

Université Abd el Hamid Ibn Badis

Mostaganem

Faculté des sciences de la

Nature et de la vie



جامعة عبد الحميد ابن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN AGRONOMIE

Spécialité : Gestion Durable de l'Environnement

THEME

**Conduite de l'irrigation gravitaire par pilotage
tensiométrique pour la conduite de *Panicum
virgatum*(halophyte)**

Présenté par

MOKEDDEM Zohra

DEVANT LE JURY:

Président: M.BENKHELIFA Mohamed Pr. Université de Mostaganem

Encadreur : M. KRADIA Laid CR. INSID, El Matmar, Relizane

Examineur : Mme. MIROUD Naima MAA. Université de Mostaganem

Thème réalisé au laboratoire de l'INSID OUEST El Matmar-Relizane

Année universitaire : 2015-2016

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude pour leur soutien tout au long de mes études.

Je ne trouverai jamais de mots pour exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour qu'ils m'accordent.

Mes frères : Ben Ameer et ses enfants, et Abd el Qader je vous aime énormément.

A toute ma famille

A mes chères amies :

Hafida, Ouafaa, sihem, khadidja

Mes collègues de promotion 2015/2016

Zohra

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions ALLAH de m' avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et suivre, le chemin de la science

*Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude s' adressent à mon encadreur: **Mr. KRADIA. Laid**, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa grande patience, ses encouragements, ses orientations et ses conseils précieux.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury dont **Mr. BENKHELLIFA Mohamed**. Professeur à l'université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury, **Mme. MIROUD Naima**, pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour son soutien et ses conseils. 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.

Sommaire

Introduction.....	01
CHAPITRE I : Méthodes d'estimation du bilan hydrique.....	03
Généralités.....	03
I.1 Suivi des bilans hydriques.....	05
I.1.1 Mesure de l'humidité.....	05
I.1.1.1 Mesure de l'humidité par sonde a neutrons.....	05
I.1.1.2 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique.....	06
I.1.2 Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres.....	07
I.2 Etude de la tension du sol.....	08
I.2.1 Qu'est-ce que la tensiométrie ?.....	08
I.2.2 Principes de fonctionnement du tensiomètre.....	08
I.2.3 Pourquoi choisir le tensiomètre ?.....	08
I.2.4 Que lit-on sur un tensiomètre ?.....	09
I.2.5 Comment mettre en œuvre la tensiométrie sur sa parcelle ?.....	09
I.2.6 Le cycle de Préparation et installation des tensiomètres	10
a/ Préparation du tensiomètre	10
b/ Endroit propice à l'installation des tensiomètres.....	10
c/ Détermination de la profondeur à laquelle les tensiomètres doivent être placés....	10
d/ Détermination de la distance latérale des appareils par rapport aux points	
d'irrigation.....	10
e/ Installation du tensiomètre.....	11
f/ Point à surveiller	11
I.2.7 Répartition des appareils ; déplacement en cas d'informations non significatives.....	11
I.2.8 Seuils repères pour le pilotage de l'irrigation.....	12
I.2.9 Mise en place de cette technologie sur l'exploitation agricole.....	12
I.2.10 Relation entre succion et eau disponible dans le sol.....	13
I.2.11 Sondes Watermark	13
Qu'est-ce qu'une sonde Watermark ?.....	13
I.2.1 2 Utilisation de la tensiométrie.....	14
I.2.1 3 Avantages et inconvénients des sondes Watermark par rapport aux tensiomètres...	15
I.3 Les tensiomètres dans le pilotage de l'irrigation.....	15
I.3.1 Le pilotage	16
I.3.2 Rôle du pilotage de l'irrigation.....	16
I.3.3 Principe de pilotage tensiométrique	17
I.3.4 Stratégie de mise en œuvre.....	17
I.3.5 Piloter l'irrigation par aspersion grâce à la tensiométrie.....	17
I.3.5.1 Principes de base.....	17
I.3.5.2 Stratégie de pilotage.....	17
I.3.6 Définition et signification de la profondeur et de la tension de référence.....	18
I.3.7 Piloter l'irrigation « goutte à goutte » grâce à la tensionométrie	19
I.3.7.1 Principes de base.....	19
I.3.7.2 Stratégie de pilotage.....	19
Généralités.....	20
I.3.7.3 Aspects pratiques.....	20

I.4 La culture : Le switchgrass (<i>Panicum virgatum</i>).....	21
I.4.1 Impacts environnementaux	22
I.4.2 Intérêt agronomique et écologique.....	22
CHAPITRE II : Matériels et méthodes.....	24
II.1. Présentation du site d'étude.....	24
II.1.1. Climat.....	25
II.1.2. La culture.....	25
II.1.3. Dispositif expérimental.....	25
II.2. Suivi des bilans hydriques.....	26
II.2.1. Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres.....	26
II.2.2. Mesures complémentaires.....	29
II.2.2.1 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique.....	30
II.2.2.2 Mesure des densités.....	30
II.2.2.3 Mesure de l'humidité en fonction du Pf.....	30
II.2.2.4 Analyse granulométrique.....	31
II.2.2.5 Suivi des apports d'eau.....	32
II.2.2.6 Mesure de pH et de la salinité du sol.....	32
CHAPITRE III : Résultats expérimentaux.....	33
III.1 Caractéristiques du sol du site expérimental.....	33
III.1.1 Texture du sol.....	33
III.1.2 Humidités caractéristiques.....	34
III.1.3 Densité apparente du sol.....	34
III.1.4 Densité réelle du sol.....	35
III.1.5 Porosité totale du sol.....	35
III.1.6 Humidité pondérale.....	36
III.2 Suivi des bilans et des flux d'eau.....	36
III.2.1 Evolution des charges (ou tensions) sur le site d'étude.....	36
III.2.2 Evolution du plan de flux nul.....	39
Conclusion.....	41
Références bibliographiques.....	43

Liste des abréviations

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
D: drainage
R : ruissellement
N : profondeur du sol
N0 : mesure de référence
Z : la profondeur de la couche du sol

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma de deux cas de calcul du bilan hydrique sous culture.....	04
Figure 1.2 : Batterie de tensiomètres connectés à un manomètre à mercure.....	07
Figure 1.3 : Pourcentage de la réserve utile épuisée en fonction de la tension.....	13
Figure 1.4 : Schéma d'une sonde Watermark.....	14
Figure 3.1 : Distribution granulométrique sur le site expérimental à différentes profondeurs.....	33
Figure 3.2 : Relation entre tension et contenu en eau du sol du site expérimental à différentes profondeurs.....	34
Figure 3.3 : Evolution des tensions relevées durant le mois de Mars 2016 au niveau du site expérimental.....	37
Figure 3.4 : Evolution des tensions relevées durant le mois d'Avril 2016 au niveau du site expérimental.....	37
Figure 3.5 : Evolution des tensions relevées durant le mois de Mai 2016 au niveau du site expérimental.....	37
Figure 3.6 : Evolution des tensions relevées durant le mois de Juin 2016 au niveau du site expérimental.....	38
Figure 3.7 : Evolution des tensions relevées durant le mois de Juillet 2016 au niveau du site expérimental.....	38
Figure 3.8 : Evolution des tensions relevées au cours du cycle de la culture.....	39
Figure 3.9 : Profils de charge (ou tension) durant le mois d'Avril 2016.....	40
Figure 3.10 : Profils de charge (ou tension) durant le mois de juin 2016.....	40

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle (moyenne sur 25ans).....	25
Tableau 3.1 : Mesures complémentaires.....	36
Tableau 3.2 : Evolution de l'humidité pondérale et les charges avant et après irrigation.....	36

RESUME

L'irrigation est essentielle en climat semi aride. En plus de générer de meilleurs rendements, elle permet aussi l'approvisionnement régulier demandé en produits de qualité.

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.

La connaissance de l'état hydrique du sol par des mesures tensiométriques porte directement sur l'amélioration de l'irrigation et de son pilotage visant à proposer aux agriculteurs des méthodes de pilotage de leur irrigation (méthodes permettant de juger de l'opportunité d'irriguer). Cette méthode est considérée comme étant la plus opérationnelle, simple et susceptible d'être appliquée sans difficultés majeures chez l'agriculteur.

Elle peut conduire l'irrigant à faire des économies d'eau et à réduire le drainage et par là même les risques environnementaux.

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.

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'apport d'eau est renouvelé 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.

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 champs 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.

Mots clés :

Tensiomètre, tension, teneur en eau du sol, pilotage, irrigation, stress hydrique.

ABSTRACT

Irrigation is essential in semi arid climate. In addition to generating higher returns, it also allows the regular supply requested quality.

Irrigation is very useful, but it requires in return an excellent governance: we must apply the right amount of water at the right time to avoid excess, unwanted water stress and loss of water and fertilizer in the environment.

To ensure good governance of water, it is first necessary to know the needs of culture and the variation there of according to the stage of development. Also, it is imperative to regularly measure the soil water content. This information will clarify the moment conducive to irrigation and especially if the amounts applied are insufficient or excessive in relation to soil type and the need for culture.

Knowledge of soil water status by tensiometric measures relates directly to improved irrigation and its management to provide farmers with their irrigation management methods (methods to judge the appropriateness of irrigate). This method is considered the most functional, simple is likely to be applied without major difficulties for the farmer.

It can lead the irrigator to save water and reduce drainage and hence environmental risks.

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

The specific objective of this work is to determine when, ie from any playback on the monitor, you have to start irrigation for that culture will not suffer water deficit and therefore we limit the drop in yield.

Considering the results obtained at the study site, the water supply is renewed each time the voltage is observed between 60-80 centibars for trading 30 cm for our type of soil, so as not to limit the production potential of culture and risk of obstructing the smooth flow of water in the soil (can replenish by sprinkling on a sufficient depth of ground). It is noteworthy that 70 centibars, the useful is depleted to 50% for our type of soil.

The present work shows the operational nature of the monitor to track the state of the water in the soil and can be used in open fields by farmers to control irrigation. However, it should be noted that the universal tensiometric provides guidance on the availability of water for plants, whatever the ground. For cons, the humidity measurements need to know the limits of the field capacity and the permanent wilting point.

Keywords:

Pressure, water content of the soil, control, irrigation, water stress

ملخص

الري ضروري في مناخ شبه الجاف. بالإضافة إلى تحقيق مردود أفضل، كما أنه يسمح بإمدادات منتظمة مطلوبة في إنتاج النوعية.

الري مفيد جداً، لكنه يتطلب في المقابل تطبيق كمية مناسبة من الماء في الوقت المناسب لتجنب الإصراف، والإجهاد غير المرغوب في المياه وفقدان المياه والأسمدة في البيئة.

لضمان التسيير العقلاني للمياه، فمن الضروري أولاً معرفة احتياجات النبتة وتغييرها خلال مرحلة تطورها. أيضاً، لا بد من القياس المنتظم لكمية الماء في التربة. هذه المعلومة تحدد الوقت الملائم للري وخاصة إذا كانت الكميات المطبقة غير كافية أو مفرطة مقارنة بنوعية التربة واحتياجات النبتة.

معرفة حالة المياه في التربة بقياسات ضغط المياه في التربة تتصل مباشرة إلى تحسين الري واقتراح إرشادات للمزارعين مع أساليب الري.

ويمكن أن يؤدي الري لتوفير المياه وتقليل الصرف ومخاطر البيئة.

ومن هذا المنظور الذي سجلنا خلاله تدريبنا ، الذي تم اجراءه على مستوى مخبر تحليل التربة، I.N.S.I.D، المطمر – غليزان-. لقد سمح لنا بمراقبة تطور الوضع المائي في التربة المزروعة من قبل قياسات الضغط والجاذبية.

الهدف المحدد لهذا العمل هو تحديد متى، أي من أي قراءة على الشاشة، عليك أن تبدأ الري لكي لا تعاني هذه النبتة عجزاً مائياً وبالتالي علينا أن نحد من انخفاض في العائد.

وبالنظر إلى النتائج التي تم الحصول عليها في موقع الدراسة، ويتم تجديد إمدادات المياه في كل مرة لوحظ الجهد بين 60-80 (cbr) عن التداول 30 سم لدينا نوع من التربة، حتى لا تحد من إمكانية إنتاج النبتة ومخاطر عرقلة انسيابية المياه في التربة (يمكن تجديد بالرش على عمق كاف من الأرض). ومن الجدير بالذكر أن 70 (cbr)، واستنفاد مفيدة إلى 50٪ لدينا نوع من التربة.

ويظهر هذا العمل إلى الطبيعة التشغيلية للرصد لتتبع حالة المياه في التربة، ويمكن استخدامها في الحقول المفتوحة من قبل المزارعين للسيطرة على الري. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن توجيهات بشأن توافر المياه للنباتات، مهما كانت الأرض. للسليبيات، وتحتاج إلى قياسات الرطوبة لمعرفة حدود السعة الحقلية ونقطة الذبول الدائم.

كلمات البحث:

الضغط والمحتوى المائي للتربة، والسيطرة، والري، وندرة المياه.

INTRODUCTION

L'irrigation est essentielle en climat semi aride. En plus de générer de meilleurs rendements, elle permet aussi l'approvisionnement régulier demandé en produits de qualité.

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. Le tensiomètre constitue un excellent investissement et présente encore actuellement l'un des meilleurs rapports qualité/prix. Les agriculteurs, de part le monde, ayant opté pour ce type d'équipement depuis quelques années se 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.

Les utilisateurs des tensiomètres avaient constaté que le besoin d'irrigation variait grandement selon plusieurs facteurs (type de sol, pluviométrie, température de l'air, ensoleillement, stade de croissance de la plante et humidité du sol en profondeur). C'est pourquoi sa régie d'irrigation était maintenant basée sur les données obtenues à partir des tensiomètres par des lectures quotidiennes et systématiques.

La connaissance de l'état hydrique du sol par des mesures tensiométriques porte directement sur l'amélioration de l'irrigation et de son pilotage visant à proposer aux agriculteurs des méthodes de pilotage de leur irrigation (méthodes permettant de juger de l'opportunité d'irriguer). Cette méthode est considérée comme étant la plus opérationnelle, simple est susceptible d'être appliquée sans difficultés majeures chez l'agriculteur. Elle peut conduire l'irrigant à faire des économies d'eau et à réduire le drainage et par là même les risques environnementaux.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre stage dans le cadre de la préparation de mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master « Gestion Durable de l'environnement ». Il s'est déroulé au niveau du laboratoire d'analyses de sol, INSID, El Matmar, Relizane. Ce laboratoire relève de l'institut national des sols de l'irrigation et du drainage, INSID.

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 placette de 1.5 m², avec une culture pérenne (*Panicum virgatum* : Switchgrass) installée depuis 2010 et dont laquelle nous avons installé des tensiomètres à différentes profondeurs. Le sol de ce site n'a jamais été travaillé.

Ce document s'organise de la manière suivante :

Le premier chapitre présente les outils de conduite de l'irrigation fondés sur la mesure de l'état hydrique du sol.

Le deuxième chapitre est consacré à la partie expérimentale. Il décrit les suivis effectués pour connaître l'état hydrique du sol de notre site d'étude.

Les résultats des différentes mesures effectuées durant notre stage sont exposés et discutés dans le troisième chapitre.

CHAPITRE I : Méthodes d'estimation du bilan hydrique

Généralités

C'est dans les couches superficielles du sol, appelée classiquement zone non saturée, que se situent les réserves en eau utilisables par les plantes et qu'ont lieu l'essentiel des transferts conduisant à l'infiltration, à l'évaporation et l'évapotranspiration ainsi qu'à la fixation, la biodégradation et à la percolation des composés organiques et minéraux.

Dans l'hypothèse d'un écoulement essentiellement vertical, la méthode permettant la détermination au champ sous culture et sur sol nu des flux est la méthode du plan de flux nul. La méthode du plan de flux nul (PFN) consiste à suivre l'évolution naturelle, sous culture ou en sol nu, des teneurs en eau et des pressions entre deux périodes d'apport d'eau. Quelques jours après un apport d'eau, le sol présente une zone supérieure soumise à l'évaporation et une zone en profondeur soumise au drainage. Par continuité, il existe entre ces 2 zones un niveau où le flux est nul (fig 1.1. a).

La méthode du plan de flux nul présente l'avantage de conduire à l'estimation simultanée du drainage et de l'évaporation : La variation de stock entre la surface du sol et le plan de flux nul moyen entre deux dates représente l'évaporation, tandis que celle au dessous correspond au drainage. Par contre la méthode est tributaire de la présence d'un plan de flux nul dans le profil, qui doit de plus être situé au delà de la profondeur maximale d'enracinement si une culture est en place. Il convient en outre de disposer d'une période de ressuyage assez longue pour couvrir une gamme d'humidité conséquente.

En fin, cette méthode est quelque peu délicate à mettre en œuvre en raison de la difficulté à faire apparaître le PFN et à suivre son évolution. Ainsi, de même pour la méthode de détermination in situ du drainage interne. Elle repose sur l'analyse de la redistribution de l'eau dans un profil vertical du sol, après une humidification par un apport d'eau à sa surface à l'aide d'infiltromètres simples ou double-anneaux ou de simulateurs de pluie.

Le sol est schématisé sous la forme d'un réservoir de capacité égale à la réserve utile RU, dans lequel sont stockés les apports discontinus (pluie P et irrigation I) diminués des pertes par drainage D ou ruissellement R ; les plantes s'alimentent dans ce réservoir et prélèvent un volume égal à ETR. Les apports d'eau par remontées capillaires (Rc) sont difficiles à estimer avec précision.

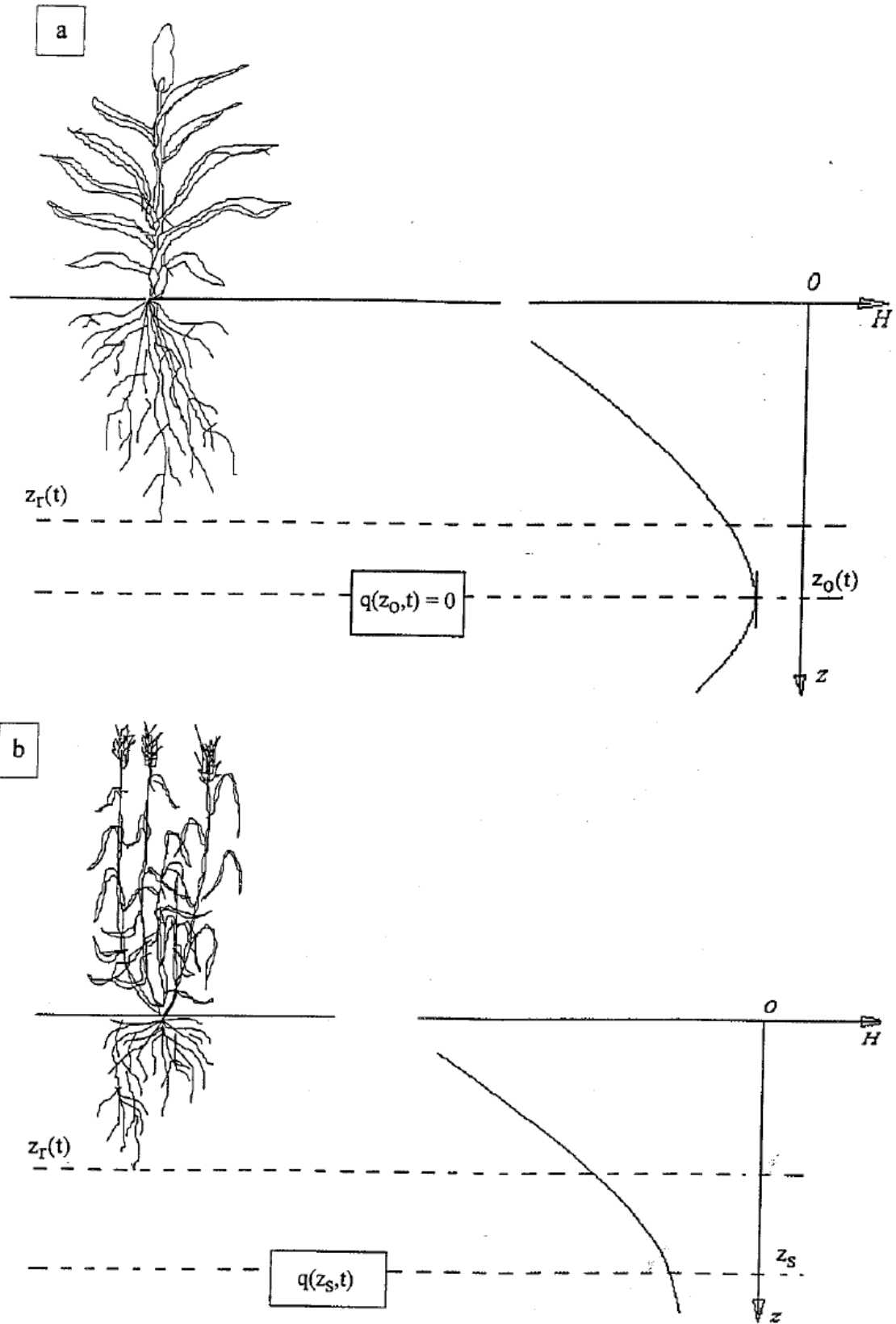


Figure 1.1 Schéma de deux cas de calcul du bilan hydrique sous culture (d'après Ruelle, 1995)

I.1 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.

I.1.1 Mesure de l'humidité

Nous présentons dans ce chapitre deux méthodes pour la mesure de l'humidité.

I.1.1.1 Mesure de l'humidité par sonde a neutrons

La sonde à neutrons mesure l'humidité volumique du sol en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides d'être ralentis (thermalisés) préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau.

Les mesures se font au moyen d'un tube en alliage d'aluminium, enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence. L'interaction entre neutron-aluminium est pratiquement nulle, d'où le choix de ce matériau. Un bon contact entre le sol et le tube est une condition essentielle à la précision de la mesure. La source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium) est amenée à la profondeur désirée, accompagnée du détecteur de neutrons lents. La mesure consiste à compter pendant un temps déterminé le nombre de neutrons thermalisés qui reviennent vers la sonde, et qui est proportionnel à l'humidité volumique du sol.



Humidimétrie neutronique

La mesure par sonde à neutrons prend en compte un volume d'échantillon plus important que les prélèvements à la tarière, annulant ainsi l'effet de certaines micro-hétérogénéités du sol. Le rayon théorique de la sphère d'influence R (qui est plutôt un ellipsoïde allongé selon l'axe du tube d'accès) peut varier dans une gamme de 7 à 15 cm pour un sol humide, et de 10 à 25 cm pour un sol sec (Hillel, 1974 in kradia.L, 2007).

Ses avantages : rapidité d'exécution et bonne précision sur des périodes assez longues ; facile à maîtriser ; le dispositif (tube) ne détruit quasiment pas le sol. Cependant, son utilisation présente des risques et nécessite d'une réglementation stricte du fait de la présence d'une source radioactive ; son coût d'achat reste élevé.

Étalonnage de l'appareil :

Il permet de passer du comptage des neutrons à la mesure d'humidité, en tenant compte aussi des éléments chimiques du sol (atomes d'hydrogène de la matière organique...) et de sa densité, raison pour laquelle l'étalonnage est différent selon la profondeur.

La relation est de la forme : $\theta = a \times (N/N_0) + b$

Avec N, comptage à une profondeur du sol et N₀, la mesure de référence obtenue dans un fût de 200 litres d'eau au centre duquel est disposé un tube d'accès en aluminium d'environ 1.2 m de long. Le protocole impose dix mesures avant et dix mesures après celles au champ, de façon à établir une moyenne et évaluer les écarts.

L'étalonnage consiste à obtenir une fonction du type $\theta = f(N/N_0)$, à partir de données de densité apparente (Da) à diverses profondeurs jumelées avec des valeurs d'humidité pondérales (Hp) aux mêmes cotes selon la formule : $\theta = Da \times Hp$.

I.1.1.2 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique

La méthode gravimétrique est à la fois la plus ancienne, la plus facile à mettre en œuvre et la plus fiable des méthodes. Elle consiste simplement à prélever un volume connu de matériau terreux et à déterminer la masse d'eau qu'il contient.

La méthode gravimétrique consiste à peser la masse initiale d'un échantillon de terre, puis de le passer à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures et de peser sa masse finale, la différence étant la masse d'eau contenue initialement dans l'échantillon. L'humidité pondérale Hp est le rapport de la masse d'eau sur la masse de la terre sèche.

Nous calculons l'humidité volumique Hv correspondante grâce aux mesures de densité apparente (Da). Pour cela, nous utilisons la formule : $H_v = H_p \times D_a$.



Le calcul de la réserve utile est obtenu grâce à la formule : $RU = (h_{cc} - h_{pf}) \times D_a \times Z$, avec h_{cc} : l'humidité à la capacité au champ du sol (pF : 2.4), et h_{pf}, celle du point de flétrissement permanent (pF : 4.2). Z, étant la profondeur de la couche du sol considérée.

I.1.2 Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres

Ce principe de mesure, a la fois aisé de mise en œuvre mais aussi d'une excellente fiabilité, rend de très nombreux services, tant sur le terrain pour le pilotage de l'irrigation qu'en instrument de contrôle du potentiel hydrique en appui à des expérimentations scientifiques.

Le tensiomètre permet de mesurer la charge hydraulique du sol. Il est constitué d'une bougie en céramique poreuse fixée à l'extrémité d'un tube, enfoncé dans le sol à la profondeur souhaitée.

Le système ainsi mis en place autorise des échanges osmotiques à travers la paroi poreuse. Si l'humidité vient à baisser, il se produit une dépression à l'intérieur du système. De même, lorsque le sol s'humidifie, la tension baisse. Lorsqu'il est saturé, elle est nulle.

Les valeurs mesurées par le boîtier des tensiomètres WaterMark, modèles utilisés dans notre essai, indiqueront donc quand il est nécessaire d'irriguer. Ces types de tensiomètres sont gradués de 0 à 200 centibars et certains modèles le sont de 0 à 40.

Pour déterminer le sens de l'écoulement il suffit d'installer une batterie de tensiomètres à différentes profondeurs dans le sol (figure 1. 2).

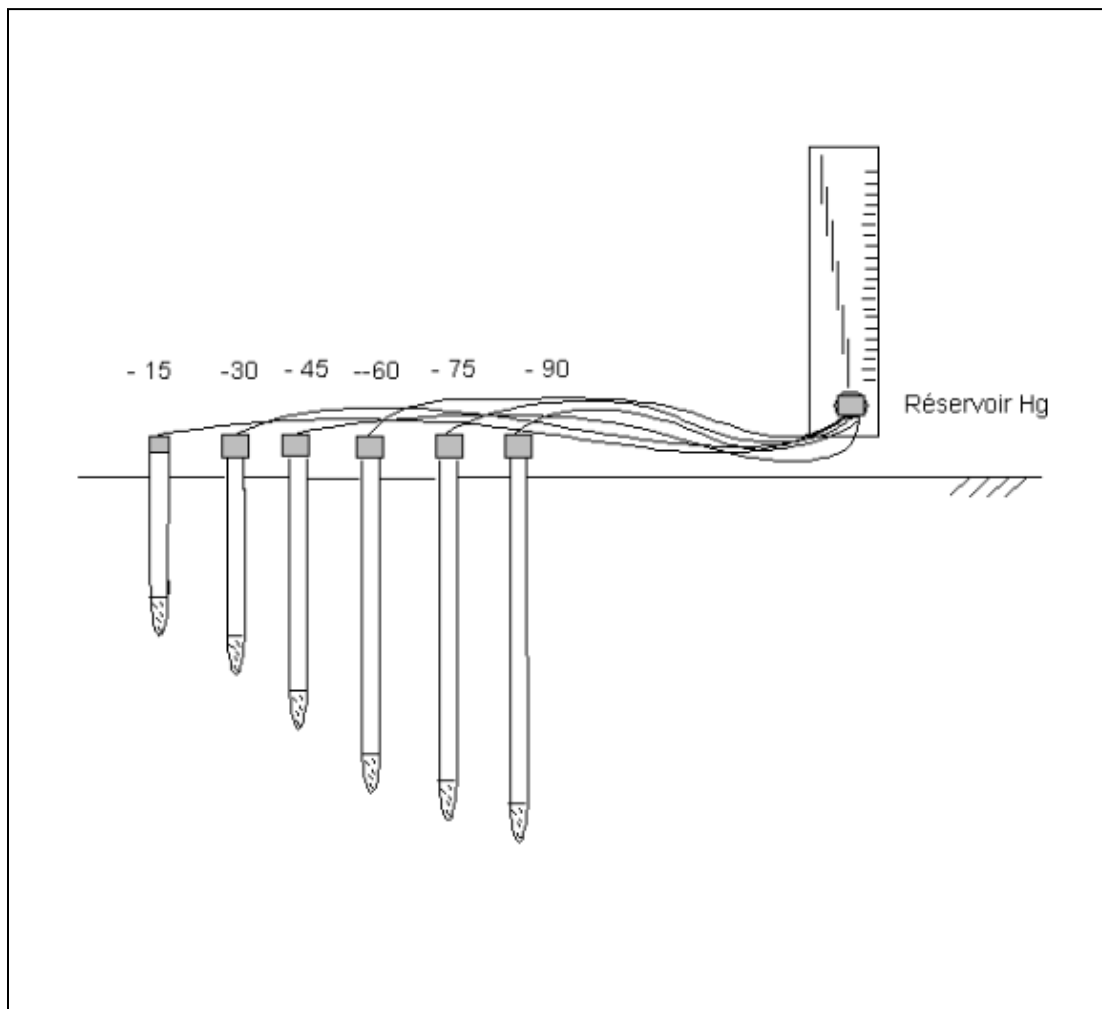


Figure 1.2 : Batterie de tensiomètres connectés à un manomètre à mercure

I.2 Etude de la tension du sol

L'utilité de renouveler les réserves en eau du sol, par l'irrigation, n'est effective que lorsque ces réserves se sont amoindries au point de ne plus satisfaire les besoins de la culture. Les techniques de mesure permettant de connaître la disponibilité en eau du sol sont multiples, cependant, elles ne sont pas adaptées aux exigences de la pratique agricole. C'est pour cette raison que l'on s'est longtemps contenté d'estimer, parfois très empiriquement, les besoins d'irrigation d'une culture.

Les méthodes de mesure de la disponibilité en eau du sol sont nombreuses, mais la plupart s'avèrent mal adaptées aux exigences de la pratique agricole (importance des manipulations nécessaires, couts des équipements et/ ou manque de fiabilité des informations)

La tensiométrie constitue un moyen pratique pour évaluer l'évolution de l'état hydrique du sol.

I.2.1 Qu'est-ce que la tensiométrie ?

Le sol est doté d'une aptitude à stocker l'eau. Il joue un rôle de réservoir pour les plantes. La tensiométrie est une technologie permettant de mesurer l'état de ce réservoir.

Elle consiste à mesurer la tension exercée par le sol pour retenir l'eau : la force de succion du sol. Moins il y a d'eau dans le sol, plus cette force est grande.

Par la tensiométrie, on visualise la dynamique de l'eau dans le sol et la reconstitution de sa réserve. Le tensiomètre, ou sonde tensiométrique, est l'appareil sur lequel on relèvera la mesure. L'information relevée est la force que doit développer la plante pour extraire l'eau du sol.

I.2.2 Principes de fonctionnement du tensiomètre

Les tensiomètres utilisés pour la mesure de la tension de l'eau dans le sol sont des appareils communs constitués d'une bougie poreuse reliée à un tube qui doit être rempli d'eau dégazée et fermé d'une façon étanche. Le tube se termine par un manomètre indiquant les valeurs de pressions. La bougie du tensiomètre est enfoncée dans le sol de la parcelle à une profondeur précise. Quand le sol se dessèche, la bougie du tensiomètre lui procure de l'eau et quand il est arrosé, l'eau revient dans l'appareil. La dépression engendrée par les allers-retours de l'eau par rapport à la pression atmosphérique ambiante est mesurée par un manomètre. La tension correspond, en effet, à la valeur de cette dépression affichée sur le manomètre.

Les tensiomètres mesurent au niveau des racines la tension en eau du sol, c'est-à-dire la force que les racines doivent déployer pour extraire l'eau du sol. Cette tension est exprimée en centibar (cbar). Plus la tension monte, moins l'eau est disponible pour la plante.

I.2.3 Pourquoi choisir le tensiomètre ?

Utiliser la tensiométrie pour piloter son irrigation présente de nombreux avantages. La sonde tensiométrique est un outil robuste et relativement peu onéreux, qui ne nécessite pas d'entretien particulier et dont la durée de vie est de 3 à 5 ans. Elle est simple d'utilisation et les mesures relevées sont précises : elles permettent d'ajuster au mieux les apports d'eau sur une culture.

Le tensiomètre facilite grandement les décisions de déclenchement de l'irrigation : pour la 1ère irrigation d'un cycle de culture, pour redémarrer l'irrigation après une pluie, pour réaliser ou non une dernière irrigation avant récolte, etc ...

La tensiométrie constitue une alternative intéressante à la méthode traditionnelle du bilan hydrique. Celui-ci considère la réserve utile du sol (RU), la culture en place, et la demande climatique en eau (évapotranspiration potentielle - ETP). Il permet de savoir combien de jours la culture peut tenir sans apport d'eau. Il implique de mesurer les pluies et les irrigations pour connaître à tout moment la quantité d'eau disponible dans le sol. Le bilan hydrique nécessite au départ de connaître l'état de la RU de son sol et l'évapotranspiration réelle de sa culture, ce qui n'est pas toujours évident (données à se procurer à l'office de la météorologie). La tensiométrie est de ce fait un moyen plus facile et pratique pour gérer son irrigation. L'utilisation d'une sonde tensiométrique permet de gagner en précision et de réduire les risques d'erreur dans l'évaluation de la réserve en eau et ainsi d'éviter le stress hydrique des cultures.

I.2.4 Que lit-on sur un tensiomètre ?

La lecture d'un tensiomètre permet de mesurer une tension correspondant à l'état de la Réserve Facilement Utilisable (RFU), portion de la RU dans laquelle la plante est en situation de confort hydrique lui permettant de croître et de produire.

Il existe deux types d'appareil :

- Le tensiomètre à eau, doté d'une plage de mesure de 0 à 80 centibars (utilisable en pratique pour un pilotage de l'irrigation entre 0 et 60 cb).

Ce type d'appareil devient obsolète et n'est plus recommandé aujourd'hui car moins facile à utiliser que la sonde électrique. Il se désamorce au dessus de 80 cb et le suivi est donc interrompu.

- Le tensiomètre électrique (Watermark), doté d'une plage de mesure de 0 à 200 centibars (utilisable en pratique, pour un pilotage de l'irrigation entre 0 et 140 cb).

La lecture de la sonde tensiométrique permet de mesurer la RFU. Sur la plage de mesure d'une sonde Watermark, la RFU est pleine à 0 cb et elle est vide à 200 cb. Il faut préciser que c'est l'évolution des mesures relevées qui aide au pilotage des irrigations et non la valeur intrinsèque de chaque mesure.

Cette méthode de suivi des irrigations donne des seuils de tension variables par type de sol, par système d'irrigation et par culture pour maintenir à tout moment un état de confort hydrique pour la plante.

I.2.5 Comment mettre en œuvre la tensiométrie sur sa parcelle ?

La tensiométrie n'est représentative que si les sondes sont bien positionnées et réparties sur la parcelle étudiée. En effet, l'hétérogénéité du sol, de la répartition de l'irrigation et celle de la culture sur la parcelle peuvent être sources d'erreurs. Pour limiter ces erreurs potentielles, on multipliera alors les points de mesures sur la surface concernée.

Deux à trois stations de mesures doivent être installées sur chaque parcelle de 1 à 5 hectares suivant l'hétérogénéité du sol. Chacune de ces stations est composée de 2 à 3 sondes mesurant à différentes profondeurs. Les profondeurs à mesurer dépendent de l'enracinement de la culture. Toutefois, une sonde plus profonde que l'enracinement de la plante est également utile pour étudier les mouvements de l'eau dans le sol et les remontées par capillarité.

Les sondes sont positionnées au sein de la culture, à proximité des plantes et de leurs systèmes racinaires.

Pour optimiser l'emplacement des sondes, il est important d'éviter les zones particulières (sommet de butte, bas fonds...) et de localiser les zones les plus représentatives de l'ensemble de la parcelle.

I.2.6 Le cycle de Préparation et installation des tensiomètres

a/ Préparation du tensiomètre

- Préparer la solution de remplissage (eau déminéralisée + colorant [ex. : bleu de méthyle]).
- Remplir le tensiomètre et le réservoir du haut avec la solution de remplissage.
- Veiller à ce que l'eau ait pénétré dans le tube du tensiomètre.
- 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.
- Frapper légèrement le tensiomètre pour faire monter les bulles d'air.
- 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.
- Veiller à ce qu'il n'y ait pas de bulles d'air dans le tensiomètre.
- Maintenir la bougie poreuse dans l'eau jusqu'à l'installation au champ.

b/ 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.

c/ Détermination de la profondeur à laquelle les tensiomètres doivent être placés

Pour les cultures annuelles, la profondeur de 20 à 30 cm environ convient habituellement. Pour les cultures pérennes, il convient de préciser, à partir d'une tranchée effectuée à proximité du point d'irrigation, l'horizon contenant le plus de racines.

Pour toute culture, lorsqu'il existe un horizon imperméable (poudingue, horizon compacté ou très argileux) à une profondeur moyenne atteinte par l'enracinement, il est très intéressant de placer les bougies à ce niveau, à une distance latérale égale à la profondeur, car cela permet de bien apprécier l'évolution de l'état hydrique du sol selon l'importance des apports.

d/ Détermination de la distance latérale des appareils par rapport aux points d'irrigation

Il s'agit de garantir à la culture une alimentation non restrictive sans gaspillage d'eau. On peut déterminer la distance latérale en procédant de la façon suivante,

- On arrête l'irrigation après une période d'arrosages abondants et on place des tensiomètres à une distance plus ou moins éloignée du point d'apport. Douze heures après cette opération, on relève les mesures obtenues.

Les valeurs observées doivent être au minimum celles de la capacité au champ, sinon cela signifie que la zone saturée est très étendue.

- On maintient l'arrêt des irrigations jusqu'à ce que les appareils indiquent 15 à 20 cbar de plus que la valeur correspondant à la capacité au champ.
 - Lorsque ce niveau est atteint, on reprend les apports en augmentant progressivement jusqu'à ce que l'appareil le plus proche commence à réagir :
 - Si les trois appareils réagissent en même temps (à des degrés différents), on peut retenir la distance la plus éloignée.
 - Si l'appareil le plus éloigné s'avère peu sensible à la variation de tension alors que le plus proche manifeste au contraire une valeur très basse, il vaut mieux retenir la distance intermédiaire.
 - Si seul l'appareil placé à la plus faible distance manifeste une réaction même en augmentant la dose d'apport, cela démontre que la diffusion latérale de l'eau est faible et que l'apport tend à s'infiltrer seulement sous le distributeur, ce qui remet alors en cause ce système d'irrigation pour le type de sol concerné.
- D'une façon générale, pour des apports quotidiens, la distance latérale ainsi définie est de l'ordre de grandeur de la profondeur. Exemple : profondeur 20 cm, distance latérale 20-25 cm.

e/ Installation du tensiomètre.

- 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.
- Introduire une petite quantité de boue épaisse confectionnée avec le sol en place (en évitant les grosses particules).
- Insérer le tensiomètre dans le trou à la profondeur désirée.
- Après l'installation, il faut remonter et compacter le sol autour de la tige du tensiomètre.
- Il doit y avoir un minimum de 2,5 cm entre le manomètre et le sol.
- Un peu d'air venant du sol peut entrer dans le tensiomètre, on enlèvera cet air en introduisant « une paille » dans la tige.

f/ Point à surveiller

- Attendre 24 heures avant d'effectuer la première lecture.
- Veiller à ce que le tensiomètre demeure « chargé » : la colonne d'eau doit toujours être présente.
- Bien indiquer à l'aide de repères visuels la localisation des tensiomètres afin de les retrouver facilement et d'éviter des bris possibles dus à la machinerie.

I.2.7 Répartition des appareils ; déplacement en cas d'informations non significatives

Une fois la distance latérale défini, on positionne les appareils en des lieux différents pour éliminer le risque de se référer à une information singulière résultant par exemple, d'un distributeur défectueux. Il n'est cependant pas souhaitable de prendre en compte tous les facteurs d'hétérogénéité (par exemple : zone ou le sol est particulier) ; au contraire, il faut choisir des sites les plus représentatifs de l'ensemble à conduire, soit en vue de garantir sur toute la surface les meilleures conditions possibles d'alimentation de la culture, soit en optimisant l'utilisation de l'eau sur l'essentiel de la surface à alimenter (certaines parties pouvant alors être légèrement sous-irriguées).

Après quelques jours de fonctionnement, si l'un des appareils donne des valeurs très différentes, il faut en rechercher la cause (distributeur obstrué, bougie placée à proximité d'une cavité, etc). Il est souhaitable de le déplacer lorsqu'il n'y a pas de cause apparente, cela peut être dû au fait que la forme du bulbe n'est pas identique d'un point de mesure à l'autre. Il suffit alors de rapprocher ou d'éloigner l'appareil de quelques centimètres du point de distribution pour que les indications fournies par les différents appareils correspondent aux mêmes ordres de grandeur.

I.2.8 Seuils repères pour le pilotage de l'irrigation

Les études sur les suivis tensiométriques réalisés depuis plusieurs années dans les sols sableux ont permis d'acquérir des références et d'affiner des seuils tensiométriques correspondant à l'état de la réserve en eau du sol.

- **0 à 8 cb** = Réserve en eau Facilement Utilisable par les plantes (RFU) pleine= 100 % à 80 % de la RFU est disponible pour la culture.
- **8 à 15 cb** = RFU satisfaisante = 80 % à 50 % de la RFU est encore disponible pour la plante.
- **15 à 30 cb** = RFU consommée à plus de 50 % = Il reste la réserve facilement utilisable en secours (soit 10 mm en moyenne) avant le point de flétrissement permanent.
- **> 30 cb** = RFU vide, la Réserve en eau Difficilement Utilisable par la plante est entamée = Attention au point de flétrissement permanent et au stress de la culture = Baisse de l'efficacité des futures irrigations (sol qui s'assèche et difficulté à le réhumecter).

Le démarrage de l'irrigation doit être réalisé lorsque les tensiomètres à 25 cm de profondeur franchissent 20 cb. Ce seuil peut être affiné en fonction des objectifs de production, de la disponibilité de la ressource en eau et de la composition des sols (granulométrie et taux de MO).

I.2.9 Mise en place de cette technologie sur l'exploitation agricole

Le raisonnement et l'enregistrement des pratiques d'irrigation via la tensiométrie devront être fortement encouragés pour optimiser l'utilisation de la ressource en eau et améliorer ses résultats de production.

Les services du développement agricole devront accompagner techniquement la mise en place de cet outil de pilotage de l'irrigation sur l'exploitation.

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 ou 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, 1986a**).

Les informations fournies par les tensiomètres doivent être représentatives : il faut installer au moins trois sites tensiométriques 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.

I.2.10 Relation entre succion et eau disponible dans le sol

La figure 1.3 donne la forme générale des relations tension-épuisement de la réserve utile pour différents types de sols.

On remarquera que, lorsque la réserve utile s'épuise, une faible variation de la tension correspond à une variation de la quantité d'eau disponible d'autant plus rapide que le sol est plus léger (sol sableux).

On peut relever sur la figure les ordres de grandeur à 60 cbar (tension proche de la limite d'utilisation des tensiomètres classiques) :

Sol	Proportion de réserve utile épuisée
sablo-limoneux	3/4
limono-sableux	2/3
limoneux	1/3
argileux	1/6

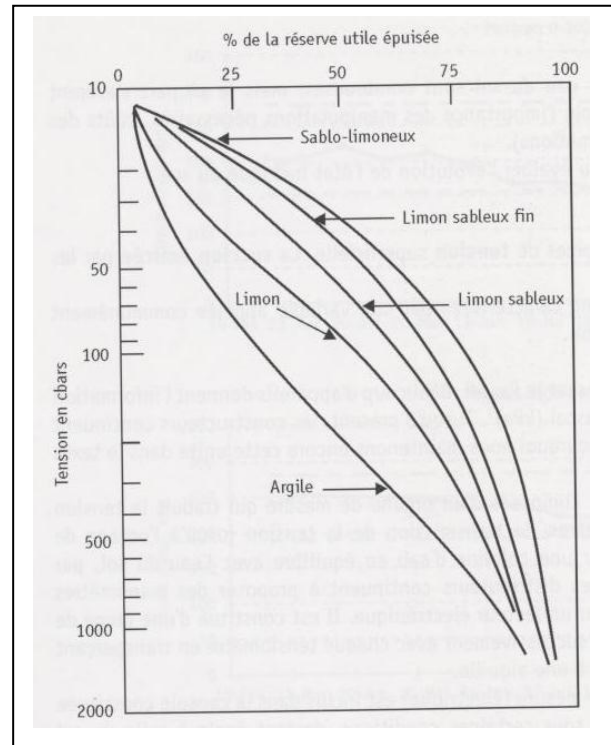


Figure 1.3 – Pourcentage de la réserve utile épuisée en fonction de la tension (modifié d'après Taylor S.A., 1965)

I.2.11 Sondes Watermark

Ces appareils sont apparus il y a plus de dix ans. Ils mesurent également la tension de l'eau dans le sol et peuvent donc être utilisés pour les mêmes applications.

Qu'est-ce qu'une sonde Watermark ?

Description et mise en œuvre

Contrairement aux tensiomètres classiques pour lesquels chaque appareil est équipé d'un organe de mesure à lecture directe, les sondes « Watermark » sont constituées, d'une part des sondes proprement dites placées dans le sol et d'autre part, d'un boîtier permettant, après branchement sur une sonde :

- d'alimenter électriquement la sonde,
- de régler un potentiomètre selon la température au point mesuré,
- de récupérer le signal émis,
- d'analyser ce signal et de le traduire en termes de tension.

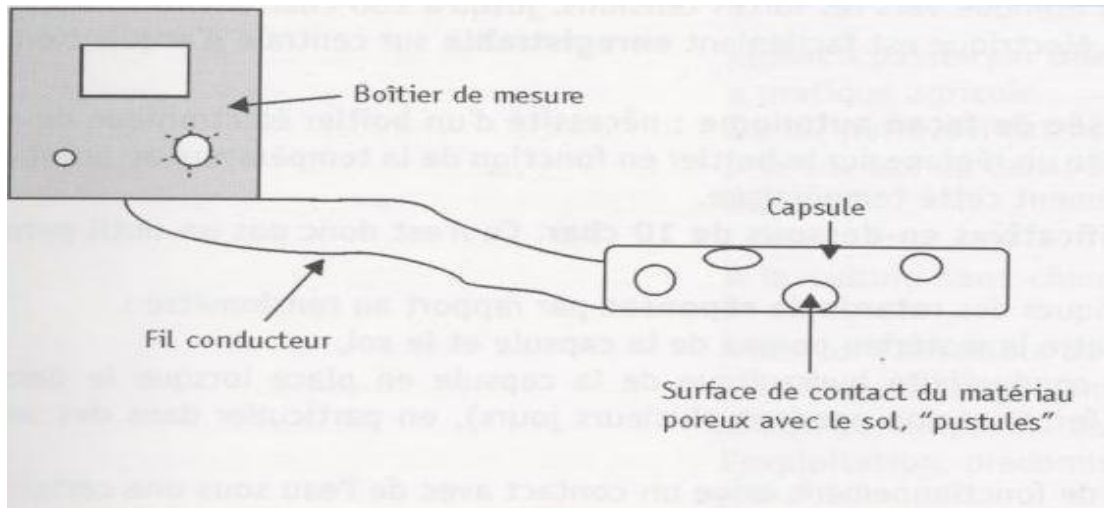


Figure 1.4 – Schéma d'une sonde Watermark

I.2.1 2 Utilisation de la tensiométrie

La tensiométrie, à l'aide de tensiomètres classiques, est le meilleur outil de détecter les excès d'eau dus aux apports trop abondants ou/et au drainage insuffisant. Cette détection est plus délicate avec des sondes watermark.

La tensiométrie permet d'apprécier l'opportunité :

- de commencer les arrosages,
- de renouveler les arrosages, en contrôlant que l'apport précédent a été totalement utilisé.

Elle renseigne sur le devenir de l'eau d'irrigation dans le sol pour les différents types d'arrosage.

Enfin, la tensiométrie peut alerter sur d'autres aspects tels que l'évolution ou les accidents d'enracinement en cultures annuelles.

Si pratique que soit la tensiométrie, sa mise en œuvre exige certaines précautions :

- contrôler le fonctionnement de chaque appareil avant sa mise en place.
- Les mesures sont ponctuelles. On ne peut donc pas se limiter à l'utilisation d'un seul site de mesure.
- Choisir sur la parcelle des emplacements de sites de mesures adaptés au type d'irrigation.
- Sur les sites de mesures, placer les appareils selon la culture et le type de sol : profondeurs, distance latérale aux points de distribution d'eau.
- Enregistrer fréquemment et régulièrement les données des capteurs, par exemple sur un graphique, pour pouvoir interpréter les mesures observés. Les progrès actuels en

matière de saisie de données permettent de disposer d'équipements qui assurent à moindre cout ce travail.

- Adopter une logique d'utilisation et la respecter.

I.2.1 3 Avantages et inconvénients des sondes Watermark par rapport aux tensiomètres

Avantages

L'absence de circuit hydraulique permet :

- Une préparation très simplifiée
- Une maintenance en état de fonctionnement grandement facilitée
- Une bonne résistance au gel
- Pas de problème de stockage

La **gamme de mesure** est plus étendue vers les fortes tensions, jusqu'à 200 cbar environ ; les valeurs lues restent approchées. La mesure électrique est facilement enregistrable sur centrale d'acquisition.

Inconvénients

Une sonde ne peut être utilisée de façon autonome : nécessité d'un boîtier électronique de mesure. De plus, le type de mesure nécessite un réglage sur le boîtier en fonction de la température au point de mesure. Il faut donc mesurer simultanément cette température.

Les mesures ne sont pas significatives en- dessous de 10 cbar. Ce n'est donc pas un outil permettant de détecter les excès d'eau.

Plusieurs raisons peuvent expliquer des retards de réponse par rapport au tensiomètre :

- surface de contact réduite entre le matériau poreux de la capsule et le sol,
- impossibilité de rétablir la conductivité hydraulique de la capsule en place lorsque le dessèchement atteint a été trop important (forte tension pendant plusieurs jours), en particulier dans des sols à argile gonflante.

Dans ce cas la remise en état de fonctionnement exige un contact avec de l'eau sous une certaine charge : sol engorgé ou trempage après retrait des sondes.

La mesure physique n'étant pas directe comme avec des tensiomètres (pression), mais dérivée (mesure électrique), on ne dispose d'aucun moyen de contrôle simple de bon fonctionnement. Ainsi, les problèmes liés à l'homogénéité de fabrication ne sont pas décelables.

Comme pour les tensiomètres, l'acquisition d'une information doit être obtenue avec plusieurs sondes.

Dans les conditions où leurs limites d'utilisation sont maîtrisées, leur emploi est considérablement plus aisé que celui des tensiomètres.

I.3 Les tensiomètres dans le pilotage de l'irrigation

La technique d'utilisation des tensiomètres a été mise à la disposition des agriculteurs pour faciliter la conduite pratique des arrosages et apprécier l'évolution de l'état hydrique du sol.

Pendant la campagne d'irrigation, l'agriculteur doit mettre en œuvre son plan d'action concernant l'irrigation et adapter les apports au contexte et au système tel qu'il est au moment d'agir. Différents outils existent également pour mieux maîtriser les apports d'eau. Trois questions principales se posent :

quels indicateurs pour représenter les besoins d'irrigation ? Quels seuils pour ces indicateurs ? Comment calculer la dose à apporter ?

La détermination de la dose apportée par tour d'eau n'est pas non plus un choix trivial. La quantité va dépendre de l'équipement d'irrigation (débit disponible et donc temps nécessaire pour apporter une dose unitaire, contraintes de travail pour les horaires de changement de positions, automatisation, ...), du sol (profond ou superficiel et donc capacité du sol à retenir la dose apportée sans drainage), en fonction des besoins de la plante (phase sensible ou non), en fonction des contraintes anticipées (restriction ou quota), en fonction de choix de l'agriculteur (rationnement de la culture). Une difficulté supplémentaire relève de la mauvaise connaissance de la dose effectivement appliquée ou d'un écart entre dose souhaitée et dose effective. Cet écart peut être dû à une mauvaise connaissance ou à une usure de l'équipement mais également à des variations de pression dans le réseau de distribution ou plus simplement aux conditions climatiques (le vent qui crée de fortes dérives) ou à l'état de surface du sol, certains équipements étant roulants.

I.3.1 Le pilotage

Il consiste à gérer et définir avec précision pour chaque arrosage la date et la dose optimale, vu qu'il assure la satisfaction des besoins en eau des cultures. Cette optimisation se base sur 3 critères :

- a) Agronomique : vise à maximiser le rendement de la culture.
- b) Hydraulique : vise à maximiser l'efficacité de l'eau.
- c) Economique : vise à maximiser le revenu de l'exploitation.

Pour la réalisation de cette optimisation une méthode récente appelée méthode de pilotage tensiométrique et mise en place.

I.3.2 Rôle du pilotage de l'irrigation

Lorsque la production maximale est obtenue sans contrainte d'alimentation en eau (disponibilité, coût), le pilotage de l'irrigation aura principalement pour but d'éviter les stress hydriques sur l'ensemble du cycle de culture. Ce cas est peu fréquent. L'importance de la protection de l'environnement, particulièrement en système irrigué doit attirer l'attention sur la nécessité de réduire l'irrigation aux stricts besoins en eau des cultures.

Si la conduite de la culture requiert des périodes de restriction hydrique pour maximiser le rendement et/ou la qualité, le pilotage de l'irrigation devra permettre d'obtenir le niveau de stress utile pendant les périodes souhaitées.

Si l'objectif de rendement est inférieur au maximum pour des raisons économiques et/ ou de disponibilité en eau limitée, le pilotage de l'irrigation aura pour rôle répartir les irrigations sur l'ensemble du cycle de culture en respectant le niveau de stress admissible. (Léopold RIEUL, et al, 2003, guide pratique irrigation, P28)

En s'appuyant sur les notions rappelées ci-dessus, le pilotage de l'irrigation est réalisé en utilisant différents types d'outils qui sont:

- des outils de contrôle de l'état hydrique du sol
- des outils de conduite fondés sur le bilan hydrique
- des avertissements à l'irrigation
- des outils de contrôle de l'état hydrique de la plante

I.3.3 Principe de pilotage tensiométrique

Le pilotage tensiométrique consiste à implanter plusieurs appareils (+03) à différentes profondeurs en un même site et à déclencher les arrosages lorsque le tensiomètre à une profondeur choisie atteint une valeur seuil des succions préalablement déterminée.

Peyremote (1984) a souligné que le choix de la profondeur de mesure a beaucoup plus d'importance que le niveau de tension indiqué en un point. De ce fait il est important de définir la profondeur de mesure en fonction du système racinaire. Le seuil de tension étant celui de la limite pratique de fonctionnement des appareils (70 à 80 cbars).

Le positionnement des tensiomètres à différentes profondeurs et en un même site, permet de contrôler l'épaisseur de la couche exploitée par les racines.

L'eau apportée localement se répartie dans le sol sous l'influence des forces, gravitaire des tensions et de succion.

La zone est de très forte teneur en eau restant saturée parfois pendant plusieurs heures après l'apport. La tension peut alors être nulle car la micro-porosité est remplie, et le tensiomètre décèle les excès d'eau.

I.3.4 Stratégie de mise en œuvre

Les limites des appareils de mesure tensiométriques obligent à passer par une stratégie de mise en œuvre. Adaptée à chaque situation, pour les rendre utiles à la pratique agricole.

Afin d'éviter aux irrigants les inconvénients de la mise au point délicate et longue d'une telle stratégie, des méthodes pratiques et éprouvées, développées par les chercheurs, pour chaque type d'irrigation sont présentées dans les trois parties suivantes.

Les objectifs de ces méthodes sont les suivants :

- garantir avant tout, le potentiel de production de la culture sans chercher forcément la plus grande économie d'eau.
- obtenir la mobilisation des ressources en eau naturelles sur l'ensemble du cycle cultural.
- éviter tout apport inutile (voire nuisible, si le sol a tendance à l'engorgement).

Attention : ces méthodes s'attachent à améliorer la gestion en temps réel des arrosages. Les considérations de gestion de l'ensemble des moyens d'irrigation de l'exploitation, prédominantes en grande culture, sont d'un autre ordre.

I.3.5 Piloter l'irrigation par aspersion grâce à la tensiométrie

I.3.5.1 Principes de base.

L'irrigation par aspersion provoque une forte variation de la teneur en eau des couches superficielle du sol pendant la période séparant deux arrosages. Pour analyser l'exploitation des réserves hydriques du sol alors que la gamme de tension correspondante peut être nettement supérieure à celle mesurable par les tensiomètres, on considère que, lorsque le sol a été totalement réhumecté, l'épuisement des réserves d'un horizon inférieur ne se produit qu'avec un certain retard par rapport aux horizons supérieurs.

Par conséquent, la tension mesurée en un point révèle une exploitation moyenne des réserves hydriques entre ce point et la surface, ou elle est considérablement plus importante.

I.3.5.2 Stratégie de pilotage.

A partir de mesures effectuées à fréquence régulière, de préférence tous les deux jours, on effectue une interprétation des tendances observées. A cette fin, on trace des graphiques du même type que ceux qui sont présentés dans le chapitre résultats expérimentaux.

On cherche à réaliser le premier arrosage lorsque la réserve en eau du sol a atteint un seuil d'épuisement maximal tolérable, Sans risque :

- de limitation du potentiel de production de la culture,
- 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).

L'idéal serait de connaître la profondeur à laquelle une tension de référence prédéfinie reflète cette situation.

I.3.6 Définition et signification de la profondeur et de la tension de référence.

Quatre types de considérations sont à prendre en compte pour définir profondeur et tension de référence.

- Les performances des appareils : pour travailler en toute sécurité, il est bon de ne pas

Dépasser :

- 60 à 80 cbar avec les tensiomètres (risques d'entrée d'air et/ou limite de la technique de mesure)
- 120 à 150 cbar avec les sondes Watermark (incertitude de resaturation ultérieure de la bougie)

- En revanche, il n'est pas justifié de retenir des valeurs de seuil moins élevées sur des

Considérations seulement liées à la culture : les cultures de plein champ s'alimentant aux tensions limites indiquées ci-dessus.

- Texture et structure du sol : les ordres de grandeur de la « relation tension- épuisement

de la réserve ». il n'ya donc pas lieu en général d'adopter des tensions de référence inférieures aux seuils permis par ces appareils..

Cependant, en sol très sableux, l'évolution des tensions au cours du temps s'avère très rapide dès que la disponibilité en eau du sol s'amointrit. Cela peut conduire à retenir une tension de référence inférieure à la limite de mesure des appareils. Ce choix est d'autant plus nécessaire que la fréquence de relevé des appareils est faible, ce qui rend difficile l'utilisation de la tensiométrie dans ce type de sol.

- la profondeur de mesure

Illustre le fait que la tension mesurée à une profondeur révèle une exploitation moyenne des réserves hydriques, entre cette profondeur et la surface. Ainsi, le choix de la profondeur de mesure a encore plus d'importance que celle du seuil de tension prédéfini.

En l'absence d'information précise sur la profondeur de mesure, on commence souvent à placer les appareils de façon systématique en tenant compte de l'enracinement présumé, ou connu (ouverture d'une tranchée).

Dans ce cas, le niveau moins profond correspond à la base de l'horizon le plus rapidement colonisé par le système racinaire, par exemple :

- en culture annuelle, le fond du labour,
- en culture pérenne, à la moitié de la profondeur maximale d'enracinement atteint ; cependant en cas de difficulté connue de réhumidification de l'ensemble du profil, les appareils doivent être placés plus haut.

I.3.7 Piloter l'irrigation « goutte à goutte » grâce à la tensionmétrie

I.3.7.1 Principes de base

Maintenir en permanence un certain volume humidifié

L'eau distribuée en un point se répartit dans le sol sous l'influence des forces de gravité et de celles de succion. L'humidité diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne latéralement du point d'apport. On dit souvent qu'il y a formation d'un bulbe (dont la forme est d'ailleurs très variable dans chaque situation).

Ainsi, il existe un gradient de l'état hydrique du sol : près du distributeur, on observe presque toujours une zone de très forte teneur en eau restant parfois saturée pendant plusieurs heures après l'apport.

Dans le cas d'un régime d'apport d'eau excessif, cette zone tend à s'accroître. A l'inverse, dans le cas d'un régime d'apport déficitaire, cette zone tend à décroître.

Des appareils placés à la périphérie de cette zone sont à même de détecter cette évolution et de permettre, en conséquence, de réajuster périodiquement le régime d'arrosage de sorte que la tension observée sur les appareils reste assez constante de jour en jour autour d'une référence comprise entre 20 et 80 cbar.

Garantir la représentativité des mesures

Pour une unité d'arrosage (surface pour laquelle l'équipement d'arrosage ne permet pas de faire varier le mode de conduite), placer les appareils dans le type de sol à privilégier.

Utiliser au moins trois appareils : même dans une unité culturale apparemment homogène, les répétitions permettent de se mettre à l'abri de mesures faites en un point singulier (accident dû au sol, débit anormal d'un distributeur...).

Le nombre d'appareils de mesure de mesures tensionométriques doit obligatoirement être augmenté :

- pour prendre en compte l'hétérogénéité de fonctionnement de certaine installation d'irrigation,
- si les appareils sont des sondes Watermark.

Il s'agit en fait du principal avantage de cette méthode qui ne repose pas sur une connaissance de la relation : « teneur en eau du sol- état de tension » (laquelle est dépendante d'un grand nombre de facteurs). Mais sur l'analyse du sens d'évolution des différences observées sur plusieurs séries de mesures.

I.3.7.2 Stratégie de pilotage

Généralités

En irrigation localisée, le régime d'intervention est très souvent commandé automatiquement (par exemple, par une horloge ou un programmeur) à périodicité préétablie (par exemple, tous les jours). Dans ce cas, l'irrigant observe quotidiennement (de préférence à la même heure) les valeurs tensionométriques qu'il enregistre, pour pouvoir en analyser l'évolution.

Plusieurs tendances peuvent se manifester :

- les valeurs n'évoluent pas significativement dans un sens ou dans l'autre ; légère augmentation un jour, suivie d'une légère baisse le lendemain, et/ou évolution légèrement différentes d'un appareil à l'autre. Dans ces cas, le temps d'arrosage n'est pas modifié.
- les valeurs sont en augmentation, soit brusque, soit progressive de jour en jour, ce qui signifie que la zone humidifiée tend à se réduire : il faut donc augmenter le temps d'apport.

- les valeurs sont en réduction, soit brusque, soit progressive de jour en jour, ce qui signifie que la zone humidifiée tend à s'accroître : il faut donc réduire le temps d'irrigation.

I.3.7.3 Aspects pratiques

Choix de la périodicité d'irrigation

Divers paramètres sont à prendre en considération.

La nature du sol

Elle conditionne la dimension du bulbe et donc sa capacité de stockage maximal d'eau sans qu'il apparaisse de pertes en profondeur.

Il en résulte une durée maximale par arrosage, ce qui nécessite dans certains cas, plusieurs apports quotidiens pour assurer, sans perte, la demande de la culture.

Un essai préalable permet de définir cette durée maximale. Les conditions de réalisation de cet essai sont décrites ci-après :

- choisir un distributeur assurant le débit que l'on désire employer (par exemple 4 l/h), le vérifier.
- placer en biais un tensionmètre dont la bougie se trouvera à la profondeur considérée comme maximale pour garantir la bonne exploitation de l'eau par les racines ; on aura pris soin d'introduire un peu de terre sèche dans l'avant-trou avant de poser l'appareil pour provoquer une élévation de tension.
- mettre en route l'irrigation. Repérer le moment à partir duquel le passage de l'eau provoque la chute de tension. Le temps écoulé entre cet instant et le début de l'arrosage est celui de la durée maximale d'un apport d'eau.

Les caractéristiques de l'installation

Elles conditionnent une durée minimale par arrosage permettant de garantir une homogénéité suffisante de distribution à l'échelle de la parcelle.

On comprend que le régime permanent de fonctionnement n'est obtenu qu'après le remplissage complet des conduites.

Ainsi, pour garantir une homogénéité acceptable de la distribution, il faut que le temps minimal de fonctionnement soit d'environ dix fois ce temps de mise en régime permanent (par exemple : temps de remplissage 3 à 3,5 mn, durée minimale par arrosage : 30 mn).

De même, lorsque les conduites se vidangent en des points préférentiels (cas le plus général), on n'a pas intérêt à multiplier le nombre d'apport.

En résumé, la périodicité à choisir doit prendre en compte :

- les besoins d'irrigation,
- la nature du sol qui limite la durée maximale d'un arrosage,
- les caractéristiques de l'installation qui déterminent une durée minimale d'arrosage.

I.4 La culture : Le switchgrass (*Panicum virgatum*)

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 Etats-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 respectueuse 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 certains zones-tampon à vocation d'épuration des eaux et des sols en milieu agricole aux Etats-Unis. Dans les meilleures conditions, ses touffes atteignent 1.8 à 2.2 m de haut.

Les feuilles mesurent de 30 à 90 cm de long, avec une nervure principale qui leur confère une certaine rigidité.

Les fleurs sont organisées en panicules bien développés mesurant jusqu'à 60 cm de long et produisant généralement une bonne récolte de graines.

La graine du switchgrass est de petite taille : éviter les terres très motteuses. Par précaution, éviter également les terres drainées car l'enracinement est très profond, souvent supérieur à 2 m. Le switchgrass serait bien adapté aux terres séchantes.

La préparation du sol doit être particulièrement soignée. Prévoir plusieurs déchaumages (faux-semis) pendant l'inter culture, suivis d'une application d'herbicide total. La concurrence des adventices est particulièrement nuisible en début de végétation. Enfin, un roulage permettra de tasser le semis pour que la graine ait un bon contact avec les particules du sol. Elle pourra ainsi puiser l'eau nécessaire à sa germination.

Le switchgrass est peu exigeant mais préfère les sols légers et bien drainés de type sableux et limoneux aux sols lourds et argileux. Les sols hydromorphes sont à éviter. Un pH entre 5 et 8 est adapté.

Le switchgrass peut se cultiver sur une large gamme de sols. Néanmoins comme pour toute culture, la « fertilité » du sol reste un élément déterminant de la production.

Le switchgrass a un enracinement profond qui valorisera les sols profonds, bien alimentés en eau. Il semble plus tolérant aux terres séchantes.

Le switchgrass se développe à partir de 10°C. En terme de température, il est plus exigeant que le maïs. Ainsi la germination démarre avec un sol entre 14 et 18°C soit une température d'air de l'ordre de 20 - 25°C. L'implantation à l'automne est donc à proscrire.

Selon les besoins et l'humidité recherchée, la récolte peut se faire soit en vert à l'automne, soit après une période de froid (en hiver ou sortie d'hiver).

Une fois implantée, la culture semble pouvoir être exploitée durant 10 à 20 ans selon les premiers travaux conduits. En fin de culture, la destruction des plantes pour remobiliser la parcelle est encore peu documentée.

Les avantages de cette culture sont listés ci-dessous:

- Capte l'énergie solaire efficacement;
- Nécessite peu d'énergie fossile pour sa production;
- Requiert peu d'intrants, tels que les engrais et pesticides, pour sa croissance;
- Possède une bonne conversion énergétique.

I.4.1 Impacts environnementaux

Plante convenant parfaitement aux conditions pédoclimatiques européennes. Plante mieux adaptée aux conditions chaudes et séchantes. Résistante aux hivers rigoureux. Production récoltable de 15 t MS/ha/an à partir de la 3^e année. Faibles besoin en intrants

Cette plante est également réputée capable de "pomper" une partie des métaux lourds du sol.

I.4.2 Intérêt agronomique et écologique

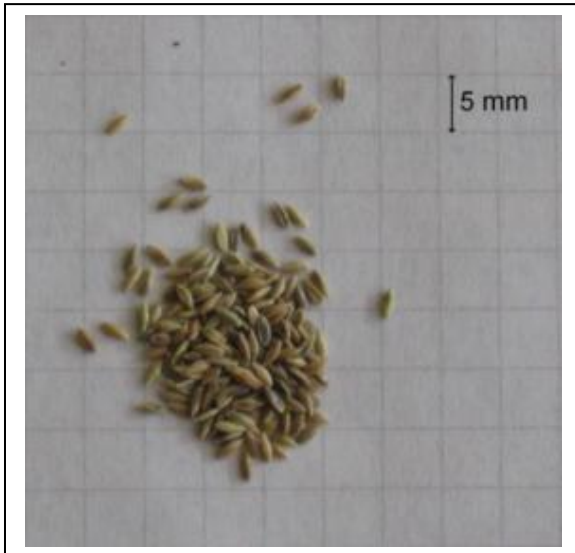
La *switchgrass*, autrefois considérée comme une mauvaise herbe inintéressante et à éradiquer des champs est aussi aujourd'hui considérée comme utile pour la restauration ou conservation de sols vulnérables ou dégradés. Son système racinaire très développé, sa hauteur et sa croissance tardive lui permettent 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 » .



Graine de switchgrass



Développement du switchgrass



Switchgrass avant récolte

CHAPITRE II : Matériels et méthodes

II.1. Présentation du site d'étude

Dans cette partie du travail nous présentons l'étude menée, sur une placette de 1.5 m², située au niveau de la parcelle expérimentale du laboratoire d'analyses de sol, INSID, Relizane avec pour but de collecter les données nécessaires pour connaître l'état hydrique sous une culture pérenne (*Panicum virgatum* : Switchgrass) installée depuis 2010.

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier l'humidité du sol pour améliorer la gestion de l'eau.

Le dispositif expérimental est constitué d'un site de 1.5 m², cultivée en fourrage (*Panicum virgatum* : Switchgrass), dans lequel nous avons installé des tensiomètres « Water Mark » sur quatre profondeurs (15, 30, 45 et 60 cm).



- Tensiomètres « Water Mark » installés au niveau du site expérimental

II.1.1. 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 2.1.

Tableau 2.1 - 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.1.2. 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 Etats-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 respectueuse 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 certains zones-tampon à vocation d'épuration des eaux et des sols en milieu agricole aux Etats-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.1.3. Dispositif expérimental

Le travail est conduit sur un site de 1.5 m², cultivée 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.

II.2. 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.

II.2.1. 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 pinces-crocodiles à la sonde (sans polarité).

Les tensiomètres sont installés aux cotes 15, 30, 45 et 60 cm. Les lectures et contrôle 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 Watermark, utilisés dans notre étude, sont des matériels de type tensiométrique 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 munis à ses parties supérieures de deux pinces-crocodiles qui seront connectées 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 champs 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 interprétations 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.

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 cm³ 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 le sol autour de la tige du tensiomètre.
- le tensiomètre est ainsi placé pour effectuer la mesure.

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 un pile 9 volt, les pinces-crocodiles seront reliées 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 cm³ d'huile.

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.



Le boîtier des sondes WaterMark

Photos prises lors de l'installation des tensiomètres



Bougie noyée dans l'eau distillée



Mesure de la profondeur d'installation



Lecture de la température



Mesure de la charge (tension)

II.2.2. 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.



Echantillons de sol prélevés au niveau des cotes des tensiomètres (15, 30,45 et 60 cm)



Préparation des échantillons de sol pour analyses



Pesé des échantillons de sol pour analyses

II.2.2.1 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 mesures tensiométriques.

II.2.2.2 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 : $[(D_r - D_a)/D_r] * 100$.



Détermination de la densité apparente par le cylindre



Détermination de la densité réelle par Pycnomètre

II.2.2.3 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 liquide retenue. 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 cologarithme 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.



Plaque en céramique avec les anneaux



Dispositif de Richard pour la détermination des pF

II.2.2.4 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 des agrégats 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 μ m) et par tamisage pour les fractions supérieures.



Pipette de ROBINSON

II.2.2.5 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 m² 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.2.2.6 Mesure de pH et de la salinité du sol

Les mêmes échantillons de sol prélevés au niveau du site expérimental à quatre profondeurs ont servis 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).



Pesée des échantillons de sol



Agitation des échantillons de sol

CHAPITRE III : Résultats expérimentaux

Dans ce chapitre nous présentons l'expérimentation menée au niveau de la parcelle expérimentale du laboratoire d'analyses de sol (INSID, El Matmar, Relizane) avec pour but de collecter les données nécessaires à la réalisation des bilans hydriques et l'utilisation de l'eau par une approche expérimentale, sous une culture fourragère irriguée. Ce travail est intégré dans un ensemble de recherches complémentaires qui concernent la gestion de l'eau à différentes échelles et la réduction des impacts environnementaux de l'irrigation (maîtrise des quantités d'eau utilisée et des risques d'entraînement de fertilisants).

L'essai est conduit sur une placette de 1.5 m², avec une culture pérenne (*Panicum virgatum* : Switchgrass) installée depuis 2010 et dont laquelle nous avons installé des tensiomètres à différentes profondeurs. Le sol de ce site n'a jamais été travaillé.

III.1 Caractéristiques du sol du site expérimental

III.1.1 Texture du sol

Le site de mesure est constitué par des sols à structure polyédrique moyenne, poreux, friable, matière organique moyennement décelable, (Etude agro pédologique INSID, 2008). Les échantillons de sol prélevés, au cours de notre stage, au niveau des cotes des tensiomètres (15, 30, 45 et 60 cm) pour le site d'étude montrent une faible variation de la granulométrie des couches de sol étudiées avec 30 – 32 % d'argile, 24 – 28 % de limon et 41 – 46 % de sable.

Les données de granulométrie (figure 3.1) révèlent une certaine constance entre les différentes couches de sol du site d'étude qui peuvent être qualifiés de limono-argileuse. Par ailleurs, la conductivité électrique (salinité) est très faible pour les horizons étudiés, entre 0.16 et 0.25 dS/m. Le pH est légèrement alcalin, variant de 7.7 à 7.9 quelle que soit la profondeur.

Il est à noter aussi la dominance du sable au niveau des quatre couches de sol du site d'étude avec la présence d'une charge caillouteuse moyenne à toutes les profondeurs.

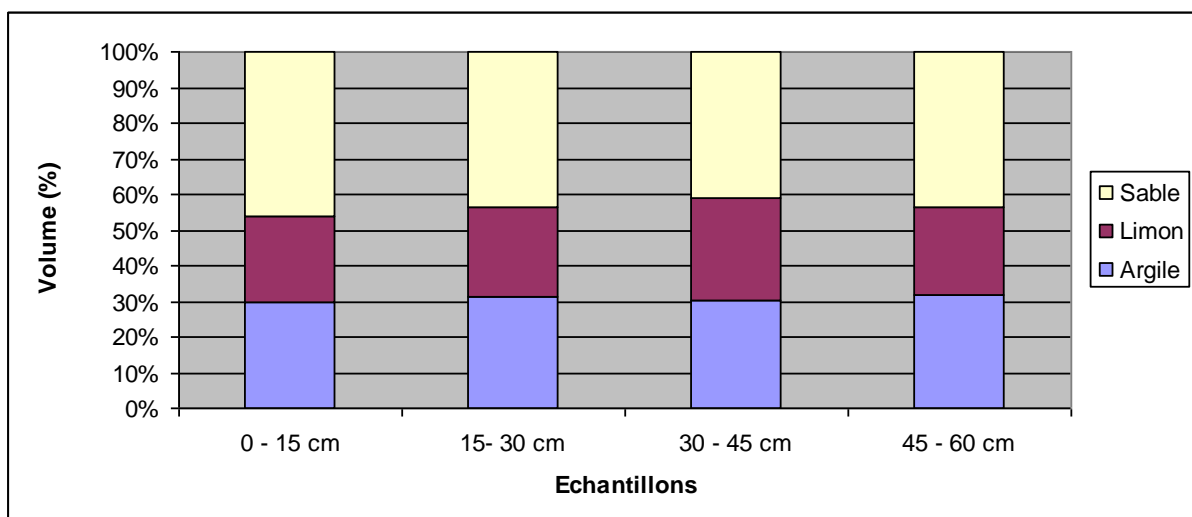


Figure 3.1 - Distribution granulométrique sur le site expérimental à différentes profondeurs

III.1.2 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 3.2 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.

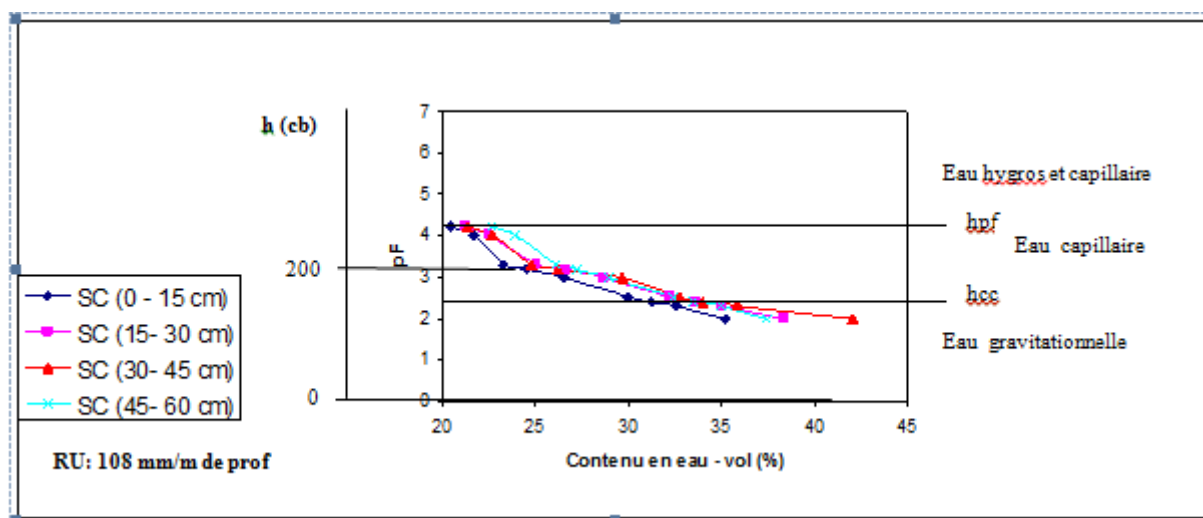


Fig 3.2 - Relation entre tension et contenu en eau du sol du site expérimental à différentes profondeurs

III.1.3 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 2016. Les données présentées (tableau 3.1) 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.1.4 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 3.1) 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.1.5 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 culturales 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 3.1.

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 (Θ) et à saturation (Θ_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 3.1.

Il à noter 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 3.1 - Mesures complémentaires

Echantillon	H (%)	Da	Θ (%)	Θs (%)	Hr (%)	Dr	Pt (%)
h (0-15 cm)	7	1.35	9.4	42	0.9	2.45	45

III.1.6 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 3.2. 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 fait sentir d'avantage.

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 3.2 - Evolution de l'humidité pondérale et les charges avant et après irrigation

Date : 04/05/2016 (avant irrigation)						
N°ech	Z (cm)	Tare	P. humide	P. sec	H (%)	Charge (centibars)
P1h1	05	33.46	99.77	95.84	6.3	
P1h2	15	33.07	112.03	102.64	13.5	170
P1h3	30	34.13	96.10	87.62	15.85	29
P1h4	45	33.57	116.37	104.76	16.31	12
P1h5	60	33.93	108.43	97.72	16.79	12
Date : 05/05/2016 (après irrigation)						
P1h1	05	34.36	94.11	83.92	20.56	
P1h2	15	35.09	115.12	102.12	19.39	15
P1h3	30	33.93	116.25	103.52	18.29	27
P1h4	45	33.70	139.15	122.80	18.35	10
P1h5	60	34.77	137.24	120.59	19.4	8

III.2 Suivi des bilans et des flux d'eau

III.2.1 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 de 86 jours (Mars - Juillet) au niveau du site d'essai. Les mesures tensiométriques (en centibars) sont données en annexe 1 et reporter sur les figures (3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7).

L'humidité évolue progressivement en fonction du temps, comme le montre l'évolution des tensions ((3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7)). 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 fait sentir d'avantage.

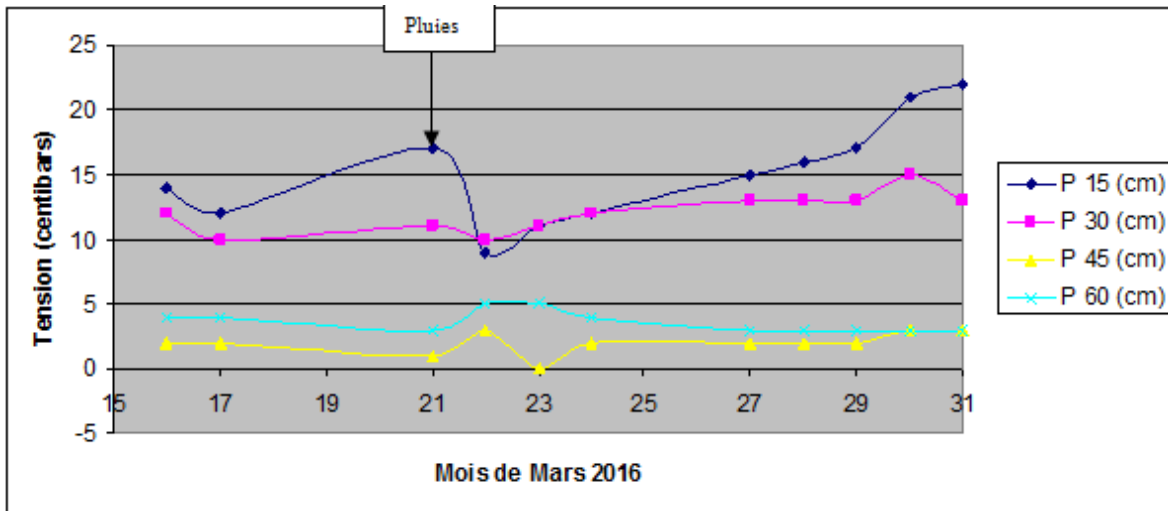


Fig 3.3 - Evolution des tensions relevées durant le mois de Mars 2016 au niveau du site expérimental

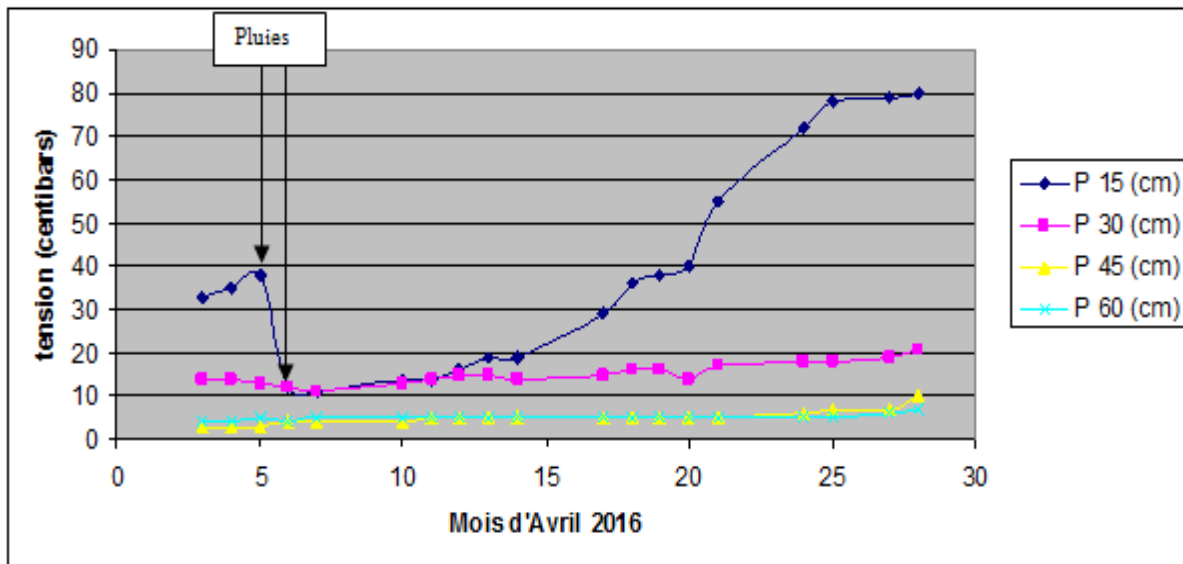


Fig 3.4 - Evolution des tensions relevées durant le mois d'Avril 2016 au niveau du site expérimental

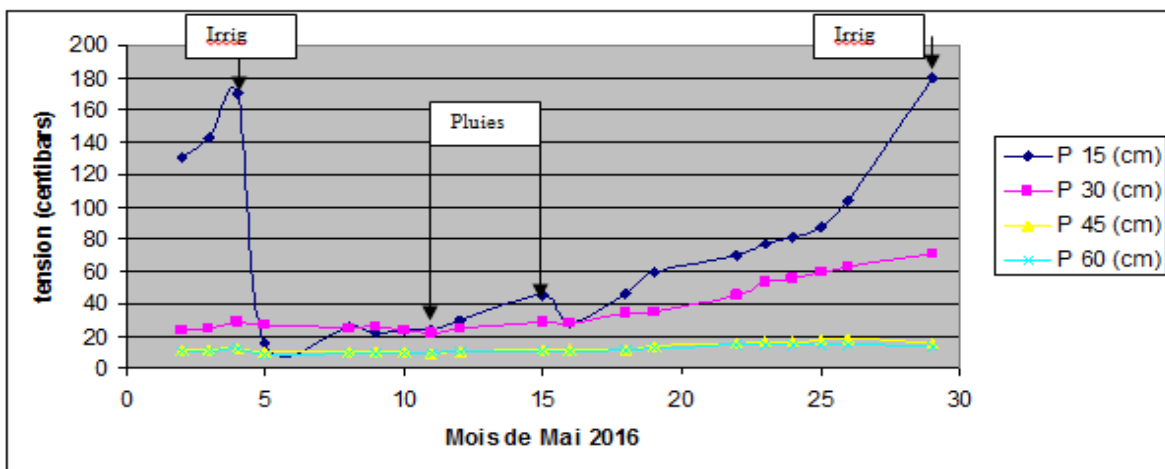


Fig 3.5 - Evolution des tensions relevées durant le mois de Mai 2016 au niveau du site expérimental

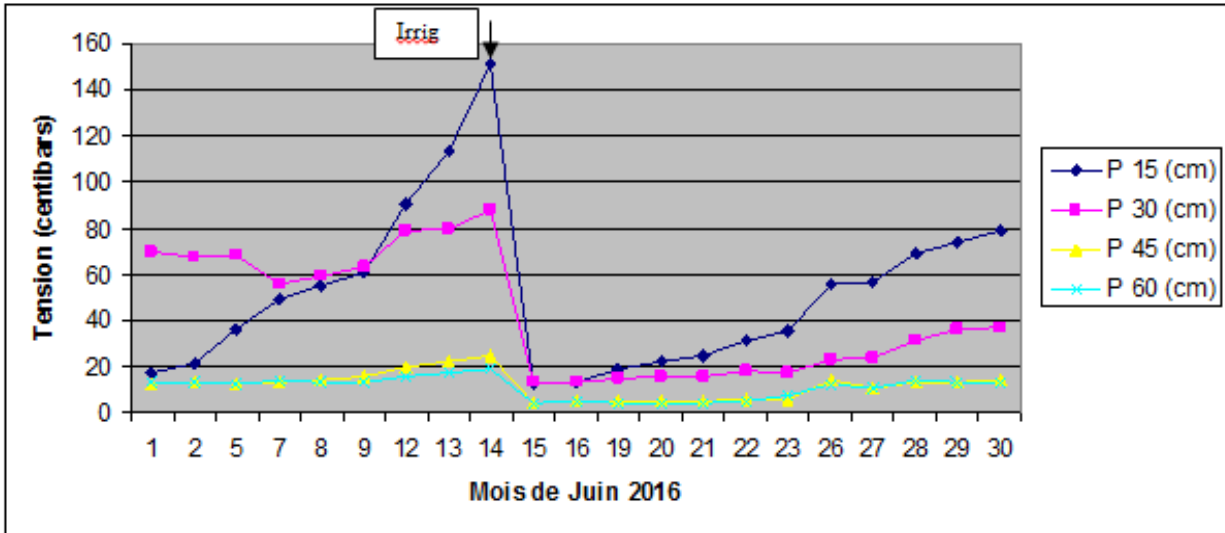


Fig 3.6 - Evolution des tensions relevées durant le mois de Juin 2016 au niveau du site expérimental

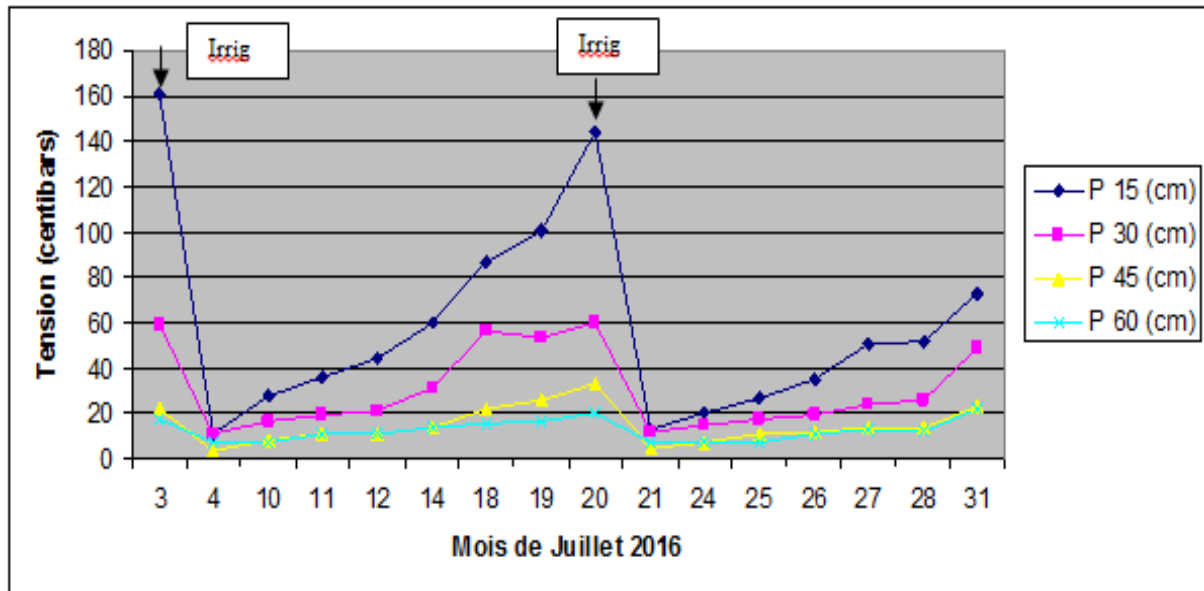


Fig 3.7 - Evolution des tensions relevées durant le mois de Juillet 2016 au niveau du site expérimental

La figure 3.8 montre que la tension (charge) atteint 179 centibars au niveau de la profondeur de mesure (15 cm) et 71 centibars à la cote 30 cm, dix sept jours après la première irrigation. A partir de cette date (29/05/2016) 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.

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.

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.

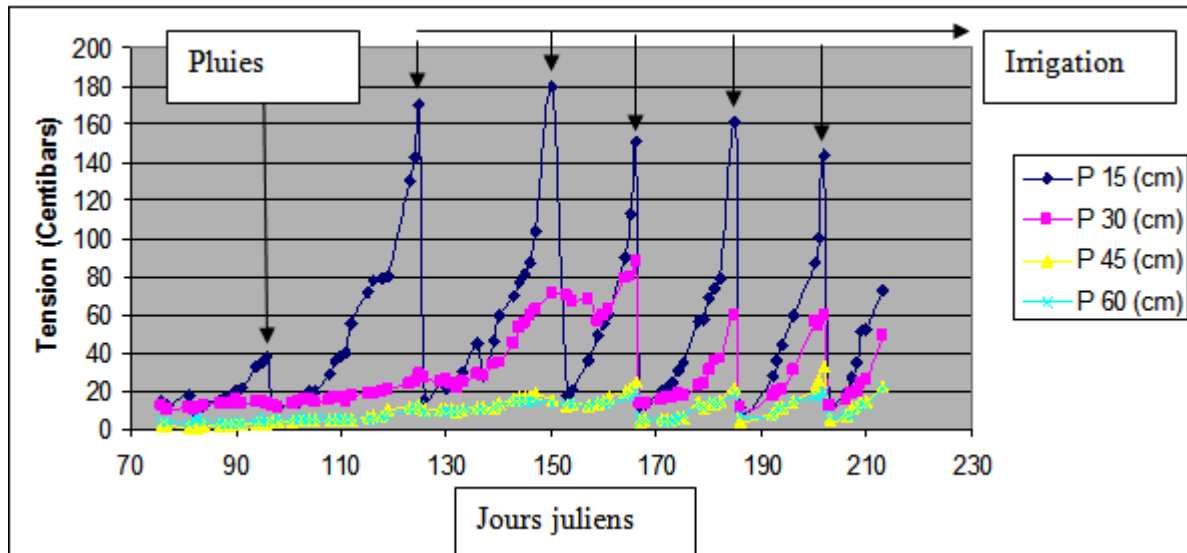


Fig 3.8 - Evolution des tensions relevées au cours du cycle de la culture.

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.

III.2.2 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 3.9 et 3.10 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 de laquelle 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.

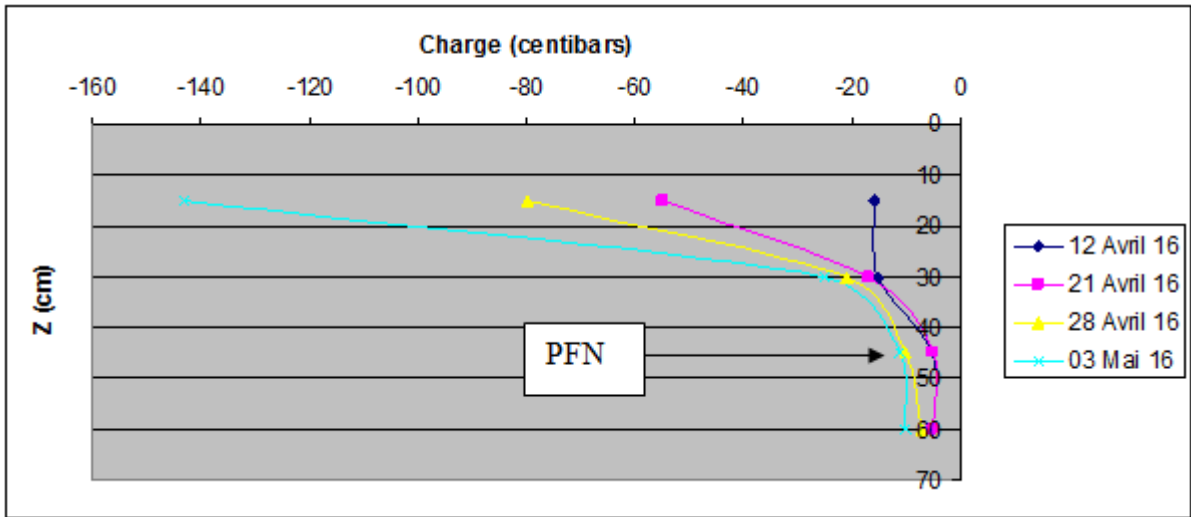


Figure 3.9 - Profils de charge (ou tension) durant le mois d'Avril 2016

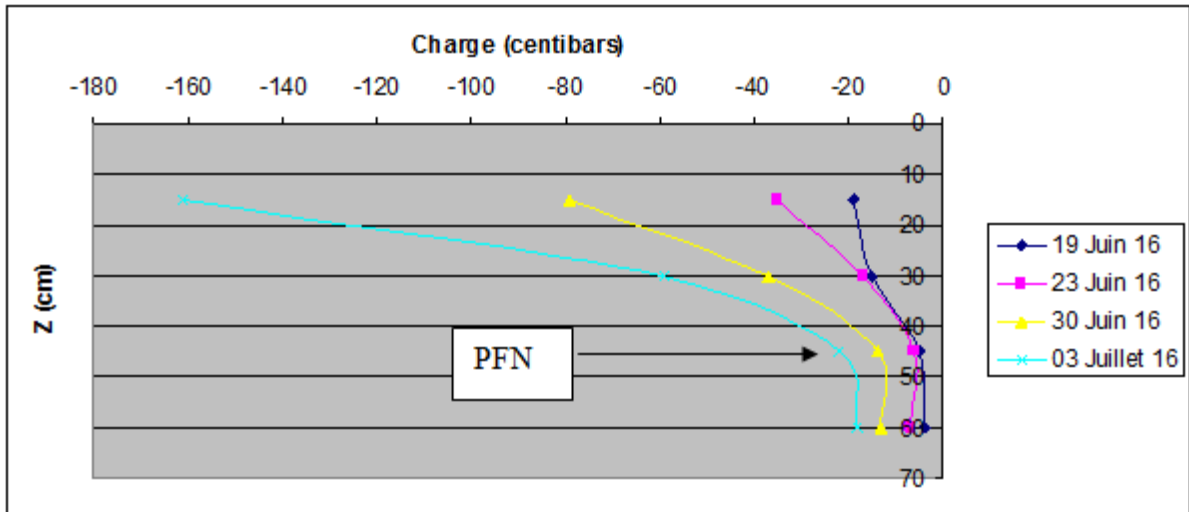


Figure 3.10 - Profils de charge (ou tension) durant le mois de juin 2016

Conclusion

L'expérimentation en cultures irriguées est indispensable à l'évaluation des stratégies à adopter pour bien valoriser l'eau requise par une culture. Elle peut également servir de référence régionale en matière de doses d'irrigation pour un objectif de rendement donné.

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, Relizane nous 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 placette de 1.5 m², avec une culture pérenne (*Panicum virgatum* : Switchgrass) installée depuis 2010 et dont laquelle nous avons installé des tensiomètres à différentes profondeurs. Le sol de ce site n'a jamais été travaillé.

Le suivi de l'état hydrique du sol aux cotes (15 – 30 – 45 et 60 cm) a été effectué sur une période de 86 jours (Mars - Juillet) au niveau du site d'étude.

Il est à préciser que les tensiomètres ne mesurent pas la quantité d'eau dans le sol mais le potentiel de l'eau du sol. Ainsi les mesures tensiométriques ont été complétées par des mesures gravimétriques et les humidités caractéristiques (notamment hcc et hpf) du sol du site d'étude pour pouvoir interpréter les résultats.

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 d'avantage.

La tension (charge) atteint 179 centibars au niveau de la profondeur de mesure (15 cm) et 71 centibars à la cote 30 cm, dix sept jours après la première irrigation. A partir de cette date (29/05/2016) 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.

Aux cotes 45 et 60 cm, la tension (charge) reste faible (< 30 centibars) au cours du cycle de la culture. 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.

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 de laquelle 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 champs 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

Alain Besnard, Sylvain Marsac, Christophe Bersonnet, Stephane Cadoux. (2009). Le switchgrass. Fiche culture. RMT Biomasse : Energie, environnement et territoire.

Alain Deloire. (2008). L'irrigation de la vigne. Synthèse. SupAgro Montpellier.

Aldaoui A, hartani T. (2000). Gestion de l'irrigation du blé par des indicateurs de l'état hydrique. Séminaires méditerranéens ; n. 40.

A. Mermoud. (2006). Dynamique de l'eau du sol. Cours de physique de sol. Ecole polytechnique de Lausanne.

Ben Moussa oum kaltoum. (2013). L'effet de la conduite de l'irrigation sur la productivité du palmier dattier au niveau des palmerais d'oued Righ (Touggourt). Mémoire d'ingénieurs en sciences agronomiques. Université d'Ouargla.

Benoit le beau. (1995). Les tensiomètres pour l'irrigation en milieu tourbeux. Master en sciences agronomiques. Université de Montreal.

Carl Boivin, Christine Landry. (2011). Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pomme de terre. Rapport final. IRDA.

Daniel Bergeron. (2010). Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jours neutres au Québec. Thèse pour l'obtention du grade de maitre es sciences en sols et environnement, université LAVAL Quebec.

DDE-E et la DDR. (2012). La tensiométrie, outil de gestion et de suivi de l'irrigation. Fiche technique.

George Vachaud, Michel Vauclin, Charle Riou, Zouhaier Chaabouni. (1985). Evapotranspiration en zone semi – aride de deux couverts végétaux (gazon-blé) obtenue par plusieurs méthodes. Agronomie, EDP Sciences, pp. 267-274.

Ibrahim Mubarak. (2009). Caractérisation des paramètres hydrodynamiques du sol sous irrigation localisée. Analyse de leur évolution spatio- temporelle : application à la modélisation. Thèse de docteur de l'INPG « Terre, univers, environnement » CEMAGREF.

I.N.S.I.D, 2008. Etude agro-pédologique sur 118 ha de ferme pilote KAID Ameer, El Matmar, Relizane, 67 p.

Jacques. Eric Bergez, Bernard Lacroix. (2008). Gestion de l'irrigation : du stratégique au tactique. Quelques apports de la recherche. Innovations agronomiques (2008) 2, 53-63.

Jean- Paul Laurent. (2006). Suivi de l'eau dans les sols et à l'interface sol/ atmosphère. Cours de physique des sols. LTHE - Grenoble.

Jérime vallée, Carl Boivin, Daniel Bergeron, René Andet, François chrétien. (2014). Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation. Rapport final. Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ).

Julien Garcia. (2008). Plantes à biomasse pérenne (canne de provence, Miscanthus, Switchgrass). Fiche technique. Chambre régionale d'agriculture du Languedoc- Roussillon.

Kradia, L. 2007. Méthodes d'estimation du bilan hydrique pour améliorer la gestion de l'eau. Cas d'une culture de maïs en système conventionnel et semis direct. Mémoire : Master. SupAgro, Montpellier, France, 46 p

Léopold Rieul , Pierre Ruelle.(2003). Irrigation. Guide pratique.

L.M.Rivière, G. Sintès et S. madiot. (1995). Pilotage tensiométrique de l'irrigation des cultures en conteneurs sur substrats organique. Etude et gestion des sols,2 ,2, 1995, pages 135-144.

Mahmoud Karimi Youch. (2010). Amélioration de la distribution de l'eau d'irrigation pour la culture biologique de la tomate sous serre. Mémoire pour l'obtention du grade de Maitre es sciences. Université LAVAL Quebec.

Mohamed Mumen. (2006). Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols à l'aide d'un modèle mécaniste de transferts d'eau et de chaleur mis en œuvre en fonction des informations disponibles sur le sol. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université d'Avignon.

Philippe Baranger. (2002). Synthèse des expériences de pilotage tensiométrique de l'irrigation en Jordanie. Mémoire d'ingénieur en agronomie environnement. INA-PG. Paris.

Annexe 1

Tableau A1 : Mesures de charges (ou tensions) au cours de l'essai

Date/Prof	Jour Julien	Charges (ou tensions)				Obs
		P 15 (cm)	P 30 (cm)	P 45 (cm)	P 60 (cm)	
16/03/2016	76	14	12	2	4	
17/03/2016	77	12	10	2	4	
21/03/2016	81	17	11	1	3	
22/03/2016	82	9	10	3	5	pluies
23/03/2016	83	11	11	0	5	
24/03/2016	84	12	12	2	4	
27/03/2016	87	15	13	2	3	
28/03/2016	88	16	13	2	3	
29/03/2016	89	17	13	2	3	
30/03/2016	90	21	15	3	3	
31/03/2016	91	22	13	3	3	
03/04/2016	94	33	14	3	4	
04/04/2016	95	35	14	3	4	pluies
05/04/2016	96	38	13	3	5	pluies
06/04/2016	97	12	12	4	4	
07/04/2016	98	11	11	4	5	
10/04/2016	101	14	13	4	5	
11/04/2016	102	14	14	5	5	
12/04/2016	103	16	15	5	5	
13/04/2016	104	19	15	5	5	
14/04/2016	105	19	14	5	5	
17/04/2016	108	29	15	5	5	
18/04/2016	109	36	16	5	5	
19/04/2016	110	38	16	5	5	
20/04/2016	111	40	14	5	5	
21/04/2016	112	55	17	5	5	
24/04/2016	115	72	18	6	5	
25/04/2016	116	78	18	7	5	
27/04/2016	118	79	19	7	6	
28/04/2016	119	80	21	10	7	
02/05/2016	123	130	24	11	10	
03/05/2016	124	143	25	11	10	
04/05/2016	125	170	29	12	12	irrigation
05/05/2016	126	15	27	10	8	
08/05/2016	129	26	25	10	9	pluies
05/09/2016	130	22	26	10	9	
05/10/2016	131	24	24	10	9	
05/11/2016	132	24	22	9	9	pluies

Tableau A1 (suite)

05/12/2016	133	30	25	10	10	
15/5/2016	136	45	29	11	10	
16/5/2016	137	28	28	11	10	irrigation
18/5/2016	139	46	34	11	11	
19/5/2016	140	59	35	13	12	
22/5/2016	143	70	45	15	14	
23/5/2016	144	77	53	16	14	
24/5/2016	145	81	55	16	14	
25/05/2016	146	87	59	17	14	
26/05/2017	147	104	63	18	14	
29/05/2018	150	179	71	15	13	irrigation
1 juin 2016	153	17	70	12	13	
2 juin 2016	154	21	67	13	13	
5 juin 2016	157	36	68	12	12	
7 juin 2016	159	49	56	13	14	
8 juin 2016	160	55	59	14	13	
9 juin 2016	161	61	63	16	13	
12 juin 2016	164	90	79	20	16	
13 juin 2016	165	113	80	22	17	
14 juin 2016	166	151	88	25	19	irrigation
15 juin 2016	167	12	13	4	4	
16 juin 2016	168	13	13	5	5	
19 juin 2016	171	19	15	5	4	
20 juin 2016	172	22	16	5	4	
21 juin 2016	173	25	16	5	4	
22 juin 2016	174	31	18	6	5	
23 juin 2016	175	35	17	6	7	
26 juin 2016	178	56	23	14	12	
27 juin 2016	179	57	24	11	11	
28 juin 2016	180	69	31	13	14	
29 juin 2016	181	74	36	13	13	
30 juin 2016	182	79	37	14	13	
03 juillet 16	185	161	59	22	18	irrigation
4 juillet 16	186	11	11	4	7	
10 juillet 16	192	28	17	8	7	
11 juillet 16	193	36	19	11	11	
12 juillet 16	194	44	21	11	11	
14 juillet 16	196	60	31	14	14	
18 juillet 16	200	87	56	22	16	
19 juillet 16	201	101	54	26	17	
20 juillet 16	202	144	60	33	20	irrigation
21 juillet 16	203	13	12	5	7	
24 juillet 16	206	20	15	7	7	
25 juillet 16	207	27	18	11	7	
26 juillet 16	208	35	19	12	11	

Tableau A1 (suite)

27 juillet 16	209	51	24	14	13	
28 juillet 16	210	52	26	14	12	
31 juillet 16	213	73	49	23	22	