



Projet INCO-WADEMED
Actes du Séminaire
Modernisation de l'Agriculture Irriguée
Rabat, du 19 au 23 avril 2004



Evaluation de la demande en eau et pilotage de l'irrigation déficitaire des cultures annuelles : méthodologie et outils de mesure

B.Ben Nouna¹, A.Zairi¹, P.Ruelle², A.Slatni¹, S.Yacoubi¹, T.Ajmi¹,
T.Oueslati³

¹ Institut national de recherches en génie rural eaux et forêts Tunis, Tunisie

² Cemagref, Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement Montpellier, France

³ Centre technique de la pomme de terre, Saïda, Tunisie

E-mail : bennouna.bechir@iresa.agrinet.tn

Résumé - Actuellement, dans le Maghreb, la disponibilité limitée en eau pour l'irrigation n'est pas encore prise en compte pour évaluer la demande des agriculteurs et l'efficacité de l'irrigation. En Tunisie, les restrictions d'eau conjuguées aux objectifs de production contraignent fréquemment les agriculteurs à pratiquer une " irrigation déficitaire ". L'objectif de ce travail est d'identifier des stratégies d'irrigation de cultures annuelles (tomate, blé, pomme de terre) dans des situations de stress hydrique. Des essais d'irrigation ont été mis en place sur une culture de tomate en 2001, dans la basse vallée de la Medjerda. La technique des mesures TDR a permis de fournir des mesures régulières du stock d'eau dans le sol, comparées aux mesures gravimétriques. Des mesures similaires ont été effectuées sur le blé en 1998 et la pomme de terre en 2000. La consommation d'eau, mesurée par décade, à chaque stade de développement, est la plus élevée pour la tomate, avec un maximum enregistré au stade de mi-saison : tomate, 7,2 mm/jour ; blé, 4,9 mm/jour ; pomme de terre, 4,5 mm/jour. L'efficacité de consommation a été estimée en fonction des régimes hydriques : pour la tomate, de 4 à 14 kg/m³ ; pour le blé, de 0,8 à 1,3 kg/m³ ; pour la pomme de terre, de 6 à 12 kg/m³. Par ailleurs, les rendements obtenus en fonction des restrictions d'eau traduisent une baisse cohérente avec la valeur du rapport moyen ETR/ ETM du cycle. La sensibilité au stress hydrique est plus marquée pour la tomate que pour le blé dur et la pomme de terre. En outre, une restriction d'eau engendre une baisse de l'efficacité de la consommation. Ces résultats constituent des références locales, utiles pour raisonner le pilotage de l'irrigation. Les outils utilisables pour mettre en œuvre pratiquement les stratégies d'irrigation en milieu agricole (sondes watermark) et leur adaptation aux conditions annuelles sont décrits. A cet effet, une relation simplifiée a été établie pour le blé entre le niveau d'épuisement de la réserve utile du sol et les données fournies par des sondes watermark installées dans des parcelles d'agriculteurs.

Mots clés : blé, tomate, pomme de terre, bilan hydrique, consommation d'eau, efficacité de l'irrigation, irrigation, irrigation par aspersion, pilotage de l'irrigation, rendement, stress hydrique, sonde à neutrons, mesure TDR, sonde watermark, Medjerda, Tunisie.

1 Introduction

Dans les zones semi-arides du sud de la Méditerranée, la faiblesse des précipitations et leur distribution aléatoire se traduisent souvent par une situation de déficit hydrique présent pratiquement durant tout le cycle des cultures. La Tunisie, vivant ce contexte de ressources en eau limitées, s'est engagée depuis les trois dernières décennies dans un programme dynamique de mobilisation de l'eau. Des investissements lourds ont été consentis, atteignant 9 % des investissements totaux de l'Etat au cours du VIII^e plan de développement (1992-1996). L'agriculture reste le plus grand consommateur d'eau (plus de 80 % de la demande totale) et représente environ 18 % du produit intérieur brut (DGGR, 1996[1]).

Compte tenu des ressources en eau limitées et du déséquilibre entre l'offre et la demande, l'adoption d'une approche rationnelle dans la gestion de l'eau d'irrigation dans les périmètres irrigués s'avère indispensable. Dans cette perspective, une meilleure évaluation de la demande en eau agricole est nécessaire et repose sur une bonne connaissance des pratiques des irrigants. La demande en eau dépend directement des conditions d'accès à l'eau sur des réseaux collectifs, ou à partir de pompes individuels et des possibilités d'utilisation à la parcelle. En effet, les contraintes climatiques, combinées aux autres facteurs limitants du milieu, conduisent les agriculteurs à adapter leurs conditions de production.

Diverses stratégies sont possibles : l'irrigation de complément ; l'irrigation concentrée sur certaines cultures ou répartie sur l'ensemble de la surface ; l'irrigation déficitaire. Le choix d'une stratégie d'irrigation est un des éléments du système de culture et doit être cohérent avec l'ensemble de l'itinéraire technique. Si l'eau est limitée, des stratégies de tolérance et de rationnement sont mises en œuvre en jouant sur les choix d'espèces, de variétés et de dates de semis mais aussi, en maîtrisant la fertilisation et la densité de peuplement. D'autres techniques, fondées sur une conduite de la culture en irrigation déficitaire, apparaissent opportunes, comme le font apparaître les évaluations économiques. Zairi *et al.* (2003)[8] ont montré que dans le cas d'une demande climatique moyenne, des réductions relativement importantes d'apports d'eau sont possibles sans occasionner de fortes pertes de rendement. Cependant, dans le cas d'une demande climatique très forte, l'adoption de l'irrigation déficitaire est difficile. La solution optimale est la maximisation du rendement en réduisant la superficie cultivée.

Ainsi que le montrent de nombreuses études, l'agriculteur ne se contente pas de décisions opportunistes en ce qui concerne l'irrigation, même s'il n'explique pas ses décisions qui peuvent conduire à des situations très contrastées en ce qui concerne la valorisation de l'eau (Deumier *et al.*, 1996[3] ; Ruelle *et al.*, 1997). L'irrigant organise la gestion de l'eau sur son exploitation en s'appuyant sur une stratégie de conduite de l'irrigation pour ses cultures. Il va pour cela intégrer les contraintes auxquelles il est confronté, en particulier l'offre en eau (tour d'eau, accès à différentes ressources), le prix de l'eau, la main-d'œuvre et ses objectifs de production. Il en résulte une demande en eau qui ne peut se déduire directement des besoins en eau des cultures. La mise en œuvre de ce programme ou calendrier prévisionnel de l'irrigation se fait en tenant compte d'un certain nombre d'aléas dus aux conditions climatiques, ou d'événements imprévus. L'agriculteur adapte son programme en cours de campagne, c'est la conduite tactique du pilotage de l'irrigation.

Dans ce contexte, les organismes de recherche et les organismes techniques ont mis en œuvre des travaux expérimentaux pour compléter les données souvent limitées aux besoins en eau et mal adaptées au contexte méditerranéen. L'agriculteur, tout comme le vulgarisateur ou le gestionnaire d'une ressource, a besoin de références pour prendre des décisions, effectuer des diagnostics ou conseiller des améliorations.

Cette communication propose une méthodologie opérationnelle pour identifier des stratégies d'irrigation des cultures annuelles (tomate, blé, pomme de terre) dans un contexte de disponibilité en eau limitée. Il s'agit de réunir les informations nécessaires pour un choix d'irrigation

déficitaire le plus approprié aux conditions locales et aux différentes contraintes et d'examiner les outils disponibles pour mettre en œuvre un pilotage de l'irrigation adapté.

L'approche expérimentale a pour but de mesurer les effets des différents niveaux de restriction hydrique, en s'appuyant sur le cas de la culture de "tomate de saison". Des mesures diélectriques (TDR) ont été effectuées pour évaluer les consommations d'eau et l'état hydrique du sol. L'objectif est d'élaborer des outils simples et opérationnels d'aide à la décision d'irriguer, en intégrant la variabilité climatique, et d'identifier les paramètres principaux d'un pilotage approprié. Des résultats concernant le blé et la pomme de terre conduits en irrigation déficitaire sont aussi présentés. Dans une dernière partie, sont examinées les possibilités dont dispose l'agriculteur pour mettre en œuvre les stratégies proposées, en particulier en analysant l'emploi d'outils simples, en particulier des sondes watermark, pour les avertissements d'irrigation des cultures annuelles en fonction de l'état de la réserve utile du sol. Un exemple d'avertissement à l'irrigation dans des parcelles d'agriculteurs est présenté.

2 Matériels et méthodes

2.1 Site expérimental

L'expérimentation a été conduite dans le domaine du Centre technique de la pomme de terre à Saïda, dans la basse vallée de la Medjerda (Lat. 37°, Long. 10°, Alt. 328 m). Le climat est semi-aride et l'hiver tempéré. Le sol de la parcelle d'essai est limono-argileux (argile, 30 % ; limon, 48 %). La réserve utile, évaluée au laboratoire, est de l'ordre de 180 mm/m. L'eau d'irrigation, titrant en moyenne 2 g/l, provient du canal à ciel ouvert de la Medjerda. Pour les besoins des essais (irrigation par aspersion), un bassin de reprise de 50 m³ a été construit. La mise sous pression est assurée par un groupe motopompe.

2.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental a été mis en place sur une parcelle de 0,4 ha conduite en irrigation par aspersion. Le réseau d'irrigation a été disposé de manière à établir un gradient pluviométrique (*source on line*) en fonction de l'éloignement des asperseurs et par suite, engendrer des traitements hydriques différenciés. La culture de tomate a été plantée le 6 avril 2001, le peuplement est de 4 plantes/m² (35 cm entre les plantes et 70 cm entre les lignes).

Le protocole expérimental prévoit (figure 1) :

- un traitement S0 placé entre deux rampes d'irrigation (1 et 2), irrigué à l'ETM (évapotranspiration maximale). Le pilotage est assuré en mesurant directement l'humidité dans le sol. L'irrigation est déclenchée selon le coefficient de tarissement (p) de la réserve utile (RU), ce coefficient est égal à 0,5 pour la tomate (Doorenbos et Kassam, 1980[2]) ;
- des traitements complémentaires S3, S6, S9, S12 à une distance croissante de la rampe 3 (respectivement 3, 6, 9 et 12 m). Ces traitements sont arrosés par une seule ligne d'asperseurs et sont donc soumis à un gradient d'apport d'eau ;
- des traitements intermédiaires (P4, P5, P6, P8, P9, P10, P12, P13) obtenus entre les traitements complémentaires (P1 et P2 entre S0 et S3 ; P4, P5 et P6 entre S3 et S6 ; P8, P9 et P10 entre S6 et S9 ; P12 et P13 entre S9 et S12).

2.2.1 Mesure de l'état hydrique du sol

L'état hydrique du sol a été évalué par :

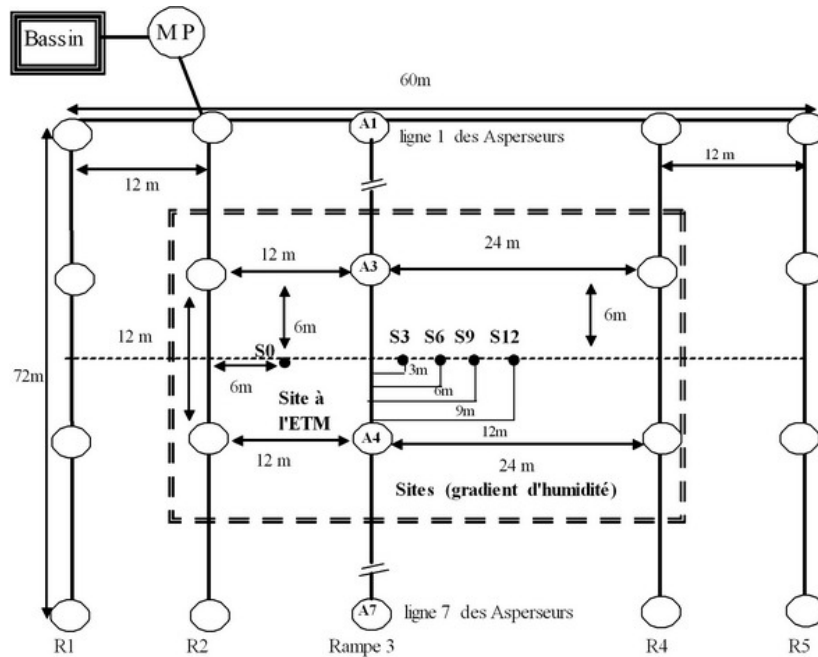


FIG. 1 – Emplacement des sites par rapport aux rampes d'aspersion.

- des mesures TDR avec des sondes TRASE. Trois sites S0, S6 et S9 ont été équipés de sondes enterrées SEC de 20 cm. Ces sondes ont été placées verticalement jusqu'à des profondeurs de 1 m. Les mesures ont été réalisées quotidiennement ;
- des mesures gravimétriques sur tous les sites sur une profondeur de 1 m avec un pas de 10 cm. Cette méthode a permis d'étalonner les sondes TDR et les mesures d'humidité avant et après irrigation, en cas de panne des appareils.

2.2.2 Mesure du développement et de la croissance de la plante

La mise en place du couvert végétal et son évolution ont une importance capitale puisqu'ils conditionnent à la fois la consommation hydrique et les potentialités de la culture. Un suivi agronomique a été effectué sur l'ensemble des traitements par :

- des observations des stades phénologiques sur des placettes (un stade végétatif donné est considéré comme atteint dès que 50 % des plants présentent les mêmes caractéristiques).
- des mesures de la surface foliaire à chaque stade de développement. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un planimètre sur des échantillons (1 m²/site) prélevés sur les sites expérimentaux.
- l'évaluation de la matière sèche des différents organes de la plante (feuilles, tige et racines), les échantillons qui ont servi pour la détermination de la surface foliaire.
- l'évaluation du rendement et les composantes du rendement à la récolte.

2.2.3 Suivi des apports d'eau

Les arrosages par aspersion ont été effectués sans vent ; l'irrigation est interrompue si la vitesse du vent dépasse 2 m/s. Les apports d'eau ont été mesurés dans des pluviomètres (3 par site) disposés 20 cm au-dessus de la végétation.

3 Résultats et discussions

3.1 Conditions climatiques de l'essai

D'après les relevés décennaires sur la culture de tomate (figure 2), les pluies ont été déficitaires en avril (30 % de la moyenne), et légèrement excédentaires en mai (117 % de la moyenne). En dehors de ces deux périodes, il n'a pas plu pendant le cycle cultural. La demande climatique (ET0) de l'année 2001 encadre la moyenne à 10 % près. Sur l'ensemble du cycle cultural, elle dépasse la moyenne de 2,5 %.

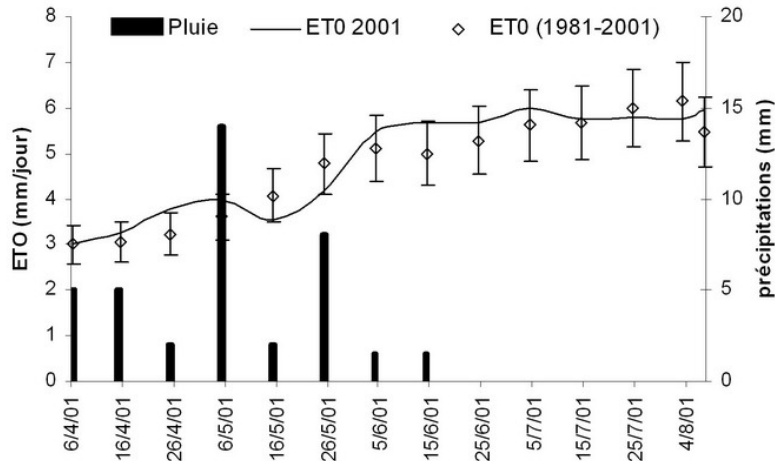


FIG. 2 – Evolution décennale des précipitations et de la demande climatique (ET0) en 2001 et moyenne de la période 1981-2001.

3.2 Répartition des apports par irrigation en fonction des stades de laculture

Les hauteurs d'eau mesurées dans les pluviomètres du dispositif (tableau 1) montre un fort gradient. Le dispositif d'arrosage adopté a donc engendré une différenciation entre les sites.

Ces différentes stratégies ont été réalisées avec une modification des rythmes d'irrigation identiques mais variables selon le stade de la culture de tomate (tableau 2).

Cette modulation des fréquences d'arrosage est en accord avec les pratiques conseillées pour l'irrigation de la tomate.

3.3 Evolution du stock d'eau dans le sol

La mesure de l'évolution du stock d'eau du sol a été comparée entre les deux méthodes de mesure (TDR et gravimétrie) (figure 3), pour les traitements S0, S6 et S9, les mesures TDR ont été effectuées avec un pas de temps journalier. On observe qu'il y a une bonne concordance entre les deux méthodes de mesure ; les différences ne sont pas significatives au seuil de 10 %. Les mesures TDR sont donc utilisables pour estimer les consommations en eau. Il faut cependant noter un épuisement marqué des réserves du sol en fin de cycle sur les sites les moins irrigués.

La conduite de l'irrigation pour l'ETM correspond à un coefficient de tarissement (p) des réserves en eau du sol de 50 %.

TAB. 1 – Hauteurs d'eau d'irrigation (mm) apportées aux différents sites suivant les stades de développement pour la culture de tomate.

Stade	Site 0	Site 3	Site 6	Site 9	Site 12
Stade initial Semis (06/04/01) - Installation (14/05/01)	112	84	74	60	39
Stade développement Installation (14/05/01) - Maximum de couverture (15/06/01)	194	128	117	69	14
Stade mi-saison Maximum de couverture (15/06/01) - Début sénescence (18/07/01)	229	161	141	92	32
Stade final (Début sénescence (18/07/01) - Récolte (07/08/01))	91	61	52	30	10
Total	626	434	384	251	95

TAB. 2 – Evolution de la fréquence d'irrigation en fonction des stades de la culture de tomate

Stades	Initial	Développement	Mi-saison	Final
Fréquence (jours)	4	7	5	5

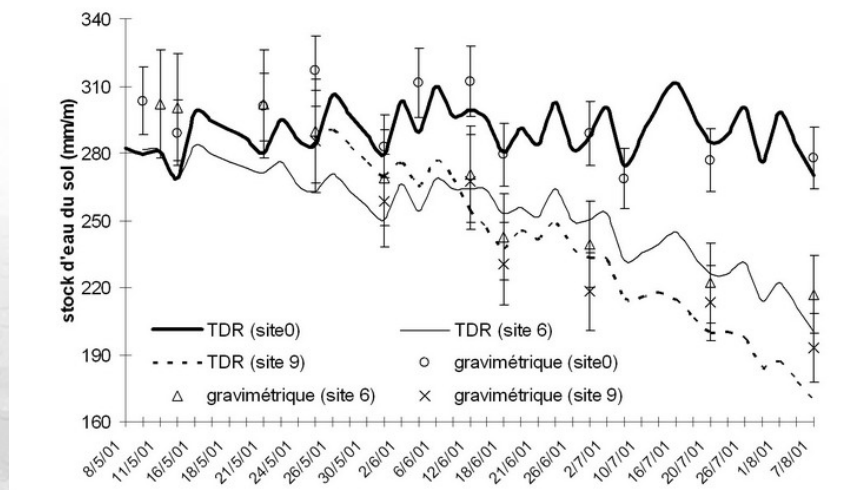


FIG. 3 – Evolution du stock d'eau selon les mesures TDR et les mesures gravimétriques observée sur la culture de tomate pour les sites S0, S6 et S9.

3.4 Evolution de l'ETR de la culture suivant les apports

L'ETR décadaire a été calculée par la méthode du bilan hydrique pour une profondeur comprise entre la surface et 1 m de profondeur. Ce calcul suppose l'absence de remontées capillaires sur les sites stressés, cette hypothèse est valable sur la majeure partie du cycle et engendre des erreurs négligeables à l'échelle de l'ensemble de la saison de culture. On note que la culture présente de fortes variations de la consommation en eau suivant les sites (figure 4). La consommation en eau maximale est enregistrée en juillet au cours du stade mi-saison.

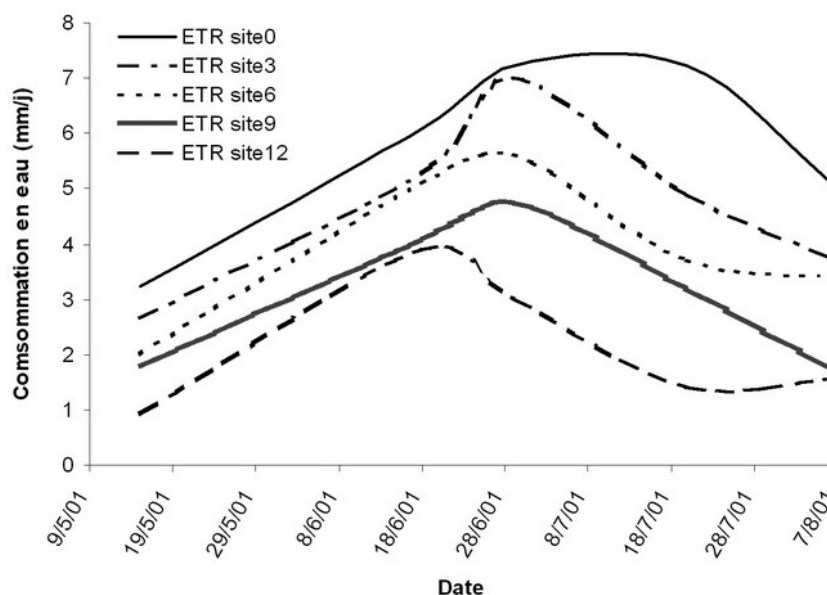


FIG. 4 – Evolution de la consommation en eau moyenne décadaire de la tomate en fonction des sites.

Sauf pour le traitement le plus stressé, la consommation maximale est atteinte au cours de la première décade de juillet. Elle est de 7,2 mm/jour pour le site S0 ; 7,0 mm/jour pour S3 ; 5,6 mm/jour pour S6 ; 4,7 mm/jour pour S9 et 3,0 mm/jour pour S12. Elle correspond à la phase de plus grande surface foliaire.

Une approche similaire a été mise en œuvre dans le cas du blé en 1998 et de la pomme de terre en 2000, avec trois traitements principaux : un traitement non stressé (S0), une contrainte hydrique modérée (S3) et une contrainte hydrique sévère (S5). Les consommations en eau moyennes décadaires du blé et de la pomme de terre ont été obtenues par la mesure des bilans hydriques (tableaux 3 et 4).

TAB. 3 – Consommation en eau moyenne décadaire du blé (mm/j).

Stade	Site 0	Site 3	Site 5
Initial	1,03	1,03	1,03
Développement	2,14	2,14	2,14
Mi-saison	4,87	3,73	3,11
Final	1,97	1,53	0,91

La comparaison des valeurs obtenues – qui correspondent à des situations climatiques proches de la moyenne – montre que la tomate est la culture qui présente la consommation en eau la

TAB. 4 – Consommation en eau moyenne décadaire de la pomme de terre (mm/j).

Stade	Site 0	Site 3	Site 5
Initial	2,07	1,97	1,52
Développement	3,14	3,04	2
Mi-saison	4,45	4,31	1,31
Final	3,82	3,37	1,02

plus élevée. Ce constat est à rapprocher de la période de l'année au cours de laquelle la tomate accomplit son cycle cultural, qui comprend les demandes climatiques les plus fortes.

3.5 Effet de la restriction en eau sur le rendement et le développement de la culture

L'adoption de l'irrigation déficitaire implique une bonne connaissance de la réponse du rendement au déficit en eau, y compris l'identification des périodes critiques de croissance, et les impacts économiques de la stratégie de réduction du rendement.

Chaque niveau de stratégie d'irrigation déficitaire correspond à une évapotranspiration relative ETR/ETM qui induit une perte relative de rendement $Q_y = (1 - YR/YM)$

ETR, évapotranspiration réelle ; ETM, évapotranspiration maximale, c'est-à-dire satisfaction complète des besoins en eau des cultures ; YR, rendement réel récolté et YM, rendement maximal.

Conformément au protocole expérimental, la culture tomate a été soumise à des situations qui vont du confort hydrique à des stress croissants sur les différents sites de suivi hydrique, l'effet de ces différentes stratégies d'irrigation a été mesuré (tableau 5).

Pour les deux derniers traitements, la réduction de rendement est très forte. Le stock d'eau du sol a été pratiquement totalement épuisé. La " valeur négative " de la réserve mesurée sur le cas 4 correspond à une culture qui est en partie desséchée à la récolte.

TAB. 5 – Réponse de la tomate aux différentes stratégies de l'offre en eau.

Stratégie de l'offre	Pertes (mm)	R initiale (mm)	R finale (mm)	ETR (mm)	Nombre d'irrigations	Coeff. de tarissement p (%)	ETR/ETM (%)	Baisse de rendement (%)
Confort hydrique C	0	110	117	658	23	0,3	1	-
Irrigation déficitaire								
1	0	110	80	503	23	0,55	0.80	36
2	0	110	74	459	22	0,65	0.70	58
3	0	110	27	363	20	0,75	0.55	81
4	0	110	- 20	265	10	> 0,85	0.40	89

Ces stratégies d'offre en eau peuvent être caractérisées par le coefficient de tarissement p, représentant le degré d'épuisement de la réserve au moment du déclenchement de l'irrigation. Il

varie de moins de 30 % pour la conduite C, à plus de 85 % pour le traitement 4.

Les expérimentations conduites sur les cultures de blé dur et de pomme de terre suivant un protocole voisin de celui de la culture de tomate ont de la même manière fourni les informations qui permettent de comparer les pertes de rendement entre ces trois cultures (figure 5).

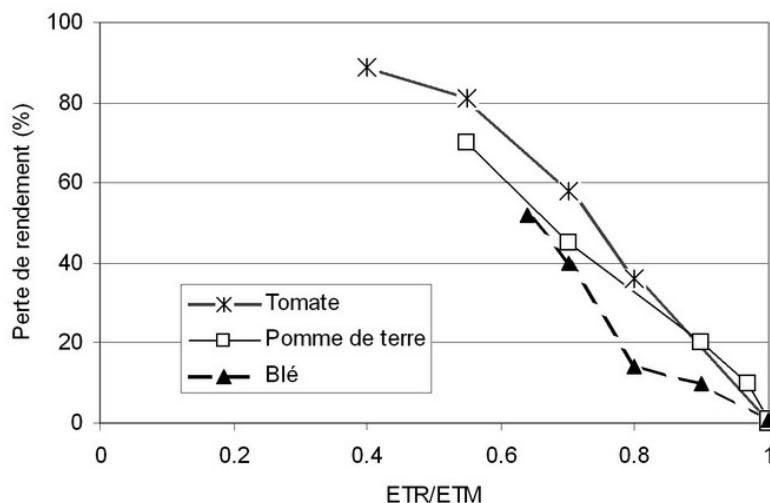


FIG. 5 – Comparaison des pertes de rendement pour différents niveaux de restriction de l'ETR pour les cultures de blé, de tomate et de pomme de terre.

Comme le montre la figure 5, le blé est moins sensible aux restrictions d'alimentation en eau, comme on le supposait ; pour des valeurs d'évapotranspiration relatives réduites de 20 %, la perte de rendement reste de l'ordre de 15 %, alors qu'elle atteint plus du double pour la tomate et la pomme de terre. Ensuite, la chute de rendement est plus élevée pour le blé ; si celles des deux autres cultures restent supérieures à celles du blé. Si l'on compare les chutes du rendement des cultures étudiées dues à l'application des stratégies de restrictions, il semble que le blé réagit mieux à l'irrigation déficitaire que la pomme de terre, s'infléchissent et restent moindres que celles de la tomate.

L'effet de la restriction en eau sur la croissance de la culture de tomate a été mesuré du point de vue surface foliaire, du nombre de fruits par plante et du calibre des fruits (figure 6). Le pourcentage de baisse de ces trois grandeurs en fonction du rapport ETR/ETM montre qu'il y a une évolution rapide jusqu'à une valeur du rapport ETR/ETM de l'ordre de 0,75. Elle peut s'expliquer par un effet direct de la réduction de la surface foliaire sur l'ETR et la production pour des valeurs de l'indice foliaire proche de 3.

Au-delà, pour des rapports ETR/ETM inférieurs à 0,75, la sensibilité au stress apparaît moins forte, après cette première réduction de la biomasse produite, puisque les courbes présentent une inflexion.

3.6 Efficience de l'eau pour différents niveaux de stress

Si l'on prend en compte le rendement en fruit commercialisable, on peut analyser l'efficience de la consommation en eau et l'efficience de l'apport de l'eau d'irrigation. Le bilan a été établi à partir de prélèvements gravimétriques réalisés à la plantation et à la récolte. Pour la tomate, le premier varie de 14 à 4 kg/m³ (figure 7). Cette efficience de consommation est relativement

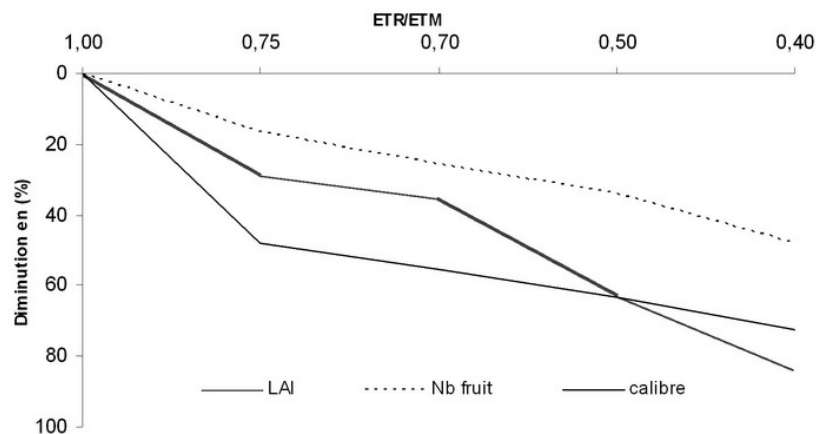


FIG. 6 – Effet de la restriction en eau sur la croissance de la culture de tomate : surface foliaire, nombre et calibre des fruits.

stable pour des valeurs de consommation en eau inférieures à 350 mm et supérieures à 600 mm. Dans le cas d'apports très restrictifs, la consommation en eau du sol est déterminante.

Pour l'efficacité de l'apport par irrigation, on retrouve les mêmes tendances (figure 8) : à partir d'un apport de près de 500 mm, l'évolution de l'efficacité est très faible. La baisse de l'efficacité est ensuite pratiquement linéaire, puis la courbe s'inverse : de faibles apports sont plus fortement valorisés. Cependant, il est sûr que ces cas ne sont pas intéressants pour la culture de tomate.

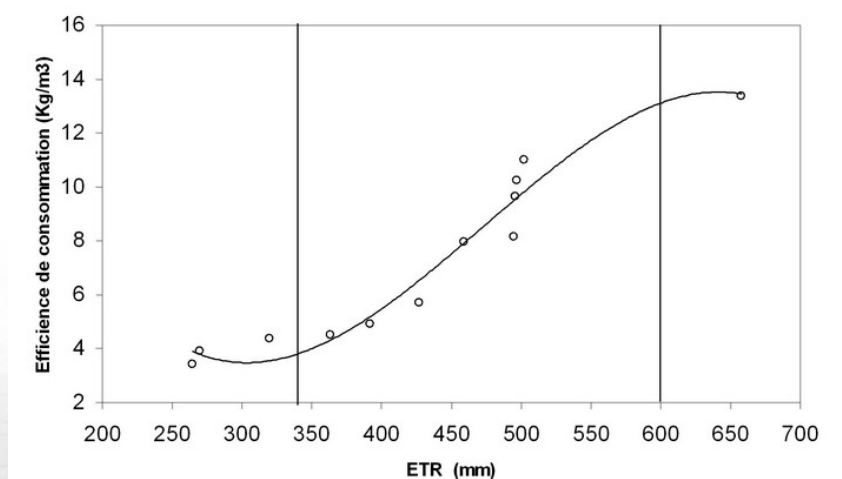


FIG. 7 – Evolution de l'efficacité de consommation en fonction de l'ETR pour la culture de tomate.

Dans le cas de la pomme de terre, l'efficacité de consommation varie de 12 à 6 kg/m³. Pour le blé, la variation s'étend de 1,3 à 0,8 kg/m³. La teneur en eau du produit récolté explique évidemment l'écart observé entre les cultures. Que ce soit la tomate, le blé et la pomme de terre, une meilleure efficacité de la consommation de l'eau est obtenue pour les traitements conduits à l'ETM, mais une rupture de pente apparaît avant la valeur maximale, ce qui indique une valorisation plus faible des derniers m³ d'eau.

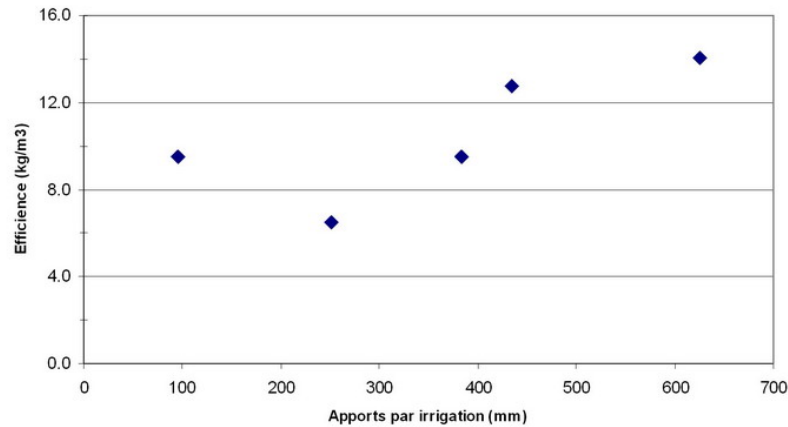


FIG. 8 – Evolution de l'efficacité de l'irrigation pour la culture de tomate.

3.7 Identification d'une stratégie pour l'agriculteur et demande en eau

La stratégie C fournit le rendement maximal et l'efficacité la plus élevée, elle correspond à l'irrigation des cultures en conditions de bonne disponibilité en eau à l'échelle du périmètre et une disponibilité des équipements d'irrigation chez les agriculteurs. Cependant, fréquemment, les agriculteurs sont amenés à retenir des objectifs inférieurs, en fonction des contraintes d'accès à l'eau et des aspects économiques. Les apports élevés sont, le plus souvent, incompatibles avec les tours d'eau et assez mal valorisés ; les irrigants sont donc amenés à retenir des stratégies d'irrigation déficitaire avec des demandes en eau réduites.

Dans le cas de la tomate, l'agriculteur peut recourir à l'une des stratégies de l'irrigation déficitaire présentées ou à des stratégies intermédiaires entre celles étudiées. Ce choix conduit à un programme de pilotage des irrigations pour des niveaux d'épuisement de la réserve ou coefficients de tarissement (p) supérieurs à 0,3-0,4 (cas de C). Ces valeurs, identifiées dans les travaux présentés (tableau 5), correspondent à des situations climatiques assez habituelles, mais restent à confirmer pour d'autres cas. Aussi, compte tenu de la variabilité climatique interannuelle et en particulier de la répartition des pluies en région méditerranéenne, la définition de stratégie d'irrigation s'appuie généralement sur l'emploi de la modélisation qui fournit une analyse à moindre coût sur une série climatique.

Une telle démarche a déjà été mise en œuvre dans le cas du blé dur en utilisant par exemple différents modèles (Zairi *et al.*, 2000[10] et 2003[9]). Le système d'irrigation doit être pris en compte en particulier dans le cas de l'irrigation gravitaire et seule une analyse économique permet d'aboutir à un choix optimal. Une approche identique est nécessaire pour le cas de l'irrigation par aspersion (Mailhol *et al.*, 2004[5]).

La méthodologie présentée correspond à une première étape indispensable pour disposer de références adaptées. La mise en œuvre de la stratégie retenue repose ensuite sur l'emploi d'outils de pilotage de l'irrigation pour appliquer les apports d'eau dans les conditions adéquates, à partir de la connaissance de l'état de la culture et des réserves en eau du sol.

3.8 Un outil simple pour raisonner et piloter l'irrigation

De nombreuses méthodes sont théoriquement disponibles pour piloter l'irrigation (RNED AFEID, Guide irrigation, 2003[6]). Elles s'appuient sur le bilan hydrique, la mesure de la disponibilité

de l'eau dans le sol (TDR, sonde à neutrons, tensiométrie, etc.), la mesure de l'état hydrique de la plante (thermométrie IR, potentiel hydrique foliaire, PEPISTA etc.).

Cependant, pour mieux raisonner les irrigations, et mettre en œuvre une stratégie d'irrigation, les sondes Watermark s'avèrent être des outils simples et intéressants et pratiquement les seuls utilisables dans la parcelle de l'agriculteur, lorsque l'on dispose de capteurs présentant une fiabilité satisfaisante. Leur faible coût est un avantage certain et elles informent sur la disponibilité en eau du sol caractérisée par sa tension (valeur absolue de la charge), exprimée en centibar (centibar = 1cbar = 10cm d'eau). la sonde Watermark se compose de deux parties distinctes, le capteur et un boîtier de mesure. Le boîtier est mobile et permet la lecture de plusieurs sondes. Schématiquement, le capteur (figure 9) est un dispositif rappelant une bougie de tensiomètre. Il est constitué d'une enveloppe extérieure en acier qui protège et maintient une enveloppe perméable à l'eau. L'enveloppe en acier est largement perforée afin d'établir une bonne surface de contact avec le sol. A l'intérieur se trouvent deux chambres remplies d'une substance hydrophile et séparées par un bloc de gypse, la chambre supérieure renferme deux parties métalliques, constituant un dipôle, séparées par un matériau saturé en gypse dont on mesure l'impédance (Tron *et al.*, 2000[7]).

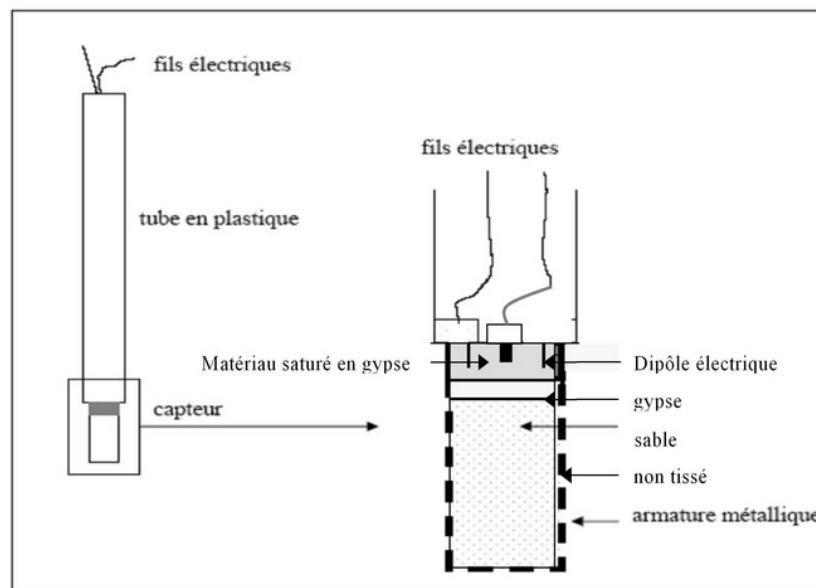


FIG. 9 – Schéma d'une sonde Watermark.

Lorsque le capteur est en contact avec le sol, la tension s'équilibre entre le sol et l'intérieur du capteur. La présence de gypse saturé l'eau en sulfate de calcium, rendant la mesure peu sensible à la salinité. En fait, l'impédance mesurée est directement liée à la teneur en eau à l'intérieur du capteur. Et cette teneur en eau est le reflet de la tension de l'eau dans le sol car la quantité d'eau dans le capteur est telle que les forces de tension à l'intérieur et à l'extérieur du capteur soient égales.

En effet, le pilotage tensiométrique de l'irrigation par des sondes Watermark est une des techniques qui permet d'optimiser l'usage de l'eau chez les agriculteurs. Des résultats encourageants ont été obtenus pour cette technique, encore peu répandue en Tunisie, testée par l'équipe d'irrigation de l'INRGREF dans le cadre d'un programme de vulgarisation dans la basse Vallée de la Medjerda. L'objectif est de pouvoir proposer aux agriculteurs et à des cellules de vulgarisation l'utilisation des sondes Watermark comme des outils simples qui permettent de piloter ou d'élaborer des conseils pour l'irrigation. Des sondes Watermark ont été installées sur des parcelles d'agriculteurs pour l'irrigation des cultures du blé, de la pomme de terre et de maïs.

A partir de l'ensemble des observations, des relations empiriques ont été dégagées entre le niveau d'épuisement de la réserve du sol et les lectures fournies par des sondes Watermark (figure 10).

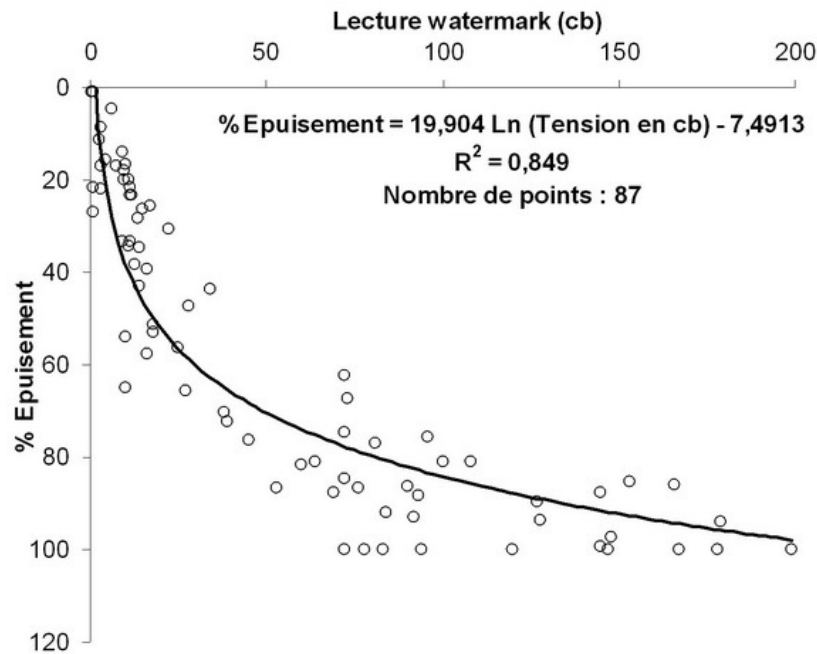


FIG. 10 – Evolution du pourcentage d'épuisement de la réserve utile en fonction de la tension de l'eau du sol mesurée par les sondes watermark sur des parcelles de blé chez des agriculteurs.

Malgré la dispersion des observations, en partie liée au fait que la relation n'est pas univoque (effet classique d'hystérésis) et à la variabilité spatiale, il est possible d'ajuster une courbe logarithmique sur les données recueillies, avec un coefficient de corrélation satisfaisant. Dans un deuxième temps, il est nécessaire de rapporter les valeurs fournies à l'état d'un volume de sol dans lequel s'alimente la culture concernée. Ce capteur apparaît donc un outil intéressant à prendre en compte pour mettre en œuvre des stratégies d'irrigation. Des travaux sont en cours pour compléter l'analyse de la fiabilité de ce capteur et tester des améliorations de son fonctionnement.

4 Conclusions

L'objectif de ce travail est d'améliorer la valorisation de l'eau d'irrigation dans la conduite des cultures comme la tomate, le blé dur ou la pomme de terre et de permettre une meilleure maîtrise de la demande en eau. Ce travail s'est appuyé sur une approche expérimentale afin de différencier des niveaux d'apports de l'eau d'irrigation, d'analyser l'effet de la restriction d'eau sur le fonctionnement hydrique de la culture et de mesurer les effets sur le rendement.

La méthodologie mise en œuvre a utilisé la technique TDR pour obtenir des mesures régulières du stock d'eau du sol ; on a ainsi accédé aux consommations en eau décadaires lors de chaque stade de développement. La consommation en eau maximale a été enregistrée au stade mi-saison et s'établit autour des valeurs 7,2 mm/j pour la tomate ; 4,9 pour le blé dur et 4,5 pour la pomme de terre. Pendant le stade final, l'évapotranspiration de la tomate et la pomme de terre semblent très élevées (4 mm/j) contrairement à la culture de blé dur (2 mm/j), malgré la période de l'année où elle est observée. Suite au défanage de la culture pendant ce stade, une

part importante de l'exportation de l'eau provient de l'évaporation directe du sol. En pratique, les agriculteurs maintiennent souvent l'irrigation pendant ce stade de manière à contrôler la situation sanitaire. Ce point montre la nécessité de bien connaître les pratiques des agriculteurs.

Par ailleurs, l'analyse de la réponse des rendements à la restriction d'eau pour les cultures étudiées a montré que la baisse de rendement (fruits, grains tubercules) est cohérente avec la valeur du rapport ETR/ETM moyen sur le cycle. Il en ressort, comme cela était prévisible, que la sensibilité au stress hydrique est plus marquée chez la tomate par rapport au blé dur et à la pomme de terre. En ce qui concerne la valorisation de l'eau d'irrigation, les essais ont démontré que toute restriction d'eau pour les trois cultures engendre une baisse de l'efficacité de consommation. En effet, les meilleures efficacités ont été obtenues avec la satisfaction maximale en eau des cultures.

Cette étude fournit des références locales de conduite d'irrigation en conditions satisfaisantes d'accès à l'eau en se référant au rapport ETR/ETM relatif à la culture envisagée et suivant un programme de pilotage des irrigations basé sur un coefficient optimal de tarissement. Toutefois, ces résultats doivent être considérés avec précaution lorsqu'il s'agit d'établir un choix entre différentes stratégies d'irrigation étant donné qu'ils ne reposent que sur une seule année climatique. De manière complémentaire, la modélisation permet de généraliser, grâce à une approche probabiliste, les situations observées à différents contextes pédoclimatiques.

En conditions de disponibilité en eau limitée et pour un rapport ETR/ETM inférieur à 0,9, il a été établi qu'il était opportun de conduire uniquement la culture de blé en irrigation déficitaire contrairement à la culture de pomme de terre et de la tomate. Ce résultat a été établi à partir d'une évaluation économique (Zairi *et al.*, 1999 ; Zairi *et al.*, 2000b[11]).

La mise en œuvre d'une irrigation déficitaire ne peut se faire de manière fiable qu'à partir d'une connaissance du niveau d'épuisement (ou tarissement p) de la réserve en eau du sol. Pour respecter une consigne concernant le niveau de tarissement des réserves, il convient de disposer d'un outil d'évaluation de l'état hydrique du sol. La possibilité d'utilisation des sondes Watermark à cette fin a été examinée. Une corrélation acceptable a pu être établie entre les mesures fournies par ce dispositif et le coefficient de tarissement de la couche de sol correspondante dans le cas du blé. Il peut donc servir d'outil pour les agriculteurs et les services de vulgarisation dans la mesure où sa fiabilité est confirmée et éventuellement améliorée.

Références Bibliographiques

Références

- [1] DG/GR, 1996. Plan stratégique pour le développement de l'économie de l'eau en irrigation.
- [2] Doorenbos J., Kassam A.H., 1980. Yield response to water irrigation and drainage paper. n° 33, FAO, Rome, Italie.
- [3] Deumier J.M., Leroy P., Peuremorte P., 1995. Evolution of concepts concerning the control of irrigated crops systems. Joint ICID-FAO Workshop "Irrigation scheduling : from theory to practice" ICID Congress Rome, Italie.
- [4] Labbé F., Ruelle P., Garin P., Leroy P., Mailhol J.C., Deumier J.M., 1997. Irrigation practices farm level and analysis of water management during water shortages : cases study in Chartente (SW France). ICID Workshop on "Sustainable irrigation in areas of water scarcity and drought" 11-12 septembre, Oxford, Grande-Bretagne (England), pages 63-72.
- [5] Mailhol J.C., Zairi A., Slatni A., Ben Nouna B., El Amami, 2004, Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia.
- [6] RNE D AFEID, 2003, Guide Pratique Irrigation. 3^eéd. L. Rieul et P. Ruelle coord. Cemagref Editions. 344 p.

- [7] Tron G., Isbérie C., Chol P., 2000. La tensiométrie pour piloter les irrigations, 88, 89, 145, 147 p.
- [8] Zairi A, Slatni.A., Maillhol JC., Ruelle P., El Amami, 2003, Surface irrigation in the tunisian context. Improvement perspective for different level of water availability. ICID workshop on "Improved irrigation technologies and methods" 17-19 septembre 2003 Montpellier, France. CD Rom Afeid. éditeur, vile, pays
- [9] Zairi. A, El Amami, Slatni.A, Pereira.L.S, Rodrigues P.N., Machado.T, 2003. Coping with Drought : Deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Tunisia. Tools for Drought in Mediterranean Regions 181-201. éditeur, vile, pays
- [10] Zairi A., Ben Nouna B., Slatni A., Pereira L.S., Rodrigues P.N., Ajmi T., 2000a. Utilisation du modèle ISAREG pour l'étude de l'effet de la restriction de l'eau sur le rendement du maïs fourrager. Rapport technique. Projet INCO-DC Research n ° IC18CT970169, 18 p.
- [11] Zairi, A., Pereira, L.S., El Amani, H., Slatni, A., Rodrigues, P., Teixeira, J.L., 2000b. Irrigation Scheduling strategies for horticultural field crops under limited water availability. In : MI Ferreira and HJ Jones (Eds) Proceedings of the Third International Symposium on Irrigation of horticultural crops (Estoril, juin, juillet 1999). Acta Horticulturae N° 537, ISHS, Leuven, Belgique. pp. 503-510.