

AMBRE

AMBRE est une unité de l'Institut de Recherches pour le Développement (Paris)

***Le bassin-versant de Kamech
(presqu'île du Cap Bon, Tunisie) :
atelier d'études intégrées des eaux et des sols***

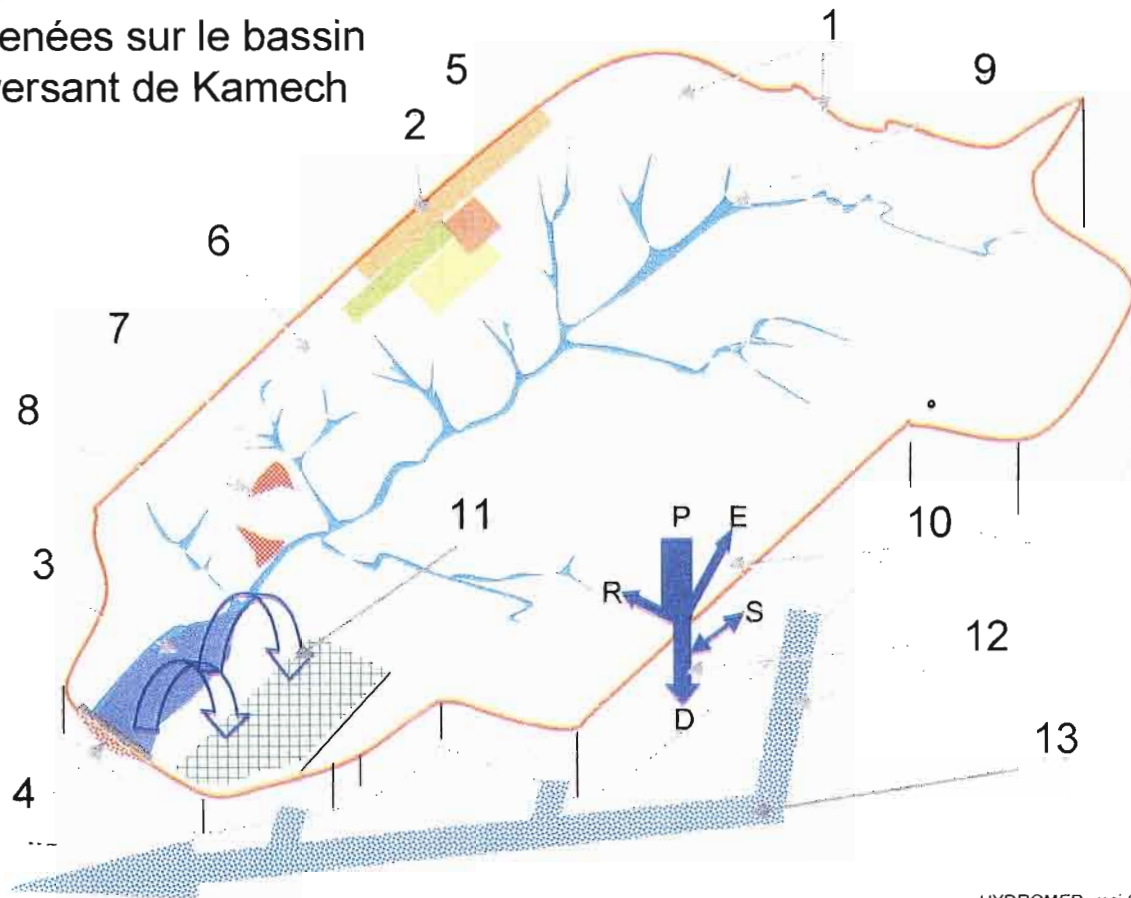


Tunis

Novembre 2001

Le programme AMBRE a pour objet l'analyse, la modélisation et la spatialisation des processus de l'écoulement et de l'érosion dans de petits bassins-versants méditerranéens. Il fait suite au programme HYDROMED initié par l'INRGREF, la CES (Ministère de l'Agriculture) et l'IRD.

Activités de recherches menées sur le bassin versant de Kamech



HYDROMED mai 2001

Activités de recherches menées sur le bassin versant de KAMECH
(légende du bloc-diagramme)

Identification des milieux physiques et humains

1 : cartographie pédologique du bassin versant

2 : cartographie de l'occupation des sols du bassin versant

Dynamique des systèmes

Bilan hydrologique et sédimentation d'un lac collinaire

3 : bilan hydrologique de la retenue

4 : bathymétrie et modèles d'envasement de la retenue

Dynamiques superficielles et prévisions des risques

5 : évolution du parcellaire

6 : érosion aréolaire

7 : érosion ravinaire

8 : mouvements de masse

9 : autres types d'érosion

Stockage et utilisation des eaux

10 : bilans hydriques sur versants

11 : agroclimatologie (approches locales et régionales)

Fonctionnement géochimique du bassin

12 : géochimie des eaux (du versant à la retenue)

13 : transferts d'eau et recharges des nappes (traceurs)

Situation

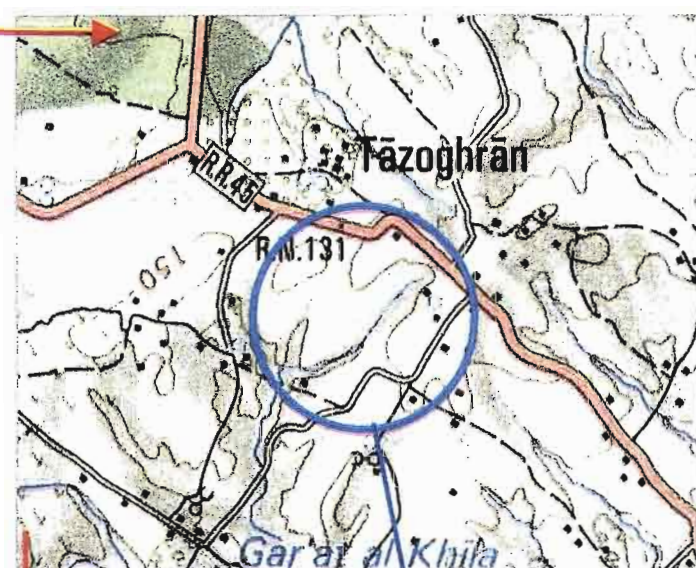
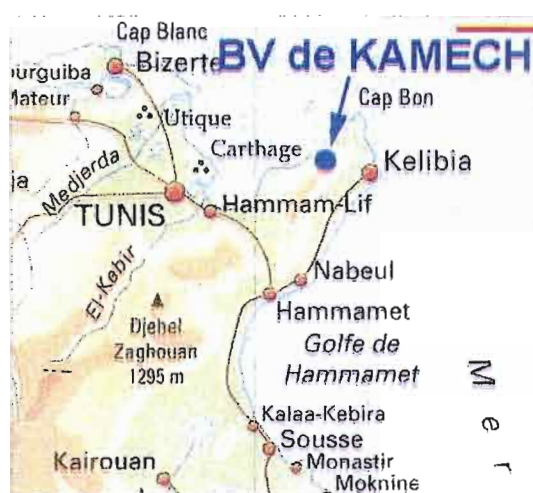
Presqu'île du Cap Bon.

Gouvernorat de Nabeul.

Délégation d'El Haouaria.

CRDA de Nabeul

Retenue: BV de 245,5 ha. Capacité initiale 142560m³, construction 1993



	1996	1997	1998	1999
Pluvio./anmm	1036	405.5	750.7	700.7
Coeff.écoul. %	43.9	3.9	9.6	20.5
Erosion m3/ha/an	15.45	-	12.1	17.49

Écoulements, érosions spécifiques du BV

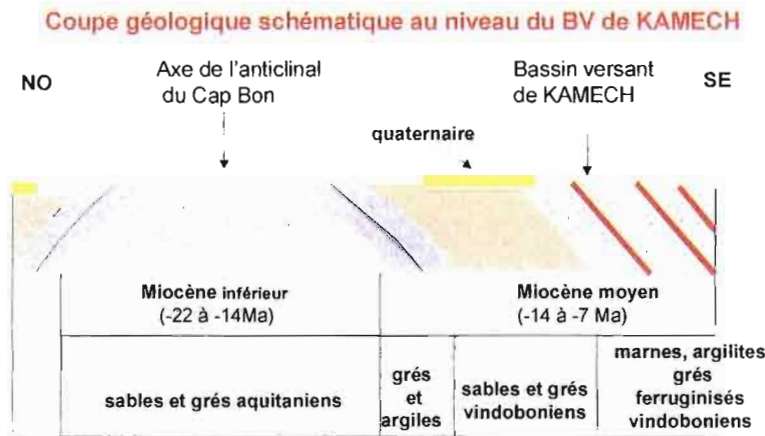
Climat: Pluviométrie de 500mm (100jours) à 1000mm (160jours), forte ETP (4 à 8mm / jour).

La saison sèche dure d'avril à septembre avec une T. max > 30°C en juillet-août. La saison humide dure d'octobre à mars avec une T. mini de 7°C en janvier et février. Cette distribution, une amplitude thermique annuelle de 24°C, un rapport E / ETP de 0,2 et 0,5, positionnent cette zone entre deux bioclimats méditerranéens: le sub-humide inférieur et le semi-aride supérieur avec une forte irrégularité inter-annuelle (35%) et une nette influence maritime atténuant l'amplitude thermique annuelle.



Géologie, géomorphologie: Le BV est situé sur le flanc SE de l'anticlinal Tertiaire de l'axe du Cap Bon. Le coeur de cet anticlinal, est occupé par les sables et grés du Miocène inférieur (-22Ma,). Le

flanc SE où se trouve Kamech, est constitué de marnes et argilites et de minces bancs gréseux ferruginisés du Miocène moyen (-7 à -14M.a.) avec des pendages monoclinaux SE de 20 à 50°. La dernière transgression marine date du Pliocène. Différentes phases d'aplanissements sont ensuite intervenues qui ont donné différents glacis (-1.8, -0.7, -0.35, -0.1 M.a). On ne découvre, dans la région de Kamech, que quelques alignements plus ou moins plans vers +160m de l'ultime surface ; celle-ci est actuellement creusée des vallées



antécédentes coulant au NO et au SE de part et d'autre d'une crête NE-SO (sud Tazoghrane), de vallon conséquent (Oued El Kamech) perpendiculaires aux pendages, et des ravines ou ensembles de versants. Ces deux ultimes entailles caractérisent le paysage de Kamech. On note une nette dissymétrie du bassin avec un versant gauche plus large sillonné par les affleurements de minces bancs de grés ferruginisés armant les marnes et un versant droit plus court plus pentu et abondamment raviné aux dépens des marnes et argilites.

Objectif général

L'application de l'équation générale du bilan hydrologique sur les retenues collinaires permet de connaître les écoulements par événements pluvieux efficaces. La bathymétrie donne des volumes de terre sédimentées, donc une érosion spécifique annuelle du BV. Ecoulements et sédimentations dépendent des événements climatiques, mais, pour une agressivité pluviométrique donnée, le sort de la retenue dépend des comportements hydrodynamiques et érosifs des terres cultivées de l'ensemble du bassin. Il en va de même du devenir des flux infiltrés et transitant plus ou moins profondément, latéralement et rapidement dans ce bassin.

Si Kamech fait partie du réseau des retenues plus intensément suivies, il n'est évidemment pas envisageable, ce serait d'ailleurs "a-scientifique", de multiplier de tels dispositifs sur la totalité des retenues déjà construites en Tunisie (572) ou prévues (plus de 1000) et dont on désire connaître les comportements et les durées de vie.

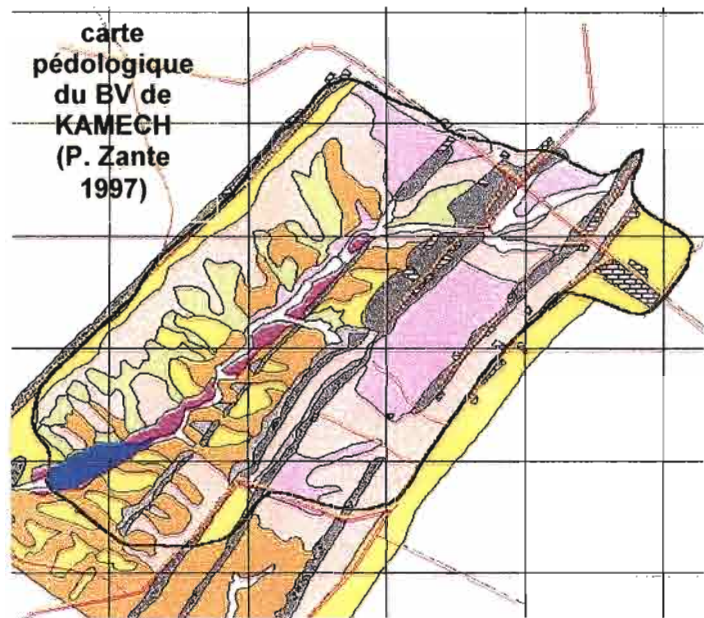
Kamech doit permettre de développer des modèles prédictifs de comportements en relation avec des variables explicatives inhérentes aux événements pluvieux, aux caractéristiques morphopédologiques du BV et aux variations des occupations des terres, voire aux aménagements CES. Ces variables explicatives prennent alors rang de marqueurs également identifiables dans d'autres bassins aux fonctionnements voisins. Cette démarche permet d'aborder une typologie des bassins versants et assure un droit à l'extrapolation d'informations stationnelles à un plus grand ensemble de retenues et barrages de la Tunisie semi-aride.

Identification des milieux physiques et humains

1 Pédologie

L'altéropédogénèse est influencée par la pétrographie et le gisement des bancs sédimentaires. On a 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. Compte tenu de ce qui précède la légende de la carte se résume en trois ensembles:

- des sols argilo-limoneux à argiles actives, assez profonds (50 à 120cm en bas de versant) sur marnes et argilites,
- 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,



LÉGENDE

- Unité 1: Sols minéraux bruts, non climatiques, bruts d'érosion, lithosols sur grès
- Unité 2: Sols minéraux bruts, non climatiques, bruts d'érosion, regosols sur marnes
- Unité 3: Sols minéraux bruts, non climatiques, bruts d'apport fluvialtiles
- Unité 4: Sols peu évolués, non climatiques, sols d'érosion régosoliques sur marnes
- Unité 5: Sols minéraux bruts, non climatiques, bruts d'érosion, lithosols sur grès
- Unité 6: Vertisols à drainage externe réduit à structure argileuse, sols vertiques sur marnes
- Unité 7: Sols calcimagnésiques carbonates bruns calcaires à encroûtement calcaire sur marnes
- Unité 8: Sols calcimagnésiques carbonates bruns calcaires à encroûtement calcaire tronqué ou érodé
- Unité 9: Sols calcimagnésiques carbonates bruns calcaires vertique hydromorphe

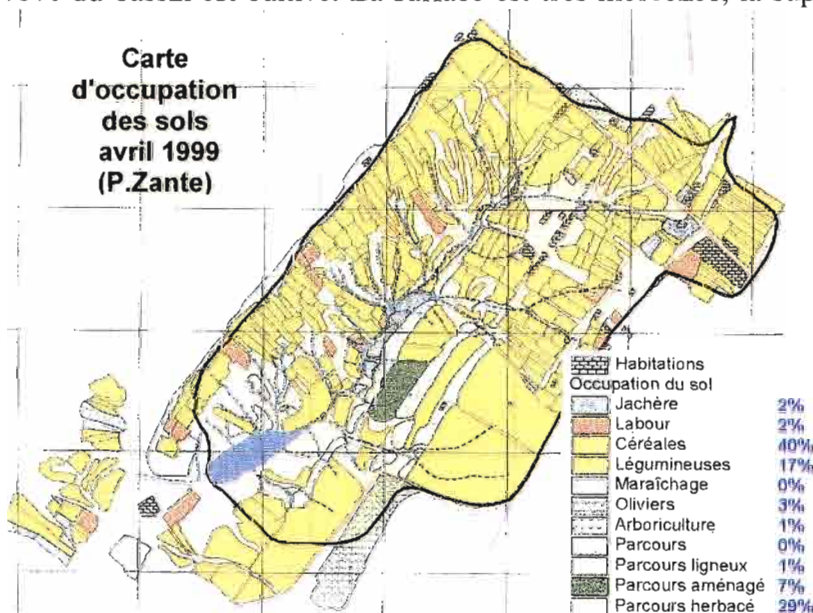
- différentes zones de sols à caractères vertiques (topomorphes en bas fond et entre les barres gréseuses de la rive gauche, uniquement lithomorphes en rive droite).

2 Occupation des sols

75% du bassin est cultivé. La surface est très morcellée, la superficie médiane d'une parcelle est est

de 0,5ha et les parcelles de 0,2 à 0,3ha forment un mode à 40%. Les sommets et pentes <15% sont réservés aux céréales (blé, orge, avoine) et aux légumineuses (pois-chiches, fèves), Les bas de vallon aux pentes > 15% correspondent aux parcours herbacés et ligneux. Les sols céréales-céréales ou céréales-légumineuses dominent sur les sols céréales-jachères.

Un exploitant irrigue au goutte à goutte sur 3 à 4 ha près de la retenue pour une production de tomates ou de piments, une irrigation gravitaire à la raie a



débuté sur quelque 3 ha en aval de la retenue.

Dynamique des systèmes

Bilan hydrologique et sédimentation d'un lac collinaire

3 Bilan hydrologique de la retenue

Le lac collinaire de Kamech est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation (Classe A type Orstom, de 1 m² et enterré sur une profondeur de 60cm) et de deux centrales d'acquisition automatique de données. La première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0.5mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crues est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits

Cette plate-forme d'acquisition automatique de données hydro pluviométriques a été équipée d'une balise ARGOS pour la télétransmission de données. La réception des données en temps quasi réel permet de connaître les événements pluvieux et d'intervenir à bon escient pour des mesures de débits ou pour des prélèvements. Elle permet aussi une télésurveillance et des interventions de maintenance à la moindre défaillance.

Deux autres pluviographes automatiques permettent une bonne connaissance des intensités et durées des pluies dans le bassin versant. 11 pluviomètres complètent l'équipement pluviométrique du bassin. 11 stations de bilan hydriques des cultures comprenant une parcelle de ruissellement, un tube d'accès pour sonde à neutrons et trois tensiomètres sont installés près de chaque pluviomètre

Un observateur, responsable des installations, relève les pluviomètres et les parcelles de ruissellement assure la mesure de l'évaporation sur bac. Il relève quotidiennement les tensiomètres et effectue des mesures de sondes à neutrons une fois par semaine. Il consigne également sur un carnet d'observations une lecture de l'échelle limnimétrique quotidienne, les ouvertures et fermetures de la vanne de fond et les temps de pompage.

Enfin, on dispose sur le bassin d'une station de mesure et d'acquisition des données climatologiques suivantes : Températures, vent, humidité, ensoleillement et rayonnement global.

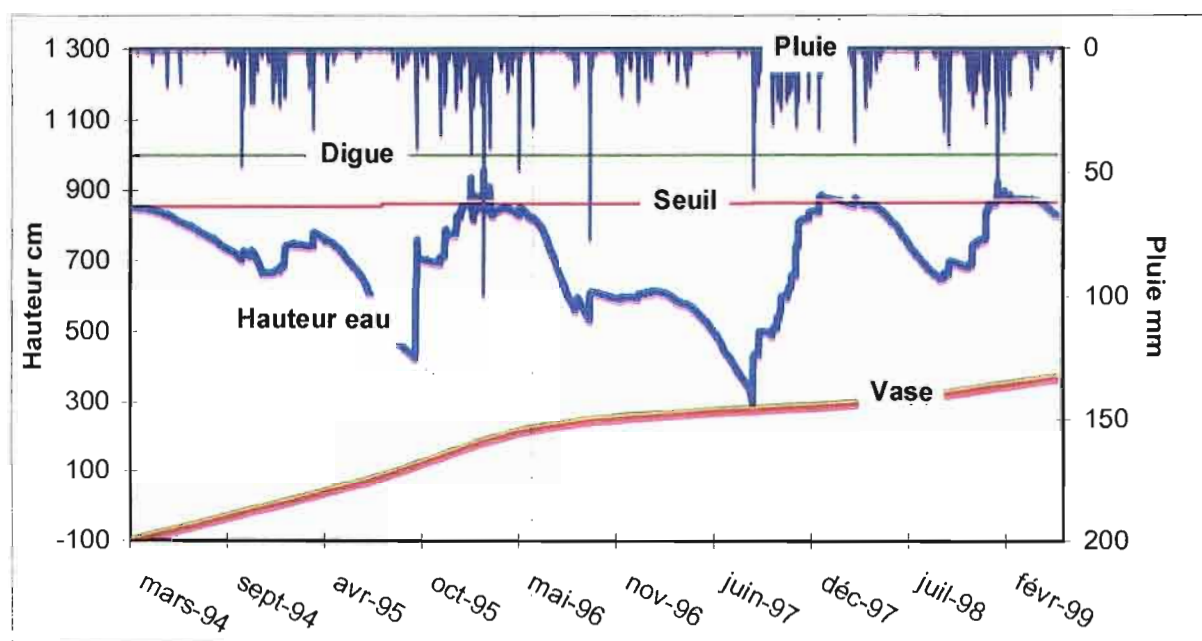


Figure : Données expérimentales sur le barrage de Kamech

Reconstitution des apports immédiats au cours d'un événement pluvieux

Les hydrogrammes des crues entrant dans la retenue sont reconstituées. Les événements « crue » sont repérés et séparés sur un critère d'une variation minimale du plan d'eau dans un temps donné. On considère un début de crue lorsque le plan d'eau monte de 1cm durant trois pas de temps successifs de cinq minutes et la fin de crue lorsque le plan d'eau ne varie plus durant 1 heure. A chaque événement ainsi séparé on applique l'équation de conservation des volumes d'eau. Le débit de pointe de crue est le débit maximal entrant calculé sur 5 minutes. Le volume de la crue est obtenu en calculant la surface de l'hydrogramme reconstitué. Les chroniques de crues ainsi reconstituées sont utilisées pour diverses formes de modélisation « Pluies – Débits » (Taoufik MANSOURI, Université Tunis 2).

4 Bathymétrie et modèle d'envasement de la retenue

La bathymétrie du lac est effectuée au moins une fois par année hydrologique. Elle est rapportée au nivellement fin du site et permet d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'établir les courbes « Hauteur / Volume et Hauteur / surface ».

En juillet 1999, la mesure de bathymétrie a donné le résultat suivant : avec un envasement de 25 765 m³ de vase accumulée depuis la mise en eau du barrage en 1993, le lac collinaire a perdu 18% de sa capacité. On peut considérer qu'il a une durée de vue d'une trentaine d'années.

Ces mesures de bathymétrie permettent de caler un modèle d'érosion qui reconstitue les apports crue par crue (Hubert ONIBON - ENIT).

La figure suivante montre la reconstitution par le modèle de Williams des transports solides crue par crue sur le bassin versant de Kamech. On voit bien que le phénomène d'envasement est lié à des événements paroxysmiques. Dans cette chronique de 6 années, trois crues ont apporté 50 % du transport solide (27 février 1996, 18 janvier 1999 et 29 Novembre 1999). La dernière a contribué à elle seule à 23% du transport observé en 6 ans.

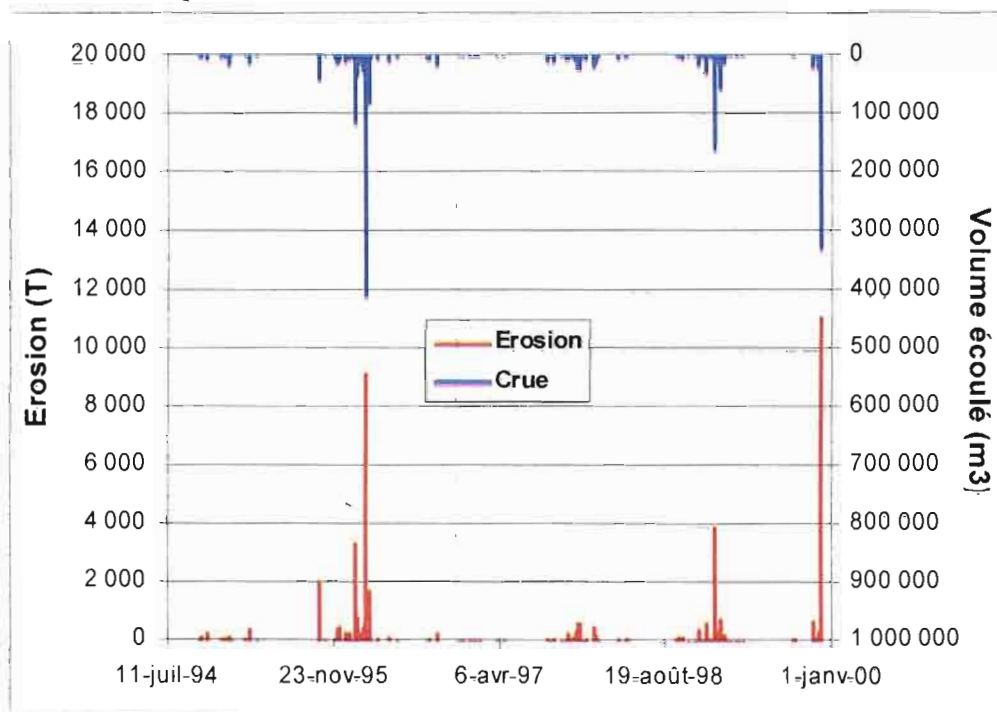


Figure : Simulation des érosions crue par crue

Dynamiques superficielles et prévisions des risques

5 Evolution du parcellaire

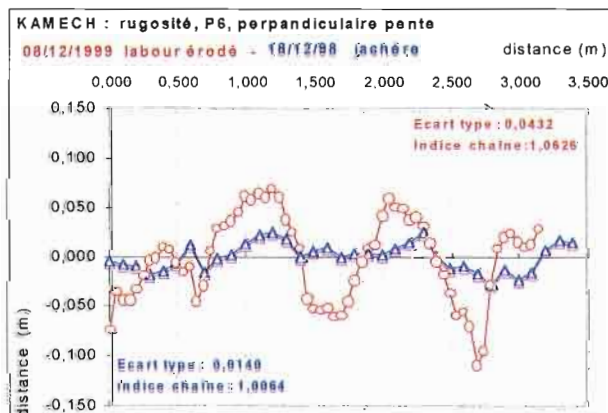
Cette action, en cours actuellement (cf carte 1999 précédente), repose sur la comparaison des occupations des sols sur toutes parties du bassin en utilisant les informations collectées depuis 1996 par Patrick ZANTE et Insaf MEKKI. Elle débouchera sur une évaluation de la dynamique des agrosystèmes en relation avec de nouvelles disponibilités en eau. Elle est déjà utilisable pour une prévision des comportements hydrodynamiques et érosifs essentiellement en amont des versants (cf. § 6 et 7).

6 Erosion aréolaire

L'érosion aréolaire est évaluée de deux façons :

a) par la mesure sur parcelle, une campagne de simulation de pluies fut menée en 2000 sur différentes situations sols-cultures (Nabil BATITA - INAT),

b) par le calcul en utilisant le couplage modèle RUSLE et un SIG, cette action est en cours actuellement (Chaïbi MANSOURI Univ de Tunis 2). Les relations fonctionnelles entre ce mode d'érosion aréolaire et l'érosion ravinatoire sont étroites parce que les ravines se forment en contrebas de champs différemment occupés, donc plus ou moins vulnérables.



Les intensités et charges des flux provenant de cet amont influencent nettement les capacités abrasives, voire les processus de dépôts des systèmes ravinaires de l'aval. Les relations R (I), obtenues sous simulation de pluies, donnent les intensités limites des pluies provoquant les premiers ruissellements donc, entr'autres choses, une prévision de fonctionnement des systèmes aréolaires amonts et ravinaires avals lorsque ces analyses sont couplées avec des caractéristiques de pluies naturelles ; cette démarche est à l'origine du modèle MOBIL.

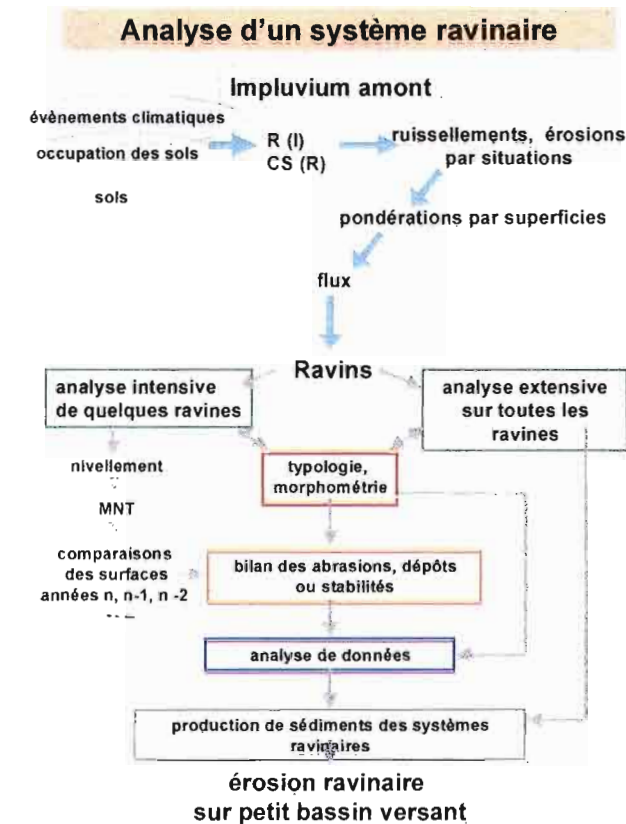
Tous éléments marqueurs des états de surfaces tels que les différenciations méso-structurales contrôlant la conductibilité hydraulique ou les micromodèles liés aux résistances structurales ou aux façons culturales sont suivis sur champs avec des méthodes fiables et fidèles (laseromètres, cf. photo). Les informations livrées par ces méthodes, coefficients de rugosité entr'autres, sont mises en relation avec les données expérimentales pour accéder à des prévisions comportementales.

7 Erosion ravinatoire

Il s'agit d'évaluer la contribution de l'érosion d'origine ravinatoire dans l'érosion générale tendant à

comblir la retenue collinaire de Kamech où les mesures bathymétriques donnent, jusqu'alors, des érosions spécifiques de 10 à 20 m³/ha/an. 31000m³ sont déjà sédimentés depuis 1993 dans un réservoir possédant un volume initial de 142100m³.

La méthode de mesure, développée dans l'organigramme ci-contre, consiste en une étude morphométrique et typologique intensive de quelques ravins caractéristiques. Les données quantitatives issues de ces nivellements, donnent, via des MNT, des zones d'iso-abrasion et d'iso-dépôts. On relie ces données aux données qualitatives issues d'une description typologique détaillée. Des relations sont établies entre ces deux catégories de données pour une extrapolation des productions de terres sur l'ensemble des 7 systèmes ravinaires actifs décrits typologiquement de façon plus succincte. Les résultats 2000 (DESS Nicolas TRUCHET) donnent des exportations spécifiques de 7,80 m³/ha/an en année "normale" et de 53,65 m³/ha/an en année très agressive. Cette étude



se poursuit cette année 2001 (DESS Mélanie KARLI).

8 Mouvements de masse

Les mouvements de masse sont à l'origine de pertes en terre par mobilisation insidieuse ou brutale de matériaux qui sont ensuite repris, ou non, par les écoulements. Ces mouvements sont souvent

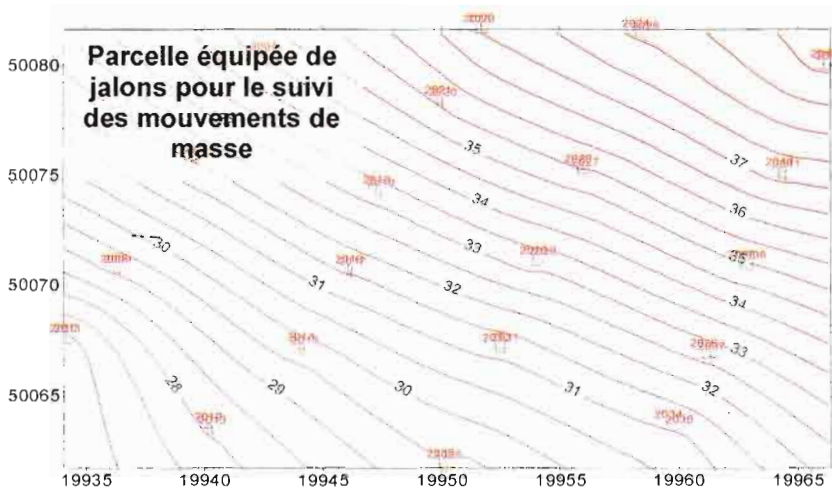
associés aux systèmes ravinaires. Ils sont "préparés" par un creep accentué sur la rupture de pente de haut de berges des ravines avec des fissures larges tendant à s'aligner parallèlement aux bords des berges.

Les mouvements de masse peuvent être des glissements en planche, en touches de piano, en coup de cuiller avec ou sans niches de décrochement, par solifluxion etc.. Il y a mouvement lorsque la composante latérale de



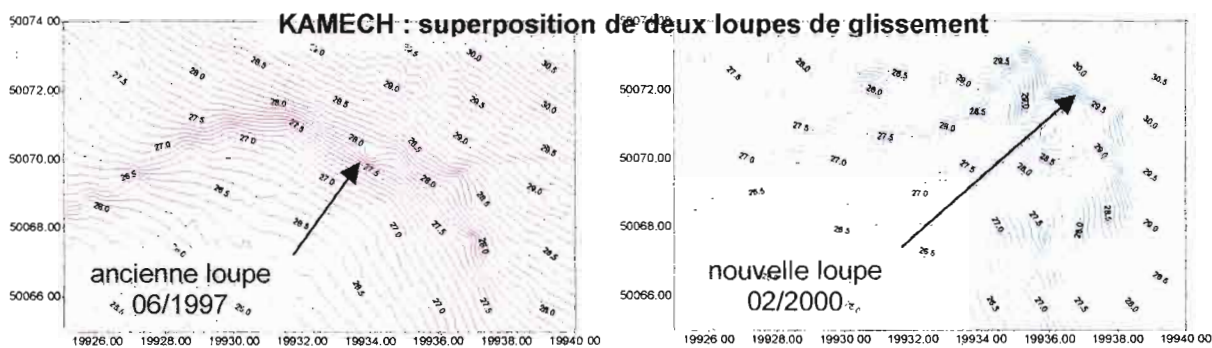
cisaillement devient plus forte que l'ensemble des tensions maintenant la cohésion du volume de terre. Sur Kamech les glissements reçoivent deux explications :

a) une surcharge s'est ajoutée dans le volume de terre concerné ---> ce peut être du bétail, ce peut être une surcharge hydrique sur la totalité du volume ayant glissé,



b) rupture en profondeur au niveau d'une mince zone faisant office de « semelle de glissement », cette zone perd sa cohésion ou se liquéfie ; cette rupture est liée aux hyperdrainages occasionnels de l'amont (fissures) pouvant amener des dispersions argileuses, ou une solubilisation de solutés (SO4--) en profondeur là où des charges en gypse augmentent.

Les informations humidimétriques et les études sur la détention hydrique d'origine fissurale (cf. posters) confirment cette possibilité de surcharge hydrique ou d'hyperdrainage au moins en bas de versant.



Le mouvement de masse d'un versant de vallon de la rive droite est suivi depuis 2000 à l'aide de jalons implantés à deux profondeurs ; jusqu'alors aucun mouvement n'a été détecté sur les hauts de versant (cf. figure) par contre des mouvements sont fréquents en bas de versant (cf les solifluxions visualisées sur MNT)

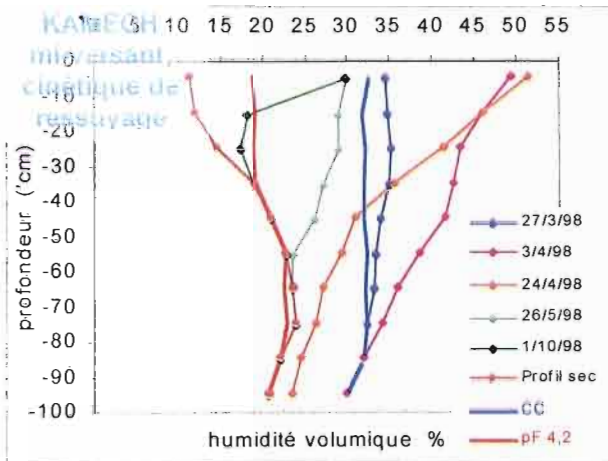
9 Autres types d'érosion

Une étude des érosions de berge et de lit de l'oued KAMECH est envisagée avec l'aide de missions annuelles de photographies aériennes prises à très basse altitude (Jean ASSELINE)

Stockage et utilisation des eaux

10 Bilans hydriques sur versants

Les mesures hydrométriques effectuées par Patrick ZANTE & Insaf MEKKI (INAT) sur le bassin ont plusieurs buts:



- suivre les cinétiques d'humectation et de ressuyage donc connaître les profondeurs des fronts d'humectation voire diagnostiquer des possibilités de drainages profonds, appréhender les teneurs en eau vers les bornes des potentiels hydriques utiles pour l'agronomie (cf. graphique ci contre),

- couplées avec les informations pédologiques, elles permettent d'approcher une évaluation des stocks hydriques sur l'ensemble du bassin et pour différentes utilisations des terres.

a) les cinétiques fournissent aux autres actions

de recherches des informations utiles en ce qui concerne les actions sur la dynamique actuelle : humidité antérieure du sol et genèse du ruissellement, détention hydrique superficielle d'origine fissurale (cf. poster), drainage et hyperdrainage en relation avec les mouvements de masse, éventuelles pertes de cohésion des matériaux. Ces sols à argiles gonflantes posent le problème d'une évaluation correcte des réserves hydriques en relation avec leurs compositions volumiques puisque leurs réservoirs changent de géométrie avec les teneurs en eau.

b) une première évaluation rapide des stocks hydriques sur l'ensemble du bassin versant a été faite en 1998 par Insaf MEKKI dans le cadre d'un travail plus général (Mémoire INAT), les données du tableau sont interprétées à partir de ce travail. Si l'on ramène les réserves de la colonne A à des valeurs proches de la capacité de rétention, on note que le volume d'eau utile stockée dans la couverture pédologique représente encore presque deux fois la capacité maximum du lac; il n'échappera cependant à personne que ces deux types de stockage s'épuisent en même temps! Compte tenu de l'intérêt de ces premiers résultats une étude plus fine sur la distribution spatiale des stocks et entreprise actuellement afin de "serrer" au plus près le "delta S" du bilan hydrique général du bassin.

Saturation à la porosité totale = stock maximum	Stockage au point de flétrissement	Différence A-B dont une partie de l'eau utile (i).
A	B	C
681500m ³ soit 282mm (ii)	399762m ³ soit 166 mm	281739m ³ soit 116mm

(i) il ne s'agit pas de l'eau utilisable car la borne A ne correspond pas à la capacité de rétention maximum mais à une saturation totale des sols.

(ii) on considère une superficie exondée de BV de 241 ha

11 parcelles de ruissellement et de bilan hydrique des cultures pluviales et les sites de bilans hydriques dans les parcelles irriguées (piments et tomates) permettront d'approfondir cette thématique et arriver à un modèle de la demande en eau des cultures et des parcours du bassin versant (Insaf MEKKI, INAT – IRD – USTL)

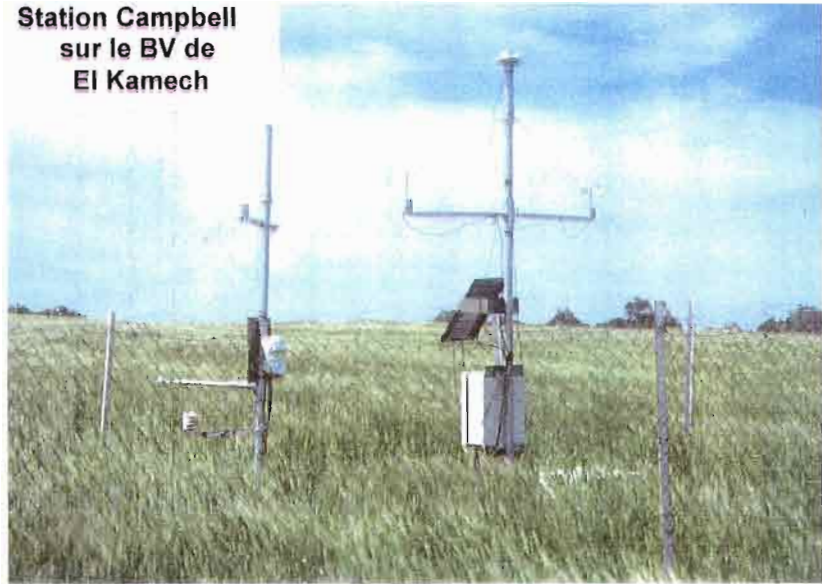
11 Agroclimatologie (approche régionale et approche locale)

Les lacs collinaires sont un des moyens de mobilisation des eaux de surface. L'utilisation de l'eau de ces lacs à des fins agricoles est actuellement un des objectifs les plus importants. Pour répondre à cet objectif de valorisation et de gestion optimale de l'eau dans le cas de ce lac, les besoins en eau des cultures, les périodes et les intensités des déficits hydriques, ont été déterminés (MOUGOU R. & VACHER J.J.). La stratégie suivie s'est basée sur deux approches :

a) une approche régionale par la caractérisation climatique de la région d'étude ; cette caractérisation climatique s'est basée sur l'analyse fréquentielle des températures, des précipitations, de la demande climatique (ETP) et des bilans hydriques agroclimatiques de deux cultures importantes pour cette région : la tomate de saison et le blé.

b) une approche expérimentale locale qui a consisté à déterminer l'évapotranspiration réelle de ces mêmes cultures conduites selon la stratégie adoptée par un agriculteur du site étudié.

Station Campbell
sur le BV de
El Kamech



Pour ce, une station micrométéorologique Campbell (cf. photo) a été installée d'abord sur blé en sec puis sur tomate de saison, irriguée, au cours de deux campagnes (1999 et 2000).

Les mesures de la consommation en eau du blé et de la tomate ont mis en évidence l'importance des déficits hydriques pour ces deux cultures et la nécessité d'une irrigation complémentaire pour le blé et d'une meilleure gestion de l'irrigation pour la tomate ; ceci permet d'une part une augmentation sensible des rendements et d'autre part une économie de l'eau.

Fonctionnement géochimique du bassin

12 : géochimie des eaux (du versant à la retenue)

Afin de préciser les relations entre le lac et l'aquifère sous-jacent, une étude géochimique et isotopique a été réalisée. Les prélèvements ont été effectués du 15 mars au 10 avril 1999 (GAY, 1999, université Paris XI).

Les eaux prélevées dans les puits sont les eaux les plus minéralisées. Leurs teneurs en SiO_2 sont significativement supérieures à celles des autres eaux. Leur faciès est chloruré-sulfaté - sodique et calcique.

moyennes des teneurs chimiques des eaux du bassin.

	Ca	Mg	K	Na	HCO_3^-	Cl	NO_3^-	SO_4^-	SiO_2	cond	pH
	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	(mg/l)	($\mu\text{S}\cdot\text{cm}$)	
sources	8,15	6,20	0,19	14,23	5,36	13,03	0,23	8,29	9,05	2359	8,14
puits	10,2	5,65	1,24	14,09	5,64	14,33	1,04	9,45	8,8	2953	7,50
talwegs	9,73	7,72	0,22	13,43	5,63	12,54	0,10	12,61	6,06	2666	8,17
lac	3,31	2,31	0,14	5,26	4,03	4,11	0,01	2,44	3,4	990,5	8,95

Ces eaux souterraines sont saturées vis-à-vis de la calcite, elles sont sous-saturées en gypse et en silice. Les eaux de source présentent une conductivité moyenne plus faible que celles des puits, principalement en raison de leurs teneurs en nitrate et en potassium plus faibles. Dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$, les points représentatifs des eaux souterraines se situent autour de la droite d'évaporation. Ils sont assez bien regroupés entre -4 et -5‰ vs SMOW en ^{18}O et autour de -30‰ vs SMOW en ^2H . En prenant en compte la marge d'erreur sur les mesures, les teneurs isotopiques des eaux souterraines sont comparables aux teneurs moyennes annuelles des précipitations, à l'exception des eaux de certains puits situés en aval du lac qui présentent des teneurs en isotopes lourds légèrement supérieures.

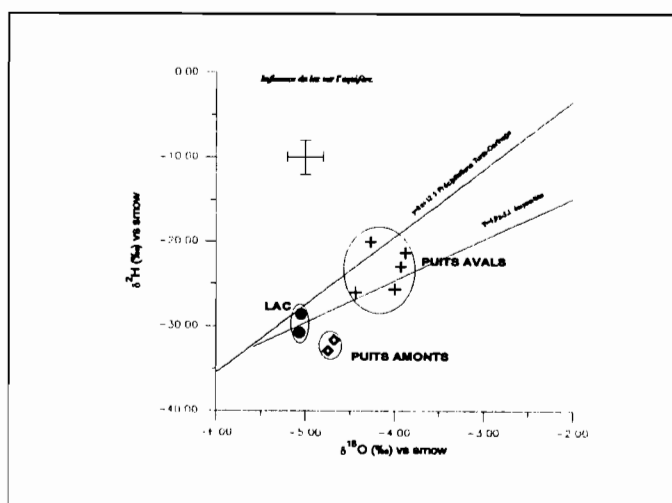
Les eaux de talweg sont à saturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomite, et de la magnésite, et sont sous-saturées en gypse et silice. Leur minéralisation est très variable : dans certains cas, elle peut être plus faible que le minimum des eaux de sources et de puits, et dans d'autres cas, plus fortes que le maximum pour les eaux des sources. Elles peuvent donc être considérées comme un groupe d'origine mixte, résultant d'un mélange entre eaux de ruissellement, et eaux souterraines. Dans un diagramme $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$, les points représentatifs des eaux d'écoulement de surface sont, pour la plupart, regroupées autour de la droite d'évaporation vers des teneurs en isotopes lourds plus élevées que celles des eaux souterraines (entre -4 et -3‰ vs SMOW en ^{18}O et entre $-21,5$ et $-25,8\text{‰}$ vs SMOW en ^2H). Cette position, proche de celle de la moyenne des précipitations du mois de mars, suggère que la contribution du ruissellement récent est largement majoritaire.

Les eaux du lac sont les eaux les moins minéralisées du bassin. Les ions dominants sont le chlorure et le sodium. Le lac est faiblement chargé en sulfate. Dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$, l'eau du lac semble être la moins évaporée de toutes les eaux. Elle est très proche de la pluie moyenne des mois d'hiver.

Les données hydrologiques montrent que l'eau du lac, au mois de mars, résulte d'un mélange complexe : eaux de pluie des mois de décembre-janvier, eaux évaporées de la saison sèche, eaux de ruissellement liées aux dernières pluies du mois, eaux du talweg amont. L'étude des teneurs isotopiques permet de préciser que la pluie de la dernière saison pluvieuse est le pôle qui domine ce mélange. Ceci s'explique par le fait qu'aux mois de janvier et février, le lac subit une série de débordements liés à des pluies importantes qui engendrent des crues. On peut alors considérer qu'à ce moment, l'eau du lac est presque entièrement renouvelée. La contribution correspondant aux eaux évaporées de la saison sèche, ainsi que le volume d'eau provenant du talweg amont deviennent alors négligeables. Le lac est donc essentiellement rempli par des eaux de ruissellement et les précipitations directes. Cette eau n'a quasiment pas subi de transit souterrain, c'est pourquoi les teneurs en éléments dissous (en particulier la silice) sont faibles.

13 : transferts d'eau et recharges des nappes (traceurs)

Les teneurs en isotopes lourds des eaux prélevées dans les puits en aval du barrage sont plus élevées que celles des eaux du lac en mars. Si le lac participe significativement à l'alimentation de l'aquifère alluvial en aval, il faudrait admettre que l'on retrouve dans l'aquifère en mars, à environ 500m du lac, des eaux du lac évaporées pendant la saison sèche, 6 à 8 mois plus tôt. La vitesse de percolation dans l'aquifère qui correspondrait à cette situation ($V_{\text{efficace}} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$),



ne semble pas aberrante pour ce type d'aquifère. Toutefois, cette possibilité d'alimentation de l'aquifère par le lac reste à l'état d'hypothèse de travail pour deux raisons majeures :

Il semble, d'après la structure et la topographie du bassin, que des apports latéraux puisse compliquer le bilan de l'aquifère en aval de la retenue. Ces apports latéraux pourraient être à l'origine des teneurs en isotopes lourds d'un échantillon d'eau prélevé dans le talweg en aval immédiat de la retenue, teneurs en isotopes lourds sensiblement plus élevées que celles de l'eau du lac en mars.

La courte durée de l'étude n'a pas permis d'obtenir des données assez espacées dans le temps pour avoir une idée précise de l'évolution des caractéristiques chimiques et isotopiques des différents pôles impliqués dans les mélanges.

L'ensemble des données acquises ne permet pas de mettre en évidence avec certitude une participation significative de la retenue à l'alimentation de l'aquifère en aval. Toutefois, cette première reconnaissance n'a pu fournir qu'une image "instantanée" d'un système que ses faibles dimensions rendent particulièrement sensible aux variations temporelles.

Ce type d'étude est donc amélioré en complétant la caractérisation spatiale par un suivi temporel.