

Une centrale d'acquisition Campbell® pour le pilotage des irrigations par tensiométrie d'une culture de plantes en pot

Gérard Sintès¹, E Lecoq², Gilles Guillemain¹

Résumé : *La forme est une des composantes de la qualité visuelle d'un rosier. Cette forme est conditionnée par une architecture dont l'élaboration est influencée par les conditions environnementales de la culture. Le programme scientifique de l'unité Sciences agronomiques appliquées à l'horticulture (SAGAH) du centre Inra d'Angers, a pour objectif de comprendre et de modéliser la réponse de facteurs abiotiques sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson et notamment l'irrigation.*

Mots clés : stress hydrique, irrigation, centrale, automatisme, tensiomètre

Introduction

Pour répondre à la question des variations de facteurs abiotiques chez le rosier buisson nous avons été amenés à nous interroger sur les modifications d'architecture et de forme de plantes soumises à des stress hydriques.

Les techniques de culture utilisées lors de ces expérimentations, notamment l'irrigation, nécessitent rigueur et précision pour respecter aussi bien le seuil de déclenchement que le volume d'eau apporté. Ces exigences impliquent l'automatisation de ces tâches répétitives. En revanche, nous ne disposons pas toujours des automates programmables qui satisferaient ce type de besoin. Dans notre cas l'utilisation d'une centrale d'acquisition « Campbell 21X », qui permet la programmation d'algorithmes de décision, a donné satisfaction.

1. Méthodologie

Le protocole prévoyait d'appliquer aux rosiers des stress hydriques contrôlés continus, à différents niveaux d'intensité et d'observer le comportement des plantes par une série de mesures morphologiques. Pour cela nous devons les cultiver dans un substrat dont le potentiel hydrique avait une valeur définie et stable.

Nous avons réalisé un dispositif expérimental qui permet de déclencher les irrigations à des niveaux définis de potentiel hydrique du substrat et d'apporter lors des irrigations un volume d'eau précis pour faire remonter de manière limitée ce potentiel hydrique, c'est-à-dire en évitant que le substrat n'atteigne son niveau d'humidification maximale. Ainsi nous avons pu conduire les irrigations en faisant fluctuer le potentiel hydrique dans des fourchettes de valeurs définies qui sont entre 7 et 25 kPa pour une modalité et entre 10 et 30 kPa pour l'autre modalité.

¹ UMR 0462 SAGAH (Sciences agronomiques appliquées à l'horticulture) INRA – F-49071 Beaucouzé Cedex
☎ 02 41 22 56 40 ✉ gerard.sintes@angers.inra.fr

² IFR 149 QUASAV (Qualité et santé du végétal) BP 60057 - F-49071 Beaucouzé cedex

2. Le matériel utilisé

2.1 Le dispositif de culture

Il est constitué pour chaque modalité expérimentale :

- d'une tablette de 12 m², équipée d'un bac de sub-irrigation,
- d'un système d'irrigation constitué d'un réservoir de solution nutritive de 200 litres, d'une pompe de reprise pour le remplissage du bac et d'un dispositif de commande électrique de cette pompe.

Avec ce dispositif la pompe est commandée soit en mode manuel (marche arrêt) soit en mode automatique en l'associant à un système de contrôle. Dans ce cas, la fermeture d'un contact déporté assure la mise en fonctionnement de la pompe.

Lorsque la pompe fonctionne, le bac de la tablette se remplit de solution. L'humidification du substrat s'effectue par remontée capillaire à partir de la base du pot. Ce type d'irrigation efficace est imprécis en termes de dosage des quantités de solution apportées. Il n'a donc été utilisé que pour la modalité témoin de notre expérimentation qui nécessitait la ré-humidification maximale du substrat.

En revanche, pour les traitements en stress hydrique, les apports en eau nécessitaient un contrôle précis du volume distribué. Nous avons donc opté pour un système d'irrigation localisée (goutte à goutte). La solution nutritive prélevée par la pompe dans le bac est envoyée dans un réseau de goutteurs installés sur chaque tablette. Les goutteurs, de type autorégulant, sont soumis à une pression de service de 1 Bar qui est obtenue par l'intermédiaire d'un régulateur de pression. Chaque pot est équipé d'un goutteur.

Nous avons fait des aménagements et des mesures sur le réseau d'irrigation pour répondre à deux exigences essentielles :

- l'homogénéité des volumes de solution distribués par chaque goutteur,
- la constance des débits de la solution lors de chaque irrigation.

Le dispositif réalisé a satisfait ces exigences, l'écart mesuré entre goutteurs ne dépassant pas +/-2 ml pour un apport de 40 ml, c'est-à-dire 10 % soit l'optimum pour ce type de matériel.

À ce stade nous contrôlions avec précision les quantités de solution apportées. Il ne restait plus qu'à maîtriser la fréquence des apports. Pour cela nous devons mesurer le potentiel hydrique du substrat avec un tensiomètre.

2.2 Le tensiomètre

Le tensiomètre est l'outil qui mesure le potentiel hydrique du substrat ; il comprend une bougie poreuse qui retient une colonne d'eau surmontée d'un capteur dont l'élément sensible est de type piézorésistif. Cet élément sensible possède la particularité de modifier sa résistance en fonction des forces qui s'exercent sur sa paroi. La modification de cette résistance fait fluctuer un signal électrique dont la valeur est comprise entre 4 et 20 mA. La **figure 1** présente la relation reliant le potentiel hydrique du substrat exprimé en kilo pascal (kPa) et la valeur électrique du tensiomètre en milliampère (mA).

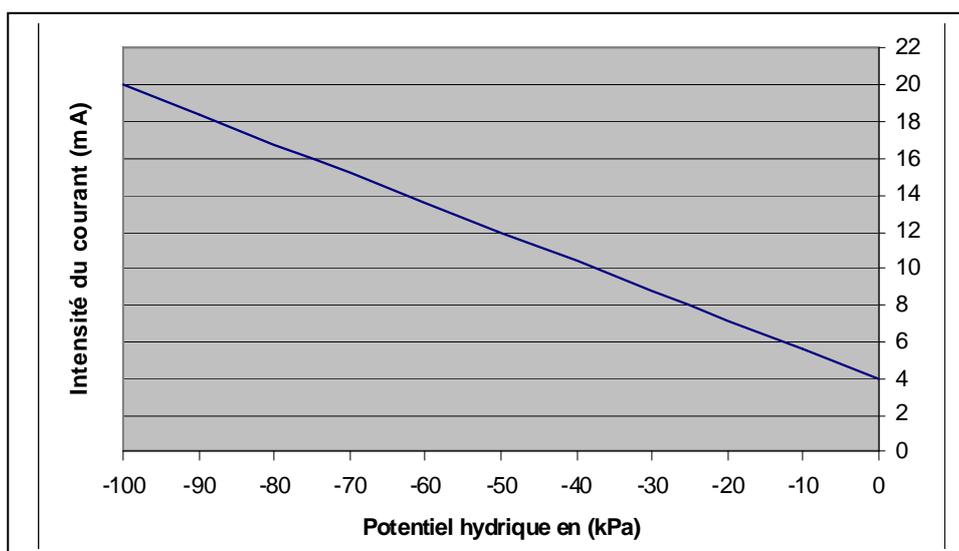


Figure 1 : réponse linéaire du signal électrique en fonction de la force, engendrée par le potentiel hydrique du substrat, qui s'exerce sur le capteur.
Fonction de la forme $Y = -0.16 * X + 4$.

Lorsque la bougie est placée dans le substrat, une continuité hydraulique s'instaure entre l'eau présente dans cette bougie et la solution du substrat. Lorsque le substrat se dessèche, sa déshydratation exerce un effet de succion qui se communique à l'eau, via la bougie poreuse présente dans la colonne. Cet effet de succion se répercute sur l'élément sensible du capteur ce qui modifie le signal électrique. C'est la mesure de ce signal qui permet de calculer le potentiel hydrique du substrat. Cette valeur est présentée sous forme négative car elle reflète la force de rétention du substrat vis à vis de l'eau.

À -1kPa la valeur du potentiel hydrique du substrat est au maximum de sa capacité de rétention en eau. Les agronomes définissent cet état, pour les conteneurs, par le terme de « capacité en bac ». C'est l'équivalent du terme « capacité au champ » utilisé pour les sols en place. Il s'agit de la valeur du potentiel hydrique mesuré, dans un substrat ressuyé, à une hauteur de 10 cm en partant de la base du conteneur.

Le seuil de déclenchement défini dans le protocole pour le témoin était de -8kPa, de -21kPa pour la modalité 1 et de -26kPa pour la modalité 2. À cela nous devons additionner la dépression exercée par la hauteur de la colonne d'eau située entre la bougie poreuse et le capteur. Cette valeur peut être considérée comme un offset. Elle est fixée théoriquement à -4kPa car on assimile la hauteur d'eau à la longueur de la canne, tube de 40 cm qui relie capteur et bougie poreuse. Néanmoins cette canne souple est souvent courbée lors de l'installation du tensiomètre ce qui peut modifier de quelques hectopascals (hPa) la valeur de cet offset.

Les seuils de déclenchement réellement appliqués doivent tenir compte de cet offset ils seront donc de -12kPa pour le témoin, de -25kPa pour la modalité 1 et de -30kPa pour la modalité 2. L'équation de droite de la **figure 1** permet de calculer la valeur des signaux exprimés en mA en fonction de ces potentiels hydriques, soit 5,92 mA pour le témoin, 8 mA pour la modalité 1 et de 8,80 mA pour la modalité 2.

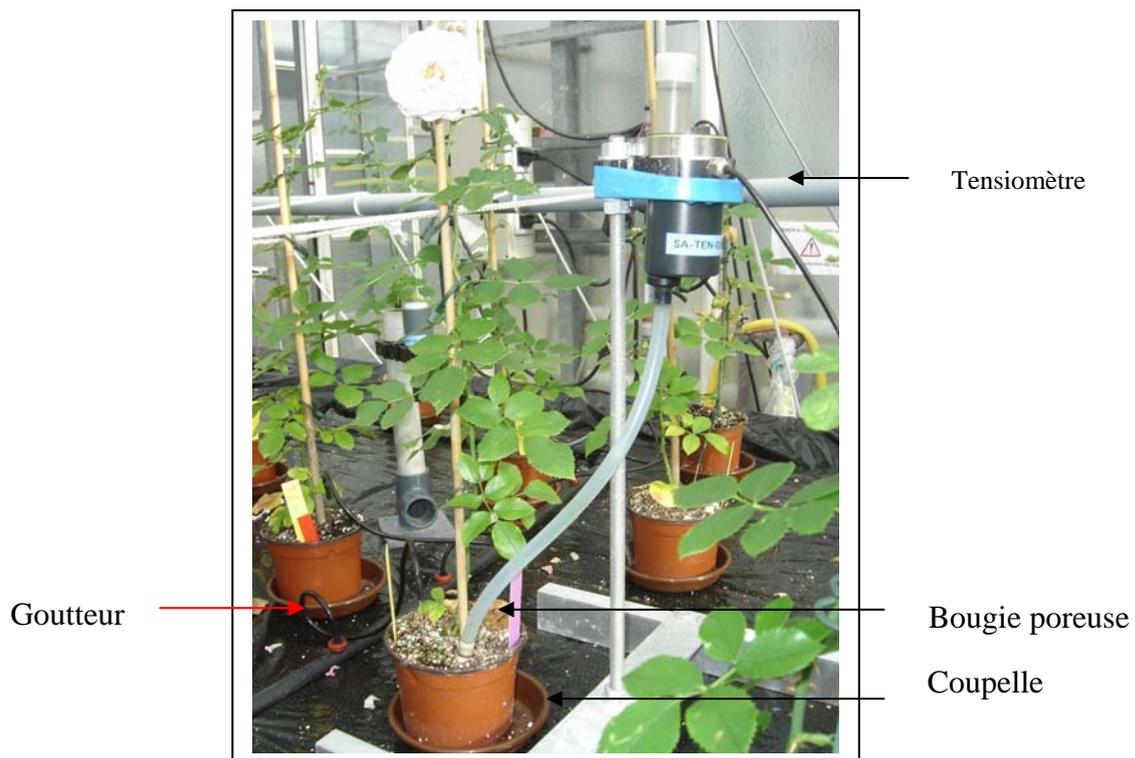


Figure 2 : présentation d'un pot équipé de son tensiomètre et de son goutteur

La **figure 2** présente un conteneur équipé d'un tensiomètre sur une tablette.

Nous pouvons distinguer :

- à gauche en arrière plan, de couleur marron, le goutteur enfilé sur le tube noir du réseau de distribution de solution ; ce goutteur est prolongé d'un tube qui apporte la solution jusqu'au substrat,
- à droite le tensiomètre prolongé du tube constituant la colonne d'eau. Au bout du tube en blanc le début de la bougie poreuse placée dans le substrat.

Les conteneurs sont placés sur des soucoupes afin d'éviter les pertes de percolât. En effet, le potentiel hydrique du substrat descend très bas avant l'irrigation, ce qui rend le substrat partiellement hydrophobe et ralentit sa ré-humidification. Les soucoupes stockent le volume de solution non retenu par le substrat mais qui néanmoins constitue une partie de la dose d'irrigation. Ce percolât sera absorbé après irrigation par remontée capillaire favorisant la ré-humidification du substrat.

Pour déclencher les irrigations, le signal issu des tensiomètres doit être traité à partir d'un algorithme de décision. Nous avons utilisé une centrale d'acquisition 21X (Campbell Scientific, Angleterre) dont le mode de fonctionnement permet d'allier acquisition de mesure et programmation d'algorithme.

2.3 La centrale de mesure

2.3.1 L'acquisition des mesures

La centrale fonctionne avec un programme qui nécessite la mise en œuvre de sous programmes ou fonctions. C'est l'agencement de ces fonctions, les unes par rapport aux autres, en une succession de phases qui constituent le programme. Les fonctions sont libellées sous forme d'une lettre « P » suivie d'un nombre. À chaque fonction sont associés des paramètres.

La **figure 3** présente l'organigramme du programme de base, le minimum nécessaire au fonctionnement de la centrale. Nous y avons associé le libellé des fonctions utilisées. Ce programme se décline en quatre phases.

Phase 1 : Le programme commence toujours par le paramétrage du pas de temps d'exécution et il s'exécute à la fréquence déterminée par ce pas de temps.

Phase 2 : Paramétrage et affectation des voies de mesure avec :

- soit la fonction P1 pour des mesures unipolaires ;
- soit la fonction P2 pour des mesures différentielles.

Dans certains cas, le nombre de capteurs mis en œuvre nécessite un nombre de voies plus grand que les huit voies présentes sur la centrale. L'utilisation d'un multiplexeur disposant de 32 voies s'impose et nécessite des fonctions particulières pour l'actionner. L'organigramme présenté sur la **figure 3** intègre les fonctions du multiplexeur.

Les centrales d'acquisition ne mesurent que des signaux de type tension. Pour utiliser des signaux de type intensité, il faut placer en série sur le circuit électrique une résistance de précision de 100 ohms et appliquer la loi d'Ohm :

$$\text{Tension (mV)} = \text{Intensité (mA)} \times \text{Résistance (ohms)}$$

La mesure s'effectue aux bornes de la résistance. Pour notre expérimentation, avec une résistance de 100 ohms, les paramètres à introduire dans la centrale pour les deux valeurs calculées ci-dessus sont donc de 880 mV (modalité 1) et 800 mV (modalité 2).

Phase 3 : Traitement et paramétrage du stockage des données.

Phase 4 : Définition du mode de communication pour décharger la centrale

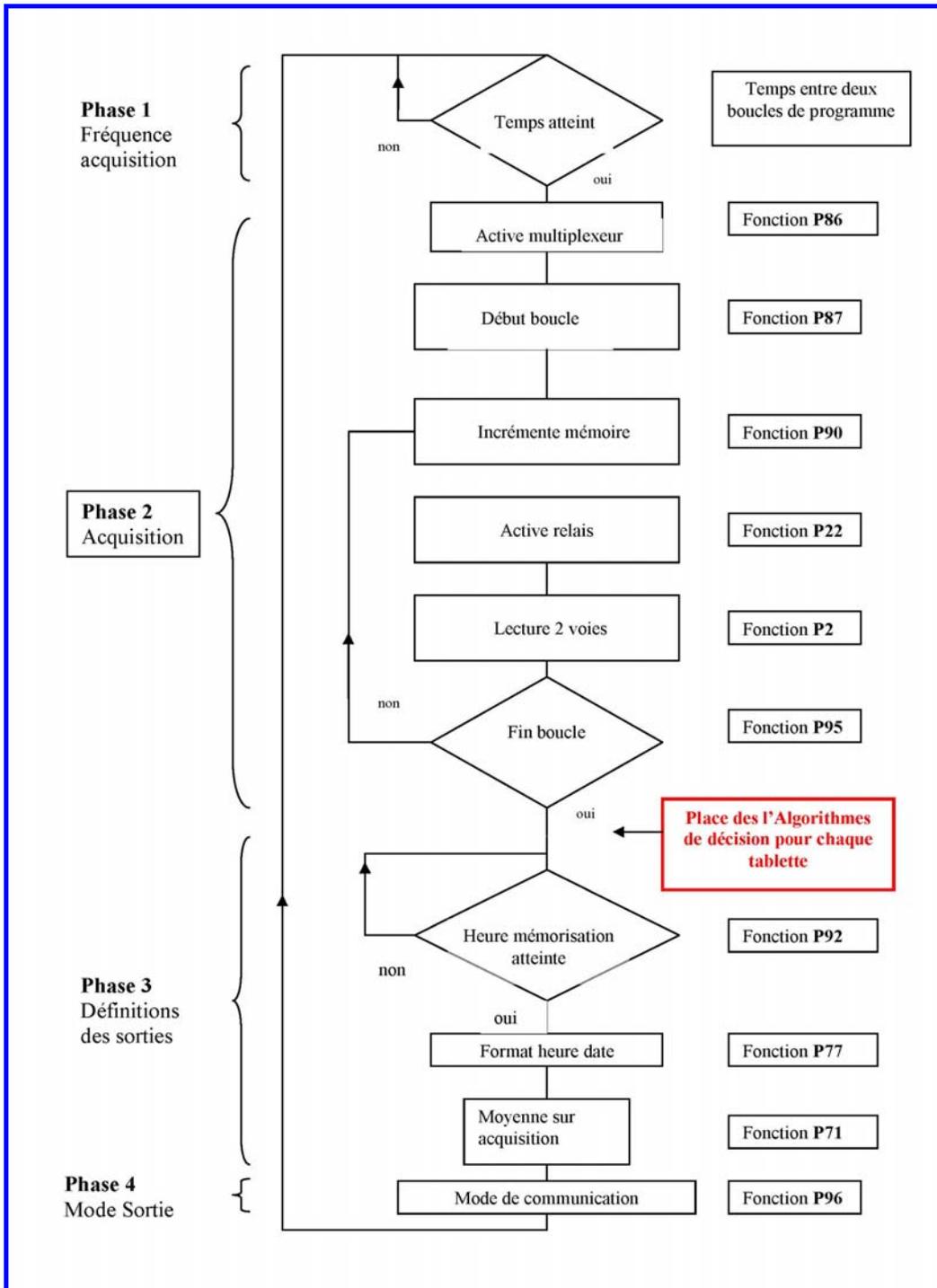


Figure 3 : *Algorithme de prise de mesure, de mise en mémoire et de transfert des données.*

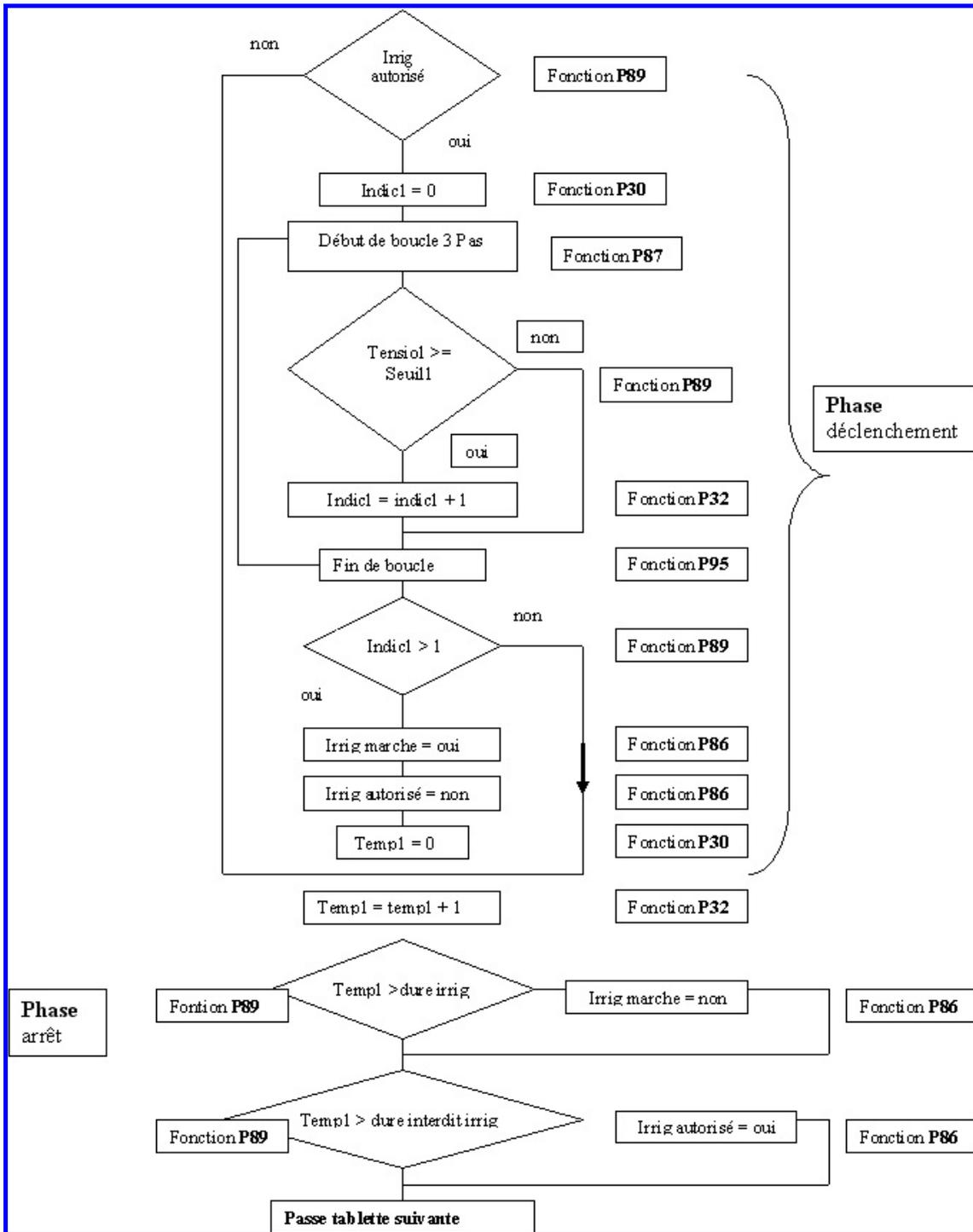


Figure 4 : Algorithme de traitement du signal des tensiomètres pour une tablette

2.3.2 Le pilotage par algorithme de décision

Grâce à l'éventail de fonctions supplémentaires existantes dans le panel de la centrale utilisée pour notre expérimentation, nous avons pu associer au programme de base un algorithme de décision nécessaire au pilotage de l'irrigation des tablettes.

Cet algorithme met en œuvre l'utilisation de trois tensiomètres pour chaque modalité expérimentale. Le choix d'utiliser trois tensiomètres se justifie en particulier pour palier au

dysfonctionnement éventuel de l'un d'entre eux. D'autres raisons sont à prendre en compte et nous les expliciterons lors de la présentation de l'évolution du potentiel hydrique du substrat. Il y a un algorithme par tablette. Ces algorithmes s'insèrent entre les phases 2 et 3 de la **figure 3** et se déclinent en deux parties, la phase de déclenchement de l'irrigation et la phase d'arrêt.

La phase de déclenchement

Toutes les dix secondes, ce qui correspond au pas de temps d'exécution programmé lors de la phase 1, pour chacun des trois tensiomètres présents sur la tablette, la centrale va comparer la valeur de consigne à la valeur mesurée lors de la phase 2 (acquisition **figure 3**). Si deux des trois tensiomètres ont atteint ou dépassé la valeur de consigne alors :

- elle active la pompe du bac associé à la tablette en plaçant au niveau haut le port de sortie ;
- elle interdit une nouvelle irrigation en plaçant le drapeau d'interdiction d'irriguer au niveau haut ;
- elle initialise le compteur de temps à zéro.

Cette phase est placée sous le contrôle d'un drapeau. Elle ne s'exécute que si ce drapeau, placé au niveau bas, l'y autorise. L'utilisation des drapeaux permet, suivant leur état logique haut ou bas, d'ignorer ou pas une ou plusieurs parties de programme. Dans notre cas, ce drapeau va permettre après une irrigation d'ignorer la phase de déclenchement durant un certain temps. Cela permet d'espacer deux irrigations pour tenir compte du temps de mise en équilibre du couple tensiomètre-substrat après une irrigation.

La phase d'arrêt

C'est la 2^{ème} partie de l'algorithme (**figure 4**), elle fait suite à la phase de déclenchement et elle débute par l'incrémentation d'un compteur temps qui est ensuite comparé à deux consignes :

- à la durée d'irrigation, ce qui permettra d'arrêter la pompe en plaçant le port au niveau bas ;
- à la durée d'interdiction ce qui permettra d'autoriser à nouveau les irrigations en plaçant le drapeau au niveau bas.

Lors du choix de ces durées d'irrigation et d'interdiction d'irriguer, nous devons tenir compte du pas de temps d'exécution du programme phase 1 (**figure 3**), dans notre cas 10 secondes. En effet le compteur est incrémenté à la fréquence de ce pas de temps. Si la durée d'irrigation est de 60 secondes le paramètre à transcrire sur la centrale sera 6.

Les résultats obtenus.

Chaque figure (5, 6 et 7) présente, pour une tablette et pendant 21 jours, l'évolution du potentiel hydrique du substrat mesuré par les trois tensiomètres qui pilotent l'irrigation. Les mesures sont mémorisées avec un pas de temps de 30 minutes. Pour chaque figure la ligne bleue indique la valeur du seuil de déclenchement de l'irrigation appliqué à la tablette.

La **figure 5** présente la modalité témoin avec un déclenchement de l'irrigation à -12kPa. Cette irrigation est effectuée en mode sub-irrigation. Elle est d'une durée de 15 minutes et elle doit permettre au potentiel hydrique du substrat de revenir à son niveau le plus haut, c'est à dire au maximum de sa capacité de rétention.

En tenant compte de la colonne d'eau, la valeur maximale doit être de -4kPa.

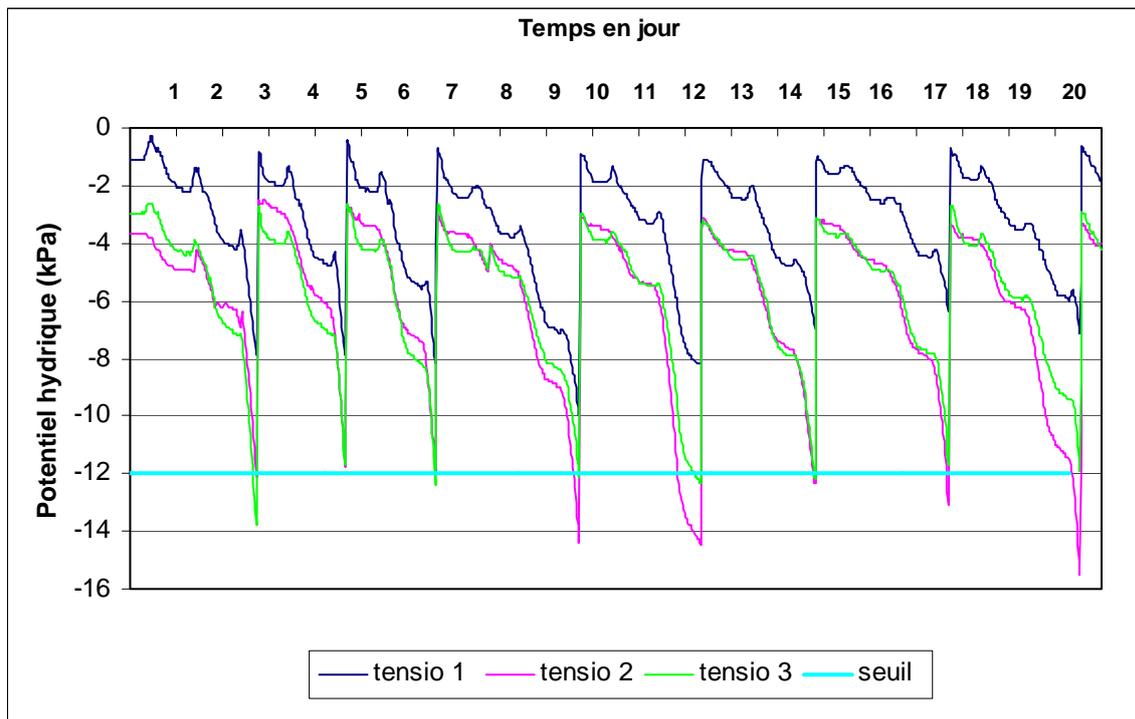


Figure 5 : évolution du potentiel hydrique pendant 21 jours sur la tablette témoin.
La ligne bleue indique le seuil de déclenchement pour cette modalité

La **figure 5** nous montre que d'une part la valeur du potentiel hydrique remonte bien au dessus du maximum théorique de -4kPa et, que d'autre part il n'est pas le même pour les trois tensiomètres. Cela provient de l'étalonnage des tensiomètres qui présentent un offset différent de la valeur théorique de 4mA pour 0kPa. Les tensiomètres utilisés n'ont pas de fonction d'ajustage donc aucune possibilité de régler ces offsets à l'identique.

Le dispositif a donc fonctionné avec des valeurs différentes de potentiel hydrique à capacité de rétention avec une valeur de :

- - 1,1 pour le tensio 1,
- - 3,7 pour le tensio 2,
- - 3 pour le tensio 3.

Nous voyons bien que dans la modalité témoin après irrigation le potentiel hydrique revient bien à capacité de rétention et qu'il fluctue dans une amplitude entre le niveau haut et bas du potentiel hydrique égale à des valeurs de :

- 8,9 kPa pour le tensio 1,
- 10,3 kPa pour le tensio 2,
- 9 kPa pour le tensio 3.

Il existe donc une dérive de 1 à 2 kPa suivant les tensiomètres par rapport à l'amplitude théorique qui est de 8kPa. Dans notre cas, cet écart n'a pas entraîné de biais dans l'expérimentation.

Néanmoins pour être plus rigoureux et tenir compte des offsets de chaque tensiomètre, il sera possible à l'avenir, dans l'étape 2 de la **figure 4**, d'utiliser une variable indicée comme valeur seuil de déclenchement. Cette étape qui compare la valeur du tensiomètre à son seuil de

déclenchement est une boucle de trois itérations. Il est donc possible de comparer la valeur du tensiomètre qui est déjà indexée à la variable seuil portant le même indice. Ceci permettra d'avoir une valeur de déclenchement spécifique à chaque tensiomètre et tenant compte des offsets de chacun de ces tensiomètres.

La **figure 6** présente l'évolution du potentiel hydrique pendant 21 jours pour la modalité dont le seuil de déclenchement est de -25 kPa. Nous voyons très nettement que la dose d'eau apportée, 40 ml, ne permet pas au substrat de revenir à sa capacité maximale de rétention comme pour la modalité témoin. Pour cet état d'hydratation les valeurs diffèrent d'un tensiomètre à l'autre et d'un jour à l'autre mais se situent toutes au dessous de -6,5kPa.

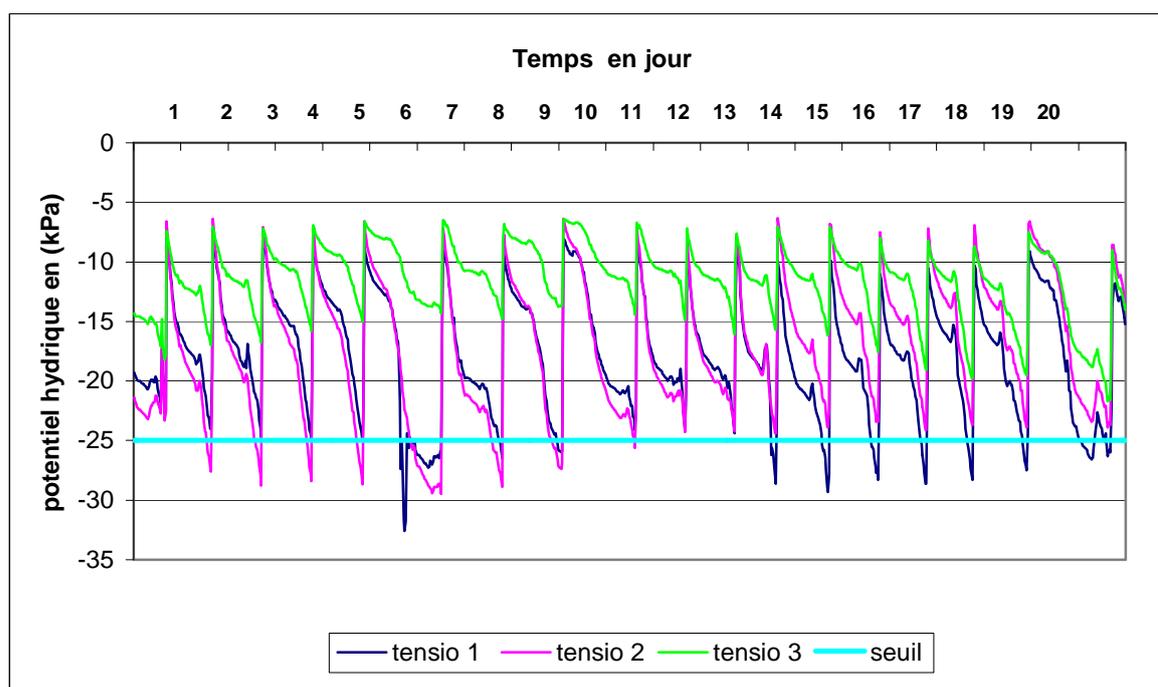


Figure 6 : évolution du potentiel hydrique pendant 21 jours sur la tablette qui a pour seuil de déclenchement -25kPa. La ligne bleue visualise ce seuil.

Les valeurs les plus basses mesurées diffèrent d'un tensiomètre à l'autre ; cette différence est très accentuée pour le tensio3. L'explication peut venir de la plante associée au tensiomètre. En effet bien que les plantes choisies comme indicatrices présentent un aspect homogène, elles peuvent être de vigueur différente, et donc absorber des volumes d'eau différents. Cela se traduit par des vitesses de déshydratation du substrat plus ou moins grandes entraînant des réponses différentes des tensiomètres. Néanmoins, à partir du 14^{ème} jour, nous remarquons une augmentation de l'amplitude du potentiel hydrique, imputable en grande partie à la croissance de la plante.

La **figure 7** présente l'évolution du potentiel hydrique pendant 21 jours pour la modalité dont le seuil de déclenchement est de -30 kPa et, nous y voyons très nettement qu'à partir du 13^{ème} jour le tensiomètre 3 n'est plus sensible aux irrigations effectuées sur la tablette. Dans la pratique le goutteur est placé à mi distance entre la plante et le bord du pot. L'eau issue du goutteur crée dans le substrat un bulbe d'humidification dans lequel est placée la

bougie du tensiomètre. La bougie est donc située dans une zone qui devrait être identique pour toutes les plantes. Mais les bulbes d'humidification ne développent pas toujours des formes symétriques créant ainsi une hétérogénéité hydrique du substrat difficilement décelable et prévisible. C'est le cas de tensio3 où la bougie poreuse se trouve hors du bulbe d'humidification à partir du 13^{ème} jour.

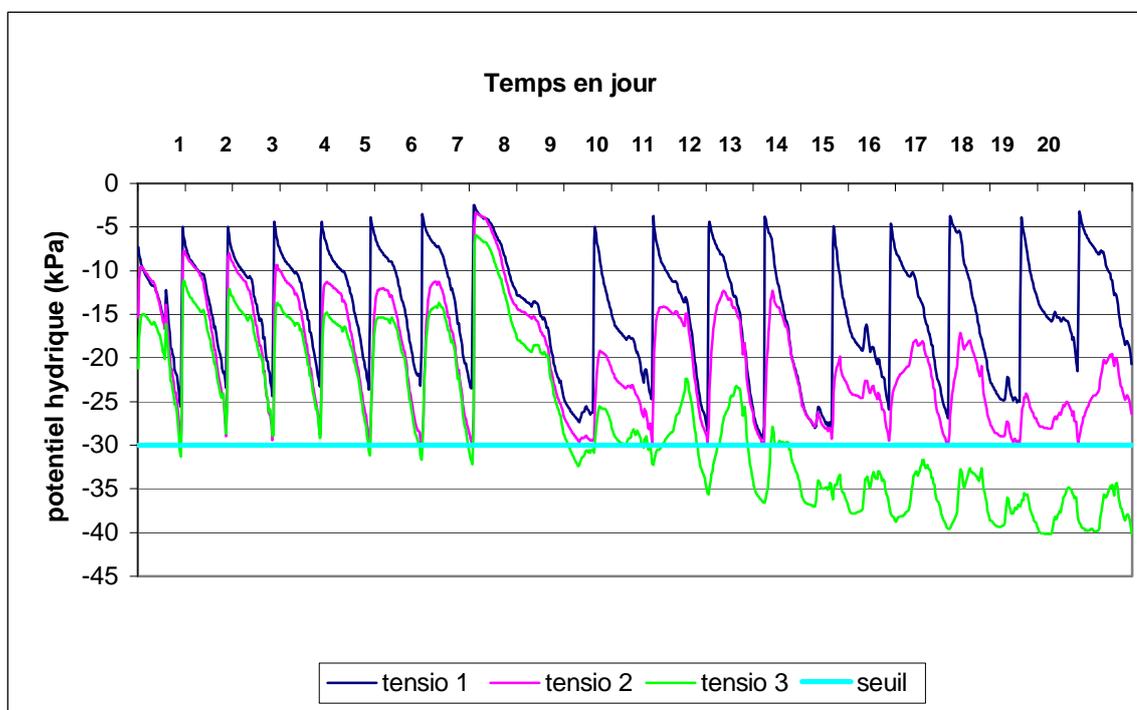


Figure 7 : évolution du potentiel hydrique pendant 21 jours sur la tablette qui a pour seuil de déclenchement -30kPa . La ligne bleue visualise ce seuil.

Le choix des plantes dont la vigueur ne peut être parfaitement identique ainsi que le développement du bulbe d'humidification du substrat qui n'est pas toujours homogène sont les deux raisons principales qui, avec les aspects déjà évoqués plus haut sur la fiabilité limitée de certains tensiomètres, expliquent la pertinence de l'utilisation, non pas d'un seul, mais de trois tensiomètres par modalité. Le déclenchement de l'irrigation intervient lorsque deux de ces trois tensiomètres ont atteint la valeur seuil de déclenchement.

Conclusion

Grâce à l'utilisation des tensiomètres et de la centrale d'acquisition 21X (Campbell) comme outil de pilotage nous avons conduit une expérimentation en appliquant des restrictions hydriques contrôlées et nous avons amélioré nos connaissances sur le comportement des plantes face à des stress hydriques (Rivière L.M *et al.*, 1995).

Par ailleurs, avec la conduite de culture sous stress hydrique contrôlé nous vérifions si l'influence d'un stress hydrique sur un plant de rosier modifie son architecture. Nous agissons ainsi sur une des composantes de la qualité esthétique de cette plante en évitant l'utilisation d'hormone nanifiant. En effet le stress hydrique peut aussi engendrer des formes compactes dans la recherche d'obtention de plantes horticoles (Morel P., 2001).

Cette approche qui soumet les plantes à des restrictions hydriques continues sans compromettre les rendements rationalise les apports d'eau dans la culture (FLOW-AID).

Il est certain que sans l'utilisation d'un système automatisé pour piloter les irrigations, ce type de conduite de culture serait voué à l'échec car son suivi nécessite des interventions trop fréquentes et trop pointues. Néanmoins la mise en œuvre, assez délicate des tensiomètres impose une surveillance accrue de l'expérimentation. Le choix de trois tensiomètres s'est avéré judicieux car il a permis de surmonter les problèmes liés aux difficultés d'utilisation et de fiabilité.

Enfin, le décalage d'offset entre les tensiomètres pourra à l'avenir être pris en compte. Il suffira pour cela de modifier le programme de pilotage en utilisant, pour consignes de déclenchement, des variables qu'il sera facile d'indexer aux valeurs mesurées avec chaque tensiomètre.

Bibliographie

- FLOW-AID FlowerTECH (2009) vol.12/N°3 (Farm Level Optimal Water management, Assistant for Irrigation under Deficit, European Project: 036958)
- Morel P. (2001) Growth control of *Hydrangea macrophylla* through water restriction. *Acta Horticulturae*. 548: 51-58.
- Rivière L.M., Sintès G., Barthelmes S. (1995) Pilotage de l'irrigation des cultures en conteneurs sur substrats organiques. *Études et Gestion des Sols*, 2,2 :135-144.