Le Goulven P., Bouarfa S., Kuper M., 2004. Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant. Actes de l'atelier du PCSI, 2-3 décembre 2003, Montpellier, France

Analyse et représentation de relations « ressources – usages » de l'eau au niveau des parcelles et des exploitations agricoles de la plaine de Kairouan

Jean-Paul LUC, Jihène ABID KARRAY, Pierre BOURGUIGON, Jean CHAMPION, Ate KOUKOU TCHAMBA, Noamene BEN HAMOUDA

IRD, USDIVHA, Tunis, Tunisie

Résumé — La communication présente un ensemble de travaux réalisés à l'échelle des parcelles et des exploitations agricoles. Ceux, conduits au niveau parcellaire ont été centrés sur trois types de connaissances : la réserve utile des sols, le besoin en eau des plantes et l'itinéraire technique de production. Pour la connaissance de la réserve utile des sols, on a pu paramétrer des fonctions de pédo-transfert utilisant les données de granulométrie, de capacité d'échange cationique et de densité apparente. Le travail sur les besoins en eau des plantes s'est focalisé sur le fonctionnement hydrique des cultures en association largement développées dans la zone d'étude. Pour les itinéraires techniques, on a uniquement étudié et hiérarchisé ceux utilisés pour la culture de la pastèque grosse consommatrice d'eau et très présente dans la zone. Les travaux conduits à l'échelle de l'exploitation agricole, avaient pour objectif de comprendre et de représenter les comportements individuels des agriculteurs dans deux contextes définis : l'abaissement de la nappe et l'introduction du goutte à goutte. Pour l'abaissement de la nappe, la population des agriculteurs concernés a été seulement celle des irrigants à partir de puits privés. Pour l'introduction du goutte à goutte, l'exemple retenu a été celui d'agriculteurs regroupés au sein groupement d'intérêt collectif.

Abstract —Study and representation of relations "resource and water use" at field and farm scales of the Kairouan plain. The paper present differents studies developped at field and farm scales. In the field we have worked on three different subjects: the soil maximum available water storage, the plant water demand and the crop management. For the soil maximum available water storage we have developed some transfert fonctions in the soil, using data of: soil texture, CEC and bulk density. We have analyse the different water exchange that we can observed in the typical associate crop of the research area. And for the crop management, we just took care of the water melon because it's the main crop of this area and it needs lot of water. It was interseting for us to work at the farm scale for understanding the individual characters agains two problems: the regular lowering of the groundtable and the introduction of the trickle irrigation. For the groundtable lowering, just were concern farmers how use private shallow wheels . And for the trickle irrigation we take the exemple of collective groupments.

Introduction

Une des bases de la gestion intégrée des ressources en eau est la compréhension des mécanismes qui régissent les interactions ressources-usages de l'eau. Ces dernières peuvent être appréhendées à différents niveaux. Nous traiterons ici celui de la parcelle et celui de l'exploitation agricole qui se justifient parce que :

– celui de la parcelle est celui où l'agriculteur fait le choix de l'itinéraire technique en fonction de ses connaissances, des moyens techniques, financiers et humains qu'il peut mobiliser ; la parcelle : atelier de production a des règles de gestion propres et est seulement soumise aux contraintes extérieures qu'à travers des défaillances ou des accidents ; c'est le volet technique de la productivité qui est privilégié ;

– celui de l'exploitation agricole : agrégation d'ateliers de production, est le niveau auquel l'agriculteur fait des choix stratégiques. Les contraintes extérieures telles que le marché, la perception du climat, les ressources en eau disponibles ou espérées sont prises en compte dans le choix stratégique. A ce niveau, c'est l'aspect économique de la productivité qu'il est important d'analyser car l'agriculteur a souvent deux attitudes soit maximaliser son revenu soit limiter les risques financiers.

Interactions « ressources – usages » au niveau des parcelles

Le contexte local est caractérisé par une grande diversité des situations liée au nombre élevé des parcelles (plus de 12 000), à la variabilité des sols (10 classes pédologiques) et des cultures avec une particularité qui est celle des cultures associées (maraîchage installé entre les rangs d'oliviers). Enfin, on assiste à un remplacement très rapide des techniques anciennes d'irrigation par du goutte à goutte. Ce changement du mode d'irrigation est souvent accompagné d'une modification profonde du système de conduite de la culture et donc on constate, sur le terrain, une cohabitation des systèmes très traditionnels à faibles intrants avec des systèmes techniquement très évolués.

Les travaux, conduits à ce niveau, avaient pour but d'approfondir les connaissances sur trois aspects: la réserve utile des sols, le besoin en eau des plantes et l'itinéraire technique de production afin de mieux préciser les modalités de valorisation de l'eau par les agriculteurs afin de mieux appréhender cette diversité.

Spatialisation de la réserve utile des sols de la plaine de Kairouan

Ce travail a été conduit par Pierre Bourguignon (2002) et cette partie est un résumé de son mémoire post-grade de l'EPFL de Lausanne.

La méthodologie a été construite selon deux approches complémentaires : la mise au point d'une méthode opérationnelle d'accès à la réserve utile du sol et ensuite la spatialisation de cette grandeur.

Le Réservoir utilisable maximum (RUM) d'un sol peut être exprimé sous la forme :

$$\text{RUM de chaque horizon} = E * Da * (Wc - Wpf)$$

E : épaisseur de l'horizon, Da : densité apparente, Wc et Wpf : teneur en eau pondérale respectivement de la capacité au champ et du point de flétrissement permanent.

Afin de simplifier les déterminations lourdes de laboratoire de ces deux teneurs en eau, Bastet *et al.* (1998) ont montré que, dans un contexte pédologique donné, il était possible de les lier à différentes caractéristiques du sol simples à obtenir par l'intermédiaire d'une régression multiple appelée fonction de pédo-transfert (FTP) du type :

$$W = a1\ C1 + a2\ C2 + a3\ C3 + ai\ Ci + b$$

dans laquelle C_i est une caractéristique pédologique, a_i le coefficient correspondant, b l'ordonnée à l'origine et W la teneur en eau.

Dans la plaine de Kairouan et dans la zone d'étude, nous sommes en présence de sols alluviaux qui ont tous la même origine géologique. Ils diffèrent essentiellement par les conditions de vitesse de l'eau de l'oued au moment de leur mise en place. Cette approche semblait adaptée et les éléments de différenciation retenus ont été : la granulométrie, l'activité chimique des particules (c'est-à-dire de leur capacité d'échange cationique CEC) et la densité apparente.

Afin d'accéder à la variabilité de ces paramètres, il a été décidé de mettre en œuvre la méthode de géostatistique basée sur la théorie des variables aléatoires régionalisée (Matheron, 1965) et d'utiliser le logiciel Géostat-PC (Boivin, 1990) pour définir le schéma d'échantillonnage.

La spatialisation des données a été réalisée en interpolant par krigeage les caractéristiques du sol (CEC, fréquences des particules fines) puis en appliquant les FPT à ces données. Pour chaque nouveau point issu de l'interpolation, on a obtenu ainsi une estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement.

Pour la mise en œuvre, la carte pédologique (1/100 000) de 1983 faite par Barbery et Mohdi et les photos aériennes (1/60 000) de l'année 90, ont servi de support pour la mise en place de l'échantillonnage de départ.

Sachant qu'il faut 150 points minimum (Gascuel-Odoux et Boivin, 1994) pour obtenir des variogrammes représentatifs, qu'il y a un peu moins de 20 unités pédologiques sur la carte pédologique de référence, que le schéma gigogne utilisé pour permettre d'obtenir un nombre de couples suffisant comprend 4 points de sondage, on arrive à un minimum de 2 séries de 4 points par unités pédologiques, soit 20*2 = 40 et 40*4 = 160 points de sondage tarière.

Ces trous de tarières ont été complétés par 13 fosses pédologiques destinées à une description de profil, un prélèvement de terre et une motte par horizon de surface, et par unité pédologique.

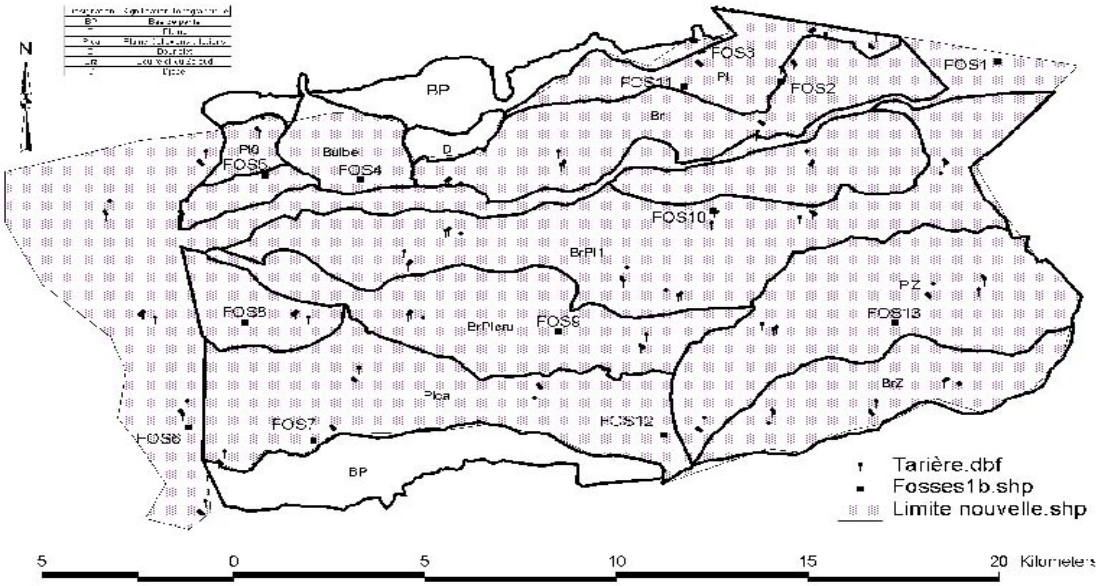


Figure 1. Répartition des points de sondage et de fosses pédologiques Bourguignon 2002.

Les granulométries ont été faites par granulométrie laser et par sédimentation.

Les descriptions de profils pédologiques confirment que ces sols sont développés dans des matériaux récents, les alluvions fluviatiles, mis en place par transport puis sédimentation en milieu aqueux. Ceci leur confère une grande variété de types au niveau granulométrique allant du sol argilo-limoneux au sol sableux. En corollaire, les CEC varient de 3 à 30 cmol/Kg de sol.

Pour le calcul des fonctions de pédotransfert, on a utilisé un lot de 30 échantillons pour le calage des FPT. La teneur en eau au pF 2,5 a été retenue pour calibrer la FPT de la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au pF 4,2 celle de la teneur en eau au point de flétrissement. Les résultats figurent dans le tableau I.

On constate que les coefficients de régression pour les FPT utilisant différentes gammes granulométriques laser sont meilleurs que les coefficients de régressions des FPT utilisant le pourcentage d'argile par sédimentation mais la régression obtenue en utilisant la granulométrie classique est déjà très bonne.

Tableau I. Résultats des FPT pour la capacité au champ et le point de flétrissement (Bourguignon 2002).

Teneur en eau à la capacité au champ			Teneur en eau au point de flétrissement		
Variables explicatives	coefficients des variables	coefficient de régression	Variables explicatives	coefficients des variables	coefficient de régressions
CEC/Arg Sed	26,215	0,940	CEC/Arg Sed	16,712	0,935
Arg Sed	0,566		Arg Sed	0,47	
b	-13,97		b	-10,223	
CEC/Argl 0-10	39,083	0,958	CEC/Argl 0-10	24,925	0,937
Argl 0-2	0,558		Argl 0-2	0,681	
Argl 2-4	1,957		Argl 2-4	-0,305	
Argl 4-6	-6,958		Argl 4-6	1,403	
Argl 6-8	17,598		Argl 6-8	-4,397	
Argl 8-10	-6,411		Argl 8-10	4,602	
b	-15,027		b	-16,604	
CEC/Argl 0-10	41,339	0,959	CEC/Argl 0-10	26,846	0,938
Argl 0-2	0,695		Argl 0-2	0,798	
Argl 2-4	1,431		Argl 2-4	-0,753	
Argl 4-6	-6,385		Argl 4-6	1,891	
Argl 6-8	18,718		Argl 6-8	-3,443	
Argl 8-10	-7,645		Argl 8-10	3,548	
Da	5,093		Da	4,337	
b	-23,672		b	-23,697	

La spatialisation des caractéristiques du sol choisies pour les FPT a été réalisée à partir de l'analyse des différents variogrammes des classes de texture. Sur les variogrammes moyens (exemple figure 2), les variables sont régionalisées pour une portée de 2 500 à 6 000 mètres. La variance augmente à partir de 15 000 mètres.

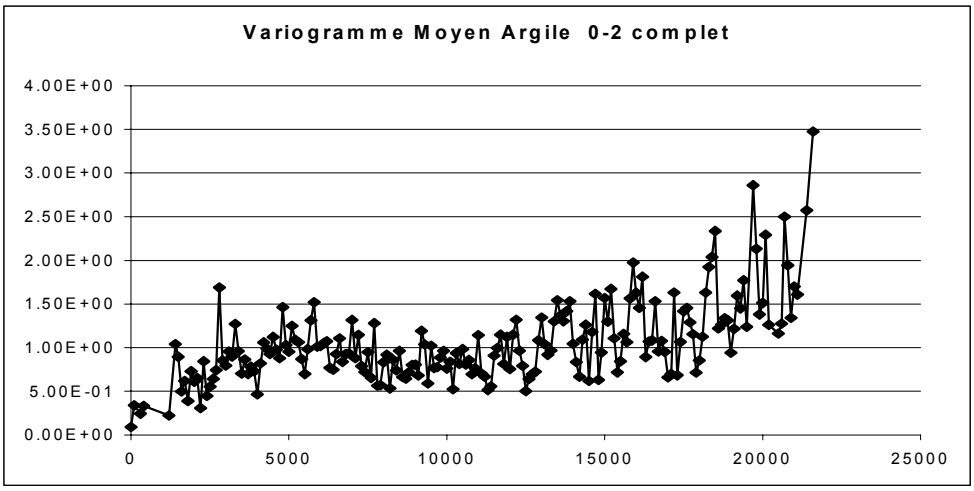


Figure 2. Variogramme moyen pour l'argile 0-2 µ (Bourguignon 2002).

Ce travail confirme que l'utilisation des fonctions de pédo-transfert pour accéder au réservoir utilisable maximal qui dépend de la teneur en eau à la capacité au champ et de la teneur en eau au point de flétrissement permanent donne de bons résultats particulièrement en milieu alluvial.

Le pourcentage de particules fines sur les échantillons de calage des FPT a été mesuré par granulométrie sédimentation et par granulométrie laser. Après comparaison des FPT issues des résultats des deux méthodes, une amélioration a été constatée avec l'utilisation des mesures du granulomètre laser. La géostatistique a permis l'analyse de la variabilité spatiale des caractéristiques explicatives.

Les itinéraires techniques en culture de melon et pastèque

Le travail entrepris dans cette action avait pour but d'évaluer l'efficacité, tant sur le rendement que sur l'efficience de l'eau ou les coûts de production, des systèmes de cultures répertoriés et d'explorer les améliorations possibles. Il a été réalisé par Jean Champion (2003).

Vu la diversité des cultures pratiquées dans la zone, il a été décidé de se focaliser dans un premier temps sur la culture irriguée qui avait le plus d'impact sur la consommation en eau de l'exploitation agricole à savoir la pastèque (résultat d'une comparaison des coefficients de corrélation entre la part de chaque culture dans la SAU et la consommation en eau à l'hectare de l'exploitation dans les 142 exploitations enquêtées par Sarah Feuillette (2001).

Sur la base des informations recueillies auprès des CRA, on a mis en évidence trois types de cultures : primeur, saison et arrière-saison, deux modes d'irrigation : gravitaire et goutte à goutte, et trois modes d'accès à l'eau : puits, périmètre irrigué, forage. Les données disponibles permettaient aussi de recenser les agriculteurs et de les classer selon les 18 combinaisons possibles. Il a donc été possible de bâtir un plan d'échantillonnage tel que ci-dessous :
– un taux de sondage de 20 % est appliqué, à la fois à chaque type de pratique rencontré dans chaque zone, mais aussi à chaque type rencontré dans l'ensemble de la zone ;
– lorsqu'un type est représenté par moins de cinq agriculteurs (au niveau de chaque secteur ainsi qu'au niveau de la zone entière), il sera considéré comme marginal et non enquêté ;
– en l'absence d'une liste exhaustive permettant un tirage au sort pour le choix des agriculteurs et des parcelles à enquêter, la méthode choisie a été le hasard ; 98 agriculteurs ont été enquêtés.

Le premier travail a été une description exhaustive des pratiques culturales recensées lors des enquêtes. On aboutit à un ensemble de variables toutes qualitatives qui ont été codifiées.

Après un croisement de toutes les variables deux à deux, une AFC sur chaque tableau de contingence, on a effectué une ACM en utilisant les variables retenues à la suite des AFC.

Pour les AFC, le test du Khi 2 montre une dépendance de toutes les variables, sauf la récolte et le binage, avec le mode d'irrigation : gravitaire et micro-irrigation.

Pour l'irrigation goutte à goutte, sept itinéraires techniques culturaux sont identifiés.

Tableau II. Itinéraires techniques identifiés en micro-irrigation.

Irrigation	Variété	Traitement des graines	Méthode d'implantation	Tunnels	Nb d'individus	Dénomination
Goutte à goutte	Standard	Oui	SD + E	Non	13	I
		Non	SD + E	Non	21	II
	Hybride ou Mixte	Oui	RP	Oui	3	III
		Non	RP	Oui	19	IV
			SD	Oui	6	V
			SD	Non	4	VI
			SD + E	Non	7	VII

Pour l'irrigation gravitaire, aucune analyse statistique n'a été entreprise ici, en raison du trop faible effectif (23 individus). Un seul itinéraire technique ressort.

Tableau III. Itinéraire technique identifié en irrigation gravitaire.

Irrigation	Variété	Traitement des graines	Méthode d'implantation	Tunnels	Nb d'individus	Dénomination
Gravitaire	Standard	Oui	SD + E	Non	19	VIII

Au final, la stratification de la population de parcelles de pastèque enquêtées à partir de ces variables a permis de distinguer huit itinéraires techniques principaux, regroupés en trois ensembles.

➢ L'itinéraire technique (III) est le plus intensif. Il est utilisé sur les plus grandes parcelles et la SAU des exploitations est la plus importante. Le semis est précoce, sous pépinière à la ferme. Les tunnels et le paillage plastique sont utilisés. L'irrigation est au goutte à goutte.

➢ Le dernier (VIII) est l'itinéraire technique traditionnel par excellence. En plus de la technique d'irrigation gravitaire, les paysans pratiquent un semis tardif (saison ou arrière saison) directement en place suivi d'un éclaircissage. Les parcelles sont de petites tailles et la surface agricole utile des exploitations est la plus faible.

➢ Les six autres itinéraires techniques sont intermédiaires. Ils utilisent l'irrigation localisée.

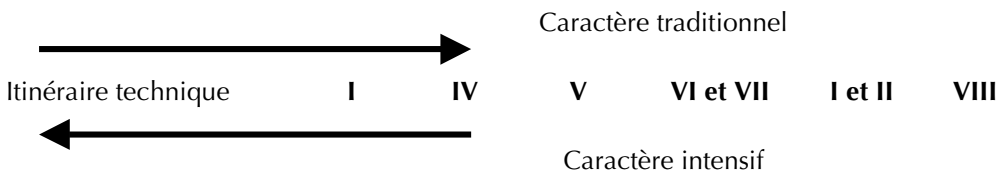
- Les itinéraires techniques (IV et (V sont plutôt intensifs, par l'emploi de tunnels et de variétés hybrides. Le semis est précoce (primeur pour le (IV), primeur et saison pour le (V) et la méthode d'implantation est le repiquage (IV) ou le semis direct sans éclaircissage (V). Le traitement des graines n'est pas pratiqué. La SAU des exploitations et les charges directes sont importantes.

- Les itinéraires techniques (I) et (II) sont assez traditionnels. Le semis direct, suivi d'un éclaircissage, est tardif, les variétés implantées sont standards et les tunnels ne sont pas utilisés.

- Les deux derniers itinéraires techniques, (VI) et (VII), sont simplifiés. Des variétés hybrides sont semées directement en place, avec ou sans éclaircissage. Les graines ne sont pas trempées et les tunnels ne sont pas utilisés.

En conclusion, ce travail a permis de classer les huit itinéraires techniques sur une échelle de degré d'intensification tel que présenté figure 2.

Tableau IV. Echelle d'intensification des itinéraires techniques.



Ils sont la base d'un travail à développer sur la productivité de l'eau.

Détermination du bilan hydrique des cultures en association

Le travail de thèse en cours de Jihène Abid Karray et présenté ici a pour objectif de quantifier le bilan hydrique adapté à ces cultures associées dans lesquels les apports et les consommations varient dans le temps et dans l'espace au sein d'une même parcelle afin de construire un modèle qui régit les transferts hydriques dans ce type de système.

Pour la méthodologie, on constate dans ces systèmes trois fonctionnements différents suivant les périodes de l'année. En absence de culture intercalaire, et suivant les besoins par rapport aux apports (pluie), les oliviers sont irrigués par l'intermédiaire de bassins réalisés autour de chaque arbre. Ces bassins sont alimentés soit par une seguia soit par un tuyau en polyéthylène. En présence de culture intercalaire (céréale, fourrage ou culture maraîchère) seule la partie de l'inter-rang occupée par cette culture est arrosée. Les agriculteurs estiment que les oliviers n'ont pas à recevoir d'irrigation.

Pour modéliser ce système, on envisage de considérer le sol comme un ensemble de réservoirs horizontaux et verticaux de dimensions variables et interconnectés dont le fonctionnement pourrait être représenté par un modèle distribué tel qu'utilisé en hydrologie, comme le montre la figure 3.

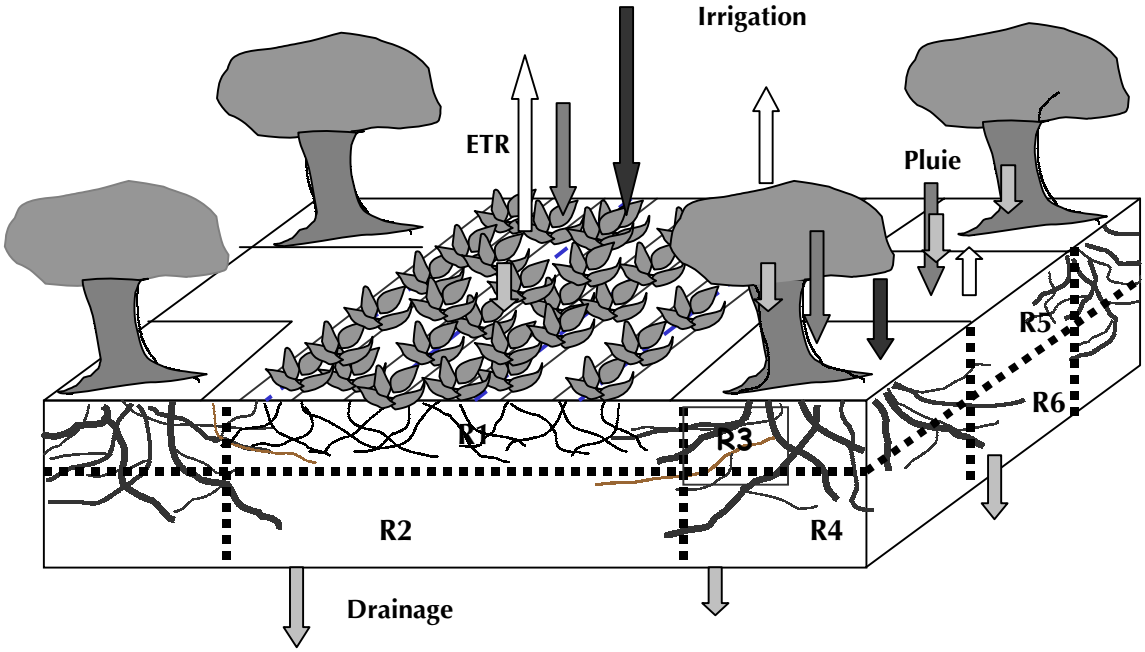


Figure 3. Compartimentation du sol en réservoirs (de R1à R6) et flux hydriques entre les réservoirs et au sein du continuum sol-plante-atmosphère**.**

Avec cette représentation, on se trouve en présence de 6 réservoirs dont les dimensions sont régis par les profondeurs racinaires des deux cultures et la surface qu'ils occupent. D'après un profil racinaire effectué à proximité d'un olivier et les résultats trouvés par Fernández et Moreno (1991) la majorité des racines d'olivier ne dépasse pas 100 cm de profondeur. Pour la pomme de terre, les observations sur le terrain ont montré que les racines de pomme de terre se trouvent à 30 cm. Pour chaque réservoir, on peut écrire une équation de bilan hydrique telle que :

- Réservoir R1 : $\Delta_S = P + I_c - ETR_c - D_{R1}$ avec $V_{R1} = L_c * long_{-c} * P_{r-c}$
- Réservoir R2 : $\Delta_S = D_{R1} - D_{R2}$ avec $V_{R2} = L_c * long_{-c} * P_{s-c}$
- Réservoir R3 : $\Delta_S = P + I_{OI} - ETR_{OL} - D_{R3}$ avec $V_{R3} = L_{OL} * long_{-ol} * P_{r-OL}$
- Réservoir R4 : $\Delta_S = D_{R3} - D_{R4}$ avec $V_{R4} = L_{OL} * long_{-ol} * P_{s-OL}$
- Réservoir R5 : $\Delta_S = P - E_{sn} - D_{R5}$ avec $V_{R5} = L_{sn} * long_{-sn} * P_{r-c}$
- Réservoir R6 : $\Delta_S = D_{R5} - D_{R6}$ avec $V_{R6} = L_{sn} * long_{-sn} * P_{s-c}$

Δ_S = variation du stock en eau, P = pluie , I = irrigation, ETR = évapotranspiration réelle de la culture avec ETR_c pour la culture, ETR_{OL} celle de l'olivier et ETR_{sn} pour le sol nu, D_{Ri} = drainage, V_{Ri} : volume du réservoir i, L_c et L_{OL} : largeur de la surface irriguée respectivement pour la culture et l'olivier, $long_{-c}$ et $long_{-ol}$: longueur de la surface irriguée respectivement pour la culture et l'olivier, P_{r-c} et P_{r-OL} : profondeur racinaire de l'olivier et de la culture, P_{s-c} et P_{s-OL} : profondeur maximale étudiée à laquelle on soustrait la profondeur de la culture en dessus.

Dans un premier temps, on va considérer que la culture maraîchère ne prélève de l'eau directement que dans le réservoir R1 et que l'eau alimentant les oliviers ne provient que du réservoir R3.

Pour vérifier ces hypothèses, il a été conçu un dispositif expérimental mis en place sur une oliveraie irrigable âgée de 12 ans (écartement 12 m*12 m) chez un agriculteur qui pratique des cultures intercalaires. L'association retenue est : olivier – pomme de terre.

Une placette de mesure composée de 4 arbres a été équipée par 12 tubes d'accès de sonde à neutrons ayant une longueur de 2,6 m répartis à proximité de l'olivier, au niveau de la culture de pomme de terre et à la limite entre les deux plantations. Des mesures de potentiel hydrique sont effectuées au voisinage des tubes d'accès sur une profondeur de 1,5 m. Des capteurs de flux de sève utilisant la méthode de dissipation de chaleur de Granier (1987) modifiée par Do et Rocheteau (2002) ont été installés sur les

quatre arbres afin d'estimer la quantité d'eau transpirée par l'olivier. En parallèle, les données climatiques nécessaires au calcul de l'ETo par la méthode de Penmann-Monteith sont collectées à partir d'une station météorologique automatique située à 2 km de la parcelle. La pluviométrie est mesurée à l'aide d'un pluviomètre installé au niveau de la parcelle. Les apports d'eau par irrigation sont quantifiés à partir d'un compteur d'eau placé en amont du système d'irrigation utilisé qui est de type Bas-Rhône.

Pour les résultats, nous disposons actuellement de 2 années de mesures avec 3 cultures de pomme de terre et une culture de petits pois pour des problèmes de rotation.

Si on s'intéresse aux calculs du stock hydrique pendant une période où il y a eu des apports d'eau sous forme d'irrigation (pour la pomme de terre) et de pluie, on remarque que le stock hydrique calculé au niveau d'un point de mesure (C1) situé au milieu des rangs de la pomme de terre augmente sensiblement après deux irrigations de celle-ci. A la limite entre l'olivier et la pomme de terre (B1), une faible augmentation du stock hydrique est observée (B1), L'olivier pourrait ainsi bénéficier d'une certaine quantité d'eau lors de l'irrigation de la pomme de terre qu'il faudrait donc intégrer dans l'équation du bilan. Juste à proximité de l'olivier (A1), la variation du stock hydrique est observée uniquement suite aux pluies. On remarque que l'augmentation du stock concerne, suivant l'importance de l'apport, les couches 0-30 cm appartenant aux réservoirs de surface et/ou les réservoirs plus profonds (figure 4).

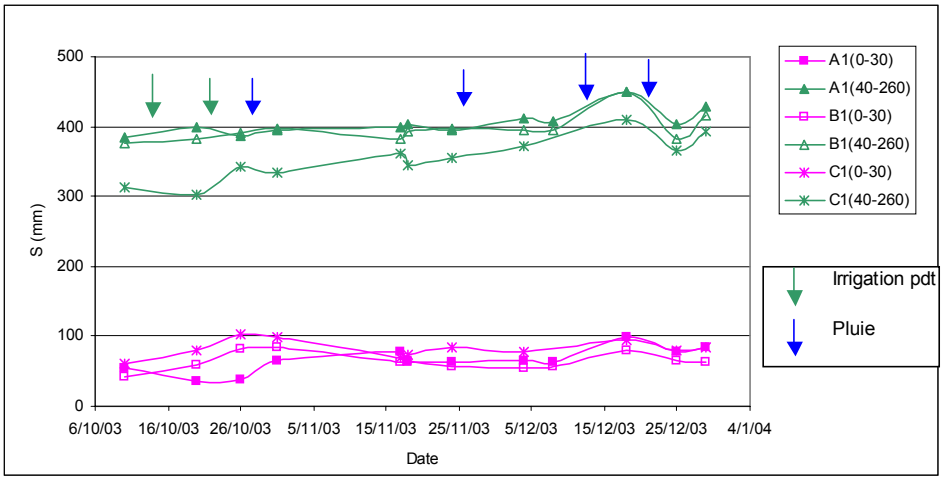


Figure 4. Evolution du stock hydrique en A1, B1 et C1 en fonction des apports d'eau.

Les flux de sève des 4 arbres ont été mesurés afin d'estimer la transpiration de l'olivier. La valeur moyenne de la transpiration de l'olivier semble se situer entre 10 et 60 l/ jour. Des résultats similaires ont été trouvés sur olivier en Espagne par Fernández *et al.* (1997). La variation du flux de sève suit la demande climatique représentée par l'ETo ce qui explique sa fluctuation saisonnière (figure 5). La mesure de la transpiration de l'olivier va nous valider ou non, le choix des réservoirs et leurs dimensions.

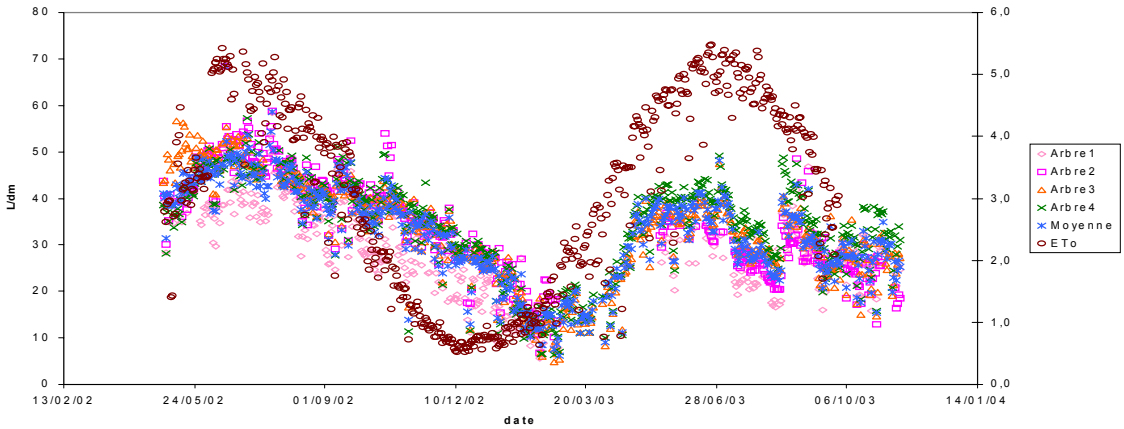


Figure 5. Evolutions comparées de la densité du flux de sève (en L/dm2) des 4 arbres étudiés et de l'Eto.

En conclusion et au vu des premiers résultats, on constate que :
– des investigations doivent être menées afin de quantifier les quantités d'eau d'irrigation excédentaires pouvant être exploitées par l'olivier. Le dispositif expérimental mis en place permet de répondre à cette question en confrontant les données du flux de sève et le bilan hydrique mesuré à la parcelle ;
– la technique de flux de sève par la méthode de dissipation de chaleur de Granier semble être bien adaptée pour la quantification de la transpiration d'une manière directe et précise.

Interactions « ressources – usages » au niveau des exploitations agricoles

Les objectifs de ce thème étaient d'inventorier, de modéliser et de comprendre des comportements individuels dans un contexte défini.

Impact, sur le revenu des exploitations, des stratégies développées par les agriculteurs suite à un abaissement de la nappe dans un secteur irrigué par puits privés

Le travail réalisé ici concerne le premier thème et a été réalisé par Ben Hamouda, (1999).

Il a été centré sur l'étude du comportement et des stratégies des agriculteurs d'une zone irriguée à partir de puits de surface et qui sont face au risque d'un manque d'eau suite à la baisse continue du niveau de la nappe à partir de laquelle ils pompent leur eau d'irrigation. Après avoir tenté d'identifier les stratégies qui pouvaient émaner des irrigants, le travail a essayé de mesurer l'impact de ces choix stratégiques sur les résultats économiques des exploitations agricoles.

Pour choisir le périmètre irrigué, sept critères de classification ont pu être retenus : superficie, orientation culturale, taille des exploitations, type d'accès à l'eau, mode de faire valoir, situation foncière et comportement des agriculteurs. Le périmètre retenu a été celui d'Awamria situé à l'intérieur d'une zone où le creusage de nouveaux puits est interdit (zone d'interdiction) et dans une zone où la surexploitation de la nappe est dans un état avancé; en effet, les niveaux piézométriques relevés depuis plusieurs années s'abaissent régulièrement, et n'ont pas été influencés par la construction en 1989 du barrage El-Haouareb.

La typologie des exploitations agricoles a ensuite été réalisée sur la base d'un échantillonnage, d'une enquête et d'une ACP. Pour l'échantillonnage, il a été procédé à un tirage aléatoire de 50 % des 138 exploitants possédant des puits en fonctionnement ou abandonnés. On a retenu au total 70 individus dont 15 correspondent à tous ceux ayant des puits abandonnés.

Le résultat de l'ACP a permis d'identifier 7 groupes types dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau V.

Tableau V. Typologie des exploitations agricoles Ben Hamouda 1999.

Groupes	Caractéristiques
1	Grandes exploitations faiblement intensifiées à faible productivité de l'eau (0,700 DT/m^3).
2	Exploitations arboricoles faiblement intensifiées à forte productivité de l'eau (2,500 DT/m^3).
3	Exploitations intensifiées à faible productivité de l'eau (0,600 DT/m^3).
4	Exploitations arboricoles moyennement intensifiées à faible productivité de l'eau (0,500 DT/m^3).
5	Petites exploitations arboricoles intensifiées à forte productivité de l'eau (3,700 DT/m^3).
6	Grandes exploitations moyennement intensifiées à dominance des cultures d'hiver et à faible productivité de l'eau (0,500 DT/m^3).
7	Exploitations en sec

Les stratégies qui seront adoptées en situations de pénurie d'eau ont été identifiées.

S_0 : Creusage ou approfondissement du puits et/ou du sondage à bras.

S_1 : Adoption d'une technique d'irrigation économe en eau : goutte-à-goutte ou aspersion.

S_2 : Elimination ou réduction des superficies des cultures annuelles (élimination des cultures annuelles les plus consommatrices en eau au profit de celles qui le sont moins par exemple).

On a pu ainsi créer des sous-groupes types des exploitations. Au final, dans chaque groupe, a été choisie une exploitation agricole sur laquelle ont été réalisées des simulations du fonctionnement actuel et l'élaboration de scénarios d'évolution possibles pour une situation de pénurie d'eau : analyse des stratégies développées par les agriculteurs irriguants.

L'outil utilisé pour réaliser les simulations est le logiciel informatique « **Q**uatre **V**ents » développé par l'INRA-Paris Grignon.

En conclusion**,** une comparaison de l'évolution des résultats économiques des exploitations simulées, entre la situation actuelle et celle projetée (traduisant les décisions stratégiques des agriculteurs face à une pénurie d'eau) nous a permis de dégager les déductions suivantes.

- Le creusage ou l'approfondissement d'un puits et/ou d'un sondage à bras est consécutif à une baisse du revenu de l'agriculteur et sa trésorerie. Le cas où le creusage d'un puits permet l'introduction de l'irrigation dans l'exploitation, les résultats économiques (MB, PE, RA et trésorerie) subissent une amélioration très importante.

- L'adoption d'une technique d'économie d'eau permet un gain substantiel. Même si ce choix ne permet pas, dans certains cas, l'amélioration du revenu agricole et surtout de la trésorerie l'année de réalisation du projet, il permet souvent, l'augmentation de la MB et de la productivité de l'eau des cultures.

- La réduction de la superficie des cultures irriguées va obligatoirement détériorer les résultats économiques de l'exploitation. Elle engendre la baisse la plus importante, même si, dans certains cas, on assiste à une amélioration de la productivité de l'eau.

D'un point de vue plus général, on peut conclure que :

– si le creusage ou l'approfondissement d'un puits et/ou d'un sondage à bras n'a que de faibles conséquences sur les résultats économiques des exploitations, ceux-ci ne font qu'aggraver l'état de (sur)exploitation de la nappe; d'ailleurs le PIP d'Awamria relève d'une « zone d'interdiction » ;

– outre la baisse importante des résultats, la réduction des superficies des cultures en irrigué contrarie les objectifs de l'Etat qui visent l'autosuffisance et la sécurité alimentaire ;

– l'économie de l'eau sera donc le choix le plus idéal, bien que certains irrigants profitent de la quantité d'eau économisée pour étendre leurs superficies irriguées.

Impact de l'introduction du goutte-à-goutte sur l'économie de l'exploitation en GIC

Le but de ce travail était la conception d'un modèle économique des exploitations agricoles capable de représenter leur fonctionnement actuel et de voir leur évolution lorsqu'elles mettent en place les mesures incitatives proposées par l'Etat et en particulier la modernisation des techniques d'irrigation. Le travail a été centré sur le GIC de Melalsa et conduit par Koukou Tchamba (2000).

Comme dans l'étude précédente, on a retenu une démarche de typologie, modélisation du fonctionnement actuel des exploitations et simulation des résultats économiques en fonction des solutions techniques d'économie d'eau utilisées.

Pour la phase de modélisation, elle a été réalisée en utilisant l'outil de résolution GAMS (General Algebraic Modelling System).

- La première étape a été une validation du modèle. En comparant les résultats de l'optimisation faite par le modèle avec la réalité des exploitations-type, il est apparu que le modèle constituait une représentation acceptable du fonctionnement des exploitations étudiées pour l'occupation du sol mais en tenant compte de certaines cultures réellement pratiquées telle que l'olivier et la fève. Par contre, il donnait des coûts d'opportunité de l'eau trop faibles et un coût d'opportunité de la terre est trop élevé.

- L'étape suivante a été la consolidation du modèle de base en prenant en compte les conditions de stress hydrique au niveau de chaque culture. Pour ce faire, on a introduit dans la fonction objectif, la relation FAO permettant le calcul de la chute des rendements en fonction de l'évapotranspiration réelle (ETR) et maximale (ETM):

$$1-\frac{\text{Rendement réel}}{\text{Rendement max}}=k_y(1-\frac{ETR}{ETM})$$ avec K_y le coefficient de stress hydrique

Dans les conditions tunisiennes, ce sont les stress hydriques du mois d'avril qui sont les plus pénalisants pour l'ensemble des cultures. Le modèle va donc optimiser les alimentations en eau sur cette période.

Les simulations, avec ce nouveau module, montrent que le modèle réalise une meilleure affectation des ressources : eau, terre et main d'œuvre disponible au niveau de chaque type d'exploitation. De plus il précise bien les cultures que l'on peut irriguer pour avoir le maximum de profit.

En cas de ressource en avril non limitante, l'eau sera distribuée entre le blé et la pastèque. Il ressort que l'agriculteur n'a aucun intérêt à faire de la fève et surtout dans sa parcelle située dans le GIC. La même conclusion apparaît pour l'olivier.

Avec une ressource limitée à 200 m^3 / ha en avril, le modèle simule bien le comportement de l'agriculteur : ne pas stresser la pastèque, réduire l'alimentation en eau du blé et abandonner la fève.

- La dernière étape a été celle de l'utilisation du modèle pour mesurer l'impact économique de la modification de la technique d'irrigation.

D'après les résultats de ce modèle, seuls les exploitants qui n'ont pas de puits et qui s'approvisionnent à partir du forages peuvent abandonner les techniques traditionnelles (le gravitaire) au profit des techniques modernes (le goutte à goutte et l'aspersion) compte tenu de leurs avantages.

L'intérêt financier étant limité, l'augmentation de la subvention à hauteur de 65 % rendrait ces techniques économiquement plus attractives.

En conclusion, le modèle mis au point simule bien le fonctionnement économique de l'exploitation et les choix stratégiques d'emblavements faits par les agriculteurs.

Sur le plan strictement valorisation de l'eau, il permet de définir les règles d'allocation des volumes disponibles pour maximaliser le profit. Dans le cas de l'introduction des nouvelles techniques d'irrigation, il montre que leur intérêt économique est limité pour l'agriculteur.

Par contre, il ne prend pas en compte les améliorations apportées par ces techniques en termes de fertilisation et de progrès technique introduits sur l'exploitation.

Conclusion

La diversité des thèmes abordés par ces travaux, montre bien la complexité d'une approche intégrée de la gestion de l'eau.

Dans un projet de recherche comme Mergusie, doivent cohabiter d'une part une réflexion collective sur le modèle de gestion intégrée qui pourra être construit mais parallèlement des actions sectorielles plus ciblées dont les résultats sont obligatoires pour alimenter le modèle final.

Les travaux présentés rentrent bien dans ce dernier cadre. Leur rôle majeur est d'apporter les informations élaborées et suffisamment pertinentes en adéquation avec la demande du modèle final.

Bibliographie

BARBERY, MOHDI, 1983. Carte des ressources en sols de la Tunisie, Feuille de Kairouan ; Tunis, Tunisie, Direction des sols, 49 p.

BEN HAMOUDA N., 1999. Stratégies des agriculteurs irriguants confrontés à une situation de pénurie d'eau. Cas d'un périmètre irrigué privé dans le bassin du Merguellil en Tunisie centrale. Master of Science, CIHEAM de Montpellier, France 159 p.

BASTET G., BRUAND A., QUETIN P., COUSIN I., 1998. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT). Une analyse bibliographique ; Etude et gestion des sols (Afes) vol 5, n°1, 7-28.

BOIVIN P., 1990. Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katoure (Basse Casamance, Sénégal) : variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse Université Paris VI, Ed. ORSTOM, Série Etudes et Thèses, Paris, 226 p.

BOURGUIGNON P., 2002. Application de lois de pédo-transferts à la détermination de la réserve utile des sols de la plaine de Kairouan, stage post-grade, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 35 p.

CHAMPION J., 2003, Typologie des systèmes de culture et de gestion de l'eau dans un bassin versant, application à la culture de la pastèque dans la plaine de Kairouan. Mémoire d'ingénieur ESA Purpan, Toulouse, France, 92 p.

DO F., ROCHETEAU A., 2002. A cyclic thermal dissipation system for measuring sap flow under high natural wood temperature gradients: 2. Analysis in an artificial flow system. Tree Physiology, 22 : 649-654.

FERNANDEZ J.E., MORENO F., CABRERA F., ARRUE J.L., MARTIN-ARANDA J., 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. Plant and soil, 133 : 239-251.

FERNANDEZ J.E., MORENO F., GIRON I.F., BLAZQUES, 1997. Control of water consumptive by olive tree. Acta Horticulae, 449: 83-89.

FEUILLETTE S, 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources -usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de la plaine de Kairouan, Tunisie Centrale. Thèse de doctorat, discipline Sciences de l'Eau, Université Montpellier II. France, 344 p.

GASCUEL-ODOUX C., BOIVIN P., 1994. Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling : a case study, GEODERMA, 62 (1994) p. 165-182.

GRANIER A, 1987. Mesure de flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. Annales des Sciences Forestières, 44-1 : 1-14.

KOUKOU TCHAMBA A. 2000. Analyse des choix des techniques d'irrigation. Cas de la zone de Melalsa. Projet de fin d'études d'ingénieur GEA, INAT Tunis, Tunisie, 102 p.

MATHERON G.1965. Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature, Ed. Masson, Paris 1965.