

Gestion de l'eau verte face à la rareté de l'eau, aux changements climatiques et aux contraintes environnementales pour la durabilité des agrosystèmes collinaires

Insaf Mekki¹, Rim Zitouna Chebbi¹, Moncef Masmoudi², Netij Ben Mechlia², Frédéric Jacob^{1,3}

¹Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts

²Institut National Agronomique de Tunisie

³IRD, Laboratoire d'étude des Interactions Sol Agrosystème Hydrosystème, UMR Lisah INRA-IRD-Supagro

إدارة الموارد المائية في التربة وتأثير ندرة المياه ، وتغير المناخ والعراقيل البيئية لاستدامة النظم الزراعية الجبلية .

تتميز النظم الزراعية الجبلية بمنطقة البحر الأبيض المتوسط شبه القاحلة بمزيج من التأثيرات البشرية (تجزئة قطع الأراضي، التكتيف الزراعي) والمناخية (تركيز هطول الأمطار والجفاف المتكررة) التي تحفز ضغط قوي على الموارد المائية والتربة (انجراف الأراضي ، تراجع مستويات المياه الجوفية) . بالإضافة إلى هذه التأثيرات والعراقيل الناتجة عن ذلك، تتميز منطقة الوطن القبلي ببرنامج واسع النطاق لتعبئة الموارد المائية والحفاظ على التربة عن طريق البحيرات الجبلية. تحسين إدارة هذه النظم الزراعية الجبلية يتطلب فهم أداؤها، بما في ذلك الردود على الضغوط البشرية والمناخية . يهدف هذا العمل لتوصيف ديناميات المكانية والزمانية من احتياطي مياه التربة وتأثير التضاريس، واستخدام الأراضي والمناخ و التربة. وهو يغطي تباين تدفقات المياه في النطاقات المكانية المختلفة (مقياس نقطة، قطعة ارض و مستجمعات المياه) ودراسة العواقب على النطاق الإقليمي وتقييم تسرب الماء في الأرض او الجريان على سطحها. ويستند التحليل على معلومات عن الخصائص المكانية للتربة (تضاريس، قطعة ارض، و أنواع المحاصيل) ، وكذلك البيانات الهيدرولوجية التي تم جمعها على مستجمعات المياه الجبلية. توفر هذه الدراسة دليلا لتقييم سيناريوهات إدارة النظم الزراعية الجبلية لزيادة أداء الزراعة البيئية.

Abstract : Management of green water facing water scarcity, climate change and environmental constraints to the sustainability of hilly agroecosystems.

Hilly agroecosystems in semi-arid Mediterranean area are characterized by combinations of anthropogenic forces (fragmentation of plots, intensification of agriculture) and climate (rainfall amount and distributions, recurrent droughts) that induce strong pressures on water resources and soils (land degradation, declining groundwater levels). In addition to these forces and the resulting tensions, the Cap Bon region is characterized by widespread hill lakes constructed to collect water and conserve soil resources. Improving the management of these hilly agroecosystems requires the understanding of their functioning, including responses to anthropogenic and climatic pressures. The objective of this study is to characterize the spatiotemporal

dynamics of soil water storage in relation to the topography, land use, climate and soils. It covers i) the quantification of the variability of water fluxes at different spatial scales (point, plot and watershed), and ii) the study of the consequences at the regional scale of land use change, in terms of water flow and partition between blue water and green water. The analysis is based on: i) the information on the spatial characteristics of the land (topography, soil map, land use, types of crops), and ii) the hydrological observations data collected on a hilly watershed. This study provides indices to evaluate management scenarios of agroecosystems aiming to increase agri-environmental performances.

Résumé

Les agrosystèmes collinaires du domaine semi-aride méditerranéen sont caractérisés par des combinaisons entre forçages anthropiques (morcellement du parcellaire, intensification agricole) et climatiques (concentrations des précipitations, récurrences de sécheresses) qui induisent de fortes tensions sur les ressources en eau et en sols (dégradation des sols, diminution des niveaux piézométriques). En sus de ces forçages et des tensions résultantes, la région du Cap Bon est caractérisée par la généralisation des aménagements de types lacs collinaires pour mobiliser les ressources en eau et préserver les ressources en sol. Améliorer la gestion de ces agrosystèmes collinaires demande de comprendre leurs fonctionnements, incluant les réponses aux pressions anthropiques et climatiques. L'objectif de ce travail est de caractériser la dynamique spatio-temporelle de la réserve hydrique des sols en lien avec la topographie, l'occupation du sol, le climat et la pédologie. Il porte sur i) la quantification de la variabilité des flux hydriques à différentes échelles spatiales (placette, parcelle et bassin versant) et ii) l'étude de la conséquence à l'échelle régionale du changement d'utilisation des terres, en termes de flux hydriques et de partition entre eau bleue et eau verte. L'analyse repose sur : i) des informations spatialisées des caractéristiques de terrain (topographie, sols, parcellaire, cultures), et ii) des données hydrologiques relevées sur un bassin versant collinaire. Ces travaux fournissent des éléments pour évaluer des scénarios de gestion des agrosystèmes, afin d'augmenter les performances agri-environnementales.

1. Introduction

L'agriculture occupe une place importante dans les régions du bassin méditerranéen semi-aride, l'activité agricole est souvent combinée avec l'élevage et caractérisée par l'occupation des plaines, collines et montagnes. Cette agriculture est parfois associée à une mise en culture des terres marginales et des pratiques culturelles non adaptées. Les agrosystèmes

collinaires sont des zones caractérisées par un morcellement très poussé des terres et une simplification des systèmes d'assolements, avec un nombre réduit de cultures entrant dans les rotations. La végétation naturelle est dégradée à cause du surpâturage et de la mise en culture induisant l'érosion des sols et l'envasement des retenues. La gestion des ces agrosystèmes collinaires est une question majeure en contexte marqué par une augmentation des besoins en eau, des sécheresses récurrentes et très prononcées et des inondations catastrophiques en automne. Ajoutée à cela les faibles performances, de l'agriculture pluviale et irriguée, sont associées à la forte compétition entre exploitations agricoles, incluant répartition amont / aval sous contrainte de la limite des ressources en eau. En zone semi-aride, les études des eaux pluviales se sont plus orientées vers les processus hydrologiques à l'échelle de l'événement pluvieux, que sur la connaissance du fonctionnement à l'échelle de l'agrosystème, incluant les diversités spatiale et temporelle des situations anthropiques et climatiques et les réponses aux pressions induites, indispensable à leur bonne gestion. Ceci nécessite d'aborder les questions de l'eau agricole de manière globale avec les possibilités de valorisation des ressources en eau du sol « eau verte » qui est apportée par les pluies et stockée dans le sol, permettant l'agriculture pluviale (Falkenmark, 1995 ; Falkenmark and Rockstrom, 2004 ; les Notes du Plan Bleu N° 8 - Avril 2008). Celle-ci est sous-estimée lorsqu'elle n'est pas seulement négligée dans les statistiques des agences de gestion des eaux. Elle est pourtant responsable de la plus grande partie de la production mondiale d'aliments et de biomasse, environ 60% de la production alimentaire de base (Rockström and Gordon, 2001). « L'eau bleue » est la partie des précipitations qui ruisselle et qui peut être mobilisée pour divers usages, dont l'irrigation L'objectif de ce travail est d'étudier la dynamique spatiotemporelle de la réserve hydrique des sols « eau verte » en lien avec les conditions environnementales et les facteurs anthropiques (pratiques et aménagements agricoles). Il porte sur : i) la compréhension de la variabilité des flux hydriques en conditions de relief collinaire à différentes échelles spatiales (placette, parcelle et bassin versant), ii) la quantification de la dynamique spatiotemporelle de la réserve hydrique des sols en lien avec le milieu physique et les pratiques agricoles, et iii) l'étude de la conséquence à l'échelle régionale du changement d'utilisation des terres en termes de flux hydriques et de partition entre eau bleue et eau verte.

2. Matériel et méthodes

Le site d'étude est le bassin versant de Kamech (263 ha) équipé à son exutoire d'un lac collinaire de capacité 145 000 m³. Ce site est localisé sur le bassin de Lebna dans le Cap Bon et il est inclus dans le réseau international d'Observatoires de Recherche en Environnement (ORE OMERE, <http://www.obs-omere.org/>), co-piloté par quatre partenaires: LISAH,

INRGREF, INAT, et HSM. Le climat se situe entre les bioclimats méditerranéens sub-humides inférieurs et semi-arides supérieurs avec une pluviométrie moyenne annuelle variant de 400 mm à 650 mm. La majorité (75%) des précipitations tombe durant la période s'étendant d'octobre à mars, avec pour caractéristiques principales des conditions hydriques déficitaires et donc sur des fenêtres temporelles importantes d'un point de vue cycle cultural. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de l'ordre 1250 mm (Zitouna Chebbi, 2009). Quatre principaux types de sols présents au Cap Bon ont été caractérisés et cartographiés (Mekki, 2003): les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, et les vertisols qui sont occupés par les cultures annuelles. La profondeur des sols varie de quelques mm sur les affleurements gréseux et dans le lit de l'oued à plus de 2 m dans le bas fond et sur certains versants. L'analyse repose sur : i) des informations spatialisées sur les caractéristiques du terrain (carte des sols, parcellaire, cultures,), et ii) des données d'observations hydrologiques relevées sur le bassin versant. Les données expérimentales sont expliquées en détails dans les travaux de Mekki (2003); Mekki et al., (2006); Zitouna Chebbi (2009) et Zitouna Chebbi et al., (2012).

3. Résultats

Les conditions climatiques

La pluie est le seul apport en eau pour les cultures dans la zone d'étude. Le bassin versant présente la particularité d'être soumis à un forçage de vent externe, et à des vitesses de vent élevées. L'analyse des conditions météorologiques rencontrées a montré qu'il existe deux classes dominantes de directions du vent, dites de « Nord-Ouest » et de « Sud », toutes deux étant approximativement parallèles aux pentes dominantes rencontrées sur le site. En situation de vent de Nord-Ouest, les vitesses de vent sont supérieures à ceux observés par vent de Sud alors que les températures, les déficits de pression de vapeur et l'évapotranspiration de référence sont inférieurs à celles-ci.

Les occupations des sols

Sur le bassin versant Kamech, le moindre espace arable est mis en culture comme d'ailleurs dans toute la région du Cap Bon. C'est ainsi que près de 70% de la surface du bassin de Kamech est utilisé pour la production agricole. Ce pourcentage élevé d'utilisation du sol est accompagné d'un morcellement parcellaire très poussé qui crée et augmente les discontinuités sur le bassin versant. Les superficies sont faibles (les parcelles de taille inférieure à 1ha sont majoritaires) et varient autour d'une moyenne de 0,62 ha. Le système de production mixte « élevage ovin » basé sur les parcours et

les fourrages induit les choix de successions des cultures. L'observation des occupations sur une période de 7 ans montre que la superficie cultivée est stable avec des fluctuations interannuelles des proportions relatives de chaque culture (Figure 1). Les céréales (principalement fourragère) représentent une place importante dans les successions de cultures avec l'introduction aléatoire de légumineuse ou jachère pour rompre la succession.

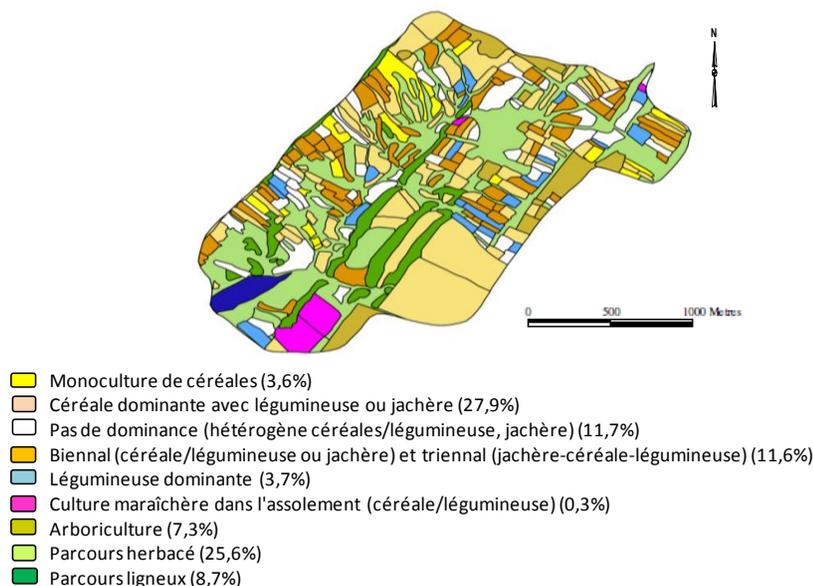


Figure 1. Bassin versant de Kamech variation spatiale des successions des cultures, types de rotations observées sur 7ans les surfaces consacrées aux cultures annuelles.

L'évapotranspiration des cultures en reliefs collinaires

La topographie joue un rôle majeur dans la mesure de l'évapotranspiration à l'échelle locale. La complexité du relief induit une hétérogénéité des flux au niveau du couvert végétal (Figure 3). Nous observons une forte influence de la direction du vent sur les flux convectifs. Les flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) et le rayonnement net (R_n) sont plus importants en régime descendant. Les différences observées pour la fermeture du bilan d'énergie mettent en exergue une faible sensibilité aux conditions d'occupation du sol, et une forte sensibilité aux conditions d'écoulement ascendant ou descendant. La comparaison de la clôture du bilan d'énergie selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant a montré que la quantité d'énergie disponible sous ses formes ($R_n - G$) et ($H + LE$) est nettement inférieure en régime de vent ascendant (de 50 à 100 W/m^2). Les conséquences des corrections appliquées sur les flux convectifs sont aussi différentes selon les conditions d'écoulement.

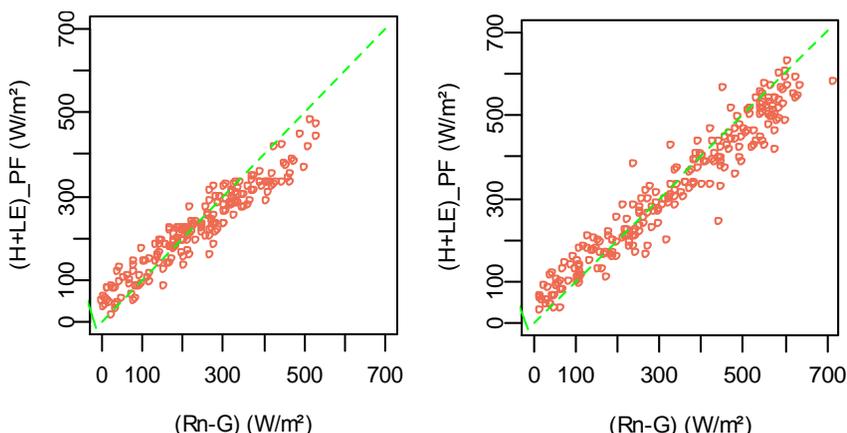


Figure 3. Évaluation de la fermeture du bilan d'énergie par comparaison des deux expressions de l'énergie disponible, $(Rn-G)$ et $(H+LE)$. Vent ascendant (gauche) et descendant (droite).

La consommation en eau (ETR) des différents couverts végétaux observés sur le bassin versant montre des similitudes fortes, malgré la grande différence des espèces considérées. On distingue quatre phases du printemps à l'été. La première phase, L'ETR dépasse rarement les 3 mm/jour, atteignant les 4 mm en pleine période de développement végétatif. Le ratio ETR/ET_0 est égal à 1, ce qui indique une bonne satisfaction des besoins en eau des cultures. La limite de cette première phase semble intervenir lorsque l' ET_0 dépasse un seuil approximatif de 4 mm/j. La seconde phase correspond à une diminution du rapport ETR/ET_0 , une diminution de la pluviométrie et l'installation de la sécheresse. Cette phase est rapide, sa durée est de l'ordre du mois, mais apparemment plus variable que la précédente. La troisième phase correspond à un flux d'évaporation quasi stabilisé de sol nu, qui démarre à 1 mm/j dès fin juin et se poursuit jusqu'aux premières pluies d'automne. La dernière phase, représente le régime d'automne et d'hiver avec une ET_0 et une ETR faibles, mais un ratio ETR/ET_0 en augmentation par rapport à la phase estivale, proche de 0,5. Les quatre phases observées sont bien évidemment classiques dans ce contexte Méditerranéen. Le fait le plus remarquable est la grande similitude des niveaux d'ETR mesurées et de leurs dynamiques temporelles entre des couverts très différents, marquant ainsi sans doute la prépondérance du contrôle climatique qui s'impose à tous ces couverts au-delà de leurs différences écophysologiques. Ceci est particulièrement important pour la modélisation du fonctionnement des cultures.

Ruissellement-infiltration

A l'échelle annuelle le ruissellement dépend principalement de la pluie. L'analyse des observations de ruissellement journalier relevées sur des placettes de mesures suivies sur le bassin versant montre une large variabilité spatiotemporelle des lames ruisselées (Figure 4). La variabilité spatiale des occupations du sol et l'hétérogénéité des conditions du milieu physique (la couverture végétale et des états de surface du sol, topographie,) accompagnés d'une variabilité des phénomènes dans le temps, engendrent des partitions variables des pluies entre ruissellement et infiltration dans le sol. Des variations importantes des lames ruisselées existent, particulièrement sur les parcours, similairement aux variabilités observées des caractéristiques du couvert végétal. L'allure des observations à l'exutoire du bassin se situe dans la famille des infiltrabilités moyennes comme les cultures annuelles occupant la plus grande surface du bassin. Cette similitude de comportement montre l'impact de l'occupation des sols et des états de surface résultants des activités agricoles sur le comportement hydrologique du bassin versant. Sur une même parcelle les états de surfaces évoluent dans le temps soit (i) progressivement : évolution du couvert végétal, ouverture et fermeture des fentes de retrait sur les sols argileux en fonction du déficit hydrique du sol, (ii) soit brutalement après un labour, un désherbage ou suite à un événement pluvieux qui a formé une croûte de battance, estompé la rugosité des labours et/ou recharge le stock hydrique du sol.

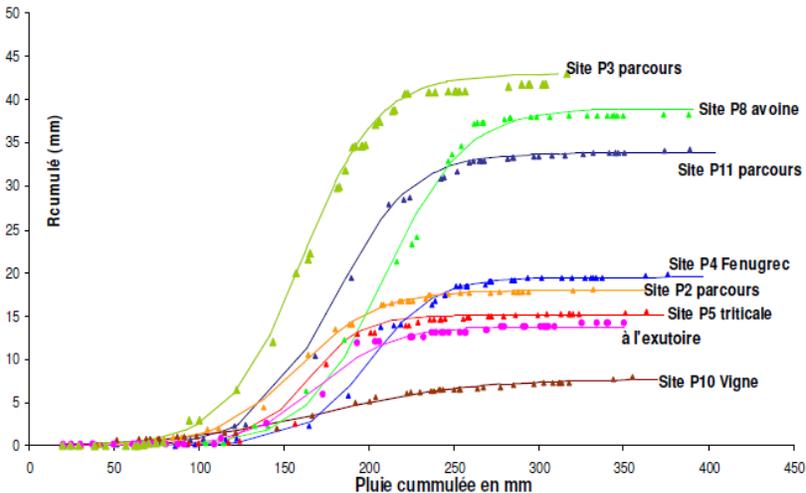


Figure 4. Ruissellement cumulé en fonction de la pluie cumulée selon l'occupation des sols.

Ainsi, les taux de ruissellements dépendent de l'état de surface des sols, et de leur évolution sous l'action des pratiques agricoles et aussi des précipitations (intensité et cumul pluviométrique). Les premières pluies automnales déclenchent des ruissellements insignifiants. Un seuil de 100 à 150 mm de cumul pluviométrique au début de la saison pluvieuse est nécessaire pour déclencher un ruissellement significatif à l'échelle du bassin versant.

Variabilité spatiotemporelle des réserves hydriques et fonctionnement de la végétation

Les évolutions des conditions d'humidité des parcelles montrent des ressemblances importantes dues aux faits que l'agriculture est conduite en pluvial. Les variations saisonnières sont donc similaires, avec un sol sec en été et à saturation en hiver, tandis que le printemps est la saison où la consommation en eau des cultures est maximale. Les différences entre parcelles sont dues à la nature de la végétation et de son système racinaire, une céréale provoquant par exemple une dessiccation du sol plus prononcée qu'une fève, à la texture du sol et à sa profondeur. Des variations importantes d'humidité au sein de la parcelle existent, particulièrement sur les parcours, similairement aux variabilités observées du couvert végétal. La recharge du réservoir du sol dépend des précipitations et de l'intensité du ruissellement. Après un cumul pluviométrique suffisant pour remplir le réservoir sol, nous observons des stocks maximum variant de 100 à 550 mm (Figure 5).

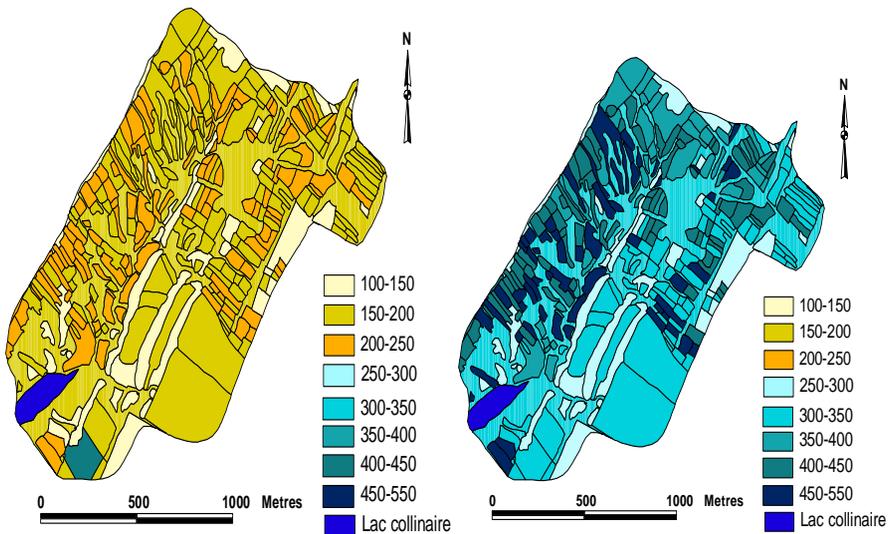


Figure 5. Distribution spatiale du stock hydrique selon deux saisons et pour différentes occupations des sols.

Nous observons que la répartition spatiale des stocks hydriques est beaucoup plus influencée par les capacités de rétention des sols et la végétation plus que par la topographie. Avec une profondeur de 0,3 à 1 m, les sols retiennent au maximum 100 à 550 mm. Ce réservoir offre une capacité de stockage en eau, facilement utilisable de l'ordre de 300 000 m³. Par rapport au stockage dans le sol, le volume du lac collinaire reste faible (1/3 des réserves hydriques des sols disponibles pour les végétaux) même s'il se remplit plusieurs fois dans l'année. Pour des évaporations moyennes de 2 à 3 mm/jour, le stock dans les sols peut assurer une alimentation continue de 40 à 50 jours. La réserve hydrique des sols varie de 160 mm à 290 mm pendant la saison pluvieuse et de 0 mm à 50 mm à la fin de la saison estivale.

4. Discussion

Ce travail expose le fonctionnement d'un petit bassin versant collinaire du domaine semi-aride. Les activités agricoles induisent une complication supplémentaire dans la tâche de modélisation du fonctionnement de ces systèmes de petite dimension. La modélisation de ces systèmes est cependant nécessaire si on désire réfléchir aux implications possibles et de proposer des recommandations pour accompagner les changements globaux. Quoiqu'il est difficile de quantifier avec précision les conséquences des changements climatiques, les modifications annoncées dans la distribution des pluies affecteront le cycle hydrologique et la dynamique de fonctionnement du réservoir sol et de la consommation des cultures. Dans ce contexte, les stratégies pour se préparer aux changements climatiques doivent viser plusieurs objectifs :

Pour quantifier les ressources en eaux, il apparaît intéressant de considérer l'eau de pluie stockée dans le sol et utilisée directement par l'agriculture pluviale appelée « l'eau verte » (Falkenmark, 1995). Ces volumes d'eau stockés dans le sol qui constituent la ressource en eau utilisable par les cultures pluviales tout comme ceux qui s'écoulent à l'exutoire du bassin et qui peuvent être recueillis dans le lac collinaire pour une utilisation différée sont sujets à une forte variabilité. L'étude des spécificités du contexte local et en utilisant une approche intégrée apte à prendre en compte l'ensemble des facteurs déterminant la variabilité dans le temps et dans l'espace permettra d'apporter des réponses. La caractérisation physique et hydrique du bassin versant Kamech, a montré que les sols ont en grande majorité une texture fine. Ils sont peu à moyennement profonds. Sur marnes ils constituent un réservoir "d'eau verte" d'une capacité totale de stockage égale à 4 à 5 fois celle de la retenue. Le partage des précipitations en lame ruisselée et lame infiltrée diffère dans l'espace et le long de l'année. A une date donnée, la différence entre états de surfaces d'une parcelle à l'autre est le facteur déterminant de ce partage.

Des modèles qui permettent la simulation du fonctionnement de la culture et du réservoir sol sont de plus en plus performants. Certains modèles 'opérationnels' tel que AquaCrop sont moins exigeants en terme de données et de paramètres de calibration. L'utilisation de ce modèle dans diverses parcelles de blé du bassin versant de Lebna ayant des textures variables a permis de simuler le bilan hydrique avec une précision relativement bonne (Aloui, 2011). Cependant les valeurs simulées étaient plus proches de la réalité en termes de la dynamique temporelle de l'humidité qu'en termes des quantités du stock d'eau et les résultats paraissent plus fiables pour des sols à texture légère que les sols à texture lourdes.

Il convient également de souligner l'importance du système de cultures et de leurs successions dans les partitions eau bleue- eau verte. Les choix des systèmes de culture ne sont pas tributaires seulement de la disponibilité en eau dans tout le bassin versant mais ils dépendent aussi de la superficie cultivable. Les agrosystèmes collinaires du semi-aride méditerranéen sont des zones caractérisées par un morcellement très poussé des terres et une simplification des systèmes d'assolements. Le morcellement des terres réduit leur productivité et accroît leur vulnérabilité. Ce facteur anthropique a une forte influence sur le milieu physique et sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant et du réservoir d'eau situé à son exutoire.

5. Conclusion

Les agrosystèmes collinaires du domaine semi-aride méditerranéen sont caractérisés par des combinaisons entre forçages anthropiques (morcellement du parcellaire, intensification agricole) et climatiques (concentrations des précipitations, récurrences de sécheresses) qui induisent de fortes tensions sur les ressources en eau et en sols (dégradation des sols, diminution des niveaux piézométriques). Ce travail fournit des éléments pour évaluer des scénarios de gestion des agrosystèmes, afin d'augmenter les performances agri-environnementales. Quelques pistes sont à explorer et qui pourraient permettre de pallier les effets des changements globaux:

- développer des modèles intégrés couplant les processus hydrologiques et le fonctionnement de la végétation, capables de simuler le fonctionnement des systèmes collinaires dans le contexte des changements climatiques.
- valoriser le potentiel de production de l'eau verte en raisonnant les choix des systèmes de cultures et améliorant l'efficacité de l'évapotranspiration.
- intégrer de manière simple les successions de cultures à l'échelle du bassin versant et évaluer l'impact des scénarios de modification d'occupation du sol sur la gestion des réservoirs.

- sensibiliser les acteurs locaux de la gestion de l'eau (agriculteurs, associations d'usagers et vulgarisation agricole) et inclure ces aspects dans la formation des élèves ingénieur.

S'agissant d'agrosystèmes complexes, l'étude du fonctionnement des petits bassins collinaires et leur évolution dans le contexte des changements climatiques nécessite de nouvelles approches d'évaluation des ressources en eaux qui prennent en compte les processus de l'échelle locale à l'échelle de la région. Dans cette perspective, les voies de modélisation intégrée quoique difficile à mettre en oeuvre sont indispensables.

Remerciements

Le soutien matériel et financier pour cette étude a été fourni par: i) le Ministère de l'Agriculture ii) les programmes de recherche français AIRD JEAI-Jasmin et l'ORE OMERE, MISTRALS/SICMED, RTRA, et iii) les projets HYDROMED et IRRIMED.

Bibliographie

- Aloui A. 2011, Mesure et simulation du bilan hydrique du blé sur différents types de sol dans la région de Cap bon., Mastère en sciences agronomiques de l'Institut National Agronomique de Tunisie, 58pp.
- Falkenmark, M and Rockstrom, J. 2004. Balancing water for humans and nature, Earthscan, London.
- Falkenmark, M. 1995. Land-water linkages: a synopsis, In: Land and Water Integration and River Basin Management, FAO Land and Water Bulletin, Rome, 1 pp 15–16.
- Mekki I. 2003. Analyse et modélisation des flux hydriques à l'échelle d'un bassin versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen (Oued Kamech, Cap Bon, Tunisie). Thèse de doctorat, Université Montpellier II, pp : 170.
- Mekki I., Albergel J., Ben Mechlia N., Voltz M. 2006. Assessment of overland flow variation and blue water production in a farmed semi-arid water harvesting watershed. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 1048-1061.
- Rockström, J. and Gordon, L. 2001. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management. *Physics and chemistry of the earth* 26, pp 843-851.
- Zitouna-Chebbi R. 2009. Observations et caractérisation des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère en condition de relief collinaire : cas du bassin versant Kamech, Cap Bon, Tunisie. Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro, pp : 292.
- Zitouna-Chebbi R., Prévot L., Jacob F., Mougou R., Voltz M., 2012. Assessing the consistency of eddy covariance measurements under conditions of sloping topography within a hilly agricultural watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 123-135.