

## CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA HAUTEUR D'HUMIDITE ATMOSPHERIQUE CONDENSABLE POUR LA CORRECTION DU STRESS HYDRIQUE CHEZ LE MAÏS

KOTO N'GOBI Gabin\*, KOUNOUHEWA Basile et AWANOU Cossi Norbert  
Laboratoire de Physique du Rayonnement (LPR), Département de Physique, Faculté des Sciences et Techniques,  
UAC 01 BP 526 Cotonou (Bénin).  
\* E-mail : kotgabin36@yahoo.fr

(Reçu le 22 Février 2012; Révisé le 23 Octobre 2012; Accepté le 28 Octobre 2012)

### RESUME

Le maïs, dans notre sous région est un produit vivrier dont la culture est souvent menacée par le retard ou la rupture de la saison pluvieuse. Nous présentons dans ce travail une évaluation de la quantité d'humidité atmosphérique condensable (rosée) sur un couvert végétal constitué uniquement de la culture de maïs considérée en situation de stress hydrique. L'étude a été menée sur une superficie d'un hectare durant les quinze (15) derniers jours de sa phase de mûrissement. La comparaison entre la quantité d'humidité atmosphérique mobilisable par le couvert végétal et les besoins en eau de la culture a montré que l'humidité atmosphérique condensable obtenue pourrait contribuer à satisfaire environ 43 % des besoins en eau de la culture dans cette période de son stade d'évolution.

Mots clés : Stress hydrique, humidité atmosphérique condensable, besoins en eau.

### ABSTRACT

The corn, in our under region is a food-producing crop whose cultivation is often threatened by the backwardness or the sudden break of the rain season. We present in this work an assessment of the quantity of condensable atmospheric humidity (dew) on a vegetable cover constituted of corn culture considered in hydraulic stress. The study has been done considering one hectare surface of corn culture during the fifteen (15) last days of its ripening phase. The comparison of the atmospheric humidity quantity mobilizable by the stressed canopy and the requirement water of the culture have shown that the condensable atmospheric humidity obtained could contribute to satisfy about 43% of the culture requirement water in this period of its evolution stage.

Key words: Canopy stress, atmospheric condensable humidity, water requirement.

## INTRODUCTION

Les années soixante dix et le milieu des années quatre vingt dix ont particulièrement été le théâtre de périodes très sèches pour l'Afrique de l'Ouest [1, 2]. Les signatures de la variabilité climatique sont entre autre la baisse des précipitations et de l'écoulement des grands fleuves, la réduction de la productivité et des recettes de l'agriculture. Aujourd'hui, en plus de ces périodes de grandes sécheresses, on observe une augmentation de la fréquence des événements extrêmes, de l'élévation continue des températures moyennes à la surface de la terre induisant la diminution de l'humidité du sol, l'augmentation des évapotranspirations et

l'imprécision sur la durée des saisons [3]. Dans un tel contexte, nos pratiques culturales nécessitent un recours aux stratégies nouvelles en vue de s'adapter. La technique de condensation de l'humidité atmosphérique valorisée dans plusieurs pays arides et semi-arides pourrait être utilisée. L'atmosphère constitue un énorme réservoir de vapeur d'eau condensable, renouvelable utilisable pour les activités agricoles [4]. De toutes les cultures confrontées aux problèmes ci-dessus cités, la présente étude porte sur le cas du maïs dans le village de Nalohou au nord-ouest du Bénin. Ce village abrite une des stations d'observation du programme international AMMA (Analyse multidisciplinaire de la Mousson Africaine) où des mesures en continue des données de flux et de

paramètres agro météorologiques fiables sont disponibles. Le but du travail est d'estimer la contribution de l'humidité atmosphérique condensable au cours de la phase de maturation du maïs (à cycle court de trois mois) considéré en situation de stress hydrique. Le stress hydrique du maïs s'exprime par le ralentissement progressif de son développement et conduit à une maturation précoce. Nous avons donc déterminé durant les quinze derniers jours de cette phase, la quantité d'eau atmosphérique mobilisable par le couvert végétal de la culture sur une superficie d'un hectare. Cette quantité d'eau a été comparée aux besoins en eau de la culture évalués durant la même période. Ainsi il a été déduit la contribution de l'humidité atmosphérique condensable dans une situation du stress hydrique chez le maïs.

## 1. Matériel utilisé

### 1.1. Présentation du site

Le Bénin abrite l'un des trois sites méso-échelle d'étude de la mousson Ouest Africaine en vue de comprendre les interactions océan-atmosphère-continent. Le site objet de l'étude est situé dans une jachère herbeuse à Nalohou (9,74484°N; 1,76457°E; 449 m). La région est caractérisée par une saison des pluies qui dure environ cinq mois (mai à septembre) et une saison sèche d'environ huit mois. La figure 1 ci-dessous (Figure 1) présente la situation géographique du site d'étude.

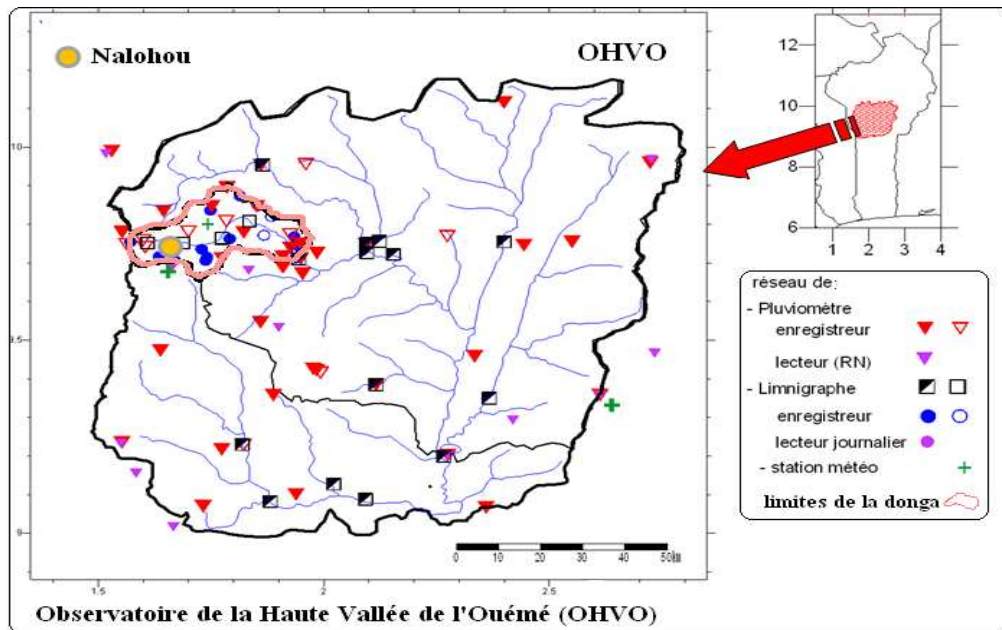


Figure 1: Situation géographique de la station de Nalohou dans la haute vallée de l'Ouémé au Bénin.

### 1.2. Les données utilisées

Les calculs nécessitent la connaissance de la température de l'air ( $T_{air}$ ), de la pression atmosphérique ( $P$ ), de l'humidité relative ( $H_r$ ) intervenant dans la formulation mathématique du problème. Cette expression dépend également des

rayonnements atmosphériques et terrestres [5]. Tous ces paramètres sont enregistrés en continu au pas de temps du quart d'heure. La figure 2 présente les différents capteurs qui ont servi aux mesures des données utilisées au cours du travail (Figure 2).

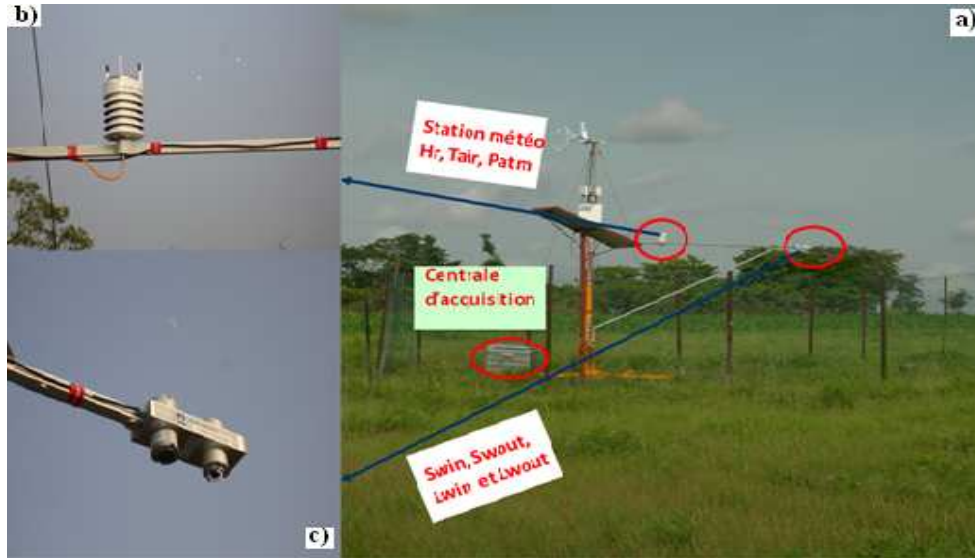


Figure 2: Station de mesure des paramètres agro météorologiques à Nalohou: **a)** station complète, **b)** capteur WXT 510: mesures météorologiques, **c)** capteur CNR1: mesures de rayonnements atmosphériques.

## 2. Méthode

L'air humide est un mélange d'air "sec" et de vapeur d'eau souvent assimilé à première approximation à un gaz parfait. Il est constitué de particules diffusant dans l'atmosphère. La première loi de Fick qui stipule que le flux de particules diffusant dans l'atmosphère est proportionnel au gradient vertical de leur concentration a été utilisée sous des hypothèses formulées.

### 2.1. Hypothèses formulées

Nous formulons l'hypothèse que l'air sec et la vapeur d'eau, isolement prise, peuvent être traités chacun, à première approximation comme un gaz idéal alors que l'air humide qui résulte de leur mélange est un gaz réel. Il peut donc vérifier l'équation de Van der Waal:

$$\left(P + a \frac{n^2}{v^2}\right)(v - nb) = nRT \quad (1)$$

$P$  est la pression totale du gaz (Pa),  $n$  son nombre de mole,  $v$  son volume ( $m^3$ ),  $R$  la constante universelle des gaz parfaits ( $R=8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  $T$  sa température (K),  $a$  et  $b$  sont respectivement la pression de cohésion ( $a=0,1358 \text{ u SI}$ ), et le covolume ( $b = 3,64 \cdot 10^{-5} \text{ u SI}$ ).

### 2.2. Détermination de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable

Pour obtenir de l'eau liquide à partir de l'air humide,

l'air devra perdre de l'énergie et sa température diminuer jusqu'au moins en dessous du point de rosée. En partant d'une feuille de la plante du maïs, supposée comme surface de condensation inclinée d'environ  $45^\circ$  par rapport à la tige et d'où dégoulinerait les gouttelettes formées, la première loi de Fick appliquée aux voisinages de la feuille s'écrit:

$$\frac{dn}{dt} = -D \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

$c$  est la concentration des particules et  $D$  le coefficient de diffusion. D'après [6],  $D$  a pour expression:

$$D = D_0 \left(\frac{T_{rad}}{273,16}\right)^{1,75} \quad (3)$$

$D_0 = 0,229 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  et  $T_{rad}$  la température (K) de la feuille. Un volume considéré d'air humide diffusant, au travers du couvert végétal de la culture pendant les nuits à ciel clair, devra alors passer par les états thermiques suivants: de sa température  $T_a$  à la température  $T_{rad}$  de la feuille avec laquelle il entre en contact. Comme  $T_{rad}$  est inférieur à au point de rosée  $T_{dew}$ , il y a condensation quand  $T_a$  est au moins égal à  $T_{dew}$ . Représentons ces états thermiques par deux zones délimitées par l'isotherme point de rosée ( $T_{dew}$ ) au dessus de la feuille considérée. La figure 3 schématise le processus (Figure 3).

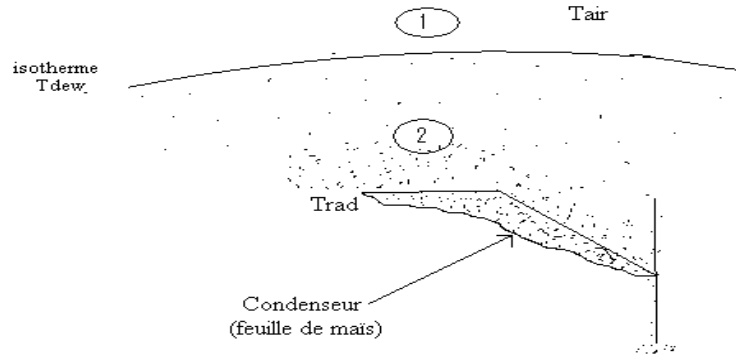


Figure 3: Schéma du processus de condensation de l'humidité atmosphérique dans l'interface séparant le point de rosée de la surface de condensation (feuille de maïs).

Si nous supposons que  $n(t)$  est une fonction continue de densité de particules condensant à la limite de l'isotherme point de rosée, et si  $n(t+\Delta t)$  est la valeur de  $n(t)$  à la limite de la surface de condensation (voisinages de la feuille) après avoir transité durant un temps d'évolution infiniment petit  $\Delta t$  de la zone 1 à 2, la formule des accroissements finis dans l'interface considéré s'écrit:

$$n(t) - n(t + \Delta t) = \left(-\frac{dn}{dt} + \varepsilon(\Delta t)\right)\Delta t \quad \text{avec} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \varepsilon(\Delta t) = 0 \quad (4)$$

Le taux de variation du flux de particules condensant dans cet intervalle de temps vaut:

$$\frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{t - (t + \Delta t)} = -\frac{dn}{dt} \quad (5)$$

$$\text{De même, } \frac{c(t) - c(t + \Delta z)}{z - (z + \Delta z)} = -\frac{dc}{dz} \quad (6)$$

Les équations (5) et (6) dans (3) donnent:

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = -D \frac{\Delta c}{\Delta z} = -D \frac{c_2 - c_1}{\Delta z} \quad (7)$$

Où  $c_1$  et  $c_2$  sont les concentrations au point de rosée et aux voisinages de la surface de condensation. D'après [7] ces concentrations peuvent être assimilées au contenu en vapeur d'eau  $\omega_1$  et  $\omega_2$  de l'air dans l'interface de condensation dépendant de l'humidité relative et des pressions dans l'interface où l'air est saturé en vapeur d'eau. Leurs expressions respectives sont:

$$\omega_1 = 0,622 \frac{P_{S1}}{P} \quad \text{et} \quad \omega_2 = 0,622 \frac{P_{S2}}{P} \quad (8)$$

Où  $P_{S2}$  et  $P_{S1}$  sont les tensions de vapeurs saturantes respectivement au point de rosée et sur la surface de condensation. En remplaçant les égalités (8) dans (7) et en multipliant membre à membre par la masse

volumique de la vapeur d'eau  $\rho_v$  on obtient:

$$\rho_v \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0,622 \rho_v D \frac{1}{\Delta z} (P_{S1} - P_{S2}) \quad (9)$$

$$\Delta z = \frac{N_u k_f}{h_c} \quad \text{Avec } k_f \text{ la conductivité thermique de}$$

l'air  $k_f = 0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $h_c$  le coefficient d'échange convectif est fonction de la température de l'air et de celle du couvert en convection naturelle.  $N_u$  (nombre de Nusselt) dépend également de l'angle d'inclinaison  $S$  de la feuille par rapport au pied et du nombre de Rayleigh  $R_a$ . D'après [7] une expression empirique pour le calcul de sa valeur moyenne est donnée par:

$$N_u = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos(S)}\right]^0 * \left[1 - 1708 \frac{\sin(1,8S)^{1,6}}{R_a \cos(S)}\right] + \left[\frac{R_a \cos(S)}{5830}\right]^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (10)$$

Où  $R_a = G_r * P_r$ . La puissance 0 signifie que le terme entre crochet est nul si l'expression est négative. Avec  $G_r$  et  $P_r$  sont respectivement les nombre de Grashof et de Prandtl:

$$G_r = \frac{\rho \cdot a_s^2 g \beta (T_{dew} - T_{rad}) L^3}{\mu^2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{2}{T_a + T_{rad}}, \quad g \text{ est l'accélération de la pesanteur}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2, \quad L \text{ est la longueur caractéristique de la feuille. } P_r = \frac{\mu}{k_f} C_p, \quad C_p = 0,9984 - 0,435 \cdot 10^{-4} T_a + 0,215 \cdot 10^{-6} T_a^2 \quad (12)$$

est la chaleur spécifique de l'air et dépend de la température,  $\mu$  est la viscosité dynamique de l'air et dépend également de la température. D'après [8]

$$\mu = 1,458 \cdot 10^{-6} \frac{T_a^{2/3} \mu}{T_a + 110,4}$$

le terme  $Q_s = \rho_v \frac{\Delta n}{\Delta t}$  de (9) est un débit de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable. En tirant  $P$  de (1) et en introduisant les

équations (3), (10), dans l'équation (9) on obtient:

$$Q_s = 1,042 \cdot 10^{-10} * \rho_v \frac{\rho_v}{\rho_{as}} * T_{rad}^{1,75} * \frac{1-1,255 \cdot 10^{-3} \rho_{as}}{T_a - 0,564 \rho_{as} + 7,073 \cdot 10^{-4} \rho_{as}^2} \frac{h_c}{\rho_{as}^2 N_u} (P_{S1} - P_{S2}) \quad (13)$$

Les pressions de vapeur saturante dépendent des températures aux limites de l'interface (point de rosée et surface de la feuille) leur expression en fonction de T est:

$$P_{Si} = 10^{-2} \exp [77,341 - 8,2 \ln(T - 0,15) + 5,71 \cdot 10^{-3} T - \frac{72,35461}{T - 0,15}]$$

La face du capteur en regard du couvert végétal (Figure 2c) mesure, en plus de l'émission propre du couvert ( $\epsilon \sigma T_{rad}^4$ ) due à sa température, le rayonnement atmosphérique qui s'y réfléchit  $(1 - \epsilon)L_{win}$ . La face en regard de l'atmosphère mesure le rayonnement incident direct  $L_{win}$  en provenance de l'atmosphère. Pour la culture de maïs  $\epsilon = 0,98$  [9]. Le bilan de la puissance mesurée peut donc s'écrire comme suit:

$$L_{wout} = \epsilon \sigma T_{rad}^4 + (1 - \epsilon)L_{win} \quad (14)$$

On en déduit la température  $T_{rad}$  du couvert végétal

$$T_{rad} = \left( \frac{L_{wout} - (1 - \epsilon)L_{win}}{\epsilon \sigma} \right)^{1/4} \quad (15)$$

Les masses volumiques de la vapeur d'eau et de l'air sec ont pour expression:

$$\rho_v = 18 \frac{P}{R_d T_a} \quad \text{et} \quad \rho_{as} = 29 \frac{(P - 0,378 P_v)}{R_d T_a}$$

avec  $R_d$  la constante de l'air sec ( $R_d = 287,1 \text{ J/kg/K}$ ) et  $P_v$  la tension de vapeur. Le point de rosée est déduit à partir de l'humidité relative et de la température de l'air en utilisant la formule de Magnus Tetens:

$$t_{dew} = \frac{237,7 \left[ \frac{17,27 t_a}{237,7 + t_a} + \ln(Hr) \right]}{17,27 - \left[ \frac{17,27 t_a}{237,7 + t_a} + \ln(Hr) \right]}$$

L'équation (13) est l'expression que nous avons utilisée pour le calcul de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable, mobilisable par une feuille de maïs. Le calcul est étendu au pied entier puis à toute la superficie en choisissant un nombre moyen N de feuilles que peut posséder un pied de maïs. Cette expression (13) dépend des paramètres directement mesurés ou déduits des mesures météorologiques enregistrées.  $Q_s$  est fonction explicite des variables  $\rho_v$ ,  $\rho_{as}$ ,  $T_{rad}$ ,  $T_a$ ,  $h_c$ ,  $N_u$ ,  $P_{S1}$  et  $P_{S2}$ . En

effet,  $\rho_v$ ,  $\rho_{as}$  sont déduits de la mesure directe de la pression atmosphérique p, de la tension de vapeur d'eau  $P_v$ , et de la température,  $T_a$  de l'air,  $T_{rad}$  dépend des rayonnements atmosphériques  $L_{win}$ ,  $L_{wout}$  directement mesurés (équation (15)).

$P_{S1}$  et  $P_{S2}$  dépendent du point de rosée et de la température du couvert végétal.  $N_u$  est une fonction implicite de la température de l'air, de la longueur caractéristique L et de l'inclinaison S de la feuille (équation (10)). Un code Matlab a été utilisé pour les calculs.

### 2.3 Détermination des besoins en eau de la culture du maïs

Les nuits, la plante profite mieux de la rosée que les journées où l'apparition du soleil accélère son évaporation et cause une importante sollicitation de la plante à la résistance. Les besoins quotidiens en eau sont équivalents à ces pertes quotidiennes par évapotranspiration affectée de son état végétatif. Parmi les méthodes de calcul des besoins en eau d'une culture (BEC), l'approche climatique est généralement la plus utilisée. Le modèle de la FAO est utilisé pour son calcul:

$$BEC = \Sigma \text{période} (k_c \cdot ETo) \quad (16)$$

Avec ETo l'évapotranspiration de référence,  $k_c$  est le coefficient cultural selon la phase de développement considérée. Ce modèle incorpore les effets de la culture et son stade végétatif. ETo a été calculée par la méthode de Penman-Monteith [10]:

$$ETo = \frac{0,408(Rn - G)10^{-3} + \frac{0,010364 \gamma v (P_s - P_v)}{t_a + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34v)} 86400$$

Rn est le rayonnement net, G le flux de chaleur dans le sol,  $\Delta$  est la pente de la courbe de tension de vapeur saturante,  $\gamma$  la constante psychrométrique. En effet,

$$Rn = (S_{win} - S_{wout}) + (L_{win} - L_{wout})$$

G mesurer directement dans le sol.  $\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} P$

$$\text{et } \Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp \left( \frac{17,27 t_a}{237,3 + t_a} \right) \right]}{(237,3 + t_a)^2} \quad (17)$$

Le tableau I ci-après présente les variables mesurées directement et celles déduites des mesures.

Tableau I: Présentation des variables mesurées directement et des variables déduites des mesures directes.

	Variables mesurées directement	Variables déduites
Variables	$t_a$ , $H_r$ , $P_{atm}$ , $V$ , $L_{win}$ , $L_{wout}$ , $S_{win}$ $S_{wout}$ , $G$	$T_{dew}$ , $P_{s1}$ , $P_{s2}$ , $N_{u_s}$ $\mu$ , $Trad$ , $hc$ , $Rn$ , $\Delta$ , $\gamma$ $T_g$

**2.4 Choix de la période et des variables caractéristiques du maïs**

Durant la saison, le maïs à cycle court de 90 jours peut être cultivé en premier cycle, en second cycle ou en cycle unique. Les premiers semis peuvent bénéficier de façon réglementaire des trois premiers mois de saison (mai, juin et juillet). Celui des seconds semis, mis sous terre au mois d'août et dont le cycle devrait durer jusqu'à la fin du mois d'octobre ne termine souvent pas le cycle quand survient la rupture ou la fin de saison. Ce mois, incertain qu'est octobre où les seconds semis, sont souvent perturbés apparaît intéressant dans ce travail. D'où son choix. Aussi, la température du couvert végétal, le point de rosée et la température de l'air sont-ils très capital dans l'occurrence de la condensation de l'humidité atmosphérique.

La figure 4 ci-après, présente l'évolution de ces trois paramètres durant trois jours (du 26 au 29 octobre 2008). Deux zones fondamentales (a) et (b) sont donc identifiables de la figure 4:

- La première zone (a) correspond aux journées, où en présence du soleil, la température de l'air réchauffant le couvert atteint les valeurs maximales et le point de rosée est rarement atteint. La courbe du point de rosée est en dessous de celle du couvert et de la température de l'air.
- La deuxième zone (b) correspond aux nuits, où en l'absence du soleil, l'air refroidi, sa température atteint les valeurs minimales et la courbe de la température du couvert végétal est située en dessous de celle du point de rosée et de la température de l'air.

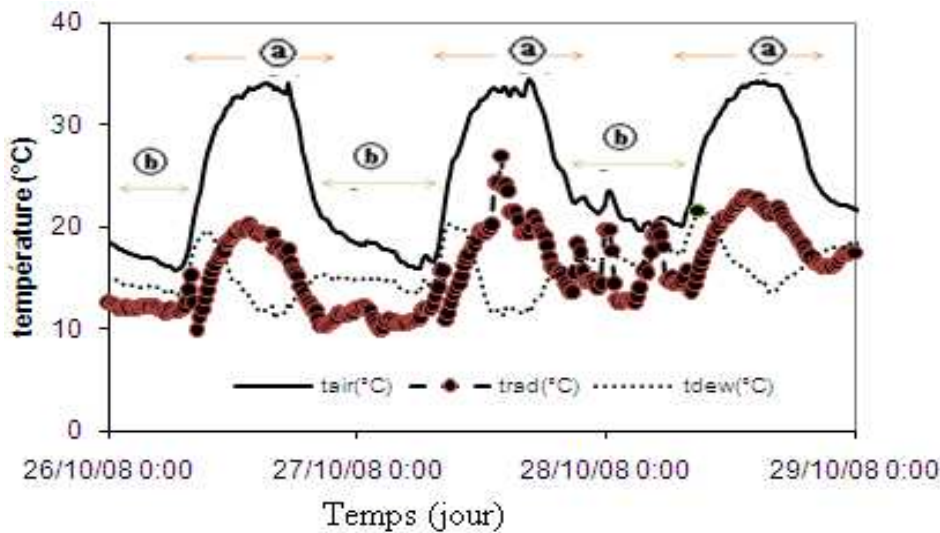


Figure 4: Evolution temporelle de la température de l'air (**tair**), de la température du couvert (**trad**) et du point de rosée (**tdew**) durant 3 jours à Nalohou.

Ce constat important justifie le choix d'évaluer la hauteur d'humidité atmosphérique condensable les nuits (22 h à 6 h du matin). Après la détermination théorique des expressions de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable (13) et des besoins en eau (16) de la culture, les données collectées par la station de mesure, dans la période du 15 au 29 octobre 2008 de 22h à 6h du matin soit huit heures de temps équivalent à 432 000 secondes ont été utilisées. Les prescriptions culturales prévoient, pour une bonne rentabilité, en moyenne que sur une superficie d'un hectare, l'espace définissant un sillon (séparant deux lignes) de pieds de maïs soit de 70 cm et celui séparant deux pieds sur une même ligne varie entre 20 cm et 50 cm [11], [12]. Pour les calculs, un choix de 70 cm entre deux lignes et 50 cm en moyenne entre deux pieds est fait, ce qui fait que sur la superficie considérée on dénombre 142 lignes et 200 pieds sur la ligne. Par hectare 28400 pieds de maïs pousseront.

Les paysans généralement sèment plusieurs grains par poquet. Après le stade de lever, ils procèdent au démariage et ils laissent en moyenne deux plants par poquet. Au total, 56800 pieds de maïs à l'hectare sont considérés si tous les pieds ont surmonté les difficultés climatiques et les menaces des oiseaux (supposition faite). La quantité d'humidité atmosphérique collectable ne se répartirait pas équitablement sur toute la superficie d'un hectare. L'eau dégouline par endroit le long des pieds de la culture et atteint le sol sur une certaine superficie autour de la plante. Nous avons supposé que la surface concernée, qui reçoit réellement l'eau condensée est circulaire et d'environ 15 cm de rayon autour de chaque pied. Le tableau suivant présente les valeurs choisies des paramètres caractéristiques du maïs (Tableau II). Les résultats obtenus à partir des calculs utilisant toutes ces équations et valeurs sont présentés.

Tableau II: Valeurs des paramètres caractéristiques de la feuille du maïs

Paramètres	Longueur Caractéristique (L)	Nombre moyen de feuilles (N)	Emissivité E	Inclinaison de la feuille	Coefficient cultural (kc) au mûrissement
Valeurs	80 cm	12	0,98	45°	0,4

Les figures ci-après présentent l'évolution de quelques uns des paramètres déduits (Tableau I) des mesures et ayant servi au calcul de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable (Figure 5). Sur cette figure, le point de rosée est situé entre la température de l'air et celle du couvert végétal: l'air (tair) chargé de vapeur passant aux voisinages du couvert végétal (trad) très refroidi perd sa chaleur et sa température diminue jusqu'au moins en dessous du point de rosée. L'écart entre les températures de l'air et celle du couvert végétal est de l'ordre de 2°C favorisant la condensation naturelle. La figure 6 ci-dessous présente l'évolution de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable et les besoins en eau de la culture comparés durant l'étude (Figure 6).

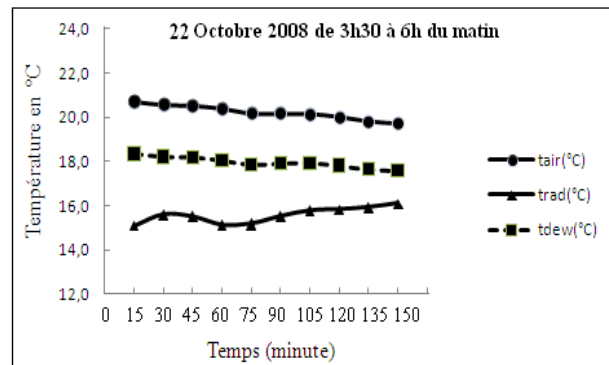


Figure 5: Evolution des températures de l'air (tair), du couvert végétal (trad) et du point de rosée (tdew) durant 2 heures 30 minutes (3h30 à 06h).

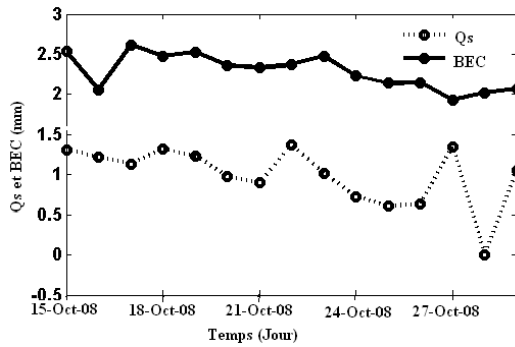


Figure 6: Variation de la hauteur d'humidité atmosphérique et des besoins en eau durant une quinzaine de jours de la phase de mûrissement.

### 3. Résultats et discussion

Les hauteurs d'humidité atmosphérique condensable (Figure 6) obtenues à l'hectare en utilisant la première loi de Fick ont une valeur moyenne cumulée de l'ordre de 1 mm par nuit. Elles fluctuent entre une valeur minimale de 0,61 mm et une valeur maximale de 1,32 mm. Les besoins en eau exprimés sous forme d'évapotranspiration maximale de la culture sur toute la superficie fluctuent entre 1,93 mm et 2,61 mm le jour avec une valeur moyenne de 2,29 mm. Cette estimation montre que la culture pourrait mobiliser de la part de l'atmosphère un total de 14,85 mm en une quinzaine de nuit pour compenser ces pertes journalières par évapotranspiration. Les pertes par évaporation sont estimées dans la même période à un cumul de 85,73 mm. Ces pertes équivalent à un besoin total en eau de 34,29 mm. La quantité d'humidité atmosphérique qui pourrait condenser dans l'environnement du couvert végétal représente environ 43% des besoins totaux en eau de la plante durant la période d'étude. Cette quantité théoriquement évaluée par condensation radiative sur le couvert végétal est inférieure aux besoins en eau de la plante. Les résultats montrent (Figure 6) une tendance légère à la baisse des besoins en eau et de la hauteur d'humidité atmosphérique condensable à la fin de cette phase de développement de la plante. Cette décroissance pourrait être expliquée par le fait que la culture tend vers la fin de son cycle.

En 2008 à la fin du mois d'octobre, l'humidité relative moyenne de l'air diminuant, l'air devient plus sec et ceux à cause de l'établissement de l'harmattan. Ainsi les vitesses diurnes du vent sont plus importantes que les vitesses nocturnes entraînant l'augmentation

diurne du coefficient d'échange par convection et la diminution de l'épaisseur de la couche de condensation. Les nuits présentant les valeurs maximales des hauteurs d'humidité atmosphérique condensable sont favorisées par un micro climat local où le vent est sensiblement faible, l'hygrométrie atmosphérique élevée et les températures nocturnes très inférieures aux températures diurnes. Cette variabilité des quantités d'eau atmosphérique obtenues pourrait également être expliquée par la forte corrélation qui existe entre les conditions d'alimentation en eau de la culture (qui n'est pas l'objet de cette étude) d'une part, et de la demande évaporative d'autre part [13]. Hughes et Brimblecombe, en 1994 ont obtenu, après mesure de la rosée en zone méditerranéenne, durant 40 nuits, que la hauteur moyenne de la rosée peut être estimée à 0,14 mm d'eau sur la surface occupée par nuit et qu'il fallait environ 8% du rayonnement net journalier pour son évaporation [13]. Si l'on extrapole ces résultats aux nôtres, on peut déduire que l'humidité atmosphérique condensable obtenue nécessitera un rayonnement solaire plus important pour son évaporation. La rosée passera beaucoup plus de temps dans le micro climat représenté par le couvert végétal et les plantes pourraient mieux profiter de sa présence pour corriger les signes de stress. Les sollicitations atmosphériques étant importante, cette eau de rosée pourrait atténuer leurs effets à travers le couvert végétal.

Bien que l'eau collectable estimée soit inférieure aux besoins en eau de la plante, elle pourrait quand même jouer deux rôles fondamentaux. Au premier plan, sa présence sur le couvert végétal permettrait à la plante de profiter de cette humidité et de retarder ces pertes par évapotranspiration. Au second plan, une grande partie de l'eau condensée dégouline par gravitation à travers le feuillage lorsque la coalescence est accrue, jusqu'au pied de la plante et à ces environs, les racines superficielles en profitent directement pour l'alimentation de la plante. Cet apport estimatif dans une situation de stress hydrique serait très considérable pour une plante qui recherche la moindre goutte pour assouvir ses besoins. Des études de campagnes récentes menées en zone arides ou semi aride d'Afrique [14, 15], d'Asie [16] et d'Europe [17] de collecte de rosée ont montré le rôle multidimensionnel et capital de l'humidité atmosphérique condensable dans le bilan des ressources en eau pour les activités humaines. Les travaux ont obtenu des résultats analogues aux nôtres: des rendements jusqu'à 0,6 L/m<sup>2</sup> ont été obtenu en utilisant des condenseurs plants, moins émissifs que le couvert du maïs.

## CONCLUSION

Au terme de cette étude théorique de l'estimation des hauteurs d'humidité atmosphérique, il ressort que la vapeur d'eau, principal précurseur d'humidité de l'air est disponible et contribuerait à une échelle non négligeable dans le bilan d'eau mobilisable par la culture du maïs pour assouvir ces besoins. La question d'adaptation de notre agriculture à la variabilité climatique pourrait passer par les poches d'eau atmosphérique. Pour apprécier l'efficacité du modèle développé, il sera judicieux de mener des collectes directes d'humidité atmosphérique en utilisant un

système des condenseurs ayant une structure ressemblant aux pieds de la culture. On pourrait utiliser des systèmes tronconiques à émissivité équivalente du couvert végétal du maïs (ayant une géométrie semblable à un pied de maïs) et l'implanter dans la même zone climatique. Prendre en compte la physiologie et le fonctionnement génétique de la plante afin de rechercher une variété de maïs qui serait tolérante au déficit en eau et qui pourrait terminer une grande partie de son état végétatif en utilisant le peu d'eau directement collectée de l'atmosphère. Ces préoccupations pourraient être le point de départ de travaux ultérieurs.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. MADIODIO N., AFOUDA A., AMANI A., 2004.- *Réduire la variabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et désertifications: Elément de stratégie régionale de préparation et d'adaptation*. UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. XVIII+71. ISBN: 2-8317-0783.
2. KANOHIN F., SALEY M. B., SAVANE I., 2009.- *Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zone tropicale humide: cas de la région de Daoukro en Côte d'Ivoire*. *European Journal of Scientific Research*, 26 (2) : 209-222.
3. PHYLLIPE R., MAHE G., 2010.- *Calcul des pluies et débits classés sur le bassin du Bani (Mali): une approche de la vulnérabilité des ouvrages et de la population depuis la sécheresse*. *Journal of Hydrological Sciences*, 351-363.
4. NIKOLAYEV V., BEYSENS D., GIODA A., MILIMOUK I., KATIUSHIN E., MOREL J.P., 1996.- *Water recovery from dew*. *J. of Hydrology*. 182:19-35.
5. AWANOU C.N., 1991.- *Study of heat exchange radiatively in 7-14  $\mu$ m band*. *Renewable Energy*, 1 (3/4) : 335-344.
6. JACOBS A. F. G., HEUNSINKVEL, B. G., BERKOWICZ S. M., 2002.- *A simple model for potential dewfall in an arid region*. *Atmosphere Research*, 64: 285-295.
7. KOUNOUHEWA B., AWANOU C. N., 1999.- *Evaluation of the amount of the atmospheric humidity condensed naturally*. *Renewable Energy*, 18: 223-247.
8. HILSENDRATH J., 1960.- *Tables of Thermodynamic and Transport Properties of Air (Argon, Carbon Dioxide, Carbon Monoxide, Hydrogen, Nitrogen, Oxygen, and Steam*. Pergamon, Press, New York, 1960).
9. RUBIO E., CASELLES V., COLL C., VALOUR E., and SOSPEDRA F., 2003.- *Thermal-infrared emissivity of natural surfaces: Improvements on the experimental set-up and new measurements*. *International Journal of Remote Sensing*. 24(24) : 5379-5390.
10. ALLEN R. G., SMITH M., PEREIRA L. S., 1994.- *Updated reference evapotranspiration definition and calculation procedures*. *ICID Bulletin*, 43 (2) : 61.
11. ROUANET G., 1997.- *Le technicien d'agriculture tropicale, le maïs*. Maisonneuve et Larousse. Nouvelle édition.
12. ROUANET G., 1984.- *Le technicien d'agriculture tropicale: le maïs*. Maisonneuve et Larousse. Nouvelle édition.
13. HUGHES R. N. and BRIMBLECOMBE P., 1994.- *Dew and guttation: formation and environmental significance*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67: 173-190.
14. LEKOUCH I., KABBACHI B., MILIMOUK I., MUSELLI M., 2010.- *Influence of temporal variations and chemical characteristics of dew and*

*rain in south-west Morocco. 5th International Conference on Fog. Fog Collection and Dew, Münster, Germany, 25-30.*

15. LEKOUCH I., MUSELLI M., KABBACHI B., OUAZZANI J., MELNYTCHOUK-MILIMOUK I., BEYSENS D., 2011.- *Dew, fog, and rain as supplementary sources of water in south-western Morocco. Energy, 36: 2257-2265.*

16. SHARAN G., CLUS O., SINGH S., MUSELLI M.,

BEYSENS D., 2011.- *Very large dew and rain ridge collector in Kutch area Gujarat area, (Gujarat, India). Journal of Hydrology. 405, Issues 1-2: 171-181.*

17. BEYSENS D., LEKOUCH I., MUSELLI M., MILETA M., MILIMOUK-MELNYTCHOUK I., SODJAT V., 2010.- *Physical and chemical properties of dew and rain water in the Dalmatian coast, Croatia. 5th International Conference on Fog. Fog Collection and Dew, Münster, Germany, pp. 25-30.*