

SIMULATION DES PRÉCIPITATIONS ET DES TEMPÉRATURES ANNUELLES DU SUD-EST CÔTIER IVOIRIEN À L'HORIZON 2050 AVEC LE LOGICIEL LARS - WG 5 ET LE MODÈLE HADCM3

Oulaï Jean Gautier KPAN¹, Franck Maxime GNAMBA¹, Zégbé Narcisse GAH², Brou KOUAMÉ³, Derving BAKA², Yéi Marie Solange OGA² Jean Biémi²

Résumé

Dans le contexte de changement climatique qui secoue le monde, des déficits pluviométriques sont observés en Côte d'Ivoire depuis la fin des années 1960. La connaissance de l'évolution future des paramètres climatiques (température et la pluviométrie) serait primordiale pour planifier des objectifs de développement durables dans la Région du Sud-Est côtier (d'Abidjan à Aboisso) de la Côte d'Ivoire. La méthodologie appliquée est basée sur l'utilisation du logiciel LARS-WG 5 et du modèle HadCM3 suivant les scénarios SRA1B et SRA2.

Les résultats de la projection future de la température donnent une augmentation de 0,10°C à 0,19°C entre 2015 et 2050 respectivement avec les scénarios SRA1B et SRA2 du modèle HadCM3 inclus dans le logiciel LARS-WG. Cette tendance, comparée à la température moyenne de la chronique 1963-2014 de la SODEXAM, indique une élévation de 1,20 (SRA1B) à 1,29°C (SRA2). Le logiciel LARS-WG a également permis de prédire une hausse de la pluviométrie de 3,06 à 5,85% entre 2015 et 2050. Cependant cette tendance optimiste correspond à une baisse de la pluviométrie de 1,86% (SRA2) à 4,45% (SRA1B) comparativement à la moyenne obtenue durant la chronique d'observation de la SODEXAM (1963-2014). Ces tendances s'inscrivent dans celle du climat mondial caractérisée par la sécheresse et le réchauffement de la planète Terre.

Mots-clés : pluviométrie, température, LARS-WG 5, HadCM3, scénarios SRA1B et SRA2, Sud-Est côtier, Côte d'Ivoire.

Abstract

SIMULATION OF ANNUAL PRECIPITATION AND TEMPERATURES IN THE SOUTHEAST COASTAL IVORY COAST IN 2050 WITH THE LARS- SOFTWARE WG 5 AND THE HADCM3 MODEL

In the context of climate change that is shaking the world, rainfall deficits have been observed in Côte d'Ivoire since the end of the 1960s. Knowledge of the future evolution of climatic parameters (temperature and rainfall) would be essential for planning objectives. Sustainable development in Côte d'Ivoire's south-eastern coastal region (Abidjan to Aboisso). The methodology applied is based on the use of the LARS-WG 5 software and the HadCM3 model according to SRA1B and SRA2 scenarios.

The results of the future projection of the temperature give an increase of 0.10 ° C to 0.19 ° C between 2015 and 2050 respectively with the SRA1B and SRA2 scenarios of the HadCM3 model included in the LARS-WG software. This trend, compared to the average temperature of SODEXAM's 1963-2014 chronicle, indicates a rise of 1.20 (SRA1B) to 1.29 ° C (SRA2). The LARS-WG software also predicted an increase in rainfall of 3.06 to 5.85% between 2015 and 2050. However, this optimistic trend corresponds to a decrease in rainfall of 1.86% (SRA2) to 4.45% (SRA1B) compared to the average obtained during the observation period of SODEXAM (1963-2014). These trends are consistent with the global climate characterized by drought and global warming.

KEY WORDS: Rainfall, temperature LARS-WG 5, HadCM3, scenarios SRA1B and SRA2, South-East Coast, Côte d'Ivoire.

¹Département des géosciences, Université Paleforo Gon Coulibaly, Korhogo, Côte d'Ivoire, B.P. 700 Korhogo, +225 08187415, kpanoulaijeangautier@yahoo.fr

²Laboratoire des Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire.

³Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Bouaké, Côte d'Ivoire

I. INTRODUCTION

La région du Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire est une zone fortement dominée par les activités agricoles. En effet, cette région possède des atouts climatiques qui favorisent le développement et l'implantation des cultures vivrières et industrielles d'importance majeure dans le tissu économique du pays. Malheureusement, les paramètres climatiques connaissent ces dernières décennies de fortes perturbations : une réduction de la pluviométrie et une augmentation de la température (KPAN, 2017).

Les populations agricoles s'étant montrées vulnérables aux effets des changements climatiques observés depuis les années 1970 (KPAN, 2017), la connaissance de l'évolution future du climat permettra de les préparer à de nouvelles

conditions. Le logiciel Lars-WG 5 et le modèle HadCM3, qui y est intégré, sont des outils couramment utilisés dans le monde. L'utilisation du modèle HadCM3 dans la présente étude est basée sur sa résolution, largement suffisante pour couvrir la zone d'étude, et sur ses 39 niveaux susceptibles de prendre en compte les paramètres hydroclimatiques de la région.

II. CADRE D'ÉTUDE ET CONTEXTE CLIMATIQUE

La zone d'étude est située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 3°00 et 4°00 Ouest et les latitudes 5°00 et 5°30 Nord. Couvrant une superficie de 5056 km² (Fig. 1), cette région a une population de 803 500 habitants (densité de 158 habitants/km²) et un taux d'accroissement démographique annuel de 1,59 % (INS, 2014). Plusieurs unités agro-

industrielles (PALMCI, PALMAFRIQUE, AGRIVAR, etc.) et de grandes plantations d'hévéa et de palmier huile y sont présentes.

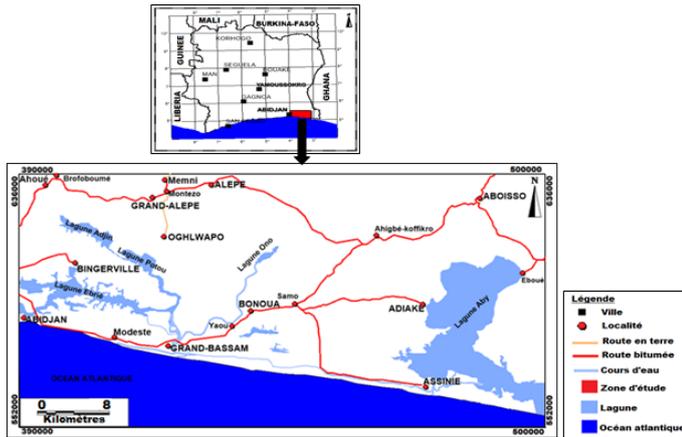


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

III. DONNEES

III.1 Données hydroclimatiques, analyses statistiques et critiques

Elles se composent de données pluviométriques, hygrométriques et hydrométriques au pas de temps journalier. Les données pluviométriques proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) et du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA). Elles concernent quatre (4) stations qui sont Abidjan-aéroport, Adiaké, Alépé et Bingerville sur la période 1960-2014. Cette période est la plus longue commune pour ces stations. Parmi ces stations, seule celle d'Abidjan-aéroport dispose de données journalières de pluviométrie. Également, les données de température, d'humidité relative et d'insolation provenant de ces différentes stations synoptiques ont été utilisées selon les couvertures périodiques indiquées dans le tableau I.

Tableau I : Tableau récapitulatif des données hydroclimatologiques

Stations	Pluviométrie (mm)	Température (°C)	Insolation (Heures)	Humidité relative (%)
Abidjan-aéroport	1960-2014	1961-2014	1970-2014	2000-2014
Adiaké	1960-2014	1973-2014		
Alépé (Lamé)	1960-2014	2000-2014	2000-2014	2000-2014
Bingerville	1960-2014	1971-2014	2000-2014	

1. Les précipitations

La région d'Abidjan-Aboisso est marquée par un climat chaud et humide. À l'image de la Côte d'Ivoire, le régime pluviométrique de la région est influencé par le déplacement du front intertropical. Dans la période 1960-1982, les précipitations étaient plus importantes et elles dépassaient 2000 mm sur l'ensemble des quatre stations météorologiques. À partir de 1983 jusqu'en 1999, cette région a connu une régression des amplitudes pluviométriques. Celles-ci sont restées en moyenne inférieures à 1500 mm. Depuis l'année 2000, une reprise des précipitations est amorcée dans la région et les moyennes annuelles observées sont presque toutes supérieures à 1500 mm (Fig. 2). Les valeurs moyennes

mensuelles maximales des précipitations au niveau des stations s'observent dans le mois de juin.

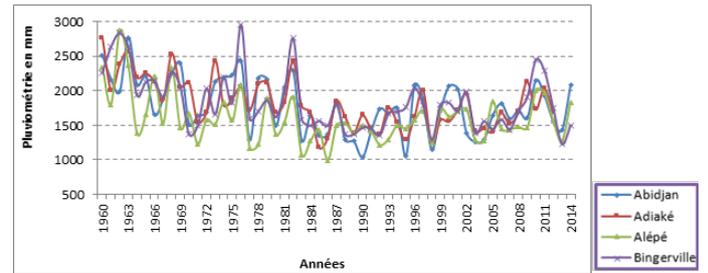


Figure 2: Variabilité temporelle de la pluviométrie annuelle de la région

2. Température

Les moyennes annuelles de la température, dans la région étudiée, oscillent entre 24 et 28°C. La figure 3 montre les différentes fluctuations de ces températures. Elles ont connu une hausse spectaculaire à partir de 1998 après une période froide (entre 1984 et 1997).

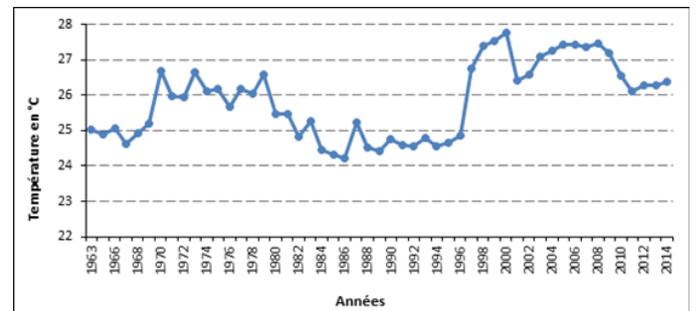


Figure 3 : Température moyenne annuelle du Sud-Est côtier (Abidjan-Aboisso) de 1961 à 2014

IV. MÉTHODOLOGIE

IV.1 Contexte du choix des scénarios climatiques, du modèle HadCM3 et du logiciel LARS-WG

IV.1.1 Choix des scénarios climatiques

La création du Groupe International d'Expert sur l'évolution du Changement climatique (GIEC dont l'équivalent en anglais est IPCC) exprime la volonté de l'ONU à rechercher des solutions aux problèmes posés par le dérèglement climatique dans le monde. Dès lors, plusieurs études scientifiques sont menées dans le monde. Celles-ci sont basées sur des Modèles Climatiques Globaux (MCG) et Régionaux (MCR) qui permettent non seulement de décrire le climat actuel mais aussi de faire des projections futures en s'appuyant sur le climat passé. Cela nécessite l'utilisation de puissants ordinateurs, de logiciels adéquats, de modèles climatiques plus précis et de scénarios plus appropriés pour une région donnée.

Les scénarios climatiques sont des simulations issues de différents modèles du climat qui sont des représentations numériques du système climatique, basées sur des équations qui régissent les processus physiques des composantes du climat.

Les scénarios A1 (monde futur avec une croissance économique et de la population très rapide), A2 (un monde très hétérogène avec une croissance plus lente), B1 (monde convergent avec la même population mondiale et l'introduction de technologies

propres) et **B2** (monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale) et/ou leurs variantes (A1B, A1B2, etc.) sont très souvent utilisés.

Dans le cadre de la présente étude, les scénarios A1B et A2 ont été utilisés.

IV.1.2 Utilisation du modèle HadCM3 pour l'étude des tendances hydroclimatiques

Les travaux de plusieurs auteurs (Jones and Thornton (2003), Butt et al. (2005), Fischer et al. (2005) Adejuwon (2006), Liu et al. (2008), Lobell et al. (2008), Nelson et al. (2009), Müller et al. (2010) et Roudier et al. (2011)) cités par KPAN (2017), ont utilisé, pour la plupart, les modèles climatiques généraux et régionaux. Il est important de souligner que les modèles hydrologiques sont nombreux et diffèrent en fonction des objectifs de recherche. Il y a les modèles empiriques globaux, les modèles conceptuels globaux et les modèles physiques spatialisés (SORO, 2014). En Afrique de l'Ouest et Centrale, les modèles couramment utilisés sont appliqués sur des bassins versants dont la taille minimale est 100 km². Les modèles GR4J et TOPMODEL ont permis à Le Lay (2006) d'étudier l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Bénin. Dezetter (1991) a appliqué les modèles globaux CREC et MODGLO sur une vingtaine de bassins versants pour prévoir les apports décennaux sur les cours supérieurs du Niger, du Bandama et du Sassandra. Mais le modèle GR2M est de loin celui qui a apporté plus d'informations dans la connaissance des bassins versants en Afrique de l'Ouest notamment la relation pluie-débit (Ouedraogo, 2001 ; Ardoïn-Bardin, 2004 ; Sighomnou, 2004 ; Vissin, 2007). Ibrahim (2012) a utilisé cinq modèles climatiques régionaux (HadRM3P, REMO, RACMO, RCA et CCLM) avec GR2M pour la prévision des ressources en eau au Burkina Faso. En Côte d'Ivoire, Koffi (2007) et Kouassi (2007) l'ont utilisé dans le bassin versant du Bandama Blanc et du N'zi confirmant ainsi la capacité du modèle GR2M à reproduire la dynamique des écoulements. L'utilisation des modèles hydrologiques distribués fait l'objet de quelques travaux. Ainsi, Konan (2002) et Kouamé (2011), respectivement avec les modèles distribués CEQUEAU et HYDROTEL, ont mis en évidence les phénomènes hydrologiques qui régissent les bassins versants du Sassandra et du N'zo (sous-bassin du bassin du Sassandra). Les plus récurrents, notamment HadCM (1, 2 et surtout 3), CGCM (1 et 2), CSIRO, ECHAM5, EPIC, MAGICC et NCAR, ont permis, de façon générale, de connaître la tendance évolutive des paramètres hydroclimatiques de certains pays de l'Afrique subsaharienne (Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Mali, Niger et Nigéria) et de modéliser leurs impacts sur certaines cultures (manioc, maïs, sorgho, etc.).

Les caractéristiques de quatre d'entre ces modèles sont données par le tableau II. Il en ressort, par exemple, qu'ECHAM (4 et 5) présente quelques difficultés. Bien qu'applicable en Côte d'Ivoire, ce modèle pourrait présenter des résultats qui ne reflètent pas la réalité.

Contrairement à ECHAM, le modèle HadCM3 s'utiliserait

aisément à la zone du Sud-Est côtier ivoirien. En effet, en plus de sa résolution largement suffisante pour couvrir la zone d'étude, ledit modèle compte 39 niveaux susceptibles de prendre en compte les paramètres hydroclimatiques de la région. En effet, les niveaux atmosphériques, par exemple, calculent les vents, le transfert de chaleur le rayonnement l'humidité relative et l'hydrologie de surface dans chaque grille tridimensionnelle terrestre selon le modèle.

Tableau II : Caractéristiques succinctes de certains modèles climatiques

Modèle	Caractéristiques succinctes
HadCM2 HadCM3	Résolution 2,5°×3,75° – 19 niveaux atmosphériques, 20 niveaux océaniques.
CSIRO-Mk2	Résolution 625×350 km – 9 niveaux atmosphériques, 1 niveau océanique.
ECHAM 4 et 5	Résolution 2,8°×2,8° – 19 niveaux atmosphériques irréguliers. Problèmes connus au niveau de la modélisation troposphérique.
CGCM 1 et 2	Résolution 3,7°×3,7° – 10 niveaux atmosphériques, 29 niveaux océaniques (à résolution 1,8°×1,8°)

Au regard de ce qui précède, nous remarquons que tous les modèles hydroclimatologiques cités donnent de très bons résultats. Cependant, compte tenu du fait de l'absence d'un bassin versant typique à la zone étudiée, il serait difficile de les appliquer hormis le modèle HadCM3. En effet, les principaux cours d'eau de la zone étudiée (fleuve Comoé, rivières Bia, Lamé, Soumié) n'y ont ni leurs sources, ni un bassin ou un sous bassin susceptible d'être utilisé comme l'indique le réseau hydrographique (Fig. 4). C'est pourquoi, notre choix s'est porté donc sur le modèle HadCM3.



Figure 4 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

IV.1.3 Choix du logiciel LARS-WG 5 pour l'étude des tendances hydroclimatiques

Il existe également une gamme de logiciels qui permettent de faire des projections hydroclimatiques. En Afrique, les logiciels WEAP, SWAT, RAS, Aquarius, RIBASIM, MIKE 21, BASIN Suite et LARS-WG ont été utilisés. Hormis le dernier modèle cité, les autres sont pratiques pour les bassins versants couplés à la géochimie des sols. Ils sont ainsi utilisés pour les simulations interactives fluviales et aquifères associées aux caractéristiques des sols. La limite de l'utilisation de ces logiciels dans la zone étudiée dans ce présent travail est également l'absence d'un bassin versant typique à la région.

Par contre, LARS-WG est un générateur stochastique de climat basé sur un modèle numérique qui produit, comme variable de sortie, une série chronologique artificielle de données météorologiques à très haute résolution temporelle à la limite des ressources informatiques avec des propriétés statistiques semblables à celles des séries observées (Racsko et al., 1991 ; Semenov et al., 1998). Ces paramètres d'entrées sont les données *in situ* issues des stations climatiques (pluviométrie, température et souvent insolation). Soulignons qu'il existe deux types de générateurs stochastiques. Le type « Richardson » (Richardson, 1981 ; Richardson et Wright, 1984) ou WGEN et le type « en série » (Racsko et al., 1991 ; Semenov et al., 1998) ou LARS-WG. Cependant, WGEN se distingue de LARS-WG par le fait que le second utilise un modèle de distribution empirique à la place de la distribution prédéfinie utilisée dans le premier cas. Ainsi, la précision de la modélisation augmente [Semenov et al. (1998)] de l'utilisation directe des observations pour élaborer le modèle séquentiel de distribution d'un état plutôt que l'ajustement d'une distribution prédéfinie aux observations. LARS-WG est applicable aux stations climatiques, aux données hydrologiques ou d'agriculture, etc.

IV.2 Démarche méthodologique

IV.2.1 Présentation du logiciel LARS-WG

Le logiciel LARS-WG est un générateur stochastique de données météorologiques conçu en 2002 par Mikhaïl Semenov de Rothamsted Research, au Royaume-Uni. Ce logiciel est conçu sur un modèle statistique capable de simuler les données météorologiques quotidiennes d'après les caractéristiques statistiques observées du temps en un seul lieu.

LARS-WG 5 intègre des projections climatiques à partir des ensembles multi-modèles de GCM utilisés dans le quatrième rapport du GIEC. Ce logiciel se base sur les états initiaux de l'environnement et de l'atmosphère pour faire des projections. LARS-WG 5 ne prend en compte seulement que les données journalières. C'est pourquoi, les données utilisées pour étudier la tendance de l'évolution de la variabilité climatique de 2015 à 2050 sont celles fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour la station d'Abidjan-aéroport qui dispose des données journalières de précipitation, de température (minimum et maximum) et du rayonnement solaire.

LARS-WG contient le modèle HadCM3 qui est un modèle climatique de dernière génération, couplé avec l'océan et l'atmosphère. Ce Modèle de Circulation Général Océan Atmosphère incorpore aussi les transports d'eau dans l'atmosphère. Figurant parmi les modèles recommandés par l'IPCC, il est utilisé dans un grand nombre d'études d'impacts de changement climatique dans les pays européens (GIEC, 2013) et en Afrique (SULTAN, 2011).

La maille du modèle HadCM3, qui est 150-400 km \times 150-400 km, couvre largement la zone du Sud-Est côtier ivoirien (d'Abidjan à Aboisso). Le logiciel Lars-WG 5 et le modèle HadCM3, qui y est intégré, sont des outils

couramment utilisés dans le monde. Le choix du modèle HadCM3 dans la présente étude est fondé sur sa résolution, largement suffisante pour couvrir la zone d'étude, et sur ses 39 niveaux susceptibles de prendre en compte les paramètres hydroclimatiques de la région.

IV.2.1 Schéma du processus stochastique de génération de temps

Le processus de génération des données météorologiques synthétiques peut être divisé en trois étapes distinctes: analyse du site ou étalonnage du modèle, validation des données et génération de données météorologiques synthétiques (M. A. SEMENOV et E. M. BARROW, 2002). L'interface de LARS-WG 5 est présentée par la **figure 5**.

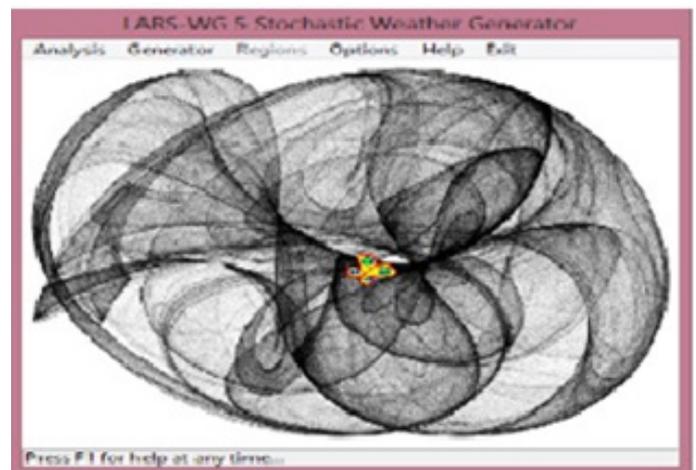


Figure 5 : Interface du logiciel LARS-WG 5

a. Étalonage du modèle

L'étalonnage du modèle est effectué dans LARS-WG en mettant en œuvre l'ANALYSE DU SITE qui analyse les données météorologiques quotidiennes observées de 1963 à 2014 (précipitations, température maximale et minimale et rayonnement solaire) à la station d'Abidjan-aéroport afin de déterminer leurs caractéristiques statistiques. L'information résultante est stockée dans deux fichiers à savoir un fichier **wgx** qui est le fichier de paramètres du site et un fichier **stx** qui est le fichier contenant des tests statistiques supplémentaires. Les deux fichiers ne doivent pas être modifiés. Ils sont utilisés plus tard dans le processus de génération.

b. Validation ou performance du modèle

Dans cette étape, les caractéristiques statistiques des données observées sont comparées à celles des données synthétiques générées. Le Q-TEST est appliqué en utilisant les paramètres dérivés des données observées d'origine (celles d'Abidjan-aéroport de 1963 à 2014). Cela implique plusieurs tests statistiques dont le Kolmogorov-Smirnov (K-S) Test et le test du Khi-carré pour comparer la probabilité des distributions, le Student-test (ou test t) pour comparer les moyennes et le Fisher-test (ou test F) pour comparer les écarts types. Les deux derniers tests déterminent, à travers le p-value, si les valeurs moyennes et les écarts-types des données synthétiques sont significativement différentes de celles de l'ensemble de données observées d'origine.

Outre les tests statistiques réalisés par le modèle lui-même (K-S test, test t, test F), la performance du modèle et sa robustesse ont été également évaluées à l'aide de critères numériques et graphiques. L'analyse des résultats de simulation est portée sur les performances des modèles en phase de calage et en validation. En effet, les performances au calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation (A. M. KOUASSI et al., 2017). Pour évaluer la performance des modèles développés dans cette étude, le coefficient de corrélation, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la moyenne biaisée, ont été utilisés comme critères d'évaluation (A. M. KOUASSI et al., 2017).

Le coefficient de corrélation (R) est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la variable réelle ou mesurée et la variable calculée. Elle est donnée par l'équation 1:

$$R = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X}) \times (X_i' - \bar{X}')}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_i (X_i' - \bar{X}')^2}} \quad (1)$$

avec :

- X_i : paramètre (pluviométrie, température) mesuré ;
- X_i' : paramètre (pluviométrie, température) simulé ;
- \bar{X} : moyenne du paramètre mesuré ;
- \bar{X}' : moyenne du paramètre simulés.

La relation est dite parfaite si $R = 1$; très forte si $0,8 \leq R < 1$; forte si R se situe entre 0,5 et 0,8 ; d'intensité moyenne si R se situe entre 0,2 et 0,5 ; faible si R se situe entre 0 et 0,2 ; nulle si $R=0$ (A. M. KOUASSI et al., 2017).

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée comme une autre mesure de la performance globale du modèle. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision. Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (équations 2) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_i')^2}{n}} \quad (2)$$

Le biais est un critère permettant de mettre en évidence l'écart entre deux grandeurs. Il doit être minimisé (l'optimum est la valeur nulle). Il donne alors l'erreur relative entre les valeurs observées et celles simulées lors des analyses. Lorsque la moyenne biaisée « B » tend vers zéro, les résultats du modèle sont sans biais, c'est-à-dire que les deux valeurs sont proches et donc le modèle est performant. Ce paramètre est défini par la relation suivante (équation 3) :

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - X_i'| \quad (3)$$

Avec :

n : taille de l'échantillon

X_i : paramètre (pluviométrie, température) mesuré ;

X_i' : paramètre (pluviométrie, température) simulé.

Tous ces tests permettent de montrer la performance et la capacité

de LARS-WG à simuler les données sur le site choisi.

c. Scénario de génération de climat

Le logiciel LARS-WG 5 génère des données météo synthétiques futures en combinant un fichier de scénario contenant des informations sur les changements dans les données hydro-climatiques (précipitations, température minimale/maximale, rayonnement solaire et l'évapotranspiration potentielle) en fonction des données météorologiques de base (52 ans de données observées) à Abidjan. Les calculs sont basés sur les équations 4, 5 et 6 :

- pour la pluviométrie

$$\rho = CC_s \cdot mpr \frac{P_{wet}^{CC}}{P_{wet}^{wet}} \quad (4)$$

Où P_{wet} et P_{wet}^{CC} sont des probabilités d'un jour humide pour les climats actuels et futurs, calculées sur la base des paramètres LARS-WG pour le site et des changements dans la longueur de la série humide / sèche du scénario climatique CC :

$$\rho = CC_s \cdot rd \frac{\bar{R}_{wet} P_{wet}^{CC} + \bar{R}_{dry} P_{dry}^{CC}}{\bar{R}_{wet} P_{wet}^{wet} + \bar{R}_{dry} P_{dry}^{wet}} \quad (5)$$

Où \bar{R}_{wet} et \bar{R}_{dry} sont prévus pour un jour humide/sec à partir des données de base. La forme de la distribution quotidienne de température, changeant quotidiennement pour les jours humides et secs, est approximée par la distribution normale avec les valeurs de moyenne et les

écart-types calculées par une série de Fourier f (t) d'ordre 3 selon :

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{j=1}^3 (a_j \cos(j\omega t) + b_j \sin(j\omega t)) \quad (6)$$

Où t = jour Julian, $\omega = 2\pi/365$. Pour ajuster une série de Fourier à une température maximale pour le climat futur, les nouvelles valeurs mensuelles de la température moyenne sont calculées en ajoutant les moyennes mensuelles observées et les variations correspondantes Δ et en recalculant les coefficients de Fourier pour les nouvelles valeurs moyennes. Pour la température maximale, Δ est calculé selon l'équation 7 :

$$\Delta = CC_s \cdot tx - T_{wet}^{max} (P_{wet}^{CC} - P_{wet}^{wet}) - T_{dry}^{max} (P_{dry}^{CC} - P_{dry}^{wet}) \quad (7)$$

La température minimale est déterminée de la même façon.

Les scénarios sélectionnés (qui sont intégrés dans le modèle HadCM3) sont le scénario optimiste d'émission A1B et le scénario d'émission A2 considéré pessimiste. Le choix de ces deux scénarios permet de faire des comparaisons entre les résultats générés afin de mieux apprécier l'évolution future du climat de la région. De plus, ces scénarios apparaissent comme les plus réalistes et les mieux adaptés pour l'Afrique de l'Ouest en particulier à la Côte d'Ivoire au regard de sa situation géographique sur le globe et des comportements des populations à la fin du siècle dernier (les années 1990). LARS-WG présente les horizons 2011-2030, 2046-2065 et 2080-2099. Dans le cas de cette étude, l'horizon concerné est l'horizon 2050, faisant partie de la période 2046-2065.

V. RÉSULTATS

Les données de sortie du logiciel sont la pluviométrie, la

température (minimum et maximum), l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'insolation et la vitesse du vent au pas de temps journalier. Dans ce présent travail, nous ne présenterons que les résultats de la pluviométrie et la température calculés au pas de temps annuel. Les scénarii SRA1B et SRA2 ont été projetés

V.1 Capacité de LARS-WG 5 à reproduire les données observées

Les différents tests appliqués lors du Q-TEST ont permis à LARS-WG 5 d'ajuster et de simuler presque efficacement les données de température (figure 5a) et de pluviométrie (figure 5b) de la SODEXAM (1963-2014). Les différents p-value obtenus, respectivement 0,042 et 0,045, sont inférieurs à 0,05. Le **tableau III** donne les résultats du calcul du coefficient de corrélation (R), de la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE) et du Biais. Ces valeurs statistiques permettent également d'évaluer la robustesse du logiciel LARS-WG 5 à reproduire les données mesurées.

L'analyse des résultats de performance obtenus (Tableau I) montre que, dans l'ensemble, les deux modèles expriment en calage, des performances presque similaires. Pour les deux modèles, des valeurs très fortes de coefficient de corrélation ont été obtenues. Pour la pluviométrie, elles varient de 0,92 à 0,96 tandis que pour la température, elles sont de 0,93 et 0,95. Les valeurs de biais (B) inférieures à 3 et les valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE) oscillent autour de 0,6. Ces différents résultats sont très satisfaisants dans l'ensemble.

La **figure 6** présente les données de la SODEXAM combinées avec celles simulées par le logiciel LARS-WG à travers les scénarii SRA1B et SRA2.

Ces résultats permettent de faire les projections de ces données jusqu'en 2050 en utilisant les scénarii optimiste SRA1B et pessimiste SRA2 du modèle HadCM3 de LARS-WG 5.

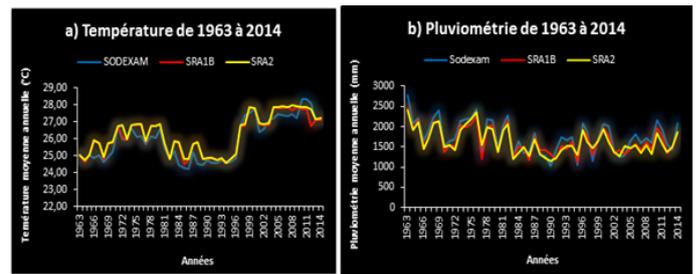


Figure 6 : Simulation des données de la SODEXAM (1963-2014) par LARS-WG 5

V.2 Résultats de la simulation de la température et de la pluviométrie en 2050

Les températures moyennes interannuelles et les pluviométries ont été générées par le modèle HadCM3 de LARS-WG 5. Ces courbes de tendance qui en résultent concernent les nouvelles données de la SODEXAM ainsi que les données issues des scénarii optimistes SRA1B et pessimiste SRA2 sur la période 2015-2050. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau IV.

Selon ce tableau, les températures moyennes prévues entre 2015 et 2050 sont 27,16°C et 27,25°C respectivement pour les scénarii SRA1B et SRA2. Ces estimations faites à l'horizon 2050 (2015-2050) indiquent des hausses de températures de 0,10°C (SRA1B) et de 0,19°C (SRA2) par rapport à celle prédite pour la SODEXAM (27,06°C). Un réchauffement de la zone d'étude est donc constaté. Les années à venir seraient un peu plus chaudes

Concernant la pluviométrie, les estimations avec le scénario SRA1B indiquent 1682,68 mm de pluie sur la période allant de 2015 à 2050. Ces précipitations seront en légère hausse (50 mm) à l'horizon 2050 comparativement à celle de la SODEXAM qui est 1632,68 mm. Également, le scénario SRA2 prédit une augmentation des précipitations de 95,56 mm pour ledit horizon. En effet, cette variation est consécutive à la différence entre les précipitations observées (1632,68 mm) et celles estimées (1728,24 mm). Cela signifie que la période 2015-2050 sera pluvieuse avec une augmentation de précipitation de 3,06 à 5,85%. Cette tendance confirmerait le regain de précipitation observé depuis 2000.

Tableau IV : Températures et pluviométries observées et estimées par le modèle HadCM3 à l'Horizon 2050 à la station d'Abidjan-aéroport

Scénario	Périodes	Température (°C)	Pluviométrie (mm)
SODEXAM	2015-2050	27,06	1632,68
SRA1B	2015-2050	27,16	1682,68
	Variation	0,10	50,00
SODEXAM	2015-2050	27,06	1632,68
SRA2	2015-2050	27,25	1728,24
	Variation	0,19	95,56

Une autre comparaison faite entre les données de la SODEXAM (1963-2014) et les estimations de LARS-WG à travers les scénarii SRA1B et SRA2 montre une hausse de la température comprise entre 1,20 et 1,29°C à l'horizon 2050. À contrario, les précipitations estimées (2015-2050) sont légèrement en baisse par rapport à celles observées (1963-2014). Les prédictions

Tableau III : Autres valeurs statistiques de validation des données simulées

Scénarii	Pluviométrie				Température			
	Moyenne (mm)	R	RMSE	B	Moyenne (mm)	R	RMSE	B
SODEXAM	1761,04				25,95			
SRA1B	1655,47	0,96	0,54	2,03	26,21	0,93	0,518	0,26
SRA2	1637,12	0,92	0,57	2,38	26,29	0,95	0,517	0,23

donnent les valeurs de -32,80 mm (SRA2) et -78,36 mm (SRA1B) qui correspondent respectivement à des déficits pluviométriques de l'ordre 1,86 à 4,45%. Ces résultats sont consignés dans le tableau V.

Tableau V : Comparaison des données climatiques observées (1963-2014) avec celles estimées (2015-2050).

	Périodes	Température (°C)	Pluviométrie (mm)
SODEXAM	1963-2014	25,96	1761,04
SRA1B	2015-2050	27,16	1682,68
SRA2	2015-2050	27,25	1728,24
Variation 1 (SRA1B/SODEXAM)	Horizon	1,20	-78,36
Variation 2 (SRA2/SODEXAM)	2050	1,29	-32,80

En définitive, il faut retenir qu'une élévation des températures sera observée dans la période de 2015 à 2050 par rapport à la chronique 1963-2014. Cette hausse est estimée entre 1,20°C (SRA1B) et 1,29°C (SRA2). Aussi, les prévisions décrivent-elles une augmentation de la pluviométrie de 50 mm (SRA1B) à 95,56 mm (SRA2) entre 2015 et 2050. Cependant cette hausse de 3,06 à 5,85% des précipitations correspondra à des déficits pluviométriques de l'ordre 1,86 à 4,45% par rapport à la période de 1963 à 2014.

La **figure 7** permet d'apprécier les différentes variations de la température et la **figure 8** illustre l'évolution de la pluviométrie.

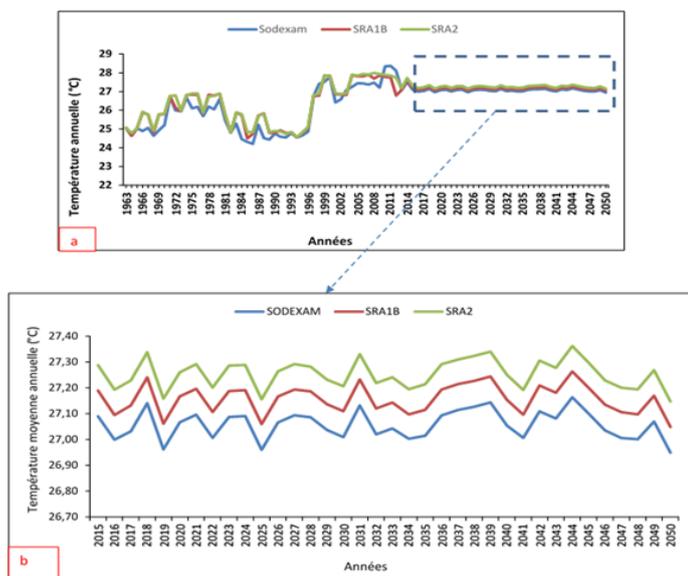


Figure 7 : Températures estimée de 2015 à 2050 (station Abidjan aéroport)

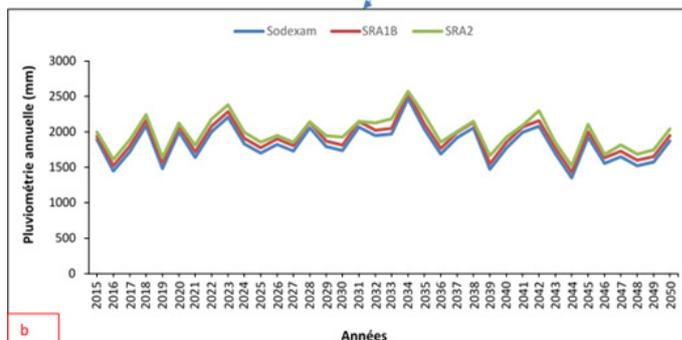
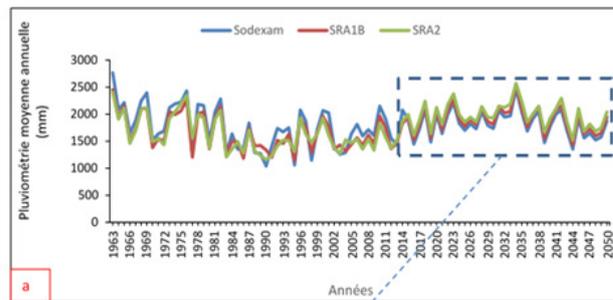


Figure 8 : Pluviométries estimée de 2015 à 2050 (station Abidjan-aéroport)

VI. DISCUSSION

Évolution de la température et de la pluviométrie en 2050

La tendance de l'évolution de la température observée dans la zone d'étude donne une augmentation de 1,20°C à 1,29°C d'ici 2050. Le logiciel LARS-WG a également permis à OGA *et al* (2016) et DANUMAH (2016) de prédire respectivement une élévation de la température de 1,29°C et de 0,32 à 1,36°C vers 2050 dans la même zone. Les résultats de ces auteurs diffèrent des nôtres d'une marge de 0,07 à 0,97°C. Cette différence se situe d'abord au niveau des chroniques d'observation c'est-à-dire 1963-2012 pour Y. M-S. OGA *et al.* (2016) et 1961-2010 pour J. DANUMAH (2016). Cela signifie que deux ans suffiraient pour modifier les prédictions. En effet, le logiciel LARS-WG est un modèle de circulation global (GCM) (M. A. SEMENOV et E. M. BARROW, 2002) qui fonctionne sur la base de données fournies. En son sein, sont incorporés des modèles couplés océan-atmosphère qui permettent d'estimer le climat futur. En outre, les températures observées en 2013 et 2014 à la station d'Abidjan-aéroport (respectivement 26,28 et 26,29°C) ont connu une légère baisse par rapport aux prédictions (27,08°C et 27,12°C), cela, malgré qu'elles présentent la même dynamique notamment la hausse prévue. En 2016, la température moyenne annuelle enregistrée à Abidjan est de 26,65°C. L'année 2016 (26,78°C) a été la deuxième année la plus chaude depuis 1961 en Côte d'Ivoire avec un écart de +1,13°C par rapport la moyenne 1961-1990 (25,65°C) selon SODEXAM (2017). Ainsi, Abidjan a connu une hausse thermique de 1°C par rapport à la moyenne 1961-1990. Les valeurs simulées dans cette étude sont compatibles avec celles observées ainsi qu'avec les projections du GIEC (GIEC, 2013). En effet, dans son dernier rapport, le GIEC confirme qu'au cours du XXI^{ème} siècle, le réchauffement climatique en Afrique sera plus important qu'au niveau mondial. La hausse de la température moyenne entre 1980/99 et 2080/99 s'échelonna entre 3° et 4°C sur l'ensemble du continent, 1,5 fois plus qu'au niveau mondial (Y. M-S. OGA

et al., 2016). Cette hausse sera moins forte au sein des espaces côtiers et équatoriaux (+3°C) et plus élevée dans la partie ouest du Sahara (+4°C) (B. SULTAN, 2011). D'après les prévisions de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques), la température du globe augmenterait de 1,7 à 2,4°C par rapport aux niveaux préindustriels, soit une hausse au moins deux fois supérieure à celle enregistrée entre 1899 et 2005 (OCDE, 2008). Les travaux de M. BOKO *et al.* (2012) révèlent également un accroissement thermique de plus de 1,1°C à l'horizon 2050 au Bénin.

Quant à la tendance d'évolution de la pluviométrie, une hausse de 3,06 à 5,85% des précipitations est prévue par le logiciel LARS-WG d'ici 2050. Les projections faites par P. ROUDIER (2012), GIEC (2013) et G. PANTHOU (2013) en Afrique de l'Ouest confirment les mêmes tendances notamment la hausse des précipitations sur les périodes 2031-2050 et 2071-2090. Cela signifierait que la reprise pluviométrique vécue ces dernières années pourrait connaître une évolution positive les années à venir. Cependant, comparée à la moyenne pluviométrique de la chronique 1963-2014, cette hausse correspondra à une baisse de 1,86 à 4,45%. Y. M-S. OGA *et al.* (2016) ont obtenu également une baisse prévisionnelle de 22% dans la zone par rapport à la période 1961-2012. Pour SODEXAM (2017), une augmentation de la pluviométrie est observée à partir de 2000. Cette tendance à la hausse a été interrompue en 2012. Ainsi, le déficit pluviométrique a été de -12% en 2012 et de -15,3% en 2013, malgré un excédent de +19,9% en 2014. Ces résultats confirment les observations et hypothèses faites par G. E. AKE (2010) et KPAN *et al* (2016) dans la région.

De façon générale, les résultats obtenus avec le logiciel LARS-WG décrivent la même tendance pluviométrique que ceux de la SODEXAM (de 1963 à 2016). Par exemple en 2016, le cumul pluviométrique annuel a été de 1530,4 mm selon SODEXAM (2017) à la station d'Abidjan-aéroport. Cette valeur est sensiblement la même que celle obtenue avec le scénario SRA1B (1523,3 mm) et inférieure à celle donnée par le scénario SRA2 (1610,2 mm). Les pluies diluviennes du mois de juin 2020 démontrent la justesse des résultats obtenus dans ce travail.

VII. CONCLUSION

La présente étude a permis, grâce au logiciel LARS-WG et le modèle HadCM3, de mettre en évidence l'évolution de la température et de la pluviométrie à l'horizon 2050. Ainsi, la projection future de la température donne une augmentation de 0,10°C à 0,19°C entre 2015 et 2050 respectivement avec les scénarii SRA1B et SRA2 du modèle HadCM3 inclus dans le logiciel LARS-WG. Cette tendance, comparée à la température moyenne de la chronique 1963-2014 de la SODEXAM, indique une élévation de 1,20 (SRA1B) à 1,29°C (SRA2).

Le logiciel LARS-WG a également permis de prédire une hausse de la pluviométrie de 3,06 à 5,85% entre 2015 et 2050. Cependant cette tendance optimiste correspond à une baisse de la pluviométrie de 1,86% (SRA2) à 4,45% (SRA1B) comparativement à la moyenne obtenue durant la chronique

d'observation de la SODEXAM (1963-2014). Ces tendances s'inscrivent dans celle du climat mondial caractérisée par la sécheresse et le réchauffement de la planète Terre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. GIEC (2013)- Bilan sur les changements climatiques : Rapport de synthèse GIEC, Stockholm, en Suède, 34 p.
2. KPAN O. J. G. (2017)- Incidence de la variabilité climatique sur les ressources en eau, le développement agricole et la santé des populations dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire et perspectives : cas de la zone littorale d'Abidjan à Aboisso. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny Abidjan,
3. INS (Institut National de la Statistique) (2014)- Recensement générale de la population et de l'habitat de la Côte d'Ivoire 2014, 22 p
4. SULTAN B. (2011)- L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales. Thèse d'habilitation à diriger les recherches, Université Pierre et Marie Curie, France,
5. SEMENOV M. A. et BARROW E. M. (2002)- LARS-WG. A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. User Manual, Version 3, 38 p.
6. KOUASSI A. M., RAPHAËL N'ZAI K. S. A., KOFFI Y. B., BIEMI J. (2017)- Application of multiple linear regression models for predicting drilling water flow in the hard rock aquifers: Example of N'zi-Comoé area (Central-East of Ivory Coast). *Journal of Water Sciences & Environment Technologies*, 2, 1, 130-141.
7. OGA Y.M.S., ADJA M. G., YAPI A.F., KPAN O.J.G., BAKA D., YAO K.T, et BIEMI J. (2016)- Projection de la variabilité climatique à l'horizon 2050 dans la zone côtière au Sud-Est de la Côte d'Ivoire (d'Abidjan à Aboisso). *Larhyss Journal*, 25, 67-81.
8. DANUMAH J. (2016)- Assessing Urban Flood Risks under Changing Climate and Land Use in Abidjan District, South Cote d'Ivoire. PhD Thesis in Climate Change and Land-use. Kwame Nkrumah University of Science and Technology Kumasi Ghana
9. SODEXAM (2017)- État du climat de l'année 2016 en Côte d'Ivoire. Rapport de la Direction de la Météorologie Nationale, janvier, 12 p.
10. OCDE (2008)- Changement climatique : relever le défi à l'horizon 2050. Synthèses, l'Observateur, 8 p.
11. BOKO M., KOSMOWSKI F. et VISSIN E. W. (2012)- Les enjeux du changement climatique au Bénin. Konrad-Adenauer-Stiftung. Programme pour le Dialogue Politique en Afrique de l'Ouest. 72 p.
12. ROUDIER P. (2012)- Climat et agriculture en Afrique de l'Ouest : Quantification de l'impact du changement climatique sur les rendements et évaluation de l'utilité des prévisions saisonnières. Thèse de Doctorat, CIRED et LOCEAN

13. PANTHOU G. (2013)- Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble
14. AKE G. E. (2010) Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire
15. KPAN O. J. G., OGA Y. M-S., YAO K. T., YAPI A. F, BAKA D., LASM T. and BIEMI J. (2016)- Impact of climate variability on water resources and population health in the South Eastern Coastal area of Côte d'Ivoire. European Scientific Journal, 12, 319-341.