

La DROUGHT-BOX, un nouvel outil pour mesurer les cinétiques de transpiration résiduelle des arbres

Julien CARTAILLER¹, Lise-Marie BILLON¹, Hervé COCHARD¹, José M. TORRES-RUIZ¹



CARTAILLER Julien est technicien en Instrumentation dans l'unité PIAF situé à Clermont-Fd. Il a un DUT en Mesures Physiques, et a commencé sa carrière à INRAE à Massy (91) dans l'unité GENIAL. Ses activités sont le prototypage, la maintenance des dispositifs expérimentaux et la réalisation de mesure en lien avec l'hydraulique des arbres.



BILLON Lise-Marie est doctorante dans l'unité PIAF à Clermont Ferrand. Son travail de thèse se concentre sur l'étude de la résistance des arbres face aux sécheresses extrêmes en particulier sur les risques de mortalité des arbres due aux pertes en eau non régulées lors de sécheresses couplées à des vagues de chaleur.



COCHARD Hervé est directeur de recherche et directeur adjoint de l'UMR PIAF. Agronome de formation, ses travaux de recherche concernent l'effet du changement climatique sur la physiologie des arbres et en particulier leurs réponses aux sécheresses et canicules extrêmes.



TORRES-RUIZ José M. est chargé de recherche de classe normale (CRCN) dans l'unité PIAF situé à Clermont-Fd. Son axe de recherche se concentre sur les mécanismes de survie des arbres aux sécheresses extrêmes, avec un accent particulier sur l'utilisation de l'eau par les plantes et leur fonctionnalité hydraulique.

Résumé. Dans le cadre des recherches de l'équipe de recherche SUREAU (Sureté hydraulique et résistance à la sécheresse des arbres), membre de l'UMR PIAF (Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant), un dispositif pour mesurer les cinétiques de transpiration résiduelle des arbres a été mis au point. Cette transpiration est essentielle pour connaître la résistance d'une plante à la sécheresse. Une transpiration résiduelle faible permet à la plante de retarder la cavitation des vaisseaux fonctionnels. Le dispositif est composé de jauges de contrainte, de capteurs de température et humidité relative, de résistances chauffantes, le tout relié à un nano-ordinateur (Raspberry Pi) et un micro-contrôleur (Arduino) pour la régulation. Des programmes de pilotage et de traitement ont été créés en Python pour obtenir des cinétiques à différentes températures et humidités relatives mais aussi avec des rampes de température et d'humidité relative croissantes et décroissantes afin de s'approcher au mieux de la réalité.

Mots clés : acquisition, balance, régulation, sécheresse, arbres.

¹ INRAE - UCA, UMR 0547 PIAF Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant. Centre de recherche Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes, F-63100 Clermont-Ferrand, France ; julien.cartailleur@inrae.fr

Abstract. In the scope of the researches of the SUREAU (Sureté hydraulique et résistance à la sécheresse des arbres) team in the laboratory UMR PIAF (Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant), a device to measure cinetics of residual perspiration of trees was set out. This perspiration is essential to know the resistance of a plant to drought. A low residual perspiration allows the plant to postpone functional cavitation of vessels. The device is compound of constraint gauge, temperature and relative humidity sensors, heating element, all of these items are connected to a nano-computer (Raspberry Pi) and a micro-controller (Arduino) for the regulation. Piloting and treatment programmes have been created in Python to get cinetics at different temperatures and relative humidity but also with temperature and relative growing and falling humidity ramps to match with cases present outside in the countryside.

Keywords: acquisition, weight, regulation, drought, trees

Introduction

Dans le cadre d'un programme de recherche, nous avons créé un dispositif pour mesurer les variations de cinétique de transpiration résiduelle sur des branches de conifères ou des feuilles d'angiospermes. En effet, en cas de sécheresse, les plantes ferment leurs stomates pour limiter les pertes en eau par transpiration. Toutefois, la fermeture stomatique ne réduit pas la transpiration à zéro, de faibles pertes en eau demeurent, c'est ce qu'on appelle la « transpiration résiduelle ». Cette transpiration peut être due à des fuites au niveau de la cuticule (couche protectrice qui recouvre les organes aériens), au niveau des lenticelles (pore présent sur le liège à la surface de l'écorce) ou à des stomates pas entièrement fermés. Cette transpiration est problématique pour les plantes en cas des sécheresses longues car elle accentue leur déshydratation, ce qui entraîne la cavitation des vaisseaux conducteurs et, à terme, leur mort. La vulnérabilité à la cavitation est une variable qui a été mesurée sur un grand nombre d'espèces ligneuses et apparait centrale dans le processus de mortalité. Cependant, des espèces ou variétés ayant une même vulnérabilité à la cavitation peuvent montrer des cinétiques d'apparition de la cavitation très différentes, même si les conditions environnementales sont identiques. Cette cinétique devient donc une problématique majeure dans la compréhension des réponses des végétaux à un stress hydrique.

La transpiration résiduelle est une variable compliquée à mesurer car comme la perte de masse est faible cela nécessite des balances très précises ou des temps de mesures longs. De plus, les conditions environnementales doivent être particulièrement contrôlées et stables.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de dispositif de mesure standardisé de la transpiration résiduelle. Cet outil a été proposé pour combler ce manque. Dans notre dispositif, les pertes en eau seront mesurées grâce à des jauges de contraintes dans une boîte hermétique régulée en température et humidité relative.

Matériel et Méthodes

Le dispositif est composé d'une boîte hermétique constituée de plaques d'isolant (polystyrène extrudé) de 40 mm épaisseur (L=650 mm, l=650 mm, H=700 mm, soit un volume utile de 300 L), de deux résistances chauffantes (2x75 W) au milieu et en bas de la boîte, un thermo-hygromètre (HyT271), un ventilateur, huit jauges de contraintes de 100 g (CZL639HD) ou 700 g (CZL616C) reliées à deux cartes d'acquisition avec pont de Wheatstone (PhidgetBridge 4-Input), deux capteurs de déplacement LVDT modèle DF5 de chez Solartron Metrology (*Linear Variable Differential Transformer*) avec une carte d'acquisition (MCP3424), un système de régulation de l'humidité relative (un débitmètre, deux électrovannes, des tuyaux à air comprimé), un nano-ordinateur (Raspberry-pi), et un microcontrôleur (Arduino) (**Figure 1**). Il y a deux compartiments, un pour l'électronique (en haut) et un pour les échantillons et la régulation (**Figures 2 et 3**). Des lampes électroluminescentes (LED) qui simulent la lumière du jour sont installées dans la boîte.

Sa plage de fonctionnement va de la température ambiante à +50°C, l'humidité relative de 10 % à 60 %, teneur eau maximum de 35 g d'eau /kg d'air sec, poids des échantillons de 2 g à 100 g pour les jauges de 100 g ou de 2 g à 500 g pour les jauges de 700 g.

Le coût du dispositif est de l'ordre de 2000 €.

Le nano-ordinateur (Raspberry-Pi) est relié aux cartes d'acquisitions des jauges de contrainte pour la prise des données de masse. Il pilote tout le système et enregistre les données de tous les capteurs (masse, température,

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

humidité relative, déplacement) sur sa carte mémoire de type SD, mais ces données sont aussi disponibles via un navigateur web et peuvent être envoyées par mail à l'utilisateur.

Le microcontrôleur (Arduino) effectue la régulation via un correcteur PID de la température et de l'humidité relative (**Figure 4a**), la lecture du capteur température / humidité relative et des capteurs LVDT. La régulation d'humidité se fait avec l'air comprimé sec et une cartouche de dessiccant pour diminuer la quantité d'eau dans l'air et au contraire l'air comprimé passe dans un bulleur pour augmenter la quantité d'eau dans l'air.

Le capteur LVDT est un capteur de déplacement qui nous permet de mettre en parallèle la perte de masse et la variation de diamètre de la branche. Ces mesures n'interviennent pas dans le calcul du g_{min} mais permet, par exemple, de voir quand sont sollicitées les réserves en eau stockées dans l'écorce. Nous ne faisons que deux mesures pour ne pas trop perturber les jauges de contrainte.

Les jauges de contraintes et leur carte d'acquisition donnent une réponse en ratio de tension (c'est un pont de Wheatstone, la tension mesurée est divisée par la tension d'alimentation et l'unité est le V/V), pour avoir une réponse en g nous avons fait un étalonnage avec des poids certifiés M1 (0.5 g, 1 g, 2 g, 5 g, 10 g, 20 g, 50 g, 100 g, 200 g*, 500 g*). * Pour les jauges de 700 g.

La résolution de la carte est de 150 nV/V (ce qui correspond à environ 20 mg) pour les jauges de 100 g. L'erreur de répétabilité des jauges est de 50 mg, et l'effet de la température est de 5 mg/°C. L'effet de la température est compensé directement par la jauge : celle-ci est en fait composée de deux jauges, l'une mesure la déformation due au poids et l'autre due à la température. Pour le thermo-hygromètre la résolution est de 0.03 %RH et 0.015°C et la fidélité de mesure est ± 1.8 % RH et ± 0.2 °C. Ce capteur a été vérifié avec deux capteurs étalons présents dans l'unité (une sonde pt100 et une sonde capacitive étalonnées régulièrement). Les capteurs LVDT ont une résolution de l'ordre de 2 nm.

Le dispositif peut mesurer la masse de l'échantillon en temps réel ou la perte de masse. Celle-ci est obtenue par soustraction de la masse initiale, ce qui nous permet de comparer les différents échantillons qui ont des masses différentes et de supprimer la charge induite par le capteur en lui-même.

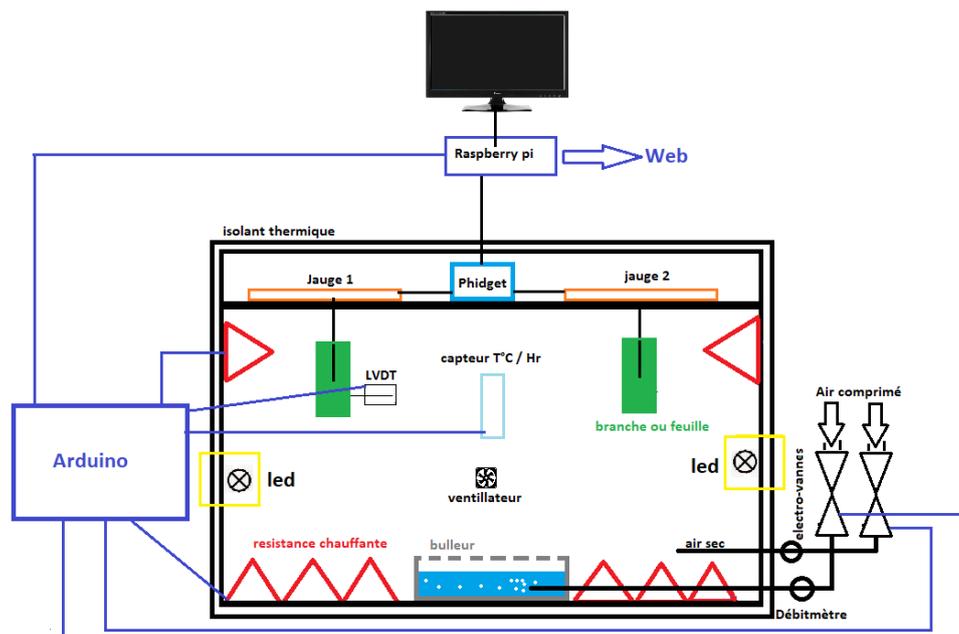


Figure 1. Schéma du dispositif. (Schéma : J. Cartailier)

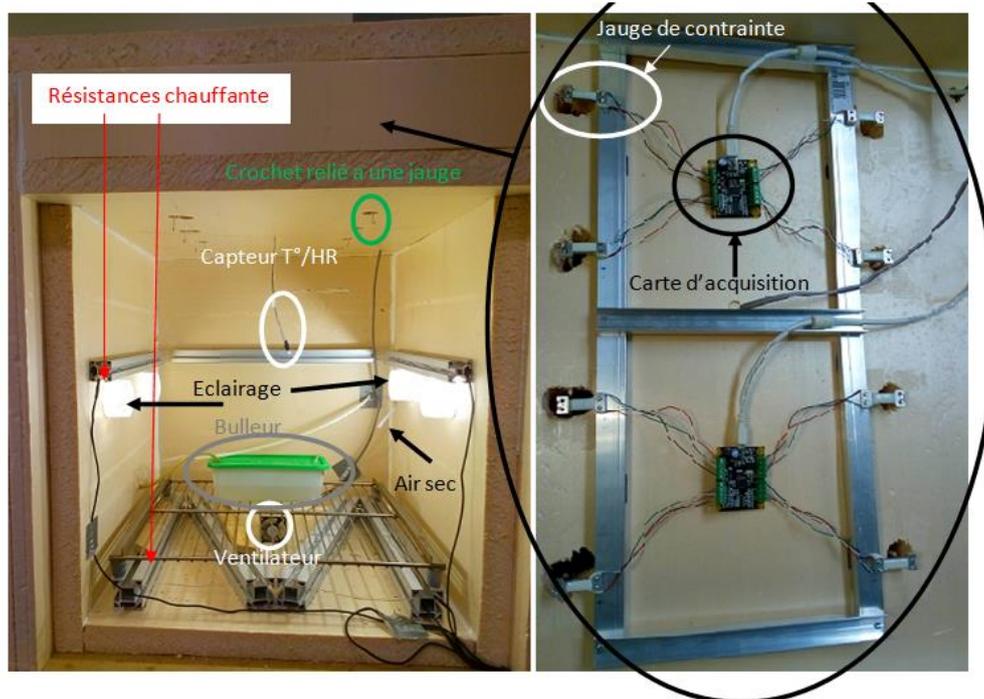


Figure 2. Photo du dispositif. (Photo : J. CARTAILLER)
A gauche de l'image l'enceinte climatique, à droite la partie électronique qui est située au-dessus.



Figure 3. Photo du dispositif avec des échantillons de branches et de feuilles. (Photo : J. CARTAILLER)
A gauche des branches de *Cedrus atlantica*, à droite des feuilles de *Populus sp.*

Régulation du dispositif

La régulation en température et humidité relative est effectuée selon deux modes : le premier où la température et l'humidité relative sont fixes (**Figure 4a**) et le deuxième, avec des rampes de température et humidité relative (**Figure 4b**). Le système est assez performant car nous atteignons le régime permanent en 15 minutes ce qui est négligeable sur nos cinétiques supérieures à 24 h. La stabilité est très bonne avec $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ et $\pm 0,5\%$. Nous avons fait une cartographie en température et humidité relative aux huit emplacements des échantillons pour connaître l'homogénéité de la chambre. En température nous avons un écart par rapport à la moyenne de

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et pour l'humidité relative, l'écart est de $\pm 1,5\%$. Ce système nous permet d'avoir un environnement maîtrisé et stable pour faire nos courbes de transpiration.

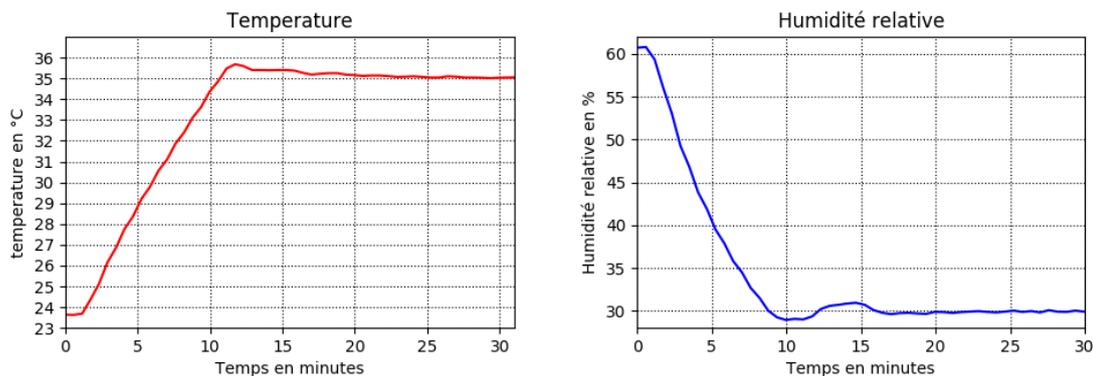


Figure 4a. Courbe de régulation de température et humidité relative (Photo : J. CARTAILLER)

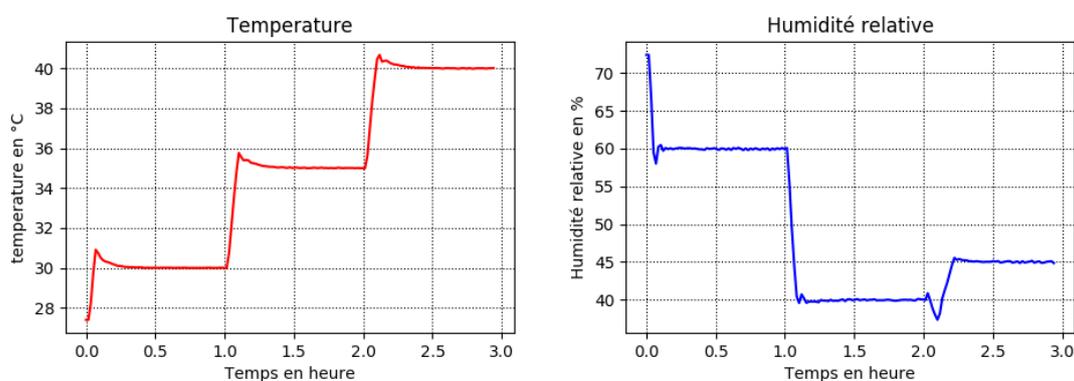


Figure 4b. Courbe de régulation de température et humidité relative avec le programme de rampes. (Photo : J. CARTAILLER)

Programmes

Il existe deux programmes d'acquisition, un en temps réel et un automatique.

Le programme d'acquisition (**Figure 5**) en temps réel est composé de trois parties, une fenêtre principale, une partie commande et une partie nombre de jauges. La fenêtre principale est composée comme n'importe quelle fenêtre (réduire, agrandir et fermer) et un texte tout en bas indiquant les nom et chemin du fichier de données de l'expérience en cours (date et heure de début). Les données sont stockées sur la carte mémoire du Raspberry, dans deux fichiers : le premier contient les données brutes d'acquisition des jauges de contrainte (le temps, le numéro de la carte, le numéro de la voie et la valeur) et le deuxième avec les données des capteurs (le temps, la température, l'humidité relative, le déplacement).

Le cadre de commande est composé de trois boutons principaux qui permettent de démarrer l'expérience (Start), de la mettre en pause (Stop) et de l'arrêter (Quitter) et trois emplacements pour rentrer les valeurs de consigne de température, de consigne d'humidité relative et la fréquence d'acquisition (par défaut à 15 s) avec un bouton d'envoi pour chaque paramètre au micro-contrôleur. La fréquence d'acquisition est dépendant du nombre de jauges car il faut une seconde pour chaque capteur. La fréquence d'acquisition est au maximum une mesure par seconde car nous moyennons cinq mesures assez rapides pour filtrer les erreurs.

Le dernier cadre sert à paramétrer le nombre de jauges (donc d'échantillons) à mesurer. Une fois appuyé sur "START", les mesures s'affichent dans le terminal (en haut de la Figure 5).

Le programme d'acquisition automatique est le même programme mais en remplaçant la fenêtre de paramétrage décrite ci-dessus par un fichier de configuration sous la forme d'une ligne de commande. Il existe deux fichiers de configuration, un pour le paramétrage à température et humidité relative fixes, et un autre pour les rampes de température et humidité relative. Le premier est de la forme suivante (T°C, HR, temps d'acquisition, nombre de

jauges, nombre de capteurs LVDT) exemple "35,50,300,8,0". Le deuxième sous la forme suivante (temps de la rampe 1, T°, HR, temps de la rampe 2, T°, HR, et ainsi de suite suivant le nombre de rampes). Une fois le temps défini écoulé, le programme s'arrête automatiquement.

Ensuite, deux programmes de traitement des données ont été créés, le premier pour les jauges, le deuxième pour les autres capteurs. Le programme consiste à lire le fichier brut, séparer les données de chaque capteur avec le temps correspondant, appliquer l'étalonnage pour avoir des masses au lieu du ratio V/V, tracer les courbes de chaque jauge (Figure 6 et 7). Le programme crée deux fichiers, le premier avec les courbes de toutes les jauges au format .png et le deuxième est un fichier résultat avec les données traitées des jauges formaté pour être ouvert par Excel. Le deuxième programme traite les données des capteurs (température, humidité relative, ...) de la même façon que le programme pour les jauges (Figure 4a et 4b).

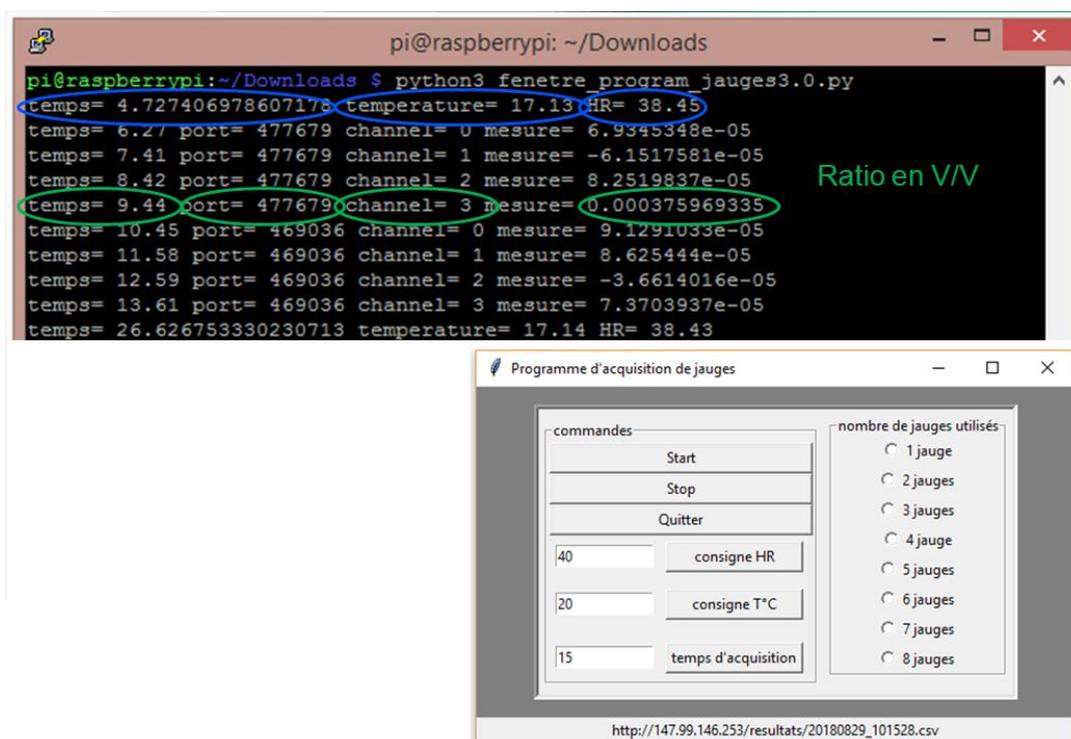


Figure 5. Programme d'acquisition en temps réel avec un terminal. (Photo : J. CARTAILLER)

En haut nous avons les résultats bruts de chaque jauge identifiée par numéro de carte et voie, en bas la fenêtre de paramétrage (consignes, nombre de jauges et temps) et de contrôle.

Résultats

Pour cette étude, nous avons utilisé des branches de conifères (*Cedrus atlantica*). Ces branches ont été collectées à l'INRAE de Crouël (Clermont-Ferrand, France, 4546030.800N 308038.200E). Des branches de 1 à 1,5 m ont été collectées à une hauteur de 2 à 3 m de la partie extérieure de la couronne d'un arbre et transportées au laboratoire dans de grands sacs en plastique. L'extrémité coupée de chaque branche a été recoupée et maintenue dans l'eau pendant la nuit alors que toute la branche est enfermée dans des sacs en plastique stockés dans l'obscurité pour permettre une réhydratation complète. Avant leur installation dans la Drought-box, chaque branche a été recoupée de 40 cm et l'extrémité coupée a été scellée avec de la cire de paraffine (point de fusion 68°C, Fluka) et le poids frais de la branche a été immédiatement mesuré. Les branches ont ensuite été attachées à chacune des huit crochets reliés aux jauges de contraintes en utilisant du fil de cuivre. La Drought-box a été fermée et les branches ont commencé à se déshydrater progressivement.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

Les cinétiques montrent trois phases, la première est très rapide et la perte de masse est très importante. Cette phase correspond au temps de fermeture stomatique. La deuxième phase, la plus longue, avec une perte de masse constante correspond aux pertes en eau résiduelles. Enfin, la dernière avec une stagnation de la masse correspond à la déshydratation finale de l'échantillon (**Figure 6** et **Figure 7**).

La deuxième phase nous permet de calculer la transpiration et la conductance minimale g_{min} (**Figure 8**).

Pour cela, on calcule la masse d'eau en mmol à chaque instant avec la masse d'échantillon et la masse sèche en gramme : $m_{eau} = \frac{m_{echantillon} - m_{seche}}{18 \cdot 10^{-3}}$

La masse sèche de la branche et des aiguilles sont obtenues à la fin de l'expérience à l'étuve à 104°C, ce qui permet d'estimer la surface foliaire.

Ensuite, on calcule la transpiration résiduelle : $T_{residuelle} = - \frac{m_{eau(20)} - m_{eau(1)}}{temps_{20} - temps_1} * \frac{1}{surface_{foliaire}}$

Enfin on obtient la conductance minimum (appelé g_{min}) : $g_{min} = \frac{T_{residuelle}}{VPD} * P_{atm}$

La transpiration et le g_{min} est en $mmol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$.

Le VPD est le déficit de pression de vapeur (en kPa) calculé avec la pression de vapeur saturante moins la pression partielle de vapeur de l'eau. Une estimation précise de ce VPD requiert une mesure de la température des feuilles, qui peut être légèrement différente de celle de l'air. Dans cette étude, la température foliaire est considérée identique à la température de l'air et la pression atmosphérique est récupérée sur une station météo présente sur le site de Croüel.

La conductance ainsi calculée est moyennée sur les huit échantillons. Elle caractérise l'espèce avec son environnement.

Les différents g_{min} de chaque espèce nous permettent de comparer la résistance des différentes espèces à un traitement donné et aussi la résistance d'une espèce à un traitement donné.

$$Pv = \frac{HR}{100} * 10^{2.7877 + [(7.625 * T^{\circ}C) * T^{\circ}K]}$$

$$Pvs = 10^{2.7877 + [(7.625 * T^{\circ}C) * T^{\circ}K]}$$

$$VPD = \frac{Pvs - Pv}{Patm}$$

On obtient une courbe pour la conductance minimum par échantillon et une courbe moyenne sur les huit échantillons (**Figure 8**). La conductance est moyennée sur le temps de la 2^{ème} phase. La répétabilité est bonne sur les huit échantillons (environ 10 %).

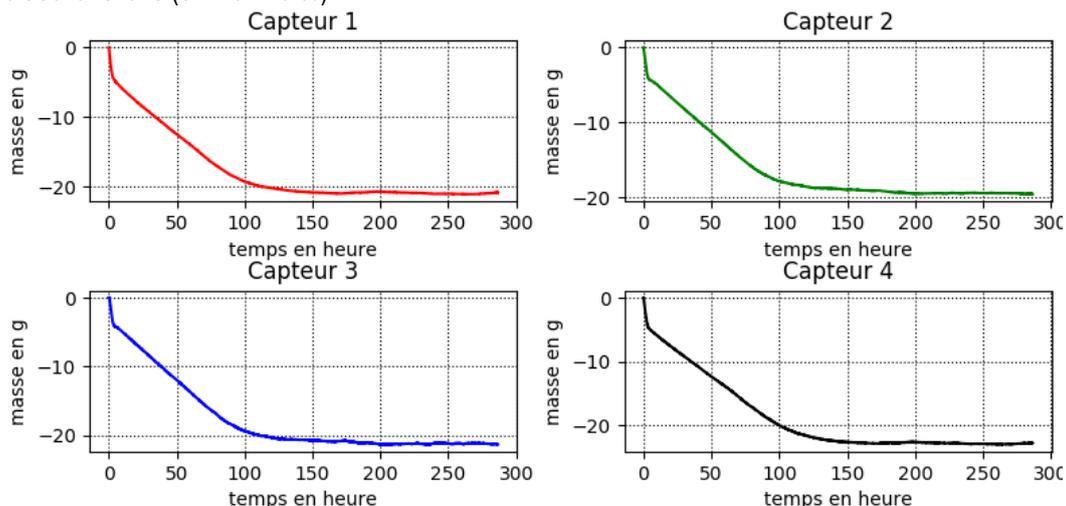


Figure 6. Cinétique de transpiration à 30°C, 18 %, et VPD = 3.5 kPa. (Photo : J. CARTAILLER)

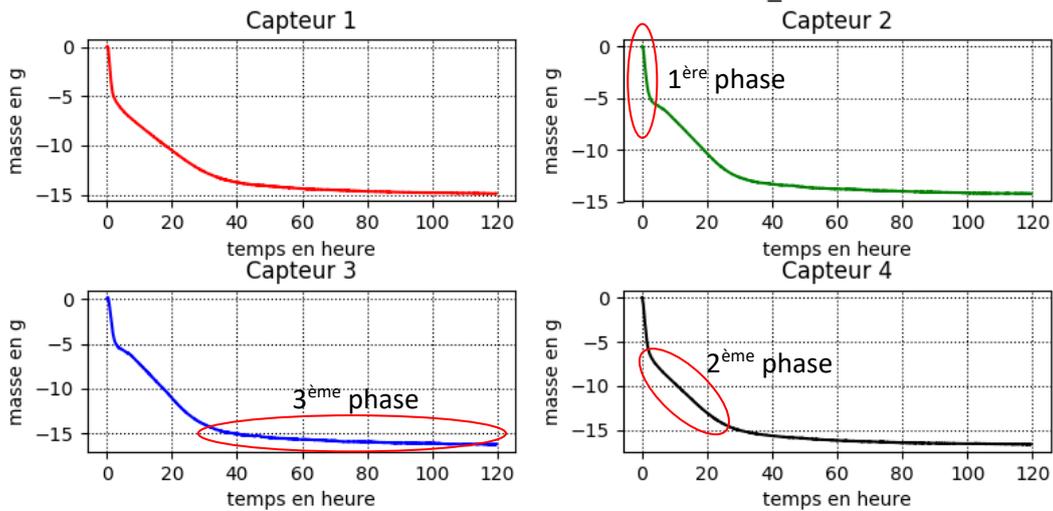


Figure 7. Exemple de cinétique de transpiration à 40°, 12 %, et VPD = 6.5 kPa. (Photo : J. CARTAILLER)

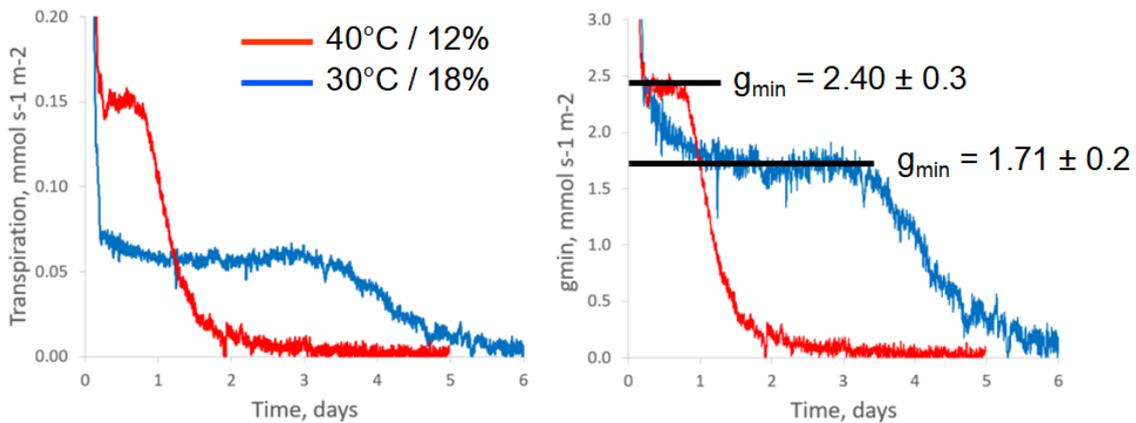


Figure 8. Calcul de la transpiration et la conductance minimale (g_{min}). (Photo : J. CARTAILLER)

Conclusion et perspectives

Pour conclure, la mesure de transpiration résiduelle est possible avec notre dispositif et les résultats sont répétables sur huit échantillons.

Le dispositif nous permet de contrôler les conditions environnementales en modifiant certains paramètres (par exemple température constante et humidité variable, ou humidité relative constante et température variable ou déficit de pression de vapeur constant ce qui signifie température et humidité relative variable).

La mesure est automatique et les paramètres tels que la température, l'humidité relative et les masses peuvent être suivies en temps réel.

Le dispositif répond aux différents besoins des utilisateurs.

Nous avons réalisé plusieurs versions des Drought-box pour augmenter le volume, améliorer les spécifications techniques (déportation des cartes d'acquisition, modification du support des jauges (acier à plexiglass)...)

En perspective, nous construisons d'autres Drought-box pour les besoins de notre unité et afin de mesurer plus d'échantillons en parallèle.

La mesure de température de surface des feuilles en continu est envisagée avec un système de mini-caméra IR installée dans la box et pilotée à distance pour connaître la température foliaire.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

Cet article est publié sous la licence Créative Commons (CC BY-SA).



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Le Cahier des Techniques de l'Inra », la date de sa publication et son URL).

Bibliographie

Billon, L. M., Blackman, C. J., Cochard, H., Badel, E., Hitmi, A., Cartailier, J., Souchal R., & Torres-Ruiz, J. M. (2020), The DroughtBox: A new tool for phenotyping residual branch conductance and its temperature dependence during drought. *Plant, Cell & Environment*. 1-11.

Un site web avec tous les éléments pratiques a été créé (<https://github.com/jcartailier/drought-box>). Ce site web contient les programmes, le matériel utilisé et les étapes de montage...