



DACCIWA

Dynamics-aerosol-chemistry-cloud
interactions in West Africa



Conclusions du
projet **DACCIWA**
à l'intention des
décideurs



financé par la
Commission européenne



Remerciements

La recherche qui a abouti aux résultats présentés dans ce document a été financée par le 7^{ème} programme-cadre de l'Union européenne (7^e PC / 2007-2013) au titre de la convention de subvention no. 603502 (Projet UE DACCIWA: Interactions dynamique-aérosol-chimie-nuage en Afrique de l'Ouest).

Cite as

Evans, M. J., et al., 2018: Policy-relevant findings of the DACCIWA project. doi:10.5281/zenodo.1476843

Contact

Pour plus de détails sur le projet, veuillez contacter:
Peter Knippertz
Institut de technologie de Karlsruhe
Institut de météorologie et de recherche sur le climat
Institut de technologie de Karlsruhe
76131 Karlsruhe, Allemagne
peter.knippertz@kit.edu



financé par l'Union européenne.



Auteurs

Mat J. Evans (University of York, York, UK)

Peter Knippertz (Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany)

Aristide Akpo (University of Abomey-Calavi, Cotonou, Benin)

Richard P. Allan (University of Reading, Reading, UK)

Leonard Amekudzi (Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana)

Barbara Brooks (University of Leeds / National Centre for Atmospheric Science, Leeds, UK)

J. Christine Chiu (University of Reading, Reading, UK / Colorado State University, Fort Collins, USA)

Hugh Coe (University of Manchester, Manchester, UK)

Andreas H. Fink (Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany)

Cyrille Flamant (Sorbonne University / CNRS, Paris, France)

Oluwagbemiga O. Jegede (Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria)

Catherine Leal-Liousse (Laboratoire d'Aérodologie, University of Toulouse / CNRS, Toulouse, France)

Fabienne Lohou (Laboratoire d'Aérodologie, University of Toulouse / CNRS, Toulouse, France)

Norbert Kalthoff (Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany)

Celine Mari (Laboratoire d'Aérodologie, University of Toulouse / CNRS, Toulouse, France)

John H. Marsham (University of Leeds, Leeds, UK)

Véronique Yoboué (University Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Ivory Coast)

Cornelia Reimann Zumsprekel (Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany)

Contributeurs

Adler B., Annesi-Maesano I., Baeza A., Bahino J., Benedetti A., Brito, J., Deetz K., Deroubaix A., Dione C., Djossou J., Galy-Lacaux C., Haslett S., Hill P., Keita S., Kniffka A., Kouadio K., Léon J.-F., Maesano C., Maranan M., Menut L., Morris E., Reinares Martínez I., Stanelle T., Taylor J., Touré E., Vogel B.

Membres du consortium

Coordinateur du projet



Karlsruhe Institut für Technologie

Partenaires

France



Centre national de la recherche scientifique



Meteo France



Université Pierre Marie Curie, Sorbonne Universités



Université Clermont Auvergne



Université Paris Diderot



Université Toulouse III, Paul Sabatier

Allemagne



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Ghana



Kwame Nkrumah University of Science and Technology

International



European Centre for Medium Range Weather Forecasting

Nigeria



Obafemi Awolowo University

Suisse



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Royaume Uni



MetOffice



University of Leeds



University of Manchester



University of Reading



University of York

Collaborateurs

Benin



Direction Nationale de la Meteorologie



Institut National des Recherches Agricoles du Benin



Université d'Abomey-Calavi

Côte d'Ivoire



Institut Pasteur de Côte d'Ivoire



Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique



Université Félix Houphouët-Boigny

France



SAFIRE

Allemagne



Technische Universität Braunschweig

Ghana



Ghana Meteorological Agency

Togo



Université of Lomé

Royaume Uni



British Antarctic Survey



Conclusions principales

Le projet Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions en Afrique de l'Ouest (DACCIWA) financé par l'UE a produit le jeu de données le plus complet à ce jour sur l'atmosphère du sud de l'Afrique de l'Ouest. L'analyse de ces données en combinaison avec les résultats de modèles numériques a conduit aux conclusions suivantes:

Concentrations et sources de la pollution atmosphérique

- Les concentrations en petites particules dans les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest excèdent fréquemment les limites fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).
- Les concentrations en moyenne annuelle de polluants gazeux ne dépassent pas les recommandations mondiales pour la qualité de l'air mais des pics de concentrations sont observés qui excèdent ces recommandations.
- Les concentrations en petites particules les plus élevées sont observées pendant la saison sèche
- Pendant la saison des pluies (été boréal), les particules de fumée provenant des feux de végétation en Afrique centrale contribuent de manière substantielle à la pollution de l'air dans le sud de l'Afrique de l'Ouest

Impacts sur la santé

- Les concentrations élevées de particules dans les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest induisent des risques substantiels pour la santé humaine et aggravent les problèmes médicaux courants.
- Les conséquences de la pollution sur la santé sont plus importantes pendant la saison des pluies et dépendent de la source de pollution.
- Les feux domestiques pourraient être le risque le plus important pour la santé en raison des concentrations très élevées observées.
- L'amélioration des connaissances sur l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé nécessite plus de données sur les aérosols atmosphériques, l'accès aux statistiques sur la santé et aux données socio-économiques associées

Les émissions de polluants

- Les estimations mondiales standard des émissions anthropiques sont nettement sous-estimées pour le sud de l'Afrique de l'Ouest.
- Les émissions de particules et de gaz organiques provenant des véhicules dans les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest sont plus élevées que dans d'autres pays.
- La combustion de matériaux apparemment similaires peut entraîner des émissions de polluants très différentes.
- La sous-estimation des émissions dans le sud de l'Afrique de l'Ouest conduit à une sous-estimation des conséquences de la pollution atmosphérique sur la santé.

Impacts de la pollution sur la météorologie et le climat

- Une augmentation supplémentaire de la pollution d'origine anthropique dans le sud de l'Afrique de l'Ouest aura une influence limitée sur les propriétés des nuages en raison de la charge déjà élevée d'aérosols dans l'atmosphère.
- Une quantité accrue d'aérosols et / ou le passage à des particules plus hydrophiles réduira la quantité de lumière solaire atteignant la surface de la Terre, ce qui aura des conséquences sur la circulation atmosphérique, les nuages et possiblement les précipitations.
- Des études scientifiques sont nécessaires pour mieux quantifier les effets des particules d'origine anthropique dans le sud de l'Afrique de l'Ouest

Perspectives à long terme

- Les températures dans le sud de l'Afrique de l'Ouest devraient augmenter de 1 à plus de 3 ° C d'ici 2050 en fonction de la situation géographique, du scénario d'émission et du modèle utilisé.
- Même le signe de futurs changements dans les précipitations reste très incertain.
- L'exposition de la région à la pollution sera influencée par les émissions anthropiques locales et éloignées et par une modification des modes de transport et des émissions de poussières.

Observations et modèles

- L'absence d'un système de surveillance de la qualité de l'air adéquat dans le sud de l'Afrique de l'Ouest limite l'estimation de l'ampleur réelle du problème de la pollution.
- Le réseau de stations météorologiques est peu développé et les données existantes ne sont pas toujours disponibles pour la recherche.
- Les observations par satellite fournissent des informations riches et uniques mais doivent être davantage validées sur la région du sud de l'Afrique de l'Ouest.
- Les modèles informatiques peinent encore à représenter de manière réaliste la complexité de la dynamique et la chimie atmosphériques en Afrique de l'Ouest.



Implications en matière de politiques publiques

Améliorer la qualité de l'air

- Réduire les émissions associées à la combustion en milieu domestique. Des alternatives de combustibles et des foyers utilisant du gaz ou de l'électricité existent et aideraient à atteindre cet objectif (<http://cleancookstoves.org>).
- Réduire la combustion de biomasse au niveau local en Afrique de l'Ouest et collaborer avec les pays d'Afrique centrale pour réduire leurs émissions considérables dues aux feux de végétation.
- Établir des réglementations pour réduire la teneur en soufre des carburants et moderniser le parc de véhicules à deux roues, à quatre roues et de poids lourds.
- Travailler avec les pays sahéliens pour réduire la dégradation des sols et donc les émissions de poussière.

Améliorer les inventaires d'émissions

- Améliorer l'accès à des données socio-économiques fiables pour les pays, les régions et les villes.
- Encourager les études sur les facteurs d'émission spécifiques à une région donnée pour des activités telles que la combustion des déchets, le transport et la combustion domestique.

Améliorer les observations

- Installez des réseaux pour mesurer sur le long terme les polluants atmosphériques en se concentrant sur les villes et les banlieues.
- Maintenir et élargir les réseaux d'observation des données météorologiques (stations de surface et ballons météorologiques, par exemple), en favorisant un échantillonnage approprié du cycle quotidien.
- Rendre toutes ces observations accessibles à la communauté scientifique internationale pour la recherche sur la prévision météorologique et le climat.

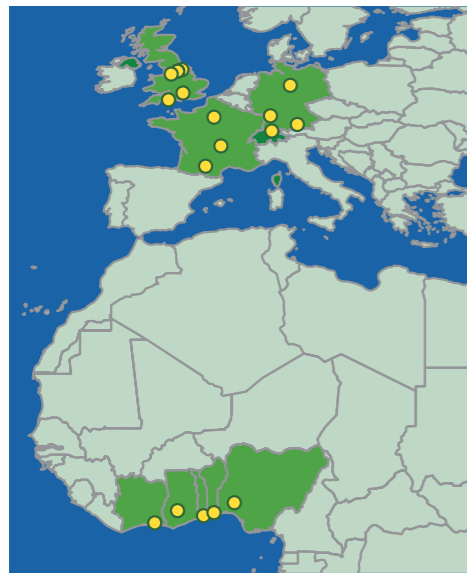
Soutenir la recherche et le renforcement des compétences

- Financer et soutenir des activités de recherche en Afrique et en Europe afin de répondre aux nombreuses questions restées en suspens à la fin du projet DACCIWA
- Soutenir le renforcement des compétences en matière de météorologie, de climat et de pollution atmosphérique en Afrique.
- Soutenir les actions d'amélioration des modèles informatiques et des jeux de données satellites pour l'Afrique de l'Ouest.



Introduction

Financé à hauteur de 8.75M€ par le 7^{ème} programme cadre de la commission européenne, le projet DACCIWA (Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa) était consacré à l'étude des processus contrôlant la composition de l'atmosphère, les conditions météorologiques et le climat dans le sud de l'Afrique de l'Ouest et leur influence sur la santé.



■ DACCIWA Partners and Collaborator countries
● DACCIWA Partner and Collaborator institutions

Figure 1. Les points jaunes indiquent l'emplacement des partenaires et des collaborateurs de DACCIWA. Les zones nuancées indiquent les pays impliqués dans le projet.

Toutes les informations sur le projet sont disponibles sur le site internet <http://www.dacciwa.eu>. Les données récoltées pendant le programme DACCIWA sont accessibles sur <http://baobab.sedoo.fr/DACCIWA>

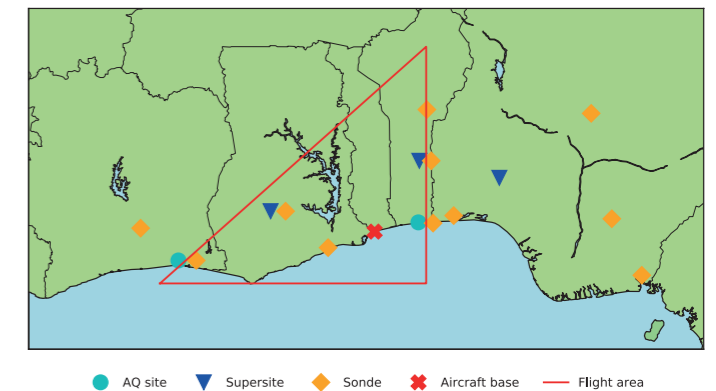
Au cours des deux dernières années, les scientifiques du programme DACCIWA ont analysé les données collectées en Afrique de l'Ouest lors des campagnes de terrain et fournies par les satellites. Ce document résume les premières conclusions pertinentes pour la mise en œuvre de stratégies politiques adaptées.



Les campagnes de terrain

Une composante majeure du projet a été la collecte de nouvelles observations de l'atmosphère dans cette région du monde où les données sont rares

Au cours des mois de Juin et Juillet 2016, des mesures détaillées (Figure 2) ont été réalisées depuis trois supersites instrumentés pour l'observation de la météorologie, onze sites de lancement de ballons météorologiques et trois avions de recherche. Des mesures de la pollution urbaine ont été faites depuis quatre sites dédiés à la qualité de l'air entre 2015 et 2017.



Le projet s'est appuyé sur des institutions partenaires et collaboratrices du Bénin, de la Côte d'Ivoire, de la France, de l'Allemagne, du Ghana, du Nigéria, de la Suisse, du Togo et du Royaume-Uni.

Figure 2. Emplacements des sites de mesure pendant DACCIWA. Les sites d'observation de la qualité de l'air ("AQ") étaient dédiés à la mesure des concentrations de polluants atmosphériques. Une large gamme de mesures météorologiques et chimiques était réalisée dans les supersites. Les sondes météorologiques étaient relâchées depuis 11 sites, pour certains en collaboration avec les services météorologiques nationaux. Trois avions de recherche étaient basés à Lomé (Togo) pour échantillonner l'atmosphère dans la zone représentée par le triangle rouge.



Concentrations et sources de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est un risque mondial majeur. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime que 8 millions de personnes meurent chaque année prématurément à cause d'un air pollué. DACCIWA a effectué des observations des concentrations et des sources de polluants atmosphériques, près de la surface et en altitude.

Les concentrations en petites particules dans les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest excèdent fréquemment les limites fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Des mesures de petites particules en suspension dans l'air (appelées PM_{2.5}) ont été effectuées dans les villes d'Abidjan et de Cotonou [Djossou et al. 2018]. Les sites choisis étaient proches des principales sources de pollution atmosphérique: brûlage de déchets dans un site d'enfouissement local, véhicules à moteur et feux domestiques pour la cuisson. Tous les sites montrent des concentrations de PM_{2.5} presque continuellement supérieures à 10 µg m⁻³ (limite recommandée par l'OMS en moyenne annuelle) et régulièrement supérieures à 25 µg m⁻³ (limite recommandée

par l'OMS en moyenne sur 24h) (Figure 3). Ces concentrations sont plus élevées que celles représentatives de villes européennes mais en deçà de celles observées en Asie.

Les concentrations en moyenne annuelle de polluants gazeux ne dépassent pas les recommandations mondiales pour la qualité de l'air mais des pics de concentrations sont observés qui excèdent ces recommandations.

Les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest ne disposent pas d'observations sur le long-terme des principaux polluants gazeux (ozone O₃, dioxyde d'azote NO₂, dioxyde de soufre SO₂). Dans le cadre de DACCIWA, des observations bi-mensuelles en surface ont été réalisées pendant la

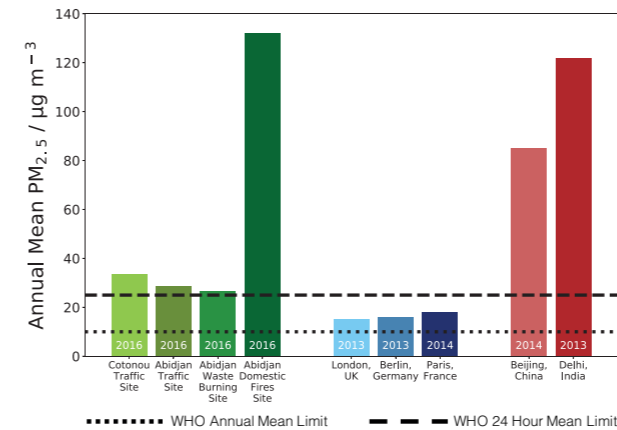


Figure 3. Observations de PM_{2.5} collectées par le projet DACCIWA sur quatre sites en Afrique de l'Ouest et mesures équivalentes effectuées en Europe et en Asie. Le site de combustion domestique d'Abidjan est un site couvert, représentatif d'une pollution intérieure. Pour les autres sites, les mesures de concentrations ont été réalisées en extérieur. La ligne pointillée indique la concentration limite recommandée par l'OMS en moyenne annuelle. La ligne en traits discontinus indique la concentration limite recommandée par l'OMS en moyenne sur 24h. Les données provenant de villes non africaines proviennent de http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/database/cities/en/

période 2015-2017 sur quatre sites de mesures de la qualité de l'air ainsi que des observations par avion pendant l'été 2016. Les observations ne montrent pas de dépassement des seuils recommandés par l'OMS pour ces polluants gazeux [Bahino et al. 2018]. Certains sites ont toutefois montré des pics de concentrations en NO₂ proches des limites recommandées par l'OMS.

Les concentrations en petites particules les plus élevées sont observées pendant la saison sèche

Les concentrations mensuelles les plus élevées de PM_{2.5} sont observées pendant la saison sèche (hiver boréal) (Figure 4). Ces concentrations résultent de la combinaison de particules de poussières désertiques du Sahara, de particules de fumée induites par les brûlages de surfaces agricoles ou de savane dans la région, qui s'ajoutent aux sources de pollution anthropiques locales. Les conditions plus humides en été (saison des pluies) induisent une combustion moins efficace

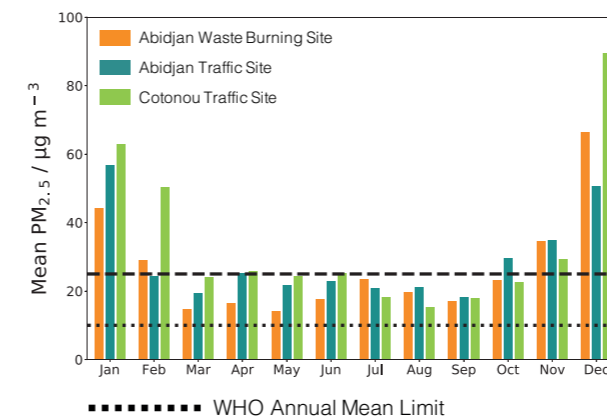


Figure 4. Concentration moyenne mensuelle de PM_{2.5} observée à Abidjan et Cotonou. La ligne pointillée indique la concentration limite recommandée par l'OMS en moyenne annuelle. La ligne en traits discontinus indique la concentration limite recommandée par l'OMS en moyenne sur 24h. ard.

(bois humide) et donc des émissions locales de combustion accrues. Une variabilité saisonnière identique a été observée pour NO₂.

Pendant la saison des pluies (été boréal), les particules de fumée provenant des feux de végétation en Afrique centrale contribuent de manière substantielle à la pollution de l'air dans le sud de l'Afrique de l'Ouest

Les changements dans la circulation et les précipitations pendant la saison des pluies (été) réduisent l'influence des poussières désertiques et des feux agricoles et de savanes locaux. A l'inverse, les panaches de fumée des brûlages de surfaces agricoles et de savane en Afrique centrale à cette même période sont transportés sur des milliers de kilomètres jusqu'aux pays côtiers du Golfe de Guinée (Figure 5). Fait remarquable, au cours de ces mois, 20 à 40% de la masse de particules est produite à partir de ces incendies en Afrique centrale et transportée dans la région.

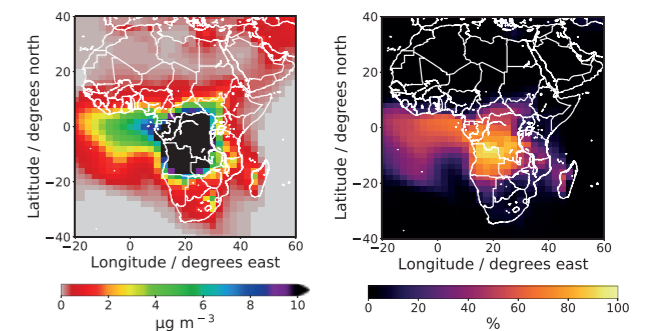


Figure 5. Contributions des brûlages de surfaces agricoles et de savanes en Afrique Centrale aux concentrations en petites particules (PM_{2.5}) en Juin et Juillet en valeur absolue (gauche) et relative (droite), calculées avec le modèle numérique GEOS-Chem. 25% à 50% des petites particules sur les pays côtiers du Golfe de Guinée proviennent des feux de végétation d'Afrique Centrale.



En raison des niveaux de concentration de polluants considérables qu'ils émettent, les feux domestiques représentent un risque important pour la santé humaine, plus important que celui lié au trafic automobile ou à la combustion des déchets.

site ou d'une région à l'autre, ce qui suggère que, pour étudier l'impact de la pollution de l'air sur la santé humaine, non seulement les concentrations des petites particules doivent être connues, mais également les types de sources.

Le programme DACCIIWA a permis de réaliser les premières recherches sur la relation pollution-santé pour Abidjan montrant des liens entre les concentrations de PM_{2,5} et les visites à la salle d'urgence pour des problèmes respiratoires et cardiaques (augmentation du risque d'environ 3%), ainsi que la mortalité dans la salle d'urgence (augmentation du risque d'environ 4%) et les troubles respiratoires lors des visites aux centres de santé ambulatoires.

Les feux domestiques pourraient être le risque le plus important pour la santé en raison des concentrations très élevées observées.

Les feux domestiques (cuisson) génèrent des concentrations très élevées de particules fines PM_{2,5}, et sont associés à un risque considérable pour la santé. Par comparaison, le risque induit par la pollution due au trafic routier ou au brûlage des déchets qui reste important serait inférieur. Cependant, les études menées dans le cadre du projet DACCIIWA se sont concentrées sur les quartiers autour des sites de mesure, plutôt que sur l'étude de groupes de population spécifiques tels que les chauffeurs de bus, les personnes travaillant à la cuisson des repas ou les personnes intervenant sur les sites de décharges. Ces premières conclusions peuvent donc occulter les risques sérieux associés à une exposition sur le long terme à ces sources d'émission importantes.

Des expériences in vitro avec des particules d'aérosols prélevées sur quatre sites d'observation de la qualité de l'air montrent que la présence de matière organique cause le plus d'inflammations. L'impact inflammatoire le plus important est observé pendant la saison des pluies sur le site de combustion domestique.



Figure 6. La préparation des aliments produit de grandes quantités de fumée et de particules. Les feux domestiques observés à Yopougon, Abidjan et en Côte d'Ivoire sont responsables des concentrations de polluants mesurées les plus élevées. Cette pollution touche principalement les femmes et les enfants.

L'exposition à la pollution de différents groupes de personnes autour de ces sites a montré que le risque pour la santé était le plus élevé pour les enfants dans les sites de brûlage des déchets en raison de la présence de métaux lourds, tandis que pour les femmes, le risque le plus élevé était en été sur le site de feu domestique en raison de la présence de matière organique induite par le processus de combustion.

Des études sociologiques ont montré des différences significatives entre le statut professionnel des individus et leur vulnérabilité à la pollution de l'air dans les quatre sites de qualité de l'air

L'amélioration des connaissances sur l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé nécessite plus de données sur les aérosols atmosphériques, l'accès aux statistiques sur la santé et aux données socio-économiques associées

Cette étude présente les premiers résultats d'une étude épidémiologique sur les impacts cardiorespiratoires de la pollution de l'air dans la région côtière du sud de l'Afrique de l'Ouest à l'aide d'observations locales. Un effet plus important et plus significatif de la pollution pourrait être observé avec des données plus nombreuses et plus détaillées. Des statistiques sanitaires détaillées ainsi que des mesures continues et répétées des polluants sont nécessaires pour améliorer les résultats épidémiologiques et permettre une compréhension plus approfondie des impacts sur la santé dans les zones urbaines et des zones métropolitaines tropicales. La disponibilité d'informations socio-économiques peut également fournir un levier pour mieux interpréter les données, car tous les habitants n'ont pas les mêmes chances de consulter un médecin.



Figure 7. Une femme emmène son bébé chez le médecin du Centre médical Soeur Catherine à Yopougon, Abidjan, en Côte d'Ivoire.

Impacts sur la santé

Des concentrations élevées d'aérosols dans l'atmosphère ont une répercussion négative sur la santé en raison d'une augmentation des maladies respiratoires, cardiaques et dermatologiques. Une réduction de moitié des émissions de polluants atmosphériques en Afrique pourrait réduire d'un tiers les décès liés à la pollution de l'air [Lioussé et al., 2014]. Le programme DACCIIWA s'est concentré sur les villes d'Abidjan et de Cotonou et a pour la première fois étudié l'influence de la pollution sur la population locale.

Les concentrations élevées de particules dans les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest induisent des risques substantiels pour la santé publique et aggravent les problèmes médicaux courants.

En utilisant le nombre de visites médicales comme indicateur indirect des effets néfastes de la pollution sur la santé, des valeurs de risque relatif sur le long terme ont été calculées pour chaque municipalité d'Abidjan. Ces valeurs décrivent la relation entre l'exposition à long terme aux petites particules PM_{2,5} et la santé respiratoire, cardiaque et dermatologique, ainsi que la mortalité en salle d'urgence. Le nombre de visites à la salle d'urgence pour des problèmes respiratoires ou cardiaques pourrait être réduit de 3 à 4% et jusqu'à 4% de la mortalité pourrait être évitée en réduisant

les concentrations de PM_{2,5} à la limite recommandée par l'OMS de 10 µg/m³.

Les conséquences de la pollution sur la santé sont plus importantes pendant la saison des pluies et dépendent de la source de pollution.

Les analyses pour les trois sites de mesure à Abidjan montrent des corrélations significatives entre le nombre de visites à l'hôpital et les concentrations de PM_{2,5}, principalement pendant la saison des pluies (été). Cela suggère que l'humidité peut jouer un rôle important dans l'influence des particules d'aérosols sur la santé en favorisant la pénétration des polluants dans les poumons. Les effets des particules atmosphériques fines sur la santé diffèrent d'un



Les émissions de polluants

Pour élaborer des stratégies de lutte contre la pollution atmosphérique efficaces, il faut évaluer les différentes sources d'émission de polluants. Dans le cadre du programme DACCIWA de nouvelles émissions de polluants pour l'Afrique ont été élaborées et confrontées aux émissions internationales standard et aux observations locales.

Les estimations mondiales standard des émissions humaines sont nettement sous-estimées pour le sud de l'Afrique de l'Ouest.

L'inventaire d'émissions de polluants EDGAR [Crippa et al., 2018] est une référence mondiale pour les émissions de polluants atmosphériques. Cet inventaire peut se révéler inexact pour des régions qui ont été peu étudiées. Dans le cadre du projet DACCIWA, de nouveaux inventaires d'émissions ont été élaborés [Keita et al., 2018] qui se basent sur des données d'activité et les facteurs d'émissions spécifiques à l'Afrique. La figure 8 compare les émissions moyennes en masses des principaux polluants atmosphériques calculées par les inventaires EDGAR et DACCIWA dans le sud de l'Afrique de l'Ouest. Un troisième inventaire exploite les observations du programme

DACCIWA pour proposer une estimation optimisée des émissions de polluants. Pour de nombreuses espèces, les émissions EDGAR qui servent de référence à l'échelle mondiale sous-estiment considérablement les émissions dans la région étudiée.

Les émissions de particules et de gaz organiques provenant des véhicules dans les villes du sud de l'Afrique de l'Ouest sont plus élevées que dans d'autres pays.

Des mesures directes des émissions de gaz organiques par différents véhicules en Côte d'Ivoire ont été réalisées [Keita et al., 2018]. Les émissions se sont révélées significativement plus élevées que les estimations en cours dans la région (Figure 9). Les véhicules à essence anciens sont bien plus

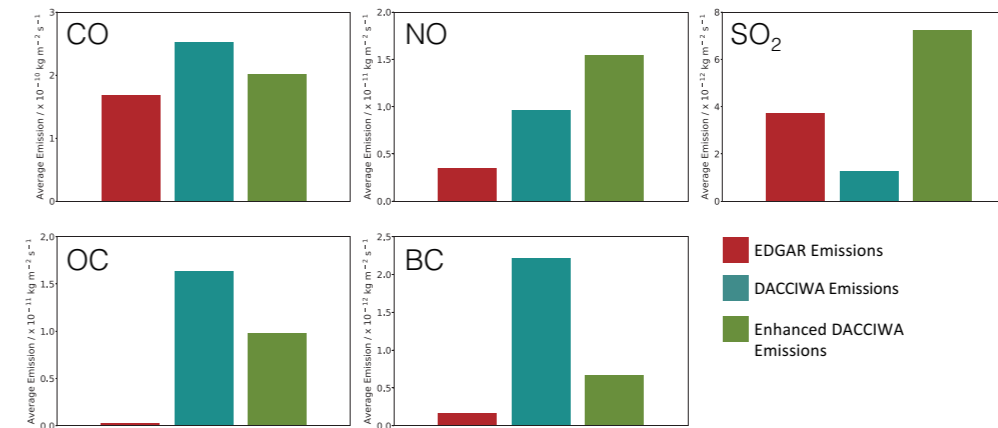


Figure 8. Comparaison des émissions annuelles moyennes de CO, NO, SO₂, carbone organique (« Organic carbon » ou OC) et carbone suie (« Black Carbon » ou BC) dans la région sud de l'Afrique de l'Ouest telles que calculées par les inventaires d'émissions EDGAR et DACCIWA. L'inventaire d'émissions amélioré « Enhanced DACCIWA emissions » est contraint par les observations réalisées pendant les campagnes de terrain.

polluants (d'un facteur mille) que les véhicules à essence récents alors que les véhicules à moteur diesel anciens sont seulement cinq fois plus polluants. Les nouveaux moteurs à quatre temps ont des émissions nettement inférieures à celles des nouveaux moteurs à deux temps.

La combustion de matériaux apparemment similaires peut entraîner des émissions très différentes.

Keita et al. [2018] ont constaté que les émissions de particules provenant des feux domestiques dépendaient fortement du type de bois brûlé. Le bois d'hévéa s'est avéré être le plus gros émetteur. La fabrication du charbon de bois est une source importante de particules et les émissions résultant de la combustion des déchets sont élevées et présentent un risque pour la santé.

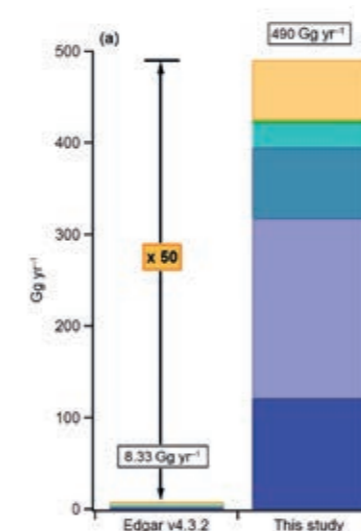


Figure 9. Masse des composés organiques émise par le secteur du transport routier en Côte d'Ivoire tel qu'estimée par l'inventaire d'émission EDGAR (à gauche) et DACCIWA (à droite). L'inventaire EDGAR communément utilisé aujourd'hui à l'échelle internationale sous-estime d'un facteur 50 les nouvelles émissions estimées dans le cadre du projet DACCIWA [Keita et al., 2018].

La sous-estimation des émissions dans le sud de l'Afrique de l'Ouest conduit à une sous-estimation des impacts de la pollution atmosphérique sur la santé.

Les estimations mondiales de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé humaine utilisent souvent les inventaires d'émissions EDGAR, lesquels sous-estiment les émissions dans la région étudiée. L'impact des PM_{2,5} sur la santé humaine dans le sud de l'Afrique de l'Ouest est donc actuellement sous-estimé avec des conséquences sur les choix de politique de santé publique.



Les estimations actuelles standard utilisées à l'échelle mondiale pour les émissions anthropiques sous-estiment notablement les émissions réelles du sud de l'Afrique de l'Ouest.



Impacts de la pollution sur la météorologie et le climat

L'une des principales incertitudes dans l'évaluation des changements climatiques à venir concerne la manière dont les aérosols - minuscules particules en suspension dans l'air - interagissent avec l'atmosphère, soit directement en diffusant ou en absorbant le rayonnement solaire, soit par leur influence sur les propriétés des nuages. Pour la première fois, DACCIWA a spécifiquement étudié cette question pour le sud de l'Afrique de l'Ouest.

Une nouvelle augmentation de la pollution d'origine anthropique dans le sud de l'Afrique de l'Ouest aura une influence limitée sur les propriétés des nuages en raison de la charge déjà élevée d'aérosols dans l'atmosphère.

Les nuages se forment par condensation de la vapeur d'eau sur des particules en suspension dans l'atmosphère. Des changements dans le nombre et les caractéristiques de ces particules peuvent donc affecter les propriétés des nuages ainsi que les précipitations. Dans le sud de l'Afrique

de l'Ouest, la concentration de particules provenant des émissions locales et des produits de combustion importés depuis les feux de végétation d'Afrique centrale est déjà si élevée qu'il y a toujours suffisamment de particules. Tout apport supplémentaire de nouvelles particules n'aura qu'un effet limité sur les propriétés des nuages. Une dégradation de la pollution par les particules aura donc une influence limitée sur les précipitations (Figure 10). Le changement des précipitations par le biais de modifications des propriétés des nuages due à une dégradation de la pollution par les particules est donc faible.

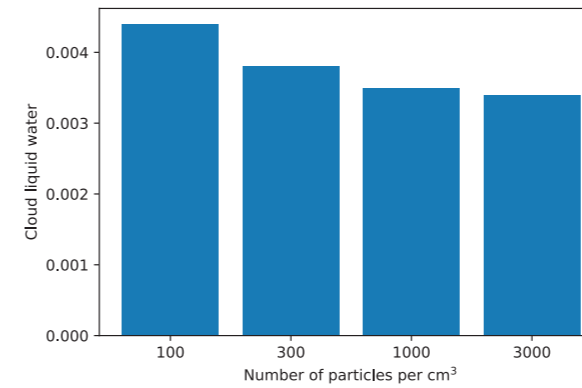


Figure 10. Colonnes totales d'eau liquide en Afrique de l'Ouest d'après le modèle Met Office Unified Model pour la journée du 4 juin 2016, simulées en utilisant quatre concentrations d'aérosols différentes. Seule la simulation basée sur un nombre de particules de 100 cm⁻³, représentative de conditions environnementales très propres montre une différence appréciable de la teneur en eau liquide atmosphérique par rapport aux autres. Les concentrations typiques d'aérosols en Afrique de l'Ouest sont comprises entre 500 et 1 000 cm⁻³.

Une quantité accrue d'aérosols et / ou le passage à des particules plus hydrophiles réduira la quantité de lumière solaire atteignant la surface de la Terre, ce qui aura des conséquences sur la circulation atmosphérique, les nuages et possiblement les précipitations.

Les aérosols réduisent également la quantité de lumière solaire atteignant la surface de la Terre. Dans un environnement humide comme le sud de l'Afrique de l'Ouest pendant la mousson estivale, les particules d'aérosol peuvent absorber de l'eau, augmentant leur pouvoir d'atténuation solaire de 5 à 7 fois [Haslett et al., 2018]. Des réductions du chauffage de surface de 20 Wm⁻² sont observées [Deetz et al., 2018b]. Cette réduction diminue le contraste de température entre la terre et la mer et retarde la progression du front côtier vers l'intérieur

des terres en fin d'après-midi et en soirée jusqu'à 30 km (Figure 11 à gauche). Cette réduction retarde de 1-2 heures l'évolution diurne des nuages bas vers des nuages plus épais et plus morcelés (Figure 11, à droite). L'atténuation du rayonnement solaire pourrait conduire à une réduction des précipitations avec des conséquences sur la productivité alimentaire, l'accès à l'eau et l'hydroélectricité. La réduction du rayonnement solaire direct affecte également les installations et la production d'électricité photovoltaïque. L'augmentation des émissions d'aérosols et / ou le passage à des particules qui absorbent plus facilement de l'eau, telles que les sulfates ou les nitrates, peuvent potentiellement exacerber fortement cet effet.

Des études scientifiques sont nécessaires pour mieux quantifier les effets des particules d'origine anthropique dans le sud de l'Afrique de l'Ouest

Le projet DACCIWA a démontré que les interactions entre les particules d'aérosol, les nuages, les précipitations et le rayonnement du soleil sur le sud de l'Afrique de l'Ouest sont complexes.

De nouveaux processus ont été découverts, tels que le déplacement du front côtier météorologique et la sensibilité de l'absorption d'eau par les particules. Pourtant, de nombreuses questions demeurent. Par exemple, comment de plus grosses gouttes tombant dans le nuage à partir de son sommet redistribuent l'eau des nuages et modifient ainsi sa durée de vie [Dearden et al., 2018]. Les sensibilités élevées et les effets de compensation, ainsi que la grande variabilité des processus en fonction de la distance à la côte ou de l'heure du jour, rendent l'analyse quantitative très difficile. Des incertitudes substantielles subsistent en raison à la fois de données d'observation limitées - même après les campagnes terrain de DACCIWA - et de grandes différences entre des modèles numériques de résolution et de complexité différentes.

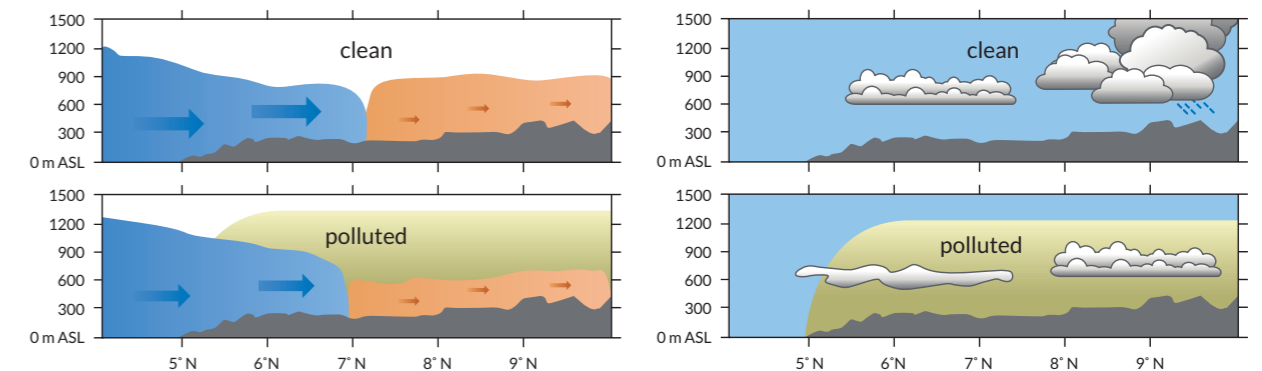


Figure 11. Transects verticaux nord-sud à travers le sud de l'Afrique de l'Ouest qui illustrent l'impact de la pollution sur les nuages et les précipitations (à droite) et la position de la zone de front, une composante météorologique qui se déplace quotidiennement vers l'intérieur des terres le soir et la nuit (à gauche). Dans le cas pollué (en bas), le front est retardé par rapport au cas moins pollué (en haut). Ceci est dû à la diminution du réchauffement à la surface qui induit une couche de surface moins épaisse et moins chaude au dessus du continent et un flux plus faible d'air maritime froid. En terme de nuages, une réduction de la température en journée entraîne une transition retardée entre les nuages peu profonds et les nuages convectifs plus épais, potentiellement pluvieux.



Perspectives à long terme

Connaître l'évolution future de l'atmosphère dans le sud de l'Afrique de l'Ouest est d'une importance cruciale pour anticiper les questions de santé humaine, de production alimentaire et d'économie. Les changements à l'échelle locale doivent être pris en compte dans le contexte d'un climat global en mutation. DACCIIWA s'est appuyé sur des modèles informatiques pour déterminer quels sont les facteurs pertinents à suivre pour les développements futurs de la région.

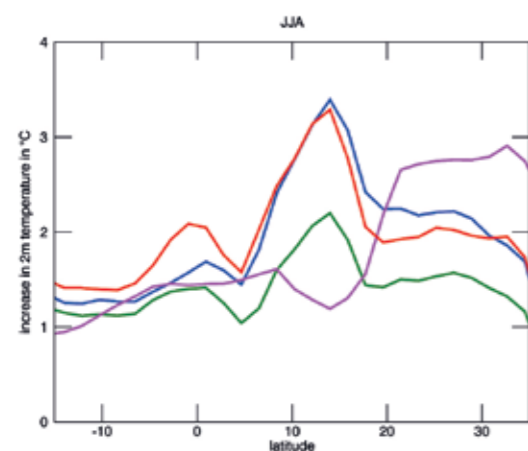


Figure 12. Augmentation de la température de surface en été (Juin à Août) au sud de l'Afrique de l'Ouest entre le présent et 2050, en fonction de la latitude, calculées par un modèle de climat pour différents scénarios. Les lignes bleue, rouge et magenta indiquent des simulations avec des fortes émissions. La ligne verte indique un scénario de basses émissions. Les lignes bleue, rouge et magenta se différencient par des hypothèses sur la température de surface de la mer, les interactions aérosols-nuages et la végétation.

Les températures au-dessus de l'Afrique de l'Ouest devraient augmenter de 1 à plus de 3 ° C d'ici 2050 en fonction de la situation géographique, du scénario d'émission et du modèle utilisé.

Conformément aux prévisions concernant le réchauffement climatique, les températures dans le sud de l'Afrique de l'Ouest devraient augmenter considérablement jusqu'au milieu du XXIe siècle. Cependant, l'ampleur exacte de cette augmentation reste incertaine. Plusieurs facteurs déterminants ont été étudiés pour comprendre cette augmentation durant les mois d'été juin - août (figure 12):

- 1) **La proximité de l'océan:** L'élévation de la température le long de la côte guinéenne aura tendance à être moins importante qu'à l'intérieur des terres.
- 2) **Émissions de gaz à effet de serre:** pour un scénario de faible émission (ligne verte sur la figure 12), les augmentations de température sont généralement inférieures à 2°C dans l'ensemble de l'Afrique du Nord mais pourraient dépasser 3°C pour les fortes émissions (lignes rouge, bleue et magenta de la figure 12).
- 3) **Océan:** Différentes hypothèses sur l'évolution de la température de surface de la mer ont une incidence sur l'ampleur du réchauffement à l'intérieur des terres (par exemple comparaison des lignes bleues et rouges sur la figure 12).
- 4) **Aérosol, végétation et autres facteurs:** le réchauffement est également sensible à la manière dont la végétation et les interactions entre aérosol et nuages sont représentées dans un modèle climatique (par exemple comparaison des lignes bleues et magenta de la figure 12).

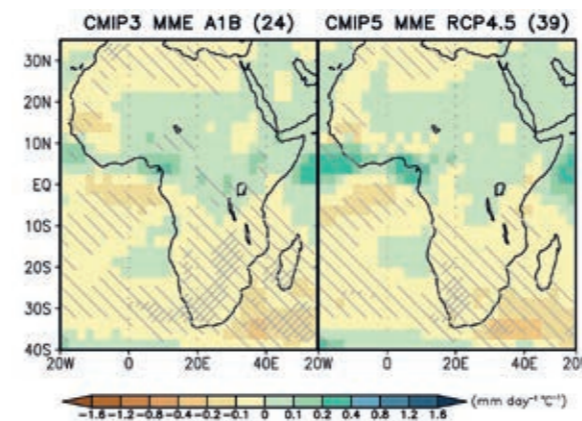


Figure 13. Evolution des précipitations moyennes en été (Juin à Septembre) sur l'Afrique en 2080-2099 par comparaison à la période 1986-2005 pour deux scénarios. A gauche : SRES A1B scénario (CMIP3, 24 modèles); à droite: RCP4.5 scénario (CMIP5, 39 modèles). Les changements de précipitations sont normalisés par les changements de température de l'air en surface moyenne annuelle globale calculée pour chaque scénario. Les hachures légères / denses indiquent que plus de 66% / 90% des modèles (ou membres) ont le même signe que la moyenne d'ensemble. Tiré du cinquième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC 2013, Figure 14.23).

Même le signe de futurs changements dans les précipitations reste très incertain.

Les modèles informatiques peinent toujours à représenter de manière réaliste la mousson d'Afrique de l'Ouest [par exemple Hannak et al. 2017]. Les deux dernières évaluations multimodèles du GIEC (CMIP3 et CMIP5) montrent une augmentation des précipitations le long de la côte guinéenne jusqu'à la fin du 21e siècle, mais avec un très faible accord entre les différents modèles, même à propos du signe du changement (Figure 13). L'évaluation précise de la fréquence des sécheresses et des inondations futures s'en trouve limitée. Les travaux de modélisation dans le cadre de DACCIIWA confirment cette grande sensibilité, reflet de notre compréhension encore médiocre du futur des précipitations dans la région.

L'exposition de la région à la pollution sera influencée par les émissions anthropiques locales et éloignées et par une modification des modes de transport et des émissions de poussières.

L'augmentation de la population et du développement économique au cours des prochaines décennies entraînera une augmentation des émissions d'aérosols et de polluants gazeux d'origine anthropique dans la région. Dans le même temps, les changements climatiques influenceront sur la quantité de poussières désertiques et des aérosols provenant des feux de végétation transportés dans la région, tandis que les changements de précipitations modifieront la durée de vie de ces particules. Dans ces conditions, la prévision de l'exposition des populations à la pollution atmosphérique reste un défi. Des résultats de modélisation numérique du projet DACCIIWA indiquent qu'une augmentation potentielle des concentrations d'aérosols anthropiques serait partiellement compensée par une diminution des concentrations de poussières en hiver, alors que les changements estivaux sont davantage contrôlés localement (Figure 14). De meilleurs inventaires d'émissions et une connaissance plus fiable des feux de végétation et des émissions de poussières seront nécessaires pour améliorer la confiance dans les projections relatives à la pollution atmosphérique dans la région.

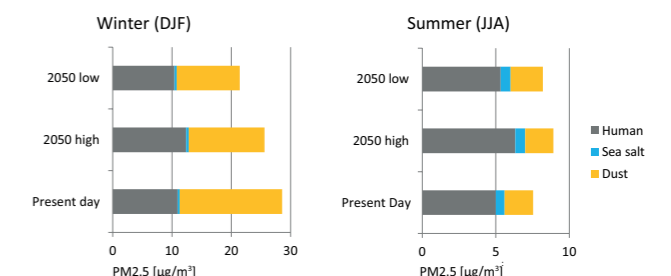


Figure 14. Concentrations moyennes de particules fines PM2.5 à la surface calculées dans le sud de l'Afrique de l'Ouest en décembre - février (à gauche) et juin - août (à droite). «Faible» (« Low ») et «élevé» (« High ») font référence à différents scénarios d'émissions locales de polluants atmosphériques.



Le manque d'observations pour la météorologie et la pollution atmosphérique en Afrique est un frein sévère à la connaissance scientifique.

L'Afrique pâtit d'une faible couverture en stations météorologiques actives (Figure 15). Le programme DACCIWA a permis la mise en place de réseaux météorologiques de pointe sur le court terme et a rendu les données librement accessibles pour la recherche. Il a également montré comment de meilleures données peuvent améliorer notre compréhension du système de mousson d'Afrique de l'Ouest, ce qui conduira à l'amélioration des prévisions météorologiques. Disposer d'un système d'observation météorologique amélioré, fiable et en accès libre en Afrique doit être une priorité. Les services météorologiques nationaux africains ont besoin d'un soutien fort pour assurer la surveillance de la météorologie et du climat et pour organiser des centres de données permettant l'accès aux données historiques actuellement indisponibles.

Les observations par satellite fournissent des informations riches et uniques mais doivent être davantage validées sur la région du sud de l'Afrique de l'Ouest.

Les observations par satellite peuvent aider à compléter le manque d'observations de surface, mais leur utilisation a des limites. La surveillance en temps réel des précipitations est l'un des grands défis du fait de l'immense valeur socio-économique des précipitations en Afrique de l'Ouest. Les données d'un réseau pluviométrique dense déployé autour de Kumasi pendant DACCIWA a montré que les estimations de précipitations basées sur des données satellites comportent des erreurs importantes, particulièrement faillibles pour l'identification des événements de précipitations extrêmes (Figure 16). Les observations par satellite de la concentration de polluants atmosphériques sont disponibles à des résolutions relativement élevées aujourd'hui, mais ne permettent toujours pas de capturer les variations spatiales et diurnes pertinentes pour l'étude de l'impact sur la santé. Ils peuvent toutefois fournir des climatologies régionales utiles pour évaluer les performances des modèles numériques.

Pour tirer parti des paramètres météorologiques et de qualité de l'air détectés par satellite, il est nécessaire de les étalonner à partir de la vérité terrain. La rareté des observations dans la région rend l'exercice difficile.

Les modèles informatiques peinent encore à représenter de manière réaliste la complexité de la dynamique et la chimie atmosphériques en Afrique de l'Ouest.

Les modèles informatiques peinent encore à simuler de manière réaliste la météorologie, la pollution de l'air et le climat de l'Afrique de l'Ouest. Même les modèles de prévision météorologique de pointe à haute résolution ne peuvent pas reproduire la répartition observée des précipitations entre le sud et le nord et la sensibilité des résultats à la résolution des modèles est considérable (Figure 17). De manière générale, la qualité des prévisions météorologiques quotidiennes dans le sud de l'Afrique de l'Ouest est insuffisante [Vogel et al. 2018] et la fiabilité de l'évolution future des précipitations est limitée (voir Figure 13).

Le programme DACCIWA a démontré que l'un des problèmes majeurs est la mauvaise représentation, dans les modèles, des nuages bas, étendus et persistants dans le sud de l'Afrique de l'Ouest. Ces nuages jouent un rôle important dans la régulation de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface et de la quantité de pluie [Kniffka et al. 2018]. En outre, les recherches effectuées ont montré que l'inclusion des effets des aérosols dans les modèles numériques pouvait améliorer les prévisions saisonnières pour l'Afrique [Benedetti et Vitard, 2018].

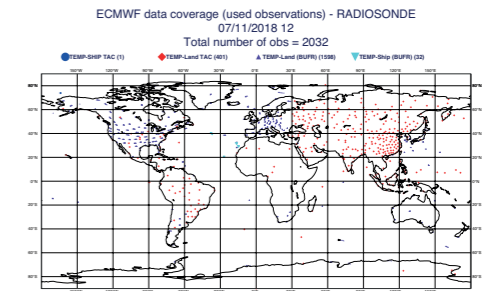


Figure 15. Sondages météorologiques disponibles pour les services météorologiques internationaux et intégrés dans les prévisions du 7 novembre 2018 à 12 UTC. L'Afrique se distingue comme le continent ayant une faible couverture de données. Figure fournie par European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

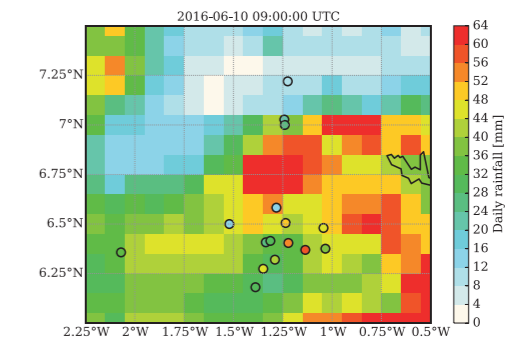


Figure 16. Précipitations journalières mesurées le 10 juin 2016 à 0900 UTC par le réseau pluviométrique de Kumasi (points colorés) et estimées par le produit satellite "Extractions multisatellite intégrées pour GPM" (IMERG, version 5). Le réseau pluviométrique est pleinement opérationnel depuis décembre 2015 et est maintenu par l'Université des sciences et technologies de Kwame Nkrumah (KNUST).

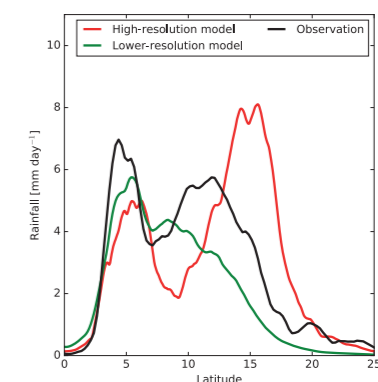


Figure 17. Répartition nord-sud des précipitations moyennées entre 8° W et 8° E en juillet 2016 déduite des observations par satellite (en noir) et des simulations avec le modèle ICON actuellement opérationnel au service météorologique allemand en haute résolution (en rouge) et à plus faible résolution (vert). Toutes les courbes sont lissées pour une meilleure visibilité. Figure adaptée de Kniffka et al. [2018].

Observations et modèles

La rareté et la difficulté d'accès aux données météorologiques et de qualité de l'air en Afrique de l'Ouest sont le principal frein actuel au progrès en matière de prévision météorologique, de recherche de solution adaptée pour limiter la pollution atmosphérique et de connaissance du changement climatique. Le programme de recherche DACCIWA a produit une profusion de données uniques pour la région, les distribuent en accès libre et a mis en évidence les lacunes des modèles informatiques de simulation de la météorologie et du climat.

L'absence d'un système de surveillance de la qualité de l'air adéquat dans le sud de l'Afrique de l'Ouest limite l'estimation de l'ampleur réelle du problème de la pollution.

Des observations continues de polluants atmosphériques effectuées sur le long terme, accessibles au public, sont le pré-requis pour une évaluation fiable de la qualité de l'air et une recherche de solutions politiques adaptées et efficaces. L'absence de données limite notre connaissance de la qualité de l'air dans le sud de l'Afrique de l'Ouest qui reste aujourd'hui médiocre. Des mesures locales quotidiennes des polluants primaires tels que les NO_x , SO_2 , O_3 et PMX dans les grandes villes sont nécessaires. D'autres produits chimiques tels que les hydrocarbures polycycliques et les métaux lourds pourraient jouer un rôle important en Afrique de

l'Ouest (comme ils l'ont été historiquement en Europe et en Amérique du Nord). Cependant, sans observations continues et qualifiées, il est impossible de le savoir.

Le réseau de stations météorologiques est peu développé et les données existantes ne sont pas toujours disponibles pour la recherche.

Les observations météorologiques ont des avantages économiques qui dépassent de loin les coûts de leur collecte (http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/documents/wmo_1153_en.pdf). Elles sont essentielles à la production de prévisions météorologiques précises, à la compréhension des processus météorologiques, à la mise en place de systèmes d'alerte précoce efficaces et à la surveillance du changement climatique.

Publications dans des revues scientifiques produites par le programme DACCIIWA

Adler B, Babić K, Kalthoff N, Lohou F, Lothon M, Dione C, et al. **Nocturnal low-level clouds in the atmospheric boundary layer over southern West Africa: an observation-based analysis of conditions and processes.** Atmos Chem Phys Discuss. 2018;1–31. <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2018-775/>

Adler B, Kalthoff N, Gantner L. **Nocturnal low-level clouds over southern West Africa analysed using high-resolution simulations.** Atmos Chem Phys 2017;17(2):899–910. <https://www.atmos-chem-phys.net/17/899/2017/>

Amekudzi LK, Osei MA, Atiah WA, Aryee JNA, Ahiataku MA, Quansah E, et al. **Validation of TRMM and FEWS Satellite Rainfall Estimates with Rain Gauge Measurement over Ashanti Region, Ghana.** Atmos Clim Sci 2016;06(04):500–18. <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/acs.2016.64040>

Amekudzi L, Yamba E, Preko K, Asare E, Aryee J, Baidu M, et al. **Variabilities in Rainfall Onset, Cessation and Length of Rainy Season for the Various Agro-Ecological Zones of Ghana.** Climate 2015;3(2):416–34. <http://www.mdpi.com/2225-1154/3/2/416>

Aryee JNA, Amekudzi LK, Atiah WA, Osei MA, Agyapong E. **Overview of surface to near-surface atmospheric profiles over selected domain during the QWeCI project.** Meteorol Atmos Phys 2018;1–15. <http://link.springer.com/10.1007/s00703-018-0618-1>

Babić K, Adler B, Kalthoff N, Andersen H, Dione C, Lohou F, et al. **The observed diurnal cycle of nocturnal low-level stratus clouds over southern West Africa: a case study.** Atmos Chem Phys Discuss 2018;1–29. <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2018-776/>

Bahino J, Yoboué V, Galy-Lacaux C, Adon M, Akpo A, Keita S, et al. **A pilot study of gaseous pollutants' measurement (NO₂, SO₂, NH₃, HNO₃ and O₃).** Atmos Chem Phys 2018;18(7):5173–98. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/5173/2018/>

Bärfuss K, Pätzold F, Altstädter B, Kathe E, Nowak S. **New Setup of the UAS ALADINA for Measuring Boundary Layer Properties, Atmospheric Particles and Solar Radiation.** Atmosphere 2018;9(1):28. <http://www.mdpi.com/2073-4433/9/1/28>

Benedetti A, Reid JS, Knippertz P, Marsham JH, Di Giuseppe F, Rémy S, et al. **Status and future of numerical atmospheric aerosol prediction with a focus on data requirements.** Atmos Chem Phys 2018;18(14):10615–43. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/10615/2018/>

Benedetti A, Vitart F. **Can the Direct Effect of Aerosols Improve Subseasonal Predictability?** Mon Weather Rev 2018;146(10):3481–98. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR-D-17-0282.1>

Bessardon GEQ, Fosu-Amankwah K, Petersson A, Brooks BJ. **Evaluation of Windsong S1H2 performance in Kumasi during the 2016 DACCIIWA field campaign.** Atmos Meas Tech Discuss 2018;1–31. <https://www.atmos-meas-tech-discuss.net/amt-2018-179/>

Brito J, Freney E, Dominutti P, Borbon A, Haslett SL, Batenburg AM, et al. **Assessing the role of anthropogenic and biogenic sources on PM₁ over southern West Africa using aircraft measurements.** Atmos Chem Phys 2018;18(2):757–72. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/757/2018/>

Brosse F, Leriche M, Mari C, Couvreur F. **LES study of the impact of moist thermals on the oxidative capacity of the atmosphere in southern West Africa.** Atmos Chem Phys 2018;18(9):6601–24. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/6601/2018/>

Cabos W, Sein D V, Pinto JG, Fink AH, Koldunov N V, Alvarez F, et al. **The South Atlantic Anticyclone as a key player for the representation of the tropical Atlantic climate in coupled climate models.** Clim Dyn; 2017; ;48(11–12):4051–69. <http://link.springer.com/10.1007/s00382-016-3319-9>

Dearden C, Hill A, Coe H, Choularton T. **The role of droplet sedimentation in the evolution of low-level clouds over southern West Africa.** Atmos Chem Phys 2018;18(19):14253–69. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/14253/2018/>

Deetz K, Vogel B. **Development of a new gas-flaring emission dataset for southern West Africa.** Geosci Model Dev 2017;10(4):1607–20. <https://www.geosci-model-dev.net/10/1607/2017/>

Deetz K, Vogel H, Haslett S, Knippertz P, Coe H, Vogel B. **Aerosol liquid water content in the moist southern West African monsoon layer and its radiative impact.** Atmos Chem Phys 2018;18(19):14271–95. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/14271/2018/>

Deetz K, Vogel H, Knippertz P, Adler B, Taylor J, Coe H, et al. **Numerical simulations of aerosol radiative effects and their impact on clouds and atmospheric dynamics over southern West Africa.** Atmos Chem Phys 2018;18(13):9767–88. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/9767/2018/>

Deroubaix A, Flamant C, Menut L, Siour G, Mailler S, Turquet S, et al. **Interactions of atmospheric gases and aerosols with the monsoon dynamics over the Sudano-Guinean region during AMMA.** Atmos Chem Phys 2018;18(1):445–65. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/445/2018/>

Deroubaix A, Menut L, Flamant C, Brito J, Denjean C, Dreiling V, et al. **Diurnal cycle of coastal anthropogenic pollutant transport over southern West Africa during the DACCIIWA campaign.** Atmos Chem Phys Discuss 2018;1–44. <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2018-766/>

Djossou J, Léon J, Akpo AB, Lioussé C, Yoboué V, Bedou M, et al. **Mass concentration, optical depth and carbon composition of particulate matter in the major southern West African cities of Cotonou (Benin) and Abidjan (Côte d'Ivoire).** Atmos Chem Phys 2018;18(9):6275–91. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/6275/2018/>

Dunning CM, Allan RP, Black E. **Identification of deficiencies in seasonal rainfall simulated by CMIP5 climate models.** Environ Res Lett 2017;12(11):114001. <http://stacks.iop.org/1748-9326/12/i=11/>

Dunning CM, Black ECL, Allan RP. **The onset and cessation of seasonal rainfall over Africa.** J Geophys Res Atmos 2016;121(19):11,405–11,424. <http://doi.wiley.com/10.1002/2016JD025428>

Flamant C, Knippertz P, Fink AH, Akpo A, Brooks B, Chiu CJ, et al. **The Dynamics–Aerosol–Chemistry–Cloud Interactions in West Africa Field Campaign: Overview and Research Highlights.** Bull Am Meteorol Soc 2018; 99(1):83–104. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-16-0256.1>

Flamant C, Deroubaix A, Chazette P, Brito J, Gaetani M, Knippertz P, et al. **Aerosol distribution in the northern Gulf of Guinea: local anthropogenic sources, long-range transport, and the role of coastal shallow circulations.** Atmos Chem Phys 2018;18(16):12363–89. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/12363/2018/>

Hannak L, Knippertz P, Fink AH, Kniffka A, Pante G. **Why Do Global Climate Models Struggle to Represent Low-Level Clouds in the West African Summer Monsoon?** J Clim 2017;201;30(5):1665–87. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-16-0451.1>

Haslett SL, Taylor JW, Deetz K, Vogel B, Babić K, Kalthoff N, et al. **The radiative impact of out-of-cloud aerosol hygroscopic growth during the summer monsoon in southern West Africa.** Atmos Chem Phys Discuss 2018; 1–25. <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2018-805/>

Hill PG, Allan RP, Chiu JC, Bodas-Salcedo A, Knippertz P. **Quantifying the Contribution of Different Cloud Types to the Radiation Budget in Southern West Africa.** J Clim 2018;31(13):5273–91. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-17-0586.1>

Hill PG, Allan RP, Chiu JC, Stein THM. **A multisatellite climatology of clouds, radiation, and precipitation in southern West Africa and comparison to climate models.** J Geophys Res Atmos 2016;121(18):10,857–10,879. <http://doi.wiley.com/10.1002/2016JD025246>

Kalthoff N, Lohou F, Brooks B, Jegede G, Adler B, Babić K, et al. **An overview of the diurnal cycle of the atmospheric boundary layer during the West African monsoon season: results from the 2016 observational campaign.** Atmos Chem Phys 2018;18(4):2913–28. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/2913/2018/>

Keita S, Lioussé C, Yoboué V, Dominutti P, Guinot B, Assamoi E, et al. **Particle and VOC emission factor measurements for anthropogenic sources in West Africa.** Atmos Chem Phys 2018;18(10):7691–708. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/7691/2018/>

Kniffka A, Knippertz P, Fink AH. **The role of low-level clouds in the West African monsoon system.** Atmos Chem Phys Discuss 2018;(September):1–37. <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2018-743/>

Knippertz P, Coe H, Chiu JC, Evans MJ, Fink AH, Kalthoff N, et al. **The DACCIIWA Project: Dynamics–Aerosol–Chemistry–Cloud Interactions in West Africa.** Bull Am Meteorol Soc 2015;96(9):1451–60. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-14-00108.1>

Knippertz P, Evans MJ, Field PR, Fink AH, Lioussé C, Marsham JH. **The possible role of local air pollution in climate change in West Africa.** Nat Clim Chang Nature Publishing Group; 2015;5(9):815–22. <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate2727>

Knippertz P, Fink AH, Deroubaix A, Morris E, Tocquer F, Evans M, Flamant C, Gaetani M, Lavaysse C, Mari C, Marsham JH, Meynadier R, Affo-Dogo A, Bahaga T, Brosse F, Deetz K, Guebsi R, Latifou I, Maranan M, Rosenberg P, D., Schlueter A., 2017. **A meteorological and chemical overview of the DACCIIWA field campaign in West Africa in June–July.** Atmos. Chem. Phys. 2017; 17, 10893–10918. <https://www.atmos-chem-phys.net/17/10893/2017/>

Maranan M, Fink AH, Knippertz P. **Rainfall types over southern West Africa: Objective identification, climatology and synoptic environment.** Q J R Meteorol Soc 2018;144 (714):1628–48. <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.3345>

McFarquhar GM, Baumgardner D, Bansemmer A, Abel SJ, Crosier J, French J, et al. **Processing of Ice Cloud In Situ Data Collected by Bulk Water, Scattering, and Imaging Probes: Fundamentals, Uncertainties, and Efforts toward Consistency.** Meteorol Monogr 2017; 58:11.1–11.33. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-16-0007.1>

Menut L, Flamant C, Turquety S, Deroubaix A, Chazette P, Meynadier R. **Impact of biomass burning on pollutant surface concentrations in megacities of the Gulf of Guinea.** Atmos Chem Phys 2018;18(4):2687–707. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/2687/2018/>

Pacifico F, Delon C, Jambert C, Durand P, Morris E, Evans MJ, et al. **Measurements of nitric oxide and ammonia soil fluxes from a wet savanna ecosystem site in West Africa during the DACCIWA field campaign.** Atmos Chem Phys Discuss 2018; 1–37. <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2017-1198/>

Pfeifroth U, Trentmann J, Fink AH, Ahrens B. **Evaluating Satellite-Based Diurnal Cycles of Precipitation in the African Tropics.** J Appl Meteorol Climatol 2016;55(1):23–39. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JAMC-D-15-0065.1>

Reinares Martínez I, Chaboureaud J-P. **Precipitation and Mesoscale Convective Systems: Radiative Impact of Dust over Northern Africa.** Mon Weather Rev 2018;146(9):3011–29. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR-D-18-0103.1>

Reinares Martínez I, Chaboureaud J-P. **Precipitation and Mesoscale Convective Systems: Explicit versus Parameterized Convection over Northern Africa.** Mon Weather Rev 2018;146(3):797–812. <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR-D-17-0202.1>

van der Linden R, Fink AH, Redl R. **Satellite-based climatology of low-level continental clouds in southern West Africa during the summer monsoon season.** J Geophys Res Atmos 2015;120(3):1186–201. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JD022614>

Young MP, Chiu JC, Williams CJR, Stein THM, Stengel M, Fielding MD, et al. **Spatio-temporal variability of warm rain events over southern West Africa from geostationary satellite observations for climate monitoring and model evaluation.** Q J R Meteorol Soc 2018; <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.3372>

Autres publications utilisées dans ce rapport

Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., van Aardenne, J. A., Monni, S., Doering, U., Olivier, J. G. J., Pagliari, V., Janssens-Maenhout, G., **Gridded Emissions of Air Pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4.3.2**, Earth System Sci. Data Disc., 1–40, 2018, <https://doi.org/10.5194/essd-2018-31>

IPCC, 2013: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Liousse, C., Assamoi, E., Criqui, P., Granier, C., Rosset, R., **Explosive growth in African combustion emissions from 2005 to 2030**, Environmental Research Letters, 9 (3), 035003, 2014, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035003>

Vogel, P.; Knippertz, P.; Gneiting, T.; Fink, A. H.; Schlueter, A., 2018: **Skill of global raw and postprocessed ensemble predictions of rainfall over northern tropical Africa.** Wea. Forecasting, 33, 369–388, doi:10.1175/WAF-D-17-0127.1.



Pour plus d'informations sur le projet DACCIIWA, consultez les site

www.dacciwa.eu



DACCIIWA
Dynamics-aerosol-chemistry-cloud
interactions in West Africa



Conclusions du
projet **DACCIIWA**
à l'intention des
décideurs



financé par la
Commission européenne

Imprimé sur du papier recyclé FSC



financé par la
Commission européenne