

Estimation de la quantité d'eau apportée par une rosée à l'aide de capteurs diélectriques de durée d'humectation

Pascal Thiébeau¹, Gonzague Alavoine¹

Résumé. Nous avons utilisé des capteurs diélectriques (ou capacitifs) afin de pouvoir suivre en continu la présence ou l'absence de rosées à la surface de pailles de chanvre au champ, cette information étant importante pour améliorer nos connaissances sur le processus de rouissage. Après une saison d'utilisation, nous avons cherché à quantifier l'eau présente lors d'une rosée par étalonnage des capteurs en conditions contrôlées au laboratoire. Deux méthodes ont été testées : une **méthode massique** (méthode 1), par pulvérisation d'eau à la surface du capteur, suivi de la dynamique d'évaporation par pesée continue sur une balance de précision ; une **méthode volumique** (méthode 2), par application d'une quantité d'eau précise déposée à l'aide d'une micropipette et mesure du signal diélectrique. Nous préconisons de retenir la méthode massique car elle se révèle plus juste que la méthode volumique. Ce matériel répond bien à l'objectif affiché par le constructeur : détecter la présence d'une rosée. Notre travail permet d'affiner cette donnée en quantifiant l'eau présente (masse d'eau sur le capteur_(g) = 0,0013 x signal_(mV) – 0,4190 ; $R^2 = 0,9728$, RMSE = 0,0261).

Mots clés : rosée, capteur capacitif, étalonnage, laboratoire, méthode, mesure de la quantité d'eau



Dispositif d'étude du rouissage de pailles de chanvre au champ (photo de gauche, G. Alavoine), exemple d'une placette de mesure dotée d'un capteur diélectrique de durée d'humectation (photo de droite, G. Alavoine).

¹ INRA, UMR Fractionnement des Agro Ressources et Environnement, 51100 Reims, France
pascal.thiebeau@inra.fr ; gonzague.alavoine@inra.fr

Introduction

Cette étude s'est inscrite dans le cadre d'un projet de recherche dont l'un des objectifs est de proposer un outil d'aide à la décision permettant de suivre le rouissage au champ de pailles de chanvre et de certifier une qualité de fibres rouies. Le rouissage est une transformation consistant à faciliter la séparation du bois et des fibres de la tige, qui s'opère sous l'action des conditions climatiques (rosée, pluie, soleil) et des micro-organismes, sur une durée variable de 4 à 8 semaines après la fauche des pailles. La réussite du rouissage a d'autre part un impact direct sur la transformation en usine de la matière première (facilité d'extraction de la fibre, taux de perte réduit). L'importance de l'effet de la rosée sur le processus du rouissage au champ est connue depuis longtemps par ses cycles d'humectation et de dessiccation des pailles en cours de journée, comme ceux liés à la durée d'ensoleillement, de pluies, etc. Jusqu'à présent, les investigations météorologiques de l'effet de la rosée ont été peu développées par manque de dispositif de mesure efficace et facile à mettre en œuvre. En dehors de mesures massiques d'humidités des pailles, qui sont ponctuelles, nous avons cherché à développer une méthodologie qui nous permette de disposer de cette information de manière régulière et automatique. Après examen des équipements disponibles sur le marché, notre choix s'est arrêté sur les sondes LWS (Leaf Wetness Sensor ; Decagon Device® Inc.) renommées « **Phytos 31** » depuis notre acquisition. Ce matériel, initialement conçu pour des applications de mesure de durée d'humectation des feuilles (modélisation des conditions de développement des maladies foliaires), intègre une sonde pouvant détecter de très petites quantités d'eau ou de glace présentes sur la surface du capteur. Lors de nos expérimentations au champ, nous avons installé ce dispositif de mesures au sein de paillis de chanvre pour étudier la dynamique de cette source d'humidité. Une relation permettant d'avoir une estimation quantitative de l'eau issue de la rosée est proposée par Cobos (2013) ; cependant, il nous a semblé nécessaire de vérifier les performances météorologiques du matériel dans un environnement contrôlé et de pouvoir ainsi confronter les résultats obtenus avec ceux affichés par celui-ci. Ce travail présente nos résultats d'étalonnage au laboratoire et d'utilisation au cours d'une saison d'expérimentation au champ.

Matériels et méthodes

Présentation du capteur LWS

Les caractéristiques techniques de ce matériel sont présentées au **Tableau 1**.

Le capteur LWS (Leaf Wetness Sensor ; Decagon Device® Inc.) est initialement conçu pour reproduire approximativement une feuille de plante et ses propriétés thermodynamiques. Il est construit en fibre de verre, mince, dont la surface de revêtement est hydrophobe comme peut l'être une feuille disposant d'une cuticule hydrophobe. Par imitation des propriétés thermodynamiques réelle des feuilles ($1480 \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), le capteur LWS reproduit étroitement l'état d'humidité d'un feuillage.

Tableau 1. Caractéristiques techniques de la sonde LWS

Durée d'une mesure	10 ms
Alimentation	de 2,5 Vcc (2 mA) à 5 Vcc (7 mA)
Signal de sortie tension	de 320 à 1000 mV à 3 V d'excitation (gamme 0-3000 mV)
Température de fonctionnement :	-40°C à +60°C
Durée de fonctionnement	Plus de 2 ans pour une utilisation continue
Dimensions/Poids	11,2 cm x 5,8 cm x 0,75 mm / 138 g (5m)
Surface de mesure du capteur	32 cm ²
Centrales d'acquisition	CSI, EM50/EM50R et autres centrales pouvant délivrer une alimentation par relais entre 3 et 15 V, et mesurer en signal tension non différentiel sous une résolution mini de 12 bits.

Il reproduit également étroitement les propriétés radiatives des feuilles vraies. Des feuilles saines absorbent généralement dans une grande proportion visible du spectre, mais rejettent sélectivement une grande partie de l'énergie dans le proche infra-rouge. Le revêtement superficiel du capteur absorbe bien dans la région du proche infra-rouge, mais la couleur blanche reflète la plupart de la radiation visible. Selon le constructeur, des mesures au spectrophotomètre indiquent que l'équilibre des radiations globales du capteur correspond étroitement à celui d'une feuille saine. L'utilisation prolongée de la sonde à la lumière du soleil peut conduire au jaunissement de la surface de revêtement, mais ne modifie pas la qualité de la mesure.

Ce matériel est un capteur capacitif : il mesure la permittivité diélectrique du milieu (ou constante diélectrique), propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué. Cette grandeur est très corrélée à la présence d'eau et souvent utilisée pour mesurer la teneur en eau volumique des sols (exemple de capteurs dans l'article de Thiébeau et Bertrand, 2016). Le capteur réalise les mesures sur une seule de ses deux faces, celle dite « supérieure » où l'on décèle très facilement au toucher et à la vue un réseau de fils noyé dans la masse ; la face inférieure étant complètement lisse. Le constructeur précise que la zone de mesure est approximativement d'1 cm au-dessus de la face supérieure.

Les capteurs ont été utilisés avec leur longueur de câble standard (5 m), équipés d'une prise jack, connectés à une centrale de mesure du constructeur (EM50) (**Figure 1**).



Figure 1. Présentation du matériel utilisé : centrale EM50 et sonde LWS (Photo : P. Thiébeau).

Préconisations d'usage du constructeur

Pour obtenir des mesures de qualité, le constructeur préconise les mesures suivantes :

- manipuler avec précaution pour ne pas abimer la surface de mesure ;
- nettoyer régulièrement avec un tissu humide afin de retirer la poussière ou les déjections d'oiseaux ;
- à réserver aux enregistreurs capables de délivrer des excitations courtes, laissant le capteur tranquille la plupart du temps car une excitation en continu peut forcer la sonde au-delà des limites électromagnétiques spécifiées ;
- pour les usagers n'utilisant pas les centrales d'acquisition Em50, il sera nécessaire de définir les seuils de rosée pour leur système ;
- l'état « sec » de signal du capteur varie avec le voltage d'excitation. La plage d'excitation acceptable est comprise entre 2,5 et 5 volts. Nous avons travaillé avec une excitation de 3 volts ;
- ne pas espacer les mesures au-delà de 15 min. Nous avons travaillé avec un espacement d'1 min ;
- une calibration individuelle de chaque capteur n'est pas nécessaire.

Données recueillies

Avec ce capteur, la centrale EM50 peut être configurée, via le programme utilitaire ECH2O permettant de produire les fichiers de sorties présence/absence de rosée, en indiquant leur durée, ou fournir une donnée en millivolt. Quelle que soit l'option choisie, le programme génère sur chaque fichier (format Excel) un onglet de données brutes

Le Cahier des Techniques de l'INRA 2018 (94)

(« unprocessed data ») qui sont transformées en données élaborées (mV) par un ajustement mathématique fourni par le constructeur :

$$\text{mV} = \text{Donnée brute} \times 0,733 \quad (1)$$

Lors de notre expérimentation au champ, nous avons comparé l'utilisation d'un capteur collectant la donnée « présence/absence de rosée » à côté de deux autres capteurs collectant les données en mV.

Par ailleurs, Cobos (2013) a proposé trois courbes de conversion des signaux recueillis pour estimer les quantités d'eau correspondantes (g/m^2) : une à partir de données brutes pour une excitation à 3000 mV, et deux à partir de données acquises en mV : pour des excitations à 2500 et 5000 mV. Ces ajustements sont tous les trois de types non linéaires. Ils sont présentés au **Tableau 2**. Compte tenu de l'excitation de la centrale d'acquisition EM50, seul l'ajustement (2) de Cobos (2013) pourra être confronté aux résultats de notre travail.

Tableau 2. Valeurs des ajustements obtenus par Cobos (2013)

Valeur d'excitation	Ajustement	Observation
3000 mV	$Y = 1,540 \exp(0,00580 * X)$	avec $Y = \text{g d'eau par m}^2$, et $X = \text{« raw counts »}$ (2)
2500 mV	$Y = 1,950 \exp(0,00864 * X)$	avec $Y = \text{g d'eau par m}^2$, et $X = \text{signal diélectrique}$ (3)
5000 mV	$Y = 0,539 \exp(0,00634 * X)$	avec $Y = \text{g d'eau par m}^2$, et $X = \text{signal diélectrique}$ (4)

Conditions dans lesquelles nous avons testé cette sonde en laboratoire

A la suite de notre campagne de mesures, nous avons souhaité vérifier si le signal délivré par ce matériel pouvait être, sur le plan de la métrologie, exploité pour quantifier la masse d'eau apportée par une rosée (gramme d'eau par unité de surface de sol, m^2). Le test a consisté à reproduire différentes rosées et/ou quantité d'eau sur trois capteurs différents ($n=3$) afin de mieux comprendre le fonctionnement et la réponse de ce matériel aux conditions d'humidités rencontrées au champ. Nous avons répété ces mesures à trois reprises pour chacun de ces capteurs.

Nous avons travaillé en utilisant deux méthodes différentes.

Mesures à l'aide d'une méthode massique (méthode 1)

Cette méthode a consisté à humecter d'eau les capteurs à l'aide d'un spray afin de bien reproduire les fines gouttes d'eau d'une rosée (**Figure 2**). Le capteur étant posé sur une balance de précision, nous collectons toutes les minutes sa masse jusqu'à l'évaporation complète de l'eau.

La balance de précision utilisée (modèle LC 3201D Master ; Sartorius, Goettingen, Germany) est connectée à un ordinateur (logiciel de communication WinWedge v1.2 et son utilitaire macro VBA, SARTO.xls). L'étendue de pesée

Pascal Thiebeau, Gonzague Alavoine

est de 0,001 à 3200 grammes. Sa précision de lecture est de 1mg jusqu'à 1000 g puis de 10 mg sur la plage 1000 à 3200 g. Compte tenu de sa sensibilité, nous avons réalisé les acquisitions en la plaçant à l'intérieur d'une enceinte hermétique afin que les flux d'air ambiant ne perturbent pas les mesures (ventilation mécanique, déplacements de personnes...).

Nous avons placé, sur la balance, un ensemble de mesure composé d'une centrale EM50, d'un capteur LWS et d'un enregistreur d'humidité relative : les dynamiques d'évaporation de l'eau présente sur le capteur ont été réalisées de manière indépendante les unes des autres (trois répétitions) et propre à chacun des trois capteurs utilisés (**Figure 3**).

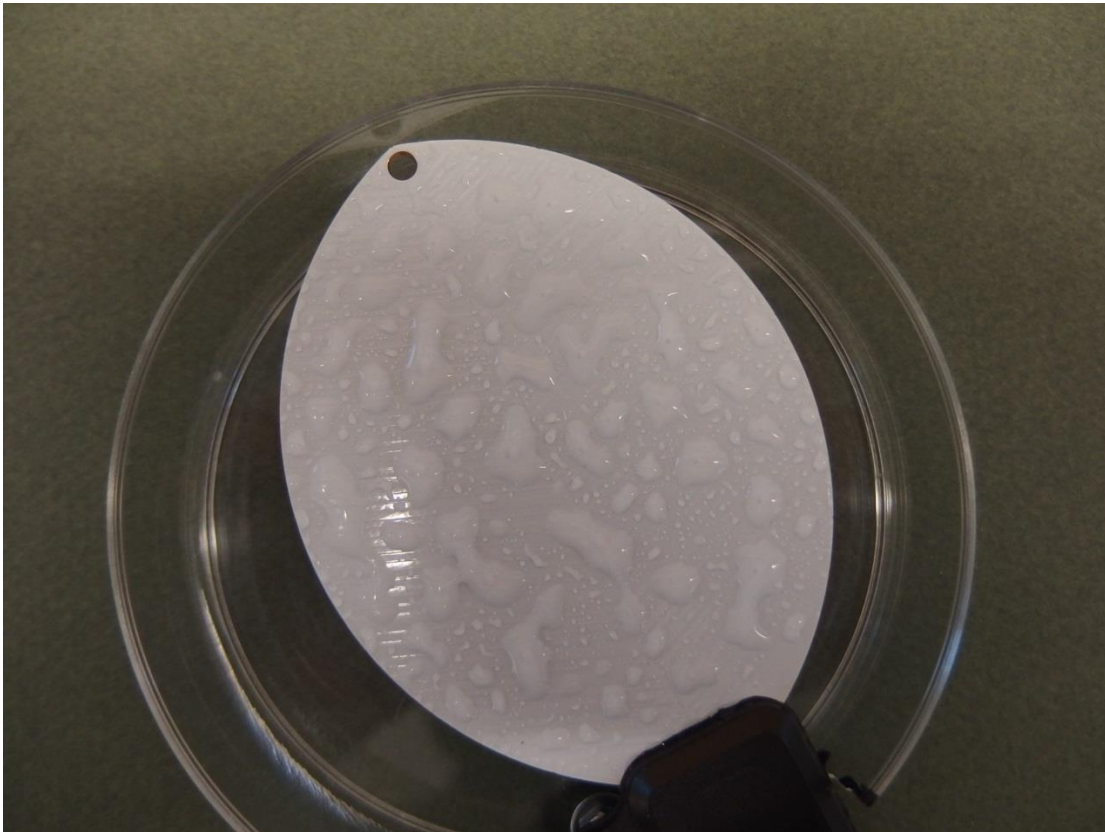


Figure 2. Exemple de rendu d'une pulvérisation de gouttelettes d'eau à la surface d'un capteur LWS (Photo : G. Alavoine).



Figure 3. Dispositif à partir duquel nous avons contrôlé la réponse de capteurs LWS à la masse d'eau présente sur sa surface de mesure (Photo : G. Alavoine).

Pour s'affranchir d'un possible effet perturbant de l'humidité relative de l'air sur la mesure de la masse, les mesures ont été réalisées dans une ambiance dite « sèche », c'est-à-dire où l'humidité relative (HR) est inférieure à 40% ($15\% < HR < 40\%$ et HR de la salle de laboratoire : 35%). Pour maintenir ces conditions, nous avons introduit deux pots de sel de silicagel (32-35g/pot) à l'intérieur de l'enceinte hermétique, autant pour maintenir un niveau d'humidité relative bas que pour absorber l'eau évaporée de la surface du capteur au cours du temps. Un capteur de mesure de l'humidité relative (HR) et de la température est positionné dans cette enceinte afin de collecter ces informations au cours de l'expérience (enregistreur de données Testo 174H ; Testo AG, Lenzkirch, Germany) - Tolérance admise $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, plage (-20 à $+70^{\circ}\text{C}$) et $\pm 3\%$ HR, plage (0 ... 100%) - Type de capteur : capteur de température CTN et capteur d'humidité capacitif interne. Un autre enregistreur de la sorte est placé à l'extérieur de l'enceinte pour enregistrer les conditions ambiantes du laboratoire.

Avant chaque série de mesures, la calibration de la balance est effectuée, plateau vide, suivi d'une remise à zéro.

Pour chaque sonde, le signal est d'abord enregistré durant 1 h sans apport d'eau (une mesure pour chaque nouvelle sonde) pour s'assurer de la stabilité du zéro, puis trois dynamiques d'état « humide » successives sont réalisées jusqu'au retour de la masse de l'ensemble centrale + capteur à la valeur tare initiale de zéro.

L'enregistrement des données est réalisé chaque minute. Cela nous permet de disposer d'une base de données suffisamment conséquente lors de son exploitation, pour retenir un maximum de points de lecture en mV à masse d'eau identique, provenant des trois capteurs testés. L'enregistrement des données est réalisé de manière automatique à l'aide d'une centrale EM50 pour le signal des capteurs LWS, et d'un ordinateur (logiciel d'acquisition spécifique) relié à la balance de précision pour l'acquisition des masses d'eau.

Précaution pour l'humectation de chaque capteur

Pour être humecté, chaque capteur est déplacé délicatement en dehors de l'enceinte. Des gouttelettes d'eau sont pulvérisées à sa surface à l'aide d'un spray. On veille à bien répartir les gouttelettes sur l'ensemble de la surface sans en disposer sur le corps noir de sa base. On replace ensuite le capteur dans l'enceinte de mesure, celui-ci étant maintenu dans sa position initiale grâce à une petite tige métallique servant de support.

Nota : à partir d'une masse de 0,450 g, les gouttelettes d'eau s'agrègent en macro-gouttes (**Figure 2**).

Mesures à l'aide d'une méthode volumique (méthode 2)

Cette méthode a consisté à déposer un volume d'eau précis à l'aide d'une pipette de précision (**Figure 4**), par pas de 0,1 g de 0 à 0,8 g et d'en relever la valeur diélectrique mesurée pour chaque capteur après 1 min stabilisée. Notre souhait était de pouvoir atteindre des masses d'eau plus importante qu'avec la méthode 1.



Figure 4. Exemple de rendu d'apport de gouttes d'eau à la surface du capteur LWS à l'aide d'une pipette de précision

(Photo : G. Alavoine).

Conditions expérimentales du site sur lequel nous avons mis en œuvre ce matériel

Nous avons mis en œuvre nos capteurs sur une parcelle de chanvre située sur le territoire de la commune La Croix en Champagne (Marne, 51 ; 49,04°N, 4,39°E) au cours de l'été/automne 2017. Nous avons réalisé des mesures sur pailles de chanvre au sol, fauchées pour partie à la fin floraison (2nde quinzaine d'août), puis une autre après la moisson des graines à maturité (2nde quinzaine de septembre).

Les capteurs ont été positionnés à l'intérieur d'andains de paille au sol, maintenus en place par fixation souple. La réalisation de mesures permettant de comparer l'information acquise par « présence/absence de rosée » a été

Le Cahier des Techniques de l'INRA 2018 (94)

comparée à celle d'autres capteurs programmés pour l'acquisition du signal diélectrique. Dans sa modalité « présence/absence de rosée », le logiciel de données produit deux colonnes de données brutes : l'une au seuil de 450, l'autre au seuil de 460 : les minutes d'état « humide » sont enregistrées pour ces deux seuils.

Le site a été complété d'une station météorologique mobile permettant de recueillir les variables climatiques suivantes : rayonnement global, température de l'air (2m) et du sol (-10 cm), l'humidité relative de l'air (H.R.), la quantité de vent et la pluviométrie. Ces données nous permettent d'estimer l'évapotranspiration potentielle lors de la période d'étude.

Traitements statistiques

Les mesures réalisées sont moyennées afin de ne retenir qu'une seule donnée par capteur étalonné. L'ensemble de ces points moyennés forme un nuage dont l'ajustement linéaire est calculé à l'aide du module statistique du logiciel SigmaPlot v.12 (SystatSoftware, Inc.). La qualité de ces ajustements est appréciée au regard de deux critères : le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne au modèle (RMSE). Pour être retenus, ces critères doivent être les plus proches de la valeur de 1 pour R^2 , et de 0 pour RMSE. Le seuil de significativité minimal accepté est $P < 0,05$.

Lorsque des comparaisons de pentes ou de constantes sont nécessaires, ils font également l'objet d'une analyse à l'aide du test de Student (t-test) proposé par ce même logiciel. Le seuil de significativité reste $P < 0,05$.

Résultats

Construction d'une relation « signal diélectrique - quantité d'eau »

Méthode 1

Nous avons réalisé trois dynamiques de mesures d'évaporation d'eau par capteur, que nous avons répété sur trois capteurs pris au hasard de notre parc de matériels. Lors de notre travail, les masses d'eau initiales (en début de dynamique) ont oscillé entre 0,534 et 0,563 g. En valeur diélectrique, la plage de mesures de l'ensemble des courbes a oscillé entre 320 et 753 mV.

Nous avons ensuite procédé à un tri des données acquises afin de retenir toutes les valeurs diélectriques correspondantes aux mêmes masses d'eau de chaque capteur. A masse d'eau strictement identique, ces trois valeurs ont été moyennées, ce qui permet de présenter une estimation d'erreur pour chaque donnée.

Chaque nuage de point fait l'objet d'un ajustement de type linéaire, selon l'équation suivante :

$$\text{Masse d'eau sur le capteur (g)} = a \times \text{Signal diélectrique (mV)} + b \quad (5)$$

Les données retenues et le tracé de l'ajustement global sont présentés à la **Figure 5**.

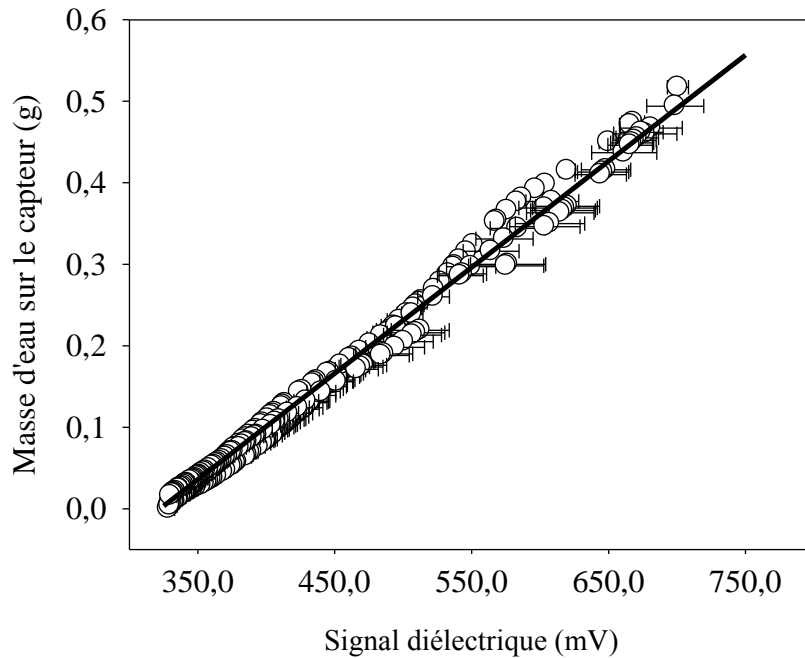


Figure 5. Dynamique moyenne des mesures diélectriques observées pour des valeurs de masses d'eau identiques positionnées par pulvérisation, collectées à l'aide des capteurs n° 2, 4 et 10 ; tracé de l'ajustement global.

Les valeurs de « a » et de « b » sont présentées au **Tableau 3**. Les critères statistiques indiquent que les ajustements sont de très bonne qualité : les coefficients de détermination (R^2) sont hautement significatifs et les RMSE indiquent des prévisions de masse d'eau à moins de 3 centièmes de grammes près.

Tableau 3. Valeurs des ajustements obtenus pour chaque capteur

	Valeur de « a »	Valeur de « b »	R^2	RMSE
Capteur n°2	0,0014	-0,4679	0,9868***	0,0181
Capteur n°4	0,0013	-0,4118	0,9798***	0,0226
Capteur n°10	0,0012	-0,3895	0,9660***	0,0295
Ajustement global	0,0013	-0,4190	0,9728***	0,0261

Pour la plage de données diélectriques testée (320 à 753 mV), compte tenu de la surface de mesure du capteur, l'ajustement global obtenu permet d'estimer des quantités d'eau comprises de 0 à 175 g/m², soit 0,17 mm/m².

Méthode 2

La relation établie ci-dessus est correcte pour des masses d'eau ne dépassant pas 175 g/m². Nous avons essayé, à l'aide d'une pipette de précision, de dépasser ce seuil. Comme le montre la **Figure 4**, nous avons testé, par apports de gouttelettes d'eau, des quantités allant de 0,1 à 0,8 g d'eau : nous n'avons pas pu, techniquement, réaliser des apports plus importants.

Les mesures montrent que cette technique présente des limites (**Figure 6**). En effet, à partir de masses d'eau supérieures à 0,3 g, les valeurs obtenues présentent une variabilité de signal significativement importante : les coefficients de variation oscillent entre 6 et 20%, alors qu'ils n'ont jamais atteint ou dépassé 4% avec la méthode 1.

La valeur maximale de 0,8 g d'eau par capteur correspond à 250 g/m².

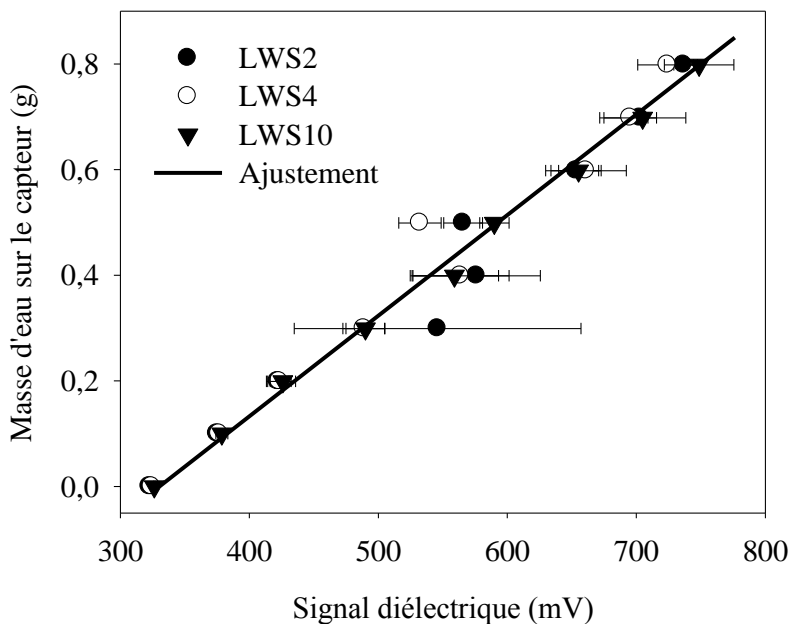


Figure 6. Variabilité des trois mesures diélectriques-répétitions obtenues par la méthode 2 pour trois capteurs (n°2, 4 et 10) ; tracé de l'ajustement global.

Les valeurs des ajustements obtenus sont présentées au **Tableau 4**. Ils sont de très bonne qualité. Le R^2 de l'ajustement global est légèrement supérieur à celui de la méthode 1 qui intégrait plus de 2900 points de mesures alors que celui-ci en intègre 27. Le critère RMSE est moins bon : sa valeur est 30% supérieure à celle de la méthode 1. Ceci est expliqué par la difficulté de pouvoir obtenir une couverture régulière et optimale de l'eau sur le capteur. En effet, à quantité d'eau égale, en raison de la taille minimum possible des gouttelettes déposées, la surface du capteur couverte par l'eau est plus faible par cette méthode qu'en utilisant un spray ; ce qui augmente la

probabilité de mauvaises quantifications d'eau (relation quantité d'eau-signal diélectrique non valide), et implique des estimations d'erreurs plus grande par rapport à la méthode 1.

Tableau 4. Valeurs des ajustements obtenus pour des quantités d'eau de 0 à 0,8 g/capteur.

	Valeur de « a »	Valeur de « b »	R ²	RMSE
Capteur n°2	0,0018	-0,6047	0,9653***	0,0480
Capteur n°4	0,0019	-0,6047	0,9711***	0,0438
Capteur n°10	0,0018	-0,6035	0,9971***	0,0139
Ajustement global	0,0019	-0,6047	0,9762***	0,0397

Il en résulte qu'à quantité d'eau égale, la méthode 2 sous-estime le signal diélectrique.

En comparant les deux ajustements obtenus par chacune des méthodes (**Figure 7**), nous constatons que la méthode 1 présente une pente significativement différente ($P \leq 0,001$) de la méthode 2 (0,0013 vs 0,0019). En revanche, les constantes de ces régressions (-0,4190 vs -0,6047) ne sont pas différentes entre-elles ($P = 0,495$). Et si l'on convertit les résultats de l'ajustement (2) obtenu par Cobos (2013) en masse d'eau présente sur le capteur, nous retrouvons une estimation non-linéaire dont le tracé ne représente pas les dynamiques que nous avons obtenues. Si le terme de son ajustement court jusqu'aux environs de 1050 « counts », cela correspond, en application de la formule (1) à 769 mV, soit pratiquement l'équivalent du terme de nos ajustements (753 mV). Or, les nuages de données que nous avons obtenus ne nous permettent pas d'adopter un ajustement « non-linéaire » comme cet auteur l'a fait. Nous ne pouvons donc pas valider, au moins pour le type d'excitation de 3000 mV avec lequel nous avons travaillé, l'ajustement que Cobos (2013) propose.

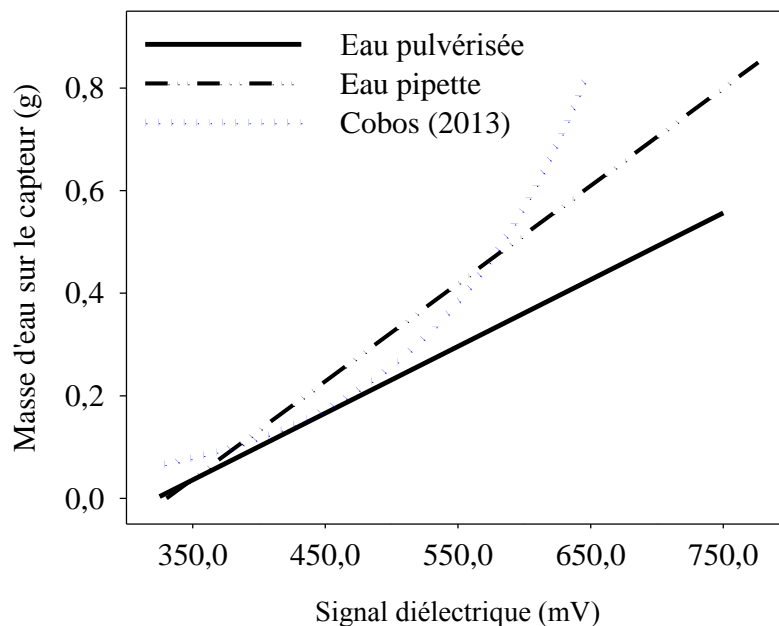


Figure 7. Comparaison des ajustements obtenus par application de gouttelettes d'eau à l'aide d'un spray ou d'une micro-pipette. Comparaison avec l'ajustement obtenu par Cobos (2013) à excitation identique (3000 mV).

Au vu de ces résultats, nous faisons le choix de retenir la méthode 1 comme méthode d'étalonnage pour estimer les rosées présentes au champ.

Utilisation des capteurs au champ

Au cours de la saison d'utilisation au champ, les mesures diélectriques ont oscillé entre 320 et 1020 mV pour l'ensemble du parc de capteurs que nous avons utilisé. Nous avons extrait une période de mesure comprise entre le 25 août et le 25 septembre 2017, que nous présentons à la **Figure 8A**.

Pour cette période, les données collectées par référence « présence/absence de rosée » aux seuils de données brutes 460 (**Figure 8B**) et 450 (**Figure 8C**) montrent une réponse assez bonne par rapport aux données diélectriques collectées. Ils réagissent parfois de façon strictement identique, parfois ils se complètent (zones cerclées, **Figure 8A**). Les cumuls horaires sont stoppés à 60 min (**Figures 8B et 8C**), ce qui est normal puisqu'il s'agit de l'espace maximal au bout duquel nous programmons la centrale pour acquérir la donnée. Pour cette période de 31 jours, nous avons cumulé respectivement 17 407 et 23 373 min d'état humide aux seuils de 450 et 460, soit 12 et 16 jours de 24 h. Les pailles seraient donc « humides » 39 à 52% du temps au cours de cette période, ce qui n'est pas négligeable.

Pascal Thiebeau, Gonzague Alavoine

Si l'on compare les données diélectriques horaires (**Figure 8A**) aux pluies horaires (**Figure 8E**), ainsi qu'aux humidités relatives horaires de l'air (**Figure 8E**), nous constatons que le signal diélectrique donne une indication sur le type d'humidité enregistré : rosée, crachin ou pluie, notamment pour les données acquises sous le seuil de 400 mV : ce seuil correspond à 31,5 g d'eau/m², soit 0,03 mm/m². Cela montre que ces faibles condensations n'entraînent qu'une ou deux bascules d'auget du pluviomètre, étalonné à 0,199 mm par bascule.

L'analyse des dynamiques d'humidité relatives de l'air (H.R.) montre que le capteur déclenche cette acquisition « présence/absence de rosée » au-dessus de valeurs H.R. de 80-85%.

En cours de saison de mesure au champ, le signal a atteint 1000 mV/heure, soit 275 g d'eau/m² (équivalent de 0,27 mm/m²) tandis que l'on observe des pluies horaires dépassant 6 mm/m² (**Figure 8E**) : le signal diélectrique ne représente donc pas une indication fiable de la quantité d'eau tombée. Cette eau maintient le capteur humide, mais une grande partie ne fait que passer dessus compte tenu de sa surface très hydrophobe. En conséquence, la valeur maximale de 0,8 g d'eau testée lors de la méthode 2, correspondant à 769 mV, ne permet pas de reproduire les valeurs les plus hautes enregistrées au champ.

Nous avons complété la **Figure 8** d'une courbe montrant la conversion des signaux diélectriques des capteurs LWS a et b en quantités d'eau observées au cours de cette période (**Figure 8D**), à l'aide des paramètres ajustés du **Tableau 3**. Au cours de cette période, les mesures de ces capteurs a et b ont cumulé respectivement 14834 et 12192 g d'eau/m²/h, soit l'équivalent de 19,2 et 15,7 mm d'eau pour la période, tandis que le pluviomètre a enregistré 114,6 mm. Il s'agit de données brutes, car des 19,2 et 15,7 mm mentionnés, une partie correspond au passage des pluies ; mais cela montre qu'une analyse plus précise nous permettrait de quantifier la part d'humidité apportée par l'ensemble des rosées et autres sources d'humidité non détectées par le pluviomètre.

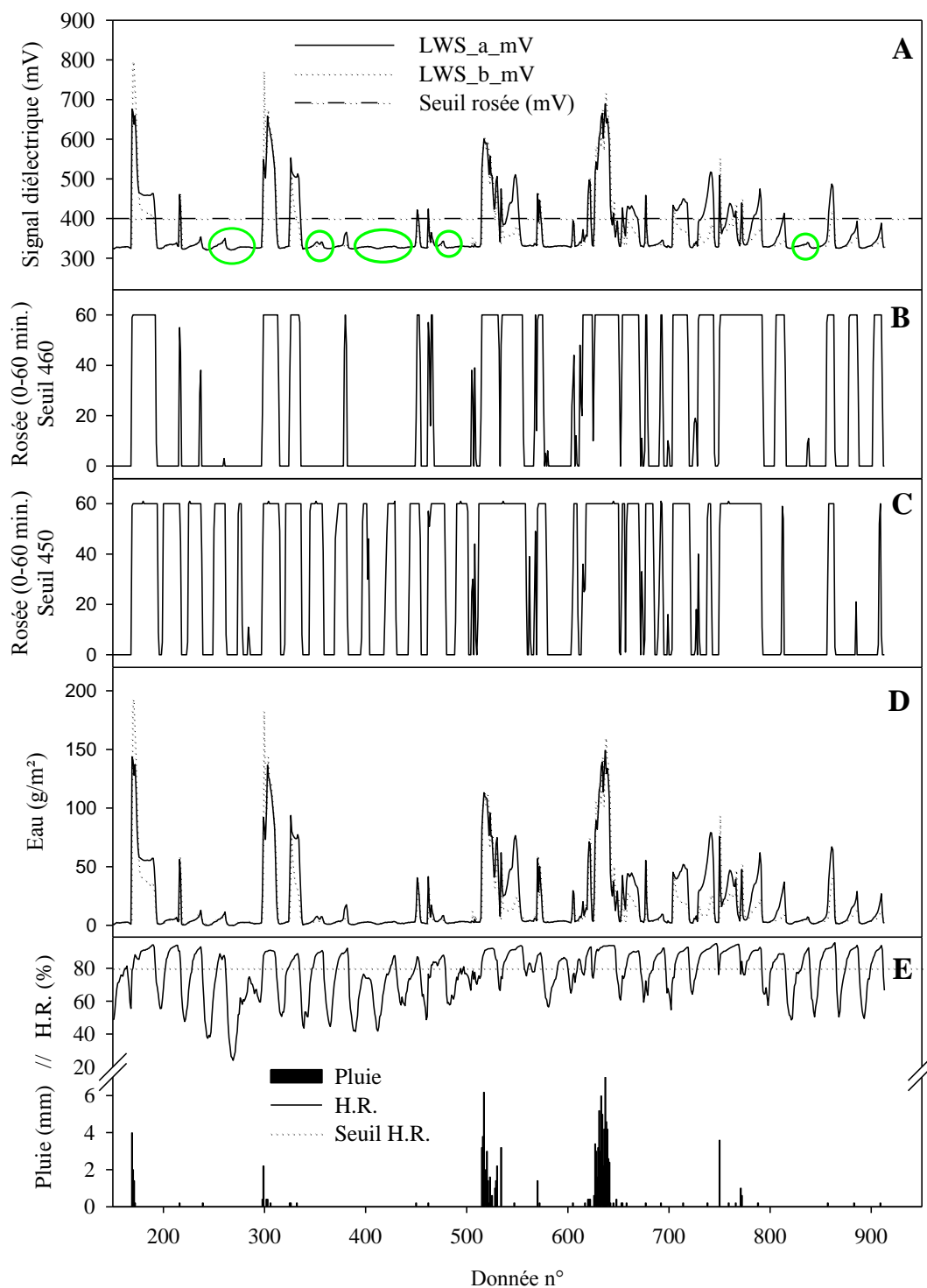


Figure 8. Comparaison de données acquises au champ du signal diélectrique (mV, **A**) à celles acquises par l'option « présence/absence de rosée » (minutes humides : 0-60, signal brut à 460, **B** et 450, **C**). Conversion du signal diélectrique en quantité d'eau par mètre carré (ajustement global du Tableau 3, **D**). Impact des pluies et de l'humidité relative de l'air (H.R.) mesurées sur place, **E**.

Conclusion

La méthode d'étalonnage a une incidence sur la quantification de l'eau présente à la surface du capteur. Nous faisons le choix de retenir la méthode massique (méthode 1), utilisant une application d'eau par pulvérisation, permettant une répartition aléatoire de l'eau sous forme de gouttelettes couvrant totalement la surface du capteur, ainsi qu'une balance déterminant précisément la masse d'eau présente. Lorsque nous confrontons les résultats obtenus aux observations de brouillard, présence/absence de rosée, et aux données de la station météorologique (données d'humidité relative de l'air et enregistrement des pluies à 0,2 mm près), cette méthode semble quantifier correctement l'eau présente sur les pailles au champ.

Les sondes LWS (Leaf Wetness Sensor ; Decagon Device® Inc.) renommées « **Phytos 31** » depuis notre acquisition répondent bien à l'objectif affiché par le constructeur qui est de détecter la présence ou l'absence d'une rosée. Notre travail permet d'affiner cette donnée en quantifiant l'eau présente.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME pour le financement du projet de recherche RIGHTLAB (contrat n° 1501C0048, 2016-2019) coordonné par *La Chanvrière* et mis en œuvre sous la responsabilité technique de *FRD* (Fibres Recherche Développement).

Les auteurs remercient Sylvie Millon pour son aide technique lors des tests de laboratoire.

Références bibliographiques

Decagon Devices Inc. (2016) Dielectric Leaf Wetness Sensor, Operator's Manual. 17 p.

Campbell Scientific Inc. (2017). LWS Dielectric. Leaf Wetness Sensor : instruction manual. 9 p.

Cobos DR (2013) Predicting the amount of water on the surface of the LWS dielectric leaf wetness sensor. Application note. Decagon Devices®, Inc. 14556-01.

Meter Environment (2017). Leaf wetness sensor. *Phytos 31*.

SigmaPlot 12 (2010) Systat Software®, Inc, *SigmaPlot Statistics*, User's guide. 259 p.

Thiebeau P, Bertrand I (2016) Mesure de l'humidité du sol en continu en sols caillouteux à l'aide de capteurs capacitifs. *Le Cahier des Techniques de l'INRA* (87), 17 p.