

Estimation de la durée d'humectation des feuilles par seuillage de l'humidité relative dans la zone nord de la Côte d'Ivoire

Kignielman Riflard Luc COULIBALY ^{1 2 3 *}, Kouassi AMANI ², Alex Zilé KOUADIO ¹, Nicaise Kassi ETTE ³, Guillaume Koffi KOUASSI ², Wawogninlin Brice COULIBALY ¹, Christophe KOUAME ²

¹ Sciences et Technologies de l'Eau, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa BP 150, Côte d'Ivoire

² Center for International Forestry Research and World Agroforestry (CIFOR-ICRAF), Côte d'Ivoire Country Programme, Cocody, Avenue Mermoz, Abidjan 08 BP 2823, Côte d'Ivoire

³ Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), Département Agrométéorologie, 15 BP 990 ABIDJAN 15, Abidjan, Côte d'Ivoire

Résumé – Cette étude examine la modélisation de la durée d'humectation des feuilles (LWD) en utilisant des approches empiriques basées sur l'humidité relative (RH). L'analyse des données météorologiques montre une variabilité diurne marquée, avec des températures comprises entre 20°C et 32°C et une humidité relative souvent supérieure à 90 %. Ces conditions favorisent des périodes prolongées d'humidité, particulièrement observées la nuit et le matin. Le modèle RH, avec un seuil de 90 %, a atteint une fraction correcte (FC) de 77 %, un indice CSI de 60 %, et un Kappa de Cohen de 0,54. Ce modèle montre une bonne capacité à identifier les périodes d'humidité, bien que légèrement sous-estimée (biais de 0,91) et avec un taux de fausses alertes (FAR) de 22 %. Par ailleurs, le modèle basé sur la dépression du point de rosée (DPD), utilisant des seuils de 1,5°C pour l'apparition et 4°C pour la cessation de l'humidité, a présenté des performances légèrement supérieures, avec une FC de 79 %, un Kappa de 0,58, et un FAR de 17 %. Cependant, ce modèle a montré une plus grande sensibilité aux variations des données lors de la validation, limitant son applicabilité opérationnelle. Les deux modèles présentent des erreurs résiduelles principalement autour de zéro, avec une précision légèrement meilleure pour le modèle DPD (MAE de 0,21 contre 0,23 pour RH). Cette étude conclut que les deux approches sont complémentaires : le modèle RH est robuste pour des applications opérationnelles, tandis que le modèle DPD offre une précision accrue pour des contextes spécifiques. Ces résultats contribuent à l'amélioration des systèmes agroclimatiques pour la gestion des risques liés à l'humidité prolongée des feuilles.

Mots-clés : durée d'humectation des feuilles, humidité relative, dépression du point de rosée, modèles empiriques, agrométéorologie.

Abstract – **Estimation of leaf wetness duration by relative humidity thresholding in the northern zone of Côte d'Ivoire.** This study investigates the modelling of leaf wetness duration (LWD) using empirical approaches based on relative humidity (RH). Analysis of meteorological data shows marked diurnal variability, with temperatures ranging from 20°C to 32°C and relative humidity often above 90%. These conditions favour prolonged wet spells, particularly observed at night and in the morning. The RH model, with a threshold of 90%, achieved a fraction correct (FC) of 77%, a CSI index of 60%, and a Cohen's Kappa of 0.54. This model shows a good ability to identify wet spells, although slightly underestimated (bias of 0.91) and with a false alarm rate (FAR) of 22%. On the other hand, the dew point depression (DPD) model, using thresholds of 1.5°C for the onset and 4°C for the cessation of wetness, showed slightly better performance, with a CF of 79%, a Kappa of 0.58, and a FAR of 17%. However, this model showed greater sensitivity to data variations during validation, limiting its operational applicability. Both models exhibit residual errors mainly around zero, with a slightly better accuracy for the DPD model (MAE of 0.21 versus 0.23 for RH). This study concludes that the two approaches are complementary: the RH model is robust for operational applications, while the DPD model offers increased accuracy for specific contexts. These results contribute to the improvement of agroclimatic systems for the management of risks related to prolonged leaf wetness.

Keywords: leaf wetness duration, relative humidity, dew point depression, empirical models, agrometeorology.

* Auteur de correspondance : riflardluc_coulibaly@yahoo.fr

Introduction

L'humidité des feuilles joue un rôle crucial dans de nombreux processus biophysiques, tels que la propagation de maladies fongiques et bactériennes, le dépôt de polluants atmosphériques, les échanges gazeux foliaires et la survie de certains insectes (Weiss, 1990 ; Huber et Gillespie, 1992 ; Brewer et Smith, 1997 ; Klemm *et al.*, 2002). Ces processus sont particulièrement influencés par la durée d'humectation des feuilles (LWD), qui correspond au nombre d'heures pendant lesquelles les feuilles restent humides au cours d'une journée. Les risques d'infection dans diverses cultures sont étroitement liés à des conditions d'humidité prolongée des feuilles, combinées à des températures favorables au développement des pathogènes (Schmitz et Grant, 2009 ; Rowlandson *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2019 ; Zito *et al.*, 2020). Ces périodes d'humidité, qu'elles soient causées par la rosée, les précipitations ou l'irrigation, favorisent la germination des spores fongiques et leur capacité à infecter les tissus végétaux (Amar et Petit, 2004 ; Harahagazwe *et al.*, 2007). Ainsi, la LWD constitue une variable clé utilisée dans les modèles prédictifs et les systèmes d'aide à la décision en agrométéorologie (Park *et al.*, 2019 ; Nguyen *et al.*, 2023).

Cependant, l'évaluation de la LWD reste un défi en raison de l'absence de normes universelles pour sa mesure et de la grande diversité des capteurs utilisés. Ces capteurs, qu'ils soient mécaniques, électriques ou radiométriques, diffèrent en termes de propriétés physiques, d'étalonnage, de maintenance et de positionnement, ce qui rend difficile la standardisation et la comparaison entre les études (Alexandre, 2013 ; Carisse *et al.*, 2020 ; Solís et Rojas-Herrera, 2021). Pour pallier ces limitations, plusieurs études ont proposé la modélisation de la durée d'humectation des feuilles comme une alternative fiable aux mesures *in situ* (Shin *et al.*, 2020 ; Patel *et al.*, 2022 ; Zia-Khan *et al.*, 2022). Ces modèles reposent sur des relations empiriques ou physiques établies à partir de variables météorologiques mesurées par des stations standards (Alexandre, 2013 ; Rowlandson, 2011 ; Shin *et al.*, 2021). Les modèles physiques, bien que robustes sur le plan théorique, nécessitent un grand nombre de paramètres difficiles à mesurer ou à estimer, ce qui peut entraîner des prédictions

inexactes de la LWD (Montone *et al.*, 2016). En revanche, les modèles empiriques, fondés sur des relations simples entre la LWD et des paramètres météorologiques comme l'humidité relative (RH), sont plus adaptés à des environnements spécifiques et nécessitent moins de données complexes (Zito *et al.*, 2020).

Cette étude vise à approfondir l'utilisation des modèles empiriques pour prédire la durée d'humectation des feuilles. Les objectifs spécifiques sont les suivants : (a) déterminer des seuils empiriques fondés sur l'humidité relative (RH) et la dépression du point de rosée (DPD) pour caractériser la LWD ; et (b) comparer les performances des modèles fondés sur RH et DPD afin d'identifier le plus performant, en tenant compte de la colinéarité entre ces variables. Les résultats de cette étude permettront d'améliorer les prédictions agroclimatiques et de contribuer au développement de systèmes d'alerte précoce pour la gestion des risques associés à l'humidité prolongée des feuilles.

1. Matériels et méthodes

1.1. Description du site d'étude

Dans le cadre de notre recherche sur la relation entre les paramètres météorologiques et l'humectation des feuilles, nous avons réalisé une collecte de données dans la zone de Korhogo en Côte d'Ivoire (figure 1). Les investigations ont été effectuées à la station de recherche fruitière du Centre National de Recherche en Agronomie (CNRA). Cette station est située à 22 kilomètres au nord de la Côte d'Ivoire et s'étend sur une superficie de 40 hectares. Ses coordonnées géographiques sont 9°34'N et 5°34'W, avec une altitude moyenne de 350 mètres. Le climat de cette zone est de type tropical de transition, caractérisé par une saison sèche de novembre à avril, et une saison pluvieuse de mai à octobre (Djaha *et al.*, 2014).

1.2. Jeux de données

1.2.1. Données météorologiques

Les variables météorologiques, notamment l'humidité relative (RH), la température de l'air (T) et la température du point de rosée (Td), ont été

observées sur le site à l'aide d'une station agrométéorologique de type HOBO. Cette station est équipée de capteurs de température et d'humidité relative installés à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol, conformément aux normes standardisées pour ce type de mesure. La précision des capteurs d'humidité relative est de ± 2 % pour une plage de mesure comprise entre 0 et 100 %. Pour la température de l'air, la précision est de $\pm 0,2^\circ\text{C}$,

tandis que la température du point de rosée est calculée à partir de RH et T. Ces données de haute qualité sont essentielles pour garantir la fiabilité des modèles développés dans cette étude. La station agrométéorologique est située à l'intérieur de la station fruitière, à une distance de 100 mètres de la zone de collecte, garantissant des conditions homogènes pour la capture des données environnementales.

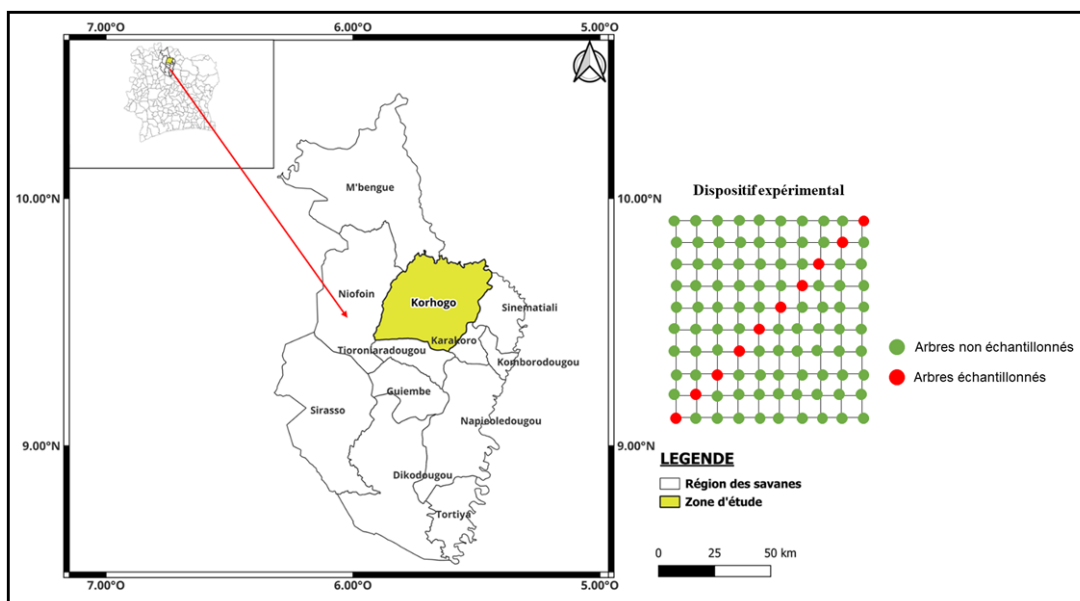


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et schéma du dispositif expérimental de suivi des arbres échantillonnés. Location of the study area and diagram of the experimental device for monitoring the sampled trees.

1.2.2. Données d'humectation foliaire

Les mesures ont été réalisées dans un parc à bois couvrant une superficie d'un hectare et comprenant 100 plants d'anacardiés. Ce parc est situé à proximité de la station agrométéorologique, à une distance d'environ 100 mètres. La collecte des données s'est déroulée sur une période de 10 jours, du 13 au 22 août 2022, durée choisie pour couvrir une phase représentative des conditions climatiques locales pendant la saison humide, propices à l'humectation des feuilles.

La notation des heures d'humectation foliaire (LWD) a été effectuée sur un échantillon de dix plants répartis selon une diagonale traversant le parc (Banito *et al.*, 2022 ; figure 1), garantissant une couverture homogène des conditions à l'intérieur du parc. Pour chaque arbre, les côtés nord, sud, est et ouest ont été identifiés à l'aide de rubans, et les

bourgeons en surface ainsi qu'à l'intérieur de chaque côté ont été marqués pour l'observation.

Chaque bourgeon a été examiné pour détecter la présence d'eau sur au moins une feuille, en s'appuyant sur la visibilité de la plus fine goutte d'eau. Les observations ont été réalisées à des intervalles d'une heure, de jour comme de nuit. Pendant les heures nocturnes, des lampes torches de type Forclaz (300 lm max, portée de 75 m) et des lunettes de vision nocturne HD Night Vision ont été utilisées pour garantir une observation précise.

Pour chaque bourgeon, si de l'eau était détectée sur au moins une feuille, celui-ci était marqué d'une valeur 1 ; en l'absence totale d'eau, il était marqué 0. Le résultat global pour un arbre donné a été défini comme suit :

- Si au moins un des côtés observés (nord, sud, est ou ouest) présentait un bourgeon marqué 1, alors l'arbre entier était marqué 1.

- Si aucun bourgeon n'était marqué 1 sur tous les côtés, l'arbre entier était marqué 0.

Enfin, l'état d'humectation foliaire (HF) de toute la parcelle pour une heure donnée a été défini comme suit :

- Si au moins un des huit arbres étudiés était marqué 1, alors toute la parcelle était considérée comme humide (HF = 1).
- Sinon, la parcelle était considérée comme sèche (HF = 0).

1.3. Modèles de durée d'humectation des feuilles (LWD)

1.3.1. Seuil RH constant ($RH \geq 90\%$)

Cette méthode repose sur l'hypothèse que la durée d'humectation des feuilles (LWD) correspond au nombre d'heures pendant lesquelles l'humidité relative (RH) est supérieure ou égale à un seuil constant. Des études récentes (Sentelhas *et al.*, 2007) ont montré que la condensation sur la végétation peut commencer avant que l'air ne soit saturé, avec des niveaux d'humidité relative allant de 91 à 99 %.

Dans cette étude, nous avons appliqué des seuils constants de RH allant de 87 à 99 %, en nous fondant sur des recommandations classiques (Monteith, 1957) et sur des observations spécifiques au site d'étude. Ces seuils ont été appliqués sur des données horaires afin d'identifier les périodes durant lesquelles la RH atteint ou dépasse chaque seuil, ce qui est considéré comme une indication de la présence d'humidité sur les feuilles. Ce processus a permis de calculer la durée totale d'humectation des feuilles pour chaque seuil et chaque journée d'observation.

1.3.2. Dépression du point de rosée (DPD)

La différence entre la température de l'air (T) et la température du point de rosée (Td), appelée dépression du point de rosée (DPD), est une variable fréquemment utilisée pour estimer la LWD (Huber et Gillespie, 1992 ; Gillespie *et al.*, 1993). La LWD est ici définie comme la période pendant laquelle la DPD reste à l'intérieur de limites spécifiques, reflétant les conditions favorables à la

condensation. Trois jeux de seuils de DPD ont été appliqués, fondés sur des études antérieures et des observations spécifiques au site :

- **Seuils initiaux** : $DPD \leq 1,8^\circ\text{C}$ pour l'apparition de l'humidité et $DPD \geq 2,2^\circ\text{C}$ pour la cessation de l'humidité (Rao *et al.*, 1998).
- **Seuils moyens** : $DPD \leq 1,5^\circ\text{C}$ pour l'apparition et $DPD \geq 4^\circ\text{C}$ pour la cessation, dérivés des moyennes observées sur le site en présence et en absence d'humidité.
- **Seuils médians** : $DPD \leq 1,1^\circ\text{C}$ pour l'apparition et $DPD \geq 3,6^\circ\text{C}$ pour la cessation, calculés sur la base de la médiane des observations locales.

Les seuils ont été appliqués aux données horaires pour chaque journée d'observation. La LWD a été calculée comme le nombre total d'heures durant lesquelles la DPD respectait les critères d'apparition ou de cessation de l'humidité. Cette approche permet d'évaluer les variations dans la capacité de la DPD à détecter les périodes d'humidité sur le feuillage.

Bien que RH et DPD soient des variables corrélées physiquement, elles apportent des perspectives complémentaires dans l'estimation de la LWD. La RH, utilisée seule, offre une approche simple et directe pour estimer la condensation. En revanche, la DPD intègre la relation entre la température de l'air et l'humidité relative, permettant une estimation plus dynamique des conditions de condensation. Dans cette étude, les deux approches ont été explorées afin d'identifier la méthode la plus précise et adaptée aux conditions locales.

1.4. Évaluations des performances

Les données de la durée d'humectation des feuilles (LWD), mesurées et estimées, ont été organisées sur une base horaire. Chaque journée de données couvre une période de 24 heures, débutant à 00:01 et se terminant à minuit (00:00) le jour suivant.

Pour évaluer les performances des méthodes empiriques d'estimation de la LWD, un tableau de contingence a été utilisé. Ce tableau répertorie quatre catégories : **X** avec les cas où la méthode estime correctement la présence d'humidité ; **Y** où

la méthode échoue à détecter l'humidité alors qu'elle est effectivement présente ; **W** où la méthode détecte de manière incorrecte une humidité absente ; **Z** où la méthode estime correctement l'absence d'humidité.

À partir de ces catégories, les quatre statistiques de performance suivantes ont été calculées :

La fraction des estimations correctes (FC) :

$$FC = \frac{X+Z}{X+Y+W+Z} \quad (1)$$

L'indice de réussite correcte (CSI) :

$$CSI = \frac{X}{X+Y+W} \quad (2)$$

Le taux de fausses alertes (FAR) :

$$FAR = \frac{W}{X+W} \quad (3)$$

Sachant qu'un FAR faible est souhaitable, indiquant une moindre fréquence de fausses détections.

Le biais (BS) :

$$BS = \frac{X+W}{X+Y} \quad (4)$$

Un biais inférieur à 1 reflète une sous-estimation de la durée d'humidité, tandis qu'un biais supérieur à 1 indique une surestimation. Une valeur exacte de 1 traduit une estimation équilibrée.

En complément, deux mesures d'erreur ont été calculées : **l'erreur moyenne (EM)** qui indique la direction du biais d'erreur, et **l'erreur absolue moyenne (MAE)** qui reflète l'ampleur moyenne des erreurs, indépendamment de leur direction.

Pour évaluer davantage la fiabilité des modèles, le Kappa de Cohen a été utilisé. Cet indice quantifie le degré d'accord entre les observations mesurées et les estimations, tout en prenant en compte la probabilité d'accord aléatoire. Contrairement aux simples statistiques fondées sur les tableaux de contingence, le Kappa fournit une évaluation robuste et significative des performances des modèles :

$$\kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \quad (5)$$

Avec $Po = \frac{X+Z}{X+Y+W+Z}$ qui représente la proportion totale d'accord observé (correctement classés comme humides ou secs) ;

et $Pe = \frac{(X+W)(X+Y)+(Y+Z)(W+Z)}{(X+Y+W+Z)^2}$ qui correspond à la proportion d'accord attendue par hasard.

Y correspond au nombre de cas où une humidité observée n'a pas été estimée ; W ceux où une humidité non observée a été estimée (fausses alarmes) ; Z ceux où une absence d'humidité a été observée et estimée correctement. Il y a bon accord pour $0,60 \leq \kappa \leq 0,80$; accord modéré pour $0,40 \leq \kappa \leq 0,60$, et faible accord pour $\kappa < 0,40$.

1.5. Calibration et validation

Les modèles retenus sur la base des métriques établis précédemment ont été calibrés sur 80 % des données et validés sur 20 % des données, en utilisant le Kappa de Cohen.

2. Résultats

2.1. Description des données météorologiques et de la durée d'humectation des feuilles (LWD)

Les variables météorologiques analysées dans cette étude incluent la température de l'air (Temp, °C), l'humidité relative (RH, %), la température du point de rosée (DewPt, °C), la dépression du point de rosée (DPD, °C), et la durée d'humectation des feuilles (LWD). Une variabilité diurne marquée est observée, avec des températures comprises entre environ 20°C et 32°C, et des niveaux d'humidité relative dépassant fréquemment 90 % (tableau I).

La dépression du point de rosée (DPD) atteint des valeurs faibles, inférieures à 2°C, aux moments d'humidité élevée, en particulier pendant les heures nocturnes et matinales (figure 2). La durée d'humectation des feuilles (LWD) varie clairement entre des périodes humides, notées par une valeur de 1, et des périodes sèches, notées par une valeur de 0.

L'évolution temporelle des températures et des humidités relatives montre des tendances opposées, comme attendu, avec des valeurs de RH élevées correspondant à des baisses significatives de DPD, proches de zéro. Ces observations coïncident avec les périodes où LWD est marquée comme humide.

Tableau 1. Statistiques descriptives des variables météorologiques et de la durée d'humectation des feuilles. *Descriptive statistics of meteorological variables and leaf wetness duration.*

	T (°C)	RH (%)	DewPt (°C)	DPD (°C)	LWD
Moyenne	25,21	84,96	22,36	2,85	0,47
Écart-type	3,01	10,5	1,06	2,25	0,5
Min	20,59	59,52	20,1	0,31	0
25 %	22,86	78,65	21,58	1,12	0
50 %	24,31	88,42	22,3	1,99	0
75 %	27,14	93,22	23,17	3,99	1
Max	32,2	98	25,08	8,85	1

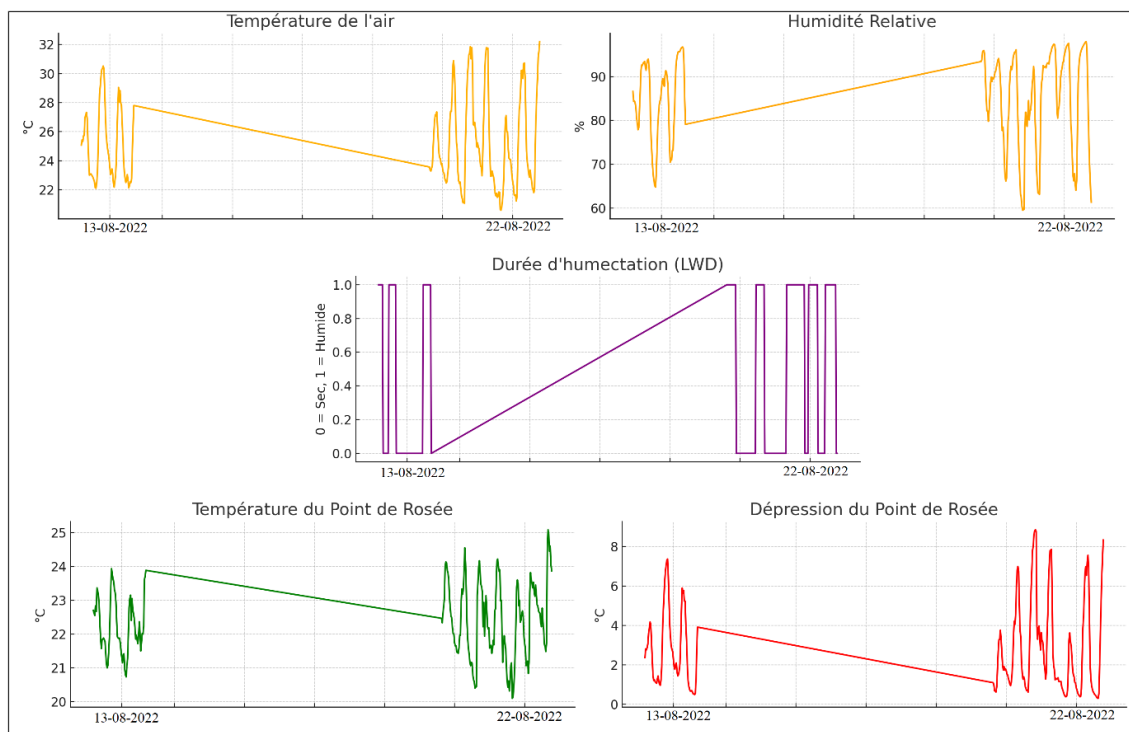


Figure 2. Evolution des variables météorologiques et de la durée d'humectation des feuilles. *Evolution of meteorological variables and duration of leaf wetness.*

2.2. Estimation de la LWD avec le modèle fondé sur RH

L'estimation de la durée d'humectation des feuilles à l'aide du modèle fondé sur l'humidité relative (RH) a été réalisée en considérant plusieurs seuils pour évaluer la capacité prédictive du modèle. Les performances des seuils RH = 87 %, 90 %, 95 % et 99 % ont été comparées. Les résultats montrent que le seuil RH = 90 % présente les meilleures performances (tableau 2). Ce seuil atteint une fraction correcte (FC) de 77 %, un indice de réussite correcte (CSI) de 60 % et un taux de fausses alertes (FAR) relativement faible de 22 %. Le biais (BS) est

légèrement sous-estimé, avec une valeur de 0,91, tandis que le Kappa de Cohen est de 0,54, indiquant un bon accord. À l'inverse, les seuils 87 % et 95 % montrent des performances inférieures, tandis que le seuil 99 % ne parvient pas à détecter correctement les événements d'humidité, avec un Kappa proche de zéro.

2.3. Estimation de la LWD avec le modèle fondé sur DPD

L'estimation de la durée d'humectation des feuilles a également été réalisée à l'aide du modèle fondé sur la dépression du point de rosée (DPD).

Plusieurs seuils de DPD ont été testés pour l'apparition et la cessation de l'humidité, notamment $DPD \leq 1,8^{\circ}C$, $1,5^{\circ}C$ et $1,1^{\circ}C$ pour

l'apparition et $DPD \geq 2,2^{\circ}C$, $4,0^{\circ}C$ et $3,6^{\circ}C$ pour la cessation.

Tableau 2. Evaluation des performances des seuils d'humidités relative pour la prédiction de la durée d'humectation des feuilles. *Evaluation of the performance of relative humidity thresholds for predicting leaf wetness duration.*

Seuil RH (%)	Fraction Correcte (FC)	Indice CSI	FAR	Biais (BS)	Kappa de Cohen
87	0,72	0,56	0,33	1,15	0,43
90	0,77	0,6	0,22	0,91	0,54
95	0,72	0,39	0	0,39	0,41
99	0,53	0	0	0	0

Les résultats obtenus montrent que les seuils $DPD \leq 1,5^{\circ}C$ pour l'apparition et $DPD \geq 4,0^{\circ}C$ pour la cessation offrent les meilleures performances (tableau 3). Cette configuration, donne une fraction correcte de 79 %, légèrement supérieure au modèle

s'appuyant sur RH, tandis que le Kappa de Cohen atteint une valeur de 0,58, traduisant un accord significatif entre les valeurs estimées et les valeurs observées.

Tableau 3. Evaluation des performances des seuils de dépression du point de rosée pour la prédiction de la durée d'humectation des feuilles. *Evaluation of the performance of dew point depression thresholds for predicting leaf wetness duration.*

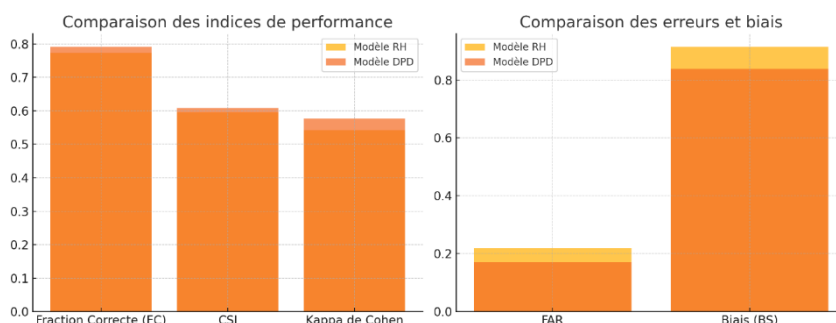
Seuil Apparition (DPD)	Seuil Cessation (DPD)	Fraction Correcte (FC)	Indice CSI	FAR	Biais (BS)	Kappa de Cohen
1,8	2,2	0,75	0,58	0,27	1	0,5
1,5	4	0,79	0,61	0,17	0,84	0,58
1,1	3,6	0,74	0,47	0,06	0,51	0,47

2.4. Comparaison des performances des deux modèles (RH vs DPD)

La comparaison des performances entre les deux modèles montre que le modèle fondé sur la dépression du point de rosée (DPD) présente une légère supériorité en termes de précision globale (figure 3). Le modèle DPD atteint une fraction

correcte de 79 %, contre 77 % pour le modèle RH. De plus, l'indice de réussite correcte (CSI) est légèrement plus élevé pour le modèle DPD, avec une valeur de 61 %, contre 60 % pour le modèle RH. Le taux de fausses alertes (FAR) est également plus faible pour le modèle DPD, s'établissant à 17 %, contre 22 % pour le modèle RH.

Figure 3. Comparaison des modèles RH et DPD. *Comparison of HR and DPD models.*



En ce qui concerne le biais (BS), les deux modèles montrent une légère sous-estimation, avec des valeurs respectives de 0,84 pour DPD et 0,91

pour RH (figure 3). Enfin, le Kappa de Cohen, est légèrement supérieur pour le modèle DPD (0,58) par rapport au modèle RH (0,54).

2.5. Analyse des erreurs et des biais pour les deux modèles (RH et DPD)

L’analyse révèle une concentration marquée des erreurs résiduelles autour de zéro (figure 4). Toutefois, le modèle fondé sur la dépression du point de rosée (DPD) présente une erreur moyenne

(ME) légèrement plus basse que celle du modèle RH, ce qui indique une sous-estimation moins marquée des périodes d’humectation. L’erreur absolue moyenne (MAE), est également plus faible pour le modèle DPD, avec une valeur de 0,21, contre 0,23 pour le modèle RH (tableau 4).

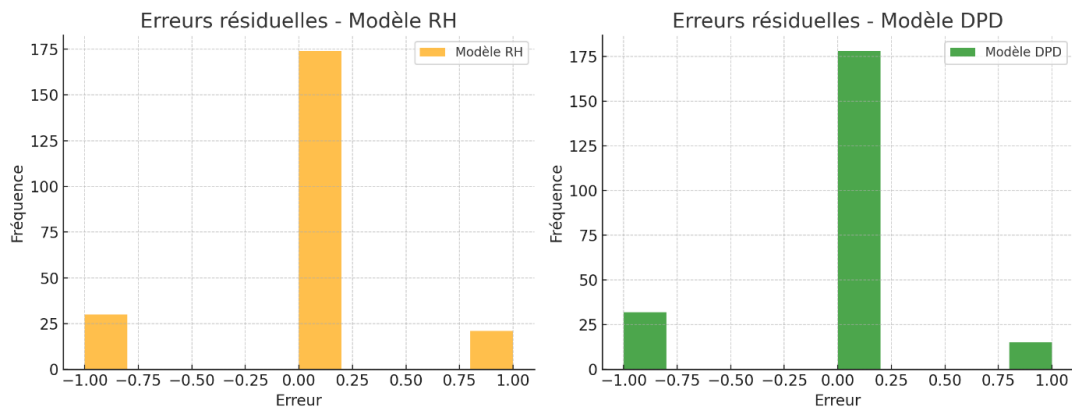


Figure 4. Analyse des erreurs résiduelles pour les modèles RH et DPD. Residual error analysis for RH and DPD models.

Tableau 4. Précision des modèles RH et DPD. Accuracy of HR and DPD models.

Modèle	Erreur Moyenne (ME)	Erreur Absolue Moyen
RH	-0,04	0,23
DPD	-0,08	0,21

2.6. Calibration et validation des modèles

La calibration des modèles a montré que le modèle DPD offre les meilleures performances, avec une fraction correcte de 80,6 % et un Kappa de

Cohen de 0,60 (tableau 5). Toutefois, lors de la phase de validation, le modèle RH présente des performances plus stables et plus robustes, avec une fraction correcte de 75,6 % et un Kappa de Cohen de 0,51, contre 73,3 % et 0,47 pour le modèle DPD.

Tableau 5. Performance des modèles RH et DPD dans la prédiction de la durée d’humectation des feuilles. Performance of RH and DPD models in predicting leaf wetness duration.

Modèle	Calibration FC	Validation FC	Calibration Kappa	Validation Kappa
RH (90 %)	77,80 %	75,60 %	0,55	0,51
DPD (1,5°C – 4°C)	80,60 %	73,30 %	0,6	0,47

3. Discussion

3.1. Signification des données météorologiques et de la durée d’humectation des feuilles (LWD)

La variabilité quotidienne des conditions météorologiques dans la zone d’étude a révélé que la température de l’air oscillait entre 20 et 32°C. Parallèlement, l’humidité relative (HR) dépassait

souvent 90 %, surtout la nuit et le matin. Ces observations correspondent à des périodes de faible dépression du point de rosée (DPD), souvent proches de 0°C, ce qui favorise l’humectation des feuilles.

Les données montrent que la durée d’humectation des feuilles (LWD) suit un schéma prévisible : les périodes d’humidité élevée, caractérisées par une HR

élevée et une DPD faible, sont directement liées à l'apparition de LWD. Ce lien est physiologiquement logique, car l'eau se condense sur les feuilles lorsque l'humidité relative est élevée et que la température du feuillage atteint le point de rosée de l'air ambiant. Ces résultats corroborent les études de de Monteith (1957) et de Sentelhas *et al.* (2007), qui indiquent que l'humidité relative et le point de rosée sont de bons indicateurs des conditions d'humectation.

3.2. Performances des modèles

L'estimation de la durée d'humectation des feuilles à partir des seuils d'humidité relative a révélé que $RH \geq 90 \%$ est le seuil optimal pour capturer les périodes d'humidité. Ce seuil a permis d'obtenir une fraction correcte (FC) de 77 % et un indice CSI de 60 %, ce qui démontre une bonne capacité du modèle à identifier les périodes d'humectation. Le taux de fausses alertes (FAR), relativement bas à 22 %, montre que les prédictions sont cohérentes, bien que le modèle présente une légère tendance à la sous-estimation avec un biais (BS) de 0,91. Le Kappa de Cohen de 0,54 confirme un accord significatif entre les valeurs observées et estimées. Ces résultats sont conformes aux attentes théoriques et montrent que l'humidité relative peut être utilisée comme un indicateur fiable pour prédire la LWD. Toutefois, les seuils plus élevés comme $RH \geq 99 \%$ se sont avérés inefficaces pour détecter la LWD, ce qui s'explique par le fait que la condensation peut débuter avant que l'air ne soit complètement saturé. Ces résultats confirment les observations de Rao *et al.* (1998) et soulignent l'importance de calibrer les seuils en fonction des conditions locales.

L'analyse des seuils de dépression du point de rosée (DPD) a montré que les seuils $DPD \leq 1,5^{\circ}\text{C}$ pour l'apparition et $DPD \geq 4,0^{\circ}\text{C}$ pour la cessation offrent les meilleures performances. Avec une fraction correcte de 79 % et un Kappa de Cohen de 0,58, ce modèle dépasse légèrement le modèle fondé sur RH en termes de précision et de qualité d'accord. La faible valeur de FAR (17 %) confirme la capacité du modèle à limiter les fausses alertes, ce qui constitue un avantage majeur pour l'estimation de la LWD. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Huber et Gillespie (1992) et ceux de Gillespie *et al.* (1993), qui ont démontré

que la DPD est un excellent indicateur des périodes d'humidité. En effet, la dépression du point de rosée intègre la relation physique entre la température de l'air et l'humidité relative, offrant ainsi une interprétation plus fine des conditions atmosphériques propices à l'humectation. Toutefois, il est à noter que les performances du modèle DPD dépendent fortement de la précision des mesures de température et d'humidité.

3.3. Comparaison des modèles

La mise en relation des performances des deux modèles révèle que le modèle fondé sur DPD offre une légère supériorité en calibration, avec une fraction correcte de 79 % contre 77 % pour le modèle s'appuyant sur RH. L'indice CSI est également plus élevé pour le modèle DPD (60,8 %) par rapport au modèle RH (59,5 %). De plus, le taux de fausses alertes (FAR) est significativement plus bas pour le modèle DPD, ce qui confirme sa meilleure capacité à discriminer les périodes d'humidité réelles. Toutefois, malgré ces avantages, le modèle RH présente des performances plus stables lors de la validation, avec une fraction correcte de 75,6 % et un Kappa de Cohen de 0,51, contre 73,3 % et 0,47 pour le modèle DPD. Ces résultats indiquent que, bien que le modèle DPD soit plus précis en calibration, il est moins robuste en validation, probablement en raison d'une sensibilité accrue aux variations des données. Le modèle RH, quant à lui, apparaît plus fiable pour une application opérationnelle dans le suivi de l'humectation des feuilles.

3.4. Erreurs et biais des modèles

L'analyse des erreurs et des biais a révélé que les deux modèles présentent une forte concentration des erreurs résiduelles autour de zéro, traduisant une bonne capacité globale de prédiction. Cependant, le modèle DPD affiche une erreur absolue moyenne (MAE) légèrement plus faible (0,20) par rapport au modèle RH (0,22), indiquant une meilleure précision. L'erreur moyenne (ME), plus basse pour le modèle DPD, montre une sous-estimation moins marquée des périodes d'humidité. Ces résultats mettent en évidence la capacité du modèle DPD à minimiser les écarts entre les estimations et les observations. Toutefois, il est

important de noter que la stabilité relative du modèle RH compense ces avantages, notamment en validation.

3.5. Robustesse des modèles

Les résultats obtenus après calibration et validation montrent que le modèle DPD offre de meilleures performances en calibration. Mais lors de la validation, le modèle RH se distingue par une meilleure stabilité. Cette dégradation plus marquée des performances du modèle DPD en validation souligne sa sensibilité aux fluctuations des données, ce qui limite son application en conditions réelles. Le modèle RH, malgré des performances légèrement inférieures en calibration, démontre une robustesse accrue, le rendant plus approprié pour des utilisations opérationnelles dans le contexte agroclimatique.

Conclusion

Cette étude visait à modéliser la durée d'humectation des feuilles (LWD) à partir de deux approches empiriques fondées sur l'humidité relative (RH). L'objectif était de déterminer les seuils optimaux pour prédire efficacement la LWD dans un contexte agroclimatique local. Les résultats obtenus mettent en lumière l'importance des données météorologiques dans la compréhension et l'estimation de l'humidité foliaire.

L'analyse des données météorologiques a révélé une variabilité diurne marquée, avec des températures oscillantes entre 20 et 32°C et une humidité relative atteignant fréquemment des valeurs supérieures à 90 %. Ces conditions, associées à des valeurs faibles de DPD (proches de zéro), favorisent des périodes prolongées d'humidité foliaire, particulièrement la nuit et tôt le matin.

Le modèle fondé sur RH a montré des performances satisfaisantes, notamment avec le seuil de 90 %. Ce seuil a permis d'atteindre une fraction correcte (FC) de 77 %, un indice CSI de 60 %, et un Kappa de Cohen de 0,54, indiquant un accord modéré mais significatif. Cependant, le taux de fausses alertes (FAR) de 22 % et un biais légèrement sous-estimé montrent que ce modèle pourrait être amélioré. En comparaison, le modèle s'appuyant sur DPD, utilisant les seuils $DPD \leq 1,5^{\circ}C$ et $DPD \geq 4^{\circ}C$ pour respectivement l'apparition et la

cessation de l'humidité, a présenté des performances légèrement supérieures. Avec une FC de 79 % et un Kappa de 0,58, ce modèle offre une meilleure capacité à discriminer les périodes humides et sèches. De plus, le FAR plus faible (17 %) confirme sa précision accrue.

Cependant, lors de la validation, le modèle RH a démontré une plus grande robustesse avec des performances plus stables, contrairement au modèle DPD qui a montré une sensibilité accrue aux variations des données. Cette différence souligne que, bien que le modèle DPD soit plus performant en calibration, il est moins fiable en validation, ce qui limite son applicabilité dans des contextes opérationnels.

L'analyse a révélé que les deux modèles présentent des erreurs résiduelles principalement concentrées autour de zéro, ce qui témoigne de leur précision globale. Le modèle DPD a néanmoins affiché une erreur absolue moyenne légèrement inférieure, confirmant une capacité légèrement supérieure à réduire les écarts entre les valeurs estimées et observées.

Enfin, cette étude a démontré que les deux approches empiriques peuvent être utilisées pour estimer la LWD, chaque modèle offrant des avantages spécifiques. Le modèle RH est recommandé pour des applications nécessitant une stabilité et une robustesse opérationnelles, tandis que le modèle DPD est préférable dans des contextes où une précision accrue est prioritaire. Ces résultats contribuent au développement d'outils agroclimatiques pour améliorer les systèmes d'alerte précoce et la gestion des risques liés à l'humidité foliaire. Des recherches futures pourraient explorer des combinaisons de ces approches pour optimiser davantage les performances des modèles.

Références bibliographiques

- Alexandre L., 2013. *Improving leaf wetness duration modeling with simple physics: applications to apple scab*. 75, New England, NY, Canada Fruit Pest Management Workshop, Burlington, VT, United States, 333 p.
- Amar C., Petit M., 2004. *Pathologies de plantes ornementales tropicales*. Petit-Bourg : CIRAD-FLHOR, 49 p.
- Banito A., Kpemoua E. K., Dayiwo R. K., Tedihou E., Sikirou R., 2022. Inventaire des maladies de l'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) dans la préfecture de Tchamba au Togo.

- International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(6), 2514-2525.
- Brewer C. A., Smith W. K., 1997. Patterns of leaf surface wetness for montane and subalpine plants. *Plant, Cell and Environment*, 20, 1-11.
- Camargo A. P., Sentelhas P. C., 1997. Performance evaluation of different potential evapotranspiration estimating methods in the State of Sao Paulo. *Brazil. Rev. Bras. Agrometeorol.*, 5, 89-97.
- Carisse O., Levasseur A., Provost C., 2020. Influence of leaf wetness duration and temperature on infection of grape leaves by *Elsinoe ampelina* under controlled and vineyard conditions. *Plant Disease*, 104(11), 2817-2822.
- Dalla Marta, A., Magarey, R., Orlandini, S., 2005a. Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agric. Forest Meteorol.*, 132, 84-95.
- Dalla Marta A., De Vincenzi M., Dietrich S., Orlandini S., 2005b. Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting. *Phys. Chem. Earth*, 30, 91-96.
- Djaha A. J. B., N'da H. A., Koffi K. E., Adopo N. A., Ake S., 2014. Diversité morphologique des accessions d'anacardier (*anacardium occidentale* L.) introduits en côte d'ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 244-258.
- Gillespie T.J., Srivastava B., Pitblado R.E., 1993. Using operational weather data to schedule fungicide sprays on tomatoes in Southern Ontario. *Can. J. Appl. Meteorol.*, 32, 567-573.
- Harahagazwe D., Ndayiragije P., Ntimpirangeza M., 2007. Les maladies et ravageurs de quelques cultures a racines et tubercules. Séminaire de formation à l'intention des Conseillers pédagogiques de l'atelier Agri-Elevage du Bureau d'Etudes de l'Enseignement Technique (BEET), Bujumbura, Burundi, 94 pages.
- Huber L., Gillespie T. J., 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 30(1), 553-577.
- Klemm O., Milford C., Sutton M. A., Spindler G., van Putten E., 2002. A climatology of leaf surface wetness. *Theor. Appl. Climatol.*, 71, 107-117.
- Luo W.H., Goudriaan J., 2000. Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agric. Forest Meteorol.*, 104, 303-313.
- Madeira A. C., Kim K. S., Taylor S. E., Gleason M. L., 2002. A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agric. Forest Meteorol.*, 111, 55-63.
- Monteith J. L., 1957. Dew. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 83, 322-341.
- Montone V. O., Fraisse C.W., Peres N. A., Sentelhas P. C., Gleason M., Ellis M. *et al.*, 2016. Evaluation of leaf wetness duration models for operational use in strawberry disease-warning systems in four US states. *International Journal of Biometeorology*, 60(11), 1761-1774.
- Nguyen B. H., Gilbert G. S., Rolandi M., 2023. A Bio-mimetic leaf wetness sensor from Replica Molding of leaves. *Adv. Sensor Res.*, 2, 2200033.
- Park J., Shin J. Y., Kim K. R., Ha J. C., 2019. Leaf wetness duration models using advanced machine learning algorithms: Application to farms in Gyeonggi Province, South Korea. *Water*, 11(9), 1878.
- Patel A. M., Lee W. S., Peres N. A., 2022. Imaging and deep learning based approach to leaf wetness detection in strawberry. *Sensors*, 22(21), 8558.
- Rao P.S., Gillespie T.J., Schaafsma A.W., 1998. Estimating wetness on maize ears from meteorological observations. *Can. J. Soil Sci.*, 78, 149-154.
- Rowlandson T., 2011. *Leaf wetness: implications for agriculture and remote sensing*. Ph.D. dissertation. Ames: Iowa State University.
- Rowlandson T., Gleason M., Sentelhas P., Gillespie T., Thomas C., Hornbuckle B., 2015. Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. *Plant Disease*, 99(3), 310-319.
- Rowlandson T., Gleason M., Sentelhas P. C., Gillespie T., Thomas C., Hornbuckle B., 2015. Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. *Plant Disease*, 99, 310-319.
- Schmitz H. F., Grant R. H., 2009. Precipitation and dew in a soybean canopy: Spatial variations in leaf wetness and implications for *Phakopsora pachyrhizi* infection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10), 1621-1627.
- Sentelhas P. C., Gillespie T. J., Santos E. A., 2007. Leaf wetness duration measurement: Comparison of cylindrical and flat plate sensors under different field conditions. *International Journal of Biometeorology*, 51(4), 265-273.
- Sentelhas P. C., Gillespie T. J., Monteiro J. E. B. A., Rowlandson T., 2004. Estimating leaf wetness duration on a cotton crop from meteorological data. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, 12, 235-245.
- Shin J. Y., Kim B. Y., Park J., Kim K. R., Cha J. W., 2020. Prediction of leaf wetness duration using geostationary satellite observations and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(18), 3076.
- Shin J. Y., Park J., Kim K. R., 2021. Emulators of a physical model for estimating leaf wetness duration. *Agronomy*, 11(2), 216.
- Solis M., Rojas-Herrera V., 2021. Approaches for the prediction of leaf wetness duration with machine learning. *Biomimetics*, 6(2), 29.
- Wang H., Sanchez-Molina J. A., Li M., Díaz F. R., 2019. Improving the performance of vegetable leaf wetness duration models in greenhouses using decision tree learning. *Water*, 11(1), 158.
- Weiss A., 1990. Leaf wetness: measurements and models. *Remote Sensing Reviews*, 5, 215-224.

Wilks D. S., 1995. *Statistical methods in atmospheric sciences*. Academic Press, San Diego, CA.

Zia-Khan S., Kleb M., Merkt N., Schock S., Müller J., 2022. Application of infrared imaging for early detection of downy mildew (*Plasmopara viticola*) in grapevine. *Agriculture*, 12(5), 617.

Zito S., Castel T., Richard Y., Rega M., Bois B., 2020. Optimization of a leaf wetness duration model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108087.

Citation de l'article : Coulibaly K. R. L., Amani K., Kouadio A. Z., Ette N. K., Kouassi G. K., Coulibaly W. B., Kouame C., 2024. Estimation de la durée d'humectation des feuilles par seuillage de l'humidité relative dans la zone nord de la Cote d'Ivoire. <i>Climatologie</i>, 22, 5.
