaluer la composition chimique moyenne de celles constituant la savane africaine, végétation la plus soumise à la combustion chaque année.

Comme signalé précédemment lorsque nous avons commenté les résultats des principales simulations, quel que soit le mode considéré, la combustion d'un végétal donne naissance à de nombreux produits. Afin d'établir la liste des

facteurs d'émission spécifiques à chacun des modes de combustion, nous n'avons tenu compte que de certains composés ou éléments présentant un intérêt atmosphérique évident.

La liste correspondante est présentée dans le Tableau 53. Les composés ou éléments sont classés suivant la fraction de produits (cendres, gaz ou particules) à laquelle ils appartiennent. Nous avons également tenu compte de certains éléments les plus significatifs, constituant des cendres, puisque ces dernières peuvent être remobilisées sous forme particulaire dans l'Atmosphère par turbulence.

Compte tenu de l'inadéquation du modèle à décrire correctement la formation des oxydes d'azote, nous avons préféré ne pas traiter ces derniers (Tableau 53).

Les facteurs d'émission du Tableau 53 sont présentés en fonction des modes "purs" de combustion (flaming, smoldering) et des combustibles utilisés. D'après le Tableau 53, on observe que pour un mode donné les facteurs d'émission varient peu lorsqu'on change de combustible, à l'exception du silicium dans les cendres. Il en découle donc que le mode de combustion constitue la grandeur qui influence le plus les facteurs d'émission.

Connaissant la répartition flaming/smoldering, ces valeurs permettent d'évaluer directement les facteurs d'émission spécifiques du feu étudié.

Composés (g élément/kg comb.)	Smoldering "pur" Loudetia mort (Côte d'Ivoire)	Flaming "pur" Loudetia mort (Côte d'Ivoire)	Flaming "pur" SAFARI (Afrique du Sud)
Cendres			
C	11,25	6,44	4,13
Ca	5,19	5,19	4,64
P	0,44	0,44	0,97
K	3,10	3,08	2,82
Si	32,70	32,70	19,40
Particules			
Ctot	145,60	6,53	8,27
K	0,39	0,40	0,45
Cl	0,22*	0,22	0,21
S	ND	0,05	0,07
TPM	146,21*	7,35	9,19
Gaz			
CO_2	168,64	370,59	391,19
CO	55,74	17,69	18,58
CH_4	23,27	3,25	3,53
COS	0,002	0,0006	0,001
NH_3	0,11	0,02	0,02
NO_x	ND	ND	ND
N_2O	ND	ND	ND
H_2S	0,27	0,09	0,26
SO_2	ND	0,13	0,30
HCl	0,01	0,13	0,16

Tableau 53 : Facteurs d'émission de certains composés d'intérêt exprimés en g élément/kg végétal brûlé - les valeurs marquées de (*) sont celles qui peuvent être sous-estimées par le modèle, compte tenu de ses limitations.

2. Estimation des flux annuels d'émission des feux de savane :

A partir des facteurs d'émission précédemment présentés, nous pouvons estimer les flux annuels d'émission correspondants des feux de savane, si on connait la quantité de biomasse brûlée par an.

Andreae (Andreae, 1991) estime que la quantité d'herbe de savane brûlée chaque année est d'environ 3690 Tg (3690 10^{12} g). Cette valeur correspond à des estimations approximatives qui peuvent être affectées d'une grande incertitude, compte tenu de la méthode géographique utilisée pour la déterminer. Néanmoins, elle permet de souligner que la savane constitue 40% à 60% de la végétation naturelle brûlée chaque année. Les feux de savane représentent donc la source majeure d'émission des composés atmosphériques issus de la combustion de biomasse végétale.

Dans un feu de savane, la majeure partie des herbes est brûlée durant la phase flaming, nous avons donc choisi de calculer les flux d'émission correspondants à partir des facteurs d'émission établis pour le flaming "pur". Le résultat obtenu est présenté dans le Tableau 54. Nous disposons à la fois des données correspondant aux flaming "purs" du Loudetia mort et du SAFARI. Ainsi, nous avons affecté à chaque composé deux valeurs, pour évaluer la variabilité des flux calculés.

Composés (Tg élément/an)	Modèle		Expérimental
	Loudetia mort (Côte d'Ivoire)	SAFARI (Afrique du Sud)	
Cendres			
C	23,77	15,22	-
Ca	19,15	17,12	-
P	1,64	3,56	-
K	11,40	10,40	-
Si	120,66	71,59	-
Particules			
Ctot	24,09	30,51	24-162[a]
K	1,46	1,64	1,11-1,25[b]
Cl	0,82	0,77	0,81-1,03[b]
S	0,17	0,26	0,07-0,19[b]
TPM	27,11	33,90	36-246[b]
Gaz			
CO_2	1367,47	1443,49	1500[a]
CO	65,29	68,57	195-420[a]
CH_4	11,99	13,04	19-48[a]
COS	0,001	0,01	0,015-0,048[a]
NH_3	0,08	0,08	0,28-8,75[a]
NO_x	ND	ND	2,45-28[a]
N_2O	ND	ND	0,035-7,7[a]
H_2S	0,35	0,98	-
SO_2	0,48	1,10	0,8-1,2[a]
HCl	0,47	0,58	-

Tableau 54 : Flux annuels d'émissions des feux de savane (Tg élément/an) - [a] Andreae (Andreae, 1991) ; [b] Echalar et al. (Echalar et al., 1995).

Dans le Tableau 60, nous avons également reporté les flux annuels des différents composés, estimés à partir des facteurs d'émission expérimentaux essentiellement acquis des expériences de terrain (Andreae, 1991 ; Echalar et al., 1995). Les valeurs expérimentales présentées sont incluses dans un intervalle de variation très large. Ceci est à relier aux difficultés de prélèvement des différents composés dans les conditions de terrain pour déduire les facteurs d'émission correspondants. En effet, les échantillons identifiés comme issus du flaming contiennentt inévitablement une petite contribution du smoldering environnant. De plus, les mesures de gaz sont toutes préalablement normées au CO_2, dont l'incertitude relative est au moins de l'ordre de 50% (Andreae, 1991).

Par ailleurs, les données d'Echalar et al. (Echalar et al., 1995) sont issues des expériences de terrain effectuées à Lamto (Côte d'Ivoire) et à Kruger Park (Afrique du Sud). Par conséquent, ce sont des composés produits par les feux de terrain à partir d'à peu près les mêmes combustibles utilisés pour les simulations.

D'après le Tableau 54, nous constatons que les flux d'émission calculés à partir des facteurs d'émission obtenus du modèle sont globalement comparables à ceux issus des données de terrain. Cependant, nous notons un léger écart en ce qui concerne CO et CH_4 : les valeurs prédites par le modèle sont légèrement plus faibles. Or, durant les expériences de terrain, on n'a jamais des émissions de type "pur". Par ailleurs, d'après le modèle un smoldering "pur" émet approximativement 3 fois plus de CO et environ 8 fois plus de CH_4 qu'un flaming "pur" (Tableau 53). Une faible contribution du smoldering peut donc affecter d'une manière non négligeable les mesures de ces composés au cours du flaming. Ainsi, il est normal que nos valeurs soient plus faibles que celles issues des données de terrain. Il en est de même en ce qui concerne tous les autres composés réduits tels que NH_3 et COS, qui sont majoritairement produits par un smoldering "pur".

Il est à noter qu'en disposant des facteurs d'émission propres à chacun des modes "purs", il nous est possible de faire varier la contribution du flaming et du smoldering au sein du feu naturel, jusqu'à ce qu'on obtienne les flux les plus représentatifs de ce dernier. Au cours des feux de savane on observe généralement que plus de 97% du végétal combustible sont consumés pendant la phase flaming (Ward et al., 1992). Autrement dit, on aurait pu intégrer dans les flux simulés (Tableau 54), 97% de flaming "pur" et 3% de smoldering "pur", pour affiner encore les résultats concernant les différents composés.

Compte tenu de la bonne concordance entre le données simulées et celles issues des expériences de terrain, nous pouvons estimer que le modèle est utilisable pour quantifier les composés produits par des feux de savane à l'échelle globale. Il en découle donc que les hypothèses et les contraintes de calcul utilisées pour sa mise en oeuvre sont adaptées à une estimation globale des flux d'émission de ce type de source de composés atmosphériques.

De plus, le modèle permet de préciser les facteurs d'émissions, données très difficilement acquises avec précision au cours des expériences de terrain. Par conséquent, en disposant de données d'entrée adéquates pour le modèle (température du feu, composition chimique moyenne et quantité des végétaux combustibles, et mesures de quelques composés permettant de contraindre le calcul de simulation), il est capable de quantifier correctement l'ensemble des composés produits par des feux de savane, à l'exception des oxydes d'azote. Or, la plupart de ces données d'entrée sont accessibles par Télédétection (Kaufman et al., 1990). Afin de vérifier la capacité du modèle à estimer des flux à l'échelle

globale, il serait donc intéressant d'initialiser le modèle avec les données acquises par cette méthode, puisqu'elles constituent des données type "grande échelle".

Il est à noter qu'en ce qui concerne les cendres, nos estimations constituent les premières données disponibles. Tenant compte de l'intérêt écologique non négligeable, elles devraient permettre de mieux évaluer la quantité en éléments nutritifs disponibles pour la repousse de la végétation.

CHAPITRE VI :

CONCLUSION GENERALE

La combustion de biomasse végétale, principalement due à la pratique des feux de forêt et de savane, est une source importante de matière gazeuse et particulaire pour la troposphère, en particulier dans la zone tropicale. Les feux de savane constituent la contribution majeure, puisque ce type de végétation représente 40% à 60% de la quantité de biomasse brûlée chaque année.

Dans ce travail, nous avons entrepris une étude des composés produits par une approche physico-chimique de leur formation. Ceci a pour but de préciser et comprendre au préalable les facteurs affectant la nature et l'intensité des émissions, afin de mieux quantifier à terme les flux des espèces formées. Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi deux démarches, l'une expérimentale et l'autre théorique, permettant de documenter d'une manière complémentaire la formation des composés observés.

Pour caractériser expérimentalement les différentes fractions de produits de combustion de biomasse végétale (cendres, gaz et particules), nous avons mis en oeuvre une série d'expériences de reconstitutions de feux de savane en chambre de combustion. En travaillant dans les conditions contrôlées de laboratoire, nous avons pu mieux spécifier les caractéristiques de la combustion : le mode qui la régit, les températures induites, le végétal combustible. Dès lors, il nous a été possible d'identifier les composés produits en fonction des processus physico-chimiques qui leur ont donné naissance. La quantification de ces produits formés a nécessité le développement de nouveaux protocoles d'analyse chimique,

en particulier concernant la composition minérale des végétaux combustibles et des cendres.

Les principaux résultats des ces reconstitutions ont servi à mettre en évidence que la spécificité de la composition chimique des espèces formées dépend effectivement des caractéristiques physico-chimiques des modes de combustion mis en jeu. De plus, ce travail constitue une étude approfondie originale des produits formés, puisque pour la première fois il a été question de caractériser et quantifier les produits à la source dans leur ensemble, et non seulement ceux qui sont émis dans l'Atmosphère. Toutefois, cette démarche uniquement basée sur l'expérimentation ne nous a pas permis d'aboutir à une définition et quantification complète de la formation des composés produits. En effet, certains paramètres spécifiques de chacun des modes de combustions ne sont pas expérimentalement accessibles, tels que la température maximale que peut atteindre la flamme ou la quantité d'oxygène nécessaire aux réactions d'oxydation impliquées. De plus, à cause des pertes éventuelles des gaz et des particules lors de leur transfert dans la chambre de combustion, il ne nous a pas été possible d'établir les facteurs d'émission qui soient propres à chaque mode.

Pour étudier la relation quantitative existant entre les caractéristiques physico-chimiques de combustion et les produits formés, nous avons donc développé un modèle dynamique basé sur les lois d'équilibres thermochimiques, qui permet de décrire théoriquement le processus de formation des composés observés à la source. Les données expérimentales acquises au cours des reconstitutions des feux de savane en chambre de combustion ont servi à initialiser et contraindre les calculs de simulations correspondants.

La bonne concordance entre les compositions simulées et celles expérimentalement obtenues des différentes fractions des produits formés, souligne que le modèle développé est adéquat (à l'exception cependant pour les

oxydes d'azote) pour décrire et prédire la formation des composés produits à partir des feux de savane. Elle montre également que les hypothèses et les contraintes de calculs utilisées pour mettre en oeuvre le modèle sont valides. Les données issues des principales simulations indiquent que le modèle permet d'expliquer et de préciser les différents résultats obtenus des observations de terrain (la composition des cendres est riche en éléments nutritifs, le rapport CO/CO_2 constitue un bon indicateur de la qualité de combustion, les espèces réduites sont majoritairement produites par un smoldering "pur", etc.). De plus, il est capable de fournir les informations nécessaires à la compréhension du phénomène qui sont inaccessibles par une approche expérimentale, par exemple : la quantité d'oxygène impliquée dans les réactions d'oxydation aussi bien en phase solide que dans la flamme, la température maximale atteinte à l'intérieur de la flamme, l'hétérogénéité structurale interne des particules émises, etc.

Par ailleurs, à partir des simulations des deux principaux modes de combustion, nous avons pu déduire des facteurs d'émission de certains composés d'intérêt atmosphérique évident, qui sont spécifiques d'une part du flaming "pur", et d'autre part du smoldering "pur". Connaissant la quantité annuelle de biomasse brûlée, ces facteurs ont servi à calculer les flux d'émission correspondants liés aux feux de savane, dont plus de 97% (Ward et al, 1993) du combustible sont consumés durant la phase flaming du feu. Les flux simulés sont en bon accord avec ceux calculés à partir des données expérimentales de terrain. Ce résultat permet de montrer que le modèle, développé et paramétré à l'échelle du laboratoire, est capable de procurer une bonne représentation des facteurs d'émission, ou tout du moins comparable à celle issue des données de mesures à l'échelle locale, pour effectuer une estimation des flux émis aux échelles régionale ou globale. Le principal avantage du modèle réside donc dans le fait qu'il donne accès à une détermination précise des facteurs d'émission en relation avec les

modes de combustion, utilisable même à grande échelle. Ainsi, il est possible de préciser les flux d'émission des différents composés produits par des feux naturels de végétation, en faisant moduler la contribution du flaming "pur" relativement à celle du smoldering "pur" au sein de ces combustions.

Perspectives :

Le travail présenté ici a permis d'acquérir des informations originales sur les composés produits par les feux de savane. Bien entendu, de nombreuses directions de recherches et de nombreuses approches restent à explorer pour affiner cette première étude. Nous nous focalisons plus particulièrement sur celles qui nous semblent prédominantes du point de vue de l'impact atmosphérique, et à terme climatique, des émissions des feux de végétation :

1/ Utiliser le modèle pour quantifier les émissions des feux de forêt, qui sont régis phénomélogiquement en grande partie par un smoldering, contrairement aux feux de savane. Ceci aurait pour but d'évaluer les capacités du modèle à prédire les émissions de tous types de feux de végétation, et donc de quantifier les flux globaux émis par cette source de composés atmosphériques, liée à la combustion de biomasse végétale.

2/ Initialiser les calculs de simulations avec des données type "grande échelle" accessibles par Télédétection, afin de vérifier l'adéquation d'un tel modèle à estimer les flux d'émission aux échelles régionale ou globale. Par ailleurs, il est à noter que le modèle développé peut également permettre d'améliorer le calibrage des différents capteurs de Télédétection. En effet, le modèle est capable d'estimer la température maximale de la flamme, difficilement détectée par la Télédétection à cause des interférences des spectres d'émission

(Kaufman, communication personnelle). Il en découle donc que le couplage Modèle-Télédétection devrait conduire à une meilleure estimation des flux d'émission des feux de végétation, permettant ainsi d'en évaluer à terme les impacts atmosphériques et climatiques avec plus de précision.

3/ Compte tenu de leur importance dans la chimie atmosphérique en tant que photooxydants, il serait souhaitable de coupler à ce modèle un module spécifique capable de décrire correctement la formation des oxydes d'azote produits à partir des feux de végétation. Considérant la synthèse des mécanismes de leur formation présentée dans ce mémoire, la principale difficulté du développement de ce couplage résidera dans le manque de données permettant de représenter théoriquement les caractéristiques physiques du fonctionnement de flamme type "turbulente" qui donne naissance à ces oxydes.

4/ Le modèle a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité structurale interne des particules émises. Cet aspect devrait avoir des conséquences importantes sur les propriétés optiques de ces particules, conduisant à terme à des modifications du bilan radiatif de l'Atmosphère jusqu'à présent évalué en admettant l'additivité des différentes composantes de la particule d'aérosol. Il serait donc intéressant de développer des méthodes d'analyse chimique capables de rendre compte de l'hétérogénéité potentielle interne de ces particules, afin de vérifier expérimentalement l'observation théorique. Les résultats d'études préliminaires ont montré que les techniques d'analyse chimique dites "de surface" constitueraient un bon outil d'approche (Goschnick et al., 1994 ; Van Grieken et al., 1994 ; Lafon, 1994).

Les résultats acquis au cours de ce travail soulignent avec force que pour quantifier les émissions des feux de végétation et leurs impacts atmosphérique et

climatique, il est important d'établir une réelle interaction entre des domaines scientifiques généralement assez éloignés : Chimie Analytique, Physico-Chimie des Systèmes Atmosphériques, Ecologie, Télédétection. Dans ce cadre, celui qui a mené ce travail a dû et doit assumer un double rôle : faire progresser et assurer un certain degré de réalisme dans toute représentation du phénomène observé vis-à-vis des différents domaines scientifiques et participer activement à une bonne intégration de ce qui a été développé, en particulier l'utilisation du modèle en couplage avec ces domaines.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adams K.M., Davis L.I., Japar J.R.et Finley D.R. (1990) Measurement of atmospheric elemental carbon : real-time data for Los Angeles during summer 1987. *Atmos. Env.* **3**, 597-604.

Albini F.A. (1981) A model for the wind-blown flame from a line fire. *Combustion and Flame* **43**, 155-174.

Albini F.A. (1984) Wildland fires. *Am. Sci.* **72**, 590-597.

Albini F.A. (1993) Dynamics and modeling of vegetation fires : observations. In "*Fire in the environment : the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*", P.J. Crutzen et J.G. Goldammer eds., Wiley, p. 39-52.

Andreae M.O. (1983) Soot carbon and excess potassium : long range transport of combustion-derived aerosols. *Science* **220**, 1148-1151.

Andreae M.O. (1991) Biomass burning : its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 3-21.

Andreae M.O. (1993) Global distribution of fires seen from space. EOS **74**, 129.

Andreae M.O., Anderson B.E., Blake D.R., Bradshaw J.D., Collins J.E., Gregory G.L., Sachse G.W. et Shipham M.C. (1994) Influence of plumes from biomass burning on atmospheric chemistry over the equatorial and tropical South Atlantic during CITE 3. *J. Geophys. Res.* **99**, 12793-12808.

Baudet J., Lacaux J.P., Bertrand J.J., Desalmand F.et Yoboué V. (1990) Presence of an atmospheric oxalate source in the intertropical zone - its potential action in the atmosphere. *Atmos. Res.* **25**, 465-477.

Bauer S.H. et Jeffers P.M. (1988) Mechanistic Investigation of Soot Precursors. *Energy & Fuels*, **2**, 446-453.

Boden T.A., Kanciruk P. et Farrel M.P. (1990) A compendium of data on global change ; the CO2 information analysis center. In "*Trends' 90*", Sepauski R.J. and Stoss F.W. eds., p. 93.

Bonsang B., Lambert G. et Boissard C.C. (1991) Light Hydrocarbons Emissions from African Savanna Burnings. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 155-161.

Bowman C.T. (1975) Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion. *Prog. Energy Combustion Sci.* **1**, 33-45.

Brémond M.P. (1989) Contribution à l'étude géochimique du carbone suie dans l'atmosphère : aspects méthodologiques et géochimiques. *Thèse de Science*, Université Paris 7.

Brezinsky K., Hura H.S. et Glassman I. (1988) Oxidation/Pyrolysis Chemistry as Related to Fuel Sooting Tendencies. *Energy & Fuels* **2**, 487-493.

Cachier H. (1992) Biomass Burning sources. In "Encyclopedia of the Earth system science", **1**, Academic Press, p. 377-385.

Cachier H., Brémond M.P. et Buat-Ménard P. (1990) Organic and black carbon aerosols over marine regions of the Northern Hemisphere, In "*Proceedings of international conference on global atmospheric chemistry*", Beijing, Newman et Kiang eds., Brookhaven National Lab. Press, p. 241-261.

Cachier H., Buat-Ménard P., Fontugne M. et Ranger J. (1985) Source terms and source strengths of carbonaceous aerosol in the Tropics. *J.Atmos. Chem.* **3**, 469-489.

Cachier H., Ducret J., Brémond M.P., Yoboué V., Lacaux J.P., Gaudichet A. et Baudet J. (1991) Biomass burning aerosols in a savanna region of the Ivory Coast. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 174-180.

Cachier H., Liousse C., Buat-Ménard P. et Gaudichet A. (1995) Particulate content of savanna fire emissions. *J. Atmos. Chem.* **22**, 123-148

Cahoon D.R., Stocks B.J., Levine J.S., Cofer III W.R. et O'Neil K.P. (1992) Seasonal distribution of African savanna fires. *Nature* **359**, 812-815.

Cahoon D.R., Stocks B.J., Levine J.S., Cofer III W.R. et Pierson J.M. (1994) Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia. J. Geophys. Res. **99**, D, 18627-18638.

Calcote H.F., Olson D.B. et Keil D.G. (1988) Are Ions Important in Soot Formation ? *Energy & Fuels* **2**, 494-504.

Cess R.D., Potter G.L., Ghan S.J. et Gates W.L. (1985) The climatic effects of large injections of atmospheric smoke and dust : a study of climate feedback mechanisms with one and three dimensional climate models. *J. Geophys. Res.* **90**, D, 12937-12950.

Chandler C., Cheney P., Thomas P., Trabaud L. et Williams D. (1983) *Fire in Forestry* **1**, Wiley.

Charleson R.J., Schwartz S.E., Hales J.M., Cess R.D., Coakley J.A., Jr, Hansen J.E. et Hofmann D.J. (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science* **255**, 423-430.

Cheynet B. (1988) Complex Chemical Equilibria Calculations with the Thermodata System. In "*Proc. of the Met Soc. of CIM, Computer Software in Chemical and Extractive Metallurgy (vol. 11)*", W.T. Thomso, F. Ajersch et G. Ericksson eds, p. 31-44.

Cheynet B., Barbier J.N., Chevalier P.Y., Rivet A. et Fischer E. (1992) GEMINI : Gibbs Energy MINImizer Codes for complex Equilibria Determination. In "*Calphad* (Celphad XXI, Jérusalem, Israel)" **16(4)**, 339.

Cheynet B. (1993) New Thermodata's personnal softwares for Thermochemical Data Banking and Equilibrium Determination. In "*Proc. of the 2nd Int. Symposium on Computer Software in Chemical and Extractive Metallurgy*", C.W. Bale et G.A. Irons eds.

Clain M.P. (1995) Etude de la composante organique de l'aérosol atmosphérique. *Thèse de Science*, Université de Savoie.

Cook L. (1939) A condition to our information on grass burning. *S. Afri. J. Science* **36**, 270-282.

Courtin R., McKay C.P. et Pollack J. (1992) L'effet de serre dans le système solaire. *La Recherche* **243**, 542-549.

Cros B., Delmas R., Nganga D., Clairac B. et Fontan J. (1988) Seasonal trends of ozone in equatorial Africa, experimental evidence of photochemical formation. *J. Geophys. Res.* **93**, 8355-8366.

Crozat G. (1978) L'aérosol atmosphérique en milieu naturel : étude des différentes sources de potassium en Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire). *Thèse de Science*, Université Paul Sabatier.

Crutzen P.J. et Andreae M.O. (1990) Biomass burning in the Tropics : impact on chemical and biogeochemical cycles. *Science* **250**, 1669-1678.

Crutzen P.J., Delany A.C., Greenberg J., Haagenson P., Heidt L., Lueb R., Pollock W., Seiler W., Wartburg A. et Zimmerman P. (1985) Tropospheric Chemical Composition Measurements in Brazil during the Dry Season. *J. Atmos. Chem.* **2**, 233-256.

Crutzen P.J., Heidt L.E., Krsnec J.P., Pollock W.H. et Seiler W. (1979) Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H_2, N_2O, NO, CH_3Cl, and COS. *Nature* **282**, 253-256.

Dat Ngo, Chylek P., Videen G. et Pinnick R.G. (1994) Effect of Black Carbon on the Optical of Sulfates Aerosols. *Fifth International Conference on Carbonaceous particles in the Atmosphere*. Berkeley, Etats-Unis.

De Santis F. et Allegrini I. (1992) Heterogeneous reactions of SO_2 and NO_2 on carbonaceous surfaces. *Atmos. Env.* **26A**, 3061-3064.

De Soete G.G. (1978) Mécanismes physico-chimiques de formation et de réduction de NOx dans les flammes d'hydrocarbures. *Revue de l'Institut Français du pétrole* **33**, 747-792.

De Soete G.G. (1989) Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion. *Revue générale de la thermique* **330-331**, 353-374.

Delmas R. A., Loudjani P., Podaire A. et Menaut J.C. (1991) Biomass burning in Africa : an assessment of annually burned biomass. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 126-132.

Dereix C. et N'guessan A. (1976) Etude de l'action des feux de brousse sur la végétation ; les parcelles de Kokondekro. Résultats après 40 ans de traitement. *Doc. int.*, CTFT-CI.

Detwiler R.P.et Hall C.A.S. (1988) Tropical forest and global carbon cycle. *Science* **239**, 42-47.

Dinh P.V., Lacaux J.P. et Serpolay R. (1992) Cloud forming properties of biomass burning aerosols. In "*Nucleation and atmospheric aerosols*", Norihiko Fukuta and Wagner P.E. eds., p. 173-176.

Dinh P.V., Lacaux J.P. et Serpolay R. (1993) Cloud active particles from African savanna combustion experiments. *Atmos. Res.*

Ducret J. (1993) Incorporation du carbone particulaire aux retombées humides : implications géochimiques. *Thèse de Science*, Université Paris 7.

Ducret J.et Cachier H. (1992) Particulate carbon in continental region rains and snows. *J. Atmos. Chem.* **15**, 55-67.

Echalar F., Gaudeichet A., Cachier H. et Artaxo P. (1995) Aerosol emissions by tropical forest and savanna biomass burning : characteristic trace elements and fluxes. *Geophys. Res. Letters.*

Fisher D.A., Hales C.H., Wang W.C., Ko M.K.W. et Sze N.D. (1990) Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on global warming. *Nature* **344**, 513-516.

Fishman J., Watson C.E., Larsen J.C. et Logan J.A. (1990) Distribution of tropospheric ozone determined by satellite data. *J. Geophys. Res.* **95**, 3599-3617.

Frenklach M., Yuan T. et Ramachandra M.K. (1988) Soot Formation in Binary Hydrocarbon Mixtures. *Energy & Fuels*, **2**, 462-480.

Gaudichet A., Echalar F., Chatenet B., Quisefit J.P., Malingre G., Cachier H., Buat-Ménard P., Artaxo P. et Maenhaut W. (1995) Trace elements in tropical African savanna biomass burning aerosols. *J.Atmos. Chem.* **22**, 19-39.

Gaydon A.G. et Wolfhard A.G. (1960) *Flames : their structure, radiation and temperature*, Chapman and Hall, 383 pp.

Ghan S.J. et Penner J. E. (1992) Smoke effect on climate, In "*Encyclopedia of Earth Science System*", 4, Academic Press, p. 191-198.

Goldberg E.D. (1985) *Black carbon in the environment*, Wiley & Sons, 198 pp.

Gordon R.J., Trivedi N.J., Singh B.P. et Ellis E.C. (1988) Characterization of aerosol organics by diffuse reflectance Fourrier transform infrared spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.*, **22**, 672-677.

Goschnick J., Bentz J.W.G. et Fichtner M. (1994) Depth-resolved analysis of microparticles generated by a household fire. *Fourth International Aerosol Conference*, Los Angeles (UCLA), Etats-Unis.

Gourichon L., Joly A. et Maissa P. (1992) Emissions de N2O par les installations de combustion fixes. *Publication du Cerchar.*

Greenberg J.P., Zimmerman P.R., Heidt L. et Pollock W. (1984) Hydrocarbon an Carbon Monoxide Emissions from Biomass Burning in Brazil. *J. Geophys. Res.*, **89**, 1350-1354.

Handbook of Chemistry and Physics, 52nd Edition.

Hao W.M., Liu M.H. et Crutzen P.J. (1990) Estimates of annual and regional releases of CO2 and other trace gases to the atmosphere from fires in the tropics, based on FAO Statistics for the period 1975-1980. In "*Fire in Tropical Biota*", J.G. Goldammer ed., Springer-Verlag, p. 440-462.

Haupais A. (1992) Combustion dans les moteurs Diesel. *Technique de l'Ingénieur, traité Mécanique et Chaleur*, **B2700**, 1-32.

Heintzenberg J. (1989) Fine particles in the global troposphere : a review. *Tellus* **41B**, 149-160.

Helas G., Bingemer H. and Andreae M.O. (1991) Organic acids over Equatorial Africa : Results from DECAFE 88. *J. Geophys. Res.* **97**, 6207-6217.

Heller R. (1969) *Biologie végétal - Nutrition et Métabolisme*, Tome II, Masson, 578 pp.

Hopkins B. (1965) Observations on savanna burnings in the Olokemeji Forest Reserve - Nigeria. *J. Appl. Ecol.* **2**, 367-384.

Houghton R.A., Boon R.D., Melillo J.M., Palm C.A., Woodwell G.M., Meyers N., Moore III B. and Skole D.L. (1985) Net Flux of carbon dioxide from tropical forest in 1980. *Nature* **316**, 617-620.

Hucknall D.J. (1985) *Chemistry of Hydrocarbon Combustion*, Chapman and Hall, 365 pp.

Jacnick R. (1993) Tropospheric aerosols. In "*Aerosol - Cloud - Climate Interactions*", P.V. Hobbs ed., Academic Press, p. 1-32.

Jaffrezo J.L., Clain M.P. et Masclet P. (1994) PAH in the polar ice of Greenland. Geochemical use of these atmospheric tracers. *Atm. Env.* **28**, 1139-1145.

James S.R., (1989) Hominid use of fire in the lower and middle pleistocene : a review of the evidence. *Current Anthro.* **30**, 1-26.

Kanury A.M. (1985) *Introduction to combustion phenomena (for Fire, Incineration, Pollution, and Energy Applications)*,Gordon and Breach Science Publishers, 411 pp.

Kaufman Y.J. et Nakajima T. (1993) Effect of Amozon smoke on cloud microphysics and albedo - Analysis from satellite imagery. *J. Appl. Meteor.* **32**, 729-744.

Kaufman Y.J., Gitelson A., Karnieli A., Ganor E., Fraser R.S. Nakajima T., Mattoo S. et Holben B.N. (1994) Size distribution and scattering phase fraction of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements. *J. Geophys. Res.* **99**, D, 10341-10356.

Kaufman Y.J., Setzer A., Justice C., Tucker C.J., Pereira M.G. et Fung I. (1990) Remote sensing of biomass burning in the Tropics. In "*Fire in Tropical Biota*", J.G. Goldammer ed., Springer-Verlag, p. 371-399.

Keller M., Jacob D.J., Wofsy S.C. et Harriss R.C. (1991) Effects of tropical deforestation on global and regional atmospheric chemistry. *Climatic Change*.

Kempf H. (1993) La savane part en fumée. *Science et Avenir* **552**, 52-56.

Kiehl J.T. et Briegleb B.P. (1993) The relative role of sulphate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science* **260**, 311-314.

Kilpinen P. (1992) Kinetic Modeling of Gas-Phase Nitrogen Reactions in Advanced Combustion Processes. *Thèse en Science*, Université Abo Akademi (Finlande).

Komarek E.V. (1965) Fire Ecology - Grasslands and Man. In "*Proceedings of the 4th Annual Tall Timbers Fire Ecology Conference*", p. 169-220.

Koukoui M. (1978) Etude physico-chimique de l'évolution de la matière organique et des minéraux argileux des profils des sols. *Thèse es Science*, Université Paris 7.

Kuhlbusch T.A., Lobert J.M., Crutzen P.J. et Warneck P. (1991) Molecular nitrogen emissions from biomass burning, a denitrification process. *Nature* **351**, 135-137.

Lacaux J.P., Brustet J.M., Delmas R., Menaut J.C., Abbadie L., Bonsang B., Cachier H., Baudet J., Andreae M.O. et Helas G. (1995) Biomass burning in the tropical savannas of Ivory Coast : an overview of the field experiment Fire of Savannas (FOS-DECAFE 91). *J. Atmos. Chem.*, **22**, 195-216.

Lacaux J.P., Cachier H. et Delmas R. (1993) Biomass burning in Africa : an overview of its impact on atmospheric chemistry. In "*Fire in the environment : the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*", P.J. Crutzen et J.G. Goldammer eds., Wiley, p. 159-191.

Lacaux J.P., Delmas R.A., Cros B., Lefeivre B. et Andreae M.O. (1991) Influence of biomass burning on precipitation chemistry in the Equatorial Forests of Africa. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 3-21.

Lacaux J.P., Delmas R.A., Cros B;, Kouadio G. et Andreae M.O. (1990) Precipitation chemistry in the Mayombe forest of Equatorial Africa. *J. Geophys. Res., Special Issue DECAFE.*

Lacaux J.P., Servant J., Huertas M.L., Cros B., Delmas R.A., Loemba-Ndembi J. et Andreae M.O. (1988) Precipitation chemistry from remote sites in the African Equatorial Forest. *EOS* **69**, 1069.

Lacaux J.P., Servant, J. et Baudet J.G.R. (1987) Acid rain in the tropical forests of Ivory Coast. *Atmos. Environ.* **21**, 2643-2647.

Lafon V. (1994) . *Rapport de DEA*, Université Paris 12.

Lambert G. (1992) Les gaz à effet de serre. *La Recherche* **243**, 550-556.

Lashof D.A.et Tirpak D. (1989) *Policy options for stabilizing global climate.* Draft Report to Congress, U.S. Environmental Protection Agency.

Le Roux X. (1995) Etude et modélisation des échanges d'eau et d'énergie Sol - Végétation - Atmosphère dans une savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire). *Thèse de Science*, Université Paris 6.

Leblanc B. (1995) Rapport d'activité de Gaz de France pour l'année 1994. Gaz de France, 40 pp.

Levine J.S. (1990) Global biomass burning : atmospheric, climatic and biospheric implications. *EOS* **71**, 37.

Levine J.S. (1991) Introduction. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. xxiv-xxx.

Liousse C. (1993) Emissions carbonées particulaires des feux de savane d'Afrique : mesures au sol et télédétection spatiale des panaches. *Thèse de Science*, Université Paris 7.

Liousse C. et Cachier H. (1992) Measurement of black carbon aerosols in the atmosphere of two different source regions : real-time data for the Paris region and a savanna site of the Ivory Coast. *Env. Techno.* **13**, 959-967.

Lobert J.M. et Warnatz J. (1993) Emissions from the combustion process in vegetation. In "*Fire in the environment : the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*", P.J. Crutzen et J.G. Goldammer eds., Wiley, p. 15-37.

Lobert J.M., Scharffe D.H., Hao W.M., Kuhlbusch T.A., Seuwen R., Warneck P. and Crutzen P.J. (1991) In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 289-304.

Lobert J.M., Scharffe D.H., Kuhlbusch T.A., Seuwen R.et Crutzen P.J. (1990) Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen-containing gases. *Nature* **346**, 552-554.

Longwell J.P. (1981) Polycyclic Aromatique Hydrocarbons and soot from practical combustion systems. In "*Soot in combustion systems and its toxic properties*", J. Lahaye et G. Prado eds., Plenum Press, p. 37-56.

Manahan S.E. (1994) *Environmental Chemistry*, Lewis Publishers, 811 pp.

Masclet P. et Mouvier G. (1988) La chimie atmosphérique des hydrocarbures aromatiques polycycliques. *Pollution Atmosphérique*, 25-30.

Menaut J.C. (1983) The vegetation of African savannas. In "*Tropical savannas*", F. Boulière ed., Elsevier, p. 109-149.

Menaut J.C. (1993) Effets des feux de savane sur le stockage et l'émission du carbone et des éléments-traces. *Sécheresse* **4**, 4, 251-264.

Menaut J.C., Abbadie L., Lavenu F., Loudjani P. et Podaire A. (1991) Biomass burning in west African savannas. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 133-142.

Monnier Y. (1968) Les effets des feux de brousses sur une savane préforestière de Côte d'Ivoire. *Etudes Eburnéennes* **9**, 260 pp.

Monnier Y. (1990) *La Poussière et la Cendre*, Focal COOP, 264 pp.

Mueller-Dombois D. et Goldammer J.G. (1990) Fire in tropical ecosystems and global environmental change : an introduction. In "*Fire in Tropical Biota*", J.G. Goldammer ed., Springer-Verlag, p. 1-10.

Oppenheimer M. (1987) Stratospheric sulphate production and the photochemistry of the Antarctic Circumpolar vortex. *Nature* **328**, 702-704.

Pascal P., Amiel P., Brun P., Delhaes P., Donnet J.P., Flahant J. Fontaine A., Marchand A. et Millet J. (1968) *Nouveau Traité de Chimie Minérale : Carbone*, Masson.

Pitot A. et Masson H. (1953) Quelques données sur la température au cours des feux de brousse aux environs de Dakar. *Bull. IFAN* **XIII**, 3, 713-732.

Pollard R.T. (1977) Gas-phase combustion. In "Comprehensive Chemical Kinetics", C.H. Bamford et F.H. Tipper eds., Elsevier.

Prinn R.G. (1991) Biomass burning studies and the International Global Atmospheric Chemistry (IGAC). In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 22-28.

Queney P. (1974) *Elements de Météorologie*, Masson, 300 pp.

Quisefit J. P. (1988) Physico-chimie de l'aérosol volcanique : modélisation thermochimique du refroidissement des émanations de haute température. *Thèse es Science*, Université Paris 7.

Quisefit J.P., de Chateaubourg P., Garivait S. et Steiner E. (1994) Quantitative Analyses of Aerosol Filters by Wavelength-Dispersive X-Ray Spectrometry from Bulk Reference Samples. *X-Ray Spectrom.* **23**, 59-64.

Quisefit J.P., Toutain J.P., Bergametti B., Javoy M., Cheynet B. et Person A. (1989) Evolution versus cooling of gaseous volcanic emissions from Momotombo Volcano, Nicaragua : Thermochemical model and observations. *Geochim. et Cosmochim. Acta* **53**, 2591-2608.

Radke L.F., Coakley J.A. et King M.D. (1989) Direct and remote sensing observations of the effects of ships on clouds. *Science* **246**, 1146-1149.

Radke L.F., Hegg D.A., Hobbs P.V., Nance J.D., Lyons J.H., Laursen K.K., Weiss R.E., Riggan P.J. et Ward D.E. (1990) Particulate and trace gas emissions from large biomass fires in North America. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 209-224.

Raison R.J., Khanna P.K. et Woods P.V. (1984) Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Can. J. For. Res.* **15**, 132-140.

Rivin D. et Medalia A.I. (1981) A comparative study of soot and black carbon. In "*Soot in combustion systems and its toxic properties*", J. Lahaye et G. Prado eds., Plenum Press, p. 25-35.

Rogers F.C., Hudson J.G., Zielinska B., Tanner R.L., Hallet J. et Watson J.G. (1991) Cloud condensation nuclei from biomass burning. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 431-438.

Sadourny R. (1992) L'homme modifie-t-il le climat ? *La Recherche* **243**, 522-531.

Schule W. (1990) Landscapes and climate in prehistory : Interaction of wildlife, man and fire. In "*Fire in the environment : the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*", P.J. Crutzen et J.G. Goldammer eds., Wiley, p. 273-318.

Seiler W. et Crutzen P.J. (1980) Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change* **2**, 207-247.

Shapiro N. et Shapley L. (1964) Mass action law and the Gibbs-free energy function. *Rand Corp.*, **Memo 3935-1-pr**, ad-605919.

Sonntag R.E. et Wylen G.J. (1992) *Introduction to thermodynamics classical and statistical*. Wiley, 800 pp.

Susott R.A., Ward D.E., Babbitt R.E. et Latham D.J. (1991) The measurement of trace emissions and combustion characteristics for a mass fire. In "*Global Biomass Burning : Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*", J.S. Levine ed., MIT Press, p. 245-257.

Symonds R.B., Rose W.I., Reed M.H., Lichte F.E. et Finnegan D.L. (1987) Volatilisation and sublimation of metallic and non metallic elements in high temperature gases at MERAPI Volcano, Indonesia. *Geochim. et Cosmochim. Acta* **51**, 2083-2101.

Tan Y.L., Quanci J.F., Borys R.D. et Quanci M.J. (1992) Polycyclic aromatic hydrocarbons in smoke particles from wood and duff burning. *Atmos Env.* **26A**, 1177-1181.

Tournier J.L. (1948) Sur les prairies d'altitude de la Chaîne du Nimba. *Notes Africaines* **38**, 7.

Turner B.L. et Lambert M.J. (1980) Sulfur Nutrition in Forests. In "*Atmospheric Sulfur Deposition : Environmental Impact and Health Effects*", D.S. Shriner, C.R. Richmond, and S.E. Lindberg ed., Ann Arbor, Mich. : Ann Arbor Science Publishers, p. 321-333.

Turpin B.J. et Huntzicker J.J. (1991) Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles Basin : a descriptive analysis of organic and elememntal carbon concentration, *Atmos. Environ.*, **25A**, 2, 207-215.

Twomey S.A., Piepgrass M. et Wolfe T.L. (1984) An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus* **36B**, 356-366.

Van Cauwenberghe K. et Van Vaeck L. (1983) Toxicological implications of the organic fraction of aerosols : a chemist's view, *Mutat. Res.*, **116**, n°1.

Van Grieken R., Injuk J., Owari M. et Van Espen P. (1994) Characterization of individual aerosol particles by Micro-PIXE and SIMS. *Fourth International Aerosol Conference*, Los Angeles (UCLA), Etats-Unis.

Van Tiggelen A. et Balaceanu J.C. (1968) Caractéristiques générales des réactions de combustion. In "*Oxydations et Combustions*", A. Van Tiggelen ed., Technip, p. 1-14.

Van Tiggelen A., Salé B., VanTiggelen P.J. et Burger J. (1968) Thermodynamique de la combustion et notions d'aéro thermochimie. In "*Oxydations et Combustions*", A. Van Tiggelen ed., Technip, p. 15-70.

Viani R., Baudet J. et Marchant J. (1973) Réalisation d'un appareil portatif d'enregistrement magnétique de mesures - Application à l'étude de l'évolution de la température lors du passage d'un feu de brousse. *C.R. coll. P.B.I.*, Ann. Univ. Abidjan **E**, 6(2), p. 295-304.

Vickos J.B. (1991) Télédétection des feux de végétation en Afrique Intertropical et estimation des émissions de constituants ayant un intérêt atmosphérique. *Thèse de Science*, Université Paul Sabatier.

Ward D.E. (1990) Factors influencing the emissions of gases and particulate matter from biomass burning. In "*Fire in Tropical Biota*", J.G. Goldammer ed., Springer-Verlag, p. 418-436.

Ward D.E. et Hardy C.C. (1991) Smoke emissions from wildland fires. *Environment International* **17**, 117-134.

Ward D.E. et Radke F.L. (1993) Emissions measurements from vegetation fires : a comparative evaluation of methods and results. In "*Fire in the environment : the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*", P.J. Crutzen et J.G. Goldammer eds., Wiley, p. 53-76.

Ward D.E., Susott R.A., Kauffman J.B., Babbitt R.E., Cummings D.L., Dias B., Holben B.N., Kaufman Y.J., Rasmussen R.A. et Setzer A.W. (1992) Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil : BASE-B Experiment. *J. Geophys. Res.* **97**, 14601-14619.

Whitby K.T. (1978) The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos. Env.* **12**, 135-159.

Williams F.A. (1977) Mechanisms of fire spread. In "*Proceedings of the 16th Symp. Int. on Combustion*", The Combustion Institute Press, p. 1281-1294.

Yoboué V. (1992) Caractéristiques physiques et chimiques des aérosols et des pluies collectés dans la savane humide de Côte d'Ivoire. *Thèse de Science*, Université Paul Sabatier.