

## INFLUENCE DES ESTIMATIONS D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE PAR LES METHODES DE PENMAN-MONTEITH ET DE OUDIN SUR LA CALIBRATION DU MODELE HYDROLOGIQUE GR4J DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME (AFRIQUE DE L'OUEST)

KODJA D. J.<sup>1</sup>, AKOIGNONGBE A.J.S.<sup>1</sup>, AMOUSSOU E.<sup>1,2</sup>, MAHE G.<sup>3</sup>, VISSIN E.W.<sup>1</sup>, PATUREL J.E.<sup>3</sup>, HOUNDENOU C.<sup>1,4</sup>

1 Laboratoire Pierre Pagny, Climats, Eaux, Ecosystèmes et développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin ([japhdom@gmail.com](mailto:japhdom@gmail.com))

2 Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Parakou, Bénin

3 UMR 5599 HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier, France

4 Institut de Géographie de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (IGATE), Cotonou, Bénin

**Résumé :** L'étude vise à analyser l'impact de l'estimation des ETP par les méthodes de Penman-Monteith et de Oudin sur la simulation des débits avec le modèle GR4J dans le bassin versant de l'Ouémé. Pour y parvenir, les données de précipitations journalières, l'évapotranspiration de Penman-Monteith, de Oudin et des débits journaliers des stations hydrométriques de Bétérou et de Bonou sur la période de 1971 à 2010 ont été implémentées dans le modèle global conceptuel GR4J. Les résultats indiquent une variation entre les ETP de Penman-Monteith et celle de Oudin. Les valeurs de l'ETP de Oudin sont légèrement supérieures à celle de l'ETP de Penman-Monteith dans le secteur. Quant à la calibration, les valeurs du Nash, en calage varient de 90 à 91 % à Bonou et de 64 à 78 % à Bétérou, alors qu'en validation, elles sont de 61 à 75 % à Bétérou et de 85 à 88 % à Bonou. Il convient de dire que la formulation de l'ETP a peu d'impact sur les critères du Nash du modèle GR4J pour ces deux bassins tropicaux

**Mots clés :** Calibration ; ETP de Penman-Monteith et de Oudin ; bassin

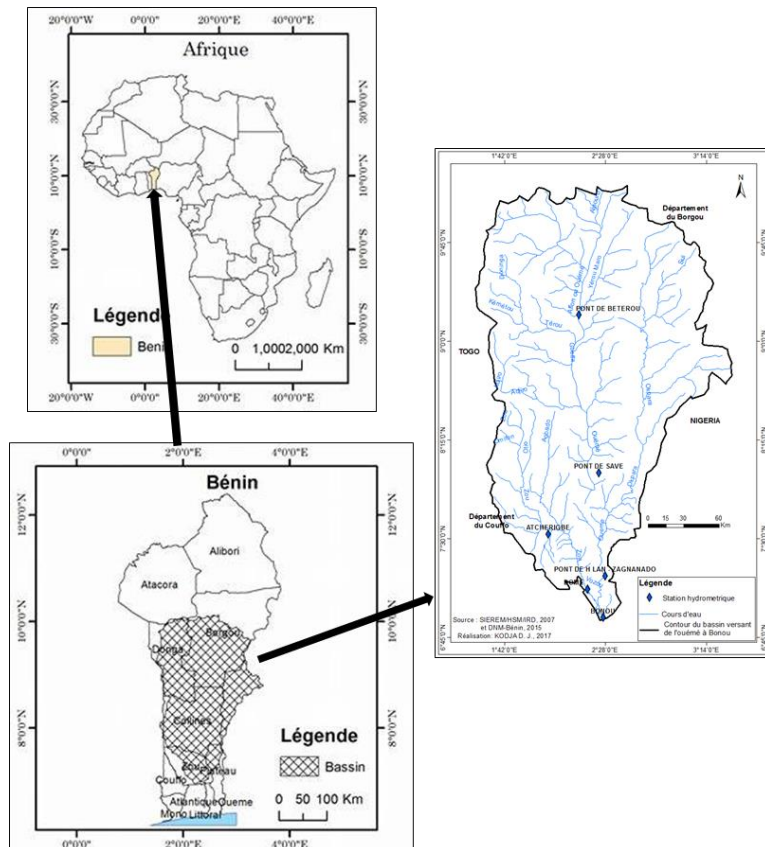
**Summary:** Influence of potential evapotranspiration estimates by the Penman-Monteith and Oudin methods on the calibration of the gr4j hydrological model in the Oueme watershed (west Africa). The study aims at analyzing the calibration of the hydrological model GR4J based on PET Penman-Monteith and Oudin estimate. Daily rainfall, Penman-Monteith and Oudin evapotranspiration and daily data flow from the Bétérou and Bonou hydrometric stations over the period 1971 to 2010 have been implemented in the GR4J model. Results indicate a variation between the Penman-Monteith and the Oudin PET. In addition, Oudin's PET values are slightly above those of Penman-Monteith PET in the study area. The values of the Nash, in calibration range from 90 to 91 % in Bonou and from 64 to 78 % in Bétérou, while in validation, they range from 61 to 75% in Bétérou and from 85 to 88 % in Bonou. It should be said that the formulation of the PET has little impact on the Nash criteria of the GR4J model for these two tropical basins

**Key words:** Calibration; Penman-Monteith and Oudin PET; basin

### Introduction

En raison des effets du réchauffement climatique, l'intensité et la fréquence des fortes précipitations augmenteront à l'avenir avec des incidences sur la disponibilité des ressources en eau souterraines et superficielles ainsi que les productions qui en dépendent (Crétat *et al.*, 2012). Dans ce cas, caractériser et prévoir la disponibilité de ces ressources dans l'espace et dans le temps deviennent alors indispensables pour la proposition des solutions adaptées aux projets de développement (Sighomnou, 2004). Pour Amoussou *et al.*, (2015), les modèles pluie-débits sont les outils qui peuvent permettre d'utiliser au mieux les ressources en eau et de suivre leur évolution dans le temps et dans l'espace. Ces auteurs ont renchéri que les modèles pluie-débits sont susceptibles de reproduire à l'échelle du bassin-versant les débits des fleuves et rivières à partir de la mesure ou de la simulation des pluies et de l'ETP. Ainsi dans le cas de cette étude, il s'agit d'analyser l'influence de l'ETP dans la calibration du modèle hydrologique pluie débit GR4J à partir de l'estimation des ETP par les méthodes de Penman-Monteith et de Oudin dans les bassins-versant de l'Ouémé à Bétérou et de l'Ouémé à Bonou, au Bénin. Le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou, couvre une superficie de 46 200 km<sup>2</sup> dont 10050 km<sup>2</sup> pour

le bassin de l’Ouémé à Bétérou. Le secteur d’étude s’étale en amont sur le socle dahoméen tandis que le sud est sur les formations sédimentaires. D’après la figure 1, il est compris entre 10°12’ et 7°58’ de latitude Nord et 1°35’ et 3°05’ de longitude Est avec un léger débordement à l’est vers le Nigeria et à l’Ouest vers le Togo (Le Barbé *et al.*, 1993). Le climat du bassin versant de l’Ouémé est de type béninien ou subéquatorial à quatre saisons dont deux saisons pluvieuses alternées avec des saisons sèches (où se trouve l’exutoire de Bonou) et au nord le climat est de type soudanien (où se trouve l’exutoire de Bétérou) à une seule saison pluvieuse et une seule saison sèche en passant par un climat intermédiaire de type subsoudanien servant de transition entre le sud et le nord du milieu d’étude.



Son réseau hydrographique est complexe, dense et long de 510 km sur le territoire béninois avec un régime hydrologique lié à la pluviosité et un sens d’écoulement globalement orienté du nord au sud vers les plaines d’inondations du delta de l’Ouémé.

Figure 1. Situation géographique du secteur d’étude.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Données

Il s’agit des données de hauteurs de pluies journalières de 30 stations ou postes pluviométriques dont 4 synoptiques et de la température journalière moyenne, l’humidité relative moyenne, l’insolation et la vitesse du vent des stations synoptiques de Savè et de Bohicon (ces données ont servi à calculer l’ETP de Penman-Monteith). Ces données proviennent des fichiers de l’Agence Nationale de la Météorologie du Bénin. Les données hydrométriques concernent les débits à l’exutoire de Bétérou (domaine du climat subsoudanien) et l’exutoire de Bonou (domaine du climat subéquatorial), extraites de la base de la Direction Générale de l’Eau au Bénin.

Ces différentes données couvrent la période de 1971 à 2010 et sont complétées par celles de la base de données du Système d’Informations Environnementales sur les Ressources en Eau

et leur Modélisation (SIEREM), Unité Mixte de Recherche 5569, Hydrosiences Montpellier (HSM).

## 1.2. Méthodes

Les stations considérées sont celles dont le taux de lacunes des hauteurs de pluies n'exède pas 5 % (Amoussou *et al.*, 2015). Une régionalisation est réalisée par la méthode de Thiessen afin d'avoir une donnée moyennée. Les données de pluie ont fait l'objet d'une analyse de rupture de stationnarité à partir des tests statistiques intégrés au logiciel Khronostat 1.01, développé par l'Unité Mixte de Recherche (UMR 5569) du laboratoire HydroSciences Montpellier. Pour cette recherche, la méthode non paramétrique de Pettitt a été utilisée.

### 1.2.1. Méthode de calcul de l'évapotranspiration

L'ETP n'est pas une variable mesurée, comme la pluie, mais le résultat d'un modèle combinant diverses variables climatiques (Oudin *et al.*, 2005).

- **Evapotranspiration de Penman-Monteith :** La méthode d'estimation de l'évapotranspiration de Penman-Monteith nécessite plusieurs paramètres climatiques dont la température de l'air (mini et maxi), l'humidité relative moyenne, l'insolation, la vitesse du vent à 2 m/s du sol, la latitude de la station climatologique considérée (Allen *et al.*, 1998). Les données restantes sont générées par le logiciel Instat+ utilisé pour calculer l'ETP.
- **Evapotranspiration de Oudin :** Cette méthode de calcul de l'ETP, est issue des modèles de Jensen-Haise et de McGuinness (Oudin *et al.*, 2005). Ces modèles généralement utilisés en climatologie prennent en compte seulement la température moyenne journalière de l'air et le rayonnement solaire qui dépend de la latitude et des 365 jours de l'année.

### 1.2.2. Calibration et validation

Pour caler et valider le modèle GR4J, des sous-périodes de calage et de validation ont été retenues : 1971-1987 pour la calibration et 1993-2010 pour la validation. Il est à noter que les sous-périodes sont homogènes et appartiennent à la séquence sèche ou humide, obtenue après la rupture de stationnarité dans les chroniques de pluie.

La calibration du modèle GR4J est basée sur les critères d'optimisation et de performance du modèle à reproduire les écoulements dans le secteur d'étude grâce aux critères de Nash-Sutcliffe, (1970), soit NSE. Ainsi le critère de NSE(Q), calculé sur les débits de hautes eaux :

$$NSE(Q) = \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})} ; \text{ le critère de NSE } (\sqrt{Q}), \text{ calculé sur les racines carrées des débits :}$$

$$NSE(\sqrt{Q}) = \frac{\sum (\sqrt{Q_{sim}} - \sqrt{Q_{obs}})}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs}})} \text{ et le critère de NSE Log (Q), calculé sur les logarithmes des}$$

$$NSE(\ln(Q)) = \frac{\sum (\ln(Q_{sim}) - \ln(Q_{obs}))}{\sum (\ln(Q_{obs}) - \ln(Q_{obs}))}$$

débits :

Toutes les valeurs de ces critères sont comprises dans l'intervalle]  $-\infty$  to 1] (Ouedraogo, 2001).

## 2. Résultats

### 2.1. Evolution interannuelle de l'évapotranspiration potentielle moyenne de Penman Monteith et de Oudin dans le secteur d'étude

L'analyse de la figure 2, révèle que l'ETP estimée par la méthode de Oudin présente quasiment le même rythme que l'ETP calculée avec la méthode de Penman Monteith à Bétérou comme à Bonou.

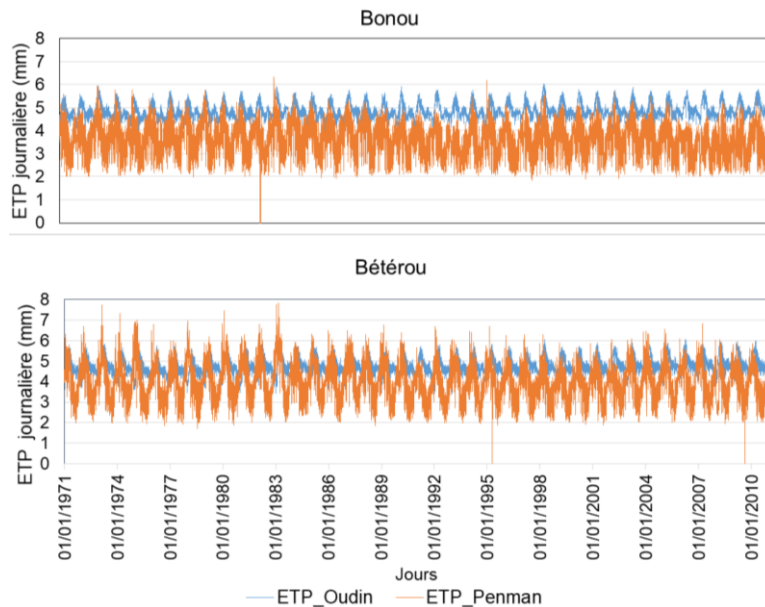


Figure 2. Evapotranspiration potentielle quotidienne calculée à partir des formules de Penman-Monteigh et Oudin, à Bétérou et Bonou.

De plus, sur la période 1971-2010, la moyenne annuelle de l'ETP à Bétérou pour l'ETP de Oudin est de 4,77 tandis que celle de Penman est de 4,02. Quant à Bonou, l'ETP moyenne de Oudin est de 4,9 et celle de Penman Monteith est de 3,7. Par ailleurs, les écarts entre l'ETP de Oudin et de Penman –Monteith sont respectivement de -15,6 % à Bétérou contre -24,7 % à Bonou. Mais, il apparaît que l'amplitude annuelle des ETP de Penman est bien plus forte que celle de Oudin alors que l'analyse des écarts indique que les valeurs de l'ETP de Oudin surestiment celles estimées par la méthode de Penman –Monteith dans les deux sous-bassins. Il convient de dire que cela peut être dû à la formulation de ces différentes ETP (Oudin *et al.*, 2005)

### 2.2. Variabilité des précipitations et des débits avec le modèle pluie-débit GR4J en calage et en validation à Bonou

Les figures 3 et 4 présentent l'évolution de la précipitation, des débits observés et aussi des débits simulés par le modèle GR4J avec en entrée les ETP de Oudin et celles de Penman-Monteith à Bonou en calage et en validation. L'analyse des figures 3 et 4 révèle que les débits moyens observés et simulés présentent quasiment, en calage et en validation, avec l'ETP de Oudin et de Penman-Monteith, le même rythme à Bonou avec un léger décalage au regard de la variabilité pluviométrique. De surcroît, il est constaté que les débits simulés surestiment les débits observés en période de basses eaux et les sous-estiment pendant les hautes eaux. Des constats similaires ont été observés à Bétérou et ne sont pas présentés ici.

Toutefois, les critères de Nash (NSE), constituent des indicateurs afin d'apprécier l'impact des différentes méthodes d'estimation de l'ETP sur la performance et le calage du modèle GR4J.

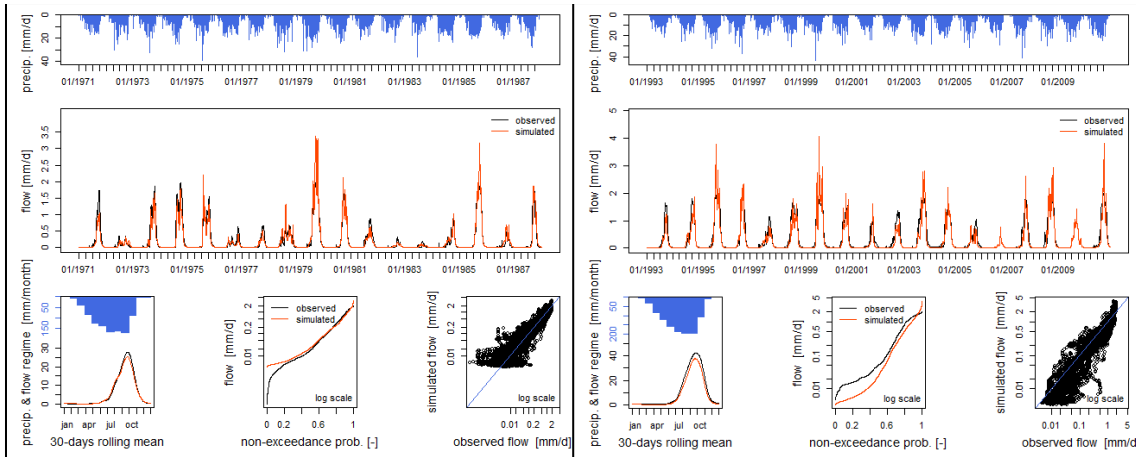


Figure 3. Variabilité des précipitations et des débits en calage et validation avec l’ETP de Oudin.

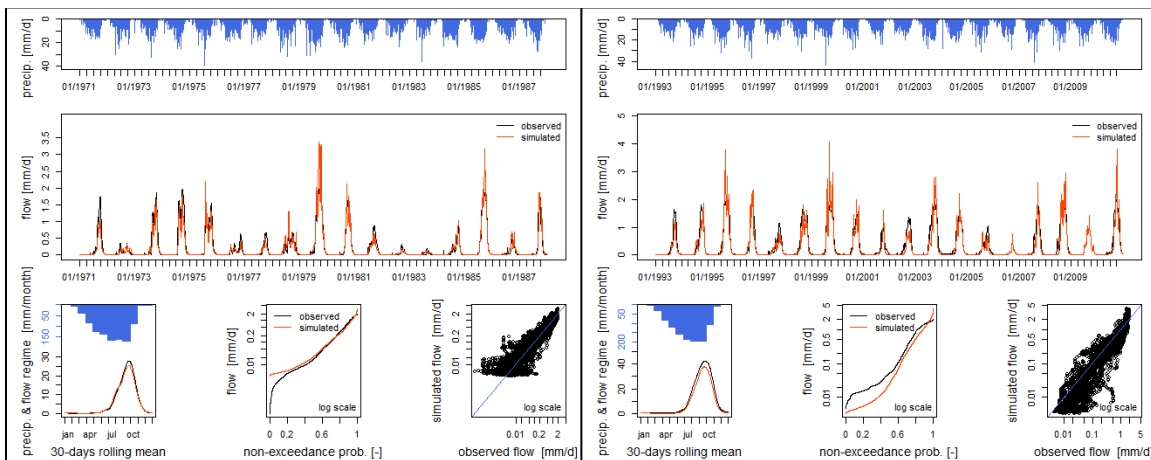


Figure 4. Variabilité des précipitations et des débits en calage et validation avec l’ETP de Penman-Monteith.

### 2.3. Valeurs des critères de calage et de la validation avec le modèle GR4J dans les bassins-versants de l’Ouémé à Bétérou et à Bonou

L’analyse des critères d’optimisation du modèle est aussi un indicateur pour mieux apprécier la performance du modèle (Tab.1). Ainsi les valeurs du NSE calculées sur les racines carrées des débits, sur les logarithmes des débits et sur les débits de hautes eaux à Bonou et à Bétérou donnent les mêmes valeurs correspondant à chaque critère aussi bien pour la méthode d’estimation de l’ETP de l’Oudin que de l’ETP de Penman Monteith.

Tableau 1. Valeurs des critères de calage et de la validation.

<i>Ouémé à Bonou</i>						
	<i>ETP de OUDIN</i>			<i>ETP de PENMAN MONTEI H -FAO</i>		
	<i>NSE√Q</i>	<i>NSE(ln(Q))</i>	<i>NSE(Q)</i>	<i>NSE√Q</i>	<i>NSE(ln(Q))</i>	<i>NSE(Q)</i>
Cal_1971-1987	0,91	0,83	0,83	0,91	0,83	0,83
Val_1993-2010	0,88	0,56	0,76	0,87	0,56	0,76
Cal_1993-2010	0,90	0,90	0,85	0,90	0,90	0,85
Val_1971-1987	0,85	0,60	0,75	0,85	0,60	0,75
<i>Ouémé à Bétérou</i>						
Cal_1971-1987	0,64	0,70	0,52	0,64	0,70	0,52
Val_1993-2010	0,75	0,78	0,59	0,75	0,78	0,59
Cal_1993-2010	0,78	0,79	0,61	0,78	0,79	0,61
Val_1971-1987	0,61	0,70	0,49	0,61	0,70	0,49

Il convient donc de dire que les méthodes d'estimation de l'ETP n'influencent pas la calibration du modèle GR4J dans le secteur d'étude. Ce qui corrobore les résultats de Dezetter (1991) et Ben Khediri et Drogue (2016) qui indiquent que les modèles pluie-débit utilisant l'ETP en entrée ne sont pas sensibles à telle ou telle autre méthode de calcul de l'ETP.

## Conclusion

Au terme de cette étude, il y a lieu de retenir que la méthode d'estimation de l'ETP de Oudin et celle de Penman-Monteith n'a pas assez d'impact sur la calibration et la performance du modèle GR4J à reproduire les débits pour les deux bassins tropicaux béninois étudiés. Dans ce sens, il est important donc d'approfondir les recherches sur l'utilité des méthodes d'estimation de l'ETP dans la reproduction des débits surtout dans le contexte des changements globaux et de la révision des normes hydrologiques.

## Remerciements

Sincères remerciements à tous les co-auteurs de cet article scientifique pour avoir contribué au traitement des données voire à l'analyse des résultats. Toutes nos reconnaissances aux organisateurs du 33ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), tenu à Rennes du 1er au 04 juillet 2020, malgré les vicissitudes de la pandémie de la Covid 19 qui a frappé le monde entier.

## Bibliographie

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., & Smith M., 1998. Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome ([http://www.fao.org/docrep](http://www.fao.org/docrep/ARPAV)) ARPAV (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quaderni per. *Geophysics*, 156-178.
- Amoussou E., *et al.*, 2015. Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve Mono. In 28ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 17-23.
- Ben Khediri W. & Drogue G. 2015. Quel est l'impact de l'échantillonnage spatial des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le pouvoir prédictif d'un modèle hydrologique empirique ?. *Climatologie*, (12), 24p.
- Crétat J., Richard Y., Pohl B., Rouault M., Reason C. J. C., & Fauchereau N., 2012. Recurrent daily rainfall patterns over South Africa and associated dynamics during the core of the austral summer. *International Journal of Climatology* (32): 261-273.
- Dezetter A. 1991. *Modélisation globale de la relation pluie débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte-d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 428p.
- Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. et Gualde R., 1993. *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. Edition ORSTOM, 540p.
- Nash J. E., Sutcliffe J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. (10), 282-290.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. & Loumagne C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.
- Ouédraogo M., 2001. *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante. Normes hydrologiques et modélisation régionale*. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, France, 257p.
- Sighomnou D., 2004. *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Yaoundé*. Thèse, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 289p.

# CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRES

Actes du colloque organisé à Rennes  
du mercredi 1<sup>er</sup> au samedi 4 juillet 2020  
(annulé pour raison sanitaire Covid-19)

## COMPOSITION DU COMITE D'ORGANISATION

Vincent DUBREUIL  
Université Rennes 2, UMR 6554 LETG

Jean NABUCET  
CNRS UMR 6554 LETG

Sébastien BRUNEAU  
Responsable administratif, Université Rennes 2

Roselyne BILLY  
Gestion administrative, Université Rennes 2, UMR 6554 LETG

Claudie PERON  
Gestion administrative, CNRS, UMR 6554 LETG

Clémentine CHARMONT  
Gestion éditoriale, Université Rennes 2

Franck BARAER  
Météo-France, Direction Interrégionale Ouest

Emmanuel Bouriau  
AUDIAR

Xavier FOISSARD  
TerraClima

Alain Hervé LE GALL  
multiCOM, OSUR, Université Rennes 1 / CNRS

Igor SNIRIK  
Post-doctorant associé LETG-Rennes

Fanny GAUTIER  
Doctorante, UMR 6554 LETG-Rennes

Gwenael MORIN  
Doctorante, UMR 6554 LETG-Rennes

Pedro MUTTI  
Doctorant, UMR 6554 LETG-Rennes

Jeanne THIBAUT  
Doctorante, UMR 6554 LETG-Brest

## EDITEURS SCIENTIFIQUES

Valérie BONNARDOT & Hervé QUENOL  
Université Rennes 2, LETG-Rennes UMR 6554 CNRS

En partenariat avec :



Réalisation et mise en page des Actes :

Clémentine CHARMONT

*Les opinions défendues dans cet ouvrage n'engagent que les auteurs ; elles ne sauraient être imputées aux institutions auxquelles ils appartiennent ou qui ont financé leurs travaux.*

© LETG, 2020

ISBN 978-2-907696-26-5