



**DÉPARTEMENT D'AGRONOMIE**

*Mémoire de fin d'études*

**en vue de l'obtention du diplôme de**

Master en AGRONOMIE

**Spécialité**

**Gestion Durable de l'Environnement**

**Thème**

**Gestion de l'irrigation par tensiométrie  
(cas du tensiomètre WaterMark)**

**Présenté par**

**BENALLAL Samira**

Devant le Jury

NEMMICHE Saïd	MCA	Président	Université de Mostaganem
HARTANI Ahmed	MAA	Examineur	Université de Mostaganem
BENKHELIFA Mohammed	Pr	Encadreur	Université de Mostaganem
KRADIA Laid	CR	Co-encadreur	INSID, El Matmar, Relizane

**Thème réalisé au laboratoire régional ouest des analyses des sols et de l'eau (INSID)**

**Année universitaire : 2016-2017**

# Dédicaces

**Je** dédie ce modeste travail à,

ma mère, mon père,

mes sœurs et mes frères et

chaque membre de ma famille ainsi que

mes amis proches.

Ce travail est également dédié à mes collègues d'études et toute la promotion Gestion Durable de l'Environnement.

*B. Samira*

# Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes vifs remerciements :

A **DIEU** le Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces années d'étude.

A Monsieur **BENKHELIFA Mohammed**, Professeur au Département d'agronomie, pour avoir accepté de me guider dans mon travail et de m'avoir accordé son attention, sa confiance, sa patience, ses conseils et surtout pour sa gentillesse. Qu'il accepte mes sincères remerciements et l'expression de mon profond respect.

A Monsieur **KRADIALaïd**, Chargé de recherche à l'INSID d'El Matmore, pour avoir accepté de me guider sur le terrain, pour sa grande patience, ses encouragements, ses orientations et ses conseils précieux.

A Monsieur **NEMICHE Saïd**, Maître de Conférence au Département d'agronomie, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

A Monsieur **HARTANI Ahmed**, Maître de Conférence au Département d'agronomie, pour avoir bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury de soutenance.

Je remercie aussi tous les ingénieurs et les employés du laboratoire d'analyse de sols (INSID) EL Matmar, Relizane, j'exprime le respect et la gratitude.

Je remercie tous les enseignants de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de Mostaganem, particulièrement ceux du département des Sciences Agronomiques pour la qualité des enseignements reçus et les innombrables soutiens durant tout le cursus universitaire.

Enfin, mes sincères remerciements à tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# ملخص

لري مفيد للإنتاج الزراعي، ولكنه يتطلب في الإدارة الجيدة العودة من تطبيق كميات المياه اللازمة في الوقت المناسب . هذا يساعد على منع المياه الزائدة من جهة، والإجهاد المائي ملزمة لمحاصيل أخرى .واحدة من الحلول التقنية التي تحسن إدارة الري tensiométrie الذي يقوم على القيم matric عتبة المحتملة التربة لتحريك ووقف الري .ومع ذلك يجب أن تحل المسائل التقنية لتنفيذ بكفاءة مقاييس ضغط الدم (موقف وعمق القياس). ومن هذا المنظور الذي هو منصوص عليه الحال لدينا، والتي وقعت في التحليل المختبري لل I.N.S.I.D التربة، والمطر وغليزان .لقد سمح لنا لمراقبة تطور الوضع المائي للتربة المزروعة من قبل Tensiometric وقياس الثقل النوعي.

وسوف يتم تحليل باستخدام تطور سيران تدفق الماء في التربة، التي تساعد على ضمان الاتساق الأحمال من التغييرات، وهو أمر مهم جدا للتحقق من صحة البيانات .ومع ذلك، فمن الممكن أن نفترض أن التنمية الجذرية وربما أقل أهمية من عمق (45 سم) ما يدفع التقيب أقل نشاطا من الطبقات العميقة، لأن التهم لا تزال منخفضة في هذا العمق

من حيث إدارة الري للرقابة السليمة، يبدو أن الطبقة السطحية هي المكان المناسب للموقع المسؤول عن وقف رصد الري .ونتيجة لذلك، تم تصميم الطبقة السفلى حيث يطور نظام الجذر لرصد مسؤولة عن وقف الري.

**كلمات البحث:** ضغط الدم، والري، وندرة المياه، وإدارة المياه

# Résumé

L'irrigation est fort utile pour la production agricole, mais elle exige en contrepartie une bonne gestion en appliquant les quantités d'eau nécessaires au bon moment. Ce qui permet d'éviter les excès d'eau, d'une part, et les stress hydriques contraignants pour les cultures, d'autre part. L'une des solutions technologiques qui permet d'optimiser le pilotage de l'irrigation est la tensiométrie qui se base sur des valeurs seuils du potentiel matriciel du sol pour le déclenchement et l'arrêt de l'arrosage. Néanmoins des questions techniques doivent être résolues pour appliquer de manière efficiente les tensiomètres (la position et la profondeur de mesure).

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre stage, qui s'est déroulé au niveau du laboratoire d'analyses de sol I.N.S.I.D, El Matmar, Relizane. Il nous a permis de faire un suivi de l'évolution de l'état hydrique d'un sol cultivé par des mesures tensiométriques et gravimétriques

Une analyse sera faite en utilisant l'évolution du plan de flux nul dans des paragraphes, cela permet de s'assurer une cohérence des évolutions des charges, ce qui est très important pour valider les données. Il est cependant possible d'émettre l'hypothèse que le développement racinaire est probablement moins important à partir de la profondeur (45 cm) ce qui a induit une exploration moins active des couches profondes, puisque les charges restent faibles à cette profondeur

En termes de gestion de l'irrigation, pour un pilotage adéquat, il semble que la couche superficielle est le lieu adapté à l'emplacement du tensiomètre responsable de l'arrêt de l'irrigation. En conséquence, la couche inférieure où se développe le système racinaire est le adapté au tensiomètre responsable de l'arrêt de l'irrigation.

**Mots clé :** Tensiomètre, irrigation, stress hydrique, gestion de l'eau

# Abstract

Irrigation is very useful for agricultural production, but it requires good management by applying the necessary quantities of water at the right time. This makes it possible to avoid excess water, on the one hand, and constraining water stresses for crops, on the other hand. One of the technological solutions that optimizes the control of irrigation is tensiometry, which is based on threshold values of the matrix potential of the soil for triggering and stopping watering. Nevertheless, technical questions must be solved in order to efficiently apply the tensiometers (position and depth of measurement).

It is in this perspective that our course, which took place at the level of the analysis laboratory of soil I.N.S.I.D, El Matmar, Relizane. It allowed us to monitor the evolution of the hydric state of a soil cultivated by tensiometric and gravimetric measurements

An analysis will be made using the evolution of the zero flow plan in paragraphs, this makes it possible to ensure a consistency of the load changes, which is very important to validate the data. It is possible, however, to hypothesize that the root development is probably less important from the depth (45 cm) than has been induced by a less active exploration of the deep layers, since the loads remain low at this depth

In terms of irrigation management, for proper steering, it seems that the surface layer is the place adapted to the location of the Tensiometer responsible for stopping irrigation. Consequently, the lower layer where the root system develops is adapted to the tensiometer responsible for stopping the irrigation.

**Key words:** Tensiometer, irrigation, hydric stress, water management

# Sommaire

<b>Dédicaces</b> .....	<b>2</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>3</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>7</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>10</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>11</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>12</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>13</b>
<b>CHAPITRE I -Pilotage de l'irrigation</b> .....	<b>15</b>
I.1. Généralité .....	16
I.2.- objectifs de pilotage des irrigations .....	16
I.3.- Les indicateurs d'état hydrique .....	17
I.3.1.- Les indicateurs liés à la plante .....	17
I.3.2.- Les indicateurs d'état hydrique liés au sol .....	18
I.3.2.1-L'humidité du sol .....	18
I.3.2.2-Sonde à neutrons .....	18
I.3.2.3-La Tensiométrie .....	19
I.3.3.- Les indicateurs basés sur le bilan hydrique .....	19
I.4 Méthodes de pilotage de l'irrigation .....	20
I.4.1.Bilan hydrique .....	20
I.4.1.1- Définition du bilan hydrique .....	20
I.4.2-Pilotage par Tensiométrie : .....	22

I.4.2.1-Généralité :	22
I.4.2.2-Définition de la Tensiométrie :	22
I.4.2.3-Description de la Tensiométrie	23
I.4.2.4-Fonctionnement	24
I.4.2.5-L'intérêt de la Tensiométrie	25
I.4.2.6-les avantages et les inconvénients de la Tensiométrie	27
I.4.2.6.1-les avantages	27
I.4.2.6.2-les inconvénients :	27
I.4.2.6.3-Précaution	27
I.4.2.7-Problèmes souvent rencontrés avec les Tensiomètres	28
I.4.2.8-Préparation et installation du Tensiométrie	28
1.4.2.8.1-Préparation du Tensiométrie	28
I.4.2.8.2-l'endroit propice à l'installation des tensiomètres	29
I.4.2.8.3-L'installation du tensiomètre	29
I.4.2.8.4-L'installation au champ	29
I.5. Présentation de la culture(Le Switchgrass)	30
I.5.1 Généralités	30
I.5.2.Avantages principal	31
I.5.3.Adaptation au milieu	32
I.5.4.Eléments de conduite de la culture	32
I.5.4.2.Fertilisation	32
I.5.4.3.Récolte	32
I.5.5 Intérêt agronomique et écologique	33
<b>Chapitre II- Matériels et méthodes</b>	<b>34</b>
II.1. Présentation du site d'étude	35
II. 2.Caractéristiques physiques	36



II.2.1. Climat.....	36
II.2.2. La culture.....	36
II.2.3. Dispositif expérimental.....	37
II.3. Suivi des bilans hydriques.....	38
II.3.1. Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres.....	38
II.3.1.1. Mise en place du tensiomètre.....	39
II.3.1.2. Fonctionnement des sondes Watermark.....	39
II.3.2. Mesures complémentaires.....	41
II.3.2.1 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique.....	41
II.3.2.2 Mesure des densités.....	41
II.3.2.3 Mesure de l'humidité en fonction du pF.....	42
II.3.2.4 Analyse granulométrique.....	43
II.3.2.5 Suivi des apports d'eau.....	43
II.3.2.6 Mesure de pH et de la salinité du sol.....	44
<b>Chapitre III Résultats et discussions.....</b>	<b>45</b>
III.3.2 Humidités caractéristiques.....	46
III.3.3 Densité apparente du sol.....	47
III.3.4 Densité réelle du sol.....	47
III.3.5 Porosité totale du sol.....	48
III.3.6Humidité pondérale.....	49
III.4 Suivi des bilans et des flux d'eau.....	49
III.4.1Evolution des charges (ou tensions) sur le site d'étude.....	49
III.4.2 Evolution du plan de flux nul.....	54
<b>Conclusion.....</b>	<b>55</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>57</b>

# Liste des abréviations

**B.H** : Bilan hydrique.

**E.T.M** : Evapotranspiration maximale.

**E.T.P** : Evapotranspiration potentielle.

**E.T.R** : Evapotranspiration réelle.

**E.T**: Evapotranspiration.

**I.N.R.A.A** : l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie.

**Kc** : coefficient cultural.

**Ta** : la température de l'air ambiant.

**Ts**: la température de surface du couvert végétal.

**INSID** :institut national du sol et d'irrigation et de drainage

**H** : humidité pondérale

**Cb** : centibars

**ETP** : évapotranspiration potentielle

**pF** : potentiel de force

**Da** : densité apparente

**Dr** : densité réelle

**RFU** : Réserve facilement utilisable

**HCC** : humidité à la capacité au champ

**HpF** : humidité au point de flétrissement

**RU** :réserve utile

**Θ** :humidité volumique

**Θs** :humidité volumique à saturation

**Hr** :humidité résiduelle

**PFN** :plan de flux nul

**Rc** :remontées capillaires

**P** :pluie

**I** : irrigation

**Fig** : figure

# Liste des figures

Figure 1 - schéma de deux cas de calcul du bilan hydrique sous culture. ....	20
Figure 2 - Schéma d'une Tensiométrie .....	23
Figure 3 : Batterie de tensiomètres connectés à un manomètre à mercure .....	24
Figure 3 – Vue sur une parcelle cultivée en switchgrass .....	31
Figure 4 - Distribution granulométrique du site à différentes profondeurs .....	35
Figure 5 – Switchgrass ( <i>Panicum virgatum</i> ). ....	37
Figure 6-boîte de WaterMark du tensiomètre. ....	40
Figure 7-prélèvement des échantillons avec la terrière .....	42
Figure 8-Analyse granulométrique sur pipette de Robinson .....	43
Figure 9 - Évolution des tensions relevées durant le mois de janvier 2017 au niveau du site expérimental .....	50
Figure 11 - Évolution des tensions relevées durant le mois de Mars 2017 au niveau du site expérimental .....	52
Figure 12- Évolution des tensions relevées durant le mois d'avril 2017 au niveau du site expérimental .....	52
Figure 13 - Évolution des tensions relevées (en valeurs logarithmiques) au cours du cycle de la culture en fonction de la profondeur de sol considérée.....	53
Figure 14 - Profils de charge (ou tension) durant le mois de mai 2017 .....	54

# Liste des tableaux

Tableau 1 - Stratégie de pilotage par tensiométrie (TRON et <i>al.</i> 2000) .....	17
Tableau 2 - Pluviométrie et évapotranspiration potentielle (moyenne sur 25ans) .....	36
Tableau 3 -Mesures complémentaires .....	48
Tableau 4- Evolution de l'humidité pondirale et les charges avant et après irrigation .	49

# INTRODUCTION

Pour qu'une régie d'irrigation soit optimale, les apports en eau doivent être effectués au moment opportun et tenir compte à la fois des besoins de la plante, des caractéristiques des sols et des conditions météorologiques. Peu de producteurs utilisent des instruments de mesure pour déterminer à quel moment déclencher l'irrigation. Ces derniers basent généralement leur décision sur l'aspect visuel de la culture et sur le toucher du sol, ce qui conduit souvent à une gestion inadaptée de l'eau.

La nécessité d'une gestion plus performante et les exigences de durabilité impliquent une gestion optimisée des systèmes irrigués. Leur fonctionnement et leur gestion ne sauraient être efficaces et durables sans une prise en compte des modalités d'occupation et de gestion de l'espace à l'échelle locale.

Cette gestion réclame de nouveaux outils et la mise en œuvre de compétences dont ne disposent pas actuellement les gestionnaires. Il apparaît alors que l'amélioration de la gestion des aménagements hydro-agricoles passe par la mise au point avec les acteurs, des outils nécessaires d'aide à la gestion.

Pour assurer une bonne régie de l'eau, il est d'abord indispensable de connaître les besoins de la culture et la variation de ceux-ci en fonction du stade de développement. Aussi, il est impératif de mesurer régulièrement la teneur en eau du sol. Cette information permettra de préciser le moment propice à l'irrigation et surtout si les quantités appliquées sont insuffisantes ou en excès par rapport au type de sol et au besoin de la culture.

Par ailleurs, il existe plusieurs méthodes et outils permettant de mesurer la teneur en eau du sol. Chaque année, de nouveaux outils viennent s'ajouter, et le choix s'avère de plus en plus difficile. Le tensiomètre constitue un excellent investissement et présente encore actuellement l'un des meilleurs rapports qualité/prix. Les agriculteurs, de par le monde, ayant opté pour cet type d'équipement depuis quelques années déclarent en majorité très satisfaits des résultats obtenus. Il s'agit de bien comprendre l'appareil, d'interpréter adéquatement les données et d'accepter ses inconvénients de maintenance. Il existe quelques types de tensiomètres, mais nous nous limiterons dans le

présent document à discuter du modèle le plus répandu, soit le « Water Mark ». Il est à noter que les principes d'utilisation sont sensiblement les mêmes pour la plupart des modèles.

Le tensiomètre est utilisé pour piloter l'irrigation, son utilisation est simple et les mesures relevées sont précises ce qui permet de mieux ajuster les apports d'eau sur une culture.

Le tensiomètre facilite grandement les décisions de déclenchement de l'irrigation : par exemple la 1<sup>ère</sup> irrigation d'un cycle de culture, ou le redémarrage de l'irrigation après une pluie et pour déclencher ou non une dernière irrigation avant récolte.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre stage dans le cadre de la préparation de mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master « Gestion Durable de l'Environnement ». Il a été effectué au laboratoire d'analyses des sols de l'INSID, El Matmar, Relizane.

Dans le cadre de ce stage, nous nous sommes intéressés au suivi de l'état hydrique d'un sol cultivé par des mesures tensiométriques pour assurer un bon suivi de l'irrigation. L'essai est conduit sur une parcelle de 1,5 m<sup>2</sup>, où est plantée une culture pérenne (*Panicum virgatum* : Switchgrass) installée depuis 2010 et dans laquelle sont installés des tensiomètres à différentes profondeurs (15, 30, 45 et 60 cm). Le sol de ce site n'a jamais été travaillé.

# **CHAPITRE I -Pilotage de l'irrigation**

## I.1. Généralité

La connaissance des besoins en eau de la plante aux différents stades végétatifs et de la situation des réserves en eau du sol détermine le pilotage de l'irrigation.

Dans un contexte caractérisé par une culture, un sol, un mode d'irrigation, un climat, le pilotage des irrigations se définit comme le raisonnement permettant de répondre à la triple question du quand-combien-comment irriguer, le choix du couple 'dose-fréquence' répond au quand-combien' la manière de réaliser les apports avec un matériel déterminé constituant le mode d'irrigation répond au 'comment'. (FILALI, 2003).

Les réponses à ces trois questions simples nécessitent la combinaison de multiples acteurs qui, selon leurs propriétés et les objectifs fixés (coût, confort, précision), donnent lieu à des solutions différentes (**CHOL, et TRON, 1999, cité par FELALI**).

Le pilotage de l'irrigation peut se concevoir de différentes façons à partir de source d'informations variées dont beaucoup peuvent être complémentaires. Le choix des moyens et des méthodes à retenir est donc en fonction des objectifs retenus.

Pour maîtriser l'irrigation, il faut concilier des considérations techniques liées aux besoins en eau des cultures, aux réserves en eau du sol, aux équipements d'irrigation et des considérations économiques liées à la rentabilité des moyens à mettre en œuvre. (**ISBERIE et al., 1992**).

## I.2.- objectifs de pilotage des irrigations

Selon **MOUHOUCHE, et ISSOLAH, (1993), cité par Belouz, 2007**), le pilotage des irrigations est un système d'aide technique aux irrigants qui a pour objet l'utilisation optimale de l'eau d'irrigation et par conséquent sa meilleure valorisation.

D'après **AIT, (1993)**, l'objet principal d'un outil de pilotage d'irrigation est de permettre à l'agriculture d'apporter la dose adéquate d'eau au moment opportun pour les différentes cultures irriguées et de sauvegarder ainsi la production agricole et optimiser le rendement des cultures et leur évitant le stress hydrique.



**Tableau 1 - Stratégie de pilotage par tensiométrie (TRON et al. 2000)**

Tension cb	Tension hp	interprétation	Action à entreprendre
0	0	Eau totalement libre, sol saturé, humidité excessive	Arrêt de l'irrigation
Pf=2,5 0,07-0,1 7- 10	Disponibilité en l'eau correspond au maximum de la teneur en eau ( hcc)		Arrêt de l'irrigation
+10 Pf = 3	+ 100	Disponibilité en eau très variable	Déclenchement des irrigations selon la nature du sol
+30	+300	Point de Flétrissement temporaire	Déclenchement des irrigations
100	1000	Point de Fletrissement Permanent	Conséquences négatives sur les rendements

### I.3.- Les indicateurs d'état hydrique

Optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation est de plus en plus nécessaire.

Les indicateurs de l'état hydrique du sol ou du couvert végétal peuvent contribuer à la gestion de l'eau, en permettant de rationaliser les apports (**RUELLE, et al., 1993**).

#### I.3.1.- Les indicateurs liés à la plante

Le pilotage visuel pratiqué par certains irrigants à partir des symptômes de stress constatés sur la culture, présente de graves inconvénients d'apporter un remède à un mal déjà fait(**DECROIX, et al. 1990**). Ce sont les indicateurs basés sur des mesures faites sur la plante elle-même, c'est donc, les indicateurs qui rendent mieux compte de l'état hydrique

d'une plante. La teneur en eau des tissus d'une plante peut être considérée a priori comme un bon indicateur de l'état hydrique d'une plante. Les principales grandeurs utilisées sont les suivantes :

Le contenu en eau (AWC) ou l'humidité pondérale et la teneur relative en eau ou humidité spécifique (HS) :

$$AW = \frac{MF - MS}{MS}$$

$$\text{Avec : } HS = \frac{MF - MS}{MF}$$

**MF**: masse de la matière fraîche

**MS** : masse de la matière sèche

### **I.3.2.- Les indicateurs d'état hydrique liés au sol**

L'état hydrique du sol permet d'avoir des informations instantanées grâce à divers appareils de mesure, permettant ainsi l'aide à la décision dans le pilotage des irrigations (**CHOL, et al., 2000**).

#### **I.3.2.1-L'humidité du sol**

L'humidité du sol peut être mesurée par gravimétrie : c'est le rapport de la différence du poids frais moins le poids sec, sur le poids sec d'un échantillon de sol desséché dans une étuve à 105°C pendant 24 heures.

#### **I.3.2.2-Sonde à neutrons**

Elle peut être, aussi mesurée par la sonde à neutrons dont le principe repose sur l'émission de neutrons par une source radioactive qui, une fois réceptionnés par les molécules d'eau, informe de la quantité de celle-ci contenue à la profondeur considérée, qui est fonction du rapport neutrons reçu sur neutrons émis.

### **I.3.2.3-La Tensiométrie**

La tensiométrie est le deuxième indicateur d'état hydrique lié au sol. À toute humidité donnée correspond un potentiel de l'eau dans le sol qui peut être mesuré à différentes profondeurs, à l'aide d'un tensiomètre (**MONNEVEUX, et THIS, 1997, cité par Belouz, 2007**).

Cette méthode consiste à suivre à l'aide des tensiomètres la zone dans laquelle le système racinaire est actif, avec des tensiomètres placés à différentes profondeurs.

Ce potentiel exprime en quelque sorte l'intensité des forces qui retiennent l'eau dans le sol et, par conséquent, l'importance de travail qu'il faudra fournir pour extraire cette eau. On retiendra en particulier que :

Plus le sol est humide, plus le potentiel de l'eau est faible, plus l'eau est mobile et visse versa. (**DUCROCQ, 1990**).

### **I.3.3.- Les indicateurs basés sur le bilan hydrique**

Pour organiser l'irrigation en fonction des besoins en eau des cultures et des moyens dont on dispose, il faut prévenir et ne pas attendre que la sécheresse se manifeste pour tenter d'intervenir.

Le bilan hydrique permet de déterminer l'état des réserves en eau du sol. Il est alors possible d'estimer l'ETR et son évolution afin de comparer l'état de satisfaction des besoins en eau de la culture aux objectifs fixés, selon les stades de végétation.

Cela possible en établissant un bilan hydrique prévisionnel, qui est une comparaison entre l'offre et la demande en eau :

- ❖ L'offre est constituée, comme tout bilan hydrique, par la réserve initiale du sol et son entretien par les remontées capillaires, les pluies et par les irrigations éventuelles.
- ❖ La demande concerne les besoins en eau de culture, liés à son stade de développement et aux conditions climatiques.

Le bilan hydrique est une représentation grossière de la réalité, mais il ne demande qu'un nombre limité de données pour son utilisation.

Il permet d'établir une gestion prévisionnelle de la sole irriguée, décision d'ordre stratégique : choix de modes de conduites plus ou moins restrictifs, élaboration de calendrier d'irrigation des différentes productions avec analyse des différents régimes hydriques.

Lors de l'utilisation en temps réel pour le pilotage de l'irrigation, décisions tactiques, il constitue un premier « garde-fou » contre l'usage abusif éventuel de l'eau. (ISBERIE, et al., 1992).

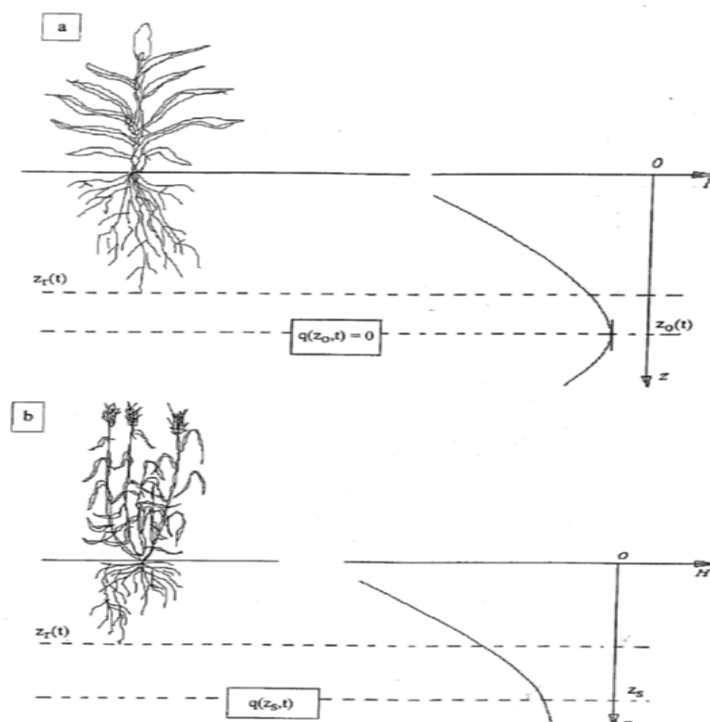


Figure1 - schéma de deux cas de calcul du bilan hydrique sous culture.

## I.4 Méthodes de pilotage de l'irrigation

### I.4.1. Bilan hydrique

#### I.4.1.1- Définition du bilan hydrique

Pendant longtemps, le bilan hydrique pour l'agronome avait pour but de définir l'eau disponible pour la plante dans le compartiment sol. Ce compartiment joue, par rapport à la

variabilité climatique des pluies, le rôle de réservoir tampon majeur qui permet de caractériser ce qu'on appelle l'offre ; en fait, cette eau disponible ne satisfait que rarement tout au long de la croissance les besoins en eau des plantes, qui sont nécessaires pour exprimer leur production potentielle. Face à cette offre, il apparaît clairement dans les années 60 (**PENMARCH, 1956, cité par Belouz, 2007**). Que les conditions climatiques imposaient, en fonction des caractéristiques physiques de l'interface (couvert-végétal atmosphère), un bilan d'énergie engendrant, dans le cas d'aucune restriction des apports d'eau au niveau de cette interface (saturation maintenue au cours du temps), une évaporation maximale dite potentielle théorique ETP c'est dire la demande climatique. (**PERRIER, 1988**).

Le bilan hydrique est traduit par l'énoncé de la loi de conservation de la matière qui stipule que la matière ne peut être ni créée ni détruite, mais qu'elle passe seulement d'un état à l'autre, ainsi la teneur en eau d'un volume du sol donné ne peut augmenter sans un apport venant de l'extérieur (par infiltration ou remontée capillaire par exemple) et ne peut diminuer à moins que de l'eau ne soit pas transportée vers l'atmosphère par évapotranspiration ou en profondeur par drainage (**HILLEL, 1980**).

Le bilan hydrique d'une plante dépend donc de la quantité d'eau absorbée, essentiellement par les racines, de celle transpirée, surtout par les feuilles, et, en fin de celle stockée dans les réserves ou utilisée pour la croissance, mais les variations de la teneur en et les quantités d'eau utilisées pour la croissance sont négligeables en masse par rapport aux flux d'eau traversant les plantes (**URBAN, 1997 cité par LEULMI, 2004**).

Il représente l'évolution des réserves en eau du sol au cours d'une période de végétation : ceci permet notamment de programmer les irrigations de façon à maintenir l'humidité du sol dans les limites satisfaisantes pour l'absorption des plantes. (**DUCROCQ 1990**).

Dans un intervalle de temps donné (1 semaine, 1 mois, etc.), l'humidité du sol varie en fonction :

- De la fraction de pluie tombée qui est effectivement stockée par la couche de terre exploitée par les racines.
- De la réserve en eau du sol initiale (c'est-à-dire existant au début de la période).
- De l'évapotranspiration de la parcelle.

## **I.4.2-Pilotage par Tensiométrie :**

### **I.4.2.1-Généralité :**

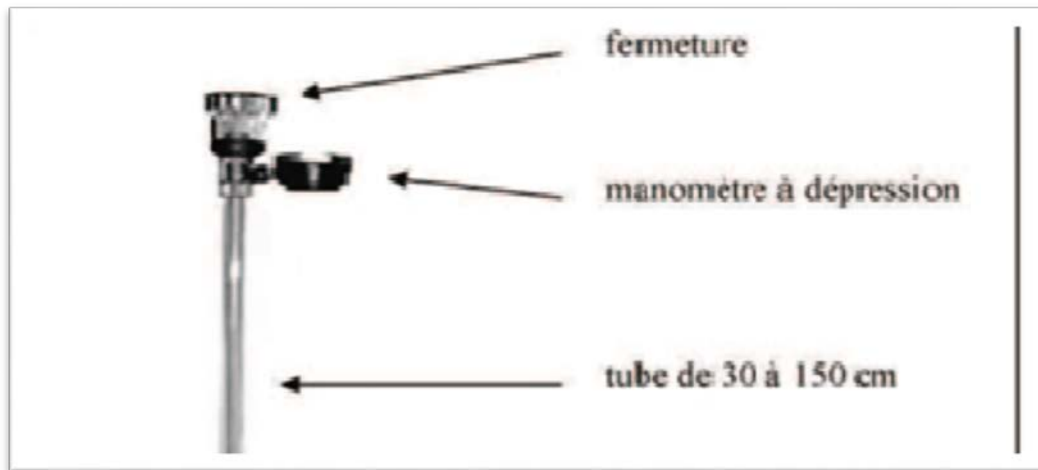
L'irrigation est fort utile, mais elle exige en contrepartie une excellente régie : il faut appliquer les bonnes quantités d'eau au bon moment, pour éviter des excès, des stress hydriques indésirables et des pertes d'eau et de fertilisants dans l'environnement.

Pour assurer une bonne régie de l'eau, il est d'abord indispensable de connaître les besoins de la culture et la variation de ceux-ci en fonction du stade de développement. Aussi, il est impératif de mesurer régulièrement la teneur en eau du sol. Cette information permettra de préciser le moment propice à l'irrigation et surtout si les quantités appliquées sont insuffisantes ou en excès par rapport au type de sol et au besoin de la culture.

Par ailleurs, il existe plusieurs méthodes et outils permettant de mesurer la teneur en eau du sol. Chaque année, de nouveaux outils viennent s'ajouter, et le choix s'avère de plus en plus difficile. Par contre, pour avoir fait l'essai de nombreux outils, je considère que le tensiomètre constitue un excellent investissement et présente encore actuellement l'un des meilleurs rapports qualité/prix. Il s'agit de bien comprendre l'appareil, d'interpréter adéquatement les données et d'accepter ses inconvénients de maintenance. Il existe quelques types de tensiomètres, mais je me limiterai dans le présent document à discuter du modèle le plus répandu, soit le « Irrometer ». Il est à noter que les principes d'utilisation sont sensiblement les mêmes pour la plupart des modèles. (BERGERON, 2005).

### **I.4.2.2-Définition de la Tensiométrie :**

Le Tensiomètre est constitué d'un cylindre de plastique creux muni à la base d'une bougie poreuse. Près de la partie supérieure se trouve un manomètre (figure N°1). Le tensiomètre est enfoui dans le sol de façon à ce que la bougie soit placée à la profondeur de mesure voulue. Lorsque le sol s'assèche, l'eau diffuse à travers la bougie poreuse vers le sol. Comme le tube est étanche, il se crée alors une tension qui est mesurée par le manomètre. Plus celui-ci présente des valeurs élevées, plus le sol est sec. Lorsque le sol est saturé, la tension est nulle. Les valeurs mesurées par le manomètre indiqueront donc quand il est nécessaire d'irriguer. La plupart des tensiomètres sont gradués de 0 à 100 centibars (BERGERON, 2005).



**Figure 2 - Schéma d'une Tensiométrie.**

### **I.4.2.3-Description de la Tensiométrie**

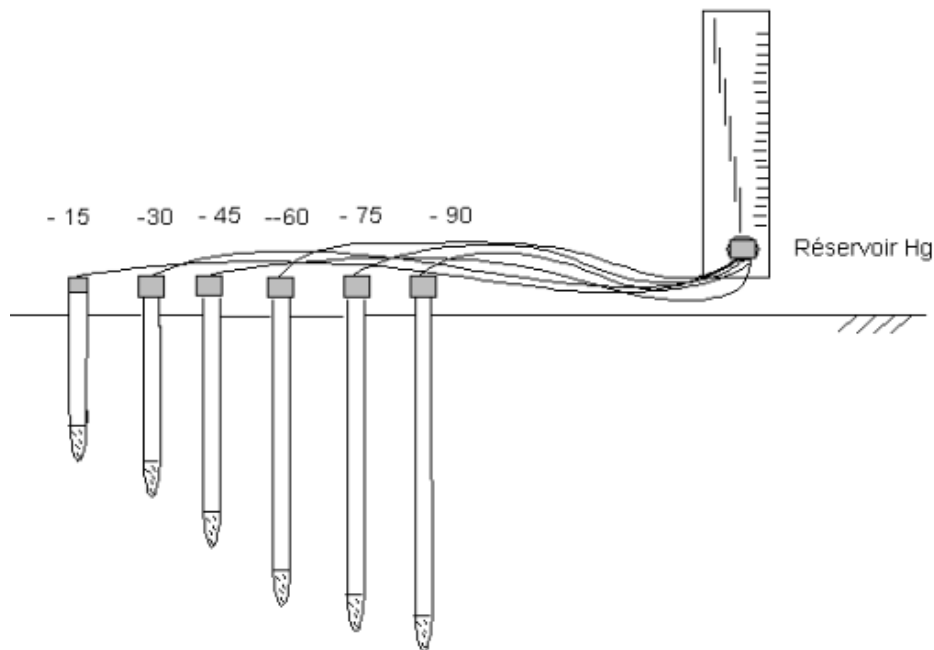
L'appareil est constitué de quatre parties. Une partie poreuse (céramique) qui met en relation la solution du soi et l'intérieur de l'appareil La gamme de mesure d'un appareil dépend notamment du diamètre des pores de la céramique : plus ce diamètre est faible, plus l'appareil peut mesurer dans une gamme étendue de valeurs. Cette partie, appelée bougie, est placée dans le sol à la profondeur de mesure souhaitée.

Un tube ou «canne» met en relation, par l'intermédiaire d'une colonne d'eau, la bougie avec un manomètre à dépression. Ce tube est de longueur variable (30 cm à 1,5m). Il est préférable d'utiliser des appareils adaptés à la profondeur de mesure souhaitée, car, si la partie hors du sol est trop importante par rapport à la partie enterrée, l'appareil est moins stable et le contact entre la bougie et le sol en est perturbé. Par ailleurs, les appareils qui dépassent trop du sol ont plus de chance d'être endommagés par les engins agricoles. Enfin, il est intéressant que cette canne soit parfaitement translucide afin de pouvoir déceler facilement si la colonne d'eau contient de l'air.

Un manomètre à dépression gradué en centibar (cbar). Quand l'appareil est opérationnel, ce manomètre indique la différence entre la pression atmosphérique, et la pression à l'intérieur de l'appareil.

Une réserve d'eau et une fermeture étanche. L'intérieur de l'appareil (bougie, tube, manomètre) est rempli d'eau. Sur les appareils, une ouverture permet de remplir le tensiomètre et ce, plus ou moins facilement selon les fabricants. À ce niveau, une réserve

d'eau facilite la purge des tensiomètres quand ils contiennent de l'air. Enfin, un bouchon permet de rendre le système étanche pour que l'appareil se mette en équilibre avec le sol. (TRON, ISBERIE et CHOL, 2000).



**Figure 3 : Batterie de tensiomètres connectés à un manomètre à mercure**

#### **I.4.2.4-Fonctionnement**

Quand l'appareil est correctement mis en place, il s'établit à travers la bougie une continuité entre la solution du sol et l'eau à l'intérieur du tensiomètre ; l'appareil se met en équilibre avec le sol. Quand l'équilibre est atteint, on sait qu'il faut dépenser la même énergie pour extraire de l'eau à la bougie ou au sol qui l'entoure. Lorsque le sol se dessèche, pour maintenir l'équilibre, l'eau est attirée hors du tensiomètre à travers la bougie. L'appareil étant étanche, la pression intérieure devient inférieure à la pression atmosphérique ; cette «dépression» est transmise au manomètre par la colonne d'eau reliant la bougie au manomètre.

Au contraire, avec la pluie ou les arrosages, l'eau devient plus disponible dans le sol et la « dépression » existante « aspire » l'eau à l'intérieur de l'appareil. Le manomètre enregistre une dépression moins forte et indique le nouvel état d'équilibre.



On appelle tension la valeur de dépression lue sur le manomètre. Plus cette tension est faible (le manomètre affiche quelques centibars), plus l'eau est disponible et abondante (il faut peu d'énergie pour l'extraire du sol). Quand l'eau devient moins disponible, la tension monte.

Schématiquement, le tensiomètre indique la force (ou succion) que doit exercer une racine pour extraire l'eau du sol. Une tension faible -quelques centibars - correspond à une grande disponibilité de l'eau ; une succion forte correspond à une disponibilité de l'eau réduite. (TRON, ISBERIE et CHOL, 2000).

**Remarque** : Le tensiomètre indique une dépression (pression plus faible que la pression atmosphérique). Certains expriment donc le résultat des lectures selon une échelle négative. Nous préférons les présenter de manière positive, car cela correspond mieux à ce qu'on lit sur les manomètres.

#### **I.4.2.5-L'intérêt de la Tensiométrie**

La Tensiométrie : Elle mesure le potentiel matriciel du sol. La tension d'eau dans le sol caractérise les forces de liaison terre-eau et indique le potentiel hydrique du sol. Il existe 2 types de tensiomètres.

- Le tensiomètre à eau et le tensiomètre électrique. Le tensiomètre à eau se compose d'une bougie en céramique poreuse enfoncée dans le sol et reliée par un tube à un manomètre. Ces deux éléments sont remplis d'eau. La pression à l'intérieur du tube équilibre au bout d'un certain temps la tension d'eau du sol par l'intermédiaire de la bougie. Le contact doit être parfait entre le sol et la bougie. L'étendue de mesure du tensiomètre est limitée entre 0 et 800 mbar (80 KPa). (Annexe, a)
- Le tensiomètre électrique, type Watermark®, offre une plage de valeur allant de 0 à 200cb. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un boîtier enregistreur sur autant de bougies que l'on désire. La résistance électrique est convertie en potentiel hydrique.

La préparation et la mise en place de ces bougies s'effectuent de la même manière que pour un tensiomètre à eau.

La Tensiométrie permet d'avoir une mesure rapide, mais ponctuelle et limitée en profondeur. Pour les deux modèles de tensiomètres, l'association de plusieurs sondes à différentes profondeurs est souvent utilisée en réponse à ce problème.

Cette association n'offre qu'une réponse partielle, en effet connaître l'état hydrique du sol à plusieurs niveaux de profondeur ne donne pas d'information sur l'état hydrique de la plante et sur ses besoins en eau (VAN LEEUWEN et al., 2001), à moins d'avoir un référentiel propre à chaque parcelle obtenu sur plusieurs millésimes à l'aide d'autres outils, et d'avoir établi une relation sol - plante. De plus la représentativité de cette mesure dépend de l'homogénéité / hétérogénéité du sol au sein d'une parcelle. La question de l'échantillonnage se pose, à savoir l'interaction nombre de sondes x hétérogénéités de la parcelle x coût de l'équipement x pertinence de l'information obtenue.

La Tensiométrie permet :

- ✓ de détecter les excès d'eau (insuffisance de drainage, apports d'eau trop abondants formation de nappes perchée temporaire, développement trop important du volume saturé en irrigation localisée),
- ✓ d'apprécier l'opportunité de commencer des arrosages où de renouveler les arrosages en contrôlant que l'apport précédent a été totalement utilisé,
- ✓ de renseigner sur le devenir de l'eau dans le sol : profondeur atteinte par la dose d'arrosage en aspersion, diffusion latérale de l'eau et homogénéité de sa répartition le long des raies en gravitaire, diffusion de l'eau en goutte à goutte (**PEYREMORTE, ISBERIE, 1986**).

Les informations fournies par les tensiomètres doivent être représentatives : il faut installer au moins trois sites tensiometriques par unité culturale en des lieux représentatifs de la parcelle. Et en fonction du type de sol, du type de culture, du stade de développement de la culture, et du système d'irrigation, la position des tensiomètres et leurs profondeurs seront différentes. Enfin l'interprétation des mesures nécessite une formation préalable des utilisateurs. (HUGUET, et ORLANDO, 1987).

Cependant la méthode tensiometrique nécessite elle aussi d'être calibrée comme nous le montre l'exemple suivant. Lorsque l'on positionne un tensiomètre à une distance  $x$  d'un pied de vigne et une distance  $y$  du goutteur, le tensiomètre nous signale des tensions basses (inférieures à 20 cb) : on est donc en droit de penser que la plante ne subit pas de stress hydrique et que l'agriculteur n'a pas besoin d'irriguer. Or en changeant la position du tensiomètre et en cherchant une position plus adéquate : les tensions montent jusqu'à 30 cb indiquant une disponibilité de l'eau moins importante. Il y a donc tout un ensemble de références à établir pour trouver la position et la profondeur optimales des tensiomètres.

## **I.4.2.6-les avantages et les inconvénients de la Tensiométrie**

### ***I.4.2.6.1-les avantages***

Selon (TRON et al. 2000) les avantages de ce type de mesures et des capteurs utilisés concernent dans quatre points semblent importants à aborder ici:

- 1) la signification de la tension vis-à-vis de la culture est une donnée indépendante de la nature du sol,
- 2) les mesures sont réalisées en des points déterminés permettant de contrôler l'ensemble des flux qui concourent à l'alimentation en eau d'une culture dans un sol donné,
- 3) quel que soit le type de sol, cette information est directement utilisable pour connaître la disponibilité de l'eau pour la plante,
- 4) les mesures sont non destructives.

### ***I.4.2.6.2-les inconvénients :***

Les inconvénients de ce type de mesures et des capteurs utilisés concernent les points suivants :

1. le manque de précision de certains appareils de mesure,
2. la plage de mesure des appareils utilisés qui ne couvre pas la totalité des possibilités
3. des plantes pour extraire l'eau du sol,
4. le faible surface de sol concernée par un capteur qui confère aux mesures un caractère ponctuel,
5. en l'absence d'expérience pour un site donné, la difficulté de pouvoir anticiper l'évolution d'une situation à partir de mesures instantanées, la nécessité d'un apprentissage.

### ***I.4.2.6.3-Précaution***

- La nature de la mesure

Il s'agit d'une mesure directe de la liaison de l'eau avec le sol : l'appareil indique la tension mesurée. Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux conditions d'obtention de cette mesure.

- Une information immédiate

Chaque appareil est muni de son propre manomètre et indique en permanence la tension de l'eau dans le sol. Une simple lecture de la valeur suffit pour obtenir l'information souhaitée à tout instant.

#### **I.4.2.7-Problèmes souvent rencontrés avec les Tensiomètres**

Les tensiomètres nécessitent un minimum de suivi pour être efficaces. Chaque semaine environ, il est important, après avoir noté la lecture, de dévisser le bouchon pour faire sortir l'air qui pourrait se trouver dans le tube et ainsi vérifier que celui-ci est bien rempli d'eau et que la lecture est adéquate. Si le tensiomètre indique une valeur qui frôle le zéro pendant une période prolongée, cela peut signifier que le sol est saturé ou que le tensiomètre est déchargé. Il se peut aussi qu'il se vide par la base qui n'est pas bien vissée (dans le cas des tensiomètres dont la base est amovible). Lors de l'installation de ce type de tensiomètres, il faut être prudent et ne pas tourner le tensiomètre dans le sens qui permettrait à la base de se dévisser.

Il arrive parfois que les travailleurs au champ déplacent par erreur ou par curiosité les tensiomètres. Si le contact entre le sol et le tensiomètre n'est pas bon, les lectures ne seront pas adéquates. Il faut toujours vérifier cet aspect et protéger adéquatement les tensiomètres.

Les tensiomètres nécessitent un minimum d'entretien. Ils doivent être protégés du gel et être remisés en fin de saison après un bon nettoyage de la bougie poreuse et de l'intérieur du tube. Les modèles dont la base se dévisse permettent un entretien plus facile.

L'eau est une ressource vitale et limitée. En faire une utilisation optimale permettra de rentabiliser davantage les investissements et de protéger la ressource. Pour en obtenir une bonne gestion, le tensiomètre s'avère un outil très valable, à condition de bien comprendre son fonctionnement et de bien l'entretenir. (BERGERON, 2005).

#### **I.4.2.8-Préparation et installation du Tensiométrie**

##### *1.4.2.8.1-Préparation du Tensiométrie*

1. Préparer la solution de remplissage (eau déminéralisée + colorante [ex. : bleu de méthyle]).
2. Remplir le tensiomètre et le réservoir du haut avec la solution de remplissage.
3. Veiller à ce que l'eau ait pénétré dans le tube du tensiomètre.
4. Immerger pendant au moins 24 heures la totalité du bout poreux du tensiomètre (bougie) dans un récipient contenant la solution de remplissage, le bouchon du tensiomètre étant dévissé.

5. Frapper légèrement le tensiomètre pour faire monter les bulles d'air.
6. Appliquer un vide avec la pompe aspirante, en maintenant la bougie poreuse dans l'eau. Vérifier les deux lectures des manomètres (pompe et tensiomètre) : elles doivent être semblables. Une différence marquée indique un mauvais fonctionnement possible de l'un ou l'autre des manomètres. Si tel est le cas, tester avec un autre tensiomètre. Visser le bouchon, puis coucher le tensiomètre sur le côté, le manomètre vers le bas, en frappant légèrement sur le manomètre afin d'enlever l'air qui aurait pu se loger dans le conduit qui mène à celui-ci.
7. Veiller à ce qu'il n'y ait pas de bulles d'air dans le tensiomètre.
8. Maintenir la bougie poreuse dans l'eau jusqu'à l'installation au champ

#### *1.4.2.8.2-L'endroit propice à l'installation des tensiomètres*

- 1) Choisir une zone représentative du champ ; éviter une baissière ou un endroit surélevé.
- 2) Les tensiomètres doivent être installés dans la zone racinaire.
- 3) Installer les tensiomètres du côté le plus ensoleillé des plants.
- 4) Utiliser deux tensiomètres installés à proximité l'un de l'autre de manière à ce que le bout poreux rejoigne le  $\frac{1}{4}$  et le  $\frac{3}{4}$  de la profondeur des racines.

#### *1.4.2.8.3-L'installation du tensiomètre*

- 1) Effectuer un trou à l'aide d'une tige de métal au bout effilé de diamètre légèrement inférieur à celui du tensiomètre. Un indicateur placé sur la tige permet de vérifier que celle-ci est enfouie à la profondeur désirée.
- 2) Introduire une petite quantité de boue épaisse confectionnée avec le sol en place (en évitant les grosses particules).
- 3) Insérer le tensiomètre dans le trou à la profondeur désirée.
- 4) Après l'installation, il faut remonter et compacter le sol autour de la tige du tensiomètre
- 5) Il doit y avoir un minimum de 2,5 cm entre le manomètre et le sol.
- 6) Un peu d'air venant du sol peut entrer dans le tensiomètre, on enlèvera cet air en introduisant « une paille » dans la tige.

#### *1.4.2.8.4-L'installation au champ*

La profondeur d'installation et la distance latérale par rapport à la ligne d'irrigation sont deux facteurs déterminants pour le bon fonctionnement du tensiomètre. Pour définir la profondeur, il est essentiel de connaître l'enracinement de la culture à irriguer. Il existe des références faisant état de la profondeur d'enracinement de la plupart des cultures. Toutefois, j'ai pu constater au fil des ans, à l'aide de tranchées, que chaque situation est particulière et que des profondeurs fortes différentes sont souvent observées. Rien de mieux que de creuser pour constater, sur le site même et à des stades de développement précis, l'état d'enracinement

de la culture à irriguer. La profondeur à considérer tiendra également compte de la zone où l'enracinement et par conséquent l'absorption sont maximaux.

On recommande d'installer les tensiomètres en paire, à des profondeurs différentes. On aura ainsi une lecture du haut et du bas de la zone des racines. Il est possible de fonctionner avec un seul tensiomètre, on placera alors celui-ci à une profondeur intermédiaire.

Pour commencer, 2 mesures à obtenir

Lorsqu'on installe les tensiomètres, on sature le sol en eau à l'aide d'une chaudière. Ceci nous donne la lecture de la tension à saturation. Normalement, cette lecture est 0 cbars mais parfois les tensiomètres indiquent une lecture  $> 0$  cbars.

On fait ensuite une lecture 24 heures après l'installation. Il s'agit de la tension à la capacité au champ. À ce moment, l'eau libre s'est infiltrée dans le sol. L'eau qui reste est retenue par les particules de sol. Il s'agit d'une eau qui est disponible pour la plante. Chez les producteurs qui ont testé les tensiomètres en 2014, la tension à la capacité au champ était aux alentours de 5 cbars de plus que la tension à saturation.

## **I.5. Présentation de la culture(Le Switchgrass)**

### **I.5.1 Généralités**

Le switchgrass ou panic érigé (*Panicum virgatum* L.famille des Poaceae) est une graminée origine d'Amérique du Nord, où elle est cultivée pour la production de fourrage et pour la lutte contre l'érosion.

Sa forte productivité en biomasse et sa rusticité ont conduit à son étude aux Etat -Unis d'Amérique et plus récemment en Europe dans le cadre des recherches sur la bioénergie.



**Figure 3 – Vue sur une parcelle cultivée en switchgrass**

Le switchgrass est une plante pérenne issue d'une graine qui développe ensuite un rhizome non invasif. Elle dispose d'un métabolisme photosynthétique de type C4 contribuant à sa forte productivité.

Les différentes variétés sont fertiles et se reproduisent par graines.

La plante pousse d'avril à septembre et peut atteindre 2 à 3m de hauteur en fin de cycle

La récolte est réalisée annuellement, en fin d'hiver pour obtenir un produit sec (70-85% MS). Une récolte en automne pourrait s'envisager pour obtenir un produit vert et un maximum de matière.

### **I.5.2. Avantages principal**

potentiel de productivité important soumis à une variabilité plus faible que d'autres cultures telles que le miscanthus bonne tolérance à une très large gamme de sols et de climats culture pérenne (10 à 20 ans) sans baisse de productivité au cours du temps (à vérifier selon mode de récolte)

- faibles besoins de fertilisation
- peu de protection phytosanitaire
- pas de matériel spécifique pour le semi

### **I.5.3.Adaptation au milieu**

Le switchgrass montre une préférence pour les sols p profonds et bien alimentés, mais semble relativement tolérant à une variété de sols et de climats, notamment les sols peu fertiles et acides. Il apparaît également plus tolérant aux terres séchantes que le miscanthus.

Le switchgrass serait éventuellement « problématique » sur terres drainées en raison de son enracinement très profond (supérieur à 2 m et pouvant atteindre 3m).

### **I.5.4.Eléments de conduite de la culture**

L'implantation du switchgrass est une étape clé pour la réussite de la culture elle semble conditionner fortement le délai d'entrée en production.

#### **I.5.4.1.Préparation du sol**

L'implantation du switchgrass est délicate et représente donc une étape clé pour la réussite de la culture. La plantation doit s'effectuer sur un sol propre pour limiter la concurrence précoce des adventices et plusieurs faux semis préalables peuvent être nécessaires.

Le semis s'effectue de manière générale au mois de mai. Le taux de levée et la vitesse de levée du switchgrass sont pénalisés par des températures de moins de 10 à 12°C, et par conditions de sol sec (moins de 15% d'humidité massique pour la variété kanlow en sol limoneux). Le choix de la date de semis doit donc être raisonné en fonction du lieu.

#### **I.5.4.2.Fertilisation**

Aucune fertilisation azotée n'est nécessaire l'année du semis, car les besoins de la culture sont faibles, et elle favoriserait plutôt le développement des adventices.

#### **I.5.4.3.Récolte**

Le mode de récolte préférentiel est la récolte en sec en fin d'hiver notamment pour un débouché en combustion. Le matériel utilisé est, soit une faucheuse et une botteleuse pour obtenir un produit dense, soit une ensileuse. Il existe un risque de verse en cas de densité trop élevée et de disponibilités en azote forte.



### **I.5.5 Intérêt agronomique et écologique**

La *switchgrass*, autrefois considérée comme une mauvaise herbe inintéressante et à éradiquer des champs est aussi aujourd'hui considérée comme utile pour la restauration ou conservation de sols vulnérables ou dégradés. Son système racinaire très développé, sa hauteur et sa croissance tardive lui permettent de bien protéger les sols contre l'érosion par le vent et l'eau tout en conservant un bon ensoleillement pour d'autres espèces plus printanières.

Elle a été incluse dans des mélanges de semences destinés à protéger des talus ferroviaires ou autoroutiers, ou des digues, des barrages, berges de cours d'eau ou d'étangs où elle offre aussi un habitat pour la faune.

Son système racinaire profond (avec celui d'autres dicotylédones et des graminées indigènes) contribue à décolmater les sols, qu'il protège en hiver, et qu'il enrichit en matière organique (Cette plante en stocke dans le sol une quantité presque équivalente à celle produite dans la partie aérienne (= > puits de carbone).

Les racines de ces plantes ont aussi augmenté la perméabilité et réserve en eau de ses sols, et donc leur fertilité.

Cette plante fournit un fourrage de qualité à de nombreux herbivores sauvages, et un habitat stable riche en bonnes cachettes et des supports pour la vie de nombreux insectes et autres invertébrés, ainsi qu'un très grand nombre de graines pour des centaines d'espèces granivores et de nombreux oiseaux et quelques « *espèces-gibier* » .

## **Chapitre II- Matériels et méthodes**

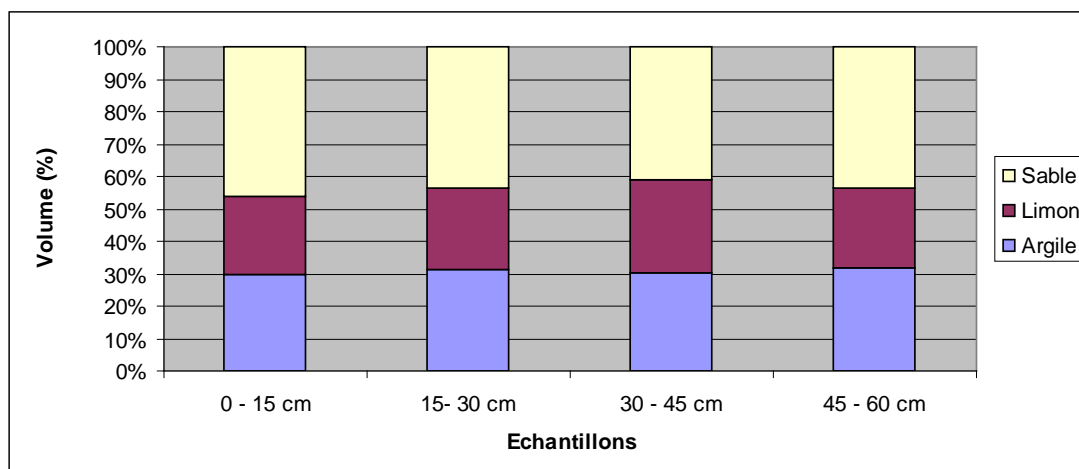
## II.1. Présentation du site d'étude

Ce chapitre est consacré à l'expérimentation menée au niveau d'une parcelle expérimentale du laboratoire régional d'analyses des sols de l'INSID (Institut National des sols, de l'irrigation et du drainage, El Matmar, Relizane). L'objectif de ce travail est de suivre le bilan hydrique par tensiométrie d'une culture fourragère irriguée à savoir le Switchgrass. En effet, il est important de disposer d'indicateurs de référence de pilotage de l'irrigation sur la base de données tensiométriques propres au site d'étude (profondeur optimale d'installation des tensiomètres, distances entre tensiomètres, fréquence de lecture tensiometrique et seuil de déclenchement de l'irrigation).

Ce travail fait partie d'un projet de recherche regroupant plusieurs sites expérimentaux en rapport avec la thématique de la gestion de l'eau en agriculture durable (maîtrise des apports d'eau en irrigation et risques de contamination phréatique par les fertilisants).

Le site de mesure est constitué par des sols à structure polyédrique moyenne, poreuse, friable, matière organique moyennement décelable (Étude agro pédologique INSID, 2008). Les échantillons de sol prélevés, au cours de notre stage, à proximité de la pierre poreuse du tensiomètre placé respectivement à 15, 30, 45 et 60 cm de profondeur.

Les résultats de l'analyse granulométrique (Fig. 4), montrent que le site d'étude enregistre de faibles variations des teneurs en argile entre 30 et 32 %, en limon entre 24 – 28 % et en sable entre 41 – 46 %. La proportion en sable est la plus importante pour tous les niveaux de mesure.



**Figure 4- Distribution granulométrique du site à différentes profondeurs**

## II. 2.Caractéristiques physiques

### II.2.1. Climat

Le climat de la région est de type méditerranéen. Pour une période de 25 ans, les précipitations annuelles sont de l'ordre de 276 mm pour des ETP (évapotranspiration potentielle de 1190 mm à la station météorologique située au niveau de la station d'El Matmar, Relizane (Source: O.N.M Oran in MEGUENNI Nouna. Mémoire d'ingénieur).

Un important déficit climatique (pluie-ETP) existe puisque la pluviométrie moyenne annuelle n'est que de 276 mm, pour des ETP de 1190 mm pour une période de 25 ans. La pluviométrie et les ETP (moyennes mensuelles) pour cette période sont reportées dans le tableau 2.

**Tableau 2 - Pluviométrie et évapotranspiration potentielle (moyenne sur 25ans)**

Mois	Sep	Oct	N	D	J	F	M	A	M	J	Total
P : mm (moy de 25 ans)	10	24.5	41	40	37	31	38.1	26.9	19.7	6.8	276
Eto : mm (moy de 25 ans)	158	144	78	72	57	68	106	140	172	195	1190

Station El Matmar, Relizane. Source: O.N.M Oran in MEGUENNI Nouna. Mémoire d'ing.

### II.2.2. La culture : *Panicum virgatum* (Switchgrass)

Le switchgrass (*Panicum virgatum*, qui se traduit par panic érigé) est originaire d'Amérique du Nord. Où elle est cultivée pour la production de fourrage et pour la lutte contre l'érosion.

Sa forte productivité en biomasse et sa rusticité ont conduit à son implantation et son étude aux États-Unis d'Amérique et plus récemment en Europe dans le cadre des recherches sur les bioénergies. Le Gouvernement des États-Unis la considère depuis 2006 comme une source potentielle d'agro carburant, plus respectueux de l'environnement.

Le *Panicum virgatum* peut atteindre une taille importante, le système racinaire très dense contribue à fixer le sol et à y améliorer les interactions sol-racines-microbes ainsi que la circulation verticale de l'eau et son épuration. Cette plante a pour cela été expérimentalement

réintroduite, avec succès dans certaines zones tampons à vocation d'épuration des eaux et des sols en milieu agricole aux États-Unis. Dans les meilleures conditions, ses touffes atteignent 1.8 à 2.2 m de haut.

La *switchgrass*, autrefois considérée comme une mauvaise herbe inintéressante et à éradiquer des champs est aussi aujourd'hui considérée comme utile pour la restauration ou conservation de sols vulnérables ou dégradés. Son système racinaire très développé, sa hauteur et sa croissance tardive lui permettent de bien protéger les sols contre l'érosion par le vent et l'eau tout en conservant un bon ensoleillement pour d'autres espèces plus printanières.

### II.2.3. Dispositif expérimental

Le travail est conduit sur un site de 1.5 m<sup>2</sup>, cultivé en fourrage (*Panicum virgatum* : Switchgrass), dans lequel nous avons installé des tensiomètres « Water Mark » sur quatre profondeurs (15, 30, 45 et 60 cm).

Des prélèvements d'échantillons de sol pour analyse au laboratoire ont été effectués sur quatre profondeurs (0-15, 15-30, 30-45 et 45-60 cm) pour déterminer l'humidité du sol. Aussi, le site d'essai a fait l'objet d'une caractérisation physique du sol (granulométrie, densités et porosité) sur les quatre profondeurs. Des apports d'eau ont été apportés au niveau du site pour combler le déficit hydrique de la culture en fonction des lectures tensiométriques.



**Figure 5 – Switchgrass (*Panicum virgatum*)**

## II.3.Suivi des bilans hydriques

L'étude de l'évolution au cours du temps des flux d'eau nécessite la mesure à la fois des apports, des humidités et des charges hydrauliques. La mesure de l'humidité a été réalisée à l'aide d'un humidimètre neutronique et des mesures gravimétriques.

### II.3.1. Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres

Le suivi des charges hydriques à l'aide du tensiomètre avait pour objectif de connaître l'état hydrique du sol. Les charges sont lues sur le boîtier électronique qui est alimenté par une pile de 9 volts en reliant les pince-crocodiles à la sonde (sans polarité).

Les tensiomètres sont installés aux cotes 15, 30, 45 et 60 cm. Les lectures et contrôles du tensiomètre ont lieu au moins 6 jours sur 7 avant 9h. Il convient de disposer des mesures avant que les effets de prélèvement par la culture soient sensibles à ces cotes.

Les sondes Water mark, utilisées dans notre étude, sont des matériels de type tensiometrique qui permettent de connaître l'état hydrique du sol mesuré en tension dans une plage comprise entre 0 et 200 centibars.

L'appareil est constitué par un tube en PVC de différentes longueurs dont l'extrémité inférieure est fermée par une bougie poreuse et qui est relié par deux files munies a ses parties supérieures de deux pince-crocodiles qui seront connectés à la sonde (sans polarité).

Le tube est placé dans le sol de façon à avoir un bon contact avec le sol au niveau de la bougie poreuse. Dans le sol, les films d'eau autour les particules au contact de la bougie poreuse se développent sur cette partie du tensiomètre.

Lorsque de l'eau est apportée au sol par les pluies ou les irrigations, le potentiel matriciel de l'eau dans le sol diminue. Alors le vide existant dans le tensiomètre « aspire » l'eau du sol à travers les pores de la bougie poreuse et le mouvement de l'eau vers le tensiomètre cesse lorsqu'un nouvel équilibre de potentiel est établi entre les deux milieux.

Pour le suivi de l'état de l'eau dans le sol, les tensiomètres sont pratiques et ils peuvent être utilisés en plein champ par les agriculteurs.

Cette gamme de tensiomètres offre des mesures relativement précises, leur installation est rapide et peu destructrice. Néanmoins, certains inconvénients rendent leur utilisation et interprétation délicates en particulier si leur nombre est insuffisant :

- la plage de mesure, de 0 à - 200 centibars, couvre seulement une partie de la pression de l'eau disponible pour la plante ;
- les mesures ne sont pas possibles dans la gamme la plus significative de succion pour les plantes (2 à 15 bars) ;
- la mise en place est difficile dans les sols caillouteux, la bougie poreuse est relativement fragile ;
- les méthodes d'emploi dans les diverses situations (principalement pour le pilotage de l'irrigation) sont connues. Sachant qu'on ne mesure pas la quantité d'eau dans le sol, mais le potentiel de l'eau du sol, ces méthodes sont basées sur l'interprétation des mesures et de leur évolution, elles impliquent donc une formation préalable des utilisateurs.

#### ***II.3.1.1. Mise en place du tensiomètre***

plonger le tensiomètre, pendant une nuit, dans un bœcher rempli d'eau distillée de manière à noyer complètement la bougie poreuse ;

Maintenir la bougie poreuse dans l'eau jusqu'à l'installation au champ.

avec une tarière spéciale, ayant le même diamètre que le tensiomètre, sur laquelle on fait un repère de profondeur, on réalise un puits de la profondeur exacte de mesure retenue ;

s'assurer qu'aucun élément grossier ne puisse tomber dans le puits une fois la tarière retirée ;  
introduire délicatement quelques cm<sup>3</sup> de boue épaisse, confectionnée avec de la terre fine du sol en place ;

enfoncez le tensiomètre dans le puits, ce dernier ayant le même diamètre que le tensiomètre, l'opération doit se réaliser légèrement en force ; c'est ainsi la preuve d'un bon contact sol-tensiomètre ;

Après l'installation, il faut remonter et compacter les alentours de la tige du tensiomètre.

le tensiomètre est ainsi placé pour effectuer la mesure.

#### ***II.3.1.2. Fonctionnement des sondes Watermark***

Les sondes Watermark, permettent de connaître l'état hydrique du sol mesuré en tension dans une plage comprise entre 0 et 200 centibars.

Le boîtier électronique est alimenté par une pile 9 volts, les pince-crocodiles seront reliés à la sonde (sans polarité).

Un thermomètre doit être placé dans le sol à la même profondeur qu'une des sondes ; le positionner dans un tube métallique creux fermé au fond et dans lequel on a versé quelques cm<sup>3</sup> d'huile.



**Figure 6-boite de WaterMark du tensiomètre.**



Pour lire les sondes : connecter les pinces à la sonde et presser READ une première fois, 2 petits traits apparaissent, puis READ une deuxième fois : la valeur de la tension s'affiche.

Pour lire la température du sol en mémoire : presser TEMP. Il est nécessaire, pour avoir une lecture correcte des sondes, d'afficher sur le boîtier Watermark la température du sol.

Pour changer la température du sol : presser et tenir TEMP et presser et tenir READ. La valeur de la température augmente (entre 12°C et 40°C). On relâche lorsque la valeur souhaitée est atteinte (si l'on veut diminuer les valeurs : tout en pressant TEMP, relâcher READ et appuyer sur READ et TEMP).

Pour tester le boîtier : fixer la température à 24°C, puis presser READ et TEST simultanément. La lecture doit être 100 + ou - 5. Pendant le test, les câbles ne doivent rien toucher (à faire pour vérifier la tension de la pile). L'appareil s'éteint automatiquement après 1 minute environ.

### **II.3.2. Mesures complémentaires**

En plus des mesures de charge (tension) effectuées au moins 6 jours sur 7 avant 9h, le site d'étude a fait l'objet d'une caractérisation physique du sol (granulométrie, pF, densités et porosité). Ainsi, des prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés à différentes profondeurs (0-15, 15-30, 30-45 et 45-60 cm) et analysés au laboratoire.

#### **II.3.2.1 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique**

Des mesures gravimétriques ont été réalisées lors de l'installation des tensiomètres, ces valeurs étant utilisées comme l'humidité initiale du sol. Elles ont été poursuivies durant la période du stage avant et après chaque apport d'eau, ces valeurs étant utilisées pour l'interprétation des mesurestensiométriques.

#### **II.3.2.2 Mesure des densités**

La densité apparente a été déterminée par la méthode du cylindre calibré, en prélevant un échantillon au niveau de deux horizons (0-15 et 15-30 cm) du site d'étude. Cette méthode

consiste à sécher l'échantillon prélevé avec le cylindre pendant 24 heures à l'étuve et le rapport de la masse sèche sur le volume du cylindre donne la densité apparente.

La densité réelle a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre en utilisant un liquide organique non polaire tel que le benzène.

Connaissant la densité apparente ( $D_a$ ) et la densité réelle ( $D_r$ ), la porosité totale peut être déterminée par la formule :  $[(D_r - D_a)/D_r] * 100$ .



**Figure 7-prélèvement des échantillons avec la terrière**

### **II.3.2.3 Mesure de l'humidité en fonction du pF**

La courbe des pF (potentiel de force) a été déterminée pour le site d'étude dans les couches du sol (0-15 cm, 15-30, 30-45 et 45-60 cm).

La méthode utilisée consiste à appliquer une pression de gaz inerte à un échantillon de terre humide afin d'extraire toute la phase liquide retenue par la **Marmite de Richard**. Il s'agit de caractériser l'état du système terre /eau en mesurant la force avec laquelle la phase solide retient la phase liquide. La technique utilisée consiste à appliquer une pression de gaz inerte à un échantillon de terre humide afin d'extraire toute la phase liquideretenue.

L'utilisation la plus fréquente du concept d'eau non libre est liée au flétrissement des végétaux qui ne semblent plus extraire l'eau du sol lorsque celle-ci est retenue par des forces supérieures à 16 atmosphères ce qui correspond à un  $pF$  de 4.2.  $pF$  représente le logarithme de la pression exprimée en cm de hauteur d'eau. Ainsi,  $pF$  4.2 correspond à une pression d'une colonne d'eau de 16000 cm de hauteur.

#### **II.3.2.4 Analyse granulométrique**

La méthode de la Pipette de ROBINSON a été utilisée pour la détermination de la texture du sol du site d'étude aux profondeurs (0-15, 15-30, 30-45 et 45-60 cm). L'analyse consiste en une mise en suspension dans l'eau des particules après destruction de la matière organique et désagrégation et dispersion des particules d'argile. Les particules sont, par hypothèse, supposées avoir toutes la même densité et une forme sphérique. Cette suspension étant stabilisée dans des conditions bien définies, la séparation des différentes classes s'effectue par sédimentation gravitaire pour les fractions fines ( $< 50 \mu m$ ) et par tamisage pour les fractions supérieures.



**Figure 8-Analyse granulométrique sur pipette de Robinson**

#### ***II.3.2.5 Suivi des apports d'eau***

Les doses d'irrigation ont été apportées en fonction de la réserve facilement utilisable (RFU) du sol du site d'étude. Pour une RFU de 72 mm par mètre de profondeur pour notre site expérimental, la dose d'irrigation est de 108 litres pour la superficie de 1.5 m<sup>2</sup> de notre site. Les apports d'eau ont été mesurés avec un débitmètre. Les fréquences d'arrosage ont été

établies en fonction des mesures tensiométriques. On reviendra sur ce dernier point dans le chapitre « résultats et discussion ».

#### *II.3.2.6 Mesure de pH et de la salinité du sol*

Les mêmes échantillons de sol prélevés au niveau du site expérimental à quatre profondeurs ont servi pour la détermination du pH et de la salinité du sol.

Pour le pH : Peser 20 g de sol, y ajouter 50 ml d'eau distillée bouillie puis brasser énergiquement. Abandonner le contenu pendant 2 heures. Procéder à l'étalonnage du pH mètre, puis remettre le contenu en suspension à l'aide d'un agitateur. Faire la lecture du pH enfin rincer l'électrode avec de l'eau distillée puis l'essuyer avec du papier Joseph (Aubert, 1978).

Pour la salinité : Peser 10 g de sol, y ajouter 50 ml d'eau distillée et agiter durant quelques minutes, à l'aide d'un agitateur. Procéder à l'étalonnage du conductivimètre mètre. Faire la lecture de la conductivité électrique enfin rincer l'électrode avec de l'eau distillée puis l'essuyer avec du papier Joseph (Aubert, 1978).

## **Chapitre III Résultats et discussions**

### III.3.2 Humidités caractéristiques

Le besoin de déterminer la quantité d'eau contenue dans le sol ainsi que d'évaluer les états énergétiques de cette eau est indispensable pour la compréhension du comportement chimique et hydrologique des sols et de l'effet sur la croissance des plantes.

La courbe caractéristique de l'humidité du sol aux pF (2, 2.3, 2.4, 2.5, 3, 3.2, 3.3, 4 et 4.2) a été déterminée pour les horizons (0 – 15, 15 – 30, 30 – 45 et 45 - 60 cm) du site d'étude. Les teneurs en eau correspondants à ces pF ont été déterminées au laboratoire par la méthode des chambres à pression (méthode de RICHARD) en appliquant des forces de (0.1, 0.2, 0.25, 0.32, 1, 1.58, 2, 10 et 15.8 bars). Les valeurs de pF sont comprises entre 0 pour l'eau très faiblement retenue par le sol et 7 pour l'eau fortement absorbée sur la surface des particules.

Dans la pratique, deux états caractéristiques de l'eau sont retenus, vu leur intérêt : la teneur en eau à la capacité au champ HCC ainsi que la teneur en eau au point de flétrissement HpF, car la détermination de la réserve utile (RU) du sol requiert ces deux teneurs en eau.

La figure(9) résume les estimations des paramètres des humidités caractéristiques pour les quatre couches du sol du site expérimental. Avec ces valeurs on obtient une réserve utile sur un mètre de profondeur de 108 mm pour, ce qui correspond à une valeur inférieure à celle donnée dans la littérature pour ce type de texture de sol. Cette différence peut être expliquée par la présence d'une charge caillouteuse et un taux de sable important au niveau des horizons explorés.

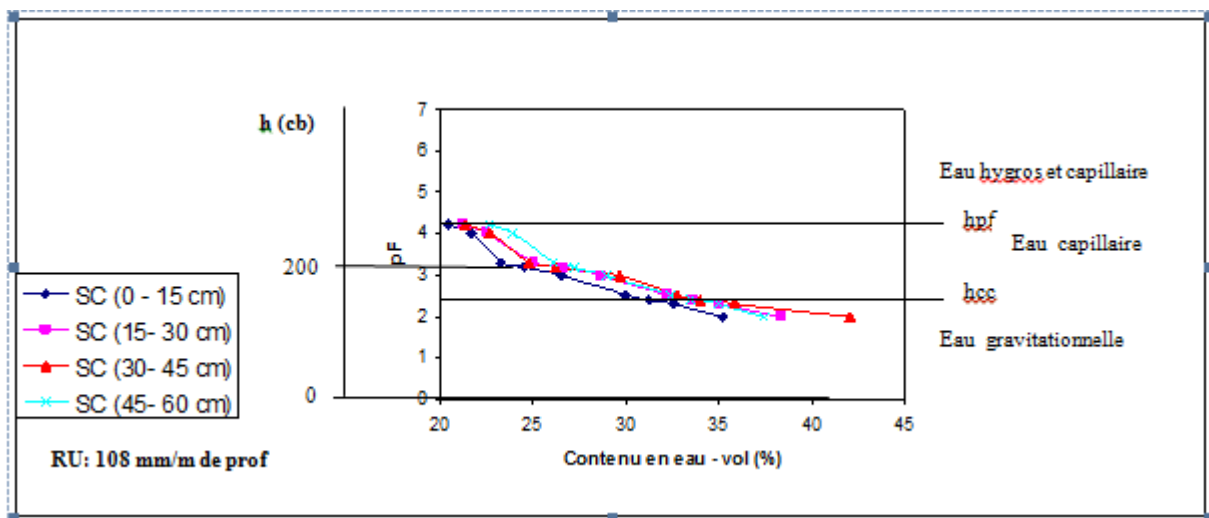


Figure 9- Relation entre tension et contenu en eau du sol du site expérimental à différentes profondeurs

### **III.3.3 Densité apparente du sol**

La densité sèche du sol a été déterminée par la méthode du cylindre calibré pour l'horizon de surface au niveau du site expérimental. Le prélèvement volumique est effectué avec un cylindre (volume connu) directement enfoncé dans le sol et dont les extrémités sont soigneusement arasées. L'échantillon est recueilli, séché et pesé (poids sec). Ces mesures ont eu lieu, au mois d'avril 2017. Les données présentées (Tableau 3) sont des moyennes de cinq mesures, avec de faibles écarts entre elles.

Pour l'ensemble des mesures réalisées au niveau de l'horizon de surface, la densité (moyenne de plusieurs prélèvements d'échantillons de sol) est de 1.35 dans le site expérimental. Il est à noter que le sol occupé par une culture pérenne n'a pas été travaillé depuis 6 campagnes.

En effet, l'accroissement racinaire de la culture entraîne une bonne porosité de l'horizon de surface. Il est à signaler que la densité apparente d'un sol varie spatialement beaucoup et est source d'erreur, d'autant plus que le sol du site de notre étude présente une charge caillouteuse au niveau des horizons explorés et un taux de sable important. Enfin, il est à noter qu'une densité supérieure à 1.5 est défavorable pour l'installation correcte de la plante.

### **III.3.4 Densité réelle du sol**

La densité réelle du sol a été déterminée par la méthode classique au pycnomètre au niveau du site d'étude. On effectue la mesure du poids et du volume de la phase solide d'un petit échantillon sec. La mesure du volume est réalisée par déplacement de liquide. Les prélèvements des échantillons de sol et les analyses de ce paramètre ont été effectués durant la période de stage. Les données présentées (tableau 3) sont des moyennes de mesures effectuées sur plusieurs échantillons prélevés du site d'étude, avec de faibles écarts entre elles. La densité réelle est de 2.45 pour notre site expérimental. Ce caractère de la densité réelle implique qu'elle est une variable de position et de dimension. C'est pour cette raison qu'il faudra prendre un échantillon de dimension suffisante pour inclure significativement l'hétérogénéité si on cherche une valeur moyenne.

### III.3.5 Porosité totale du sol

La porosité totale est l'ensemble de tous les vides du sol, c'est-à-dire les vides situés entre les mottes, dans les mottes (porosité structurale) et dans les agrégats élémentaires (porosité texturale). Comme la densité apparente, ce paramètre peut être aussi une variable saisonnière ; elle est en effet susceptible de changer pour toute cause de modification de la structure, naturelle (battance, tassement) ou artificielle (façon culturale provoquant une fragmentation ou au contraire un tassement) ; elle varie avec l'humidité dans les sols gonflants.

En déterminant la densité réelle et la densité apparente d'un volume de sol, on est à même de calculer la porosité de ce matériau qui s'exprime en % du volume apparent. La lecture des porosités d'un sol est en principe plus « réelle » que celle des densités apparentes.

Les estimations de ce paramètre pour le site d'étude sont présentées dans le tableau 3.

Le volume total de vides accessibles à l'air et à l'eau (porosité totale) est de 45 % pour le site expérimental.

Il est à noter qu'un horizon à faible porosité sera un horizon ayant une résistance mécanique plus importante à la pénétration des racines et il aura également un coefficient de perméabilité à l'eau nettement inférieur par rapport à un sol à porosité plus élevée.

En plus de ces paramètres, les humidités volumiques ( $\theta$ ) et à saturation ( $\theta_s$ ) ont été aussi déterminées pour les mêmes échantillons de sol prélevés au niveau de l'horizon de surface du site expérimental. Le principe de la perte de masse après passage à l'étuve à 105°C a été utilisé pour déterminer l'humidité résiduelle ( $H_r$ ) du sol. Mais celle-ci correspond à la perte de masse observée après passage à 105°C d'une prise d'essai de l'échantillon de sol préparé pour analyse, c'est-à-dire séché à l'air. Les mesures effectuées de ces paramètres sont données dans le tableau 3. Il a noté que l'humidité résiduelle du sol du site inférieure à 1% montre bien l'influence de la teneur élevée du sable au niveau du sol de l'essai expérimental.

**Tableau 3 - Mesures complémentaires**

Echantillon	H (%)	da	$\theta$ (%)	$\theta_s$ (%)	$H_r$ (%)	dr	P (%)
h (0-15 cm)	7,00	1,35	9,40	42,00	0,90	2,45	45,00



### III.3.6 Humidité pondérale

Des mesures gravimétriques et les charges (tensions) ont été réalisées avant et après irrigation au niveau des cotes des tensiomètres (15 – 30 – 45 et 60 cm). Un apport d'eau de 90 litres a été apporté, soit une dose d'irrigation de 60 mm pour la culture du site expérimental.

L'humidité varie beaucoup plus en surface, comme le montre le tableau 4. En effet, dans cette zone les effets conjugués des paramètres climatiques (évaporation directe du sol en plus du prélèvement par la culture, apport d'eau par irrigation et pluie) se font sentir davantage.

Avant irrigation, on constate une forte diminution de l'humidité dans l'horizon 0-15 cm. Après irrigation, la charge (tension) chute de 170 centibars à 15 centibars pour la couche de surface. Mais l'évolution est moins rapide en profondeur (> 45 cm). Au-delà de cette profondeur, le développement racinaire est probablement moins important.

**Tableau 4- Evolution de l'humidité pondérale et les charges avant et après irrigation**

Date : 09/03/2017 (avant irrigation)						
N°ech	Z (cm)	Tare	P. humide	P. sec	H (%)	Charge (centibars)
P1h1	15	33.93	107.89	99.37	13.02	77
P1h2	30	34.04	137.95	123.54	16.10	20
Date : 10/05/2016 (après irrigation)						
P1h1	15	33.93	92.09	81.74	21.7	15
P1h2	30	34.04	96.16	86	19.53	14

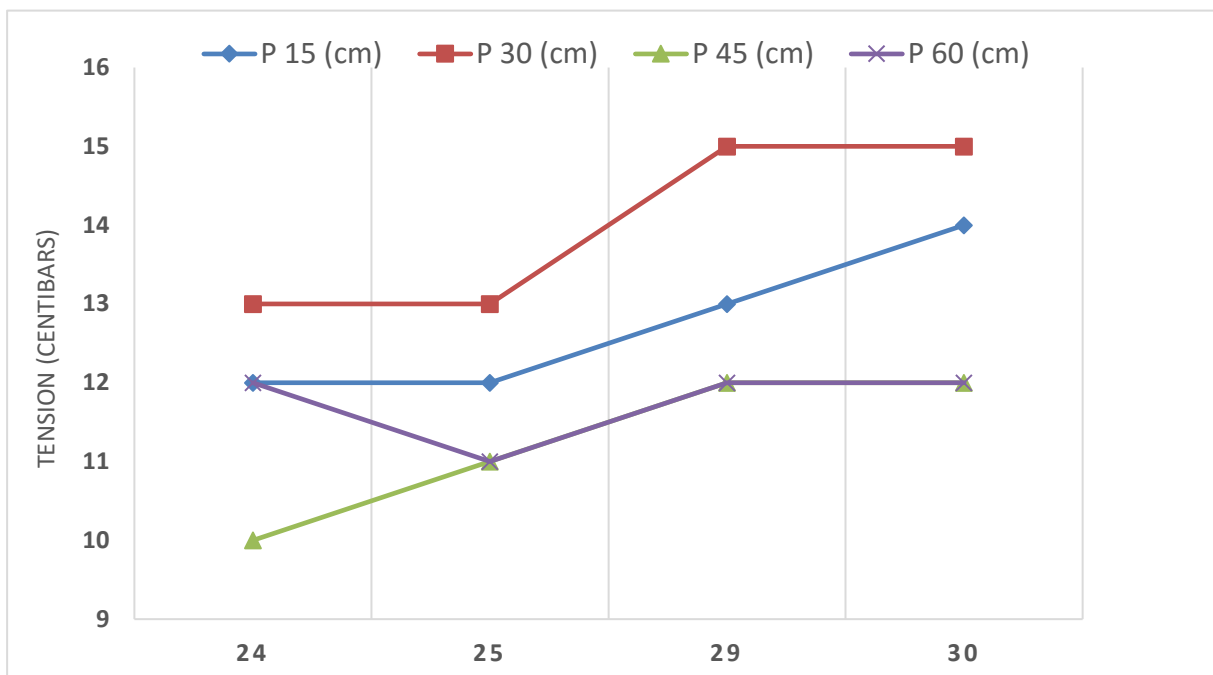
## III.4 Suivi des bilans et des flux d'eau

### III.4.1 Evolution des charges (ou tensions) sur le site d'étude

Le suivi de l'état hydrique du sol aux cotes (15 – 30 – 45 et 60 cm) a été effectué sur une période allant de mars à mai au niveau du site d'essai. Les mesures tensiométriques (en centibars) sont données en annexe 1 et reportées sur les figures 9, 10, 11, 12, et 13

L'humidité évolue progressivement en fonction du temps, comme le montre l'évolution des tensions (Figs. 9, 10, 11,12, et 13). Cette évolution est moins rapide durant les

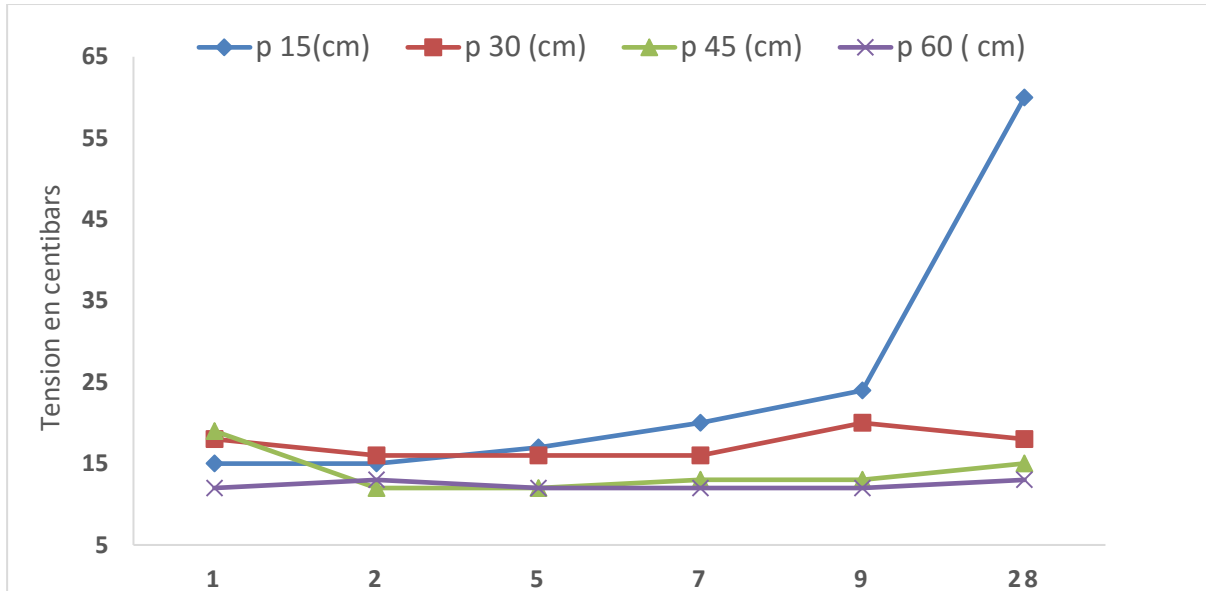
mois de mars et d'avril en raison de la faible demande climatique puis elle devient de plus en plus rapide en fonction de la hausse de l'évapotranspiration dans les couches supérieures du sol (0-30 cm). En effet, dans cette zone (profondeur de 30 cm) les effets conjugués des paramètres climatiques (évaporation directe du sol en plus du prélèvement par la culture, apport d'eau par irrigation et pluie) se font sentir davantage. Aux cotes 45 et 60 cm, la tension (charge) reste faible (< 30 centibars) durant toute la période d'étude. Cela signifie que l'on n'atteint pas l'utilisation complète de l'eau apportée ou bien le développement racinaire est probablement moins important à partir de cette profondeur (45 cm). Il est à noter que la tensiométrie peut alerter sur des aspects tels que l'évolution ou les accidents d'enracinement en cultures annuelles.



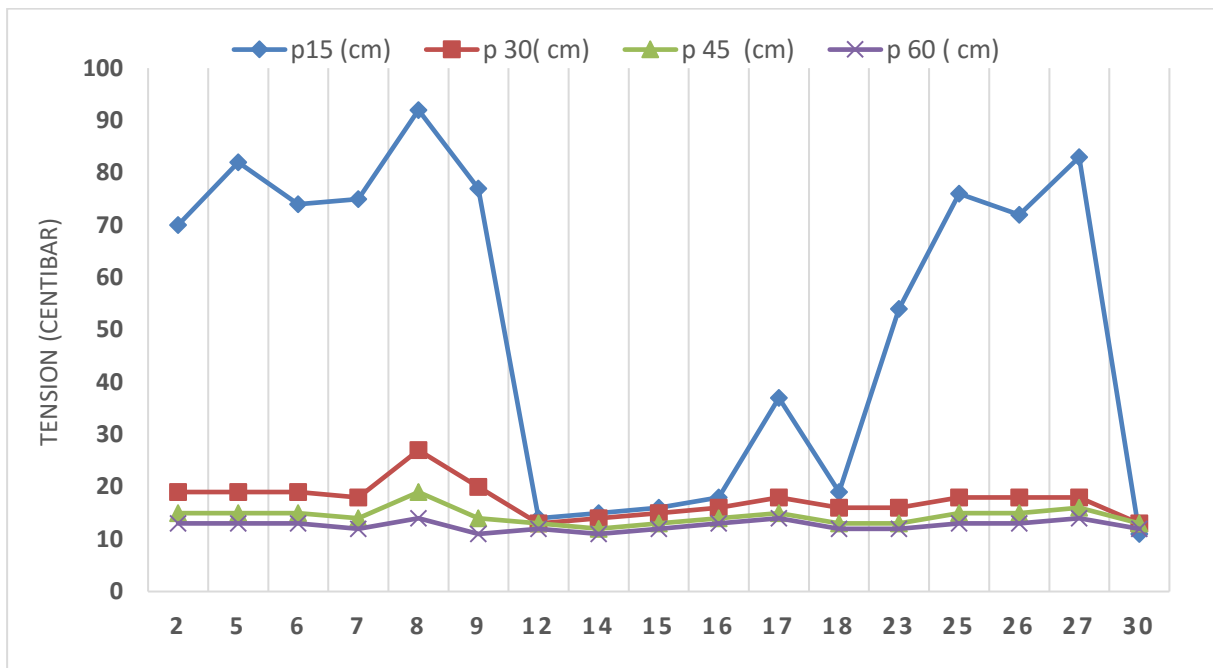
**Figure 9 - Évolution des tensions relevées durant le mois de janvier 2017 au niveau du site expérimental**

La figure 11 montre que la tension (charge) atteint 100 centibars au niveau de la profondeur de mesure (15 cm) et 25 centibars à la cote 30 cm, 18 jours après la première irrigation. À partir

de cette date (09/03/2017) l'effet de l'évaporation directe du sol et du prélèvement par la culture devient de plus en plus intense. Ainsi, l'écart entre les irrigations (fréquence d'arrosage) est réduit. Il oscille entre 09 et 13 jours pour des tensions de 144 à 161 centibars à la cote 15 cm et de 59 à 88 centibars à la cote 30 cm.

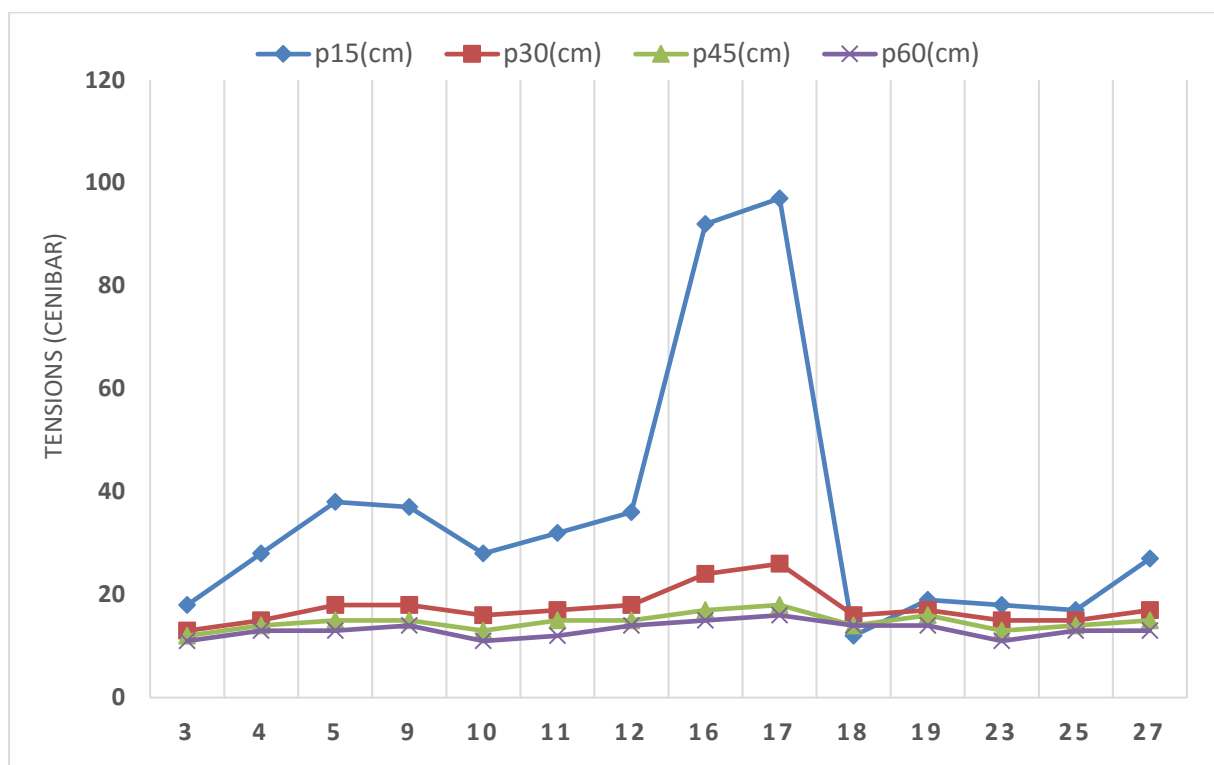


**Fig 10 - Évolution des tensions relevées durant le mois de février 2017 au niveau du site expérimental**



**Figure 11- Évolution des tensions relevées durant le mois de Mars 2017 au niveau du site expérimental**

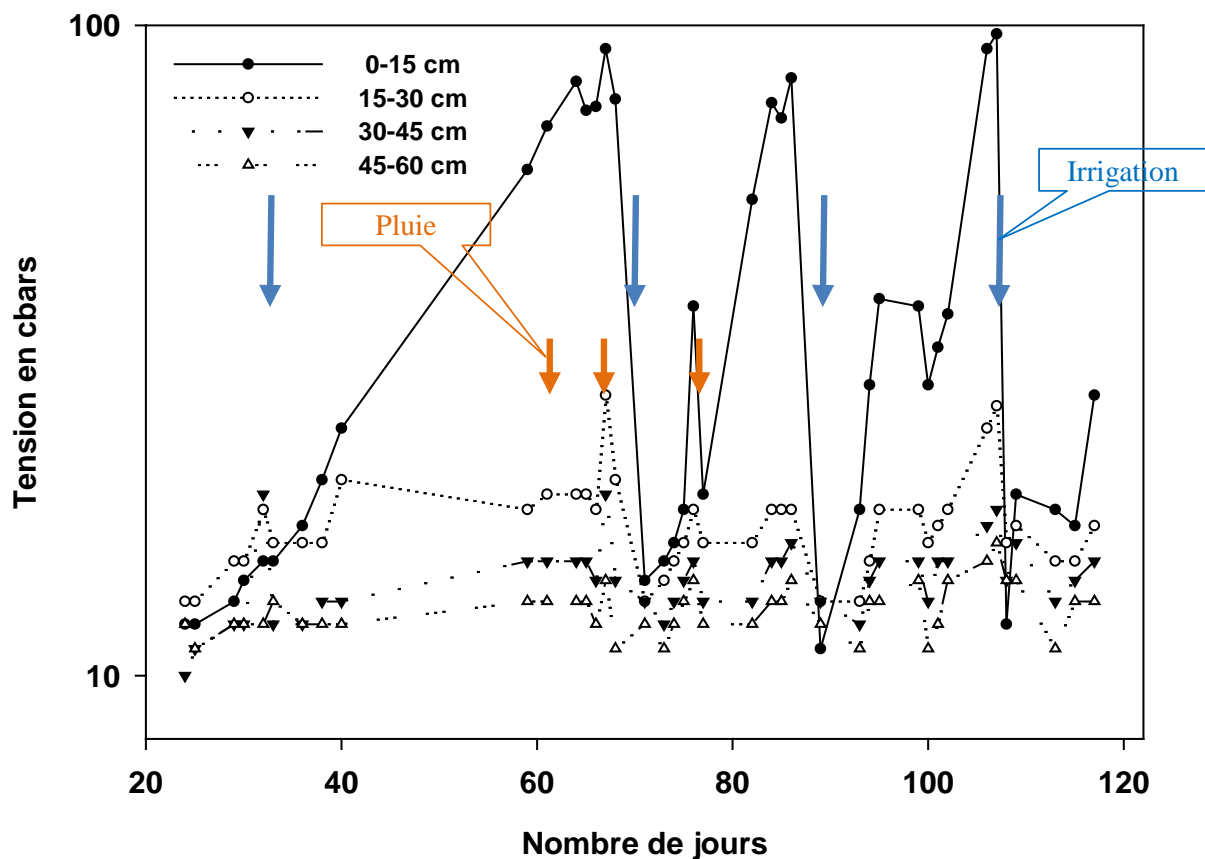
Pour une stratégie de pilotage, on abandonne les mesures à la cote 15 cm (incertitude de resaturation ultérieure de la bougie au-delà de 150 centibars avec les sondes Watermark) et on prend en considération celles de la cote 30 cm pour renouveler les arrosages.



**Figure12- Évolution des tensions relevées durant le mois d'avril 2017 au niveau du site expérimental**

L'apport d'eau est renouvelé donc chaque fois que la tension observée est entre 60 à 80 centibars à la cote 30 cm pour notre type de sol, afin de ne pas limiter le potentiel de production de la culture et sans risque d'entrave à la bonne circulation de l'eau dans le sol (possibilité de reconstituer les réserves par l'arrosage sur une profondeur de sol suffisante). Il est à noter qu'à 70 centibars, la réserve utile est épuisée à 50 % pour notre type de sol.

Une analyse sera faite en utilisant l'évolution du plan de flux nul dans le paragraphe suivant. Ces graphiques permettent de s'assurer de la cohérence des évolutions des charges, ce qui est très important pour valider les données. Il est cependant possible d'émettre l'hypothèse que le développement racinaire est probablement moins important à partir de la profondeur (45 cm) ce qu'a induit une exploration moins active des couches profondes, puisque les charges restent faibles à cette profondeur.



**Figure13 - Évolution des tensions relevées (en valeurs logarithmiques) au cours du cycle de la culture en fonction de la profondeur de sol considérée.**

La couche superficielle de 0-15 cm (Fig. 13) est non seulement affectée par les valeurs du potentiel matriciel, lui-même lié aux conditions météorologiques (température et évapotranspiration) du milieu mais aussi par les irrigations et les pluies. A un degré moindre, les couches inférieures sont aussi affectées par les variations saisonnières et les apports hydriques. Dans ce cas, les variations saisonnières et les apports d'eau touchent essentiellement la couche superficielle qui semble déterminante sur la croissance et le

développement de la culture en place. C'est pourquoi lors de l'étude des caractéristiques physicochimiques du sol nous avons particulièrement insisté sur cette couche.

En termes de gestion de l'irrigation, pour un pilotage adéquat, il semble que la couche superficielle est le lieu adapté à l'emplacement du tensiomètre responsable de l'arrêt de l'irrigation. En conséquence, la couche inférieure où se développe le système racinaire est le adapté au tensiomètre responsable de l'arrêt de l'irrigation.

### III.4.2 Evolution du plan de flux nul

Le plan de flux nul (PFN) a été déterminé visuellement, à partir des profils journaliers de charges établis systématiquement. Les figures 13 et 14 présentent quelques cas à titre d'illustration).

Il faut noter que lors de certaines périodes la détermination du plan de flux nul est difficile à cause des gradients de charges très faibles observés sur une partie du profil.

Il est intéressant d'observer le plan de flux nul (PFN) à 45 cm (à tout moment du cycle de la culture), profondeur à partir du quel nous avons dit que le développement racinaire est probablement moins important. Cela signifie que les couches profondes n'ont pas été sollicitées par la culture. Sur le site d'étude,.

Il est à noter que la tensiométrie peut alerter sur des aspects tels que l'évolution ou les accidents d'enracinement en cultures annuelles.

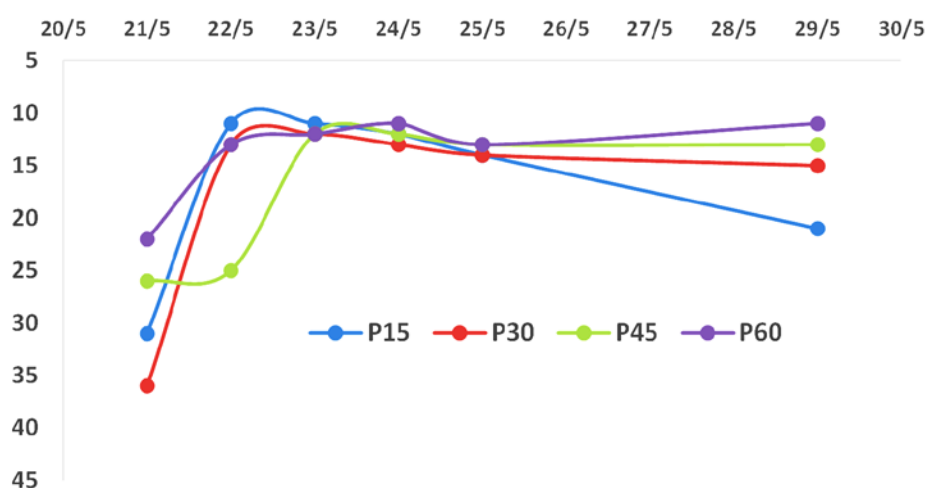


Figure 14 - Profils de charge (ou tension) durant le mois de mai 2017

# Conclusion

L'essai conduit, durant notre stage, qui s'est déroulé au niveau du laboratoire d'analyses de sol, I.N.S.I.D, El Matmar, Relizanous a permis de faire un suivi de l'évolution de l'état hydrique d'un sol cultivé par des mesures tensiométriques et gravimétriques.

En effet, il s'agit d'une parcelle cultivée par une culture pérenne (*Panicum virgatum* : Switchgrass) depuis 2010 et dont laquelle nous avons installé des tensiomètres à différentes profondeurs. Le sol de ce site n'a jamais été travaillé.

Partant du principe que les tensiomètres ne mesurent pas la quantité d'eau dans le sol, mais le potentiel matriciel de l'eau du sol, nous avons complété ce travail par des mesures gravimétriques et par la détermination des humidités caractéristiques (notamment à HCC et à HpF) du sol pour les besoins d'interprétation.

L'objectif précis de ce travail est de déterminer à quel moment, c.à.d. à partir de quelle lecture sur le tensiomètre, il faut déclencher l'irrigation pour que la culture ne subisse pas un déficit hydrique et par conséquent on limite la baisse de rendement.

Au regard des résultats obtenus au niveau du site d'étude, l'humidité évolue progressivement en fonction du temps, elle est moins rapide durant les mois de mars et d'avril en raison de la faible demande climatique puis elle devient de plus en plus rapide en fonction de la hausse de l'évapotranspiration dans les couches supérieures du sol (0-30 cm). En effet, dans cette zone (profondeur de 30 cm) les effets conjugués des paramètres climatiques (évaporation directe du sol en plus du prélèvement par la culture, apport d'eau par irrigation et pluie) se fait sentir davantage.

Pour une stratégie de pilotage, on abandonne les mesures à la cote 15 cm (incertitude de resaturation ultérieure de la bougie au-delà de 150 centibars avec les sondes Watermark) et on prend en considération celles de la cote 30 cm pour renouveler les arrosages.

L'apport d'eau est renouvelé donc chaque fois que la tension observée est entre 60 à 80 centibars à la cote 30 cm pour notre type de sol, afin de ne pas limiter le potentiel de production de la culture et sans risque d'entrave à la bonne circulation de l'eau dans le sol

(possibilité de reconstituer les réserves par l'arrosage sur une profondeur de sol suffisante). Il est à noter qu'à 70 centibars, la réserve utile est épuisée à 50 % pour notre type de sol.

L'évolution du plan de flux nul permet de s'assurer de la cohérence des évolutions des charges, ce qui est très important pour valider les données. Il est cependant possible d'émettre l'hypothèse que le développement racinaire est probablement moins important à partir de la profondeur (45 cm) ce qu'a induit une exploration moins active des couches profondes, puisque les charges restent faibles à cette profondeur.

Le plan de flux nul (PFN) a été déterminé visuellement, à partir des profils journaliers de charges établis systématiquement.

Il est intéressant d'observer le plan de flux nul (PFN) à 45 cm (à tout moment du cycle de la culture), profondeur à partir duquel nous avons dit que le développement racinaire est probablement moins important. Cela signifie que les couches profondes n'ont pas été sollicitées par la culture. Sur le site d'étude, on observe un drainage jusqu'au début juillet.

Il est à noter que la tensiométrie peut alerter sur des aspects tels que l'évolution ou les accidents d'enracinement en cultures annuelles.

Le présent travail montre le caractère opérationnel du tensiomètre pour le suivi de l'état de l'eau dans le sol et ils peuvent être utilisés en plein champ par les agriculteurs pour piloter l'irrigation. Cependant, Il convient de noter que la tensiométrie fournit des indications universelles concernant la disponibilité en eau pour les plantes, quel que soit le sol. Par contre, les mesures d'humidité nécessitent de connaître les valeurs limites de la capacité au champ et du point de flétrissement permanent.



# Références bibliographiques

**AIDAOUI et T.HARTANI**, Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique .Institut National agronomique EL Harrach – ALGER

**AIT. A., 1993**, conduite e traitements hydriques différenciés d'une culture de poivron.54p

**BELOUZ. K., 2007**, Simulation du bilan hydrique et des rendements de la culture du blé dur par le modèle Pilote. Institut National agronomique EL Harrach – ALGER p72.

**BERGERON. D, 2005**, Mieux irrigué avec les tensiomètres. Journées horticoles de Saint-Rémi 2005.

**CHOL. P., TRON. G., 2000**, La Tensimétrie pour piloter les irrigations. 95, 96, 97,100 p.

**DUCROQ, M., 1990**, Les bases de l'irrigation.117p

**REGIX (2006 6 – 2007)**. Rapports de résultats d'essais du réseau.

**LIDEA, 2007**Fiche culture Switchgrass.

**Elbersen H.W. et al.2002**, Switchgrass variety choice in Europe in Final Report " Switchgrass"

**Elbersen et al, 2004**.Switchgrass as an alternative energy crop,

**Energy Chains European.2006**.Bioenergy chains from perennial crops in South Europe, Final Report of the Bioenergie chains European

**FILALI. F., 2003**, Bilan hydrique à la parcelle. Pilotage d'un essai d'irrigation par le logiciel Pilote dans ses versions 1.2 et 1.3 utilisant respectivement le Kc et le LAI, Thèse magister, 167p.

**HILLEL. D., 1980**, L'eau et le sol, Principes et processus physiques, 294p

**HUGUET J-G. et ORLANDO P., 1987**, les besoins en eau de la bioprogrammation l'arboriculture fruitière, pp. 33 a 44.

ISBERIE. C et al., 1992. Irrigation.292p.

**LEULMI. S., 2004**, Simulation du bilan hydrique à la parcelle par le modèle Pilote (J.C Mailhol, Cemagref, Montpellier). Application à la Mitidja. Thèse ingénieur INA, 103p.

**Lewandowski et al. 2003; Biomass and Bioenergy 25 335-361**The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. **PERRIER. A., PERSONN. E., TUZET. A., ET ZURFLUH. O., 1988**, Bilan hydrique agropédoclimatique d'une culture.

**PEYREMORTE P. et ISBERIE C., 1986**, les tensiomètres permettent de contrôler l'irrigation par aspersion. RNEDHA, Montpellier, 8 p.

**RUELLE. P., et L. RIEUL, 2003**, Guide pratique irrigation (3e éd.), CEMAGREF.

**T. Semere & F. Slater, Cardiff University, 2005.**The effects of energy grass plantations on biodiversity.

**TRON G., ISBERIE C. et CHOL P., 2000**, la Tensiométrie pour piloter les irrigations, 88, 89, 145,147 p.

**URBAN. L., 1997**, Introduction à la production sous serre \_l'irrigation et fertilisation en culture hors sol, tome 2, Paris Lavoisier, 210p.

**VAN LEEUWEN C., CHONÉ X., TRÉGOAT O., GAUDILLÈRE J.P., 2001**, The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. The Australian Grapegrower and Winemaker, 449, 18-24.