

Un automate de phénotypage pour cultiver des plantes à des états hydriques du sol contrôlés :

Un outil d'aide à la caractérisation de la réponse de la croissance et de la transpiration à la sécheresse.

Myriam Dauzat¹, Emmanuel Simon², Christine Granier¹, Philippe Hamard¹, Bertrand Muller¹, Angélique Christophe¹, Didier Combes³, François Tardieu¹, Thierry Simonneau¹

RESUME

Afin de répondre au besoin de phénotypage à haut débit dans le domaine végétal, un automate a été créé pour irriguer des plantes en pot (250 cm³) à des niveaux de déficits hydriques du sol reproductibles. Cet automate est capable de peser et d'ajuster le poids de plus de 500 pots et de prendre des images des plantes automatiquement, suivant les consignes données par un programme. Celles ci sont attribuées pot à pot et peuvent être modifiées à chaque pas de temps suivant le scénario souhaité. Les cycles du robot peuvent être programmés plusieurs fois dans une même journée. Cet automate est placé dans une chambre de culture dans laquelle les conditions environnementales ont été homogénéisées au maximum de façon à ce que les 500 plantes soient cultivées dans des conditions identiques.

Une présentation technique détaillée de l'automate, les contrôles 'qualité' effectués, les améliorations techniques apportées ainsi que les techniques utilisées pour s'assurer d'une homogénéité des conditions environnementales ressenties par les plantes sont présentés ici.

MOTS CLES : Phénotypage haut-débit, automate, *Arabidopsis thaliana*, déficit hydrique, croissance foliaire, transpiration

INTRODUCTION

Un des objectifs du Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux à Montpellier, est d'analyser et de modéliser la réponse de la croissance foliaire et de la transpiration des plantes aux conditions environnementales, en particulier au déficit hydrique du sol. Dans un premier temps, les modèles ont été établis pour un génotype chez différentes espèces, comme Dea chez le maïs, Albena chez le tournesol, Col-0 chez *Arabidopsis thaliana*. Puis, il a été envisagé (1) de tester la robustesse de ces modèles en analysant la variabilité génétique au sein des espèces et (2) d'utiliser ces modèles pour rechercher des QTLs associés aux réponses de la croissance foliaire au déficit hydrique chez le maïs. Le passage d'un seul génotype à un grand nombre de génotypes (plus de 100 dans le cas de la détection des QTLs) demandait d'adapter la taille des dispositifs et d'automatiser un grand nombre de mesures.

L'objectif du travail présenté ici était de réaliser un automate capable d'ajuster l'humidité du sol pot à pot dans un dispositif de 500 pots environ. Les plantes dans ces pots devaient être cultivées dans des conditions micro météorologiques très homogènes. Parallèlement, des capteurs devaient permettre le suivi non destructif de l'expansion foliaire des plantes et leur consommation en eau. Ce travail a été effectué en 3 temps. Dans un premier temps le cahier des charges que devaient remplir l'automate et la chambre de culture qui devait l'accueillir a été réfléchi au LEPSE (de

¹ INRA-Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux, 2, place Viala, 34060 Montpellier cedex

² Apilogic, Z.A de la Haute Limougère 37230 Fondettes

³ INRA- Unité d'Ecophysiologie des Plantes Fourragères, 86600 Lusignan

janvier à septembre 2002). L'automate a ensuite été construit par une entreprise experte en automatisation et en système de supervision reliés par internet en ce qui concerne l'automate lui-même (APILOGIC, de Septembre 2002 à Février 2003). En parallèle, la chambre de culture qui devait l'accueillir a été construite par une entreprise experte en froid et climatisation (AMFroid, Montpellier, de Septembre 2002 à Février 2003). Le tout a été livré au LEPSE en mars 2003 où il a ensuite fait l'objet de nombreux tests et contrôles 'qualité' (de Mars 2003 à Septembre 2003) avant de donner ses premiers résultats.

1. LE CHOIX DES ENTREPRISES PARTENAIRES

Une recherche locale a permis d'identifier quelques entreprises locales correspondant aux besoins. Certaines étaient déjà connues sur le centre et intervenaient sur certains de nos dispositifs (chambre de culture). Elles ont eu la priorité et le cahier des charges a été établi en collaboration. Ainsi, l'entreprise AM Froid a conçu la chambre de culture.

Internet a permis d'élargir la recherche. Les mots clefs: automatisme, programmation, supervision, déplacement linéaire, robotique ont permis de sélectionner 3 entreprises. Un appel d'offre a été lancé. Les devis obtenus ont été comparés: les prix dans un premier temps, puis, les rapports qualité/prix et surtout la faisabilité des systèmes proposés, leur souplesse, leur possible évolutivité et leur accessibilité.

La société APILOGIC a été choisie pour la conception de l'automate

Les types de capteurs qui équipent la chambre ainsi que l'automate sont déjà largement utilisés dans notre laboratoire et présentent des caractéristiques techniques suffisantes et satisfaisantes pour l'utilisation prévue (Campbel, Sartorius, LI-Cor, Vaisala, Skye, Sony...). Nous avons donc toutes les raisons de poursuivre l'équipement avec ce matériel.

Les autres fournisseurs ont été choisis via internet pour des matériels plus particuliers (pompe, moteurs).

Un récapitulatif en fin d'article précise les coordonnées des principaux fournisseurs.

2. CAHIER DES CHARGES DE LA CHAMBRE DE CULTURE ET DE L'AUTOMATE

Il s'agissait de réaliser un système d'irrigation automatisé de plantes pot par pot par pesées au moyen d'une balance déplacée successivement sous chaque pot. Simultanément, une caméra et un capillaire d'irrigation devait se déplacer au dessus des pots (*Photo 3*) afin de prendre les plantes en photos et les irriguer. L'ensemble devait être installé dans une chambre de culture (*Photo 1*) dont les dimensions intérieures utiles étaient de $l \times L \times h = 150 \times 420 \times 218$ cm. (h utile = $240 - 22$ cm de plafond lumineux).

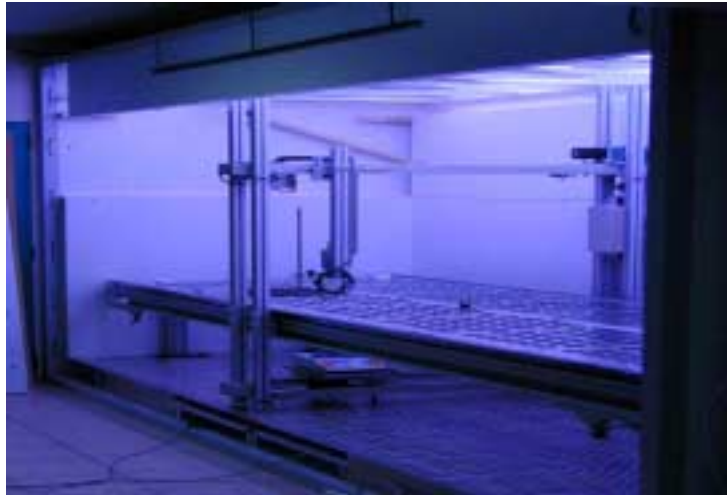


Photo 1 : Mise en place du robot dans la chambre

La chambre devait pouvoir être régulée en température dans une gamme de 10 à 30°C, en humidité de l'air dans une gamme de 30 à 80%. Suivant les applications, plusieurs niveaux de rayonnement incident devaient pouvoir être imposés. En effet, un rayonnement incident journalier supérieur à $20 \text{ mol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ est nécessaire pour la culture du maïs, alors qu'il doit être compris entre 8 et $12 \text{ mol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ pour une croissance optimale d'*Arabidopsis thaliana* (Frank, 2001). La gestion et le pilotage du climat dans la chambre devaient être intégrés à l'automatisme. Les conditions dans la chambre de culture devaient être le plus homogène possible de façon à ce que les plantes soient cultivées dans des conditions rigoureusement identiques. Il avait été envisagé que les plantes se déplacent dans la chambre au cours de l'expérience de façon à homogénéiser leurs conditions de culture mais cette solution n'a pas été retenue.

Le dispositif devait être conçu pour recevoir dans l'immédiat des pots de petites dimensions pouvant peser jusqu'à 220g (pots cylindriques de 9cm de haut, 7cm de diamètre à la base et 5cm de diamètre en haut du pot, pour la culture d'*Arabidopsis thaliana*). Mais il devait être modulable pour permettre ultérieurement la culture de plantes dans des pots plus grands pouvant peser jusqu'à 10kg (pour la culture des plantes de maïs). L'information relative à la disposition des pots à l'intérieur de la chambre devait pouvoir être archivée sur le PC sur ordre de l'opérateur lors de l'installation des pots, et lors de toute permutation ou suppression ultérieure des pots. L'identité de chaque pot (déclinée éventuellement en plusieurs identificateurs) associée à sa position dans le dispositif (type mots-croisés et/ou repère x, y) devait être extraite d'un fichier externe (Excel ou autre..), dans lequel à chaque pot est associé un poids cible à atteindre par irrigation et être stockée. De même, à chaque pot devait être associée une prise d'image ou pas.

3. DESCRIPTION DE LA MECANIQUE, DE L'AUTOMATISME ET DU MATERIEL EMBARQUE SUR L'AUTOMATE .

L'ensemble mécanique de ce système d'irrigation automatisé a été réalisé en profilés d'aluminium. Cette structure comporte **un cadre principal fixe** (axe X 4.17m) constitué de deux glissières rails à galets avec entraînement par courroies crantées. Il supporte **un portique** mobile le long de l'axe X. Ce portique constitue l'axe Y (course 1.46m) et est entraîné de la même manière que l'axe des X. L'entraînement des axes XY est effectué à l'aide de moteurs pas à pas, chaque axe étant muni de détecteurs pour la prise de référence. Le mouvement est assuré par

deux moteurs de type « servomoteur » pilotés par variateur électronique afin d'assurer un déplacement d'une précision millimétrique. Le cadre principal supporte aussi la structure qui va recevoir **les plateaux** de pots (*Photo 1*). Ce cadre comporte un minimum de poutrelles de renforcement pour permettre la plus grande souplesse dans la disposition des pots. Un caillebotis (fourni par l'installateur de la chambre) surélevé d'environ 15 cm par rapport au plancher est placé sur toute la surface pour la reprise d'air dans l'enceinte climatique. Ce caillebotis est conçu pour supporter le poids d'un opérateur. Par contre, le poids du robot d'irrigation repose sur des pieds traversant le caillebotis jusqu'au sol. La hauteur utile est réduite à 203 cm (240cm – 22cm de plafond lumineux – 15 cm de caillebotis).

Le portique (*Photo 2*) supporte une balance de précision (Sartorius CP 622, 37075 Gottingen, Allemagne), un capillaire d'alimentation en solution nutritive et une caméra (Sony, color vidéo caméra, exwave HAD).

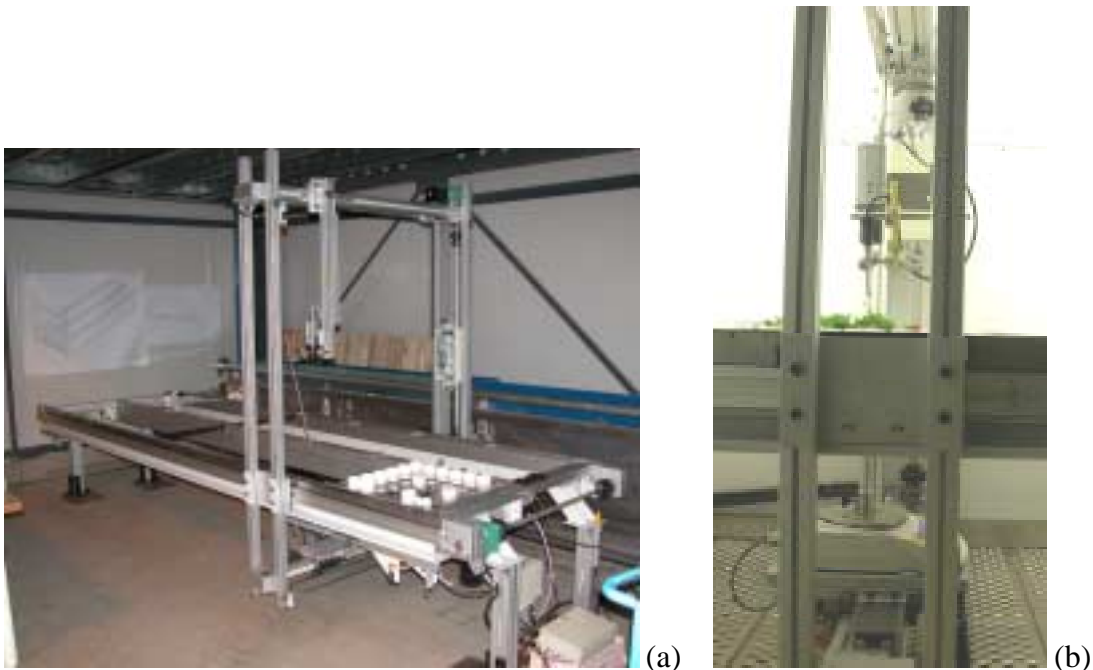


Photo 2 : vue générale du robot avant (a) et après (b) sa mise en place

Les déplacements de la balance, du capillaire et de la caméra sont synchrones en X et en Y. Le portique est conçu pour supporter environ 8 kg sur sa traverse haute (dispositif d'irrigation, caméra, mais d'autres capteurs peuvent être ajoutés comme une caméra infra-rouge ou un pyromètre infra-rouge, par exemple) et environ 12 kg sur sa traverse basse (balance et pot). Sa hauteur permet le déplacement du capillaire et des caméras embarquées au dessus des plantes sans les gêner. La traverse haute du portique est réglable en hauteur sur les montants du portique et la traverse basse supporte la balance.

La **balance** est équipée d'une interface de communication (RS232) et a un indice de protection IP54. Elle est posée sur un petit plateau élévateur actionné par un vérin pneumatique. Ce vérin est équipé de détecteurs pour définir ses positions haute et basse.

Une pompe péristaltique (Electro finish, Fontaine, France) pilotable par sortie RS232 (marche/arrêt, vitesse de rotation) permet de délivrer la solution nutritive. Elle est reliée au capillaire d'irrigation par un tuyau de type « tygon » de diamètre extérieur de 4mm. Ce tuyau circule dans deux chaînes porte-câble pour s'adapter aux déplacements Y et X.

La caméra (Photo 3) est reliée par une sortie RS 232. Une carte PCI Diane développée par APIM informatique (Francouville, France) et adaptée par Apilogic, permet la prise d'images et la visualisation en direct sur l'écran du PC des images.



Photo 3 : la caméra en action

Les plateaux : ils sont carrés et amovibles (Figure 1), en aluminium d'environ 0.35 cm d'épaisseur, percés de 36 alvéoles (qui reçoivent les pots) et de trous pour la circulation verticale de l'air vers le caillebotis.

Ainsi le cadre principal renforcé par 2 poutres (2 latérales et 1 centrale) supporte 2 rangées de 7 plateaux.

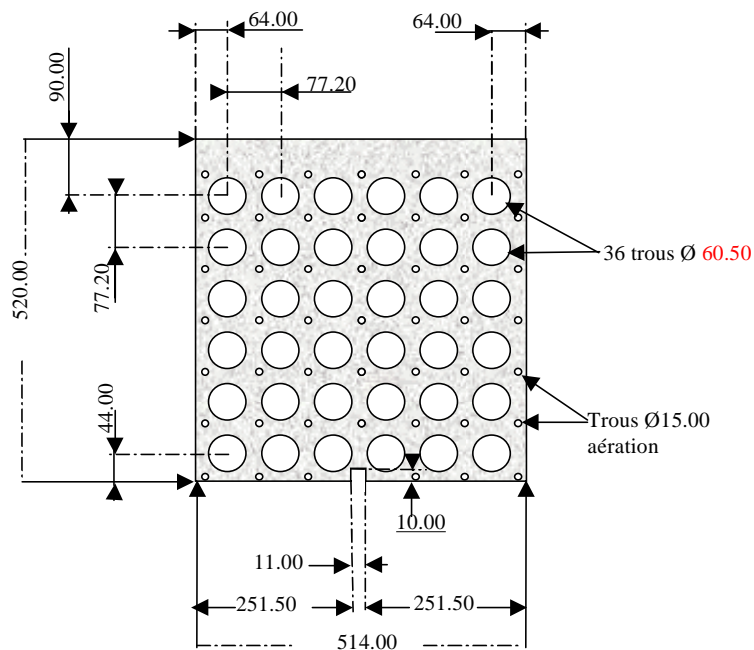


Figure 1 : détail des côtes d'un plateau et vue d'un plateau avec plantes au cours d'une expérimentation

Un PC programmé avec l'outil APIGRAF-IP (solution complète d'automate et supervision sur PC développée par la société Apilogic) est connecté aux différents capteurs et actionneurs par des modules d'Entrées / Sorties « Tout ou Rien » et d'Entrées Analogiques. Il assure les fonctions de :

- ❑ Automatisation de l'irrigation (contrôle des moteurs pas à pas, détecteurs, électrovanne d'irrigation, levage de la balance, communication avec la balance, contrôle sécurité porte d'accès, déclenchement du cycle d'irrigation...).
- ❑ Dialogue et pilotage du système d'irrigation.
- ❑ Automatisation du conditionnement climatique de la chambre (contrôle d'un ou 2 groupes froid, de résistances, de l'allumage de rampes de lampes, d'un vaporisateur et d'un sécheur d'air).
- ❑ Dialogue et pilotage du conditionnement climatique.
- ❑ Interface Homme/Machine, Supervision pour: la saisie des informations de paramétrage de fonctionnement, l'édition et la sauvegarde des rapports, la visualisation de l'état du système.

Le principe de l'automate est présenté sur le diagramme suivant.

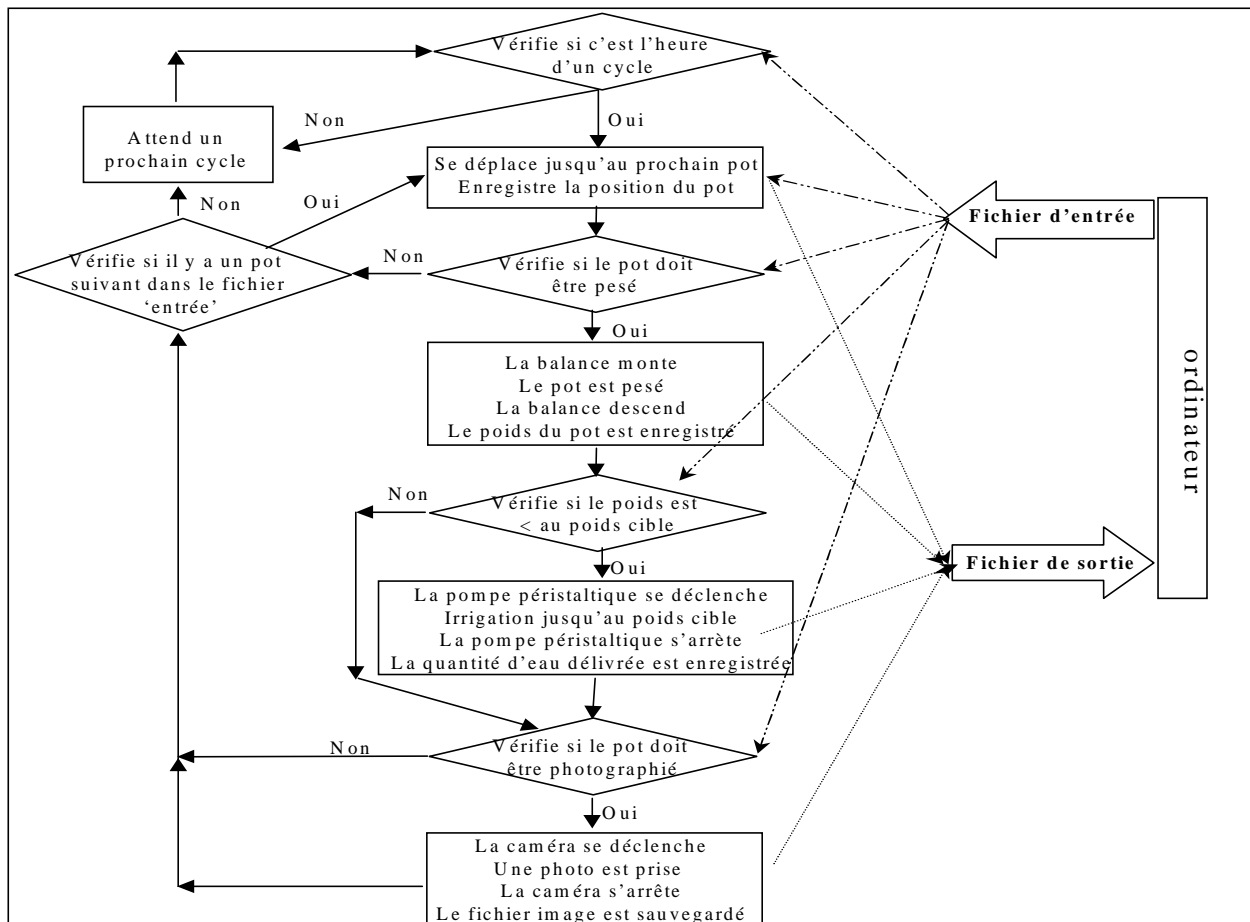


Figure 2 : principe de l'automate

4. DESCRIPTION DU SYSTEME DE REGULATION CLIMATIQUE DE LA CHAMBRE DE CULTURE

La régulation climatique de la chambre est pilotée par des actionneurs reliés individuellement à :

- ❑ un humidificateur à mélange eau/air pulsé (gouttes < 5µm²),
- ❑ un sécheur Munters à disque hygroscopique à régénération,
- ❑ Trois résistances de 1000W,
- ❑ un groupe froid MANEUROPE,
- ❑ 14 lampes (de type iodure métallique)
- ❑ 7 néons

Il est ainsi possible de contrôler et faire varier dans la chambre de culture : le taux d'humidité de l'air, la température et le rayonnement incident. Ces facteurs sont mesurés et enregistrés en continu, à un pas de temps défini, respectivement par un capteur HMP 35AC (Vaisala Oy, Helsinki, Finlande) et SKP 215/S (Skye Instruments, Powys.LD1 6 DF U.K).

5. CONTROLES QUALITE ET REGLAGES DE LA CHAMBRE DE CULTURE

Des capteurs micro-météorologiques permettant de mesurer le niveau de rayonnement incident (RPA¹, LI-190SB, Li-Cor, Lincoln, Ne, USA et RPA fabriqués en interne et étalonnés), l'humidité relative et la température de l'air (HMP35AC) ont été placés sur les plateaux recevant les pots, à différents endroits dans la chambre de culture. Ces capteurs étaient connectés à une centrale d'acquisition de données (Campbell Scientific, LTD-CR10 Wiring panel, Shepshed, Leicester-shire, UK) permettant de stocker et de faire des moyennes de ces données toutes les 300 s. Une cartographie des conditions environnementales dans la chambre de culture a ainsi pu être établie .

5.1. Homogénéisation du niveau de Rayonnement dans la chambre

Le rayonnement (RPA) dans la chambre de culture était en moyenne de 380 µmol m⁻² j⁻¹, soit un rayonnement journalier supérieur à 20 mol m⁻² j⁻¹ avec une photopériode de 16 heures. Celui ci convenait à la culture du maïs mais il était trop élevé pour favoriser le développement d'*Arabidopsis thaliana* et répondre à ses besoins. De plus, il était hétérogène sur la surface de la chambre : plus faible sous le bras de l'automate, et près des parois de la chambre (figure 3a). Nous avons donc cherché à réduire de façon irrégulière l'intensité du rayonnement, sans toutefois en altérer la qualité. Plusieurs types de filtres et de verres fumés de diverses couleurs ont été testés. Finalement, un doublage des vitres à l'aide de papier calque disposé avec des épaisseurs différentes suivant leur position dans la chambre a permis de trouver des niveaux de rayonnement convenables et homogènes (figure 3b) .

¹ RPA= Rayonnement Photosynthétiquement Actif

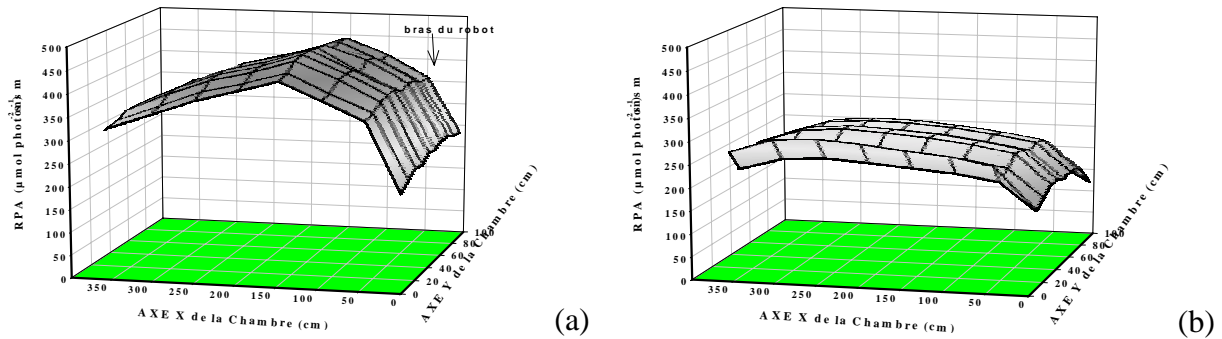


Figure 3: Spatialisation du RPA dans la chambre avant (a) et après (b) la mise en place des calques

5.2. Vérification de l'homogénéité de la qualité de la lumière

Nous avons mesuré les caractéristiques spectrales de la chambre, à 22 cm au-dessus de chaque plateau (1 mesure par plateau) avec un spectroradiomètre (Li-1800, LI-Cor, Lincoln, NE, USA). Les calculs ont été faits à l'aide du programme CARFIL (UEPF, INRA Lusignan). Le photoéquilibre du phytochrome (ϕ_c) et l'efficacité photosynthétique ont été calculés comme décrit par Sager *et al.* (1988).

Il apparaît que les caractéristiques spectrales de l'éclairage du point de vue du ϕ_c et de la quantité de bleu (« signaux photomorphogénétiques ») sont homogènes sur l'ensemble de la chambre (Figure 4). Ainsi leurs variations entre plateaux sont faibles (<10%).

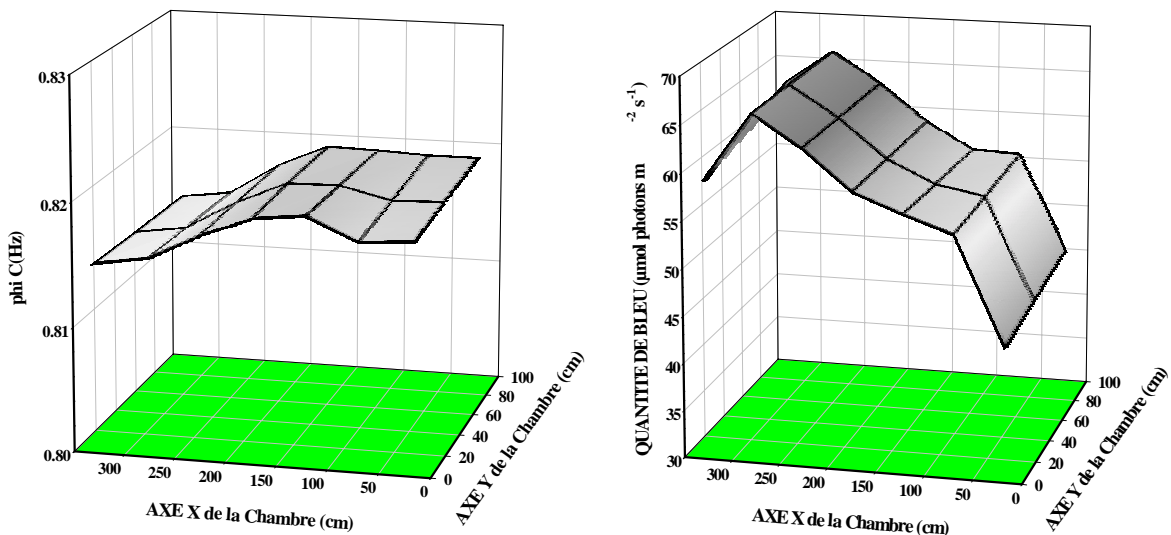


Figure 4: spatialisation des deux principales caractéristiques spectrales de la lumière

Ces caractéristiques sont proches de celles d'un éclairage naturel de plein jour ($\phi_c \sim 0.72$ Smith et Holmes, 1977; BL/PAR ~ 0.30 Holmes, 1981). De plus, la quantité de flux de photons dans le bleu est supérieure à $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, seuil en dessous duquel les réponses

photomorphogénétiques liées aux cryptochromes seraient activées chez plusieurs espèces (Wheeler et al., 1991; Christophe et al., soumis).

En résumé en termes de qualité de la lumière, les conditions dans la chambre sont telles que ni les phytochromes (ϕc), ni les cryptochromes (bleu) n'induisent de réponses photomorphogénétiques chez les plantes situées n'importe où dans la chambre.

5.3. Température et Hygrométrie

Une hétérogénéité concernant la distribution spatiale de l'humidité relative (HR) de l'air et de la température dans la chambre de culture a également été constatée. Elle était due essentiellement à l'orientation des buses d'humidification de la chambre, disposées aux 2 extrémités de la chambre et au réglage de la ventilation permettant de brasser l'air de la chambre de culture. Un réglage de la ventilation et de la position relative des deux buses a été trouvé permettant d'optimiser la dispersion de l'humidité en évitant de concentrer l'eau et donc de rafraîchir certains endroits plus sensiblement.

Les Figures 5 et 6 témoignent des améliorations de l'homogénéité de l'ensemble des conditions environnementales suite aux modifications techniques réalisées.

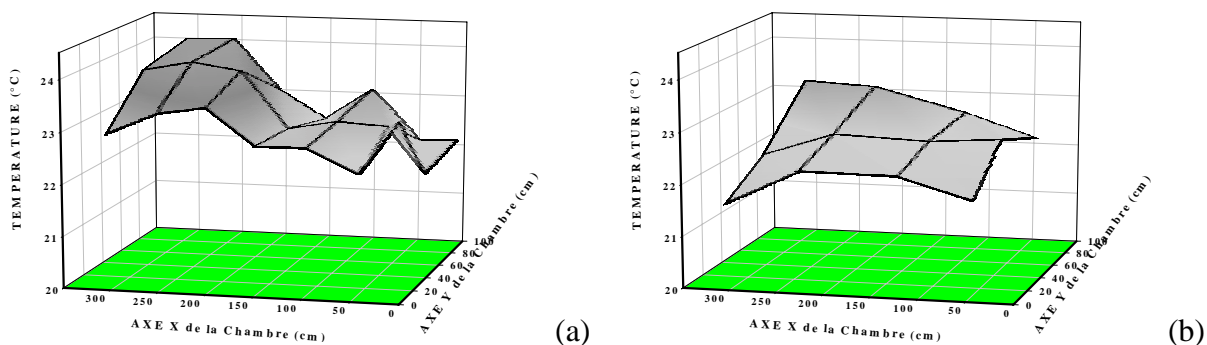


Figure 5: Spatialisation de la Température dans la chambre, après homogénéisation du rayonnement, avant (a) et après (b) améliorations techniques

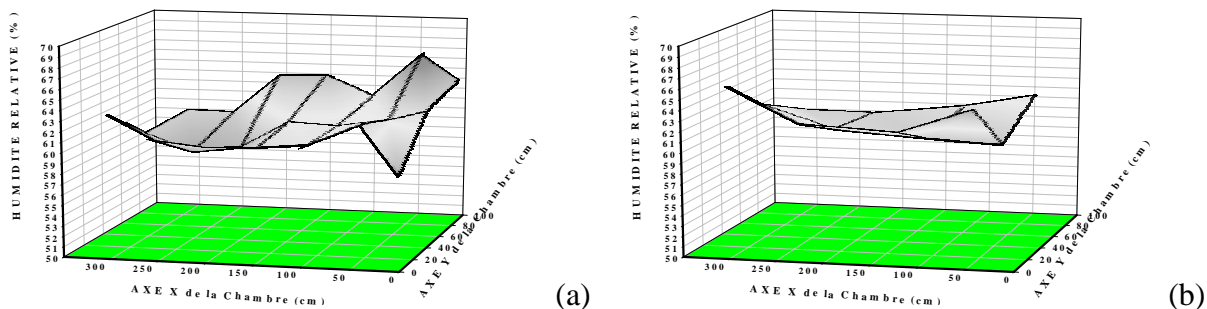


Figure 6: Spatialisation de l'Humidité Relative dans la chambre, après homogénéisation du rayonnement, avant (a) et après (b) améliorations techniques

6. CONTROLE QUALITE ET REGLAGE DE L'AUTOMATE

L'automate est un prototype, le premier de son genre, conçu sur mesure pour une localisation et une application très précise. Malgré un cahier des charges précis, une conception et une construction rigoureuses, de nombreux contrôles ont dû être effectués et des mises au point ont été nécessaires.

6.1. La Programmation

La société APILOGIC a assuré par télémaintenance la mise au point et les principales modifications du programme. Des consignes de sécurité ont ainsi été ajoutées au programme de façon à ce que l'appareil soit plus opérationnel et fiable en routine. Par exemple, lorsque la pesée du pot est nulle, l'appareil n'irrigue pas même si il y a un poids cible dans le programme. Cette sécurité a été rajoutée pour subvenir aux problèmes lors de la suppression physique d'un pot dans l'expérimentation et l'oubli de suppression de ce même pot dans le fichier d'entrée.

6.2. Les Réglages

La pompe : La pompe péristaltique est calibrée avant chaque expérimentation. Son débit est saisi dans le programme de façon à ce que le temps d'irrigation nécessaire pour délivrer la quantité de solution nutritive voulue soit correct. Une modification du coefficient du débit de la pompe péristaltique est nécessaire régulièrement, dû principalement à l'usure (800 heures) du tuyau en tygon de celle-ci.

Les supports de culture : Le diamètre des alvéoles des plateaux supportant les pots avait été calculé de façon à ce que lors des soulèvements des pots, le contact entre les bords des alvéoles et ceux des pots soient nuls. Toutefois il s'est avéré que les pots une fois remplis de terre se dilataient légèrement. Les contrôles qualité effectués en comparant des pesées manuelles des pots pleins et les pesées automatisées par le robot lui-même se sont avérés insatisfaisants. L'erreur de pesée acceptable pour une expérimentation a été estimée à 2% soit 4g pour des pots remplis de terre pesant environ 200g. Les pots prévus pour nos expérimentations (pots 1) engendraient des erreurs de pesées jusqu'à 7% à cause de leur contact avec le bord des alvéoles (*figure 7*). Des pots plus coniques (pots 2) ont été utilisés ensuite et ont permis de nettement améliorer la qualité de pesées (*figure 8*).

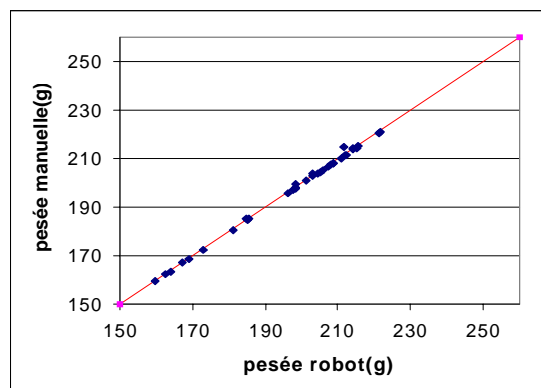
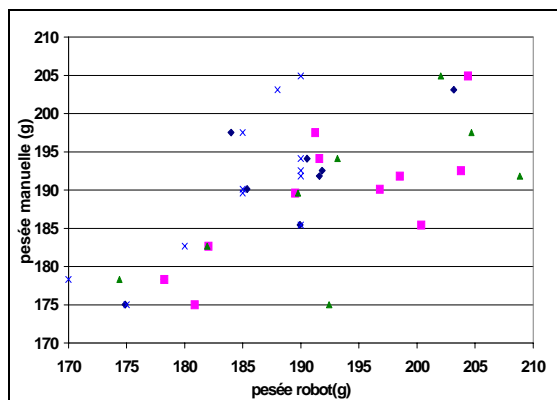


Figure 7 : performances des supports de culture des pots 1, avant (a) et après améliorations (surveillance, aide, ébavurage des plateaux) (b)

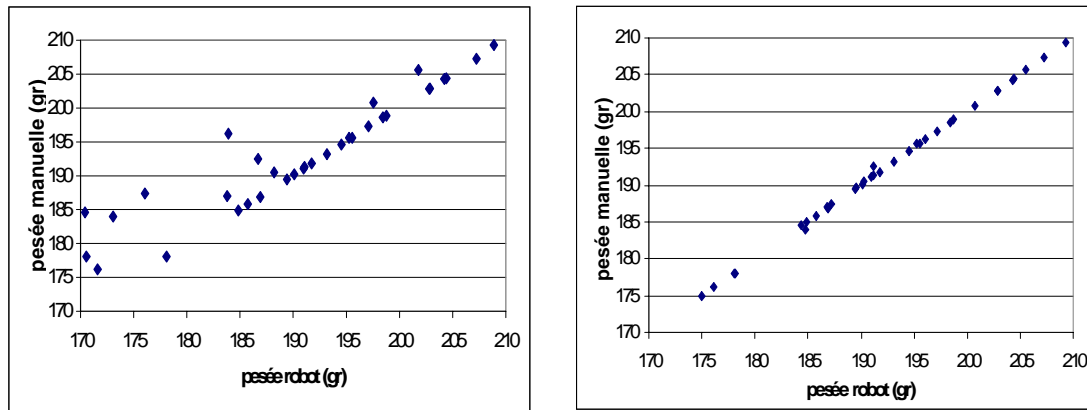


Figure 8: performances des supports de culture des pots 2, avant (a) et après améliorations (surveillance, recentrage des pots) (b)

7. LA MAINTENANCE DU SYSTEME

Le robot ainsi que les conditions climatiques sont pilotables à distance. Cette fonction est très utile pour contrôler, piloter l'automate et changer les conditions environnementales de la chambre de chez soi (week end, vérifications en soirée). Mais aussi pour la télémaintenance et les modifications de programmation assurées par la société Apilogic.

Cette opération est possible via internet et le réseau de notre campus grâce aux logiciels suivants mis à notre disposition par l'unité informatique du centre INRA de Montpellier:

- VPN: système d'accueil et logiciel client permettant la liaison entre le poste distant et le serveur du centre via internet, de façon sécurisée et inviolable (IPSEC avec cryptage 3DES 128 bits).
- VNC: logiciel de prise en main à distance entre 2 ordinateurs (l'un client, l'autre parent), sous réserve de la mise sous tension des 2 machines.

D'autres logiciels assurant les mêmes fonctions existent dans le commerce.

8. PREMIERS RESULTATS

Ce nouvel outil a déjà été mis en œuvre en 2003 et 2004 dans le cadre d'une action GABI-GENOPLANTE dont l'objectif est d'analyser la variabilité naturelle de la réponse à la sécheresse chez *Arabidopsis thaliana*. Le système automatisé a permis de cultiver jusqu'à 9 accessions d'*Arabidopsis thaliana* à des teneurs en eau du sol stables et identiques au cours du temps (Figure 9). L'effet de 6 états hydriques du sol (teneur en eau du sol de 0.45, 0.35, 0.30, 0.25, 0.2 et 0.15 g g⁻¹) sur la croissance foliaire et la transpiration des accessions a pu être analysé. Les résultats encourageants soulignent de fortes différences de sensibilité au dessèchement du sol entre écotypes, tant pour la croissance foliaire (Figure 10) que pour la transpiration des plantes.

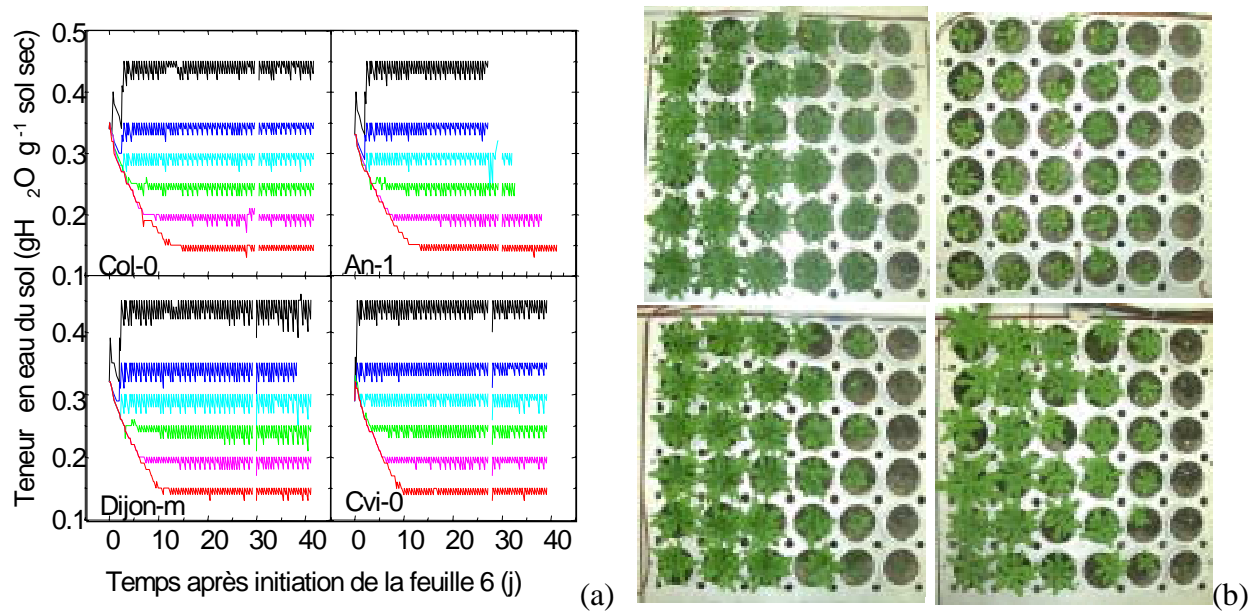


Figure 9 : effet des teneurs en eau du sol (a) sur la croissance de 4 accessions d'*Arabidopsis thaliana* (b)

9. PERSPECTIVES ET EVOLUTIONS

Ce système a été conçu pour être modulable et permettre la culture d'autres plantes telles que le maïs en changeant juste les plateaux supportant les pots et la balance, et en ajustant la hauteur des différents capteurs sur le bras mécanique. Il est prévu également d'équiper le bras de nouveaux capteurs comme une caméra infra-rouge pour la prise de températures de surface. La quantité de fichiers de données générée par une expérimentation dans le robot (fichiers météo, fichiers de pesées et d'irrigation des pots, fichiers image...) nous conduit à réfléchir à une gestion automatisée des fichiers et à une automatisation des analyses d'images.

Si les applications retenues pour l'instant sont essentiellement l'imposition de contraintes hydriques du sol, il est probable que d'autres laboratoires s'équipent d'un outil semblable dans le cadre de notre IFR pour imposer des carences minérales reproductibles.

Remerciements : Nous tenons à remercier tous les participants qui ont contribué à la faisabilité technique et à l'aboutissement de ce projet.

Merci à Philippe Bénézech, Philippe Naudin, Benoît Suard, Christophe de Berranger, MrVenne et Mr Mas.

ANNEXE

Liste récapitulative des **Partenaires et Fournisseurs** de matériel ayant servi à la réalisation de la chambre de culture et de l'automate :

La CHAMBRE de CULTURE :

	adresse	Tél, email ou site internet
AM Froid	Montpellier, France	0467871578
Campbel	Campbell Scientific, Shepshed, Leicester-shire, UK	http://www.campbellsci.co.uk/fr
Défecteur Lampes : iodure métallique Lampes : néons	Sylvania distribué par Teissier à Montpellier 340000	http://www.topgrow.com http://www.sylvania.com
Li-Cor	Lincoln, Ne , USA	Http://www.licor.com
Skye Instruments	Powys.LD1 6 DF U.K	http://www.skyeinstruments.com
Vaisala	Oy, Helsinki, Finlande	http://www.vaisala.com
Sécheur Munters	Colombes principal cedex	
Groupe froid	Danfoss Maneurop SA	
Humidificateur	Ambrumesnil 76550 France	http://www.devatec.com
caillebotis	Manutan	http://www.manutan&é.com

L'AUTOMATE :

APILOGIC	Z.A. de la Haute Limougière 37230 FONDETTES	www.apilogic.com
Moteurs servomoteurs	Sanyo Denki 95958 Roissy	www.sanyodenki.co.jp
Sartorius	37075 Gottinghen, Allemagne	http://www.sartorius.com
Sony, color vidéo caméra, exwave HAD).		
Electro finish	Fontaine, France	Electro.finish@freesbee.fr
APIM informatique	Francouville, France	http://www.apim-informatique.com

