



OMERE

Observatoire Méditerranéen
de l'Environnement Rural et de l'Eau

LE DISPOSITIF D'OBSERVATION SUR LE BASSIN VERSANT DE KAMECH (CAP BON, TUNISIE)

LABORATOIRES CO-GESTIONNAIRES :



Rédaction collective des membres du consortium pilotant l'ORE OMERE
Coordination : Damien Raclot (UMR LISAH / IRD Tunis)
Version septembre 2013

Ce livret présente le dispositif d'observations et les principales activités de recherche en cours ou passées sur le bassin versant de Kamech de l'ORE OMERE. Ce livret est une actualisation de documents antérieurs ([Zante et al., 2005] en particulier). Il est organisé comme suit :

Table des matières

<i>Préambule : historique et enjeux.....</i>	<i>2</i>
<i>Cadre général.....</i>	<i>3</i>
Localisation géographique.....	3
Contexte géologique et géomorphologique	4
Pédologie.....	4
Éléments du climat.....	5
<i>Dispositif d'observation sur Kamech, ORE OMERE.....</i>	<i>7</i>
I. Suivi des activités anthropiques.....	7
Parcelaire agricole et occupation du sol.....	7
États de surface et pratiques culturales.....	8
II. Suivi des flux d'eau et de matières associées.....	9
Le dispositif de mesure sur Kamech	9
Mesures emboîtées du ruissellement et de l'érosion.....	10
Dynamique hydrologique des aquifères superficiels.....	12
Suivi hydrochimique des eaux de surface et des eaux souterraines.....	13
Dispositif de mesures micrométéorologiques.....	14
Disponibilité des stocks hydriques dans le sol pour plusieurs cultures	15
Caractérisation de l'infiltrabilité et de l'érodibilité des sols.....	15
Caractérisation de la dynamique de gonflement-retrait des sols argileux.....	15
Caractérisation des stocks de carbone dans le sol (coll. LSCE, INRAT).....	16
Hiérarchisation des processus d'érosion	17
<i>Bibliographie.....</i>	<i>19</i>

PRÉAMBULE : HISTORIQUE ET ENJEUX

Le barrage de l'Oued Lebna a été édifié en 1986 avec une capacité de stockage d'environ 30 millions de m³ dans le but d'approvisionner en eau une population croissante, de recharger la nappe et d'accroître la production agricole du bassin par l'irrigation des cultures. La construction de la retenue s'est inscrite dans une politique de mobilisation des eaux de surfaces via de grands ouvrages amorcée dès les années 30. Depuis sa mise en eau en 1987, la retenue est suivie par les autorités tunisiennes et deux périmètres irrigués ont vu le jour au droit du barrage (un sur chaque rive). La retenue est aujourd'hui identifiée comme une zone humide d'importance internationale (convention RAMSAR). On peut noter que les aquifères côtiers subissent une surexploitation venant engendrer des problèmes de salinisation des eaux souterraines par intrusion d'eau de mer. Plusieurs tendances déjà observées pourraient se renforcer dans un futur proche : un exode des populations rurales présentes sur les zones amonts vers les grands centres urbains de la Tunisie, ou bien encore le développement de l'activité touristique sur la plaine littorale.

Dans les années 90, des retenues collinaires ont été construites, dans le cadre du programme « Aménagement des terres en pente, mobilisation des ressources en eau, entretien et sauvegarde des aménagements » entrepris par le gouvernement tunisien. Ce programme s'inscrit dans une politique générale de conservation des eaux et des sols dont l'objectif principal est de réduire l'envasement des grands barrages en aval tel le Lebna. Ces retenues collinaires visent également à augmenter la recharge des nappes et à créer des points de développement pour les usages domestiques et agricoles via l'irrigation. En amont du barrage Lebna, onze retenues collinaires ont ainsi été créées entre 1994 et 2003. La première construite est celle du bassin versant de Kamech avec une capacité initiale de 142 000 m³. Dès sa mise en eau en 1994, elle a été intégrée dans un réseau pilote d'une trentaine de retenues faisant l'objet d'un suivi en terme de bilan hydrologique et de risque d'envasement dans le cadre d'une convention entre la DG ACTA-CES et l'IRD Tunis. Il a tout d'abord été financé sur des fonds INCO-DEV puis dans le cadre du programme HYDROMED (1996-2001) appartenant aux 4^{ème} et 5^{ème} PCRD.

Depuis 2002, la retenue de Kamech fait partie d'un Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) nommé OMERE (Observatoire de Recherches de l'Environnement Rural et de l'Eau). Cet ORE, qui comprend également un bassin versant en France (Roujan, Languedoc-Roussillon), est géré par un consortium de quatre partenaires : l'UMR LISAH Montpellier SupAgro-INRA-IRD ; l'UMR Hydrosiences CNRS-IRD-Université Montpellier II ; l'INRGREF et l'INAT. Il bénéficie des moyens humains, matériels et financiers de ces quatre partenaires et de leurs institutions de tutelle. Il constitue de ce fait un bassin expérimental de référence destiné à cristalliser le partenariat autour de questions de recherches sur les changements globaux affectant les hydrosystèmes cultivés et naturels, tant sur le régime que sur la qualité des ressources en eau et en sols. Pour cela, une acquisition conjointe à moyen et long terme d'observations structurées sur (i) les régimes d'écoulements, (ii) les processus d'érosion physique et chimique des sols, (iii) l'évolution de la qualité des eaux superficielles et souterraines, et (iv) l'évolution spatio-temporelle de l'état et des fonctions de forçage des hydrosystèmes, a été mise en place. La vocation d'un tel ORE est de mettre les données récoltées à disposition du plus grand nombre. Cela se fait à travers internet à l'adresse suivante : <http://www.obs-omere.org>.

Compte tenu de l'historique d'observations rappelé ci-dessus, de ses caractéristiques et de ses évolutions passées et attendues, la zone incluant le bassin versant du Lebna, les périmètres irrigués attenants et la zone côtière constituent un site élargi très intéressant pour l'observation et l'étude de l'évolution des écosystèmes agricoles. De multiples questions pourraient ainsi trouver des éléments de réponse, parmi lesquelles (i) l'impact des aménagements hydrauliques sur la redistribution de l'eau, entre eau verte et eau bleue, ou entre zones amont et aval au sein d'un bassin versant, (ii) les mécanismes d'adaptation des systèmes agricoles et de l'usage des terres à une pénurie de la ressource en eau ou au contraire à une mobilisation de cette ressource par des aménagements hydrauliques, et (iii) de façon plus globale, la répartition de la population en fonction de l'évolution de la ressource en eau et en sol.

CADRE GÉNÉRAL

Localisation géographique

Les bassins versants du Lebna (210 km²) et de Kamech (2,63 km²) sont situés dans une région agricole du Nord du Cap Bon, Tunisie (Figure 1).

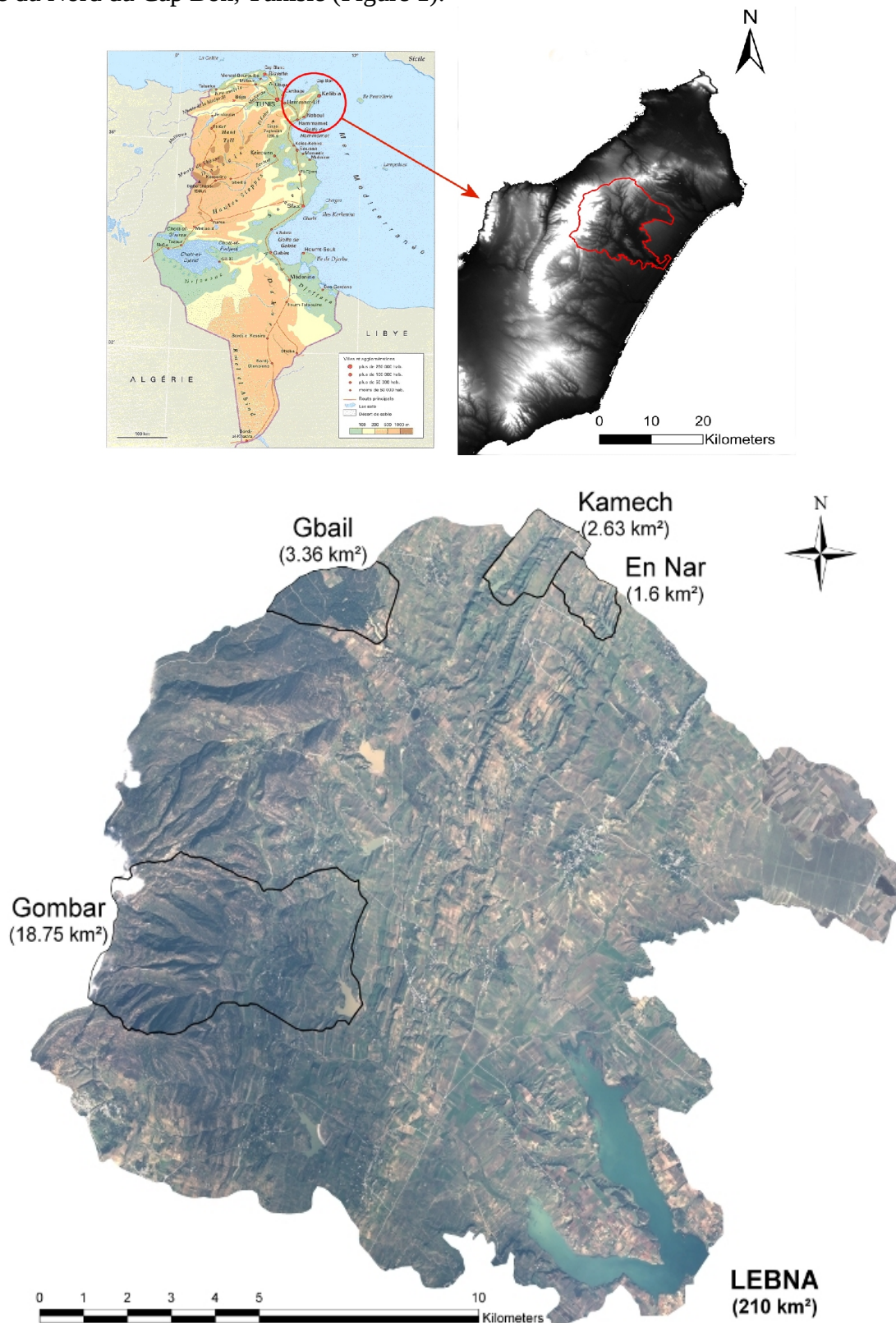


Figure 1. Localisation, modèle numérique de terrain et vue satellitale (image Quickbird) des bassins versants du Lebna et de Kamech. Trois autres sous-bassins versants équipés sont également identifiés.

Contexte géologique et géomorphologique

La géologie du Cap Bon est constituée par des couches sédimentaires sur plus de 7000 m d'épaisseur, les terrains affleurants d'origine tertiaire (de l'Eocène au Pliocène) représentent une épaisseur totale de 4500 m. L'affleurement de couches aussi importantes est rendu possible par le redressement des couches responsable de la topographie de la région. La mise en place de cette structure plissée a pris fin au Pliocène [Castany A., 1953]. Des dépôts sédimentaires issus de la transgression Astienne en recouvrent certains secteurs.

Le bassin du Lebna s'étend du djebel Abderrahmane, représentant l'axe sud-ouest / nord-est de l'anticlinal Tertiaire du Cap Bon, jusqu'à une zone littorale, séparés par une zone d'alternance stratigraphique de bancs marneux et gréseux ou sableux essentiellement d'âge Miocène et Pliocène [IAO, 2002]. Le djebel Abderrahmane constitue un ensemble de montagnes qui culminent à plus de 600 mètres et sont soumises à une érosion prononcée dans les marnes des Éocènes moyen et supérieur et du Miocène inférieur. Cette zone amont est marquée par un relief collinaire prononcé avec de fortes pentes et des versants courts. Les principaux affluents de l'oued Lebna sont : l'oued el Ouidiane et l'oued el Maleh au nord ; l'oued Bou Dokhane et l'oued Abida au sud. Le bassin de Kamech est situé sur le flanc sud-est de l'anticlinal (Figure 2), en rive gauche de l'oued el Ouidiane .

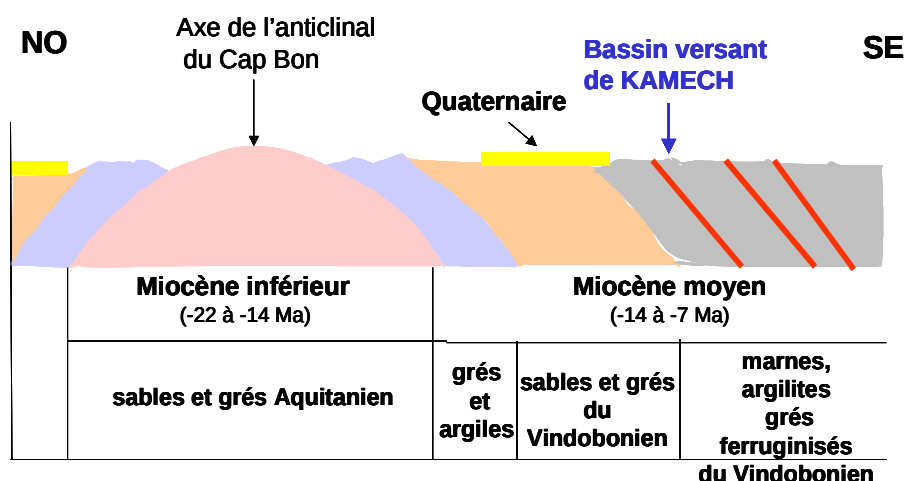


Figure 2. Coupe géologique schématisée dans l'anticlinal du Cap Bon et localisation du bassin de Kamech.

Dans la région de Kamech, on ne retrouve que les restes de paléosurfaces quaternaires marquées par quelques alignements de sommets plans vers 160m d'altitude. Cette surface est actuellement creusée par :

- des vallées antécédentes coulant au nord-ouest et au sud-est de part et d'autre d'une crête nord-est – sud-ouest (sud Tazoghrane),
- des vallons conséquents, comme celui de l'oued Kamech, parallèles aux axes tectoniques,
- des ravines ou ensembles de versants perpendiculaires aux vallons précédents et qui sont les ultimes entailles caractéristiques du bassin versant de Kamech.

On note une nette dissymétrie du bassin de Kamech avec un versant gauche sillonné par les alignements de crêtes formés par les minces bancs de grès ferruginisés armant les marnes en dépression et un versant droit en revers de côte, abondamment raviné vers la mi-versant au dépens des marnes et argilites. Le relief de Kamech est représentatif d'un relief collinaire avec une dénivelée maximale de 110 m et des pentes dépassant localement les 100%.

Pédologie

L'altéropédogénèse est influencée par la pétrographie et le pendage des bancs sédimentaires. A Kamech, se trouvent des fronts de cuesta en rive gauche et des revers de côtes en rive droite, ceci influe sur la profondeur des sols, sur leurs régimes hydriques, orientant soit une percolation soit une stagnation. Trois grands ensembles peuvent être distingués :

1. des sols argilo-limoneux à argiles actives, assez profonds (50 à 120cm en bas de versant) sur marnes et argilites,
2. des sols limoneux à limono-sableux fins, contenant peu d'argiles actives, peu profonds près des barres gréseuses dont les superficies affleurantes varient d'une rive à l'autre,
3. différentes zones de sols à caractères vertiques (topomorphes en bas fond et entre les barres gréseuses de la rive gauche, uniquement lithomorphes en rive droite).

La Figure 3 présente la carte pédologique élaborée par [Zante et al., 2005]. Elle décrit neuf unités réparties dans quatre classes de la classification CPCS 1967 communément utilisée en Tunisie : (i) les sols minéraux bruts, non climatiques ; (ii) les sols peu évolués, non climatiques; (iii) les vertisols; (iv) les sols calcimagnésiques.

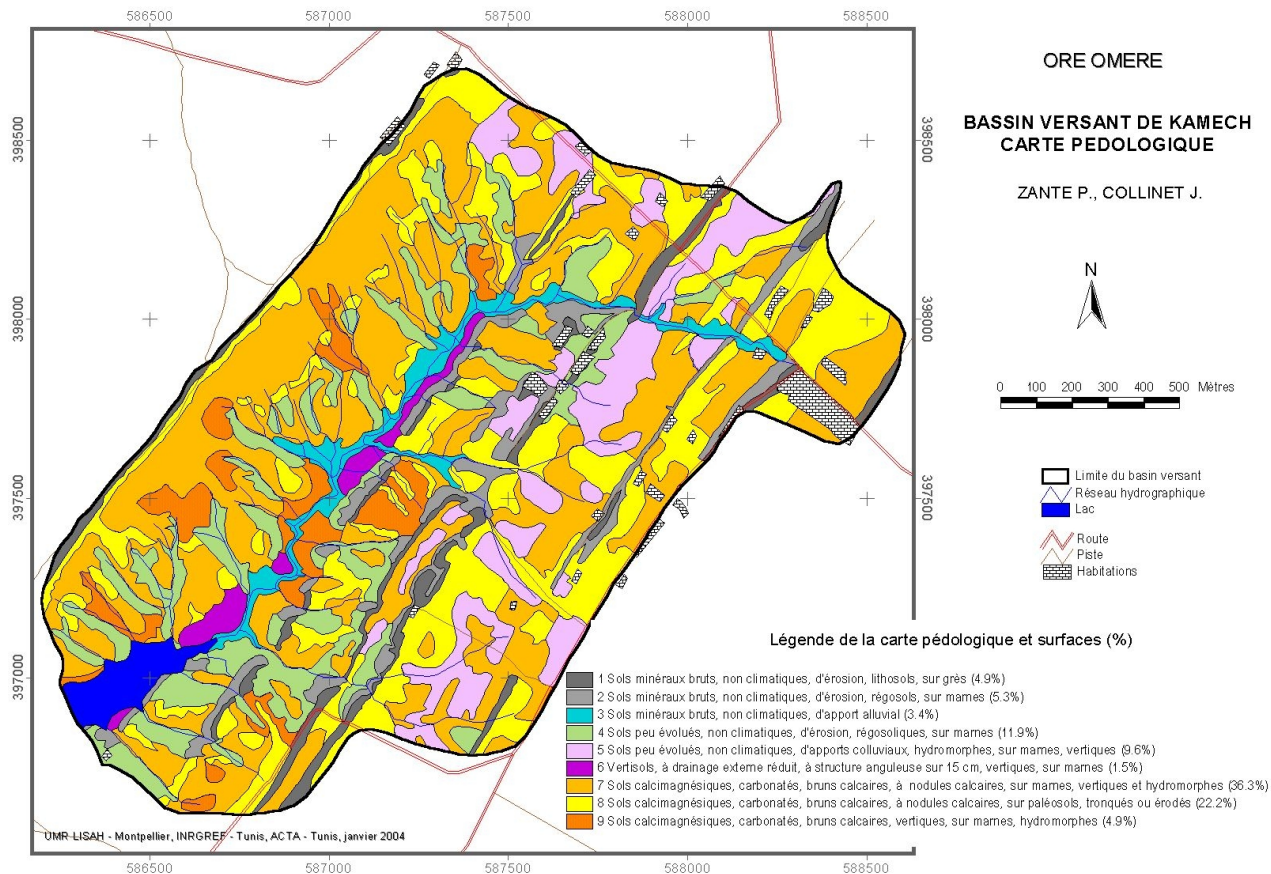


Figure 3. Carte pédologique de Kamech [Zante et al., 2005]

Éléments du climat

Le bassin du Lebna intègre sur 210 km² une forte variabilité climatique puisque les 3 étages bioclimatiques répertoriés par [Bortoli et al., 1969] sur le Cap Bon y sont représentés : l'extrême amont du bassin est soumis au climat méditerranéen humide, le centre du bassin au climat sub-humide alors que l'aval du bassin est soumis au climat semi-aride.

Pour Kamech, la saison sèche dure d'avril à septembre avec une température moyenne journalière maximum supérieure à 30°C en juillet et août. La saison humide dure d'octobre à mars avec une température moyenne journalière minimum de 7°C en janvier et février. La distribution des pluies et des températures, une amplitude thermique annuelle de 24°C et un rapport P/ETP de 0,2 à 0,5 positionnent plus précisément ce bassin entre le bioclimat semi-aride supérieur et le bioclimat méditerranéen sub-humide inférieur [Gounot et Le Houerou., 1967].

La Figure 4 présente les statistiques réalisées à partir de 18 années de mesures à Kamech entre 1994 et 2012. La moyenne inter-annuelle des précipitations est de l'ordre de 650 mm ; celle de l'évapotranspiration potentielle étant de l'ordre de 1500 mm.

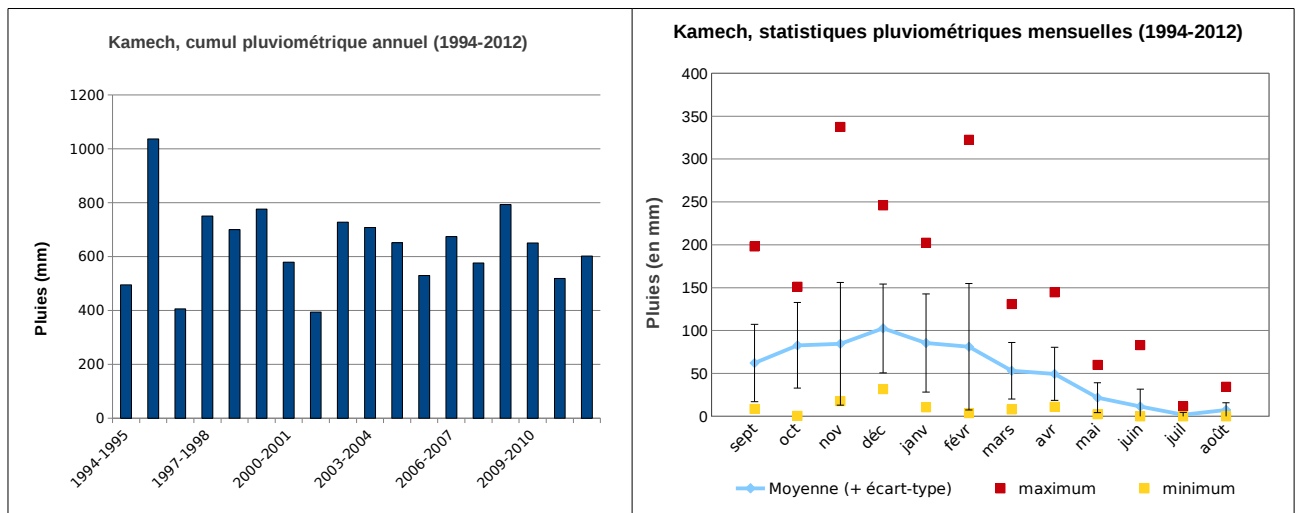


Figure 4. Cumul annuel (à gauche) et statistiques mensuelles (à droite) des précipitations (en mm) sur Kamech de 1994 à 2012.

Réseau de surveillance de la ressource en eau

Les bilans hydrologiques et sédimentaires à l'exutoire du bassin versant du Lebna et de quatre sous-bassins versants (Figure 1) sont déterminés par l'observation à haute fréquence temporelle en ces cinq points de la pluie, des niveaux d'eaux dans les retenues, des débits déversés, des prélèvements et vidanges d'eau, de l'évaporation et de mesures bathymétriques.

Sur la retenue du Lebna, ce suivi est effectué par les services tunisiens depuis 1987, date de mise en eau du barrage. Sur les 4 retenues collinaires amont, ce suivi est mené conjointement par la DG ACTA/CES et l'IRD depuis 1994 pour Kamech et depuis 2008 ou 2009 pour Gbail, En Nar et Gombard (Figure 1). Les hydrogrammes des crues entrant dans la retenue sont reconstitués au pas de temps de 5 minutes par bilan en s'appuyant sur les courbes Hauteur/Volume pour évaluer la variation de stock. Pour déterminer ces courbes Hauteur/Volume, des bathymétries de la retenue sont régulièrement effectuées. Outre les courbes actualisées « Hauteur / Volume et Hauteur / surface », ces bathymétries permettent d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'estimer l'érosion globale sur le bassin versant sur des périodes intégrées.

La Figure 5 présente un exemple des données expérimentales recueillies au niveau de la retenue de Kamech entre 1994 et 2009. En juin 2013, la campagne de bathymétrie a donné le résultat suivant : avec près de 50 000 m³ de vase accumulée depuis la mise en eau du barrage en 1994, le lac collinaire a perdu 35% de sa capacité. Une extrapolation linéaire de cet envasement conduit à estimer la durée de vie de l'ouvrage à une cinquantaine d'années.

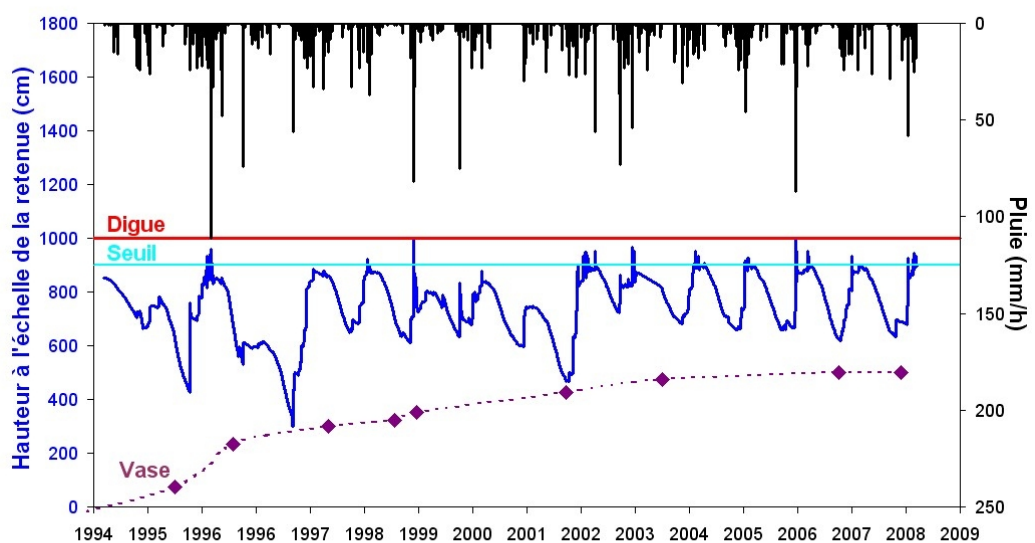


Figure 5. Suivi du niveau d'eau et de vase dans la retenue de Kamech

DISPOSITIF D'OBSERVATION SUR KAMECH, ORE OMERE

I. Suivi des activités anthropiques

Parcellaire agricole et occupation du sol

La cartographie du parcellaire et la détermination des occupation des sols ont été déterminées sur Kamech depuis 1997 [Mekki, 1999 ; 2003 ; Jenhaoui et al., 2008]. Un référencement exhaustif des propriétaires et exploitants de parcelles et un suivi du régime foncier (cession, location, héritage) sont également effectués depuis 2004. Le parcellaire et les occupations du sol apparaissent fortement liés au relief et à la qualité des sols (Figure 6). En conséquence, le bassin est très morcelé : la superficie médiane des parcelles est de 0,5 ha.

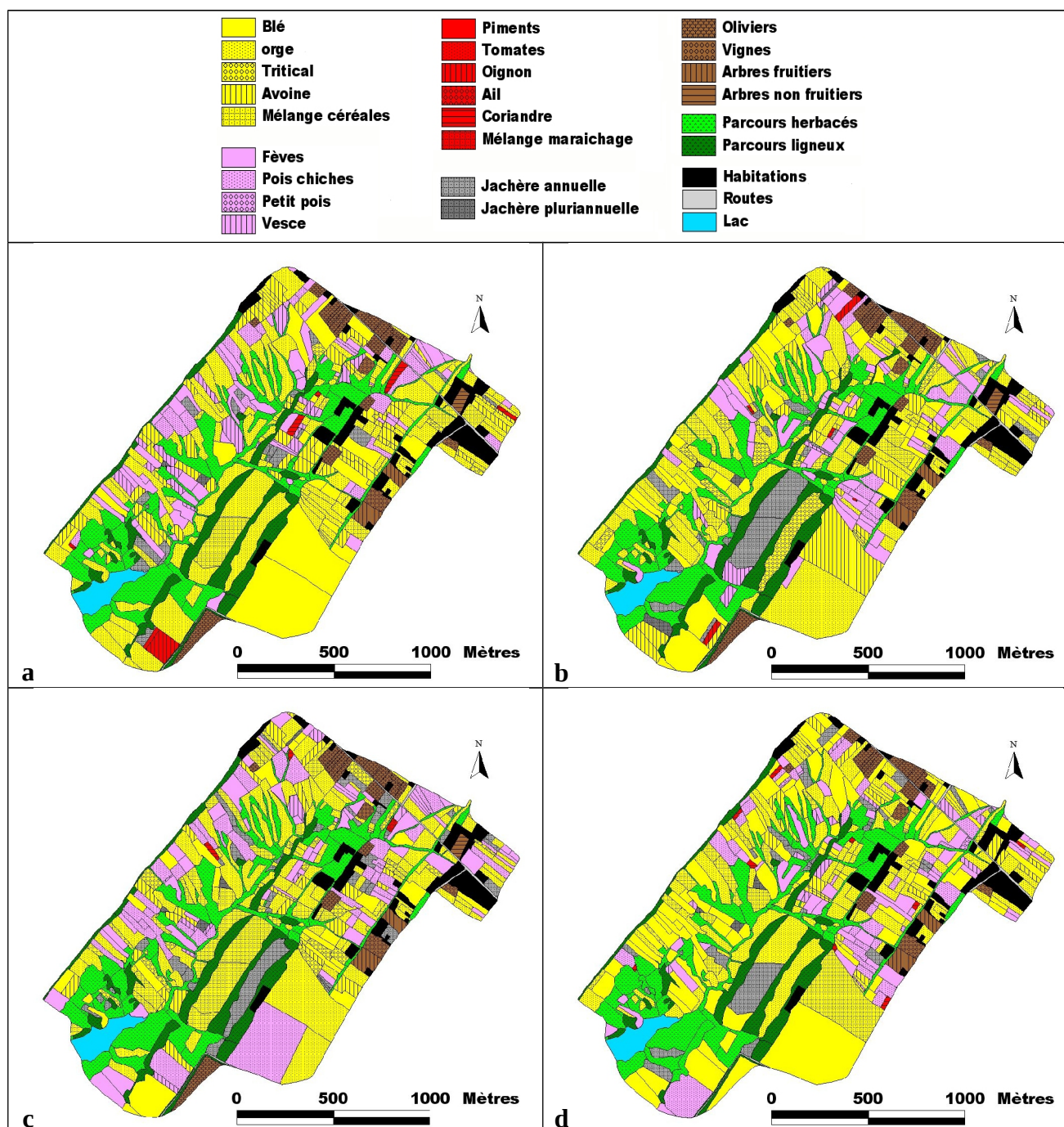


Figure 6. Carte d'occupation du sol pour les années (a) 2004-2005 ; (b) 2005-2006 ; (c) 2006-2007 ; (d) 2007-2008

Sur ce bassin versant, le moindre espace arable est mis en culture comme d'ailleurs dans toute la région du Cap Bon. 30% de la superficie du bassin, correspondant aux zones d'affleurement des barres gréseuses et à certaines fortes pentes sur marnes (> 15%), est utilisée en parcours ligneux ou herbacés. Les terres restantes (>60%) sont essentiellement utilisées en culture annuelle (céréales ou légumineuses) avec une dominance de soles céréales-céréales et céréales-légumineuses. Chaque année, une superficie variant entre 3 et 10 ha est irriguée à la raie et au goutte à goutte pour les parcelles situées à l'aval de la retenue et au goutte-à-goutte pour les parcelles situées dans le bassin.

États de surface et pratiques culturales

Les pratiques culturales sur le bassin versant sont représentatives de l'agriculture traditionnelle en zone de relief du Cap Bon. Depuis 2003, un suivi de ces pratiques et des états de surface est effectué sur un échantillon de parcelles cultivées. Outre l'alimentation de modèles distribués (ruissellement et érosion par exemple), l'objectif de ce suivi est de mettre au point un modèle d'évolution pour la prédiction des états de surface connaissant un ensemble de facteurs explicatifs comme la pluviométrie ou les pratiques culturales. Chaque parcelle suivie est photographiée à chaque sortie sur le terrain ; ces photographies sont archivées au sein d'une photothèque (http://www.obs-omere.org/EDS-occupation_Kamech/listEtat.php). La Figure 7 présente une fiche d'observation des états de surface pour une parcelle de Kamech.

FICHE GLOBALE DES ETATS DE SURFACE																
Site : Kamech			Parcelle : C8													
Date	Culture	Travail du sol					Sol nu									
		Travail(TA, (TR) ou (HT))	Date de labour	Type de traction	Sens labour/pente	Date	Facès	Mottes et agrégats	Rugosité	Seuil Ecou.	Zone Seuil Ecou.	Fentes (larg cm)	Fentes (prof cm)	Croûte	Humidité, compacité	Eléments Gros %
04/10/2004	Chaume	NT					FHF2	0	RT0	SE0	80-100	2-4	10-30	stp	Sec/M	0-25
10/11/2004	TL	TA	31/10/2004	Tracteur	Parallèle		F1	M1	RT2	SE2	80-100	0	0	stp	H/M	0-25
01/12/2004	TL	TR	30/11/2004	Tracteur	Parallèle	29-30/11/04	F0	M0	RT0	SE0	80-100	0	0	0	F/TM	0-25
12/01/2005	Avoine	TA					F1	M0	RT0	SE1	20-40	0	0	stp	F/M	0-25
04/02/2005	Avoine	TA					NaN	0	RT0	SE1	0-20	0	0	NaN	Sat/M	0-25
16/03/2005	Avoine	TA					FHF2	0	RT0	SE1	0-20	0	0	stp	F/C	0-25
19/04/2005	Avoine	TA					FHF2	0	RT0	SE1	0-20	0	0	stp	Sec/C	0-25
25/05/2005	Chaume	TA				24-25/05/05	FHF2	0	RT0	SE1	0-20	1-2	5-10	stfp	Sec/C	0-25
28/06/2005	Chaume	TA					FHF2	0	RT0	SE1	0-20	2-4	10-30	stfp	Sec/C	0-25
14/07/2005	Chaume	TA					FHF2	0	RT0	SE1	0-20	2-4	10-30	stfp	Sec/C	0-25
50 à 60%																
Mouillé																
Il n'y a pas beaucoup de mauvaises																
Avoine fauchée et étalée au sol (recouvre bien le sol). Ce pourcentage intéressant ne sera plus valable dès que l'agriculteur ramasse l'avoine fauchée. La litière est étalée sur																



Parcelle C8 (11/12/2004)



Parcelle C8 (19/04/2005)

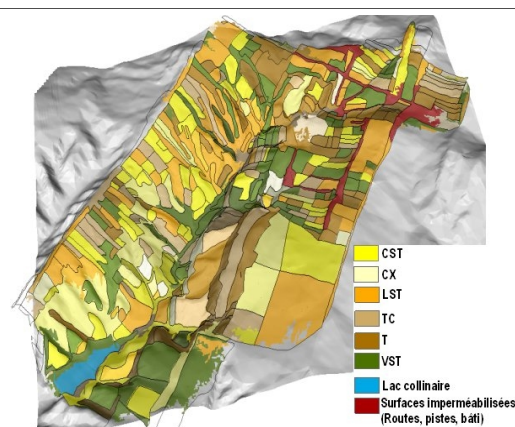


Parcelle C8 (28/06/2005)

Figure 7. Exemple de suivi des états de surface sur Kamech (Jenhaoui Z., IRD Tunis)

Une méthode de reconnaissance des états de surface par télédétection satellitaire a également été proposée (doctorat de C. Corbane, UMR LISAH) pour couvrir rapidement l'ensemble du bassin versant (cf. résultat en Erreur : source de la référence non trouvée par exemple). Des premières enquêtes sur les intrants (engrais, produits phytosanitaires) sont également menées de manière épisodique afin d'établir un protocole d'observation pertinent.

Figure 8. Cartographie des états de surface à partir d'une image SPOT 5 [Corbane, 2006].



Depuis l'automne 2011, des prises de vue automatiques à haute résolution spatiale et temporelle depuis le haut d'un mât ainsi que 2 à 4 campagnes annuelles d'acquisition de photographies par cerf-volant viennent compléter le dispositif d'observation des activités anthropiques.

II. Suivi des flux d'eau et de matières associées

Le dispositif de mesure sur Kamech

Un dispositif de mesures des flux d'eau et de matières associées a été mis en place sur le bassin versant de Kamech (Figure 9).

Légende

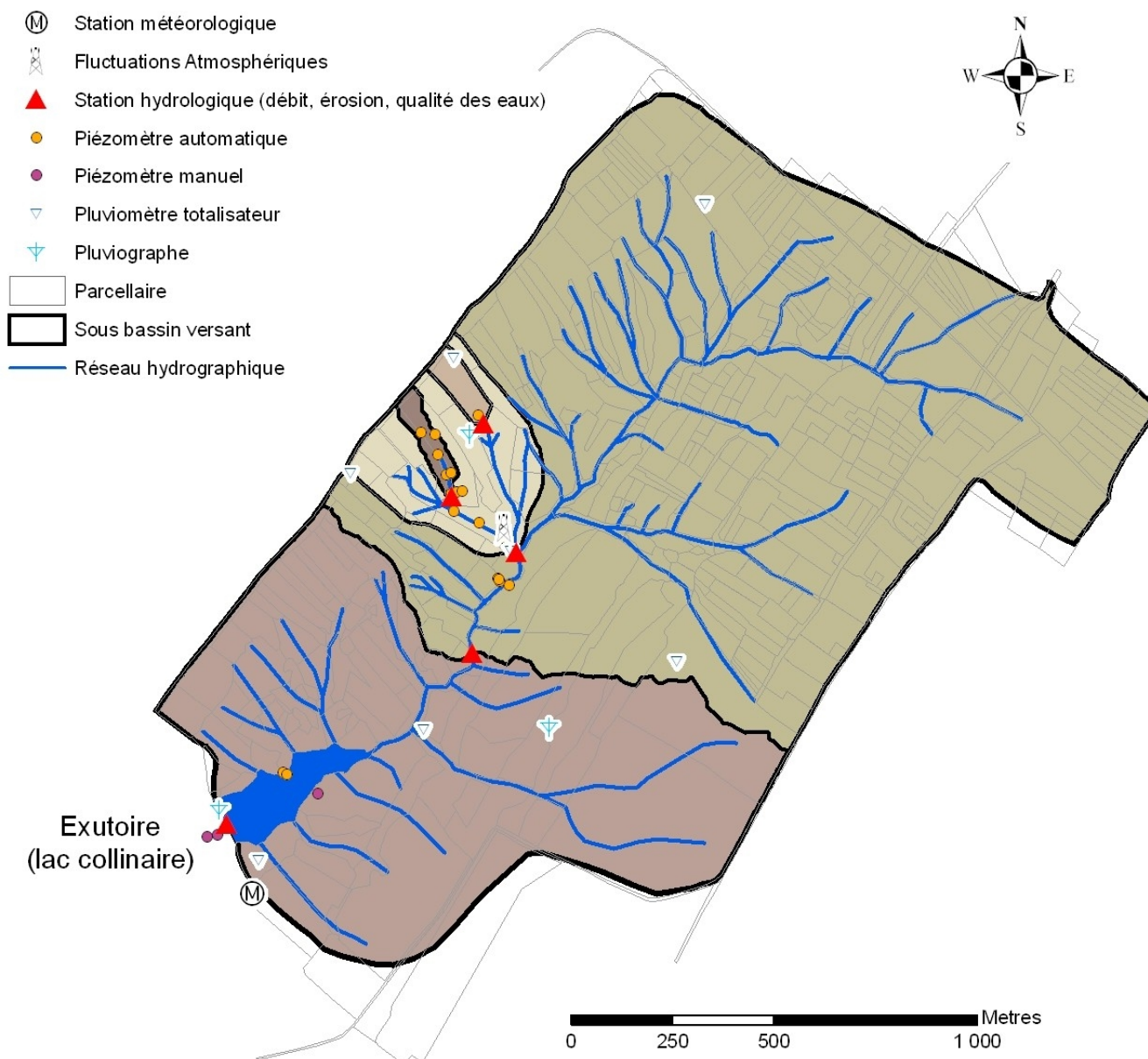


Figure 9. Le dispositif expérimental permanent de Kamech (octobre 2010)

Ces équipements ont été mis en place selon la chronologie suivante : la station météorologique, ainsi que le suivi du lac en 1994 ; le réseau de mesure de la pluie a été densifié en 2000 ; les 4 stations hydrologiques emboîtées ont été construites entre 2003 et 2005 ; le réseau de piézomètres a

été installé entre 2006 et 2008 et le mat micro-météo mesurant les fluctuations atmosphériques en 2010.

Par ailleurs, un ensemble de mesures destinées à mieux comprendre et spatialiser les différents flux d'eau et de matières ont été réalisées ou sont en cours sur Kamech. Quelques-unes parmi les plus récentes sont également décrites à la suite de la présentation du dispositif permanent.

Mesures emboîtées du ruissellement et de l'érosion

Un dispositif emboîté de 4 stations hydrologiques a été mis en place (Figure 10) pour quantifier les différents taux d'érosion de l'amont jusqu'à l'aval et mieux préciser les différents termes des bilans hydrologiques. L'objectif de ce dispositif emboîté est également de mieux cerner les processus dominants à chaque niveau d'échelle (formes dominantes d'érosion et/ou de sédimentation) et ainsi essayer d'apporter des réponses au problème de changement d'échelle. Les stations hydrologiques sont fonctionnelles depuis : décembre 2003 pour la parcelle ; novembre 2004 pour la ravine ; décembre 2004 pour le versant et novembre 2005 pour l'oued Kamech. Elles sont chacune équipées de :

- deux capteurs de hauteurs d'eau permettant une estimation du débit avec une précision optimisée selon l'intensité du ruissellement ;
- un préleveur échantillonneur de 24 flacons pour la mesure des flux de Matières En Suspension (MES) ;
- une centrale Campbell permettant de recueillir les mesures et de piloter les prélèvements.

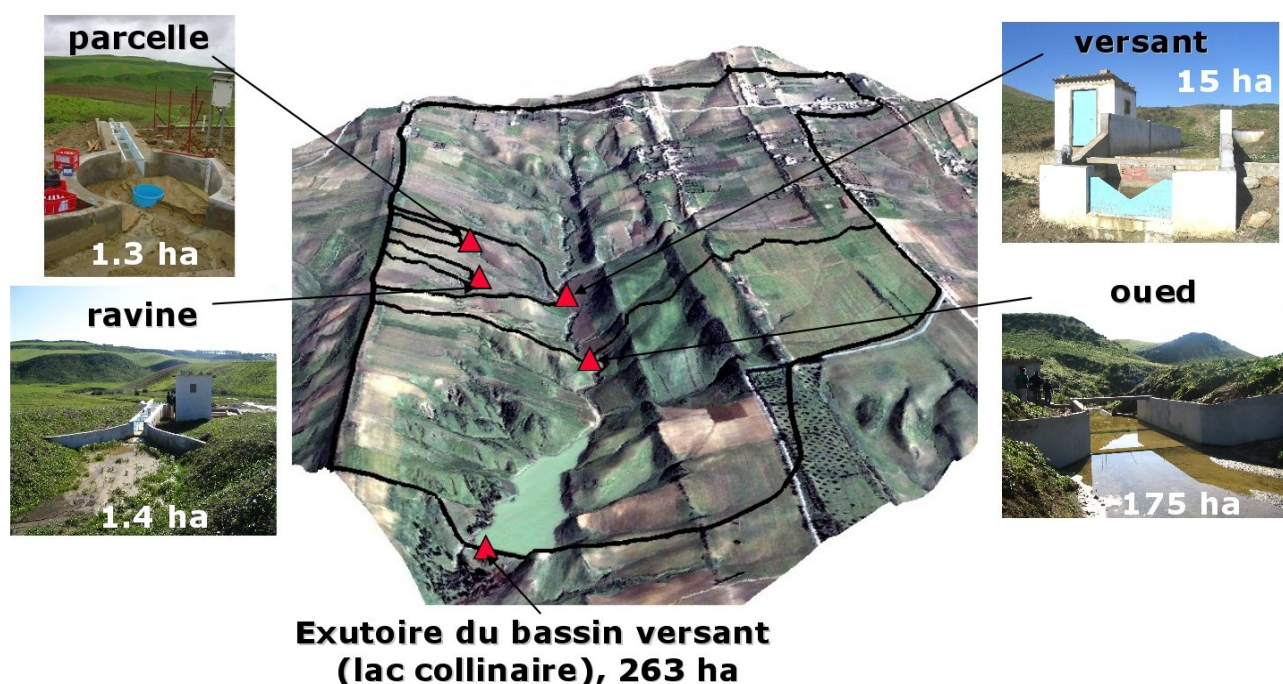


Figure 10. Dispositif emboîté de stations hydrologiques sur Kamech

Un rapport d'installation [Hamdi et al., 2010] disponible à l'adresse <http://www.obs-omere.org> décrit en détail les stations hydrologiques et leur fonctionnement.

Un tel dispositif permet par exemple de caractériser les lames ruisselées aux diverses échelles en fonction du cumul de pluie annuel (Figure 11). On observe une tendance nette et similaire quelle que soit l'échelle considérée. Une très forte variabilité inter-annuelle est cependant observée pour chaque station de mesure. Cette variabilité peut être due aux différences dans la distribution des pluies d'une année à l'autre en lien avec des états de surfaces eux aussi variables dans le temps.

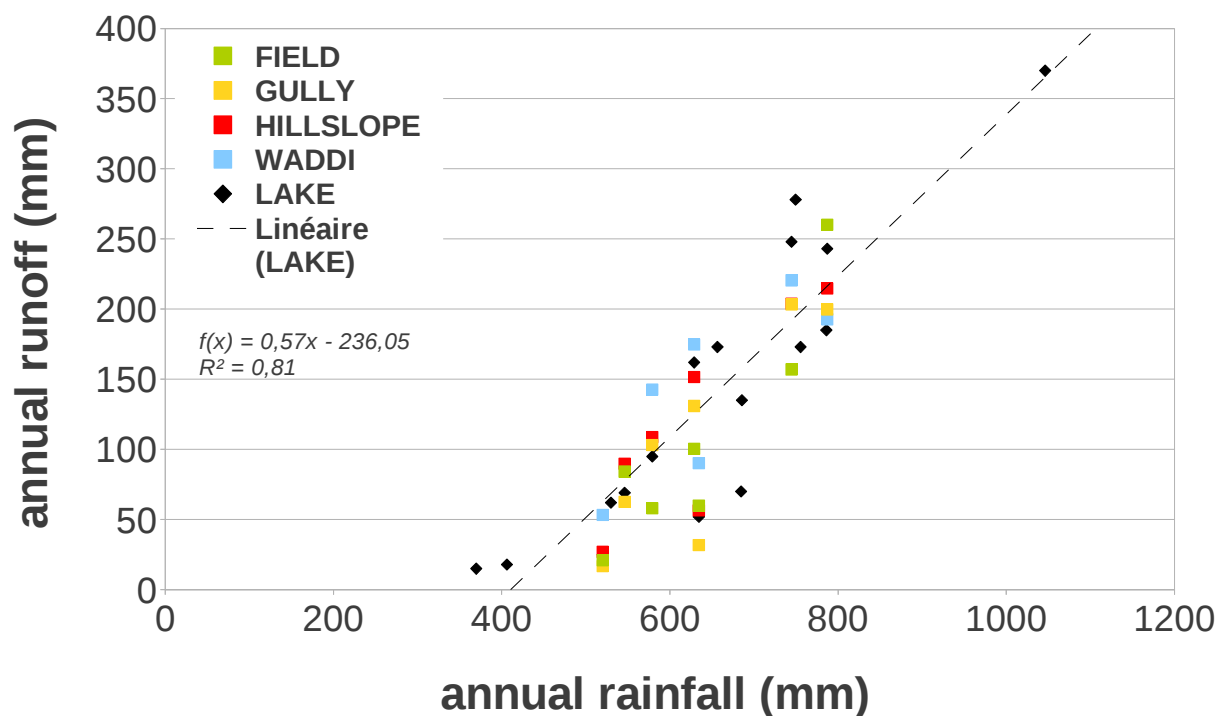


Figure 11. Lame ruisselée annuelle en fonction de la pluie annuelle sur les différentes stations emboîtées de Kamech (2005-2012)

L'observation à long terme conjointe sur les 2 bassins versants composant l'ORE OMERE permet également de dresser des comparaisons (Figure 12). On voit par exemple que les débits annuels sont plus élevés sur Kamech que sur Roujan, et ce malgré une pluviométrie et une évapotranspiration potentielle annuelles similaires sur les 2 bassins

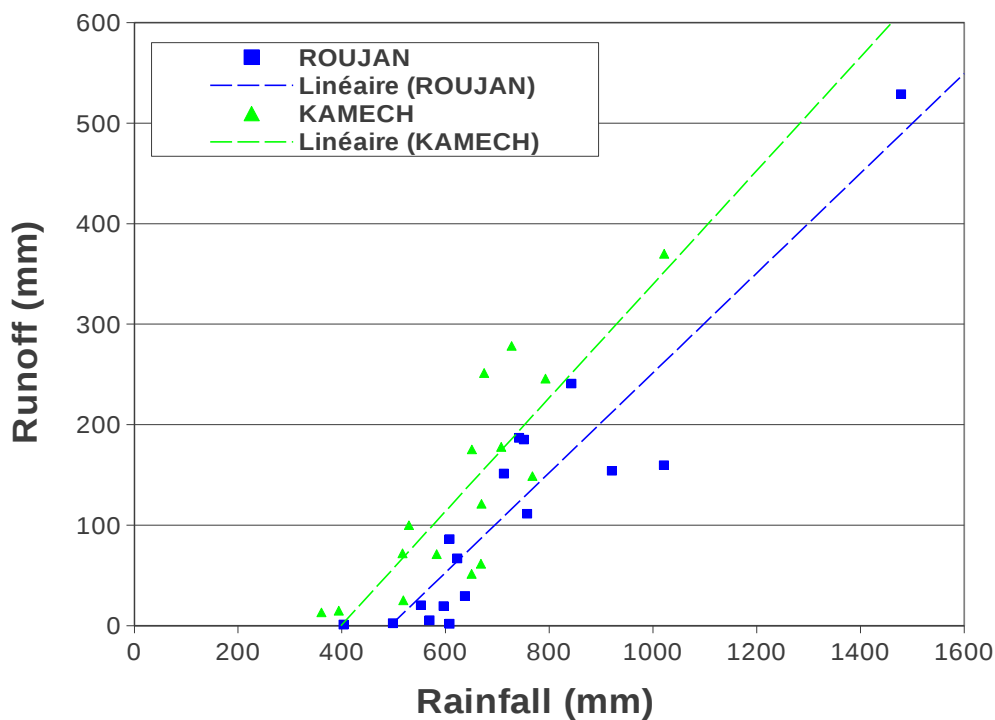


Figure 12. Comparaison Roujan / Kamech des lames ruisselées annuelles à l'exutoire sur la période 1994-2011

Dynamique hydrologique des aquifères superficiels

La dynamique hydrologique des aquifères superficiels et le rôle de ces aquifères dans le cycle hydrologique des bassins versants font l'objet d'études pour mieux comprendre les échanges entre la nappe, la surface, le lac, et pour caractériser la répartition et le transfert de l'eau à l'échelle du bassin versant. A cet effet, un dispositif de 22 piézomètres a été récemment installé sur le bassin versant (en 2007). Des sondes piézométriques ont été installées sur 16 piézomètres permettant une mesure automatique toutes les 5 minutes. Des mesures manuelles sont également faites sur les autres piézomètres avec une fréquence hebdomadaire à journalière.

L'analyse de la dynamique hydrologique de la nappe s'appuie par ailleurs sur le traçage isotopique des flux d'eau de surface et des flux d'eau souterrains. Les isotopes lourds de la molécule d'eau (^2H , ^{18}O) sont mesurés dans les eaux de pluie, de l'oued, du lac et de la nappe à partir d'échantillons prélevés quotidiennement à mensuellement depuis l'année hydrologique 2009/2010 dans le cadre d'un programme de recherche financé par l'AEIA (coll. ENI Sfax Laboratoire de Radio Analyse de l'Environnement -N. Chkir, K. Zouari, A. Hamouda). La composition isotopique des différents compartiments hydrologiques est acquise (Figure 13) pour aider à i) contraindre le bilan hydrologique de la retenue, ce qui permettra de quantifier les échanges entre le lac et l'aquifère, ii) quantifier la contribution de la nappe à l'écoulement de l'oued et iii) comprendre plus généralement les échanges entre la surface et le souterrain.

Les principales caractéristiques de l'aquifère sont:

- une surface piézométrique globalement parallèle à la surface topographique,
- une forte réactivité piézométrique à la pluie en automne et en hiver (Figure 14),
- l'amplitude des fluctuations piézométriques est importante à l'échelle de l'année comme à l'échelle de l'événement pluvieux (Figure 14),
- la surface de la nappe affleure dans les zones de convergence des écoulements.

Ces caractéristiques reflètent une dynamique contrôlée par une recharge diffuse sur les versants et par des échanges aquifère-oued essentiellement au niveau de l'oued principal. La contribution de la nappe à l'écoulement dans l'oued a été estimée entre 10 et 20% selon les années hydrologiques.

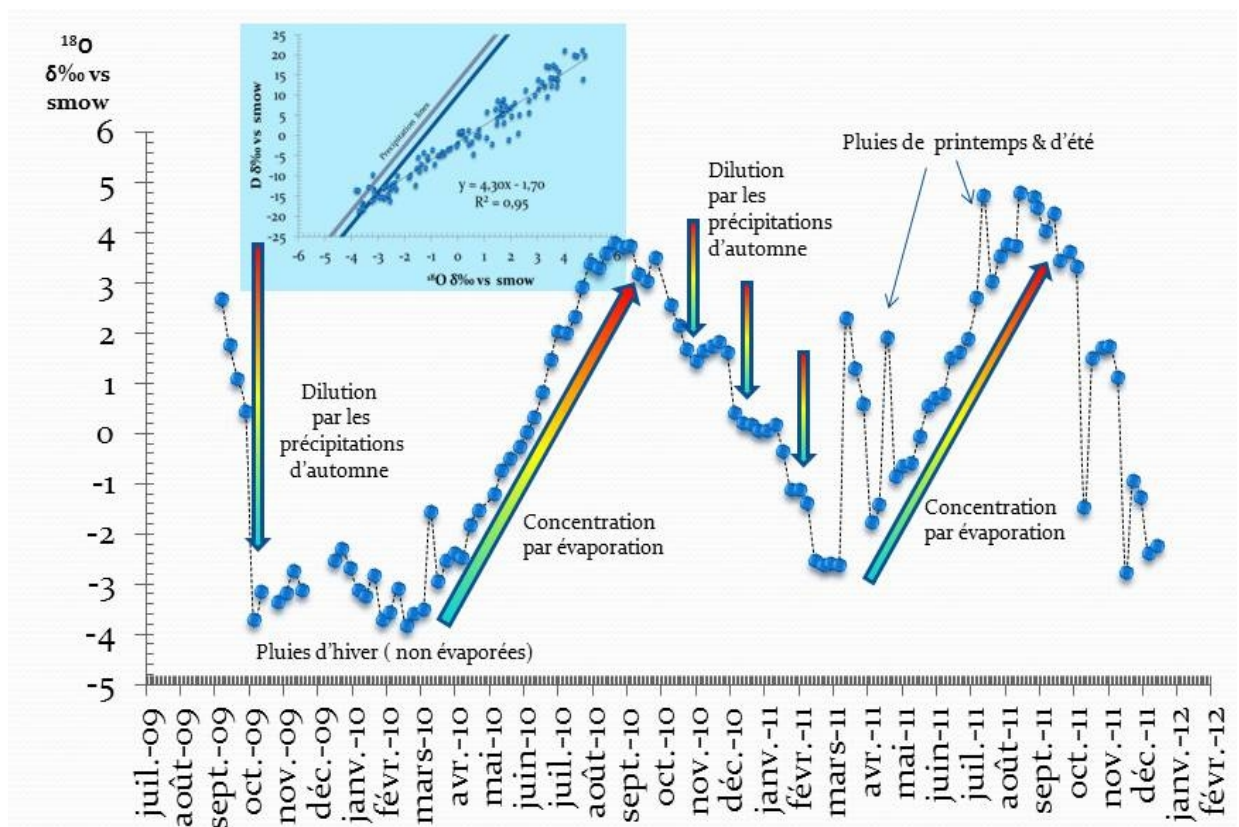


Figure 13. Variation de la composition isotopique en oxygène 18 de l'eau du lac entre août 2009 et janvier 2012 (Bassin versant de Kamech -ORE OMERE-).

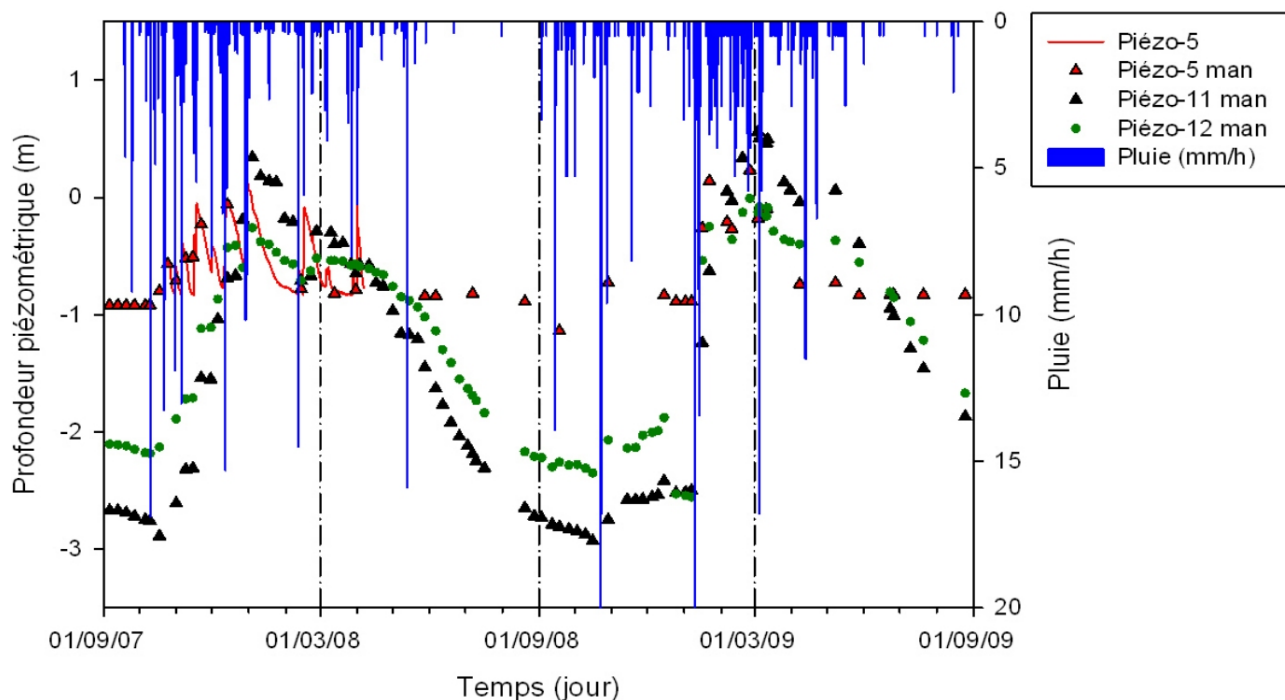


Figure 14. Profondeur piézométrique pour les piézomètres 5, 11, et 12. Les pluies sont représentées sous la forme d'un hyétogramme inversé.

Suivi hydrochimique des eaux de surface et des eaux souterraines

Un suivi des éléments majeurs et des différentes formes de l'azote est réalisé dans les eaux de surface et les eaux souterraines du bassin versant de Kamech depuis l'année hydrologique 2009/2010 (Figure 15). Le protocole comprend des prélèvements d'échantillons d'eau de nappe, du lac et de l'oued à une fréquence variant de la crue au mois. Les échantillons sont prélevés manuellement, filtrés sur le terrain et ramenés au laboratoire pour être analysés. Ce suivi permet de traiter, entre autres, la question du transfert d'azote dans les bassins versants agricoles en milieu semi-aride. Ce travail se fait en collaboration entre l'INAT, l'ENIS et le LISAH. Un travail actuellement en cours cherche à quantifier les différents flux d'azote contrôlés par les flux hydrologiques au sein d'un bassin versant.

Diagramme de Piper des eaux du lac

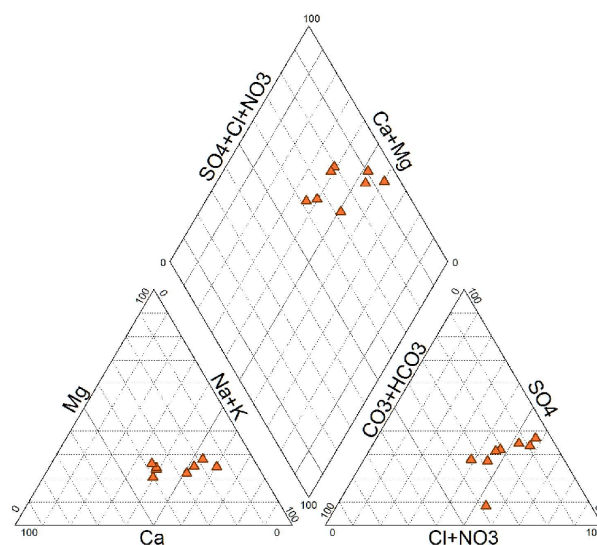


Figure 15. Diagramme de Piper des eaux du lac (bassin versant de Kamech, ORE OMERE), diagramme établi à partir des analyses faites sur les prélèvements hebdomadaires (période sept 2009-Mars 2010) (A. Hamouda, mémoire de Master ENI Sfax, 2010)

Dispositif de mesures micrométéorologiques

L'objectif principal de ces mesures est de documenter l'évapotranspiration réelle (ETR), composante majeure du bilan hydrologique en climat méditerranéen, à l'échelle du bassin versant. Pour cela, une démarche de mesure de l'ETR à l'échelle de la parcelle et à l'échelle d'un ensemble de parcelles est adoptée.

La méthode de mesure de l'ETR par covariances turbulentes est mise en place à l'échelle de la parcelle depuis 2004 (projet IRRIMED). Les quatre termes de l'équation du bilan d'énergie : rayonnement net (R_n), chaleur sensible (H), chaleur latente (LE), flux de chaleur dans le sol (G) sont mesurés ($R_n - G = H + LE$). Les instruments utilisés sont : anémomètre sonique, hygromètre optique, capteurs de flux thermique, radiomètre net (Figure 16 et Figure 17).

A l'échelle de l'ensemble de parcelles, des mesures ont été réalisées à l'aide d'un scintillomètre en 2006. Depuis mars 2010 une tour à flux est installée et des mesures de l'ETR sont réalisées par la méthode de covariances turbulentes (Figure 18).



Figure 16: Mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle locale. Anémomètre sonique et hygromètre optique à hauteur de 2m du sol

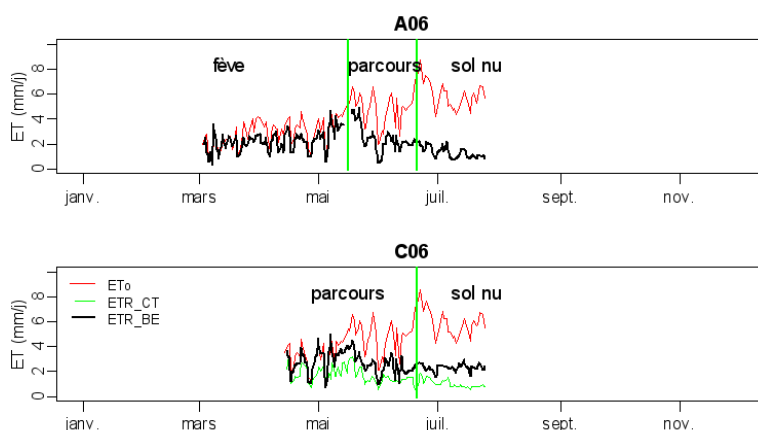


Figure 17: Evapotranspiration de référence (ET₀), évapotranspiration réelle mesurée (ETR_CT) et estimée par bilan (ETR_BE) sur deux parcelles en 2006



Figure 18: Mesure intégrée de l'évapotranspiration réelle. Anémomètre sonique et hygromètre installés à 10m du sol

Les expérimentations sur les échanges surface-atmosphère sont non seulement réalisées pour donner une estimation de l'ETR pour le bilan hydrologique mais aussi pour comprendre l'effet du relief collinaire sur les flux d'évaporation. En effet, des analyses sur l'effet de la pente sur l'écoulement d'air et la conséquence sur les flux atmosphériques ont été réalisées dans le cadre de la thèse [Zitouna Chebbi R., 2009] et continuent dans le cadre d'un projet RTRA.

Disponibilité des stocks hydriques dans le sol pour plusieurs cultures

Un réseau de 12 placettes de 2m² (Figure 19) a été installé durant deux années pour le suivi des composantes du bilan hydrique et des biomasses produites sur les parcours et les cultures pluviales dans le cadre du doctorat de Insaf Mekki (Univ. Montpellier II - INAT – IRD) [Mekki, 2003].

À l'échelle des placettes, les précipitations annuelles varient de 20% entre les sites, et le ruissellement et la lame d'eau stockée dans le sol varient respectivement de 5 et 3 ordres de grandeurs.

À l'échelle du bassin versant, le volume d'eau total stocké à saturation des sols représente 7 fois le volume du lac collinaire et l'écoulement annuel varie entre un minimum de 3% et un maximum de 40%.



Figure 19. Parcelle expérimentale de bilan hydrique sur une culture de fèves

Caractérisation de l'infiltrabilité et de l'érodibilité des sols

15 simulations de pluie (chacune avec 5 répétitions) ont été réalisées entre 2004 et 2007 sur les combinaisons majoritaires type de sol / états de surface (convention UMR LISAH - DG ACTA/Dir Sols). Lors de ces simulations des prises d'échantillon permettent d'évaluer la concentration des eaux de ruissellement en Matière en Suspension et de relier cette charge solide avec l'intensité de pluie et les états de surface. L'objectif est de coupler ces résultats avec le modèle de prédiction des états de surface pour pouvoir prédire également les propriétés d'infiltration et d'érodibilité des sols.



Figure 20. simulation de pluie sur Kamech

De telles informations sont très utiles pour fixer les ordres de grandeur de paramètres de modèles tels que la conductivité hydraulique à saturation ou l'érodibilité.

Des mesures de stabilité structurale sont également réalisées afin de relier les résultats d'érodibilité obtenus par simulation de pluie à un référentiel de mesure beaucoup plus simple à mettre en œuvre.

Caractérisation de la dynamique de gonflement-retrait des sols argileux

La caractérisation physique et hydrique du bassin versant a montré que les sols ont en grande majorité une texture fine. La présence d'argiles gonflantes (smectites notamment) sur une partie du bassin conduit à la présence de très larges fentes de retrait en saison sèche. Les premières eaux de pluie sont entièrement absorbées si bien qu'un ruissellement significatif est rarement observé avant un cumul de 200 mm de pluie sur l'année hydrologique (sauf orage extrêmement violent).

Pour caractériser la dynamique de gonflement-retrait, la variation de l'épaisseur de la couche de sol a été mesurée sur 2 saisons hydrologiques et reliées à son humidité. La couche de sol est matérialisée par deux tubes concentriques ancrés aux deux extrémités de ladite couche (cf. Figure 21), dispositif dit « THERESA ». La mesure de l'écartement entre les extrémités aériennes des tubes ancrés fournit les variations de l'épaisseur de la couche de sol. L'humidité est mesurée par pesée avant et après passage à l'étuve d'échantillons prélevés à proximité immédiate des mesures de variations d'épaisseur et aux mêmes profondeurs. Ces mesures effectuées à différents états

d'humidité (cf. Figure 22) permettent d'établir la courbe de rétraction de la couche de sol concernée et donc de définir les propriétés de gonflement-retrait recherchées.



Figure 21. Parcelles de mesures du gonflement-retrait et coupe schématique d'un dispositif « THERESA »

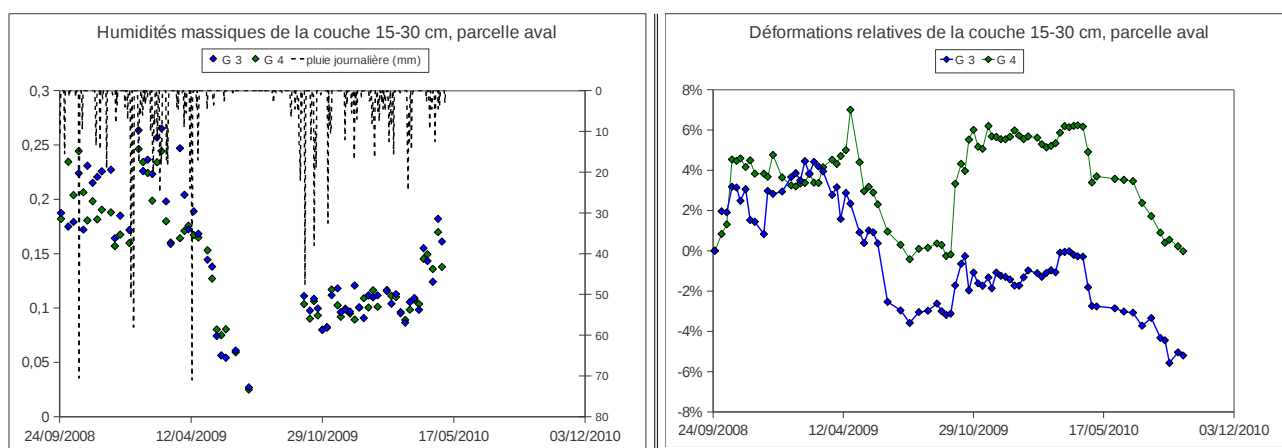


Figure 22. Exemple de données mesurées sur deux répétitions (G3 et G4) à la profondeur 15-30 cm : à gauche les humidités massiques au cours du temps, à droite les déformations verticales (en %) mesurées sur la même période

Caractérisation des stocks de carbone organique dans le sol (coll. LSCE, INRAT)

La quantité et la nature du carbone stocké dans les milieux à substrat calcaire est mal connue. Nous avons donc tout d'abord déterminé la répartition du stock de carbone organique sur un profil vertical (Figure 23). Il est apparu que (i) les concentrations en carbone sont plus fortes en surface qu'en profondeur, (ii) le stock de carbone dans les 30 premiers centimètres ne constitue toutefois que 33 % du stock total du profil de 140cm analysé ; et (iii) le carbone sur l'ensemble du profil, daté au ^{14}C , est âgé de plusieurs centaines d'années.

Par ailleurs, des tests de minéralisation du carbone par incubation ont montré que le carbone plus ancien situé en profondeur se minéralisait plus facilement que le carbone plus jeune présent à la surface.

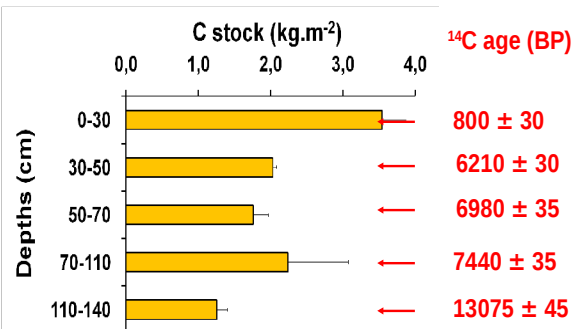


Figure 23. Stock de carbone organique et datation sur un profil vertical de la parcelle expérimentale de Kamech

Hierarchisation des processus d'érosion

Afin de mieux définir les stratégies de lutte anti-érosive, il est fondamental de mieux préciser la hiérarchie des processus en fonction des échelles spatiales. Deux grandes approches sont mises en oeuvre de façon complémentaires pour cela : 1/ analyse des flux de sédiments selon les échelles grâce au dispositif emboîté de Kamech ; 2/ traçage des sources de sédiments à partir des sédiments piégés dans la retenue depuis sa création.

Une illustration de l'exploitation des mesures des flux sédimentaires au niveau des stations emboîtées provient du croisement entre les mesures de flux à l'exutoire d'une ravine et de son impluvium (1,4 ha en tout, cf. Figure 10 et Figure 24) et l'analyse fine de l'évolution de la morphologie de la ravine elle-même (0,17 ha). Pour cela des levés micro-topographiques des flancs et du lit de la ravine ont été régulièrement effectués depuis 2001. Les données quantitatives issues de ces nivellements permettent de spatialiser les zones d'iso-abrasion et d'iso-dépôts entre chaque levé, ou pour la plus grande période (Figure 24). Si on élimine la zone de dépôt aval artificiellement induite par l'installation de la station de suivi des flux, on constate que la ravine a produit principalement à partir de ses flancs environ 50 m^3 de sédiments en 7 ans, ce qui représente une érosion moyenne nette de 0.5 cm/an environ [El Khalili et al., 2013]. Cette valeur est à mettre en lien avec le flux de matière mesurée à l'aval de la ravine (recueillant la ravine et son impluvium de 1.3 ha) qui est de l'ordre de 100 m^3 sur la période 2005-2009, ce qui conduit à estimer la part de l'érosion de la ravine elle-même à environ 25 % du flux total de sédiments au niveau de la station « ravine » de Kamech. Cette contribution de 25 % de la ravine explique bien la différence de taux d'érosion constatée sur la période 2005-2009 entre la station de la ravine ($38,4 \text{ t/ha/an}$) et la station de la parcelle ($29,2 \text{ t/ha/an}$) sur laquelle seuls des processus d'érosion de surface sont actifs [Sauvadet et al, 2012].

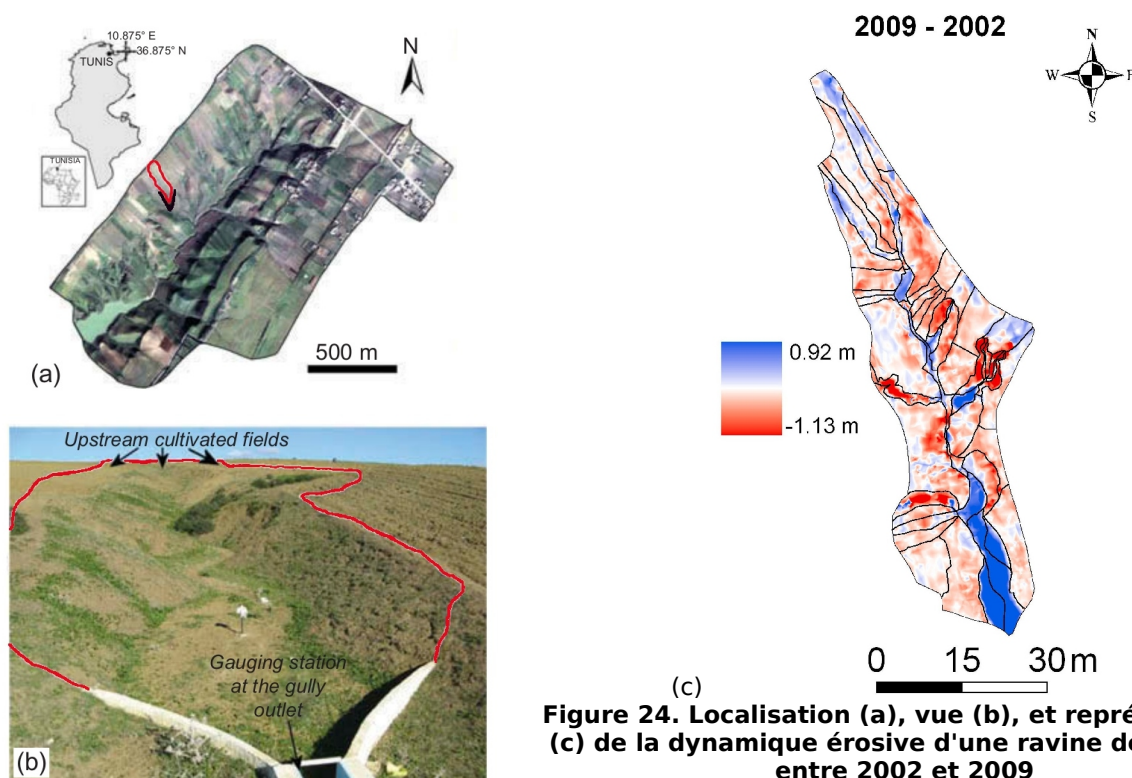


Figure 24. Localisation (a), vue (b), et représentation (c) de la dynamique érosive d'une ravine de Kamech entre 2002 et 2009

Une méthode de traçage des sources de sédiments a également été adaptée pour des carottes prélevées dans les sédiments piégés par la retenue du lac. Parmi les éléments analysés pour retrouver l'origine des sédiments, le césium et le carbone se sont avérés les plus pertinents pour discriminer le sol de la surface des parcelles agricoles (sol mobilisé par l'érosion de surface de type

diffus ou rigole) et celui prélevé en profondeur ou sur les flancs des ravines ou de l'oued (sol mobilisé par l'érosion concentrée, érosion ravinaire principalement). L'application de cette approche par traçage sur des carottes de sédiments piégés dans des retenues collinaires permet donc de quantifier la part relative entre les processus d'érosion diffuse/rigole et ceux d'érosion concentrée de façon intégrée dans le temps (sur toute la durée de vie de la retenue) et dans l'espace (à l'exutoire de petits bassins versants). Appliquée sur le bassin versant agricole de Kamech, cette méthode a permis de démontrer la très nette prédominance des processus d'érosion diffuse (responsable d'environ 80 %) et donc l'intérêt sur un tel bassin de concentrer les efforts de protection du sol sur la recherche de pratiques agricoles plus adaptées à la conservation du sol [Ben Slimane et al., 2013].

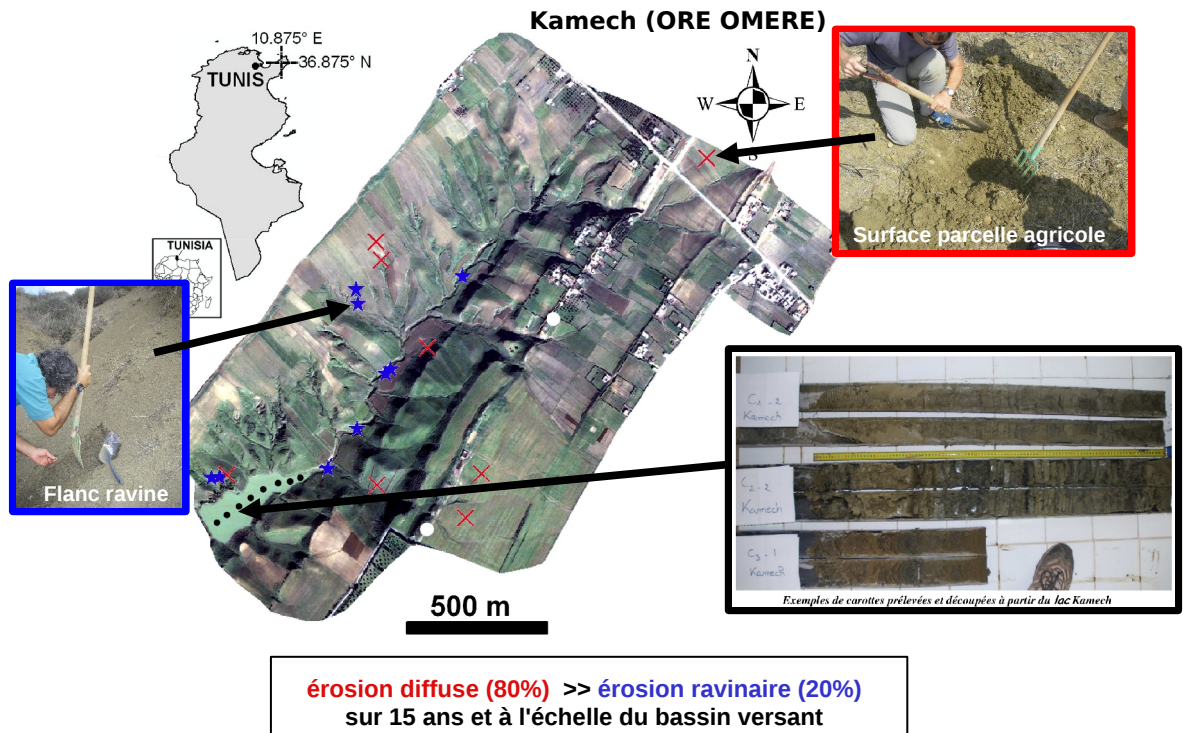


Figure 25. Méthode de traçage des sources de sédiments à partir de sédiments piégés dans les retenues collinaires

On constate donc une convergence des valeurs obtenues par les différentes approches développées. L'application de la méthode de traçage sur d'autres bassins versants (doctorat A. Ben Slimane), ainsi que des recherches sur les facteurs déterminants de la localisation et de l'activité des ravines (doctorat H. Rebai) sont en cours .

BIBLIOGRAPHIE

- Ben Slimane A., Raclot D., Evrard O., Sanaa M., Lefèvre I., Ahmadi M., Tounsi M., Rumpel C., Ben Mammou A., Le Bissonnais Y., 2013. Fingerprinting sediment sources in hillside reservoir within a cultivated catchment of Tunisia. *Journal of Soils and Sediments*, 13: 801-815. doi: 10.1007/s11368-012-0642-6.
- Bortoli L., Gounot M., Jacquinet J.C., 1969. Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale, *Ann. I.N.R.A. Tunisie*, 42, pp. 1–235.
- Castany A., 1953. Carte géologique de la Tunisie au 1/500 000 (deuxième édition). Direction des Travaux Publics, Service des Mines de l'Industrie et de l'Energie. 143 p., 1 carte géologique à 1/500 000 en quatre feuilles , annexes de 14 planches.
- Corbane C., 2006. Reconnaissance des Etats de Surface du milieu méditerranéen par télédétection optique à Très Haute Résolution Spatiale (THRS). PhD, Université Montpellier II. 251 p.
- El Khalili A., Raclot D., Habaieb H., Lamachère J.M., 2013. Factors and processes of permanent gully evolution in a Mediterranean marly context (Cape Bon, Tunisia). *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1-13. doi : 10.1080/02626667.2013.824086 .
- Gounot M., Le Houerou H.N., 1967 : Carte bioclimatique de la Tunisie Septentrionale à 1/500 000 avec le concours de Baldy C., Bortoli L., Bigot A., Floret C., Froment D., Guillermin L., Jacquinet J.C., Le Floch E., Schoenberger A., Soler A., Van Swinderen H. Carte éditée par le CNRS / CEPE Montpellier pour le compte du Secrétariat d'Etat au Plan et à l'Economie Nationale du Gouvernement Tunisien., copyright CNRS 1967. carte + légende.
- Hamdi R., Lamachère J.M., Raclot D., 2010. L'équipement hydrométrique du bassin versant de Kamech (hors lac collinaire). 78 p. (disponible sur <http://www.umr-lisah.fr/omere/index.php?page=docconsult&lang=fr&opened=Rapports&tmpWay=>)
- Hamouda, A., 2011. Bilan hydrogéochimique et isotopique de la retenue du barrage Kamech (Nabeul - Cap bon). Master de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie.
- IAO (Istituto Agronomico per l'Oltremare). 2002. Land resources of the Oued Lebna catchment (Tunisia). 20th course professional master "Remote sensing and natural resources evaluation", IAO, Florence, Italie, 132 p.
- Jenhaoui J., Raclot D., Lamachère J.M., 2008. Le parcellaire et l'occupation du sol entre 2004 et 2008 sur le bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie). UMR LISAH, IRD Tunis. 15 p. + annexes.
- Mekki I. 1999. Étude intégrée du bassin versant d'un lac collinaire et de l'exploitation de l'eau pour l'irrigation. Mémoire de fin du cycle de spécialisation, INAT, 57 p.
- Mekki I., 2003. Analyse et modélisation de la variabilité 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 de Montpellier II, Montpellier, 173 p.
- Sauvadet M., Raclot D., Ben Slimane A., Le Bissonnais Y., 2012. Déterminisme de l'érosion hydrique de la parcelle au versant en milieu méditerranéen marneux. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1(1) : 41-46.
- Zante P., Collinet J., Pepin Y., 2005 : Caractéristiques pédologiques et hydro-météorologiques du bassin versant de Kamech, Cap Bon, Tunisie. UMR LISAH IRD Tunis, DG ACTA Direction des Sols Tunis, INRGREF Tunis. 21p. + 6 annexes.
- 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. PhD, Université de Montpellier II, Montpellier, 292 p.