

CONCEPTS USEFUL FOR INTERPRETING MEASUREMENTS TAKEN IN THE FIELD, PARTICULARLY THE SOIL WATER STATUS, FOR THE PURPOSE OF IRRIGATION SCHEDULING

NOTIONS UTILES À L'INTERPRÉTATION DES MESURES DE TERRAIN, NOTAMMENT D'ÉTAT HYDRIQUE DU SOL, POUR PILOTER L'IRRIGATION

by *Carole Isbérie*

The importance of making rational decisions by looking at the trends and not only the absolute values when using sensors for irrigation scheduling

De l'importance de raisonner à partir d'analyses d'évolutions et non des seules valeurs absolues lorsque l'on utilise des capteurs pour le pilotage de l'irrigation

The aim of this article is not to go into detail about the different sensors that can be used for irrigation scheduling, but rather to go over certain fundamental rules and basic principles that could be useful when taking a decision on the basis of an analysis of the measurements obtained by the sensor, as well as providing the arguments that support these considerations.

We will mainly be discussing the aspects relating to the measurements of the soil water status, although certain principles may also be applied regarding other types of sensors, e.g. plant water status, etc... adapting them as necessary.

HISTORICAL REMINDER

Since the first instances of irrigation used in agriculture, the form used traditionally has been the gravity-fed method. This involves the flooding of the crop area with water, without really knowing how much water is being applied to each field: water is allowed to flow into a field for a certain period of time and then the next fields were subsequently irrigated in turn.

Since mechanised irrigation came on to the scene, e.g. sprinkling and then drip irrigation, with the creation of reservoirs and closed systems, it became necessary to rationalise these amounts of water applied, notably in order to be able to forecast and plan: how much water

L'objet de cet article n'est pas de revenir en détail sur les différents capteurs utilisables pour le pilotage de l'irrigation, mais de revoir quelques bases fondamentales et principes qui peuvent être utiles pour la prise de décision à partir de l'analyse des mesures obtenues avec ces capteurs, ainsi que de donner les arguments qui justifient ces considérations.

Seront évoqués principalement des aspects relatifs aux mesures d'état hydrique du sol, mais certains principes peuvent également être appliqués sur d'autres types de capteurs, par exemple d'état hydrique du végétal, etc., en les adaptant.

RAPPEL HISTORIQUE

L'irrigation « traditionnelle », depuis les tout premiers temps de l'agriculture irriguée, était principalement gravitaire. Il s'agissait de faire circuler l'eau dans les cultures, sans que l'on connaisse précisément les volumes attribués à chaque parcelle: faire passer l'eau sur une parcelle pendant un certain temps, puis les champs suivants étaient à leur tour irrigués.

Dès l'apparition d'une irrigation plus mécanisée, aspersion, et plus tard goutte-à-goutte, avec la création de réservoirs et de réseaux fermés, il a fallu rationaliser ces apports d'eau, notamment dans un but prévisionnel: combien faut-il apporter d'eau en



SINCE MECHANISED IRRIGATION CAME ON TO THE SCENE, E.G. SPRINKLING AND THEN DRIP IRRIGATION, WITH THE CREATION OF RESERVOIRS AND CLOSED SYSTEMS, IT BECAME NECESSARY TO RATIONALISE THESE AMOUNTS OF WATER APPLIED.

DÈS L'APPARITION D'UNE IRRIGATION PLUS MÉCANISÉE, ASPERSION, ET PLUS TARD GOUTTE-À-GOUTTE, AVEC LA CRÉATION DE RÉSERVOIRS ET DE RÉSEAUX FERMÉS, IL A FALLU RATIONALISER CES APPORTS D'EAU.

needs to be applied in order to avoid 'wastage' and how to calculate the size of the installations? So, the soil has come to be considered as a reservoir which becomes empty when the crop consumes all the water it contained, and which was replenished through the action of rainfall or irrigation. These processes would 'top up the soil water reservoir' when it reached a level beyond which the plants would have found it more difficult to absorb the water or where, consequently, there would be a risk of a drop in production (or a deterioration in the aesthetic aspect in the case of green spaces, for example).

It has also been possible to use this kind of predictive irrigation scheduling modelling, the 'water balance', to manage the irrigation in the field, in real time. However, the concepts that enable the water balance to be calculated, the soil water reservoir ('readily available soil water reserve', with the notion of the 'root zone'...),

évitant qu'elle soit « gaspillée », comment dimensionner les installations? On a alors considéré le sol comme un réservoir qui se vidait lorsque la culture consommait l'eau qu'il contenait, et qui se remplissait sous l'action de la pluie ou des arrosages. Ceux-ci venaient « remplir le réservoir sol » quand celui-ci atteignait un niveau au delà duquel les plantes auraient eu plus de difficultés à s'alimenter, et où, par conséquent il risquait d'y avoir une baisse de production (ou d'esthétique, si l'on considère les espaces verts, par exemple).

Or, on a voulu utiliser également ce mode de calcul prévisionnel, le « bilan hydrique » pour gérer en temps réel sur le terrain la conduite de l'irrigation. Mais les notions qui permettent le calcul de ce bilan hydrique, le réservoir sol (« réserve facilement utilisable », avec la notion de « zone racinaire »...),

‘efficient’ rainfall, ‘efficient’ irrigation, ‘real’ or ‘maximum’, or even ‘optimal’ evapotranspiration (based on the calculation of the ‘reference’ evapotranspiration, often called ‘potential’ ET previously) are imprecise and highly variable models,...both in terms of time and area. We will not dwell on these aspects - a number of articles would be required to explain these difficulties; there is, for example, an entire FAO handbook covering the notion of effective rainfall. Furthermore, the soil does not only function as a water reservoir: it is a zone of water movement, where the water can move downwards, e.g. to replenish the aquifers, or upwards, - known as capillary rise - or even sometimes laterally, - in the case of drip irrigation or impermeable zones, etc... However, these water movements in the ground are almost impossible to estimate under field conditions, because, if the parameters necessary for their calculation are difficult to evaluate on an experimental plot where the characteristics are well-defined and well-known, then it would be even more of a problem under diverse agricultural conditions.

That is why, at the end of the 70s mainly, in order to refine scheduling in real time, there was a desire to develop methods based on the use of field measurements: soil water status, plant water stress.

This involved replacing (or supplementing) these in an integrated manner, with measurements and estimates based on insufficiently reliable or assessable variables and parameters, even if they had been useful and necessary from a predictive viewpoint.

Nevertheless, it must always be borne in mind that a measurement or a set of measurements can only be truly useful for decision-making if the strategies used for processing these measurements have been developed and verified. A number of teams have worked on these strategies: IRSTEA (CTGREF, CEMAGREF), SCP, ARVALIS (CTIFL)... The aim of this article is to look into some basic elements of these strategies and how they should be taken into account when developing the use of sensors for irrigation scheduling, particularly with the methods available today, automation, remote sharing of information, Internet...

We will mainly base this article on the use of soil water status sensors including the tensiometer sensors. Initially, we will explain why we prefer these, without disregarding other types of sensors that could also be of interest (cost, ease of use, etc.). As mentioned above, certain basic principles and considerations could be adapted to very different contexts and types of measurement.

la pluie « efficace », l'irrigation « efficace », l'évapotranspiration « réelle » ou « maximale », ou même « optimale » (basées sur le calcul de l'évapotranspiration « de référence » nommée par habitude ancienne « potentielle »), sont des notions d'une grande imprécision et d'une grande variabilité, dans le temps et dans l'espace. Nous ne reviendrons pas sur ces aspects, il faudrait plusieurs articles pour expliciter ces difficultés – il existe par exemple une brochure entière de la FAO sur la seule notion d'efficacité de la pluie... Par ailleurs, le sol ne fonctionne pas uniquement comme un réservoir: il est en fait une zone de passage de l'eau, où elle peut circuler soit vers le bas – par exemple pour venir remplir les nappes phréatiques –, soit vers le haut – on parle alors de remontées capillaires –, soit même parfois latéralement – cas de l'irrigation goutte-à-goutte, ou en cas de zones imperméables, etc. Or, ces circulations sont quasiment impossibles à estimer dans les conditions du terrain, car les paramètres nécessaires à leur calcul sont difficiles à évaluer, déjà sur les parcelles d'expérimentations agronomiques de caractéristiques bien définies et connues, a fortiori encore plus dans les conditions si diverses de la pratique agricole.

C'est pourquoi, à partir de la fin des années 70 principalement, on a voulu développer, pour affiner le pilotage en temps réel, des méthodes basées sur l'utilisation de mesures de terrain: état hydrique du sol, état hydrique de la culture.

Il s'agissait de remplacer (ou compléter) de façon intégrative par des mesures des estimations basées sur des variables et paramètres insuffisamment fiables ou évaluables, même si elles avaient été utiles et nécessaires dans un but prévisionnel.

Cependant, il faut bien avoir en tête qu'une mesure ou une série de mesures ne peut être vraiment utile pour la prise de décision que si des stratégies d'utilisation de ces mesures ont été développées et vérifiées. De nombreuses équipes ont travaillé sur ces stratégies: IRSTEA (CTGREF, CEMAGREF), SCP, ARVALIS (CTIFL)... L'objet du présent article est de revenir sur quelques éléments de base de ces stratégies et sur l'intérêt de leur prise en compte lorsque l'on développe l'utilisation des capteurs pour le pilotage de l'irrigation, notamment avec les moyens disponibles actuellement, automatisation, partage de l'information à distance, Internet...

Nous nous baserons ici principalement sur l'utilisation de capteurs d'état hydrique du sol et, parmi ceux-ci, de capteurs tensiométriques. Nous expliquerons dans un premier temps pourquoi ils ont notre préférence, sans toutefois fermer la porte aux autres types de capteurs qui peuvent avoir leur intérêt également (coût, facilité de mesure, etc.). Comme dit plus haut, on peut adapter certains principes fondamentaux et considérations à des contextes et types de mesures très différents.



TENSIOMETRY, WHICH SHOWS HOW MUCH SUCTION IS REQUIRED TO WITHDRAW WATER FROM THE SOIL, GIVES US A DIRECT INDICATION OF HOW MUCH SOIL WATER IS READILY AVAILABLE TO THE ROOTS.

LA TENSIOMÉTRIE, QUI INDIQUE LA FORCE DE LIAISON ENTRE L'EAU ET LE SOL, RENSEIGNE DIRECTEMENT SUR LA DISPONIBILITÉ EN EAU DU SOL POUR LES RACINES.

THE BENEFITS OF TENSIOMETRIC MEASUREMENTS TO IRRIGATION SCHEDULING

Tensiometry, which shows how much suction is required to withdraw water from the soil, gives us a direct indication of how much soil water is readily available to the roots, whereas the soil moisture content (percentage by volume or weight of water in the soil) does not give any idea about this availability if the soil type is not known. For example, a sandy soil with a water content by volume of 20% can appear to be 'waterlogged', or at least have a water content that is very readily available to the crop, whereas a clayey soil, with the same moisture content, will almost behave like a 'dry' soil, the water being substantially withheld, and, therefore, not very available to the plants...

INTÉRÊT DES MESURES TENSIOMÉTRIQUES EN CONDUITE DE L'IRRIGATION

La tensiométrie, qui indique la force de liaison entre l'eau et le sol, renseigne directement sur la disponibilité en eau du sol pour les racines, alors que la valeur de teneur en eau (pourcentage volumique ou pondéral d'eau dans le sol) ne donne aucune idée de cette disponibilité si l'on ne connaît pas le type de sol. Par exemple, un sol sableux avec une teneur en eau volumique de 20 % pourra paraître « engorgé », ou au moins avec de l'eau extrêmement disponible pour la culture, alors qu'un sol argileux, avec la même teneur en eau se comportera comme un sol quasiment « sec », l'eau y étant fortement retenue, et donc peu disponible pour les plantes...

In order to be able to use the water content concept, it will be necessary to know and understand a graph known as the soil-water characteristic curve, which compares the volumetric soil moisture content with the soil water tension or suction for each soil type, according to its texture (particle size) and structure (compacted or loose, for example). And this would apply to different layers of soil, if necessary...

It is also important to know the characteristics of the crop, concerning the positioning of the roots, for example or their absorption capacity... Another possibility to be used is understanding the maximum and minimum values that can be allowed for the water content of the different layers of a soil profile and even determine how these compare with the water content values measured in real time. This will require a preliminary study to be conducted to determine these maximum and minimum reference values.

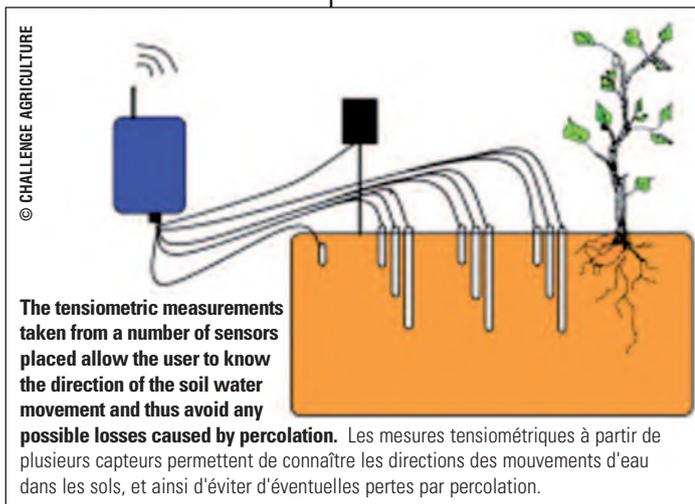
We must emphasize, therefore, the benefit of working with tensiometric measurements as opposed to water content when we do not have sufficient information about the soil and crop parameters.

Pour pouvoir bien utiliser la notion de teneur en eau, il faudrait donc connaître ce qu'on appelle la « courbe caractéristique » du sol, reliant tension et teneur en eau pour chaque type de sol, selon sa texture (granulométrie) et sa structure (tassé ou plus aéré, par exemple). Et ce, pour les différentes couches de sol si nécessaire... Il faudrait

connaître également des caractéristiques de la culture, concernant par exemple la localisation des racines, leur capacité d'absorption... Une autre possibilité d'utilisation consiste à connaître les valeurs maximales et minimales de teneur en eau que l'on s'autorise dans les différentes couches d'un profil de sol, et de voir où se situent les

valeurs de teneur en eau mesurées en temps réel par rapport à ces valeurs. Mais cela aussi suppose une étude préalable pour obtenir ces références maximales et minimales...

On soulignera donc l'intérêt de travailler à partir de mesures tensiométriques plutôt que de teneur en eau lorsque l'on ne connaît pas encore suffisamment les paramètres du sol et de la culture.



Furthermore, the tensiometric measurements, taken from a number of sensors placed, for example, at different depths, allow the user to know the direction of the soil water movement and thus avoid, or have a better control over, any possible losses caused by percolation, and/or maximise the contribution of the deep soil water reserves: benefitting the capillary rise process and saving on irrigation water by using naturally available water resources.

Finally, the tensiometric measurements are particularly useful for detecting any unusual, but not uncommon, incidents or mishaps: difference in the soil types, plough pans causing waterlogging... Numerous examples have been observed:

- plough pan waterlogging of maize in Camargue, with suffocation of the roots and poor plant growth;
- vines at the foot of a slope (Provence) with a temporary perched aquifer preventing the development of deep roots, leading suddenly to a high level of water stress when this aquifer disappeared in early August;
- peach trees watered by drip irrigation in the Vivarais region with root suffocation in the zone covered by the drippers, and symptoms of... water stress...;
- urban spruce trees planted in pits where the managers recommend an increase in irrigation, when, in reality, they were 'flooded' and already overirrigated;
- etc...

For all these reasons (and a few others besides: cost of sensors, etc.) it would appear to us that tensiometric measurements are the type of measurement best suited to irrigation scheduling. There could, however, be reasons or occasions for using water content measurements, particularly when there is a good knowledge of the field references.

Par ailleurs, les mesures tensiométriques, à partir de plusieurs capteurs, placés par exemple à des profondeurs différentes, permettent de connaître les directions des mouvements d'eau dans les sols, et ainsi d'éviter, ou de mieux

contrôler, d'éventuelles pertes par percolation, et/ou de maximiser la contribution des réserves en eau profondes du sol : favoriser les remontées capillaires et économiser de l'eau d'irrigation en utilisant les ressources en eau naturellement disponibles.

Enfin les mesures tensiométriques sont particulièrement utiles pour détecter des incidents ou accidents singuliers... mais pas rares : hétérogénéité du sol, semelle de labour causant des zones d'hydromorphie... De nombreux exemples ont été observés :

- engorgement sur semelle de labour sur maïs en Camargue, avec asphyxie racinaire et mauvais développement de la culture ;
- vigne en pied de coteaux (Provence) avec nappe perchée temporaire empêchant le développement de racines profondes ce qui entraînait subitement un fort stress hydrique lors de la disparition de cette nappe début août ;
- pêchers irrigués en goutte-à-goutte dans le Vivarais avec asphyxie des racines dans la zone sous influence des goutteurs, et symptômes de... stress hydrique...;

- arbres urbains dépérissants plantés en fosses, pour lesquels les gestionnaires préconisaient d'augmenter l'irrigation, alors qu'en réalité ils étaient « noyés », et déjà surirrigués ;
- etc.

Pour toutes ces raisons, (et quelques autres : coût des capteurs, etc.) la mesure tensiométrique nous semble le type de mesure le mieux adapté à la conduite de l'irrigation. On peut cependant avoir des raisons ou des occasions d'utiliser des mesures de teneur en eau, notamment avec une bonne connaissance des références du terrain.



The tensiometric measurements are particularly useful for detecting any unusual, but not uncommon, incidents or mishaps: difference in the soil types, plough pans causing waterlogging...

Les mesures tensiométriques sont particulièrement utiles pour détecter des incidents ou accidents singuliers... mais pas rares : hétérogénéité du sol, semelle de labour causant des zones d'hydromorphie...

In all these cases, the use of measurements will always be preferable to rough estimates of a water balance, which must always be treated with caution.

So, let us now discuss a few principles to be taken into account when developing strategies for using measurements for irrigation scheduling. We will focus on two main aspects:

- the benefit of working on a trend analysis of the difference in the measurements rather than referring to absolute values;
- modalities for putting these principles into practice: number of repeat measurements, representivity, choice of location.

THE BENEFIT OF USING TREND ANALYSIS OF THE TENSIOMETRIC MEASUREMENTS FOR IRRIGATION SCHEDULING, RATHER THAN ROUGH ABSOLUTE VALUES.

This is the first principle that we wish to mention. It basically relates to adhering initially to the slope of the measurement versus time curve, and not the absolute values of the measurements (without disregarding them completely, however). This principle is based on universal, or more specific, criteria.

‘Universal’ criteria

- The variability of the ground conditions, often within the same field on the farm, as well as certain developed strategies (cf. bibliography) require the use of a certain number of sensors in order to be able to use these strategies. It is not, therefore, a matter of using expensive sensors, which are used in scientific experiments, but rather sensors whose cost is more reasonable, although they may be less precise. Identifying the trends and not the threshold values will make it easier for the user to cope with the accuracy level of the values obtained with these less costly sensors.

- In the same vein, identifying the trends, but not for individual measurements, rather sets of measurements, will guarantee the reliability of the values observed.

Dans tous les cas, l'utilisation de mesures sera toujours préférable aux seules estimations d'un bilan hydrique toujours sujet à caution.

Abordons à présent quelques principes à prendre en compte lors de l'élaboration des stratégies d'utilisation des mesures pour le pilotage de l'irrigation. Deux points seront principalement abordés:

- l'intérêt de travailler en analyse d'évolution des mesures plutôt qu'en se référant aux valeurs absolues ;
- les modalités de mise en pratique : nombre de répétitions des mesures, représentativité, choix de leur localisation.

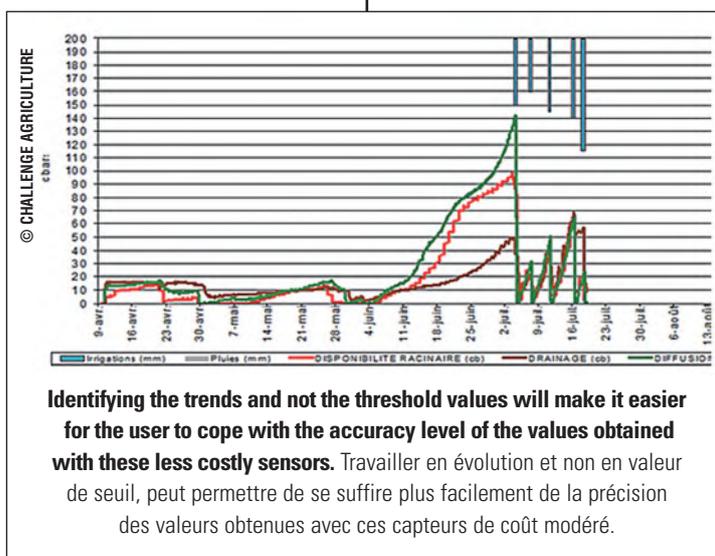
INTÉRÊT DE L'ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES MESURES TENSIOMÉTRIQUES POUR LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION, PLUTÔT QUE DES SEULES VALEURS ABSOLUES

Il s'agit du premier « principe » que nous voulons évoquer. Il s'agit de s'attacher principalement et dans un premier temps à la pente de la courbe des mesures en fonction du temps, et non aux valeurs absolues des mesures (sans toutefois les oublier complètement!). Ce « principe » repose sur des critères universels ou plus spécifiques.

Critères « universels »

- La variabilité de conditions de terrain, à l'intérieur souvent d'une même parcelle agricole, ainsi que certaines stratégies développées (cf. bibliographie) demandent d'utiliser un certain nombre de capteurs pour pouvoir

utiliser ces stratégies. Il ne s'agira donc pas, en général, d'utiliser les capteurs souvent très coûteux qui servent en expérimentations scientifiques, mais des capteurs dont le coût est plus raisonnable et dont la précision n'est pas aussi fine. Travailler en évolution et non en valeur de seuil, peut permettre de se suffire plus facilement de la précision des valeurs obtenues avec ces capteurs



de coût modéré.

- Dans le même ordre d'idée, travailler en évolution, donc non sur des mesures individuelles, mais sur des séries de mesures, assure plus de fiabilité aux valeurs observées.

• Furthermore, identifying the trends could mitigate the spatial variability of the phenomenon studied: we can confirm that the measurements in absolute terms can be extremely variable, taking into account the variability of the terrain, but the directions of the trend curve - increase or decrease of the measurements over time, change in intensity of these phenomena - are often more consistent.

• Finally, from a practical point of view, plotting the measurements on an historical trend curve allows the user to predict; the slope of the curve gives an indication of the amount of time remaining before he or she must react: rapidly, or, on the contrary, the farmer or manager (green spaces) may even still have time to get organised (organisation of work, watering cycles, etc.).

More specific criteria related to the observations made in the field

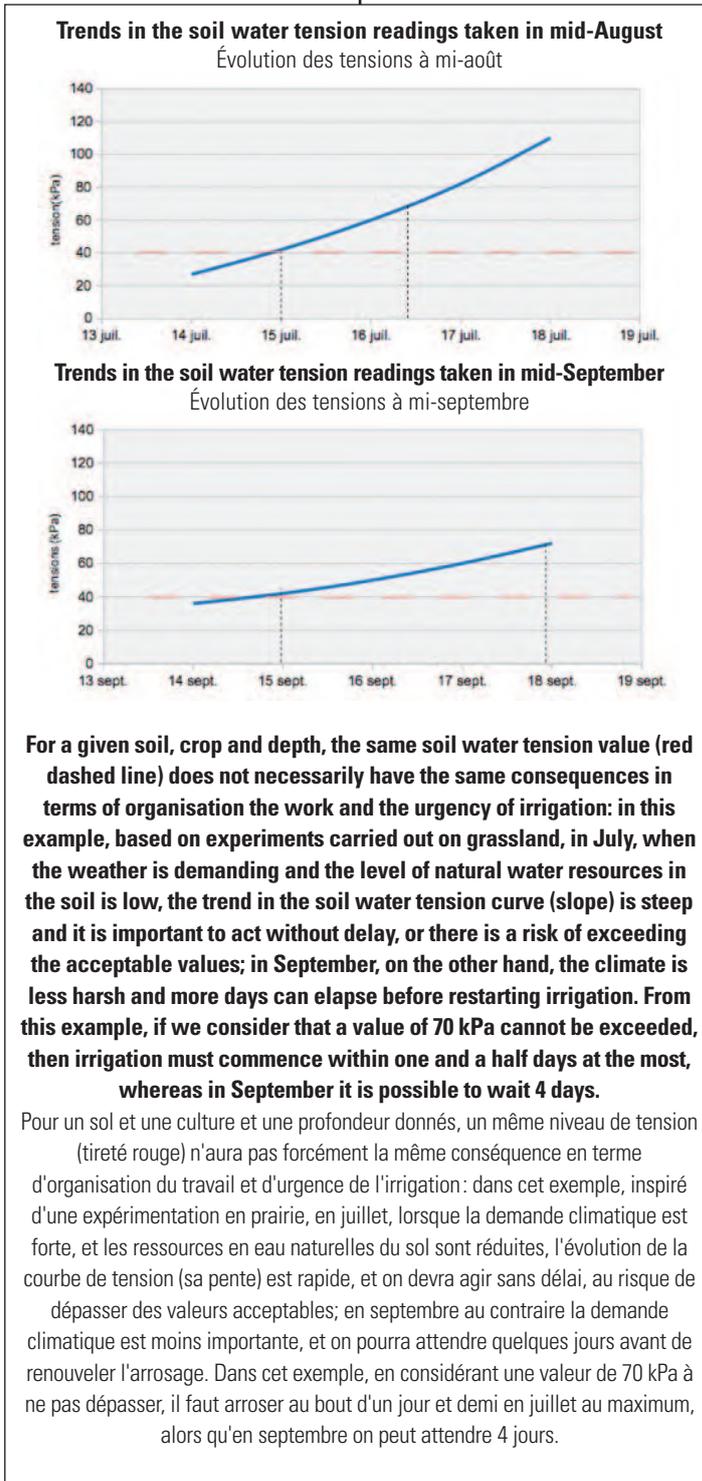
• The same absolute value does not have the same significance at different times of the year. Thus, it has been confirmed that in the month of August (grassland) when the soil tension value was around 20 cbars, it took 2 days for irrigation to be urgently required. At that time, the dry soil slope on the curve (increase in tension) was very steep and indicated that two days later would be too late... In September, on the other hand, the dry soil slope is not steep, so for the same absolute value measured, we could allow more days to elapse before there would be a need to irrigate.

• Par ailleurs, travailler en évolution peut atténuer la variabilité spatiale du phénomène étudié: on constate que les mesures en valeurs absolues peuvent être extrêmement variables, compte tenu de la variabilité du terrain, mais que les sens d'évolution – augmentation ou diminution des mesures au cours du temps, changement d'intensité de ces phénomènes – sont souvent plus homogènes.

• Enfin d'un point de vue pratique, travailler sur les courbes d'évolution des mesures en fonction du temps peut permettre d'anticiper; la pente de la courbe donne des indications sur le délai qui reste pour devoir absolument réagir: rapidement, ou bien au contraire l'agriculteur ou le gestionnaire (espaces verts) a encore du temps pour s'organiser (organisation du travail, des tours d'eau, etc.).

Critères plus spécifiques liés à des observations réalisées sur le terrain

• Une même valeur absolue n'a pas la même signification à différentes périodes de l'année. Ainsi a-t-on constaté qu'au mois d'août (prairie) lorsque la valeur de tension dans le sol était de l'ordre de 20 cbars, il fallait 2 jours pour que la nécessité d'irriguer soit pressante. À ce moment là, la pente de la courbe de dessèchement du sol (augmentation de tension) était très forte, et laissait présager que deux jours plus tard ce serait trop tard... En septembre, au contraire, la



pente de dessèchement est beaucoup plus faible, et pour la même valeur absolue mesurée, on peut attendre plus de jours avant que la nécessité d'irriguer ne s'impose.

• Another critical period for irrigation is the start-up at the beginning of the season. In tree-growing, i.e. cherry trees under drip irrigation, we were able to confirm that changes in the tensiometric measurements of the zones watered by the drippers during the period of irrigation (see the strategies recommended for drip irrigation in the bibliography) are very slight in the long term. This means that the water being withdrawn by the roots is being replaced by the soil's natural contribution. However, this zone, due to the fact that it has been under irrigation for a number of years, has a high root population. At a given moment, the curve will rise sharply. That is then the time to start irrigation, but in very small doses (the measurements allow these to be adjusted), but not necessarily when the fruit producer would understandably have assumed that it is necessary to irrigate. Thus, the rooting system will continue to function properly in the zones watered by the drippers.

PRACTICAL APPLICATION OF PROCEDURES

Number of repeats.

Even though the strategies that allow decisions to be taken are mainly based on the measurement trend analysis, with the advantages explained above, the importance of the repeats should not be forgotten, even though the soil and crop situations are supposedly identical (at least, as far as is known...):

- with a single sensor, for a given situation, nobody is quite sure what they are going to do - particularly in the case of a sensor - and it is not very representative
- with two sensors, if one goes in one direction and the other goes in another, no-one is quite sure what to decide
- with 3 sensors, there are two that necessarily go in the same direction, which will influence the decision; it is thus advisable to have an uneven number of sensors. For sensors that can be considered as being moderately reliable, we could instead recommend having

• Une autre période critique pour l'irrigation est son démarrage en début de saison. En arboriculture, cerisier avec arrosage au goutte-à-goutte, on a pu constater que l'évolution des mesures tensiométriques dans les zones qui seront en période d'irrigation sous influence des goutteurs (voir dans la bibliographie les stratégies préconisées pour l'irrigation goutte-à-goutte), reste longtemps très faible. Cela signifie que ce que les racines prélèvent est compensé par la contribution naturelle du sol. Mais cette zone, du fait de l'irrigation réalisée depuis plusieurs années, est très riche en racines. À un moment donné, la pente de ces courbes s'accélère rapidement. Il est alors temps de démarrer l'irrigation, même à très petites doses (les mesures permettent de s'ajuster), pas forcément au moment où l'arboriculteur aurait pensé naturellement qu'il est déjà nécessaire d'arroser. On préserve ainsi le bon fonctionnement racinaire dans les zones sous influence des goutteurs.



With 3 sensors, there are two that necessarily go in the same direction, which will influence the decision; it is thus advisable to have an uneven number of sensors.
 Avec 3 capteurs, il y en a forcément au moins 2 qui vont dans le même sens, ce qui permet d'orienter la décision ; on conseille donc de préférer un nombre impair de capteurs.

MODALITÉS DE MISE EN PRATIQUE

Nombre de répétitions.

Même si les stratégies permettant les prises de décision sont principalement basées sur l'analyse de l'évolution des mesures, avec les avantages précisés plus haut, il ne faut pas oublier l'importance des répétitions,

même dans des situations de sol et de culture a priori identiques (au moins à ce qu'on en sait...):

- avec un seul capteur, pour une situation donnée, on ne sait pas trop ce qu'on fait – notamment en cas de défaillance du capteur – et on a peu de représentativité ;
- avec 2 capteurs, si l'un va dans un sens et l'autre dans l'autre, on ne sait pas quoi décider ;
- avec 3 capteurs, il y en a forcément au moins 2 qui vont dans le même sens, ce qui permet d'orienter la décision ; on conseille donc de préférer un nombre impair de capteurs. Pour des capteurs que l'on considérerait comme moyennement fiables, on peut

5 sensors, for example (instead of 3), which, would allow for the extreme values to be discarded from the calculations and only take into consideration the median readings of the 3 sensors each time, possibly basing the calculations on the average of the 3 median sensors in order to maintain one single representative criteria, notwithstanding the range of conditions across the field.

Representative nature of the measurements and choosing their location. When sensors are positioned for the purpose of irrigation scheduling, the question arises of how representative they are of the zones where they are installed. However, many plots or fields, particularly - but not only - on hilly terrain, have wide disparities in soil type (high or low ground, outcrops or rocky areas, etc.), which are not immediately obvious when assessing the land at first glance. A number of different methods have been considered for obtaining a mapping system of these disparities, which have an impact on the soil-plant-water relationship.

Thus, in tree-growing, it is possible to take sample measurements of the trunks over the whole plot

recommander par exemple plutôt 5 capteurs (au lieu de 3), ce qui peut permettre, d'écarter du calcul les valeurs extrêmes, et de ne raisonner que sur les 3 capteurs médians à chaque fois, en se basant éventuellement sur la moyenne de ces 3 capteurs médians, pour garder un seul critère représentatif malgré tout d'un ensemble de la parcelle.

Représentativité des mesures, et choix de leur localisation. Lorsque l'on positionne des capteurs avec un objectif de pilotage de l'irrigation, il faut se poser la question de la représentativité des zones d'implantation de ces capteurs. Or beaucoup de parcelles, notamment en terrains de côteaoux – mais pas seulement –, présentent de fortes hétérogénéités de sol (hauts et bas de côteaoux, affleurements, etc.), pas toujours évidents à déterminer lorsque l'on regarde le sol en surface lors d'une première approche. Diverses méthodes ont été envisagées pour obtenir un minimum de cartographie de ces hétérogénéités qui impactent sur le fonctionnement hydrique du couple sol-culture.

Ainsi en arboriculture, il est possible de pratiquer un échantillonnage des diamètres des troncs sur toute la

(work to be carried out during the off-season...); or it is even possible to take tests with a hand auger across the whole plot (painstaking...).

At the present time, the use of remote sensing is being considered in order to better understand the zones that are taken as being typical of the field or piece of land and even be able to extrapolate to much larger areas, up to the scale of a territory or small region - by grouping together zones with similar characteristics.

Finally, when positioning sensors for the purpose of irrigation scheduling, a choice will have to be made eventually: positioning the sensors in the zone with the most adverse conditions, which could lead to overirrigating the areas with the most favourable conditions; or rather place the sensors in an area with favourable conditions, in which case the zone or zones under adverse conditions could be suffering from water stress during certain periods. This choice has to be thought out according to the farmers objectives (water saving, maximum/optimal yield...) and the relative size and importance of these different zones.

parcelle (travail à réaliser en saison creuse...); ou bien on peut faire un certain nombre de sondages à la tarière sur une parcelle (laborieux...).

Actuellement, l'utilisation de la télédétection peut être envisageable pour mieux appréhender les zones représentatives des parcelles et pouvoir même extrapoler à des zones plus grandes, jusqu'à éventuellement l'échelle d'un territoire ou d'une petite région - en regroupant les zones dont les réactions sont proches.

Enfin, lorsque l'on positionne des capteurs servant au pilotage pour une unité d'irrigation, un choix sera à faire éventuellement: positionner les capteurs dans la zone la plus défavorable, ce qui peut entraîner de la surirrigation dans les zones les plus favorables, mais assure que l'ensemble de la parcelle sera alimentée suffisamment, même les zones défavorisées; ou bien placer les capteurs dans une zone favorable, auquel cas la ou les zones défavorables pourront être en stress hydrique à certaines périodes. Ce choix est à raisonner en fonction des objectifs de l'agriculteur (économie d'eau, rendement maximal/optimal...) et de l'importance relative de ces différentes zones.

PLASTIC-PUGLIA
Irrigation Systems ITALY
since 1967

TOP QUALITY IN DRIP IRRIGATION

<p>Aquadrop</p> <p>DRIP LINE WITH FLAT EMITTER</p>	<p>AQUATAPE</p> <p>DRIP TAPE</p>	<p>AquaPress</p> <p>PRESSURE COMPENSATING DRIP LINE</p>	<p>GOLD-DRIP</p> <p>DRIP LINE WITH CYLINDRICAL EMITTER</p>
---	---	--	---

www.plasticpuglia.it

CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In summary, we can say that, compared with a simple water balance approach, which is useful initially when sizing the installations, sensors are of much greater use for improving the irrigation scheduling and control in real time, whether in agriculture or the management of green spaces.

However, no sensor is completely suitable for this purpose without an implementation strategy and a strategy for interpreting the measurements being in place.

We have endeavoured to mention here a few basic principles for strategies relating to the use of sensors for irrigation scheduling, as developed over the last forty years. Nowadays, the technological progress made in electronics, software, Internet and communication, particularly over the last fifteen years, has brought significant improvements and opportunities in the collection and management of data, even including automatic control systems. However, the aspects covered here in respect of using sensors and processing the information thus obtained, for the purpose of irrigation scheduling, have lost none of their importance.

The following bibliography will allow those who are interested to find further information about the examples cited above and have an in-depth deepen their knowledge of the scheduling concepts and strategies discussed above. ■

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

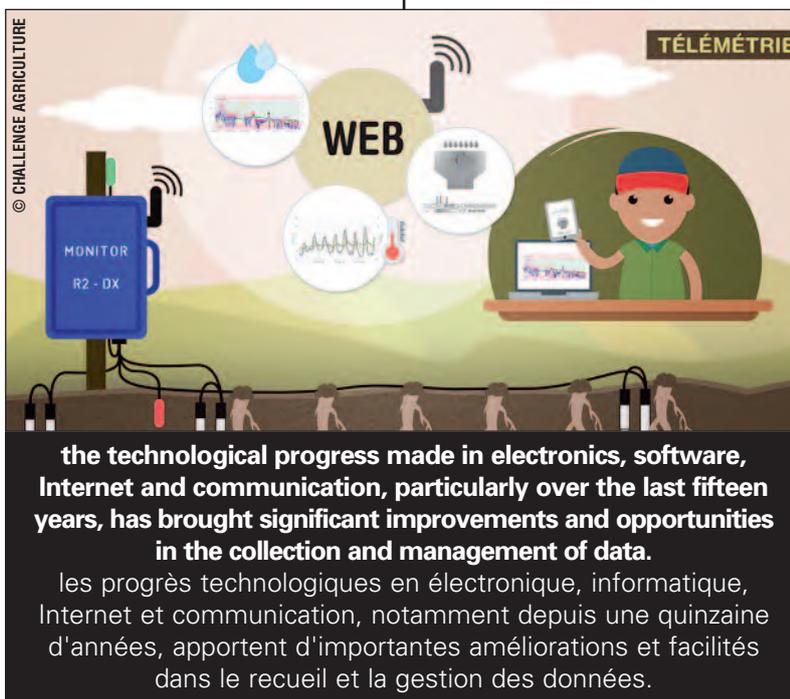
En résumé, on peut dire que, par rapport à un simple bilan hydrique, qui reste utile dans un premier temps pour le dimensionnement des installations, les capteurs sont d'une grande utilité pour améliorer la conduite et le contrôle en temps réel de l'irrigation, que ce soit en agriculture ou en gestion d'espaces verts.

Mais qu'aucun capteur n'est vraiment utilisable correctement dans cet objectif sans une stratégie de mise en œuvre et une stratégie d'interprétation des mesures.

Nous avons tenté de rappeler ici quelques principes à la base des stratégies d'utilisation des capteurs pour le pilotage de l'irrigation développées dans les quarante dernières années. Actuellement les progrès technologiques en électronique, informatique, Internet et communication, notamment depuis une quinzaine d'années, apportent d'importantes améliorations et facilités dans le recueil et la gestion des données, et jusqu'à la réalisation

d'automates. Cependant les quelques axes de réflexion que nous avons abordés sur la mise en œuvre de ces capteurs et le traitement de l'information qu'ils permettent d'obtenir, en vue de leur utilisation pour le pilotage de l'irrigation gardent toute leur importance.

La bibliographie ci-après permettra à ceux qui le souhaitent de retrouver quelques exemples cités et d'approfondir les notions et les stratégies de pilotage évoquées dans cet article. ■



the technological progress made in electronics, software, Internet and communication, particularly over the last fifteen years, has brought significant improvements and opportunities in the collection and management of data.

les progrès technologiques en électronique, informatique, Internet et communication, notamment depuis une quinzaine d'années, apportent d'importantes améliorations et facilités dans le recueil et la gestion des données.

BIBLIOGRAPHY BIBLIOGRAPHIE

- BENSAOUD A., ISBÉRIE C., MARIÉ X.**, 2006 - *Tensiométrie et fonctionnement hydrique de deux types de sols urbains reconstitués*. 33^{es} Journ. GFHN, 28-29 Nov. 2006, in: Milieux Poreux Transf. Hydr., 52, 145.
- BOYER I., ISBÉRIE C., MARTINEZ A.M., BERUD M., DUFILS A.**, 2012 - *Measuring soil water tension an soil moisture content: an experimental comparison of the new irrigation scheduling tools*. Irrigaz. n° 128, 14-19.
- ISBÉRIE C.**, 1992 - *Contribution du sol à l'alimentation hydrique d'un verger de cerisiers micro-irrigué selon un pilotage tensiométrique*. Thèse, Univ. Montp. II, CEMAGREF, 415 p.+ 384 p. annexes.
- MÉROT A., WÉRY J., ISBÉRIE C., CHARRON F.**, 2007 - *Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometer*. Eur. J. Agron., 8-18.
- PEYREMORTE (P.)**, 1984 - *Pilotage des irrigations : adéquation des estimations ou des mesures ?* Bull. GFHN, n° 16, 17 - 36.
- RNEDHA**, 1995 - *La conduite de l'irrigation, de la stratégie au pilotage de l'irrigation*, 124 p.
- TRON G., ISBÉRIE C., CHOL P.**, 2013 (rééd.) - *La tensiométrie pour piloter les irrigations : une utilisation raisonnée de la ressource en eau*. Educagri éditions, Dijon. 250 p. (nouv. éd. revue et augmentée).