

Bilan de l'azote atmosphérique à l'échelle des écosystèmes africains

Sommaire

5.1. Introduction	157
5.2. Bilan des dépôts atmosphériques d'azote à l'échelle des écosystèmes africains.....	159
5.2.1. Le dépôt humide d'azote	159
5.2.2. Le dépôt sec d'azote	167
5.2.3. Bilan du dépôt atmosphérique total d'azote à l'échelle des écosystèmes africains .	169
5.3. Bilan émission-dépôt des principales espèces azotées à l'échelle des écosystèmes africains	174
5.3.1. Emission des composés azotés gazeux.....	174
5.3.2. Bilan émission-dépôt des composés azotés oxydés	176
5.3.3. Bilan émission-dépôt des composés azotés réduits.....	180
5.3.4. Bilan annuel émission-dépôt des composés azotés	183
5.4. Comparaison des flux de dépôt d'azote : mesures IDAF, modèles globaux	185
5.4.1. Mesures IDAF et multi modèle global de Dentener et al. (2006).....	185
5.4.2. Dépôt total d'azote dans les écosystèmes africains et charges critiques d'eutrophisation.....	192
5.5. Conclusion.....	194

5.1. Introduction

L'azote (N) est un élément essentiel dans l'atmosphère terrestre, la biosphère et l'hydrosphère (Galloway et al., 2003). Le cycle de l'azote dans les écosystèmes dérive initialement de trois principales sources : la fixation biologique de N, la minéralisation et les dépôts atmosphériques. L'azote N, présent majoritairement sous la forme N_2 , est donc converti en N réactif (N_r), qui comprend des formes inorganiques oxydées (par exemple, NO_x , HNO_3 , NO_3^-), des formes inorganiques réduites (NH_3 et NH_4^+), et des formes organiques (acides aminés et l'urée), avant son utilisation par des microbes ou des plantes. L'accroissement de la formation de l'azote réactif et sa redistribution globale par l'atmosphère dans l'environnement, peut avoir des impacts positifs comme une fertilisation et une amélioration de l'approvisionnement alimentaire, mais aussi négatifs sur la santé humaine et les écosystèmes.

La compréhension actuelle du cycle de l'azote et de son altération par les activités humaines, est illustrée par le schéma conceptuel de la cascade de l'azote proposé par Galloway et al. (2003) (Figure 5.1).

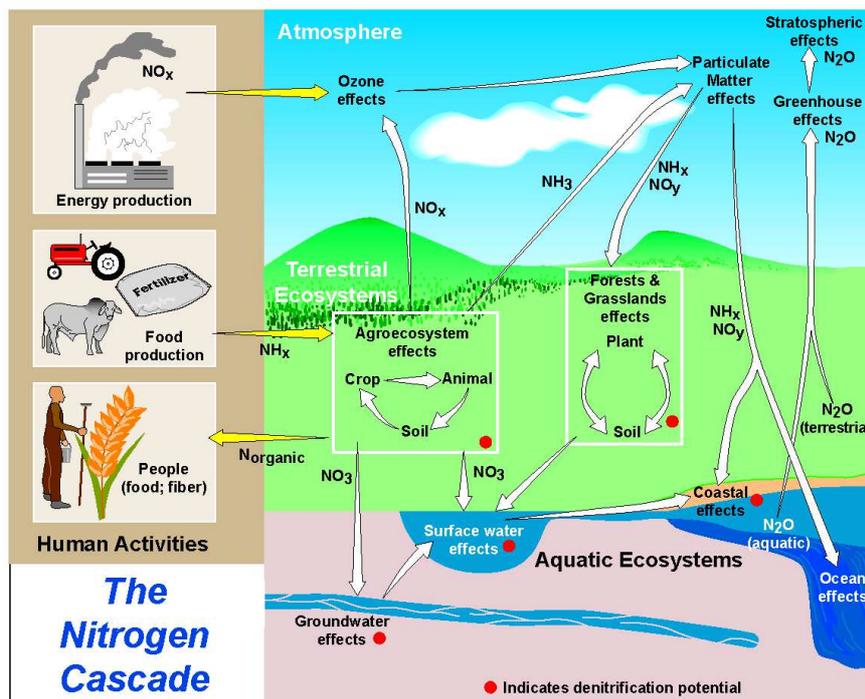


Figure 5.1: La cascade de l'azote (Galloway et al., 2003).

La cascade de l'azote, au sens de Galloway et al. (2003) décrit quantitativement et qualitativement le phénomène de circulation de l'azote dans la biosphère, l'hydrosphère et

l'atmosphère, et son accumulation dans plusieurs de leurs compartiments, mettant en exergue d'une part les risques environnementaux et de santé liés à ces accumulations, et d'autre part la partie liée aux activités humaines dans les flux observés. Après dépôt, l'azote peut induire une augmentation de l'acidité des sols, une diminution de la biodiversité, une pollution des nappes phréatiques et ainsi une eutrophisation des milieux aquatiques.

Le cycle de l'azote joue donc un rôle fondamental dans l'étude des échanges biosphère-atmosphère (Galloway et al. (2003, 2008) ; Holland et al., 1997 ; Dentener, et al., 2006 ; Matson et al., 1999 ; Phoenix et al., 2006,...). L'importance de l'étude des dépôts atmosphériques est liée à « la notion de Charge Critique », une estimation quantitative de l'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle aucun effet néfaste sur les éléments sensibles spécifiés de l'environnement ne se produit, dans l'état actuel des connaissances (Nilsson and Grennfelt, 1988) ; l'excédent défini comme la différence positive éventuelle entre le dépôt effectif et la Charge Critique, fournit une bonne estimation de la vulnérabilité d'une certaine zone (Hirst and Storvik 2003 ; Morselli et al., 2003a,b ; Skeffington et al., 2007, Bouwman et al., 2002a, Bobbink et al., 2010).

Le principal objectif de ce chapitre est de faire un bilan des dépôts atmosphériques (secs et humides) d'azote à l'échelle des écosystèmes du réseau IDAF. Ce bilan prend en compte les 3 types de mesures réalisées par le réseau qui sont : la composition chimique des pluies et des aérosols et les concentrations des gaz.

Mon travail de thèse m'a permis de contribuer à une première étude de bilan du cycle de l'azote incluant les émissions et les dépôts atmosphériques à l'échelle de la région sahélienne avec une étude couplée mesures IDAF / modélisation (Delon et al., 2010).

Dans ce chapitre, **le deuxième objectif** sera d'étendre ce bilan émission-dépôt des principales espèces azotées à l'échelle de l'ensemble des écosystèmes africains (savanes sèches, savanes humides et forêts).

Le troisième objectif sera de comparer les flux de dépôt d'azote, estimés dans le cadre du programme IDAF, d'une part aux flux simulés par les modèles globaux, et d'autre part aux valeurs de charges critiques d'eutrophisation existantes dans la littérature afin d'essayer d'appréhender l'impact du dépôt d'azote sur les écosystèmes tropicaux d'Afrique de l'Ouest et Centrale.

5.2. Bilan des dépôts atmosphériques d'azote à l'échelle des écosystèmes africains

Le dépôt total d'azote a été estimé à partir du dépôt humide sous forme d'ammonium (NH_4^+) et de nitrate (NO_3^-), du dépôt sec des gaz (NO_2 , HNO_3 , NH_3 , (chapitre 4)) et du dépôt sec des particules (pNH_4^+ , pNO_3^-).

5.2.1. Le dépôt humide d'azote

Le dépôt humide concerne le lessivage des espèces chimiques en phase gazeuse ou particulaire dans les hydrométéores (pluie, neige ou grêle) selon deux phénomènes fondamentaux : la capture par les gouttes de pluie de polluant gazeux ou particulaires dans le nuage (« rainout ») et la capture lors de la précipitation sous le nuage (« washout »).

Ces dernières années, la compilation des données validées de chimie des précipitations IDAF a permis de réaliser plusieurs synthèses, écosystème par écosystème, avec pour objectifs communs :

- de caractériser et de suivre sur le long terme la composition chimique des précipitations et quantifier les flux du dépôt humide associé ;

- d'étudier et de mettre en évidence les processus qui régulent le contenu chimique des pluies et des dépôts humides par l'analyse de leurs relations avec les principales sources de gaz et de particules atmosphériques émis par les écosystèmes ;

- d'analyser les variations temporelles, saisonnières et interannuelles de la chimie des précipitations et des dépôts associés.

Ainsi on peut citer les travaux suivants : Galy et Modi, 1998, Galy-Lacaux et al., 2009, Laouali et al., 2010 en savanes sèches du Niger et du Mali, Yoboué et al., 2005, Akpo et al., 2010 en savanes humides en Côte d'Ivoire et au Bénin , et Sigha et al., 2003, Lacaux et al., 1992 en forêt au Cameroun et au Congo.

Afin de présenter les principaux résultats concernant le dépôt humide de l'azote, nous présentons succinctement les conclusions publiées dans ces travaux de synthèse concernant le contenu chimique des pluies en ions NH_4^+ et NO_3^- à l'échelle des écosystèmes africains.

5.2.1.1. Composition chimique des pluies sur le transect : les ions NH_4^+ et NO_3^-

Les mesures de la composition chimique des précipitations ont permis d'établir les concentrations moyennes pondérées annuelles (VWM) des ions majeurs (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , H^+ (pH), NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , et acides organiques) et leur dépôt humide dans les écosystèmes de savane sèche, savane humide, et forêt (Galy-Lacaux et al., 2009, Yoboué et al., 2005, Sigha et al., 2003). Ces études couvrent différentes périodes de mesure : par exemple 1996-2003 pour le site Zoétéélé en forêt, 1995-2002 pour le site Lamto de savane humide et 1994-2005 pour le site Banizoumbou de savane sèche. Dans notre étude, afin de faire un bilan de dépôt (sec et humide) d'azote sur le transect des écosystèmes, nous avons pris en considération les concentrations moyennes pondérées mensuelles et annuelles des ions NH_4^+ et NO_3^- et nous avons calculé le dépôt humide sur la période d'étude (1998-2007).

Sur la figure 5.2, nous présentons l'évolution des concentrations mensuelles moyennes des ions ammonium et nitrate sur la période d'étude et sur le transect savane sèche-savane humide-forêt. Sur cette figure la pluviométrie moyenne mensuelle mesurée sur chaque site IDAF est représentée. Pour l'écosystème forêt, seul le site Zoétéélé est considéré.

Le début (et la fin) de la saison des pluies permet le lessivage d'une atmosphère plus chargée en gaz et particules conduisant à de fortes concentrations des ions NH_4^+ et NO_3^- . Puis, le lessivage fréquent de l'atmosphère en pleine saison des pluies explique la diminution des concentrations moyennes pondérées par volume d'eau des ions en saison humide (figure 5.2).

Les concentrations moyennes pondérées annuelles des ions NH_4^+ et NO_3^- des sites IDAF d'Afrique de l'Ouest et Centrale sur la période d'étude 1998-2007 sont présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Concentrations moyennes pondérées annuelles des ions NH_4^+ et NO_3^- des sites IDAF d'Afrique de l'Ouest et Centrale sur la période d'étude 1998-2007.

Concentration ($\mu\text{eq.L}^{-1}$)		NH_4^+	NO_3^-
Savanes sèches	Agoufou*	23,9 \pm 3,0	13,6 \pm 2,1
	Banizoumbou	17,8 \pm 2,4	11,2 \pm 2,6
	Katibougou	19,0 \pm 5,6	10,2 \pm 3,1
Savanes humides	Djougou*	12,8 \pm 3,7	7,5 \pm 0,9
	Lamto	20,7 \pm 5,0	8,8 \pm 2,3
Forêt	Zoétéélé	11,2 \pm 1,8	7,9 \pm 1,4

* La période d'étude du site Agoufou est 2004-2007 et du site Djougou 2005-2008

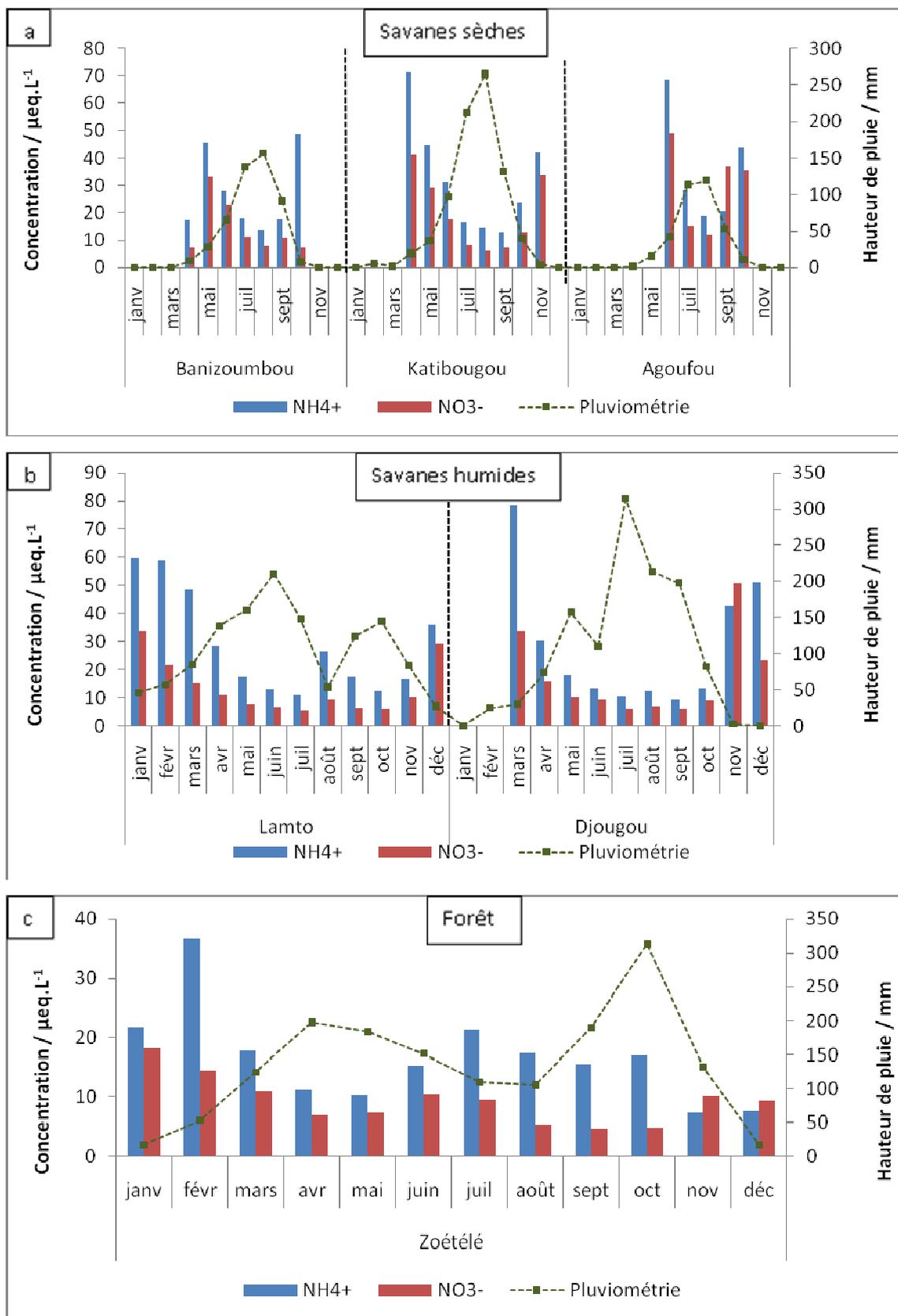


Figure 5.2. Evolution mensuelle des concentrations moyennes pondérées de NH_4^+ et NO_3^- sur le transect savane sèche (a), savane humide (b), forêt (c) sur la période 1998-2007.

Ammonium (NH_4^+). L'ammonium est l'ion azoté le plus abondant dans les pluies échantillonnées de tous les sites IDAF. Le contenu en ammonium dans les précipitations résulte de la capture de l'ammoniac gazeux et des particules contenant de l'ammonium par l'eau nuageuse et précipitante. Seinfeld (1986) a indiqué que généralement dans l'atmosphère, l'ammoniac (particulaire) se trouve sous la forme de sulfate d'ammonium ($(NH_4)_2SO_4$) mais il est possible de le trouver sous la forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) (Parmar et al., 2000). Les principales sources d'ammoniac gazeux proviennent de la décomposition de l'urée dans les excréments d'animaux et les sols fertilisés ou naturels (Schlesinger and Hartley, 1992), les feux de savanes et les combustions domestiques (Delmas et al., 1991). Sur le transect des écosystèmes, les concentrations moyennes annuelles de NH_4^+ dans les précipitations présentent un gradient négatif des savanes sèches et humides ($13-24 \mu eq.L^{-1}$) à la forêt ($11 \mu eq.L^{-1}$, à Zoétéélé) (tableau 5.1). Ces fortes concentrations dans les régions semi-arides d'Afrique de l'Ouest ($18-24 \mu eq.L^{-1}$) sont reliées aux persistantes sources d'ammoniac animales (Galy and Modi, 1998, Delon et al., 2010). Dans la savane humide de Lamto, les concentrations annuelles de NH_4^+ atteignent $21 \mu eq.L^{-1}$, et sont de même ordre de grandeur qu'en savanes sèches. Ces fortes concentrations à Lamto sont dues à la combinaison de la source animale et des émissions des feux de savanes en saison sèche (notamment de décembre à Mars) (figure 5.2).

Nitrate (NO_3^-). Les concentrations de nitrate dans les précipitations résultent des processus hétérogènes et homogènes d'inclusion dans l'eau nuageuse de composés gazeux et particulaires azotés. Le monoxyde d'azote (NO) est le composé majoritairement émis par les sols de savanes en saison humide (Serça et al., 1998, Otter et al., 1999), et une grande partie de ce NO est rapidement oxydé en HNO_3 et nitrates organiques. HNO_3 est un composé très soluble dans l'eau et donc facilement lessivable par les précipitations. Sur le transect des écosystèmes, les concentrations moyennes pondérées annuelles de nitrate dans les pluies sont légèrement plus élevées en savanes sèches ($10-14 \mu eq.L^{-1}$) et de même ordre de grandeur en savanes humides ($7,5-9 \mu eq.L^{-1}$) et en forêt ($8 \mu eq.L^{-1}$) (tableau 5.1). Ces résultats de NH_4^+ et NO_3^- obtenus sur notre période d'étude (1998-2007) sont comparables aux caractérisations publiées dans les synthèses des différents écosystèmes (Galy-Lacaux et al., 2009 ; Yoboué et al., 2005 ; Sigha et al., 2003 ; Laouali et al., 2010 ; Akpo et al., 2010, ...).

Sur le transect d'écosystèmes, les concentrations d'ammonium et de nitrate dans les pluies d'Afrique de l'Ouest et Centrale sont plus élevées en savanes sèches (surtout à Agoufou) et plus faibles en forêt. La savane humide de Lamto présente des concentrations annuelles de même ordre de grandeur que les savanes sèches. Pour l'ion nitrate, l'écart des concentrations entre les trois écosystèmes est faible. La variabilité interannuelle des concentrations moyennes pondérées sur la période 1998-2007 est comprise entre $\pm 13\%$ et $\pm 30\%$ et ne présente pas de tendance significative. Cette variabilité est principalement due aux variations naturelles d'amplitude des sources et à la distribution spatio-temporelle de la pluviométrie (Galy-Lacaux et al., 2009).

5.2.1.2. Flux de dépôt humide des ions NH_4^+ et NO_3^-

Le dépôt humide d'azote a été calculé à partir des concentrations moyennes d'ammonium (NH_4^+) et de nitrate (NO_3^-) dans les pluies, et de la pluviométrie moyenne sur la même période de mesure. La figure 5.3 présente l'évolution mensuelle moyenne du flux de dépôt humide total d'azote sous forme d'ions NH_4^+ et NO_3^- pour les sites IDAF et sur le transect savane sèche-savane humide-forêt. Les flux moyens de dépôt humide annuel sont présentés dans le tableau 5.2.

Sur tous les sites, le dépôt d'azote sous forme ammonium (forme réduite) est plus important que sous forme nitrate (oxydée). En savanes sèches, le dépôt humide est maximal en juin-juillet, au cœur de la saison humide, période où la pluviométrie est la plus grande. Dans la savane humide de Lamto, le dépôt humide d'azote est aussi important au début de la saison sèche (janvier-mars). En effet, les concentrations des ions ammoniums et nitrates sont très élevées en lien avec l'intensité de la source des feux de savanes et la pluviométrie mensuelle élevée à cette période (50 à 100 mm). Pour le site forestier de Zoétélé, le dépôt humide d'azote est faible en saison sèche, notamment pendant les mois de décembre et janvier. L'évolution mensuelle des flux de dépôt humide d'azote est très influencée par la pluviométrie mensuelle pour chaque écosystème (figure 5.2, 5.3).

Nous notons que le gradient de la pluviométrie (moyenne annuelle) sur le transect des écosystèmes varie de 348 mm en savane semi-aride du Mali (Agoufou) à 1479 mm en forêt du Cameroun (Zoétélé) (Tableau 5.2).

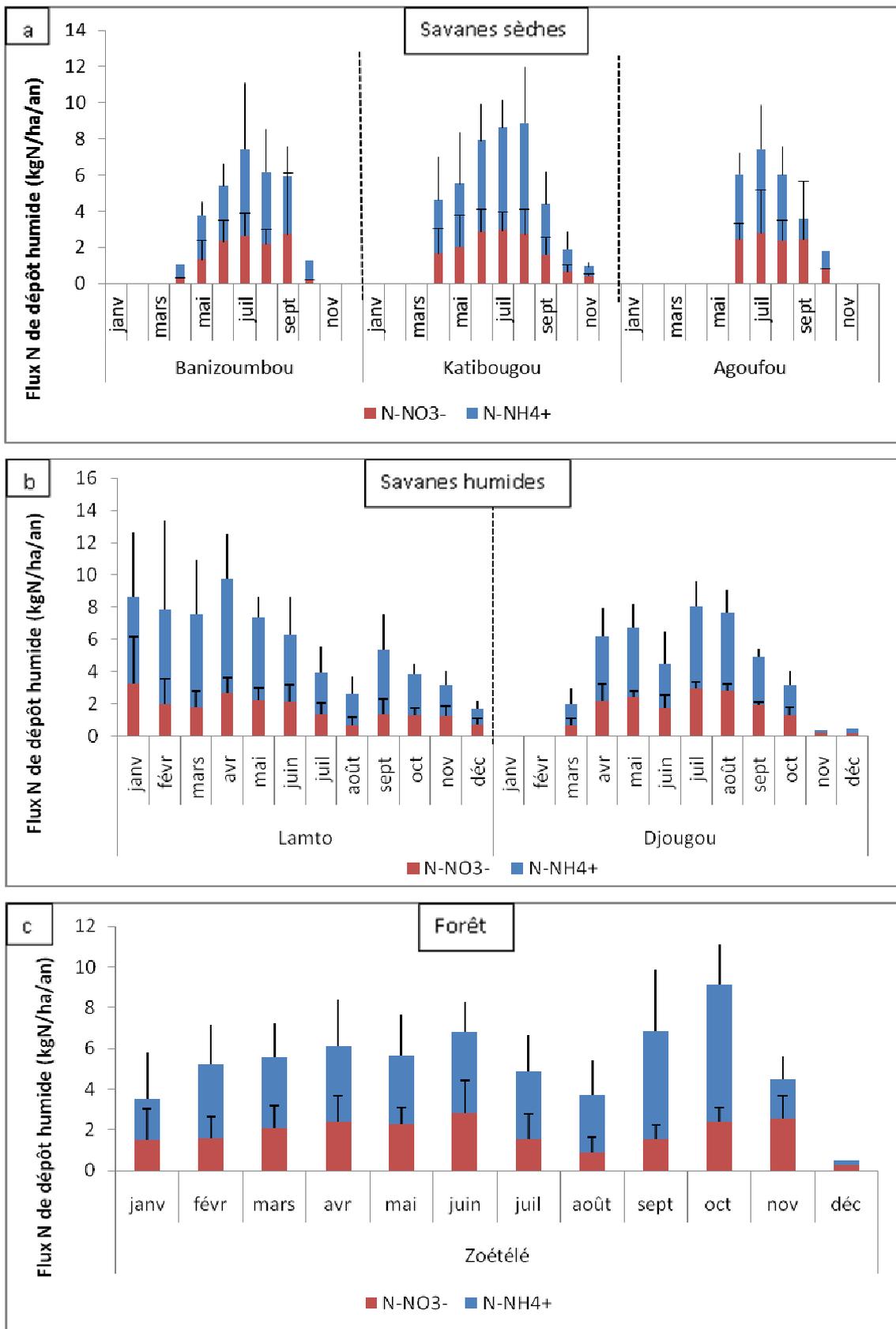


Figure 5.3 : Evolution mensuelle moyenne des flux de dépôt humide total d'azote par les ions NH_4^+ et NO_3^- sur le transect savane sèche (a), savane humide (b), forêt (c). Les barres d'erreur verticales indiquent les écart-types calculés sur la période d'étude (1998-2007).

Tableau 5.2 : Flux moyen annuel de dépôt humide d'azote par les ions NH_4^+ et NO_3^- ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) dans les stations IDAF sur la période d'étude 1998-2007.

Flux de Dépôt humide ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$)				
Site (pluviométrie moyenne annuelle)		N- NH_4^+	N- NO_3^-	Dépôt humide total N
Savanes sèches	Agoufou* (348 mm)	1,0 \pm 0,4	0,6 \pm 0,3	1,6
	Banizoumbou (486 mm)	1,4 \pm 0,5	0,8 \pm 0,2	2,2
	Katibougou (797 mm)	2,1 \pm 0,4	1,1 \pm 0,3	3,2
Savanes humides	Djougou *(1205 mm)	2,2 \pm 0,5	1,3 \pm 0,1	3,5
	Lamto (1269 mm)	3,6 \pm 0,6	1,6 \pm 0,3	5,2
Forêt	Zoétéélé (1479 mm)	2,8 \pm 1,8	1,8 \pm 0,3	4,6

*La période d'étude du site Agoufou est 2004-2007 et du site Djougou 2005-2008.

Le dépôt humide total d'azote représente la somme des formes oxydées et réduites (N- NO_3^- , N- NH_4^+). Sur le transect, le dépôt humide annuel total d'azote mesuré est de 1,6 à 3,2 $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en savanes sèches, de 3,5 à 5,2 $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en savanes humides, et de l'ordre de 4,6 $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en forêt. Ainsi, malgré un gradient de concentration négatif des savanes sèches vers les forêts, on note un flux de dépôt humide d'azote important en forêt.

La figure 5.4 (a, b) présente le dépôt humide moyen annuel d'azote et le pourcentage de contribution de chaque ion au dépôt humide total pour les stations IDAF.

Le dépôt humide d'azote dans les principaux écosystèmes africains (sites IDAF) est dominé par un dépôt sous forme réduite (N- NH_4^+) qui représente environ 62 à 65% du total en savanes sèches, 63 à 70% en savanes humides et 63% en forêt. La contribution du dépôt humide d'azote sous forme oxydée (N- NO_3^-) représente donc environ 30 à 38% du total sur l'ensemble des écosystèmes (figure 5.4b).

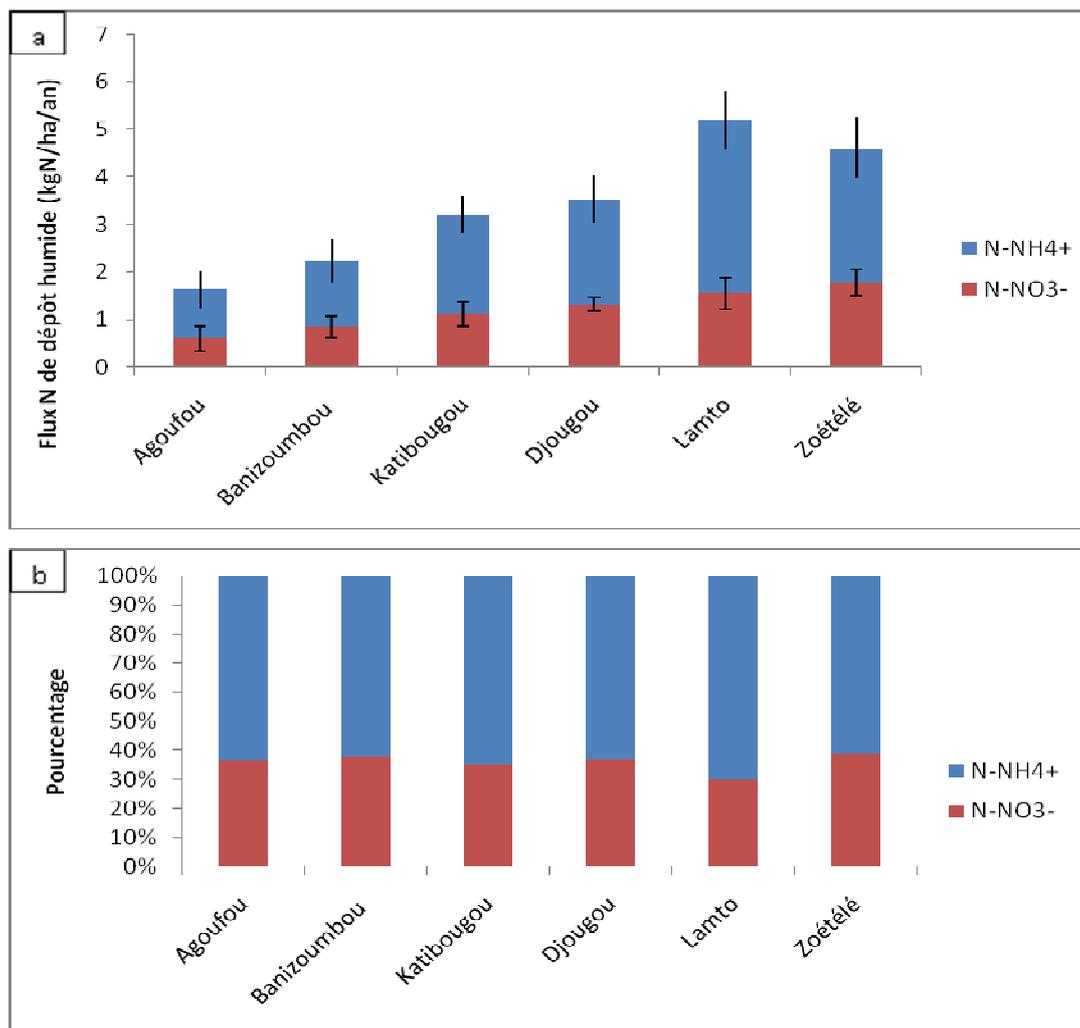


Figure 5.4 (a,b) : Flux moyens annuels de dépôt humide d'azote par NH_4^+ et NO_3^- (a) et leurs pourcentages de contribution au dépôt humide total d'azote (b) sur la période d'étude (1998-2007) dans les stations IDAF.

La variabilité interannuelle des flux de dépôt humide d'azote sous formes réduite et oxydée sur la période 1998-2007 est comprise entre $\pm 11\%$ et $\pm 44\%$ sur l'ensemble des sites. Les plus fortes variabilités sont observées en savanes sèches. L'incertitude globale du flux de dépôt humide a été évaluée à partir des incertitudes connues sur les mesures de concentrations d'ions dans les pluies et sur les mesures de hauteur de précipitation, et estimée à 10%.

5.2.2. Le dépôt sec d'azote

On distingue deux formes de dépôt sec : le dépôt sec sous forme gazeuse et le dépôt sec sous forme particulaire.

- **Dépôt sec d'azote sous forme gazeuse**

Le dépôt sec d'azote par voie gazeuse a été présenté dans le chapitre 4. Pour résumer, l'estimation des flux de dépôt sec d'azote est réalisée à partir des mesures mensuelles des concentrations gazeuses (NO_2 , NH_3 , HNO_3) associées à des vitesses de dépôt sec, calculées par la méthode inférentielle avec le modèle big-leaf de Zhang et al. (2003b).

Le bilan des flux de dépôt sec des gaz azotés est présenté dans le chapitre 4 à la section (4.2.1.4). Nous avons pu montrer que le dépôt sec total d'azote sous forme gazeuse est plus important en forêt ($\approx 8 \text{ kgN.ha.an}^{-1}$) et de même ordre de grandeur en savanes humides (3,4-4,6 kgN.ha.an^{-1}) et en savanes sèches (4-5,3 kgN.ha.an^{-1}). La contribution du dépôt sec d'azote sous forme gazeuse au dépôt total d'azote sera étudiée dans le bilan de dépôt atmosphérique total d'azote à l'échelle des écosystèmes africains (section 5.2.3).

- **Dépôt sec d'azote sous forme particulaire**

Le dépôt sec des particules azotées est calculé comme le produit de la concentration moyenne de la particule dans l'air par la vitesse de dépôt sec, tout comme pour le gaz (équation 4.2 du chapitre 4). Le processus de dépôt sec des particules diffère de celui des gaz. La solubilité et la réactivité sont les principaux facteurs affectant la résistance de surface pour les gaz, alors que pour les particules, le principal facteur ayant une influence sur la résistance est la taille de la particule. Selon leurs tailles et leurs masses volumiques, les particules vont être soumises à différents mécanismes de dépôt (Petroff et al., 2008, Sportisse, 2007) : la diffusion brownienne (pour les particules très fines), l'interception, l'impaction (ou impact par inertie), et la sédimentation (pour des grosses particules). Il existe de nombreux modèles de dépôt sec d'aérosols sur les couverts végétaux dans la littérature (Slinn, 1982 ; Wesely et al., 1985 ; Ruijgrok et al., 1995, 1997 ; Zhang et al., 2001). Les différents modèles décrivent les mêmes mécanismes (la diffusion brownienne, interception, etc.), mais utilisent des notions de vitesse macroscopique différentes. Certains ne s'attachent qu'à décrire la gamme dite grossière des aérosols (supérieure à $1 \mu\text{m}$, Aylor, 1982), d'autres s'appliquent à prédire le dépôt de toutes les tailles d'aérosols (Slinn, 1982 ; Wiman et Agren, 1985 ; Zhang et al., 2001). La plupart d'entre eux sont conçus pour être appliqués à un type de couvert particulier ; mais les modèles analytiques de Slinn (1982) et Zhang et al. (2001) peuvent s'appliquer à tous les couverts.

Une revue sur le dépôt sec des particules peut être trouvée dans Zhang and Vet (2006), Petroff et al. (2008), Fowler et al. (2009)...

A partir de ces revues, afin d'estimer le flux de dépôt sec des particules azotées, nous avons choisi des vitesses de dépôt sec (V_d) pour les écosystèmes de savanes dans la littérature. Les particules fines sont généralement déposées lentement, avec leur vitesse de dépôt d'une ampleur similaire à NO_2 ; cependant les particules grossières se déposent beaucoup plus rapidement (Zhang et al., 2009). Zhang et al. (2009) ont estimé des valeurs des V_d de pNO_3^- et pNH_4^+ comprises entre 0,1 et 0,2 cm.s^{-1} , du même ordre de celles de NO_2 (0,2 cm.s^{-1}). Pour les écosystèmes européens, les vitesses de dépôt sec des particules pNH_4^+ et pNO_3^- sont estimées de l'ordre de 0,2-0,3 cm.s^{-1} pour des végétations courtes (Flechard et al., 2011), et plus élevées dans le cas de surfaces plus rugueuses (forêt) (0,2-0,5 cm.s^{-1} ou 1-2,5 cm.s^{-1} selon les modèles).

Dans notre étude, en se basant sur les vitesses de dépôt sec des particules pNO_3^- et pNH_4^+ estimées dans Zhang et al. (2009) et Flechard et al. (2011) pour les différents écosystèmes, nous avons utilisé une gamme de valeurs de V_d pour les savanes (0,15-0,25 cm.s^{-1}) sans distinction de taille des particules.

Le dépôt sec d'azote sous forme particulaire est estimé à partir du produit entre les concentrations moyennes annuelles d'ammonium (pNH_4^+) et de nitrate (pNO_3^-) particulaires mesurées dans la partie soluble des aérosols, et des vitesses de dépôt sec. L'aérosol a été collecté, sans séparation en taille, à Banizoumbou (Niger) de 1996 à 2004, à Katibougou (Mali) de 1999 à 2003, à Lamto (Côte d'Ivoire) de 1998-2004.

Le tableau 5.3 présente les concentrations moyennes annuelles des particules pNH_4^+ et pNO_3^- mesurées ainsi que leurs flux de dépôt sec associés pour trois stations IDAF d'Afrique de l'Ouest.

Les concentrations moyennes annuelles de pNH_4^+ et pNO_3^- en savanes sèches (respectivement 0,5-0,6 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et 0,2 $\mu\text{g.m}^{-3}$) sont de même ordre de grandeur qu'en savane humide de Lamto (respectivement 0,66 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et 0,13 $\mu\text{g.m}^{-3}$).

La comparaison des concentrations des particules azotées avec les mesures de NH_3 en phase gazeuse dans les sites de savanes sèches (de l'ordre de 6,5 ppb, soit 4,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$) et de savanes humides (de l'ordre de 4 ppb, soit 2,8 $\mu\text{g.m}^{-3}$) conduit à affirmer que le dépôt d'azote sous forme particulaire est négligeable, comparé à la forme gazeuse. Par conséquent, l'erreur commise sur le choix de la vitesse de dépôt sec des particules dans le calcul des flux de dépôt influencerait peu le bilan de dépôt d'azote.

Tableau 5.3 : Flux de dépôt sec moyen annuel d'azote par les particules $p\text{NH}_4^+$ et $p\text{NO}_3^-$ ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) dans trois stations IDAF, année de mesure des concentrations (96-04 pour 1996-2004).

Ecosystèmes	Sites IDAF	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Dépôt sec d'azote sous forme particulaire*		
		$p\text{NO}_3^-$	$p\text{NH}_4^+$	N- $p\text{NO}_3^-$	N- $p\text{NH}_4^+$	total N
savanes sèches	Banizoumbou (96-04)	0,45 \pm 0,03	0,20 \pm 0,02	0,05-0,08	0,07-0,12	0,12-0,20
	Katibougou (99-03)	0,63 \pm 0,18	0,15 \pm 0,06	0,07-0,11	0,05-0,09	0,12-0,20
savane humide	Lamto (98-04)	0,66 \pm 0,16	0,13 \pm 0,04	0,07-0,12	0,05-0,08	0,12-0,20

*Les gammes $V_d = 0.15-0.25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour les sites de savanes sont utilisées pour estimer la gamme des flux de dépôt sec des particules $p\text{NH}_4^+$ et $p\text{NO}_3^-$.

Le flux moyen annuel de dépôt sec total d'azote sous forme particulaire est estimé entre 0,12-0,20 $\text{kgN}\cdot\text{ha}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes (tableau 5.3). La gamme proposée pour cette estimation dépend de la gamme de vitesses de dépôt sec mentionnée plus haut. En forêt, le dépôt sec d'azote sous forme particulaire est considéré négligeable comme dans les autres écosystèmes. Notre estimation montre que le dépôt sec total d'azote sous forme particulaire est faible pour les écosystèmes africains, comparé au dépôt sec sous forme gazeuse qui varient de 3,4 à 8 $\text{kgN}\cdot\text{ha}\cdot\text{an}^{-1}$. Le dépôt sec sous forme particulaire ne représente que 3 à 4% du dépôt sec total d'azote sur l'ensemble des écosystèmes africains.

Pour le bilan annuel du dépôt total d'azote, nous utiliserons la moyenne de la gamme estimée des flux de dépôt sec sous forme particulaire (tableau 5.3).

5.2.3. Bilan du dépôt atmosphérique total d'azote à l'échelle des écosystèmes africains

Le bilan de dépôt sec et humide d'azote a été réalisé pour tous les sites IDAF d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Ce travail nous a permis de proposer une première estimation du dépôt total d'azote pour l'Afrique à l'échelle des sites pour les trois principaux écosystèmes.

Nous présentons sur la figure (5.5) l'évolution mensuelle du dépôt total (sec sous forme gazeuse et humide) d'azote sur le transect savane sèche-savane humide-forêt. Le dépôt sec mensuel des particules azotées n'est pas représenté.

En savanes sèches, l'azote se dépose en quantité plus importante en saison humide (10-18,5 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) qu'en saison sèche (1,5-9 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). En savanes humides, les valeurs

mensuelles du dépôt d'azote varient de 5 à 15,5 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ à Lamto avec un dépôt plus important au début de la saison sèche (janvier-avril), et de 3 à 12 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ à Djougou où le dépôt en saison humide est prédominant. Dans l'écosystème forestier (Zoétélé), les moyennes mensuelles des flux de dépôt total d'azote sont comprises entre 7 et 17 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, la plus faible valeur étant obtenue au début de la saison sèche (décembre).

Le tableau 5.4 présente le bilan annuel du dépôt d'azote pour les sites IDAF et la contribution en pourcentage de ses composantes. Le dépôt annuel d'azote de chaque espèce pour chaque site de mesure est représenté à la figure 5.6.

Les résultats montrent que le dépôt total d'azote estimé est de l'ordre de 6-9 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savane sèche, 7-10 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savane humide, et 13 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en forêt d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Nous observons un gradient (positif) du dépôt d'azote sur le transect de la savane sèche /savane humide /forêt. Le dépôt sec d'azote sous forme particulaire est négligeable (0,1-0,2 kgN.ha⁻¹.an⁻¹) et ne représente que 2 % du dépôt total d'azote (tableau 5.4).

En savanes sèches, la contribution relative du dépôt sec des gaz au dépôt total d'azote représente entre 61 et 71 % tandis qu'en savanes humides cette contribution est comprise entre 46 et 49%, et est de l'ordre de 63% en forêt. Ce bilan met clairement en évidence l'importance des processus de dépôt sec pour les espèces gazeuses azotées. Nous notons qu'en savanes humides, la contribution du dépôt humide est équivalente à celle du dépôt sec.

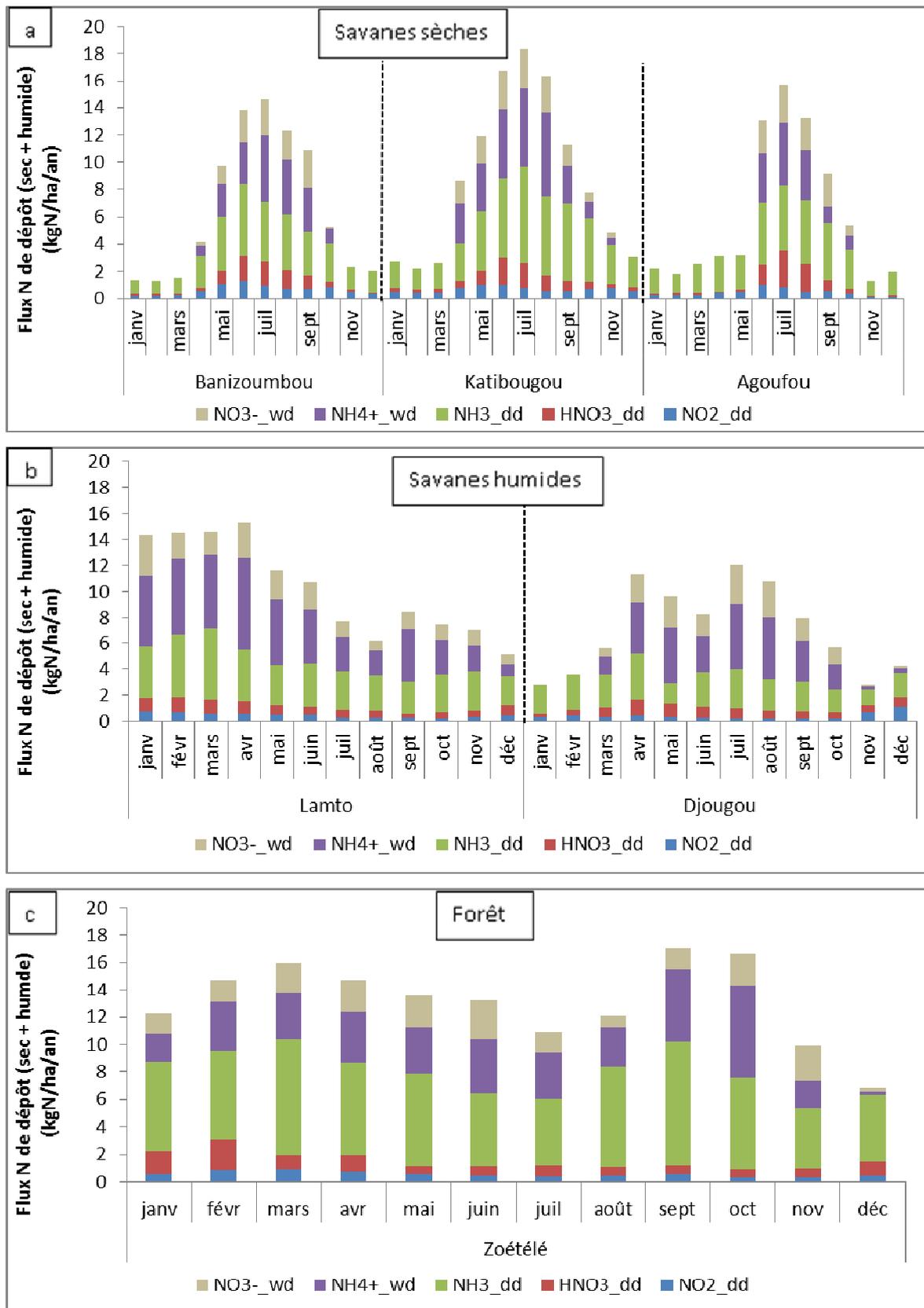


Figure 5.5 (a,b,c) : Evolution mensuelle des flux moyens de dépôt total d’azote (1998-2007) sur le transect savane sèche (a) – savane humide(b) – forêt (c). **dd** : dry deposition (dépôt sec) ; **wd** : wet depositions (dépôt humide).

Tableau 5.4 : Bilan de dépôt d'azote (en $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) incluant dépôt humide et dépôt sec sous forme gazeuse et particulaire (pourcentage de contribution de chaque type de dépôt au total) à l'échelle des écosystèmes africains.

Dépôt d'azote ($\text{KgN}/\text{ha}/\text{an}$)		Dépôt sec		Dépôt humide ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$)	Dépôt total
		Gazeux ($\text{NO}_2 + \text{HNO}_3 + \text{NH}_3$)	particulaire ($\text{pNO}_3^- + \text{pNH}_4^+$)		
Savanes sèches	Agoufou	4,0 (71%)	*	1,6 (29%)	5,6
	Banizoumbou	4,0 (63%)	0,16 (2%)	2,2 (35%)	6,4
	Katibougou	5,3 (61%)	0,16 (2%)	3,2 (37%)	8,7
Savanes humides	Djougou	3,4 (49%)	*	3,5 (51%)	7,0
	Lamto	4,6 (46%)	0,16 (2%)	5,2 (52%)	9,9
Forêt	Zoétéélé	8,0 (63%)	*	4,6 (37%)	12,6
	Bomassa	8,5	*	*	

* : mesures d'aérosols ou de contenu chimique des pluies non disponibles ou non traitées.

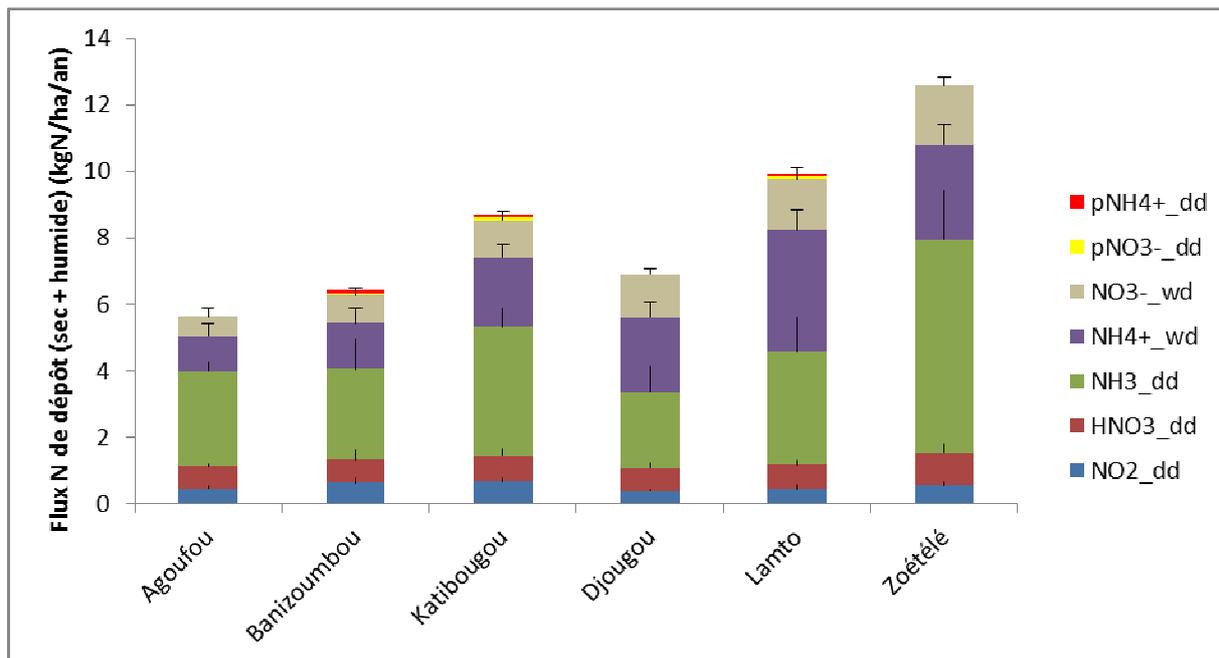


Figure 5.6 : Flux moyen annuel de dépôt total d'azote (sec + humide) dans les stations IDAF sur la période d'étude 1998-2007. **dd** : dépôt sec ; **wd** : dépôt humide.

La contribution de chaque espèce azotée au dépôt total d'azote est représentée à la figure 5.7. Le dépôt sec d'azote par l'ammoniac gazeux (NH_3) prédomine dans le bilan de dépôt total d'azote en savanes sèches (42-51%) et en forêt (51%). En savanes humides, les contributions

du dépôt humide de NH_4^+ (32-37%) et du dépôt sec de NH_3 (33-34%) au dépôt total d'azote sont de même ordre de grandeur.

L'analyse des formes oxydées (NO_2 , HNO_3 , NO_3^- , pNO_3^-) et réduites (NH_3 , NH_4^+ , pNH_4^+) du bilan de dépôt total d'azote montre qu'il est dominé par un dépôt sous forme réduite qui représente environ 65 à 74 % du total pour tous les écosystèmes.

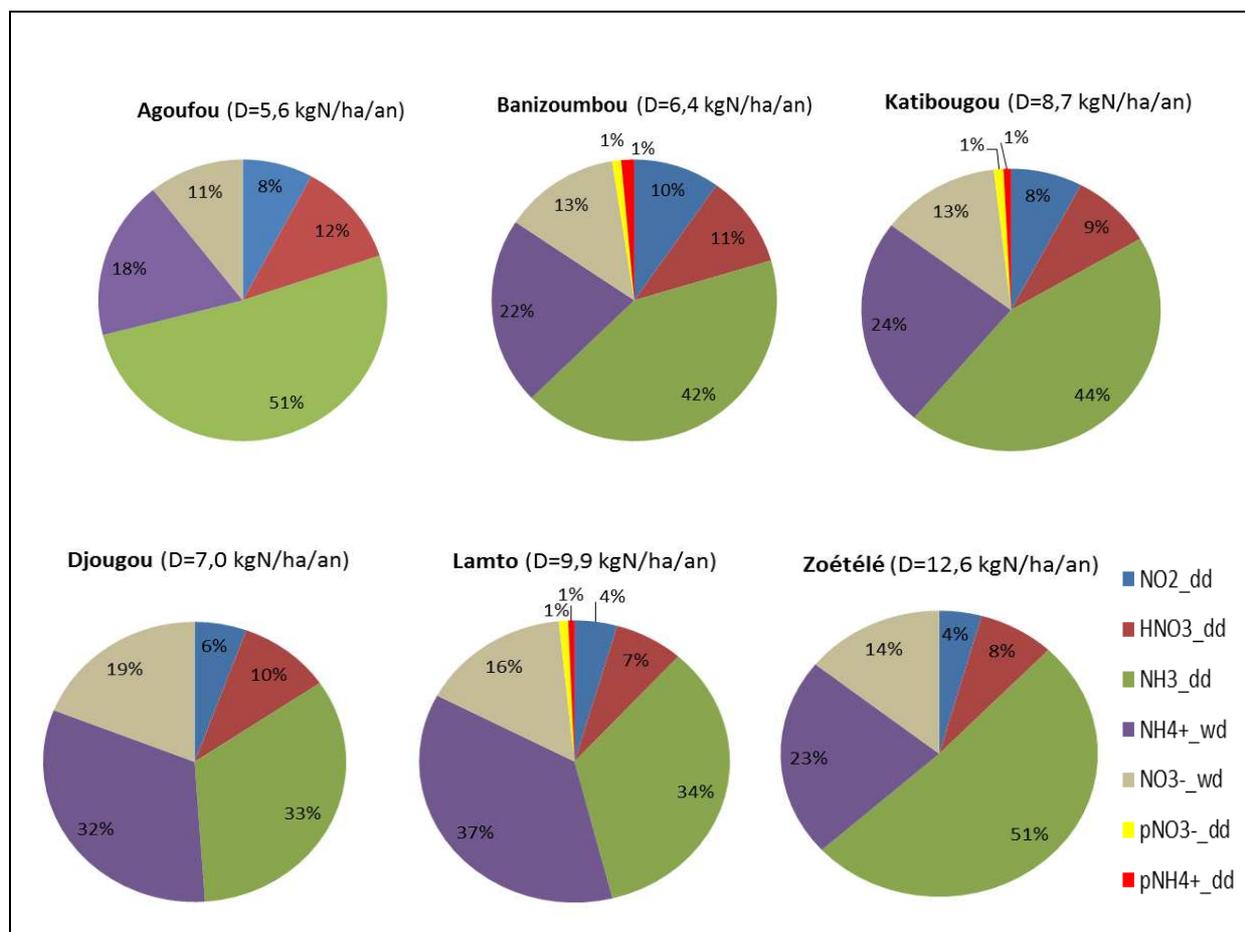


Figure 5.7 : Contribution de chaque espèce azotée du dépôt sec (NO_2 , HNO_3 , NH_3 , pNO_3^- , pNH_4^+) et du dépôt humide (NO_3^- , NH_4^+) aux flux du dépôt total d'azote au niveau des sites IDAF. **dd** : dépôt sec ; **wd** : dépôt humide ; **D** : dépôt total d'azote.

Il est important de préciser que ce bilan ne prend en compte qu'une partie des composés azotés et n'inclut pas les espèces azotées organiques (par exemple, PAN). Ainsi ce bilan pourrait être sous estimé. Toutefois, les concentrations de PAN sont supposées négligeables dans les régions non polluées (autour de 100 ppt ; Seinfeld and Pandis, 1998), comparées aux concentrations de NO_2 (1-2,5 ppb) et HNO_3 (0,2-0,5 ppb) mesurées sur les sites reculés du réseau IDAF (Adon et al., 2010).

Nous estimons l'incertitude globale de ce bilan de dépôt d'azote à environ 30%, sachant que les estimations du dépôt humide sont relativement bien connues (à 10% près) et que les flux de dépôt sec ont une incertitude plus grande, liée à l'estimation des vitesses de dépôt sec.

L'analyse de la base de données IDAF, avec ses trois composantes (chimie des pluies, des aérosols et des gaz), a permis d'établir le premier bilan du dépôt d'azote à l'échelle des écosystèmes africains. Ce bilan d'azote inorganique est une composante importante du cycle global de l'azote réactif dans l'atmosphère.

5.3. Bilan émission-dépôt des principales espèces azotées à l'échelle des écosystèmes africains

Un bilan émission-dépôt des principales espèces azotées pour l'année 2006 en région sahélienne a été déjà réalisée grâce à une approche couplée modèle-mesures IDAF (Delon et al., 2010). Dans ce travail, nous avons étendu ce bilan à l'échelle des écosystèmes d'Afrique de l'Ouest et Centrale sur notre période d'étude (1998-2007).

5.3.1. Emission des composés azotés gazeux

Les flux d'émission de composés gazeux estimés pour ce bilan sont : les flux biogéniques de NO par les sols, les émissions de NO_x et de NH₃ par les feux domestiques et les combustions de biomasse ainsi que les flux de NH₃ par volatilisation des excréments d'animaux domestiques.

Je voudrais souligner ici que l'ensemble du travail sur les estimations des émissions a été réalisé par C. Delon au laboratoire d'Aérodologie avec qui j'ai collaboré étroitement afin d'initier les différents travaux sur le bilan émission dépôt d'azote à l'échelle des écosystèmes africains. Ma contribution dans ce contexte a porté en particulier sur l'estimation de dépôt sec validé sous forme gazeuse pour chacun des écosystèmes étudiés. Deux publications ont déjà été réalisées. La première est un bilan émission dépôt à l'échelle des écosystèmes sahéliens pour l'année 2006 (Delon, Galy-lacaux, Adon et al, 2010) et la seconde porte sur l'analyse pluriannuelle du bilan émission dépôt d'azote à l'échelle des savanes sèches et humides (Delon, Galy-lacaux, Adon et al, 2011).

Les flux d'émission de NO sont simulés avec le modèle ISBA (Noilhan and Mahfouf, 1996), auquel a été ajouté un module d'émission biogénique par les sols, élaboré à l'aide d'un réseau

de neurones artificiel (Delon et al, 2007, 2008, 2010). Ce module d'émission a été testé en zone aride pendant la saison des pluies à l'aide du modèle Méso-NH (Delon et al., 2008). L'humidité du sol a une influence primordiale dans les écosystèmes de savanes sèches, en raison de fortes émissions (pulses) lors des premières pluies de la saison. En savanes humides et en forêts, ce phénomène est réduit, en raison de l'humidité des sols plus élevée, même pendant la saison sèche. Les flux simulés de NO ont été calculés sur une maille de $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ centrée sur chaque site de mesure. Le forçage météorologique développé dans le programme ALMIP a été utilisé (voir section 4.1.1 du chapitre 4). L'incertitude du flux biogénique de NO à partir du sol est proche de 20% en moyenne annuelle pour chaque site (Delon, Galy-lacaux, Adon et al., 2011).

Les taux de fertilisation fournis au modèle sont élaborés à partir du calcul de l'azote émis par fertilisation organique (excréments d'animaux) pour chaque pays. La fertilisation synthétique est considérée comme négligeable (Bouwman et al., 1997, Potter et al., 2010). Delon et al. (2010) ont développé une base de données de fertilisation organique pour 23 pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale. On considère une quantité d'azote émise par un cheptel d'animaux constitué de vaches, de moutons et de chèvres. La densité de population animale, dans chaque sous-région pour chaque pays, est issue de la base de donnée GLIPHA (Global Livestock Production and Health Atlas) de la FAO (Food and Agriculture Organization) (2009, <http://kids.fao.org/glipha/>). L'inventaire du taux de fertilisation d'azote ainsi obtenu est une valeur d'entrée en azote de l'algorithme du réseau de neurones.

La quantité d'azote émise par les animaux en azote est estimée à $23 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à Agoufou (Mali), $25 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à Banizoumbou (Niger), $11 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à Katibougou (Mali), $8 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à Djougou (Benin), $8 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à Lamto (Côte d'Ivoire) et $3 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à Zoétélé (Cameroun). 30% de cet apport azoté est utilisé pour le calcul du flux de volatilisation de NH_3 , le reste est utilisé comme apport dans le module d'émissions biogéniques de NO par les sols (Delon et al., 2010, 2011). L'incertitude totale appliquée au flux de volatilisation est de l'ordre de 50%.

Les émissions de NO_x et de NH_3 par les combustions de biomasse ont été calculées à partir des données satellites des surfaces brûlées (L3JRC) (Lioussé et al., 2010), dérivées des données du capteur végétation SPOT-VGT et de la carte de végétation GLC (Global Land Cover). Les facteurs d'émissions des espèces gazeuses ont été choisis selon Andreae et Marlet (2001). Des flux mensuels moyens d'émissions ont ainsi été estimés sur une fenêtre de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$

centrée sur chacun des sites d'étude. Selon Delon et al (2010), l'incertitude totale appliquée aux flux de combustion de biomasse (de NH₃ et NO_x) est 54%.

Les émissions de NO_x et de NH₃ par les feux domestiques, principalement liées aux combustions de « biofuels » pour cuisiner, ont été estimées constantes sur l'année. Des flux annuels d'émissions ont été estimés sur une fenêtre de 5°×5° pour chaque site à l'aide de la méthodologie développée par Junker et Liousse (2008). L'incertitude totale appliquée aux feux domestiques est 60% et l'incertitude totale sur les flux d'émission est évaluée à 45% (Delon, Galy-lacaux, Adon et al 2011).

Les flux d'émission moyens annuels de chaque composé azoté estimé au niveau des sites IDAF sont résumés dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 : Flux d'émission moyens annuels des composés azotés (en kgN.ha⁻¹.an⁻¹) dans les stations IDAF sur la période 2002-2006.

Emission d'azote (kgN/ha/an)	Composés oxydés			Composés réduits		
	NObiogénique	NO _x BB*	NO _x BF*	NH ₃ volatilisation	NH ₃ BB*	NH ₃ BF*
Agoufou	1,1 ±0,2	0,0 ±0,0	0,1 ±0,0	7,2 ±3,6	0,0 ±0,0	0,3 ±0,2
Banizoumbou	1,6 ±0,2	0,5 ±0,1	0,1 ±0,1	7,7 ±3,8	0,3 ±0,1	0,1 ±0,0
Katibougou	1,5 ±0,2	0,5 ±0,2	0,1 ±0,0	3,4 ±1,7	0,3 ±0,1	0,2 ±0,1
Djougou	2,3 ±0,1	1,3 ±0,6	0,3 ±0,1	2,5 ±1,2	0,8 ±0,3	0,7 ±0,3
Lamto	2,0 ±0,0	1,4 ±0,7	0,2 ±0,1	2,3 ±1,2	1,0 ±0,2	0,8 ±0,3
Zoétéélé	1,8 ±0,0	1,2 ±0,3	0,1 ±0,1	1,0 ±0,5	0,6 ±0,2	0,3 ±0,1

* BB : biomass burning (combustion de biomasse), BF : biofuel (feux domestiques).

Dans les sections suivantes, les flux d'émission de composés azotés oxydés et réduits seront présentés séparément; puis ils seront comparés aux flux de dépôt d'azote oxydés et réduits dans le but de mieux comprendre la contribution de chaque source d'émission au dépôt.

5.3.2. Bilan émission-dépôt des composés azotés oxydés

Le flux d'émission d'azote sous forme oxydée est défini comme la somme des flux biogéniques de NO par les sols, des flux de NO_x par la combustion de biomasse et les feux domestiques. Il est comparé au flux de dépôt des composés oxydés, défini comme la somme des flux de dépôt sec sous forme NO₂ et HNO₃ en phase gazeuse et pNO₃⁻ en phase particulaire, et des flux de dépôt humide de NO₃⁻.

La figure 5.8 présente les résultats des flux d'émission moyens mensuels simulés (composés oxydés) sur la période 2002-2007, comparés aux flux mensuels de dépôt des composés azotés oxydés pour chaque site IDAF.

En savanes sèches, les flux de dépôt et d'émission augmentent simultanément au début de la saison humide ; le maximum est atteint en juin/juillet pour les flux de dépôt et en août pour les flux d'émission (biogénique de NO). Les flux d'émission de NO_x par combustion de biomasse présente un maximum en novembre/décembre à Banizoumbou et à Katibougou, et correspond à l'apparition des feux pendant la saison sèche. A Agoufou, aucune émission due aux combustions de biomasse n'est observée ; ceci est cohérent avec les mesures des concentrations de NO₂ qui n'ont pas montré de pic en saison sèche (peu de végétation à cette période).

La comparaison émission-dépôt des flux mensuels (figure 5.8a) confirme le dépôt total d'azote sous forme oxydée, en quantité plus importante en saison humide (4-6 kgN.ha⁻¹.an⁻¹) dans les sites de savanes sèches. Ceci est la conséquence de forte émission des flux biogénique de NO par les sols en cette saison. Les flux d'émission et de dépôt sont, tous les deux, très faibles en saison sèche.

En savanes humides, l'évolution mensuelle des flux d'émission biogénique (NO) simulés est comparable à celle des flux de dépôt d'azote sous forme oxydée, surtout en saison humide. Nous remarquons, à la figure 5.8b, que les émissions de NO_x dues aux combustions de biomasse sont très élevées en décembre pour les deux stations. Les mesures de concentrations de NO₂ par les capteurs passifs ont montré des valeurs très élevées en janvier/février à Lamto et en novembre/décembre à Djougou, dues aux feux de savanes. La forte amplitude des flux de NO_x en décembre à Lamto serait due à l'impact des émissions des combustions de biomasse à l'échelle régionale.

En forêt (Zoétélé), les flux mensuels d'émission biogénique de NO par les sols sont pratiquement constants sur toute l'année, la saison sèche étant peu marquée dans cet écosystème (figure 5.8c). De décembre à janvier (saison sèche), les émissions des composés d'azote oxydés sont dominées par les émissions des combustions de biomasse, comme en savanes humides. Les mesures des concentrations de NO₂ à Zoétélé (figure 3.1) ne montrent pas une très forte influence des combustions de biomasse en décembre. Ainsi, nous supposons que la forte valeur des flux simulés de NO_x en décembre serait aussi due à l'impact des émissions à l'échelle régionale. Les flux de dépôt d'azote sous forme oxydée ne présentent pas de tendance saisonnière tout comme les flux d'émissions biogéniques de NO par les sols. Les valeurs mensuelles des flux de dépôt d'azote sont supérieures à celle des flux d'émission en saison humide.

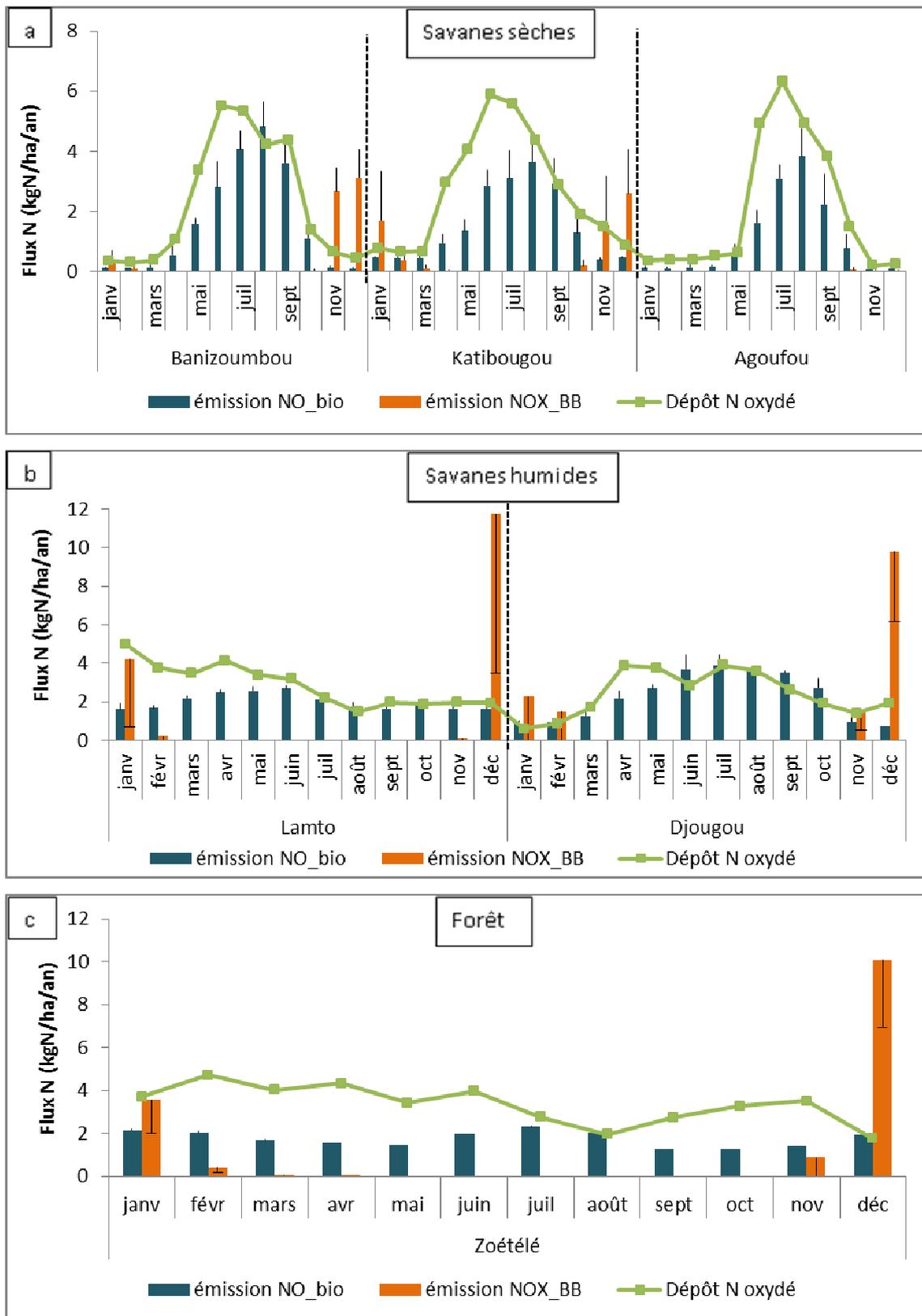


Figure 5.8 (a,b,c) : Evolution mensuelle des flux moyens d'émission et de dépôt des composés d'azote sous forme oxydée sur le transect savane sèche (a) – savane humide (b)- forêt (c). **bio** : biogénique ; **BB** :biomass burning (combustion de biomasse). Les barres représentent les écart-types sur la période 2002-2007.

La comparaison de ces flux (figure 5.8), à l'échelle mensuelle, montre un bon accord entre l'ordre de grandeur des émissions simulées et des dépôts calculés, tout en soulignant les difficultés de l'analyse du bilan d'azote dans ces zones reculées où très peu de mesures sont disponibles. La modélisation des émissions présente une alternative à ce manque de mesure, mais de nombreuses questions restent préoccupantes, par exemple, la quantité d'azote contenue dans les sols, ou la quantité d'émissions après la première pluie dans les régions semi-arides. Toutefois, l'exploitation en commun des mesures IDAF et les résultats de la modélisation des émissions donne une opportunité unique dans l'analyse d'un premier bilan d'azote à l'échelle de l'Afrique.

A l'échelle annuelle, nous avons réalisé une première estimation de la contribution des émissions biogéniques, et par les combustions de biomasse et les feux domestiques au dépôt atmosphérique des composés d'azote sous forme oxydée. La figure 5.9 présente les moyennes annuelles des flux d'émission (a) et des flux de dépôt oxydés (b) pour les stations IDAF.

Les flux d'émission moyens annuels d'azote (sous forme oxydée) sont de l'ordre de 1-2 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes sèches, de 3,5-4 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes humides, et de 3 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et en forêt. Le dépôt moyen annuel d'azote sous forme oxydée varie de 1,7 à 2,8 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes (sèches et humides) et est de l'ordre de 3,3 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en forêt. Pour les composés d'azote oxydés, les flux d'émission et de dépôt sont généralement de même ordre de grandeur dans les écosystèmes, excepté pour la savane humide où les flux d'émission sont plus élevés (Lamto et Djougou).

En effet, en savane humide, une part importante des émissions d'azote réactif (N_r) par les feux de savanes est transportée vers l'équateur et déposée dans les autres biomes. Chen et al. (2010) ont montré que seulement 53% des émissions de N_r par les feux sont déposés dans les savanes, indiquant que les savanes africaines sont de net exportatrices de l'azote réactif vers les forêts tropicales.

Les flux d'émission d'azote oxydé sont largement dominés par la part biogénique qui représente entre 70 et 90 % du total en savane sèche, 60% en savane humide et en forêt. La contribution des émissions dues aux combustions de biomasse, à l'échelle annuelle, est de 25% à Banizoumbou et Katibougou en savanes sèches, de 33% à 40% en savane humide et en forêt équatoriale. Sur le site sahélien d'Agoufou, cette contribution est négligeable (< 1%). La contribution des feux domestiques est moins importante (11% à Agoufou et de 3 à 7 % pour les autres sites).

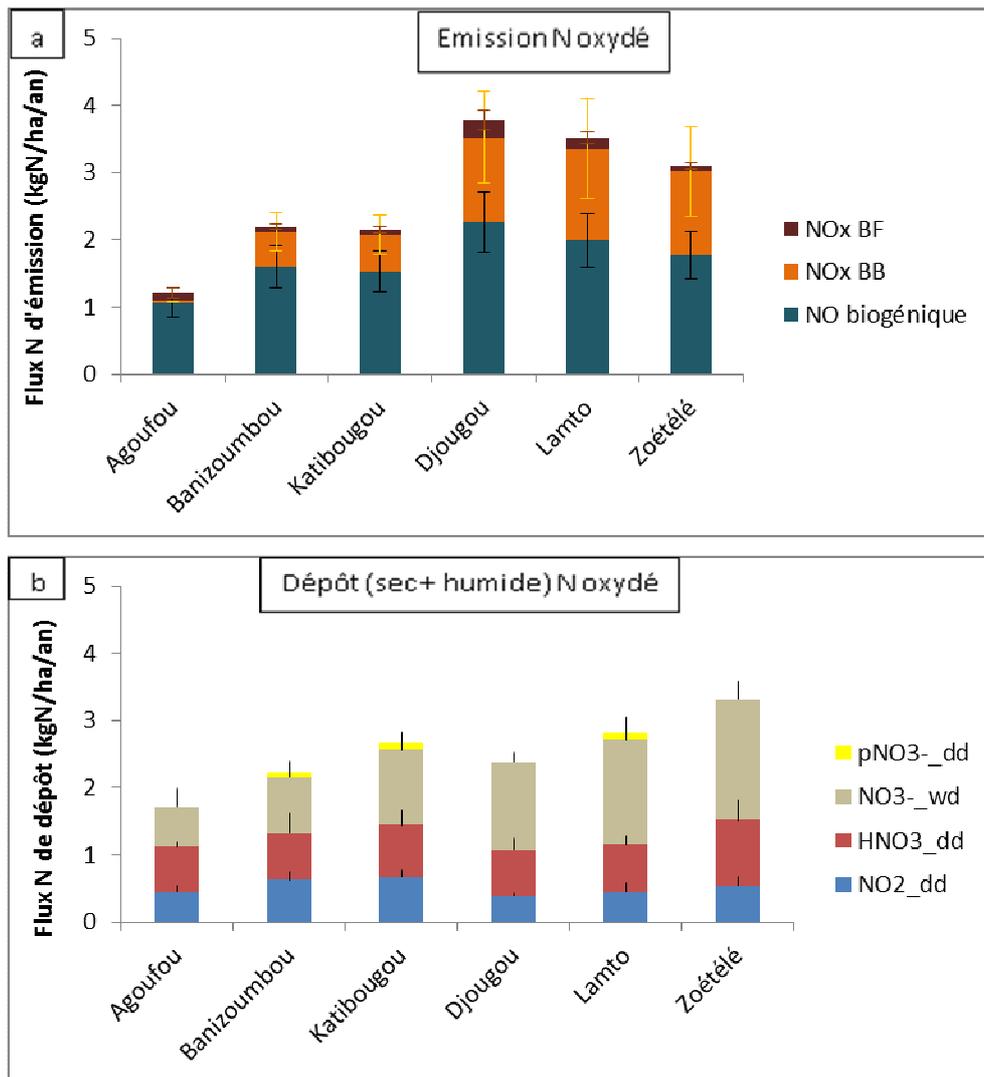


Figure 5.9 : Flux moyens annuels d'émission (a) et de dépôt (b) des composés d'azote oxydés pour les stations IDAF. **BF** : biofuel (feux domestiques) ; **BB** : biomass burning (combustion de biomasse) ; **dd** : dépôt sec ; **wd** : dépôt humide. Les barres d'erreur représentent les incertitudes associées aux flux d'émission (a), et l'écart type des flux de dépôt sur la période d'étude 1998-2007 (b).

5.3.3. Bilan émission-dépôt des composés azotés réduits

Les flux d'émissions de composés azotés réduits considérés sont les émissions de NH_3 par volatilisation, combustion de biomasse et feux domestiques.

Le dépôt sec et humide des espèces azotées sous formes réduites (NH_3 , pNH_4^+ , et NH_4^+) seront référés comme NH_x par la suite. Dans ce bilan, l'émission de NH_3 par les processus microbiens dans le sol n'a pas été prise en compte.

Le calcul de la volatilisation de NH_3 a été brièvement présenté à la section 5.3.1, et plus de détails peuvent être trouvés dans Delon et al. (2010, 2011). L'application de 30% comme taux de volatilisation de NH_3 a conduit aux estimations suivantes : 3,4-7,7 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes

sèches, de l'ordre de $2,4 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en savanes humides et de $1 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en forêt (Zoétélé) (tableau 5.5). L'hypothèse selon laquelle l'émission serait constante au cours de l'année n'est évidemment pas exacte en raison des variations saisonnières dans l'absorption et l'émission dépendant de l'humidité du sol, la vitesse du vent, la qualité des aliments pour le bétail. Par conséquent, l'absence de mesure dans les régions reculées, le manque de données statistiques sur la répartition des bovins et la teneur du sol en azote conduit à de nombreuses hypothèses ; ce qui implique évidemment plusieurs incertitudes dans la détermination de la quantité exacte de NH_x émise. Mais le niveau relatif de volatilisation à partir des excréments d'animaux par rapport à d'autres sources de NH_3 est acceptable, comparé aux émissions à l'échelle globale (Bouwman et al., 1997 ; Galloway and Cowling, 2002).

La figure 5.10 présente la répartition des flux annuels d'émission et de dépôt de NH_x , et les incertitudes associées comme barre d'erreur (pour l'émission). Les valeurs annuelles de ces flux pour chaque station IDAF sont présentées dans le tableau 5.6 (section 5.3.4).

Les flux d'émission de N par NH_3 sont très élevés dans les sites sahéliens d'Agoufou et Banizoumbou ($7,5\text{-}8 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), de même ordre de grandeur ($4 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) dans le site soudano-sahélien de Katibougou et dans les savanes humides (Djougou et Lamto), et très faible dans le site forestier de Zoétélé ($1,4 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Inversement, les flux des composés d'azote sous forme réduite (NH_x) se déposent en quantité plus importante en forêt ($9,3 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) à cause de la densité de la végétation et de la forte pluviométrie (les vitesses de dépôt sont alors plus fortes), et ce dépôt est moindre en savane sahélienne ($4 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Les mesures des concentrations d'ammoniac gazeux (NH_3) par les capteurs passifs montrent des valeurs plus élevées pour les trois sites des savanes sèches (6-7 ppb) par rapport aux sites des savanes humides et forêts où elles sont de même ordre de grandeur (4 ppb). Ce résultat est en accord avec les valeurs des émissions modélisées.

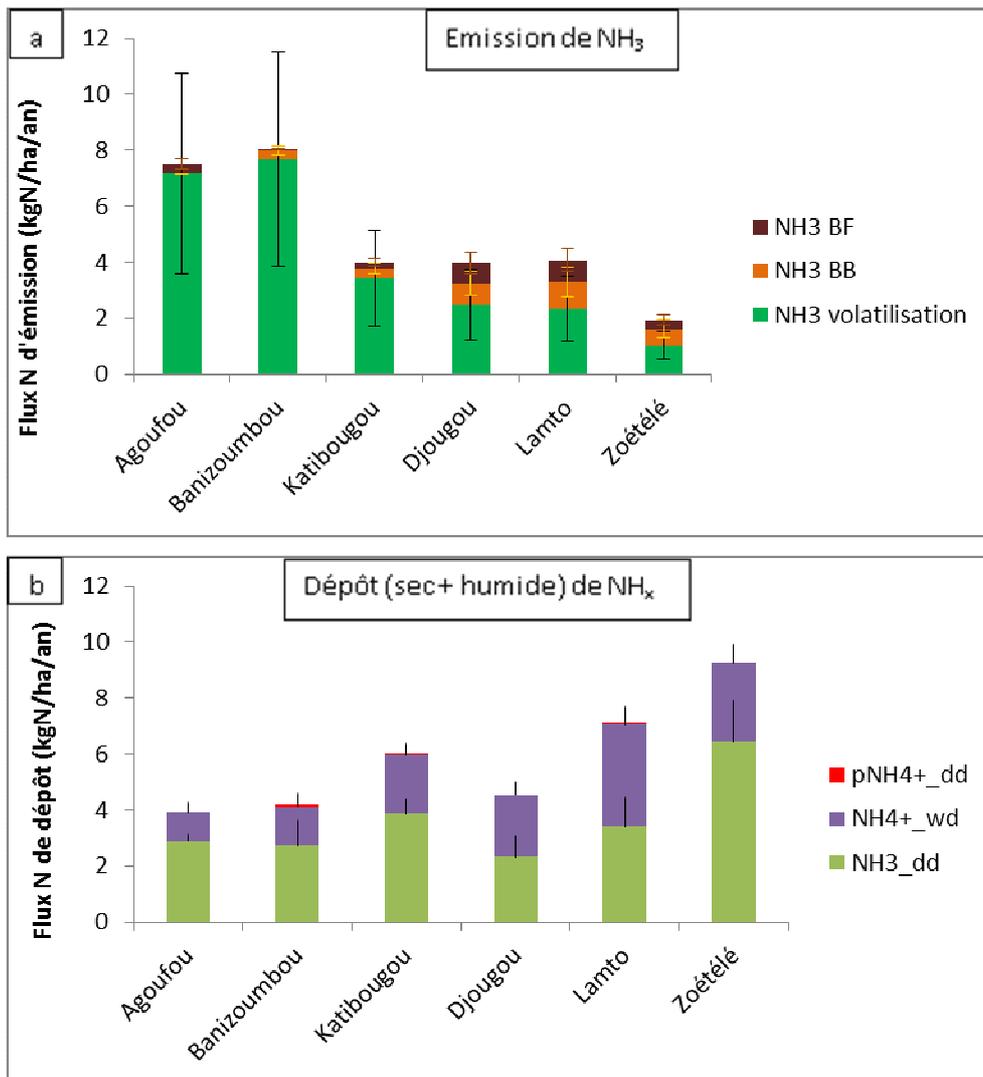


Figure 5.10 : Flux moyens annuels d'émission (a) et de dépôt (b) des composés d'azote réduits (NH_x) pour les stations IDAF. **BF** :feux domestiques ; **BB** :combustion de biomasse ; **dd** : dépôt sec ; **wd** : dépôt humide. Les barres d'erreur représentent les incertitudes associées aux flux d'émission (a), et l'écart type des flux de dépôt sur la période d'étude 1998-2007 (b).

L'émission de NH₃ est largement dominée par les flux de volatilisation et représente entre 86 et 96% du total en savanes sèches, entre 57 et 62% en savanes humides et 53% en forêts. La contribution des combustions de biomasse à l'émission totale de NH₃ est de l'ordre de 31% en forêt (Zoétélé), de 20-24% en savanes humides, et de 4-8% en savanes sèches (0% à Agoufou). La contribution des feux domestiques est de 1 à 6% en savanes sèches et de 16 à 19% en savanes humides et en forêts. Dans les écosystèmes de savanes humides et de forêts d'Afrique tropicale, les feux domestiques constituent une source, non négligeable, d'ammoniac.

5.3.4. Bilan annuel émission-dépôt des composés azotés

Le tableau 5.6 présente le bilan total d'émission et de dépôt d'azote atmosphérique incluant les formes oxydées et réduites pour chaque site d'étude. Un taux d'incertitude de 30% est appliqué aux flux de dépôt et de 45% aux flux d'émission.

Tableau 5.6 : Flux moyens annuels d'émissions et de dépôts et les incertitudes associées (en kgN.ha⁻¹.an⁻¹) des composés azotés oxydés et réduits dans les stations IDAF sur la période d'étude (1998-2007 pour le dépôt, et 2002-2006 pour l'émission).

Flux (kgN/ha/an)	N oxydé		N réduit		Bilan de N (total)	
	Dépôt N _{ox} *	Emission N-ox *	Dépôt NH _x	Emission NH _x	Dépôt total	Emission totale
Agoufou	1,7 ±0,5	1,2 ±0,5	3,9 ±1,2	7,5 ±3,4	5,6 ±1,7	8,7 ±3,9
Banizoumbou	2,2 ±0,7	2,2 ±1,0	4,2 ±1,3	8,0 ±3,6	6,4 ±1,9	10,2 ±4,6
Katibougou	2,7 ±0,8	2,1 ±1,0	6,0 ±1,8	4,0 ±1,8	8,7 ±2,6	6,1 ±2,8
Savane sèche (moyenne)	2,2 ±0,7	1,8 ±0,8	4,7 ±1,4	6,5 ±2,9	6,9 ±2,1	8,4 ±3,8
Djougou	2,4 ±0,7	3,8 ±1,7	4,5 ±1,4	4,0 ±1,8	7,0 ±2,1	7,8 ±3,5
Lamto	2,8 ±0,8	3,5 ±1,6	7,1 ±2,1	4,1 ±1,8	9,9 ±3,0	7,6 ±3,4
Savane humide (moyenne)	2,6 ±0,8	3,7 ±1,6	5,8 ±1,8	4,0 ±1,8	8,4 ±2,5	7,7 ±3,5
Zoétéélé (Forêt)	3,3 ±1,0	3,1 ±1,4	9,3 ±2,8	1,9 ±0,9	12,6 ±3,8	5,0 ±2,3

* N_{ox} : composés d'azote (N) oxydés

Sur le transect des écosystèmes, la forme oxydée du dépôt d'azote varie de 1,7 à 3,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ tandis que la forme réduite est comprise entre 3,9 et 9,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. Pour chaque site (et chaque écosystème), l'azote se dépose en quantité 2 fois plus importante sous forme réduite (NH_x) que sous forme oxydée (N_{ox}). La contribution des composés oxydés au dépôt total représente 26-35% sur l'ensemble des écosystèmes, et celle des composés réduits 65-74%.

En savane sèche, l'azote est émis majoritairement sous forme réduite (NH_x ou NH₃), qui représente 65-86% de l'émission totale, tandis qu'en forêt l'émission d'azote est dominée par les composés oxydés (environ 61%). En savane humide, la contribution de NH₃ à l'émission totale d'azote (51-54%,) est proche de la contribution des composés oxydés (46-49%).

En savanes sèches, le flux moyen annuel d'azote est estimé entre 6,1 et 10,2 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ pour l'émission totale et entre 5,6 et 8,7 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ pour le dépôt total. Les flux d'émission sont plus importants pour les sites sahéliens d'Agoufou et de Banizoumbou à cause de l'émission prépondérante de l'ammoniac par volatilisation dans ces zones

agropastorales. Le dépôt d'azote est plus important dans le site soudano-sahélien de Katibougou en raison du caractère moins sec de sa végétation et de son climat par rapport aux deux autres sites. Pour l'écosystème type savane sèche, le flux moyen d'azote estimé est de $6,9 \pm 2,1 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour le dépôt total, et de $8,4 \pm 3,8 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour l'émission totale. Ces flux sont comparables à ceux rapportés par Delon et al. (2010) pour le bilan d'azote de l'écosystème sahélien réalisé pour l'année 2006 ($7,5 \pm 1,8 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour le dépôt total, et $8,4 \pm 3,8 - 12,5 \pm 5,9 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour l'émission totale).

En savanes humides, le flux moyen d'émission totale d'azote est de l'ordre de $7,7 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ et le flux de dépôt est estimé entre $7,0$ et $10 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. L'azote se dépose en quantité plus importante dans la savane humide guinéenne (ou pré forestière) de Lamto car sa végétation est plus dense et plus humide, et sa pluviométrie répartie sur toute l'année favorise un dépôt humide important. Pour l'écosystème type savane humide, le flux moyen annuel de dépôt total d'azote est estimé à $8,4 \pm 2,5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, du même ordre de grandeur que le flux d'émission totale ($7,7 \pm 3,5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

Dans l'écosystème forestier de Zoétéélé, le flux moyen annuel de dépôt ($\sim 13 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) est plus de deux fois plus élevé que le flux d'émission d'azote ($5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), l'émission de NH_3 étant faible. L'écosystème forêt constitue un puits pour NH_3 plutôt qu'une source en raison du caractère très humide de sa végétation et de son climat. De plus, les forêts tropicales africaines sont bordées au nord et au sud par les savanes, et les émissions d'azote réactif (N_r) par les combustions de biomasse sont transportées, de l'hémisphère Nord ou de l'hémisphère Sud selon les saisons, vers l'équateur et déposées dans les forêts (Chen et al., 2010), d'où le flux de dépôt plus important que le flux d'émission d'azote.

Avant de conclure ce chapitre du bilan de l'azote, nous avons comparé les flux de dépôt d'azote, estimés dans le cadre du programme IDAF, aux flux simulés par les modèles globaux à l'échelle de la terre dans Dentener et al. (2006). Dans le but d'essayer d'appréhender l'impact de ce dépôt sur les écosystèmes nous avons comparé le dépôt total d'azote estimé dans les écosystèmes tropicaux d'Afrique de l'Ouest et Centrale aux valeurs de charges critiques d'eutrophisation existantes dans la littérature.

5.4. Comparaison des flux de dépôt d'azote : mesures IDAF, modèles globaux

5.4.1. Mesures IDAF et multi modèle global de Dentener et al. (2006)

Dentener et al. (2006) ont utilisé 23 modèles globaux de transport de chimie atmosphérique, dans une approche multi modèle, pour calculer le dépôt d'azote réactif (NO_y , NH_x) et de sulfate (SO_x) sur les surfaces de la terre et des océans. Ces flux ont été estimés pour l'année 2000 et un scénario pour l'an 2030 est proposé. Les composés azotés oxydés, dénommés NO_y , regroupent NO , NO_2 , HNO_3 , HNO_4 , NO_3^- , $2\text{N}_2\text{O}_5$, PAN, nitrates organiques. Les composés azotés réduits, NH_x , regroupent NH_3 et NH_4^+ . Les émissions globales annuelles anthropogéniques (incluant la combustion de biomasse) et naturelles de NO_x , NH_3 , SO_2 , CO_2 et NMVOC ont été utilisées dans les modèles pour les simulations des flux de dépôt, et pour différents scénarios.

La capacité des modèles à représenter les dépôts totaux d'azote et de soufre a été évaluée. Les différentes simulations du dépôt (sec + humide) ont été confrontées aux mesures des différents réseaux internationaux (en Asie de l'Est(EANET), Amérique du Nord (NADP), Europe (EMEP), Afrique (IDAF), ...). Une simulation moyenne du dépôt de N par les 23 modèles est utilisée comme référence à l'échelle globale. Ces travaux de modélisation du dépôt total d'azote ($\text{NO}_y + \text{NH}_x$) à l'échelle globale (Dentener et al., 2006), ont été récemment utilisés dans plusieurs études comme une référence (Galloway et al., 2008 ; Bobbink et al., 2010 ; Bleeker et al., 2010 ;...).

Dentener et al. (2006) ont rapporté que des quantités importantes sous forme de NO_y et NH_x sont déposées sur des végétations naturelles (non agricoles), typiquement entre 50 et 80%, indiquant l'importance du transport dans la dispersion des polluants atmosphériques provenant des émissions des zones industrielles et agricoles autour des écosystèmes naturels. Ces flux de dépôt continental modélisés peuvent être comparés aux flux d'azote estimés dans les écosystèmes d'Afrique de l'Ouest et Centrale dans le cadre du programme IDAF. Ainsi, nous avons collaboré avec F. Dentener afin de comparer et de discuter des résultats de modélisation avec les résultats IDAF des flux de dépôt d'azote à l'échelle du continent africain.

La figure 5.11 (a,b,c) présente un zoom sur l'Afrique de la simulation numérique moyenne du dépôt annuel d'azote sous forme oxydée (NO_y) (Dentener et al., 2006), comparée aux flux estimés dans le cadre du programme IDAF pour le continent africain.

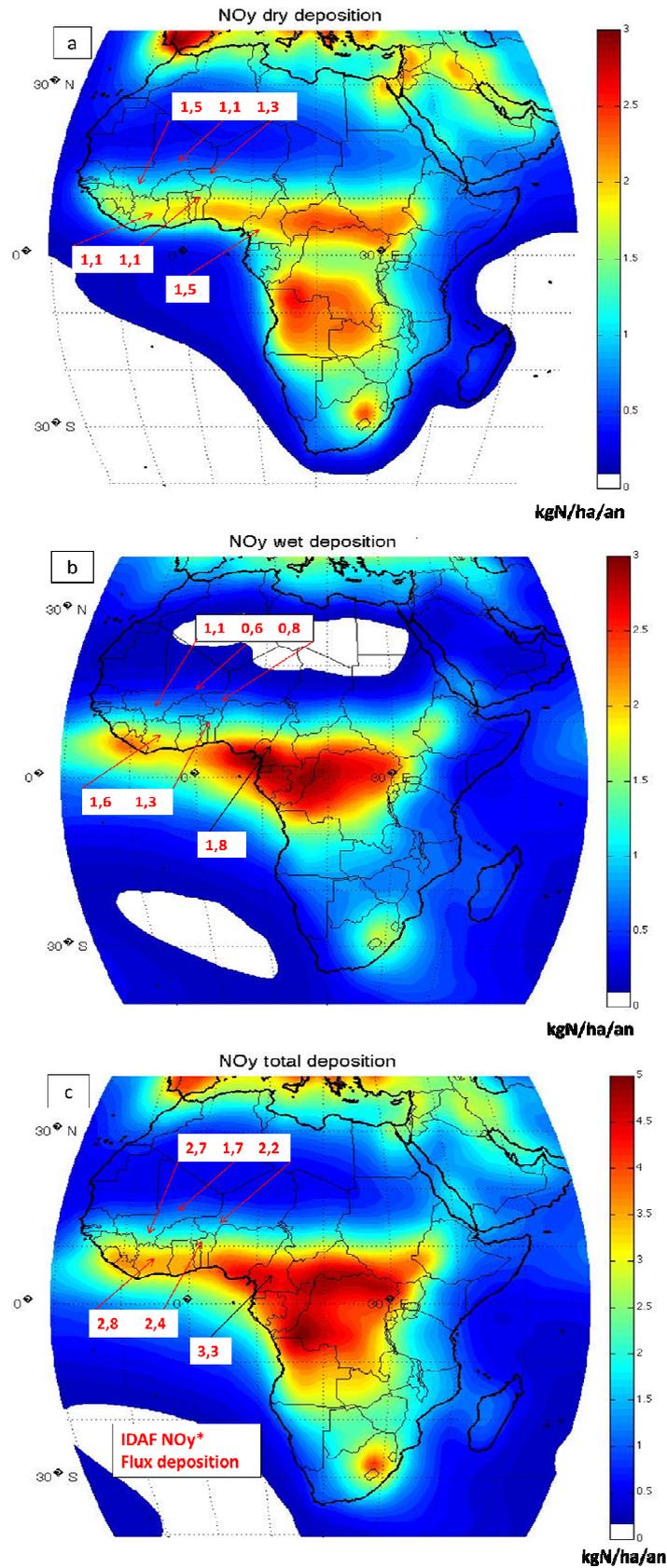


Figure 5.11 : Simulation du dépôt annuel d'azote sous formes oxydée (NO_y), à l'échelle globale pour l'année 2000 (Dentener et al., 2006), comparée aux observations IDAF (1998-2007) pour le continent africain. (a) NO_y dépôt sec, (b) NO_y dépôt humide, (c) NO_y dépôt total d'azote sous forme réduite. L'unité en kgN/ha/an est modifiée de l'unité originale (mgN/m²/an). NO_y*=NO₂+HNO₃+NO₃⁻.

Nous rappelons que pour les mesures IDAF, le dépôt d'azote sous forme oxydée (NO_y), inclut les espèces NO_2 , HNO_3 , NO_3^- .

Pour le dépôt sec de NO_y (figure 5.11a), nous remarquons que le flux estimé en régions sahéliennes du Mali et du Niger par l'approche multi-modèle ($0,5-1 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) est légèrement plus faible, comparé à la valeur estimée dans le cadre du programme IDAF ($1,1-1,5 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). Le modèle prédit des valeurs plus élevées pour les savanes humides de Côte d'Ivoire et du Bénin ($1,5-2 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) et pour la zone forestière du Cameroun ($\approx 2 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). Dans le cadre du programme IDAF, le flux NO_y estimé est de l'ordre de $1,1 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes humides et de $1,5 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en forêt.

Pour le dépôt humide de NO_y (figure 5.11b), les flux estimés par les deux approches (multi-modèle, et cette étude) sont de même ordre de grandeur pour les savanes sèches ($0,5-1 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) du Mali et du Niger, et pour les savanes humides ($1-2 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) de Côte d'Ivoire et du Bénin. Cependant pour la zone forestière du Cameroun, nous remarquons que le dépôt humide de NO_y estimé par l'approche multi modèle global ($2,5-3 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) est supérieur à celui estimé dans notre étude ($1,8 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$).

Ainsi pour le dépôt d'azote sous forme oxydée (figure 5.11c), nous notons que de façon générale, le flux total annuel estimé à l'échelle globale par la modélisation de l'ordre de $1-2 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en régions sahéliennes, de $3-3,5 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en savanes humides et de $4-5 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans l'écosystème forestier de Cameroun est en accord avec l'ordre de grandeur mesuré, dans le cadre du réseau IDAF.

Les valeurs un peu plus élevées des flux de dépôt de NO_y estimés dans les écosystèmes de savanes humides et de forêts par l'approche multi modèle global pourraient s'expliquer par la prise en compte de plusieurs composés azotés oxydés dans les modèles globaux par rapport à notre étude qui n'inclut que les espèces NO_2 , HNO_3 et NO_3^- . Toutefois, nous signalons que pour les écosystèmes d'Afrique de l'Ouest et Centrale, seule une fraction de 60 à 80% des flux estimés par l'approche multi modèle serait tombée sur les végétations naturelles (Dentener et al., 2006). Cependant pour les savanes sèches et arides, nous pensons que les émissions biogéniques de NO par les sols seraient un peu sous estimées dans ces modèles (Jaeglé et al. 2004). Nous notons, que la non-prise en compte des composés organiques azotés (par exemple, le PAN) dans notre bilan de dépôt d'azote n'influence pas significativement l'ordre de grandeur du dépôt total d'azote sous forme oxydée dans les écosystèmes africains.

Pour le dépôt d'azote sous forme réduite, la figure 5.12 (a,b,c) présente le zoom sur l'Afrique de la simulation numérique moyenne du dépôt annuel d'azote sous forme NH_x (Dentener et al., 2006), comparée aux flux estimés dans le cadre du programme IDAF pour le continent africain.

Nous remarquons à la figure 5.12a que le flux de dépôt sec de NH_3 estimé dans le cadre du programme IDAF pour les écosystèmes savanes sèches ($2,7-3,9 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) et forêt ($6,4 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) est 2 à 3 fois supérieur que celui simulé par l'approche multi modèle de Dentener et al. (2006) ($1-1,5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour la zone sahélienne de Mali et Niger, $\approx 2 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour la forêt équatoriale du Cameroun). Nous pensons que cette différence entre les flux de dépôt sec de NH_3 estimés dans le cadre du programme IDAF et l'approche multi modèle de Dentener et al (2006) serait principalement due à la sous-estimation de la source de combustion de biomasse en savanes humides et forêts, et de la source agro pastorale en zone sahélienne dans les modèles.

Pour le dépôt humide de NH_x ou NH_4^+ (figure 5.12b), les flux simulés par les deux approches (multi modèle et cette étude) sont de même ordre de grandeur en savanes sèches ($1-2 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), en savane humide de Djougou ($2 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) et en zone forestière ($3-3,5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) du Cameroun. Pour la savane humide de Lamto (Côte d'Ivoire), le flux de dépôt sec de NH_x estimé dans notre étude est de l'ordre de $3,6 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, plus élevé comparé au flux simulé à l'échelle globale ($2 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) par l'approche multi-modèle de Dentener et al. (2006).

Ainsi pour le dépôt d'azote sous forme réduite (NH_x) (figure 5.12c), le flux total moyen annuel du multi modèle global sur le continent africain ($1-3 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en régions sahéliennes, $3-4 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en savanes humides et $4-5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ en forêts équatoriales) est sous-estimé d'un facteur de 2 ou 3 des dépôts estimés à partir des mesures IDAF ($4-6 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$; $4,5-7 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$; $9,5 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ respectivement pour les écosystèmes de savanes sèches, savanes humides et forêts). Nous pensons que cette différence peut être reliée aux inventaires globaux d'émissions d'ammoniac (Bouwman et al. 2002a) utilisés dans ces modèles. L'émission de NH_3 n'est pas bien représentée dans les modèles globaux (Potter et al., 2010). Ceci met en évidence l'importance des mesures des composés azotés dans les sites reculés, comme ceux du réseau IDAF, pour valider ou améliorer les modèles globaux.

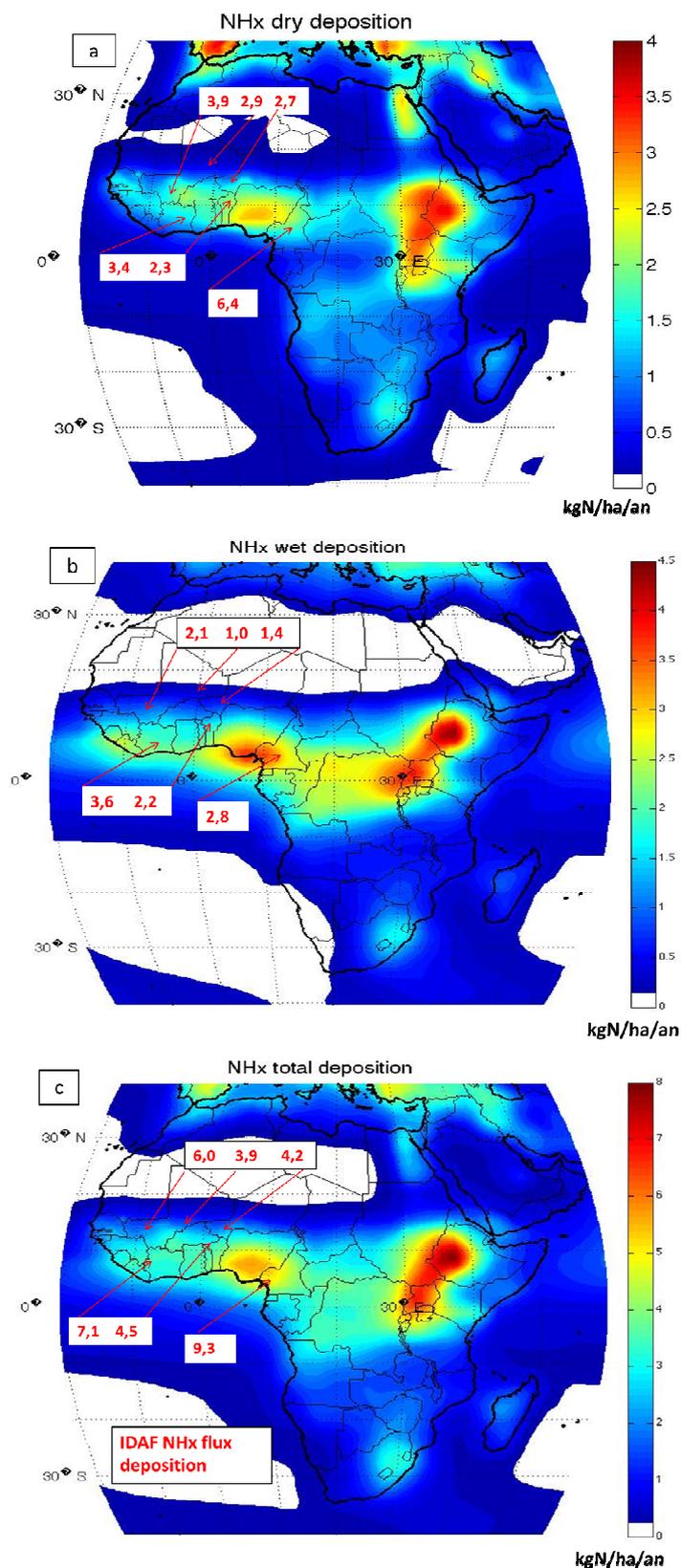


Figure 5.12 : Simulation du dépôt annuel d'azote sous formes réduite (NH_x) à l'échelle globale pour l'année 2000 (Dentener et al., 2006), comparée aux observations IDAF (1998-2007) pour le continent africain. (a) NH_x dépôt sec, (b) NH_x dépôt humide, (c) NH_x dépôt total d'azote sous forme réduite. L'unité en kgN/ha/an est modifiée de l'unité originale ($\text{mgN/m}^2/\text{an}$).

La figure 5.13 présente la simulation numérique moyenne à l'échelle globale du dépôt total d'azote (Dentener et al., 2006), comparée aux flux moyens annuels estimés dans le cadre du programme IDAF pour le continent africain.

Le dépôt total annuel d'azote réactif estimé à partir des émissions globales totales de N (NO_y et NH_x) par modélisation est de l'ordre de 2-4 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en régions sahéliennes, 6-8 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en régions guinéennes et soudanaises (savanes humides), et 8-10 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en régions équatoriales (forêts) de l'Afrique de l'Ouest et Centrale.

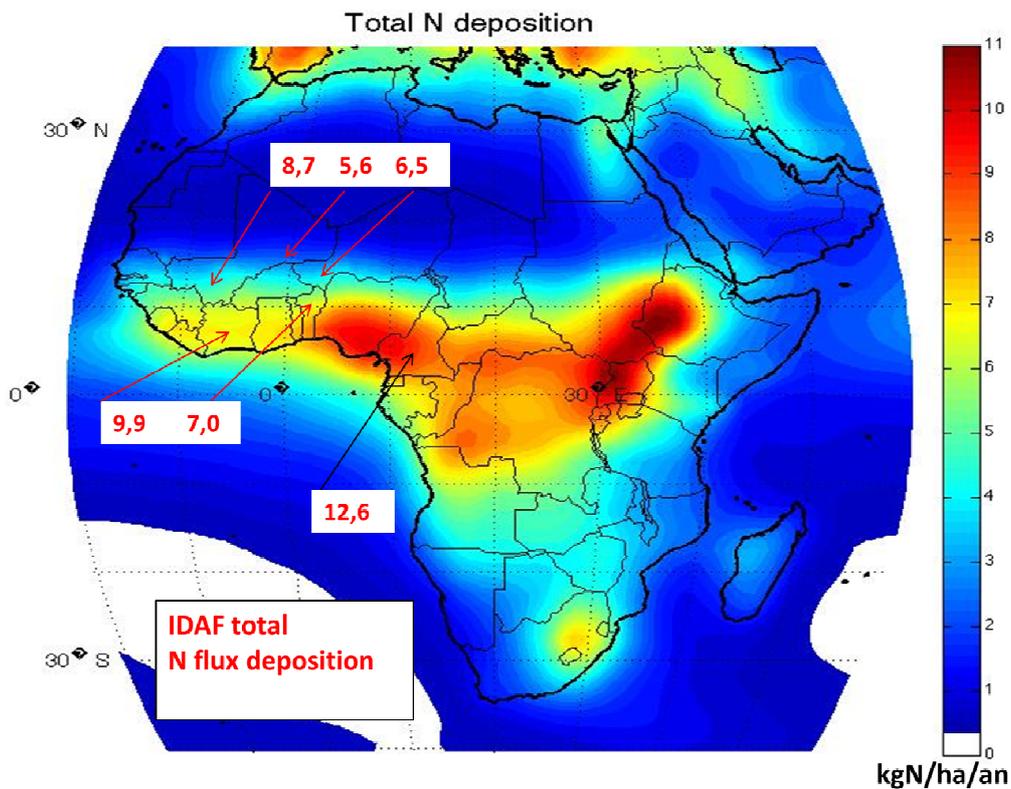
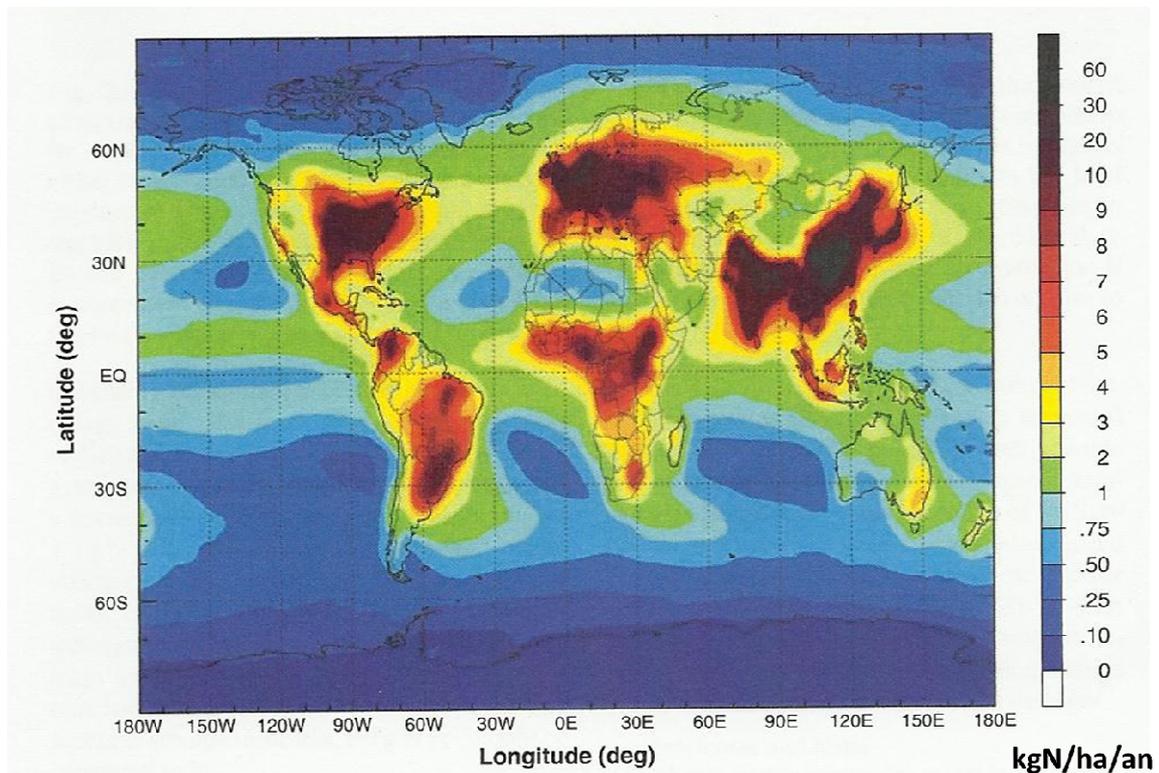


Figure 5.13 : Simulation du dépôt total annuel d'azote à l'échelle globale pour l'année 2000 (Dentener et al., 2006), comparée aux observations IDAF (1998-2007) pour le continent africain.

Pour la zone sahélienne, le dépôt total d'azote est sous-estimé d'un facteur de 2 par la simulation moyenne des modèles globaux, comparé au flux total estimé en savanes sèches ($6-9 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) dans le cadre du programme IDAF. Cette différence pourrait être reliée à la sous-estimation des fortes émissions biogéniques de NO par les sols secs du Sahel (« pulses »), et des quantités prépondérantes d'émissions de NH_3 dans ces zones agropastorales. Pour les écosystèmes de savanes humides et forêts, le dépôt total d'azote estimé par les modèles globaux demeure faible par rapport aux flux de dépôt estimés à partir

des mesures IDAF ($7-10 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, $13 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ respectivement en savanes humides et en forêt (Zoétélé)). Toutefois, l'écart entre les deux estimations reste moindre pour les écosystèmes de savanes humides et forêts.

La figure 5.14 présente les résultats des simulations numériques moyennes à l'échelle globale du dépôt total d'azote (Dentener et al., 2006) pour tous les continents.



Figures 5.14 : Simulation du dépôt total annuel d'azote à l'échelle globale pour l'année 2000 (Dentener et al., 2006) pour tous les continents. L'unité en $\text{kgN}/\text{ha}/\text{an}$ est modifiée de l'unité originale ($\text{mgN}/\text{m}^2/\text{an}$). (Source : Galloway et al., 2008).

L'analyse de ces résultats montre qu'à l'échelle globale, les régions de forte amplitude de dépôt total d'azote se trouvent en Amérique du Nord, en Europe, en Inde et en Asie de l'Est où le flux de dépôt de N peut atteindre des valeurs supérieures à $20 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ dans certaines zones industrialisées. Pour l'Afrique et l'Amérique du Sud, les quantités totales d'azote déposées sont comparables. Dentener et al. (2006) ont indiqué qu'à l'échelle globale, environ 42% de tout NO_y et 40% de tout NH_x sont déposées sur des végétations naturelles. De façon générale, la comparaison des flux de dépôt d'azote simulé en Afrique à ceux des autres continents montre que le dépôt d'azote est aussi important sur le continent africain, particulièrement dans ses écosystèmes.

Dans cette section, nous avons comparé les valeurs moyennes des flux de dépôt d'azote estimés sur la période 1998-2007 dans le cadre du programme IDAF aux flux estimés à l'échelle globale pour l'année 2000 par modélisation (sur le continent africain). Nous signalons que par différents scénarios d'émissions, Dentener et al. (2006) ont prédit une augmentation des flux de dépôt de NO_y et NH_x pouvant atteindre un taux de 50 ou 100% à l'an 2030 en Asie et en Afrique (les pays en voie de développement). Toutefois, sur notre période d'étude, nous avons noté des variations interannuelles des flux de dépôt pouvant atteindre parfois 40% mais sans observer de tendance significative. Les sites de mesures du réseau IDAF restent peu influencés par les émissions industrielles ou anthropiques (à l'exception du site Amersfoort de l'Afrique du Sud).

5.4.2. Dépôt total d'azote dans les écosystèmes africains et charges critiques d'eutrophisation

Pour évaluer les effets probables du dépôt d'azote sur les écosystèmes africains, nous avons comparé les flux estimés dans cette étude aux seuils critiques d'eutrophisation disponibles dans la littérature. L'eutrophisation des milieux terrestres est généralement déclenchée par des apports excédentaires d'azote et par son accumulation dans l'écosystème. Le rôle de l'azote (N) dans les changements de la biodiversité a été largement étudié en Europe et en Amérique du Nord, avec la plupart des recherches portant sur les changements dans la composition et la diversité des espèces végétales (Goulding et al., 1997 ; Haddad et al., 2000 ; Bobbink et al., 2010).

La vulnérabilité des écosystèmes est établie en termes de « charges critiques » : charge critique azotée (eutrophisation) et charge critique d'acidité (acidification). Cette vulnérabilité est fonction des caractéristiques du sol, de la végétation et du climat. Les concepts de charge critique de N peuvent être basés sur une approche de calculs et de modèles (Spranger et al., 2008, Bobbink et al., 2010) ou sur une approche expérimentale appuyée par des mesures et des observations à long terme sur le terrain (charges critiques empiriques) (Bobbink et al., 1996, 2003). Comme une première approximation d'exprimer la vulnérabilité des différents écosystèmes à l'échelle globale, certains auteurs (Dentener et al., 2006 ; Bleeker et al., 2010) ont utilisé un seuil de dépôt d'azote de $10 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, basé sur les charges critiques disponibles principalement dans les écosystèmes tempérés de l'Europe (Bobbink et al., 1998). Les travaux récents de Bobbink et al. (2010) ont montré que cette charge critique peut varier considérablement de 5 à $30 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, notamment sur des écosystèmes tropicaux.

Afin d'estimer les charges critiques d'eutrophisation (et d'acidification) des écosystèmes à l'échelle globale, Bouwman et al. (2002b) ont extrapolé des données des études européennes aux différents écosystèmes dans une variété de conditions climatiques et pédologiques. Cette carte à l'échelle globale est la seule disponible dans la littérature. Elle est fondée sur un grand nombre d'hypothèses et des incertitudes dans les charges critiques qui ont été exprimées en supposant de larges gammes de leurs valeurs.

La figure 5.15 présente la distribution globale des estimations des charges critiques moyennes d'eutrophisation selon Bouwman et al. (2002b). Nous y avons superposé les flux de dépôt total d'azote estimés dans les écosystèmes africains à partir des mesures IDAF (l'unité d'origine $\text{meq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ est convertie en $\text{kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

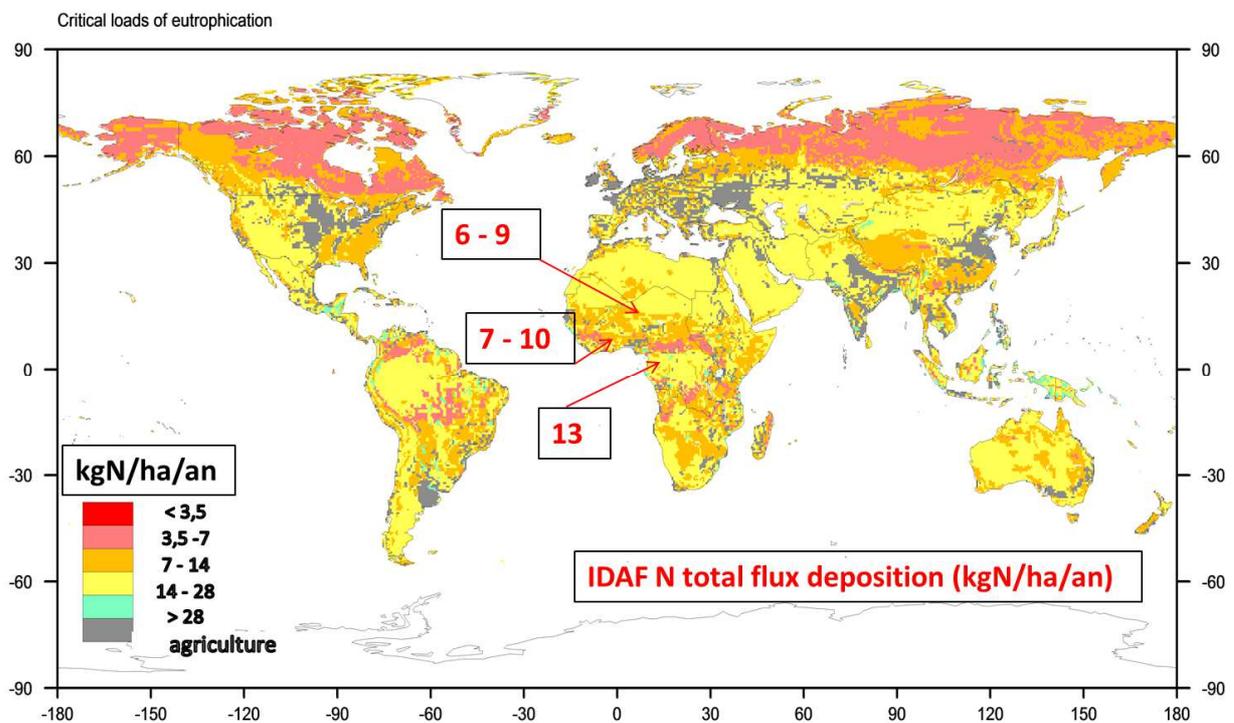


Figure 5.15 : Distribution globale des charges critiques moyennes d'eutrophisation (d'après Bouwman et al., 2002b), et flux de dépôt total d'azote estimé dans les écosystèmes africains à partir des mesures IDAF. (L'unité d'origine $\text{meq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ a été convertie en $\text{kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

Nous remarquons que la gamme de charge critique d'eutrophisation est de l'ordre de 7-14 $\text{kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour les domaines de savanes et de l'ordre de 14-28 $\text{kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour la forêt équatoriale (figure 5.15). Le seuil d'eutrophisation (7 $\text{kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) serait donc atteint dans les écosystèmes de savanes (sèches et humides) d'Afrique de l'Ouest où nous avons estimé un dépôt total d'azote de l'ordre de 6-10 $\text{kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. L'excès de charge pour un écosystème

donné est déterminé par la différence entre charges critiques et charges réelles (ou dépôt total de N dans le cas d'eutrophisation). Ainsi pour les écosystèmes de savanes sèches et humides d'Afrique de l'Ouest, nous évaluons un excès de charge d'eutrophisation de l'ordre de 2-3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, selon les estimations de Bouwman et al. (2002b).

Pour l'écosystème forêt tropicale, le seuil d'eutrophisation (14 kgN.ha⁻¹.an⁻¹) serait presque atteint à Zoétélé où le dépôt total d'azote estimé est de l'ordre de 13 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. Toutefois, si un seuil de 10 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ est supposé comme charge critique d'eutrophisation (comme dans certaines études : Dentener et al., 2006 ; Bleeker et al., 2010), nous évaluons un excès de 3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ pour la forêt équatoriale. Cependant, Bouwman et al. (2002b) ont indiqué que la sensibilité des forêts tropicales humides à l'eutrophisation est supposée faible, avec une gamme de charge critique de 20-30 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. En effet, plusieurs forêts humides sont limitées par le phosphore (P) (Bouwman et al., 1993 ; Vitousek et al., 1997) et non par l'azote (N).

Pour les systèmes tropicaux, il est actuellement difficile d'établir de réelle charge critique, mais Bobbink et al. (2010) ont affirmé qu'un dépôt d'azote supérieur de 20-30 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ peut potentiellement affecter sérieusement les écosystèmes de ces régions. Bouwman et al. (2002b) ont souligné que de nombreuses hypothèses existent dans l'estimation des charges critiques de N pour les tropiques. Il y a donc encore plusieurs incertitudes sur les vulnérabilités des écosystèmes tropicaux secs, incluant les savanes, les écosystèmes semi-arides, ... D'autres études supplémentaires avec des observations et des expérimentations sur le terrain sont nécessaires pour estimer les charges critiques d'eutrophisation afin d'évaluer l'impact du dépôt d'azote dans les écosystèmes tropicaux.

5.5. Conclusion

L'analyse de la base de données IDAF, avec ses trois composantes (chimie des pluies, des aérosols et des gaz), a permis d'établir un premier bilan d'azote à l'échelle des écosystèmes africains. Ce bilan d'azote inorganique est une composante importante du cycle de l'azote.

Un bilan de dépôt (sec et humide) d'azote a été réalisé sur la période d'étude 1998-2007 pour les sites IDAF d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Le dépôt sec d'azote sous forme gazeuse (NO₂, HNO₃, NH₃) varie de 3,4 à 5,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savanes (sèches et humides), et est de l'ordre de 8 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en forêts. Le flux moyen annuel de dépôt sec d'azote sous

forme particulaire est estimé à 0,1-0,2 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ pour les écosystèmes de savanes, très faible comparé au dépôt sec sous forme gazeuse. Le dépôt humide d'azote estimé à partir des concentrations moyennes d'ammonium (NH₄⁺) et de nitrate (NO₃⁻) dans les pluies, et de la pluviométrie moyenne sur la même période de mesure, présente des valeurs moyennes annuelles comprises entre 1,6 et 3,2 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savanes sèches, entre 3,5 et 5,2 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savanes humides et est de l'ordre de 4,6 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en forêts. Le dépôt humide d'azote est dominé en Afrique de l'Ouest et Centrale, par un dépôt sous forme réduite d'ammonium qui représente environ 62 à 70% du total.

A l'échelle des différents écosystèmes africains, le dépôt total d'azote (sec + humide) présente un gradient positif sur le transect : 6-9 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savanes sèches, 7-10 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savane humides, et 13 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en forêts. Sur l'ensemble des écosystèmes, la contribution relative du dépôt sec sous forme gazeuse au dépôt total d'azote représente entre 46 et 71%, celle du dépôt humide entre 29 et 52%, et celle du dépôt sec sous forme particulaire est négligeable (2%). Ce bilan met en évidence l'importance des processus de dépôt sec pour les espèces gazeuses azotées. Le dépôt total sous forme réduite représente 65-74% du total dans les principaux écosystèmes africains.

Nous avons réalisé un bilan émission-dépôt des composés azotés oxydés et réduits à l'échelle de chaque écosystème sur la période 2002-2006. Le flux moyen d'émission totale est estimé à 8,4 ±3,8 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savanes sèches, à 7,7 ±3,5 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en savanes humides, et à 5,0 ±2,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ en forêt. Le flux d'émission totale est de même ordre de grandeur que le dépôt moyen annuel d'azote dans les écosystèmes de savanes (sèches et humides) mais plus faible dans l'écosystème forestier, qui constitue plutôt un puits d'azote.

Enfin, nous avons conclu ce chapitre par une analyse comparative entre les mesures IDAF de dépôt d'azote et les résultats de modélisation globale de Dentener et al. (2006). La comparaison des valeurs moyennes des flux de dépôt d'azote estimés dans le cadre du programme IDAF avec ceux estimés à l'échelle globale par modélisation (Dentener et al., 2006) pour le continent africain a permis de montrer que :

- pour la zone sahélienne, le dépôt total d'azote est sous-estimé d'un facteur de 2 par l'approche multi modèle global ;
- pour les écosystèmes de savanes humides et forêts, le modèle sous-estime le dépôt total d'azote avec un écart moindre comparé aux mesures IDAF ;
- le dépôt total d'azote mesuré sur le continent africain est comparable aux ordres de grandeur simulés dans les pays en zones tempérés et industrialisés.

Ceci met en évidence l'importance des mesures des composés azotés dans les sites reculés, comme ceux du réseau IDAF, pour valider ou améliorer les modèles globaux. On peut aussi souligner l'importance dans le futur de mieux quantifier les émissions de composés azotés gazeux comme par exemple la source de NH_3 animale.

En comparant les flux de dépôt d'azote estimés dans notre étude (cadre IDAF) nous évaluons un excès de charge d'eutrophisation de 2-3 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les écosystèmes de savanes sèches et humides d'Afrique de l'Ouest, selon les estimations de « charges critiques d'eutrophisation » de Bouwman et al. (2002b). Pour l'écosystème forêt, nous évaluons un excès de charge de 3 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Finalement, nous avons tenté une première évaluation de l'impact potentiel du dépôt total d'azote sur les écosystèmes africains.