

MATIERE ORGANIQUE DANS LES SEDIMENTS DES BARRAGES COLLINAIRES EN ZONE MEDITERRANEENNE SEMI-ARIDE DE TUNISIE

Jean Albergel¹, Taoufik Mansouri², Patrick Zante¹,
Abdellah Ben Mamou³, Saadi Abdeljaoued³

- (1) UMR LISAH, Campus ENSAM/INRA, Bat 24, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 01
Tel : (0)4 99 61 27 64, Fax : (0)4 67 63 26 14 albergel@ensam.inra.fr , zante@ensam.inra.fr
- (2) ENIT, Campus Universitaire 2092 EL MANAR 2 Tunisie Tel : 71 874 700 Fax 71 872 729
taoufi.mansouri@voilà.fr
- (3) FST, Campus Universitaire 2092 EL MANAR 2 Tunisie Tel : 71 872 600 Fax 71 872 666
Abdallah.benmammou@fst.rnu.tn

Résumé

A l'exutoire de petits bassins versants, les barrages collinaires sont des pièges à sédiments efficaces. Au cours de l'été 1997, des carottes de sédiments ont été prélevées dans deux lacs asséchés de la dorsale tunisienne faisant l'objet d'un suivi hydro-pluviométrique très précis. Ces carottes ont été à la base d'une étude sédimentaire de ces lacs de barrages construits récemment. L'étude des profils a permis une description des faciès lithologiques puis l'échantillonnage des faciès représentatifs pour une analyse de la granulométrie, de la minéralogie et de la matière organique des sédiments. Ces mêmes analyses ont été réalisées sur des échantillons de sols dans le bassin versant.

Dans les carottes prélevées, les teneurs en carbone organique total (COT) varient de 0,37% à 1,63%. Elles semblent refléter l'hétérogénéité de la composition lithologique et ne diminuent pas avec la profondeur (les lacs sont très récents, moins de 10 ans d'âge). L'analyse des relations entre IH (index d'hydrogène exprimé en mg d'hydrocarbures/g de COT), Tmax (température à laquelle le taux d'hydrocarbonés provenant de la pyrolyse est maximum) d'une part et S1 (Taux de composés hydrocarbonés présents à l'état libre), S2 (Taux d'hydrocarbonés générés par le craquage de la matière organique non volatile) et COT d'autre part conduisent à conclure que la matière organique présente dans les sédiments de ces lacs est de continentale ligneuse et provient en quasi totalité de l'érosion des sols du bassin versant (type III de la classification établie par...).

A partir de mesures de bathymétrie, il a été possible de calculer un taux d'érosion moyen annuel sur les deux bassins versants et la perte correspondante en carbone organique total. Le suivi du bilan hydrique et l'analyse granulométrique des sédiments ont permis d'attribuer à chaque crue ou séries de crues rapprochées une partie du dépôt et donc un taux précis de carbone érodé.

Mots-clés : barrage collinaire, séquestration de carbone, érosion, transport du carbone, sédimentation du carbone, pyrolyse de Rock-Eval.

Abstract

Title : Organic matter in sediments of hilly dams of semi arid Mediterranean areas

Hilly dams, at the outlets of small catchments are very effective traps for sediments. During summer 1997, carrots of sediments were dug in two dried lakes in Central Tunisia to study sediments. Lithologic features were described, and analyses were led to determine mineralogical constitution and organic matter content. Same analyses were done on soils in catchments.

;

Contents in total organic carbon (TOC) measured in the sampled carrots vary from 0.37 % to 1.63 %. They seem to reflect the heterogeneousness of sediments and do not decrease with depth (lakes being very recent, less than 10 years). Analysis of relations among HI (hydrogen index ($HI = [100 \times S2]/TOC$)), Tmax (temperature at which the maximum release of hydrocarbons from cracking of kerogen occurs during pyrolysis) on one hand and S1 (amount of free hydrocarbons (gas and oil) in the sample), S2 (amount of hydrocarbons generated through thermal cracking of nonvolatile organic matter) and TOC on the other hand leads to conclude that present organic matter in lakes sediments is type III: continental ligneous and results almost in totality from soil erosion in the catchment.

From various bathymetry measurements, an annual erosion rate was computed on both reservoirs, equivalent total organic loss in carbon was derived. Water balance and particles size distribution of sediments allowed to attribute to every floods or series of floods a part of the deposit and so a precise rate of organic carbon.

Key words: Hilly dams ; Sediment carbon ; Carbon transport ; Erosion ; Sediment loss ; Rock – Eval Pyrolysis

INTRODUCTION

Le carbone C, est le principal élément de la matière organique, et sa présence est un facteur déterminant de la qualité du sol. Pour conserver la fertilité des sols, l'homme a de tout temps cherché à maintenir, voire à accroître le taux de carbone organique dans ses champs (Doran *et al*, 1996). Depuis quelques années, d'enjeu agronomique, le carbone du sol est devenu enjeu environnemental : l'accumulation de carbone dans le sol peut contribuer à freiner l'émission de dioxyde de carbone vers l'atmosphère, et limiter ainsi l'augmentation des gaz à effet de serre (Doran *et al* *ibid*). Rappelons qu'avec 1 500 Gt (plus du double de la végétation 650 Gt), les sols représentent le plus grand réservoir de carbone de l'écosystème terrestre. Certains auteurs (Robert, 2000) considèrent que durant le dernier siècle et jusqu'aux années 1970, l'une des premières sources de l'accroissement des gaz à effet de serre a été la minéralisation en CO₂ du carbone des sols lors de leur mise en culture ou suite à l'érosion. Robert (2000) a pu établir *a posteriori* un parallèle entre l'accroissement des surfaces cultivées, les pertes en carbone et l'accroissement de la surface de sols sensibles à la dégradation en particulier à l'érosion ou à la désertification.

L'érosion des sols est sélective vis-à-vis des nutriments et des colloïdes qui font l'essentiel de la fertilité des sols. Ceci est net pour le carbone, l'azote, le phosphore, l'argile et les limons jusqu'à 50 microns (Roose, 1984). Les pertes en carbone des sols mis en culture sont suivies sur des parcelles d'érosion aux dimensions normalisées (Wischmeier et Smith, 1978). La littérature donne de nombreuses valeurs des pertes en carbone, comme en d'autres éléments, retrouvés dans les eaux ruisselées recueillies à l'aval de ces parcelles d'érosion. Ces pertes varient en fonction de la nature du sol, du couvert végétal, des pratiques culturales et de l'intensité de l'érosion (Larson *et al*, 1983, Smith *et al* 2001).

Pour étudier la perte de carbone des sols par l'érosion hydrique dans le contexte du changement climatique, la taille de la parcelle d'érosion, peut paraître trop petite et l'érosion mesurée à l'échelle d'un bassin versant comme une donnée plus intéressante parce qu'agrégeant toutes les formes d'érosion : érosion aréolaire, érosion ravinnaire, mouvements de masse etc...). Sa variation dans le temps permettant en outre d'estimer l'impact des modifications de pratiques agricoles ou des aménagements (agro-foresterie, reboisement, lutte anti-érosive) sur la séquestration du carbone à l'échelle d'une unité hydrologique (Lal *et al* 1995, 1997).

Le dispositif expérimental, classiquement mis en œuvre pour évaluer les pertes de carbone à cette échelle, est le bassin versant expérimental où sont mesurés à l'exutoire : le débit liquide, les transports solides et les matières dissoutes (Owens *et al.*, 2002). Ce dispositif est efficace mais difficile à mettre en place et très coûteux. Il nécessite la présence d'opérateurs à chaque crue ou de disposer d'appareils à prélèvements et de capteurs automatiques fiables.

Les petits barrages en zone semi aride sont de très bon pièges à sédiments. L'un des objectifs assigné aux mille lacs collinaires en cours de réalisation en Tunisie, est d'ailleurs de piéger les produits d'érosion provenant des Jbels et de protéger les grands barrages d'une sédimentation trop rapide. Ces petits barrages permettent aussi l'installation à moindre frais d'un dispositif de mesure des bilans hydrologiques et de transport solide (Albergel et Rejeb, 1997). Un travail de thèse (Rahaingomanana, 1998), sur un ensemble de petits barrages de la dorsale tunisienne, a montré que les eaux des réservoirs étaient très pauvres en éléments phosphorés et/ou nitrés. Ces lacs ne présentent pas de risque d'eutrophisation. La végétation qui s'y développe est rare, on doit donc trouver peu de carbone de néo formation dans ces eaux. Ces barrages sont de construction récente et connaissent un fort envasement. Certains d'entre eux n'ont encore pas ou peu déversé.

Tout ceci permet de penser qu'une analyse des sédiments de ces barrages et du carbone organique qu'ils contiennent est susceptible de donner une information correcte sur la perte en carbone par érosion du bassin versant?

Profitant de l'assèchement de plusieurs petits barrages durant l'été 1997, une campagne de prélèvements a été réalisée. Cet article décrit cette campagne et présente les premiers résultats encourageants.

DONNEES ET METHODES

Choix des lacs, suivi de l'envasement

Deux lacs collinaires asséchés durant l'été 1997 ont été choisis pour cette campagne de prélèvement. Nous avons sélectionné des lacs situés sous le même climat, n'ayant que très peu déversé. La figure 1 montre la situation de ces deux lacs, présente leur bathymétrie au moment des prélèvements et la localisation des carottes prélevées. L'envasement est très important dans le premier lac de Fidh ali et plus raisonnable dans celui d'El Gouazine dont le bassin versant a fait l'objet d'un aménagement anti érosif sur 60 % de sa superficie (Tableau 1).

Les bathymétries des lacs se font en période de basses eaux. On réactualise les cartes de bathymétries environ chaque année (fig.1).

La comparaison entre les volumes du réservoir à la cote de déversement, d'une mesure à l'autre permet d'estimer la quantité de matériaux retenus annuellement dans le barrage. On attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage. Le transport solide entre deux mesures de bathymétrie est donc obtenu en ajoutant au volume de vase retenu dans le barrage et multiplié par sa densité, la masse de terre exportée par les débits liquides déversés.

$$T = V_s \times d + \sum_{i=1}^n S_i C_i \quad (1)$$

T Transport solide total entre deux mesures bathymétriques (t) ; V_s Volume de vase mesurée (m^3), d Densité de la vase, n nombre de crues ayant déversées entre deux mesures, S_i Volume déversé pendant la crue i (m^3), C_i concentration moyenne en matière en suspension mesurée durant la crue i (t/m^3).

La reconstitution des transports solides, crue par crue, est réalisée à partir de l'hypothèse de Williams (1982) : A l'échelle d'un bassin élémentaire, le transport solide dépend du volume de la crue et de la forme de son hydrogramme et peut s'exprimer par la relation suivante :

$$T_i = \lambda(Q_i \times V_i)^\beta \quad (2)$$

T_i représente l'apport en tonnes de sédiments de la crue i ; V_i , le volume de la crue naturelle entrant dans le réservoir, en m^3 ; Q_i , le débit de la pointe de crue, en m^3s^{-1} ; λ est un paramètre représentant les sols des versants et leur occupation, β est un paramètre caractérisant le réseau hydrographique. Pour chaque bassin, ces deux paramètres sont calculés par optimisation en comparant la somme des transports solides reconstitués entre deux mesures de bathymétrie et celle mesurée (équation 1) (Albergel et al., 1999).

Dans ce travail, cette reconstitution est réalisée pour voir si les concentrations en carbone des sédiments sont liés à la saisonnalité ou à l'importance des événements.

Figure 1 : Carte de situation

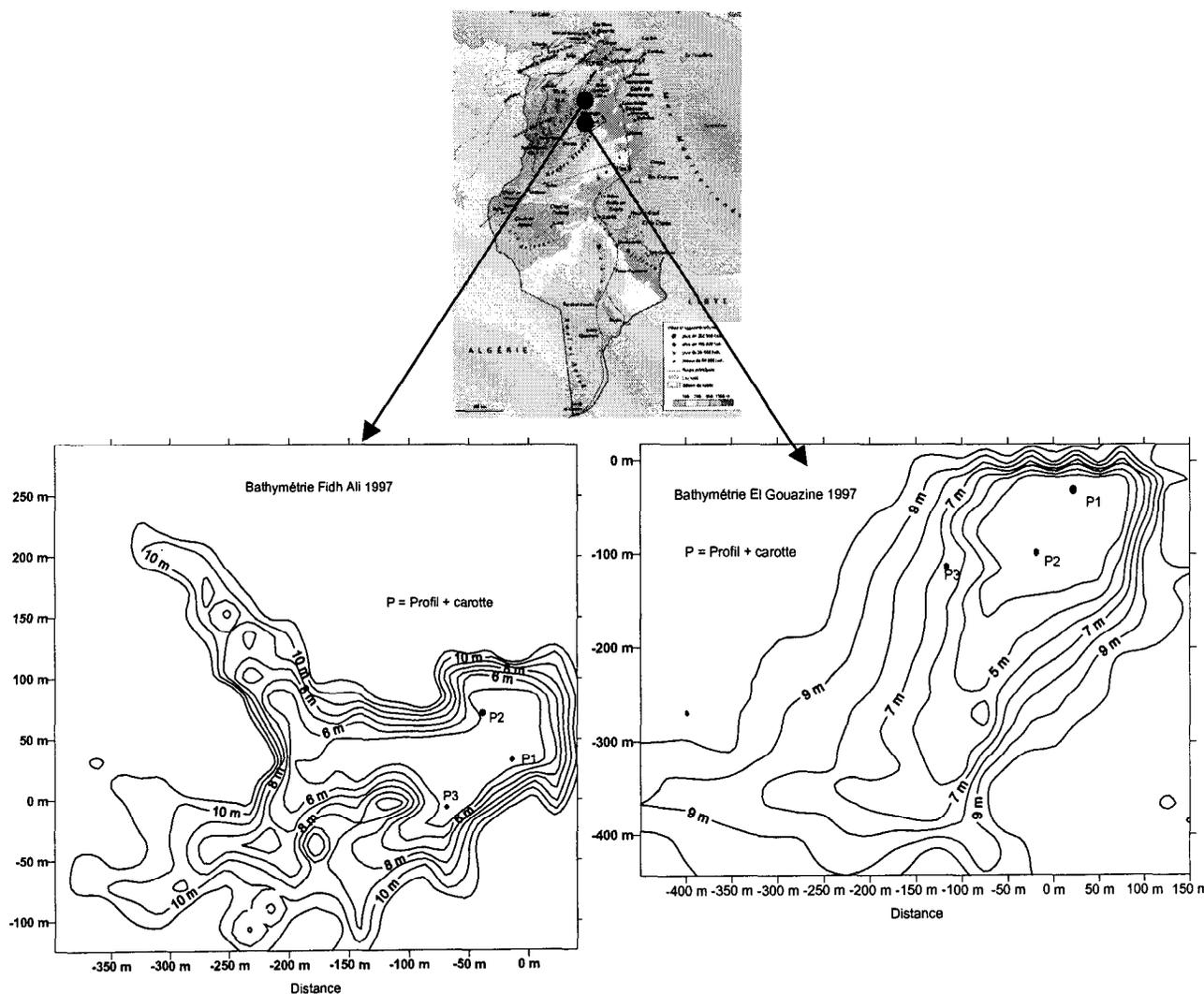


Tableau 1 : Barrages expérimentés (valeurs 1999)

Station	Localisation substratum géologique et pluviosité	Surface BV (ha)	Année const./ vol. de la retenue (m^3)	Volume de sédiments produits (m^3)	Sédiments Exportés (t.)	Erosion Spécifique (t/ha/an)
Fidh Ali	Tunisie Centre, anticlinal éocène. Marnes gypseuses & lumachelles (Isohyète 400 mm)	238	1991 / 134 710	49 840	0	24,2

El Gouazine	Tunisie Centre, vallée dans alluvions anciennes encroûtées - pléistocène. (Isohyète 400 mm)	1 810	1990 / 237 030	16 030	1 300	1,8
----------------	--	-------	-------------------	--------	-------	-----

Protocole d'échantillonnage

Dans chaque barrage, trois points ont été choisis pour des prélèvements de sédiments (fig.1). En chaque point, une fosse pédologique a été creusée jusqu'à atteindre un niveau de boue liquide, puis un tube de PVC a alors été enfoncé à la masse jusqu'à refus, et/ou vérification d'être arrivé au fond de la retenue avant sa mise en eau. Lors de la pénétration du tube les sédiments très humides se sont tassés dans le tube ; la hauteur du sédiment à l'extérieur et à l'intérieur du tube a alors été mesurée pour pouvoir rétablir la profondeur réelle d'échantillonnage. La carotte ainsi obtenue a été dégagée et emportée au laboratoire. Les carottes ont été coupées longitudinalement à la scie électrique, une moitié gardée intacte pour une description fine et l'autre utilisée pour les analyses.

La description des lithofacies observés dans les puits et les carottes est basée sur la nature lithologique, la texture ainsi que sur les variations de couleur relevées à l'aide du code Munsell. Elle permet d'établir la correspondance des niveaux de sédimentation entre les trois carottes. Les événements hydrologiques responsables des dépôts sédimentaires ont été identifiés pour la période de mesures hydrologiques. Par exemple une couche fine à argile très fine grise bleuâtre foncée (2FOR GLEY 3/10B) est considérée comme une période sans crue avec lac plein. Une couche sablo-argileuse gris-beige (5Y 5/2) est considérée comme marquant l'arrivée d'une crue importante.

Des échantillons ont été prélevés tous les cinq centimètres sur chaque profil pour une analyse de la granulométrie. Par couche de même apparence lithologique un échantillon a été prélevé pour analyse des variables suivantes : teneur en eau, densité apparente, granulométrie, nature des argiles, teneur en matière organique.

Méthode d'analyse

Toutes les analyses ont été réalisées au laboratoire de sédimentologie du département de géologie de la faculté des sciences de Tunis II. Les techniques d'analyse des propriétés physiques et minéralogiques des sédiments sont celles classiquement utilisées pour l'étude des sols (Chamayou et Legros, 1989) : densité apparente au cylindre, analyse granulométrique sur banc laser, et reconnaissance minéralogique par analyse thermique.

La détermination de la matière organique a été réalisée par la méthode de pyrolyse Rock-Eval couramment utilisée en prospection pétrolière (Tissot et Welte 1984) pour différencier différentes origines possibles du Carbone. Des petits échantillons (100 mg) sont analysés à l'aide d'un four à pyrolyse couplé à un détecteur à ionisation de flamme (FID). Ont ainsi été déterminés :

- COT : le taux de carbone organique total exprimé en milligrammes de CO₂ produit durant la pyrolyse, par milligramme d'échantillon ou en %
- S1 : le taux de composés hydrocarbonés présents à l'état libre dans les sédiments et libérés à 300°C (matières organiques volatiles : gaz et huile)
- S2 : le taux d'hydrocarbonés générés par le craquage de la matière organique non volatile.
- Tmax : la température à laquelle le taux d'hydrocarbonés provenant de la pyrolyse est maximum, c'est un indicateur du stade de « maturation » de la matière organique

IH : l'index d'hydrogène, exprimé en mg d'hydrocarbures/g de COT, qui représente la quantité de composés hydrocarbonés potentiels S2 rapportée à celle du carbone organique total. Cet index est utilisé pour connaître l'origine de la matière organique. Les organismes aquatiques et les algues, riches en protéines et lipides ont un taux Hydrogène / Carbone supérieur celui des plantes terrestres plus riches en sucres.

Huit échantillons d'El Gouazine et 13 échantillons d'Fidh Ali ont ainsi été analysés de même que 3 échantillons de sol provenant du bassin d'El Gouazine (échantillons de surface correspondant à trois occupations de sols différentes : pinèdes, parcours, culture).

RESULTATS

Description des profils sédimentaires

La figure 2 montre les profils sédimentaires des barrages pour les horizons décrits sur le terrain, carottage non compris. Les volumes de sédiments apportés par chaque crue ont été calculés par l'application du modèle de Williams et les épaisseurs de sédiments correspondantes reportées dans le tableau 3. N'ont été conservées dans ce tableau que les crues les plus significatives pour les deux bassins (débit de pointe $> 1\text{m}^3/\text{s}$), mais le calcul a été fait pour toutes les crues, soit 34 crues à El Gouazine et 28 crues à Fidh Ali.

Les sédiments déposés dans les deux lacs présentent des fractions fines très importantes. Le faciès prédominant est silto-argileux. Les autres faciès sont accessoires (Mansouri, 2001). A Fidh Ali, la part de la fraction $<63\mu\text{m}$ est supérieure à 90% quelque soit la profondeur. A El Gouazine, la présence de sable est plus marquée, la fraction $<63\mu\text{m}$ varie de 55 à 95% en fonction des échantillons. L'analyse granulométrique la fraction fine montre un dépôt par perte de charge suivi d'une décantation.

Les analyses densitométriques d'un cycle de dépôts montrent une décroissance progressive de la densité. Chaque cycle est formé par des strates argilo-silteuses vers le sommet et des strates à granulométrie plus grossière à la base comme le montre les analyses granulométriques. La densité apparente sèche des sédiments varie de 1 à 1,5 montrant une rythmicité des dépôts. On peut prendre une moyenne de 1,3 pour un cycle complet (Mansouri, 2001).

Une variation des teneurs en eau est observée le long des colonnes sédimentaires avec un maximum au dessous des fentes et une diminution vers la base près du substratum (de 60% à 30%). En surface, on note une diminution importante du volume des sédiments consécutive à leur assèchement. Ces rétractions du sédiment en place en fonction du taux d'humidité pose un problème pour le passage des volumes mesurés aux masses de sédiments, la densité apparente des dépôts étant variable (de 1.1 à 2).

Les minéraux présents dans les sédiments des deux lacs sont à peu près les mêmes. On note une importante quantité de quartz et d'argiles, une quantité notable de calcite pour les deux lacs, du gypse des faibles quantités de dolomite sont présents à Fidh Ali. Le cortège argileux est formé de smectite, de kaolinite et de faibles quantités d'illite. Une comparaison avec les compositions argileuses des sols du bassin versant montre un enrichissement en smectite et en illite et un appauvrissement en kaolinite (Mansouri, 2001). Ces profils sédimentaires réalisés dans des petits barrages ont des propriétés similaires à ceux décrits pour de plus grands barrages en Tunisie Centrale par Ben Mamou (1998).

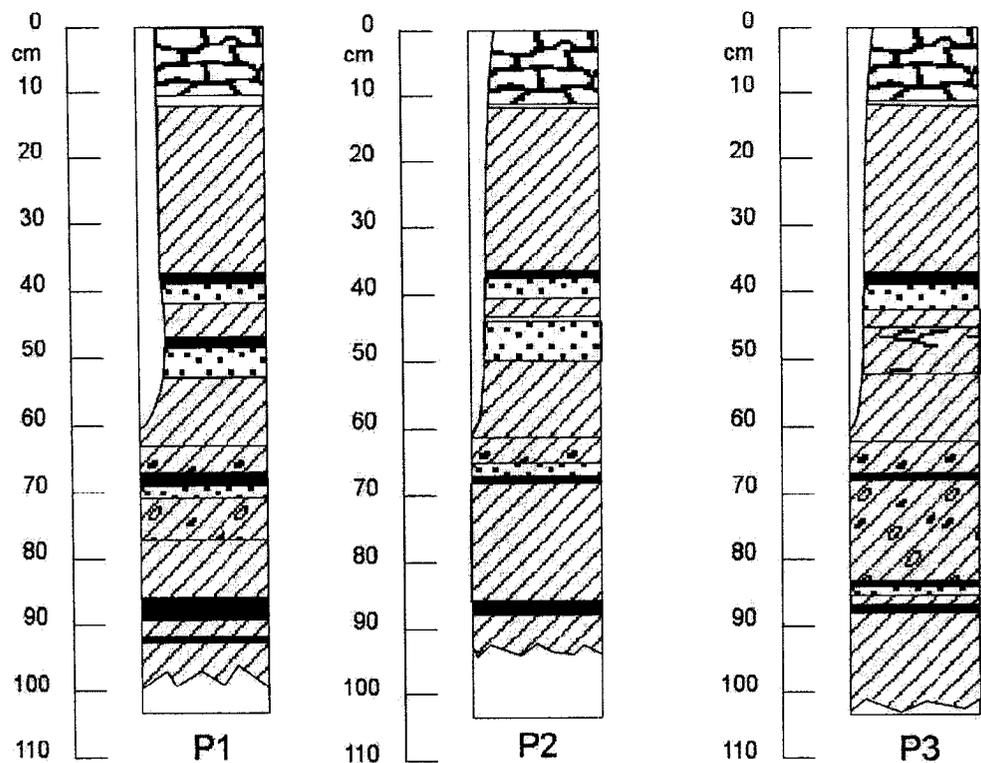
Teneurs en carbone organique total des sédiments

Les résultats de l'analyse de la matière organique par la méthode de pyrolyse Rock-Eval sont consignés dans le tableau 2a pour Fidh Ali et 2b pour El Gouazine.

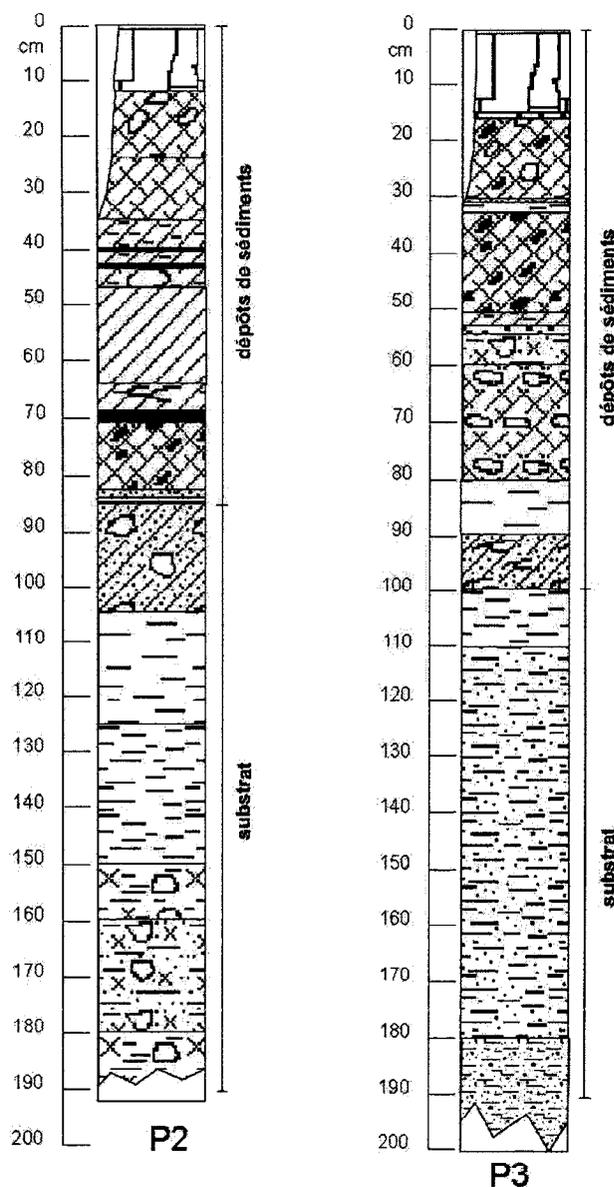
Dans la carotte (P1) prélevée à 1 m de la digue de El Gouazine, les teneurs en carbone organique totale (COT) oscillent entre 0,37 et 1,5 %, (Moyenne 1,03 %, écart type 0.47). Pour le puits P3 effectuée dans le lac de Fidh Ali, les teneurs varient entre 0,4 et 1,63%, (Moyenne 0.91 %, écart type 0.49). La variation de COT dans les profils sédimentaires est très irrégulière et semble refléter l'hétérogénéité de la composition lithologique, les faibles valeurs sont observées pour les horizons beiges à la granulométrie la moins fine et les plus fortes valeurs dans les horizons bleuâtres à granulométrie très fine. Les teneurs en COT des sédiments sont plutôt supérieures à celles des sols (0,66% dans les horizons de surface des sols cultivés représentant 88% de la superficie du bassin de

Fidh Ali et 55 % de celui d'El Gouazine, 0,88% dans les sols de pinède de El Gouazine et 1% dans les sols de maquis, parcours).
 On ne note pas de diminution régulière de la matière organique avec la profondeur. Les laes sont jeunes (<10 ans), la matière organique serait encore préservée dans les sédiments sans modifications.

Fidh Ali



El Gouazine



LEGENDE

- | | | | |
|--|---|--|--|
| | dépôt limono-argileux massif structuré en blocs | | matériel végétal in situ réduit |
| | matériau argileux à structure polyédrique | | vase homogène grise ou bleutée |
| | matériau argileux à structure polyédrique avec taches d'oxydation | | vase litée |
| | matériau argileux à structure polyédrique avec taches de réduction | | vase litée avec débris végétaux réduits, en boules |
| | vase avec débris végétaux grossiers | | matériau argilo-sablo-limoneux avec éléments grossiers |
| | matériau argileux plus ou moins compact | | matériau limono-sableux |
| | succession de strates sableuses et argileuses | | |
| | matériau argileux compact avec éléments grossiers et nodules calcaires | | |
| | matériau argileux à sable grossier avec nodules calcaires et éléments grossiers | | |

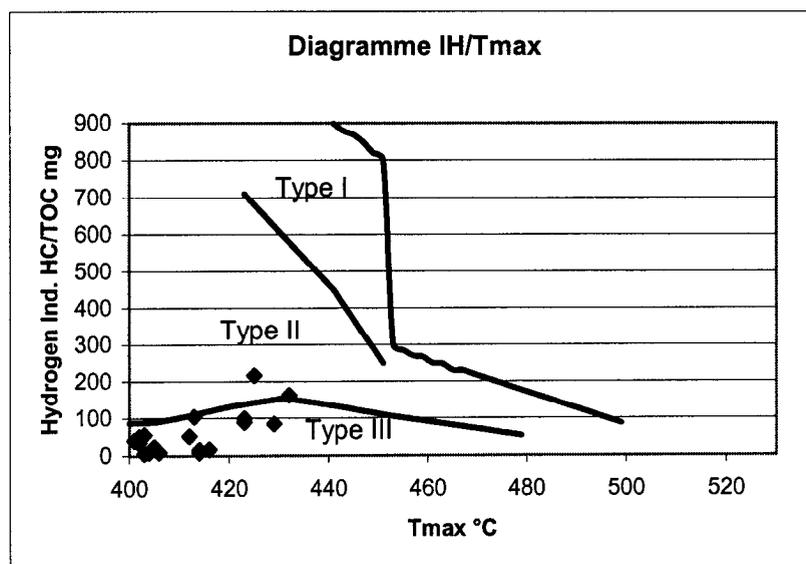
Figure 2 : Description des carottes

Tableau 2 : Paramètres des analyses par pyrolyse Rock Eval

Tab 2a : Fidh Ali						Tab 2b : El Gouazine					
Ech.	S1	S2	Tmax	%COT	IH	Ech.	S1	S2	Tmax	%COT	IH
H10	0,03	0,13	405	0,57	22,8	C1-1	0,14	0,73	412	1,41	52
H12	0		****	0,56	****	C1-2	0,14	106	425	0,49	216
H13	0,08	0,24	401	0,59	40,67	C1-3	0,13	0,91	432	0,56	163
P3-10	0,04	0,24	416	1,45	16,55	C1-4	0,18	1,32	423	1,48	89
P3-11	0,07	0,16	403	0,29	55,17	C1-5	****	****	****	0,37	****
P3-20	0,05	0,23	402	0,46	50	C1-6	0,17	1,24	423	1,25	99
P3-21	0,07	0,18	394	0,4	45	C1-7	0,17	1,05	429	1,25	84
P3-30	0,05	0,29	402	0,84	34,52	C1-9	0,2	1,56	413	1,5	104
P3-40	0,03	0,14	404	1,62	8,64						
P3-50	0,04	0,21	414	1,43	14,68						
P3-60	0,04	0,14	406	1,63	8,58						
P3-71	0,02	0,07	403	1,24	5,64						
P3-80	0,03	0,06	414	0,73	8,21						

Sur la figure 3 sont reportées les valeurs de (IH) en fonction de (Tmax). L'ensemble des analyses tombe dans le domaine des matières organiques de type III : continentale ligneuse qui a une origine allochtone : matériel particulaire et / ou amorphe issu des horizons pédologiques. Ces produits sont apportés par l'érosion dans le lac. Seul un point sort de ce domaine mais reste proche de sa limite.

Figure 3 : IH fonction de Tmax et domaine des types de matières organiques



Erosion et perte du carbone organique dans le bassin versant

Les résultats des analyses par pyrolyse ont apporté la preuve que la plus grande partie du carbone organique retrouvé dans les barrages provient de l'érosion des sols et que cette matière organique n'est pas encore transformée dans les sédiments d'accumulation récente. On peut donc répondre positivement à la question posée en introduction, **la matière organique retrouvée dans les sédiments du lac collinaire est celle perdue par le bassin versant sous l'effet de l'érosion hydrique.**

En utilisant des valeurs moyennes, il est possible de donner des ordres de grandeurs de la perte inter annuelle en carbone pour ces deux bassins. On trouve une perte spécifique moyenne de carbone organique de 218 kg/ha/an à Fidh Ali et 19 kg/ha/an à El Gouazine qui a reçu un aménagement anti érosif en 1996 (tableau 1)

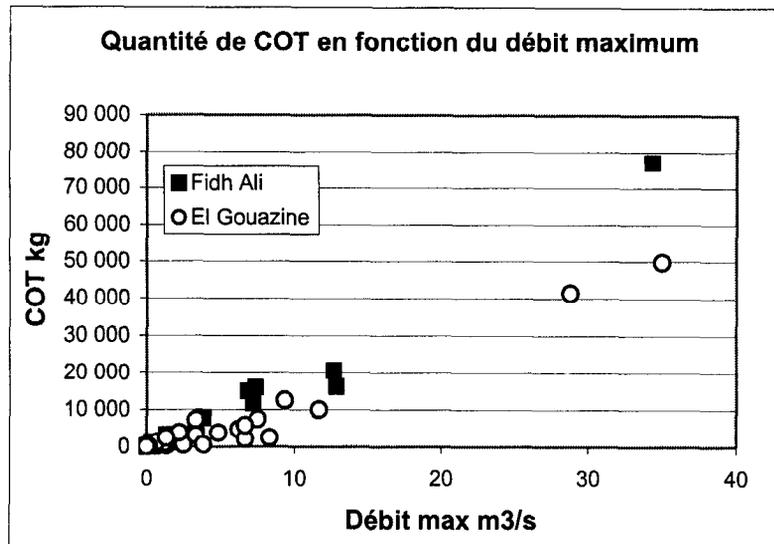
La reconstitution des quantités de carbone organique recueilli dans le barrage crue par crue sur la période des observations hydrologiques, (1993 à 1997) montre des exportations importantes pour les plus fortes crues (Tab.3)

Tableau 3 : Carbone transporté pour les crues supérieures à 1 m³/s (en gras les crues ayant déversées)

Bassin	date	Pluie mm	Crue		Dépôt m ³	cote vase m	COT %	Carbone kg
			volume m ³	Q max m ³ /s				
El Gouazine	02-sept-94	8,5	13 300	6,23	290	1,95	1,25	4 714
El Gouazine	30-sept-94	14,0	12 140	4,86	233	2,03	1,25	3 780
El Gouazine	03-oct-94	38,0	126 800	28,8	2 549	2,56	1,25	41 414
El Gouazine	11-oct-94	8,0	26 000	6,67	435	2,62	0,37	2 091
El Gouazine	22-oct-94	8,0	4 000	1,33	58	2,63	0,37	278
El Gouazine	04-nov-94	21,5	27 000	8,33	506	2,7	0,37	2 433
El Gouazine	01-août-95	3,0	5 200	2,50	97	2,71	0,37	466
El Gouazine	11-août-95	2,5	18 700	7,50	385	2,76	1,45	7 399
El Gouazine	13-sept-95	13,5	37 500	9,33	654	2,82	1,46	12 575
El Gouazine	17-sept-95	14,5	12 800	1,19	106	2,83	0,48	772
El Gouazine	20-sept-95	27,0	147 280	35,0	3 109	3,08	1,23	49 703
El Gouazine	24-sept-95	21,5	15 218	6,67	314	3,12	1,41	5 750
El Gouazine	18-oct-95	29,9	19 200	3,33	244	3,14	1,41	4 472
El Gouazine	10-déc-95	63,5	44 000	3,33	395	3,17	1,41	7 234
El Gouazine	13-janv-96	25,0	21 000	2,22	203	3,19	1,41	3 723
El Gouazine	15-févr-96	11,0	10 000	3,33	167	3,21	1,41	3 063
El Gouazine	14-mars-96	25,0	22 000	11,67	546	3,22	1,41	10 008
El Gouazine	12-mai-96	18,0	16 000	1,33	129	3,24	1,41	2 365
El Gouazine	09-sept-96	50,5	32 800	3,83	28	3,24	1,41	516
Fidh Ali	04-sept-93	29,5	8 180	3,80	839	0,66	0,73	7 963,0
Fidh Ali	14-sept-93	18,5	2 590	2,17	311	0,84	0,73	2 950,6
Fidh Ali	27-sept-94	39,5	14 550	6,88	2 959	1,92	1,62	62 312,0
Fidh Ali	03-oct-94	51,0	63 800	34,3	9 900	3,4	0,61	77 222
Fidh Ali	11-juin-95	25,5	12 000	12,8	2 123	3,61	0,59	16 281
Fidh Ali	04-sept-95	4,0	6 932	1,33	415	3,66	0,59	3 184
Fidh Ali	16-sept-95	17,0	12 500	7,17	1 550	3,8	0,59	11 891
Fidh Ali	19-sept-95	31,0	28 219	12,67	3 459	4,09	0,46	20 687
Fidh Ali	22-sept-95	22,5	30 396	7,33	2 631	4,3	0,47	16 072
Fidh Ali	23-sept-95	16,0	1 100	1,50	153	4,31	0,57	1 133
Fidh Ali	15-oct-95	36,5	20 901	6,83	2 032	4,46	0,57	15 057
Fidh Ali	17-oct-95	14,0	4 254	3,33	532	4,5	0,57	3 944
Fidh Ali	09-sept-96	23,5	3 700	2,83	447	4,54	0,57	3 310

La figure 4 montre une relation significative entre débit de pointe et quantité de carbone transporté au barrage. On remarque qu'aux plus fortes crues correspondent en général de fortes teneurs en COT, excepté pour la crue exceptionnelle du 3 octobre 1994 à Fidh Ali (débit spécifique de pointe : 14,6 m³/s/km²) qui a causé une érosion spectaculaire avec des effondrements de berges et apparition de grandes ravines. Nous interprétons ce fait de la manière suivante : Une partie importante du transport solide consécutif à cette crue correspond à des matériaux arrachés aux berges du réseau hydrographique et au fond des ravines. Il s'agit de marnes gypseuses pauvres en matière organique. Le décapage de la surface par cette crue est tel que l'on ne retrouve pas de COT importants dans les crues qui suivent.

Figure 4 : COT exporté en fonction du débit de pointe (tous les points mesurés)



CONCLUSION

Le résultat connu à l'échelle des parcelles d'érosion est confirmé à l'échelle du petit bassin versant : Les concentrations en carbone organique total retrouvées dans les produits de l'érosion à l'aval du bassin sont plus fortes que dans les sols d'où il proviennent.

Les crues les plus fortes charrient d'importantes quantités de carbone organique. Les crues exceptionnelles ont un effet de décapage qui appauvrit les sols en carbone organique sur une période importante.

L'expérience présentée sur deux bassins de la dorsale tunisienne est concluante, elle a donné un ordre de grandeur des pertes en carbone organique total pour deux bassins différents. Sur le premier, cultivé à 80% et constitué principalement de sols sur argilites et marnes gypseuses ces pertes sont estimées à 200 kg/ha/an, soit 10 fois plus importantes que sur le bassin boisé (40% de sa superficie) et aménagé contre l'érosion. Le rapport entre les pertes en sol est de 15, les sédiments provenant du bassin boisé étant plus riche en COT.

Ces résultats demandent à être confirmés par de nouveaux prélèvements dans ces mêmes barrages en 2003-2004, (en 1997 les prélèvements correspondaient à 6 ou 7 ans d'accumulation) et/ou sur d'autres barrages. En Tunisie Centrale, dans la dorsale semi-aride, du Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 30 retenues artificielles ont été sélectionnées pour constituer un réseau d'observation et de surveillance des lacs collinaires et de leurs bassins versants. Elles ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. En excluant les barrages où les déversements sont importants, il est possible de répéter le type d'observations présenté ici et obtenir une estimation de l'érosion de la matière organique dans différentes conditions environnementales. Plusieurs de ces bassins commencent à être aménagés : banquettes anti érosives, reboisement, traitement des ravons. Les effets des aménagements sur le ruissellement et l'érosion des terres commencent à être bien connus, il serait intéressant d'évaluer leurs impacts sur la dynamique du carbone et peut être également sur d'autres composés des sols.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme européen HYDROMED et a reçu le soutien de la direction générale ACTA du Ministère de l'Agriculture Tunisien. Les auteurs remercient son directeur général : Si Habib Fährat.

BIBLIOGRAPHIE

- Albergel J, & Rejeb N, (1997)** Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes Rendus à l'Académie d'Agriculture de France*. Vol 83 n°2 (1997) 77(2)-88(2) et 101(2)-104(2).
- Albergel J., Pépin Y., Nasri S., Boufaroua M. (1999)** Modeling small dams siltation with MUSLE. Dept. of water resources engineering, Lund Institute of Technology, 29/6 au 3/7/98. *Report 3222*, LUND, Suede. pp. 195-204.
- Ben Mamou A. (1998)** Barrages Nabeur, Sidi Salem, Sidi Saad et Sidi Boubaker. Quantification, étude sédimentologique et géotechnique des sédiments piégés. Apports des images satellitaires. *Thèse de Doctorat en Géologie*. Tunis II.
- Chamayou H. & Legros J.P., (1989)** Les bases physiques chimiques et minéralogiques de la science du sol, *Techniques vivantes*, 593 p
- Doran, J.W., Elliott, E.T., Paustian K., (1998)** Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil Tillage Res.* 49, 3-18
- Doran, J.W., Sarrantonio, M., Liebigh, M.A., (1996)** Soil health and sustainability. In : Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, Vol. 56. Academic Press San Diego, CA, pp. 1-54
- Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F. (Eds), (1997)** Soil properties and their management for carbon sequestration. USDA, *National Resources Conservation Service, National Soil Survey Center*, Lincoln, NE.
- Lal, R., Kimble, J.M., Levine E., Stewart, B.A. (Eds), (1995)** Soil and Global Change. *Advances in soil sciences*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL
- Larson W.E., Pierce F.J. et Dowdy R.H. (1983)** Loss in long-term productivity from soil erosion in the United States. In: *Soil Erosion and Conservation*. El-Swaify, Moldenhauer et Lô (eds.) Soil Cons. Soc. Am., Ankeny, USA: 262-271.
- Mansouri T. (2001)** Modélisation spatialisée des écoulements et du transport solide des bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon. *Thèse de doctorat en Géologie*. Tunis El Manar 286p.
- Owens L.B., Malone R.W., Hothem D.L., Starr G.C., Lal R. (2002)** Sediment carbon concentration and transport from small watersheds under various conservation tillage practices. *Soil & Tillage Res.* 67 pp 65-73
- Rahaingomanana N. (1998)** Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. Th. : Géosci Université de Montpellier 1, Montpellier (FRA), 1998, 313 p. multigr., bibl., cart. : 3, ill., tabl., graph
- Robert M. (2000)** En arrière plan du protocole de Kyoto, des enjeux qui dépassent la lutte contre le changement climatique. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*. N° 41 INRA, <http://www.inra.fr/dpenv/roberc41.htm>
- Roose (1984)** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) FAO, Rome (ITA), 438 p., bibl., ill., tabl., phot. - (Bulletin Pédologique de la FAO (ITA), No 70)
- Smith W.N., Wall G., Desjardins R., et Grant B. (2001)** Le carbone organique des sols. C. Qualité du sol. pp. 85-93. http://www.agr.gc.ca/policy/environment/eb/public_html/pdfs/aei/fchap09.pdf
- Tissot B P and Welte D H. (1984)** Petroleum formation and occurrence Edition Berlin: Springer-Verlag. 699 pp.
- Williams, J.R. 1982.** Testing the Modified Universal Soil Loss Equation. p. 157-164. In: Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands, USDA.ARM-W-26
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith.(1978)** "Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning ." USDA Handb. 537, U.S. GPO, Washington, DC, 1978