

Un automate d'irrigation contrôle la sécheresse et quantifie la transpiration chez de jeunes arbres

Cyril Buré¹, Alain Bénard¹, Marie-Béatrice Bogeat-Triboulot¹, Oliver Brendel¹, Patrick Gross¹, Irène Hummel¹, Didier Le Thiec¹, Franck Radnai¹

Résumé. Pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers et à terme assurer leur durabilité, il est important non seulement de caractériser les réponses des différentes espèces forestières aux changements climatiques, mais aussi d'analyser les mécanismes d'acclimatation en abordant la plasticité inter et intra-spécifique de traits fonctionnels liés à l'acquisition des ressources (eau, carbone...). Les sécheresses du futur seront plus fréquentes et intenses; étudier leurs impacts nécessite le passage par des expérimentations en conditions contrôlées. Ces conditions devant être homogènes et répétables sur un grand nombre d'individus, l'automatisation est donc devenue indispensable.

Mots clés : automate, irrigation, sécheresse, forêt

Introduction

Depuis longtemps à l'INRA l'équipe « Physiologie et diversité de la réponse aux contraintes » au sein de l'UMR EEF (Ecologie et écophysio­logie forestières) étudie les réponses des arbres à la disponibilité en eau. L'équipe mène de nombreuses expérimentations en pot en conditions contrôlées. En pot, le niveau de sécheresse édaphique appliqué est déterminé à partir d'une calibration entre l'humidité volumique du substrat et sa masse. L'humidité volumique est mesurée manuellement par TDR (time domain reflectometry) et la masse par pesée. Le maintien de l'intensité de la sécheresse passe par un arrosage contrôlé qui compense les pertes évaporatoires. L'automatisation des pesées et de l'arrosage des pots à haute fréquence limite les oscillations de la teneur en eau du sol et par conséquent assure le maintien et la répétabilité de la contrainte. Par ailleurs, la quantité d'eau transpirée par la plante est quantifiable à partir de ces pesées.

A la suite de plusieurs projets conséquents (en nombre d'individus) l'idée de développer un système automatisé d'irrigation et de quantification de la transpiration par pesée de plantes en pot a émergé. En effet, le contrôle de la sécheresse sur environ 150 jeunes arbres mobilise beaucoup de personnel plusieurs fois par jour et est consommateur en manipulations ainsi qu'en temps. Ces raisons ont été déterminantes pour le développement d'un système automatisé approprié à l'application d'un déficit hydrique et permettant de quantifier les pertes transpiratoires.

Lors de la réflexion, appuyée par un échange avec le Lycée Louis Vincent à Metz, il est apparu important de concevoir un outil capable 1) de manipuler de jeunes arbres en croissance, 2) de gérer une fréquence d'arrosage élevée permettant ainsi un contrôle fin de la sécheresse mais également de mesurer la cinétique journalière de transpiration. Pour rédiger le *Cahier des clauses techniques particulières* (CCTP), nous avons établi une liste de contraintes et de critères techniques afin de définir la solution la plus appropriée à nos besoins. L'automate étant destiné à être installé en serre, et étant conscient de l'hétérogénéité climatique dans ce type de structure (température, lumière...), nous avons fait le choix d'un système avec convoyage des plants par rapport à un système à multiples balances fixes. Cette solution offre l'avantage de pouvoir installer, en plus d'une station de pesée-arrosage automatique, une station de mesure avec un équipement unique plutôt que de multiplier l'équipement pour chaque plante. Cette solution offre aussi la perspective d'ajouter ultérieurement une cabine de phénotypage. Nous avons requis un système où le convoyage ne modifie pas l'azimut des plants. Un autre critère du CCTP était l'optimisation de l'espace pour

1. INRA, UMR 1137 Ecologie et écophysio­logie forestières, F-54280 Champenoux, France ; cyril.bure@nancy.inra.fr

maximiser le nombre de plants dans la serre (dont les dimensions sont de 9 m x 6,3 m) sachant que les études qui y seraient menées porteraient sur de jeunes arbres en croissance (essentiellement le peuplier et le chêne). L'envergure latérale maximale prévue pour ces jeunes arbres était de 50 cm et le volume des pots d'environ 10 L afin de ne pas trop contraindre le développement racinaire.

Parmi les différentes offres faites par des prestataires, nous avons fait le choix 1) d'un système de convoyage à bandes avec une mécanique simple (sans chaîne et sans huile) nécessitant peu d'entretien et fonctionnant à l'air comprimé ; 2) de travailler avec des entreprises qui nous laissaient la propriété du système de contrôle et donc avec une entière liberté d'évolution (ELCOM² et ELOGIA³). Travailler en collaboration avec des entreprises spécialisées en automatisation s'avérait approprié à nos besoins de recherche tout en laissant une marge de développement du système de contrôle. C'est ainsi, et après plusieurs années de réflexion, de conception, de réalisation et de tests qu'en décembre 2010 « Pollux » a été installé dans une serre du Centre.

Présentation générale

Il s'agit d'un système de convoyage de plants en pot vers une station de pesage/arrosage via un « ascenseur » qui descend le pot sur une balance fixe ou vers une station de mesure manuelle (située dans une zone sécurisée). La forme du dispositif a été optimisée pour maximiser le nombre de plants dans la serre soit 72 plants, organisés sur six convoyeurs de stockage (**Figure 1**). Aux extrémités, deux navettes déplacent les pots d'une ligne de stockage à l'autre ou vers l'une des stations. L'ensemble du système est confiné sous la serre grâce à un sas de protection. Le mode de circulation des plants est organisé, sans mélange aléatoire, de façon à ce que l'ordre des plants soit toujours le même et ainsi que l'intervalle de temps entre deux pesées soit quasi-identique pour chaque plant. De plus, la vitesse de déplacement a été réglée pour limiter les mouvements brusques et à-coups susceptibles de modifier le fonctionnement des plants, tout en maintenant une cadence de mesure/arrosage optimale.

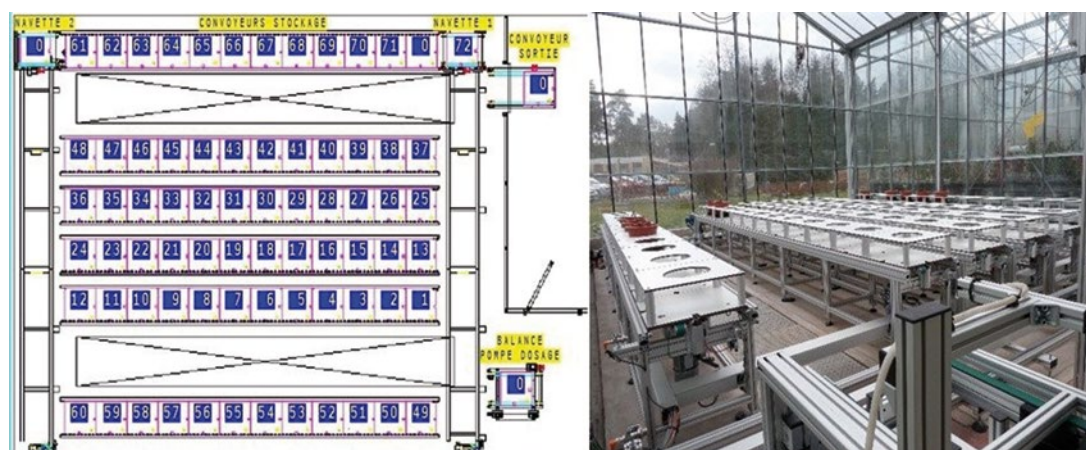


Figure 1. Plan d'ensemble et vue générale du dispositif (photo : C. Buré).

2. ELCOM : 1 rue Isaac Asimov, ZAC La Maladière, 38300 Bourgoin-Jallieu ; Tél. 04 74 43 99 61 mail : elcom@elcom.fr
3. ELOGIA : 425 chemin Pré Piraud, Z.A Pré Châtelain, 38300 Saint-Savin ; Tél. 04 74 27 74 02

Ossature

Les supports de pots dits « palettes »

Ce sont deux plaques carrées (50 x 50 cm et d'1 cm d'épaisseur) en stratifié compact pour une grande résistance à l'humidité et aux produits chimiques, espacées par quatre entretoises en aluminium (de 15 cm de haut) (**Figure 2**). La plaque inférieure est numérotée et équipée d'une puce RFID (radio frequency identification) permettant l'identification de la palette (donc du plant) lors de son passage sur les stations d'arrosage ou de mesure. La plaque supérieure, usinée pour recevoir un pot de 20 cm de diamètre, est amovible pour évoluer en fonction des besoins (utilisation d'autres diamètres de pots).

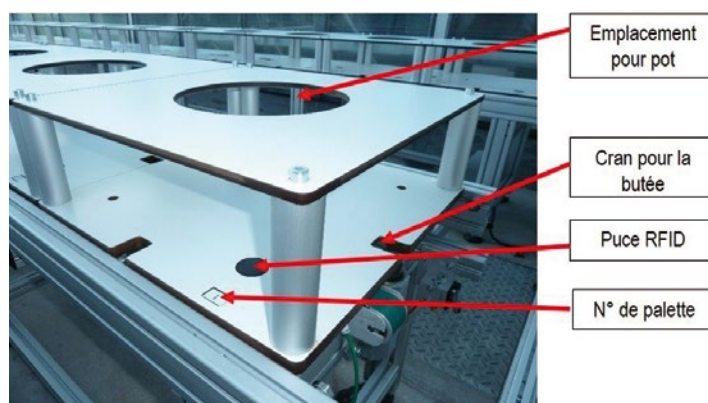


Figure 2. Palette (photo : C. Buré).

Les convoyeurs de stockage et les navettes

Les convoyeurs de stockage (ou « lignes ») sont des structures en profilé aluminium équipées d'une bande roulante portant 12 palettes chacune et assurant le déplacement des palettes (**Figures 1 et 3**). Cinq convoyeurs fonctionnent dans un sens, le sixième, dit « convoyeur de retour », dans l'autre sens. Situées sur un rail à chaque extrémité des convoyeurs, les navettes naviguent de façon coordonnée perpendiculairement aux convoyeurs. Lors du transfert d'une palette, la navette se positionne en face du convoyeur, ce qui libère la butée d'arrêt via un distributeur à galet d'air comprimé (**Figure 3**) et met en action la bande roulante. La palette coulisse vers la navette jusqu'à ce qu'un capteur de présence situé sur la navette détecte la palette et implique l'arrêt du transfert (**Figure 3**). La navette 1 reçoit la palette de l'un des cinq convoyeurs et l'emmène soit à la station de pesée-arrosage, soit à la station de mesure, ou directement vers le convoyeur de retour (ligne 6). La navette 2 reçoit la palette située à l'extrémité opposée du convoyeur de retour et la transfère à la position libérée par la dernière palette transportée par la navette 1. Seule la navette 1 est équipée d'un lecteur RFID qui identifie la palette avant son passage sur une des stations.



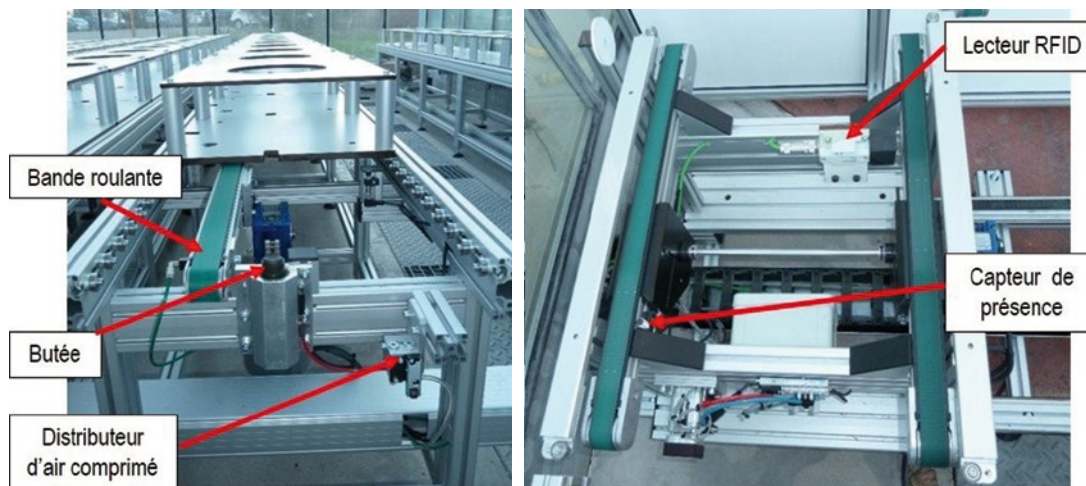


Figure 3. Convoyeur (à gauche) et navette 1 (à droite) (photos : C. Buré).

Station de pesée et arrosage

Ce poste, capital dans le système, est constitué d'une balance (Mettler Toledo BBA429) conçue pour répondre à des environnements de travail particulier (étanchéité à la poussière et à l'eau en projection, balance industrielle) avec un terminal de pesage (IND429). Elle est connectée et commandée par l'automate via le port RS-232. Avant le transfert d'une palette sur cette station, l'automate commande une tare : la navette transfère la palette sur la station de pesage ; la palette est descendue lentement sur la balance ; elle est pesée et/ou arrosée selon le schéma de flux (**Figure 4**). Si la masse enregistrée est inférieure à la consigne, l'automate active la pompe péristaltique (Masterflex L/S 7550-30) pour délivrer un volume d'eau correspondant à la différence entre la masse mesurée et la consigne. Le volume est délivré avec une incertitude de ± 2 mL. La pompe prélève l'eau dans un réservoir, ce qui permet une certaine autonomie en cas de coupure d'alimentation en eau et protège la pompe péristaltique de la pression du réseau (**Figure 5**). Le réservoir est alimenté grâce à deux capteurs de niveau (bas et haut) reliés à une électrovanne. Une fois la phase d'arrosage terminée, la masse est de nouveau comparée : si l'écart à la consigne est supérieur à 10 mL, l'automate relance une deuxième phase d'arrosage ; sinon, l'automate redirige la palette sur la navette, qui l'amène sur le convoyeur de retour avant de prendre en charge la palette suivante. La consigne et les masses avant et après arrosage sont automatiquement enregistrées.

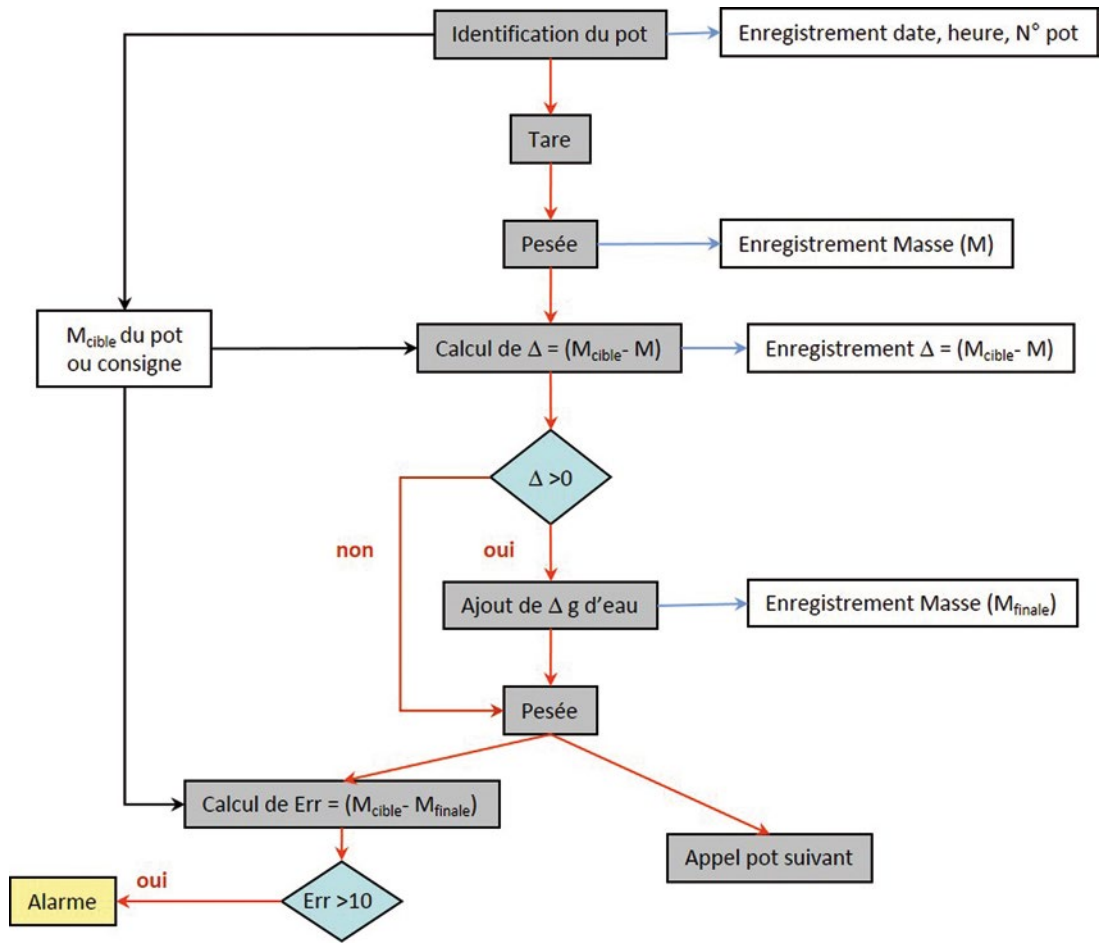


Figure 4. Schéma de flux.

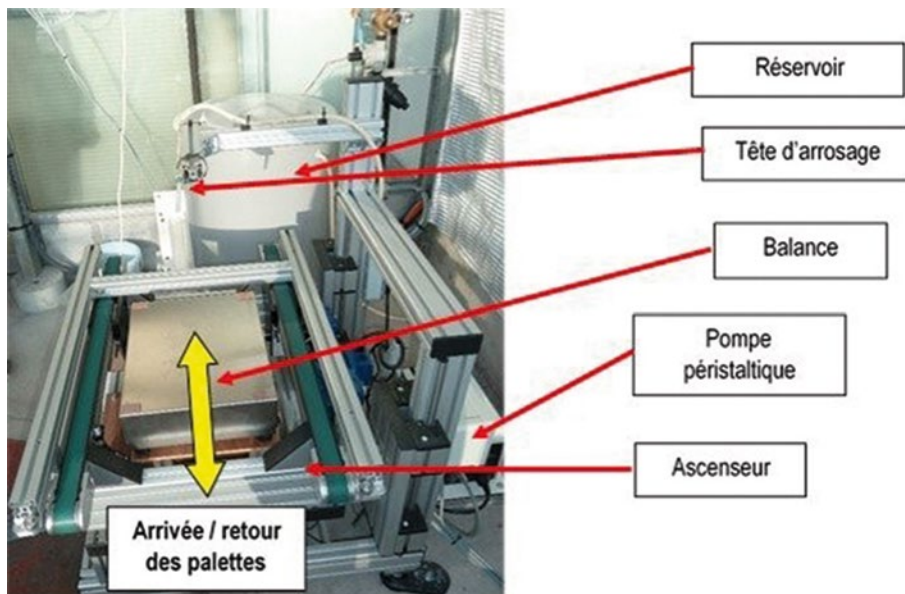


Figure 5. Station de pesée/arrosage (photo : C. Buré).



Station de mesure manuelle et sas de contrôle

La station de mesure manuelle est placée dans un sas (**Figure 6**) qui permet de recevoir les palettes pour réaliser différentes opérations sur les arbres en toute sécurité. La palette est présentée par la navette 1 devant la porte coulissante et à l'ouverture de celle-ci, s'avance jusqu'au poste de mesure. Une fois les mesures terminées, il suffit de valider son retour dans le circuit, via l'interface de gestion.

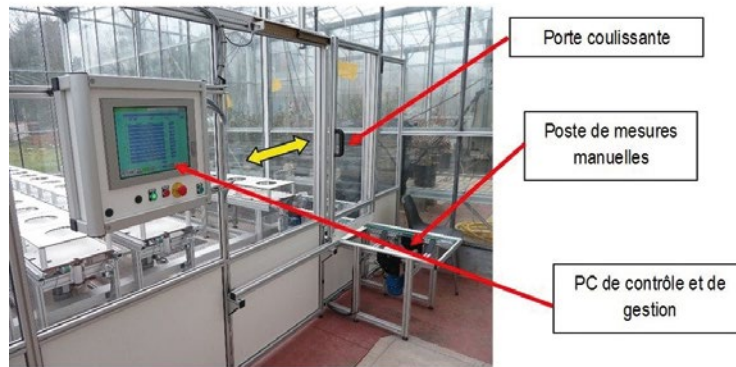


Figure 6. Sas et station de mesure manuelle (photo : C. Buré).

Automate et interface PC

Le pilotage de la partie mécanique a été réalisé en collaboration avec la société ELOGIA (bureau d'étude en automatisme) qui a conçu un programme permettant de répondre au mieux aux attentes et aux besoins des expérimentations et des expérimentateurs. Il s'agit d'un système de contrôle interfacé par PC tactile (**Figure 7**) qui gère de façon coordonnée :

- ✓ le convoyage des palettes,
- ✓ la desserte de la station de pesée et la descente/remontée de l'ascenseur pour la pesée,
- ✓ la desserte de la station de mesure,
- ✓ le système d'arrosage contrôlé.



Figure 7. PC tactile de gestion (photo : C. Buré).

Interface

L'interface permet de programmer 1) l'enchaînement des différents cycles de travail de l'automate, 2) une modification facile du programme, 3) également le changement instantané des consignes ainsi que la visualisation de la position des palettes et la surveillance des données enregistrées. Ce système peut être piloté à distance via le réseau internet et plus précisément, par le système « d'accès distant » mis en place par l'Unité SESUP (Services, support, usages autour du poste de travail) et disponible dans le catalogue de services 2014 de la DSI (Direction du Système d'information). Évolutif, ce système peut être complété en fonction de nouveaux besoins (nouveau mode de circulation, ajout de mesures automatiques ...).

Les différents cycles de travail de l'automate

- ✓ *Cycle « chargement et déchargement »*
Il permet de recevoir les palettes vides une à une au niveau du poste de mesure manuelle pour y déposer les plants. De plus, une sélection des palettes est possible de façon à ne considérer qu'un lot de plants.
- ✓ *Cycle « mesure manuelle »*
Il permet d'amener les palettes à la station de mesure. De même que pour le cycle « chargement et déchargement », une sélection des palettes est possible de façon à ne considérer qu'un lot de plants.
- ✓ *Cycle « arrosage »*
Il permet à chacune des palettes d'être dirigée vers la station de pesée, et, en fonction de la consigne de masse attribuée, d'être arrosée ou non.
- ✓ *Cycle « pesage seul »*
Il permet une pesée des palettes sans arrosage pour estimer la perte en eau entre deux arrosages.
- ✓ *Cycle « mesure et arrosage »*
Ce cycle est la combinaison des deux étapes précédentes. Dans un premier temps il y a le passage au poste de mesure manuelle suivi de l'étape d'arrosage.
- ✓ *Cycle « balade ».*
Les palettes sont en mouvement, elles circulent d'un convoyeur à l'autre sans passer sur les stations dans le but d'homogénéiser l'exposition à l'environnement.
- ✓ *Cycle « pause »*
C'est l'arrêt programmé du système pendant un certain temps (en minutes) (max : 1000 min). Il est utilisé pour espacer les autres cycles.

Les programmes

Deux types de programmation de l'automate sont possibles.

Le programme journalier

Il démarre chaque jour à une heure donnée. Le programme comprend jusqu'à 20 étapes, chacune correspondant à un des cycles décrits plus haut. A chaque étape, le cycle peut être répété plusieurs fois (ex : 1^{ère} étape de trois cycles « balade »). Une fois toutes les étapes effectuées, quelle que soit l'heure, l'automate s'arrête et le programme journalier reprend le lendemain à l'heure donnée. Le chargement des consignes se fait automatiquement à chaque début du programme.

Le programme unique

Contrairement au programme journalier, le programme unique ne peut pas commencer à une heure donnée. Son exécution se fait manuellement et comme son nom l'indique, il permet de réaliser un seul cycle.



Enregistrement des données

Toutes les données produites sont enregistrées quotidiennement sous forme de fichiers « .csv » (*comma-separated values*). Trois types de données sont sauvegardées : 1) les fichiers d'évènements qui répertorient tous les évènements programmés ou non, 2) les fichiers d'alarmes et 3) les fichiers de pesées qui sont incrémentés au fur et à mesure des pesées avec la date et l'heure de passage de chaque palette, son identification et les masses avant et après arrosage ainsi que la consigne.

Les fichiers journaliers de pesée-arrosages sont intégrés quotidiennement dans une base de données (BD). Pendant l'intégration, les données sont vérifiées et les pertes en eau ainsi que la transpiration par unité de temps sont calculées. Cette intégration se base sur un fichier pour chaque projet/robot où les opérateurs indiquent de manière codifiée les informations utiles. C'est aussi dans ce fichier que sont précisées les sorties de pot de la chaîne de mesure. La BD est capable d'intégrer des anomalies de masse (ex : perte ou ajout de masse autre que l'eau, comme un tuteur, un instrument de mesure, etc.) et des arrosages manuels supplémentaires dans ses calculs. Dans la BD, les données sont organisées par projets avec toutes les métadonnées sur la conduite de l'expérimentation. Il est aussi possible d'y accéder à distance par une connexion PostgreSQL.

Système d'alarme

Pour s'assurer du fonctionnement optimal de l'automate, un système d'alerte par sms (short message system) a été installé. Ce système peut nous informer sur notre téléphone portable en temps réel, de toute panne mécanique mais aussi d'un mauvais fonctionnement du programme. Pour plus de sécurité dans les expérimentations, un sms peut signaler le dysfonctionnement du système de convoyage ou d'arrosage (écart [masse de consigne-masse finale]).

Applications et perspectives d'évolution

Le système a été dupliqué en 2013 dans un autre compartiment de la même serre. Plusieurs projets de recherche ont eu lieu en interne ou lors de collaborations nationales et internationales sur différentes espèces forestières (chêne, peuplier, etc.). Les automates sont impliqués dans le cadre d'un projet européen d'infrastructure (Tree4future).

Pour illustrer l'utilisation principale de l'automate, nous avons choisi un exemple de suivi temporel de la masse d'une palette lors d'une expérimentation sur peuplier (**Figure 8**). L'arrosage du pot (jusqu'à la masse de consigne) permet de compenser les pertes transpiratoires entre les cycles d'arrosage et d'appliquer strictement des régimes hydriques de façon homogène. Notre système permet de calculer l'eau consommée par une plante à l'échelle de la journée et de suivre la dynamique de transpiration le jour et la nuit (**Figure 9**).

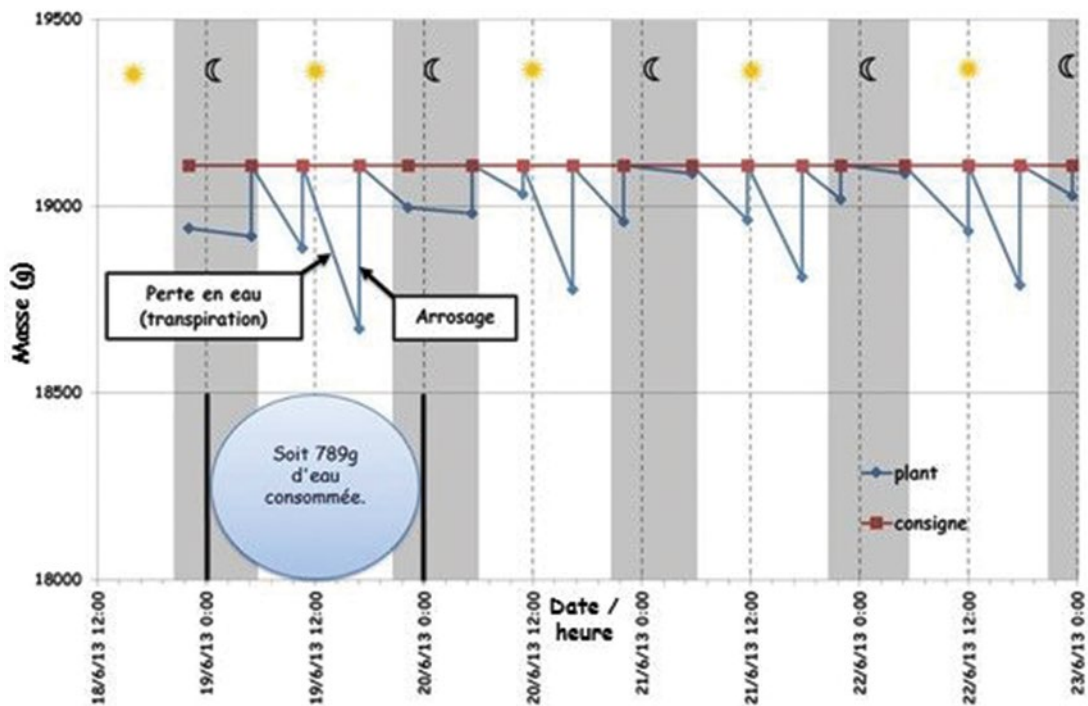


Figure 8. Exemple de suivi temporel de la masse.

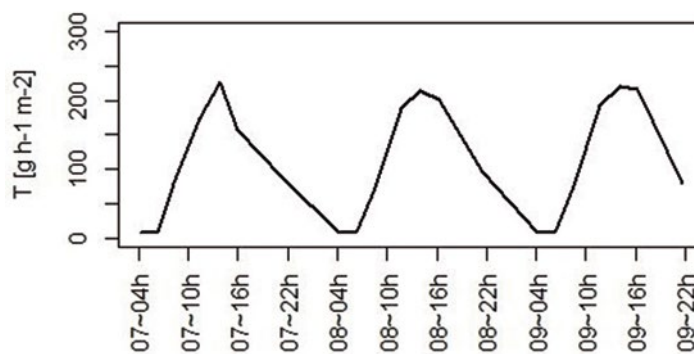


Figure 9. Suivi temporel de la transpiration « plante entière » sur 3 journées consécutives.

Le retour des utilisateurs est très positif d'autant que les résultats sont obtenus 1) sans la fatigue physique des pesées manuelles pluri-journalières, 2) avec une grande fréquence temporelle dans l'acquisition des données. De plus, la sauvegarde automatique (des mesures et des événements) permet une amélioration de la démarche qualité autour d'expériences lourdes. Enfin, le choix d'un système évolutif, tant dans l'ossature que la gestion de l'automatisme, est pertinent. Nous avons pu faire évoluer « Pollux », lors de l'acquisition du second automate (« Castor »), pour mieux satisfaire les utilisateurs. Etant gestionnaires et propriétaires du programme et des données générées, nous avons la liberté de faire évoluer nos automates en fonction de nos besoins scientifiques (exemple : acquisition automatique des diamètres de tige ou de l'humidité volumique du substrat, ajout d'instrumentation aux stations, ajout de stations et/ou d'interconnexions des deux automates).

