

Le ravinement sur marnes gypseuses en Tunisie semi-aride

Jean Collinet*, Patrick Zante**

UMR LISAH (IRD / ENSAM / INRA) 2 place Viala 34060 Montpellier Cedex 1

*collinet.j@wanadoo.fr **patrick.zante@ensam.inra.fr

Résumé

Cette étude porte sur la conservation des eaux et des sols dans les régions semi-arides cultivées de la Tunisie. Elle résulte d'une collaboration débutée en 1998 entre l'Institut National de Recherches en Génie Rural et Eaux et Forêts - INRGREF - (Tunis), la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols - CES (Tunis) et l'Institut Français de Recherche pour le Développement - IRD ex ORSTOM - (Représentation de Tunis).

Elle s'inscrit actuellement dans une des thématiques de l'UMR « Laboratoire d'Etude des Interactions entre Sols, Agrosystèmes et Hydrosystèmes - LISAH », construite sur la coordination des activités de certains programmes de l'ENSAM, de l'INRA et de l'IRD (Montpellier).

Après avoir posé le problème du stockage des ressources en eau dans différents types de réservoirs mondiaux, cette étude quantifie et explique les dégâts provoqués par l'érosion dans un petit bassin versant de 212 ha sur marnes gypseuses de la Tunisie semi-aride. L'objectif est de connaître la part des pertes revenant au ravinement dans la dégradation spécifique de bassins versants équipés de retenues collinaires en danger de comblement.

La méthode est une comparaison diachronique de nivellements réalisés au tachéomètre laser sur un des ravins du bassin. Les données sont utilisées dans des MNT qui servent à calculer les différences de volumes de terre et dresser des cartes d'isovaleurs donnant les bilans entre abrasions et remblaiements sur deux ans.

En année de pluviométrie moyenne (P# 300mm) on note, à l'exutoire du ravin de 1,3 ha incisant un impluvium de 7,5 ha une ablation de 0,061 t/m² ce qui correspond à une production annuelle de 42 t/ha de sédiments, ceux-ci n'ont pas transité plus loin sur le versant et n'ont donc pas contribué à la sédimentation de la retenue.

Pendant cette période la réactivité de l'impluvium fut marquée par : 1) une forte dynamique structurale des matériaux des berges qui sont des sols à argiles gonflantes ou des argilites susceptibles de foisonner fortement, 2) une dissolution interne des zones les plus gypseuses et halitiques favorisant le "piping" et la résurgence dans le ravin d'eaux drainées sur les champs limitrophes.

Cette étude se poursuit pour vérifier les effets d'événements pluvieux très agressifs.

Mots clés : Tunisie, Zone semi-aride, Ravinement en tunnel, MNT

Problématique

Stockage des ressources en eau

Les barrages de superficies diverses stockent actuellement dans le monde entier $540\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eau (1) qui sont des ressources hydriques à utilisation différable notamment pour l'irrigation. On estimait qu'en 1998 les surfaces irrigables cultivées du monde couvraient $270 \cdot 10^6 \text{ ha}$ (2). On sait que ces surfaces fournissent à elles seules 40% de la production agricole tandis que les 60% complémentaires proviennent d'une agriculture pluviale nécessitant 4,5 fois plus de terres ($1\,240 \cdot 10^6 \text{ ha}$). On sait enfin que les besoins en eau augmenteront de quelque 20% d'ici 2050 compte tenu d'une projection estimant la population mondiale à 8 milliards d'individus à cette époque.

Si les possibilités de stockage en retenues peuvent encore se développer dans les pays les moins vulnérables, les sites de construction de barrage vont généralement en diminuant dans les pays du sud semi-aride, circum-méditerranéens entre autres, précisément là où les demandes sont en train de devenir deux fois plus importantes que les ressources hydriques superficielles et souterraines actuellement disponibles, (évaluation faite pour l'Egypte, la Libye, la Tunisie, l'Algérie et le Maroc). Si, dans ces pays, les efforts de construction de réservoirs de diverses capacités (barrages, retenues) ont été considérables, ce sont aussi ceux où les risques de sédimentation sont les plus importants ce qu'illustrent les informations ci-dessous (tabl. I).

Tableau I : exemples des pertes de capacité des barrages dans le monde (d'après J. Margat (1))

Pays	Capacités initiales	Capacités finales		Pertes annuelles	
	10^6 m^3	10^6 m^3	%	10^6 m^3	%
Etats Unis (3 états du SO)	206000	-	-	373	0.18
Egypte (Assouan)	169000	2100	1.2	80	0.05
Chine (sur 236 rés.)	81000	11500	14.2	-	0.80
Espagne (sur 101 rés.)	18000	3600	20	-	0.10 à 0.40
Maroc (sur 29 rés.)	9180	830	9	38	0.40
Algérie (sur 19 rés.)	1900	830	44	15	0.90
Tunisie (sur 21 rés.)	1600	400	25	28	1.00 à 2.50

Au Maroc, les $38 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eaux perdues annuellement par sédimentation des barrages équivalent à la disparition annuelle de quelque 7 000 ha de terres irriguées. Des péréquations permises par des climats et cultures voisines amènent ces pertes de 2 750 ha/an en Algérie et à 5 150 ha/an en Tunisie.

Durée de vie des barrages

La sédimentation, liée à l'érosion des versants et aux diverses formes d'abrasion dans les cours d'eau, péjore la durée de vie des barrages dans des proportions variables selon l'occupation, l'érodibilité des sols du bassin et les caractéristiques climatiques du lieu. Sur une moyenne mondiale, comprenant donc les plus grands réservoirs, on estime qu'une perte de capacité de 1% l'an est admissible ce qui correspond à une durée de vie d'un siècle. S'agissant d'une information moyenne, les données sont évidemment influencées par les valeurs extrêmes et donnent une idée fautive de la vulnérabilité des plus petits ouvrages. En Tunisie, on admet

que les retenues de 100 000 à 500 000 m³ de capacités, collectant les eaux de bassins de 2 à 10 km² puissent avoir une durée de vie n'excédant pas 25 à 30 ans.

Le problème se pose donc pour ceux dont les mesures bathymétriques prouvent des sédimentations risquant de diminuer cette durée. Il s'agit presque toujours de bassins occupés par des sols différenciés sur marnes et argilites et où les apports proviennent de périodes pluvieuses susceptibles de provoquer un ravinement des versants, alors que, dans la dégradation spécifique du bassin, la part prise par l'érosion aréolaire reste à un niveau modeste, voire insignifiant.

Erosion ravinante : quelques repères quantitatifs et géographiques

Si les pertes en terre liées aux manifestations de la seule érosion aréolaire excèdent rarement les 10 t/ha/an pour ses formes les plus sévères, l'érosion ravinante est à l'origine de dégâts 10 à 50 fois plus importants. Bien des continents renferment des zones particulièrement vulnérables au ravinement, une recherche bibliographique succincte peut aider à quantifier géographiquement ce risque.

En Chine, la région loessique du bassin du Fleuve Jaune, soumise à un climat semi-aride froid reçoit 300 à 600mm de pluie en moins de 5 mois. 580 000 km² du bassin sont soumis à un ravinement extrême. Des érosions de 10 000 à 45 000 t/km² ont été mesurées sur les pentes > 40% qui représentent 30 à 60% des surfaces loessiques, à ce niveau de perte il est vraisemblable que le ravinement évolue parfois en laves torrentielles (3)

La ceinture méditerranéenne avec ses ravins et bad-lands sur marnes et argilites, (barranco, calanco, roubines) est très vulnérable

- Espagne : sous 650mm de pluie et sur des argiles du Tertiaire, différents auteurs (4) ont mesuré sur des bad-lands des pertes en terre de 120 à 400 t/ha/an. Ils ont mis en avant le rôle déstabilisant des argiles sodiques dans des processus où alternent « piping » et simples incisions mécaniques.

- Italie : dans les calancos des Apennins et sur des matériaux limono-argileux à illite et montmorillonite, des observations similaires ont été faites (5) sur des sols plus ou moins salins où les pertes en terre atteignent 100 à 200 t/ha/an.

- France : dans les marnes callovo-oxfordiennes (terres noires) des Hautes Alpes, on a identifié pour différentes échelles spatiales, (0.02 à 100 ha), et temporelles, une articulation de processus déclenchant le ravinement avec une « production spécifique » de sédiments variant de 100 et 300 t/ha/an (6)

- Algérie : dans les marnes Eocène du massif de l'Ouarsenis, en climat semi-aride avec des précipitations de 250 mm (année sèche) à 550 mm (année humide), des analyses diachroniques et à différentes échelles spatiales croisées depuis le BV de 44 km² (Telfifit) jusqu'au micro-bassin de quelques hectares et des parcelles de simulation de pluies ont donné des dégradations spécifiques de quelque 20 t/ha/an dans lesquelles 95% sont attribuables à une érosion ravinante (7). Une synthèse des informations collectées entre 1986 et 1995 dans le nord ouest de l'Algérie par l'INRF et l'IRD (20) donne des érosions ravinantes de 90 à 300 t/ha/an.

- Tunisie : dans le centre-ouest tunisien la progression du ravinement a été suivie par une analyse diachronique de photographies aériennes (8) ; sur des bassins de 50 à 500 ha la densité des réseaux de ravins fait actuellement de 40 à 150 m / ha ; en 27 ans elle s'est accrue de 40 % à plus de 100%, dispersion liée aux variations lithologiques et aux différences de précipitations (9); les auteurs notent que plus de 50 000 km², soit 31% du territoire, sont menacés ou déjà dégradés par l'érosion hydrique ravinante.

En Afrique de l'ouest : au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, en zone de savane humide, une équipe de l'IRD (10) a étudié dans un bassin de 136 ha les systèmes de ravins se développant dans une

toposéquence du domaine ferrallitique sur granites présentant la succession amont - aval suivante : altérites ferrallitiques indurées, sols jaunes meubles et profonds, colluvions hydromorphes. Les rigoles de l'amont passent vers la mi-pente à des ravines dont le creusement est préparé par un piping résultant du regroupement du drainage amont; en bas de versant les horizons hydromorphes non perméables limitent la profondeur du ravinement. Les 81 ravins étudiés donnent une densité de 20 à 170 m d'incision à l'hectare qui produisent de 12 à 64 m³ de sédiments par hectare.

En Nouvelle Galles du Sud (Australie) : sous 600 à 700mm de pluies, les sols sur sables et schistes pélitiques se ravinent avec effondrement de berges ce qui donne 25 à 40 m³ de sédiments par mètre linéaire tandis que les têtes ont reculé de 50 à 60 m en 29 ans (11).

Enfin, il faut évoquer la tentative de modélisation du ravinement par Stocking (12) sur les sables du Zimbabwe (Rhodésie de l'époque) entre 1972 et 1978, au sud-ouest d'Hararé (Salisbury de l'époque). L'auteur a comparé différentes chroniques de ravinements à l'aide de photographies aériennes prises depuis 1956 et a construit un modèle statistique fonctionnant par résolution d'équations de régressions multiples considérant deux groupes de variables explicatives :

- des variables environnementales (pluie, indice d'humidité, surface du bassin, indice de « piping », couvert végétal, interception de la pluie, densité de la population),
- les variables intrinsèques du système (dénivelés des têtes de ravin, pentes des berges et chenaux)

La recherche bibliographique précédente révèle d'étonnantes convergences de fonctionnement des systèmes de ravins en deux domaines extrêmement éloignés : le semi-aride méditerranéen (exemple du Maghreb) et le tropical humide (exemple de l'Afrique de l'ouest). Dans les deux cas, on constate que le ravinement peut-être préparé par une suffosion interne précédant un piping dû à la collecte du drainage de l'amont. Dans les zones semi-arides il y a combinaison d'une incision superficielle dès l'amont, alimentée par les écoulements provenant d'un impluvium à affleurements rocheux (djebel) et d'un piping du tiers supérieur du versant accentué par la dissolution des ciments salins profonds (halite, gypse). Dans les tropiques humides de l'ouest africain, l'incision apparaît plus bas sur le versant et résulte plutôt de l'effondrement des tunnels de suffosion creusés dans des matériaux désaturés en bases et ameublés par une diminution des ciments argileux et sesquioxydiques, matériaux déblayés par la collecte du drainage des milieux microagrégés, poreux et cohérents de l'amont. Un processus similaire est observé sur les ferralsols (latossolos roxos) sur basaltes triaso-jurassiques du sud Brésil (Rio Grande do Sul) (13) .

L'érosion ravinante dans la dégradation spécifique du bassin versant de la retenue collinaire de Fidh Ali,

Depuis quatre ans, des études du ravinement sont menées en Tunisie sur le bassin versant de *Kamech* sur le Cap Bon, dans le Gouvernorat de Nabeul, et sur le bassin versant de *Fidh Ali* au sud-est de la dorsale, dans le Gouvernorat de Kairouan. Ces études apportent trois choses :

- une contribution scientifique à l'analyse du fonctionnement des systèmes de ravins dans un cadre climatique semi-aride et sur des matériaux à argiles gonflantes et gypseux fournissant des sols à forte réactivité structurale,
- une application directe de la recherche au développement puisque ces sites sont inscrits dans des bassins versants alimentant des retenues collinaires à risque important de sédimentation.
- un intérêt didactique car ces sites servent d'atelier d'étude à de nombreux étudiants et jeunes chercheurs de toutes nationalités.

Ce travail présente une analyse des données de terrain recueillies de 1999 à 2001 sur une zone ravinée dans le bassin versant de la retenue collinaire de Fidh'Ali.

1 Cadres physique et humain

Le bassin versant de Fidh Ali ($35^{\circ}42'40''$ N , $09^{\circ}36'13''$) s'inscrit dans la retombée sud-est de la dorsale tunisienne sur la plaine de Kairouan. (fig 1)

Le bassin de 212 ha alimente une retenue qui faisait $134\,710\text{ m}^3$ lors de sa construction en 1991 et dont la capacité actuelle n'est plus que de $85\,000\text{ m}^3$. Fidh Ali est une des 470 retenues collinaires actuellement construites sur les 1000 prévues par la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols de la Tunisie.

Figure 1 : localisation du bassin versant de Fidh'Ali

Climat

La région reçoit 375 mm de pluie ; 65 années de relevés sur un poste proche (Ouseltia) ont permis de calculer les moyennes pluviométriques de différentes occurrences.

P. décennale sèche = 209 mm, P. décennale humide = 572 mm,
P. médiane = 332 mm, P. moyenne = 375 mm.

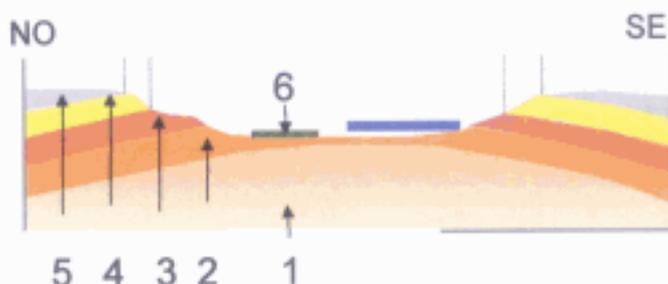
Fidh'Ali est en limite sud du « bioclimat » méditerranéen semi-aride inférieur (14) caractérisé par un hiver tempéré dans sa nuance continentale avec des précipitations oscillant de 300 à



600mm /an, une saison sèche de 5 à 8 mois, une amplitude thermique maximale (moyenne des maximums de juillet – moyenne des minimums de janvier) de 16 à 18°C et une humidité atmosphérique de 65% à l'intérieur des terres.

Géologie, géomorphologie

Le bassin versant occupe une partie de la voûte érodée d'un anticlinal orienté NE-SO, de quelque 12 à 15 km de large et à flancs dissymétriques (fig.2).



- 1, 2, 3 Eocène moyen argiles gypseuses, calcaires à lumachelles, argilites phosphatées, calcaires dolomitiques.
 4 Oligocène grès à nummulites, silts.
 5 Miocène inférieur sables grossiers, argiles, sables fins.
 6 Quaternaire encroûtements calcaires

Figure 2 : coupe géologique au niveau du BV de Fidh Ali

La coupe géologique résume les formations et leurs lithologies depuis les flancs jusqu'à l'axe de l'anticlinal. Le bassin de Fidh'Ali s'inscrit uniquement dans les formations de l'Eocène. Les djebels des limites amont (ouest-sud ouest) sont dans les lumachelles. Les limites sud se situent dans des interstratifications serrées de bancs calcaires coquilliers assez minces et plus rarement de grès fins « armant » des bancs plus épais d'argiles gypseuses. Les variations lithologiques et les gisements de ces bancs ont une grande importance sur la différenciation des sols et, par voie de conséquence, sur les comportements hydrodynamiques et érosifs.

Distribution des sols et comportements prévisibles des terres cultivées

L'image SPOT de la figure 3 a été prise à l'époque des sols dénudés et labourés. Son traitement a orienté la reconnaissance pédologique qui met en évidence les trois situations principales suivantes :

1 (en blanc) : les lithosols et affleurements rocheux qui sont soit des épandages de cailloux et blocs, soit des affleurements de calcaires coquilliers Eocène. Sur les pentes du djebel, ils génèrent de forts ruissellements canalisés en petits torrents. Ils ne cèdent pas de charges solides.

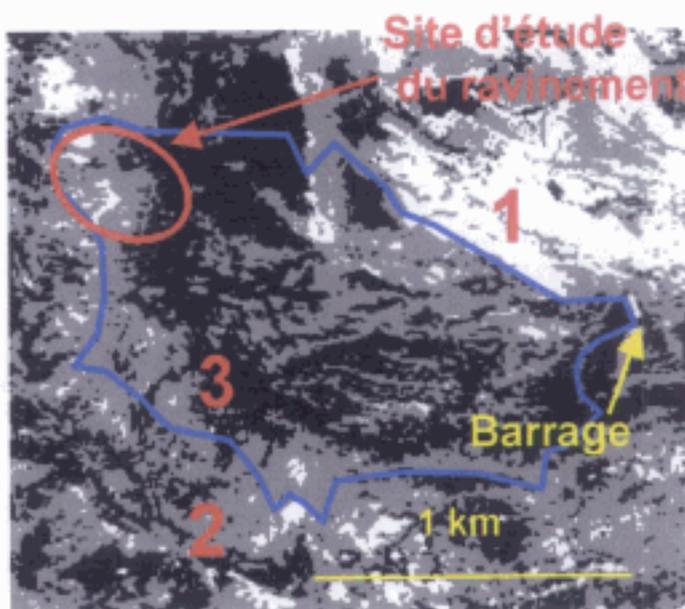


Figure 3 : esquisse pédologique du bassin

2 (en gris) : les sols calcimagnésiques bruns calciques dont la pédogénèse est liée au calcaire. Ces sols peu épais (<50cm) contiennent 20 à 30% d'argile + limons fins. Cette texture favorise peu la dynamique structurale saisonnière, les sols se fissurent donc peu. La faible stabilité des mottes contribue à donner des surfaces se lissant rapidement à l'issue des premières averses avec formation de pellicules à faible conductivité hydraulique. Ils fournissent également peu de charges solides car l'épaisseur de la lame ruisselante intercepte l'énergie des pluies, tous comportements déjà analysé dans un travail antérieur (15).

3 (noir) : les sols calcimagnésiques bruns vertiques et gypseux dont la pédogénèse est liée aux marnes et argilites. Ces sols sont plus épais (>50cm) et contiennent 60 à 75% d'argile + limons fins. Ils ont une forte dynamique structurale saisonnière liée aux smectites qui se traduit par une fissuration de leurs surfaces en fin de saison sèche. Les ruissellements y sont retardés car leur détention hydrique dans les macrofissures est forte (70 à 120mm). Leurs structures résistent assez longtemps, donc, contrairement aux sols précédents, il se maintient une forte rugosité superficielle alimentant assez durablement les premiers ruissellements en charges solides importantes.

Occupation et utilisation des terres

Le bassin versant de Fidh'Ali s'inscrit dans un terroir (Jebbes, Haffouz) où vivent 9 756 habitants répartis en une dizaine de douars particulièrement dispersés (densité = 86 hab. / km².) La structure foncière y est complexe avec un mélange de terres privatives, de terres sans immatriculation et d'autres en indivision. 80% des parcelles ont moins de 10 ha, dont la moitié de moins de 5 ha. Cette tenure aurait dû faciliter toutes applications de travaux de CES notamment pour corriger les torrents et ravins naissants. Une incitation insuffisante dans une population pourtant assez dense n'a pas permis d'enrayer le développement de gros dégâts érosifs.

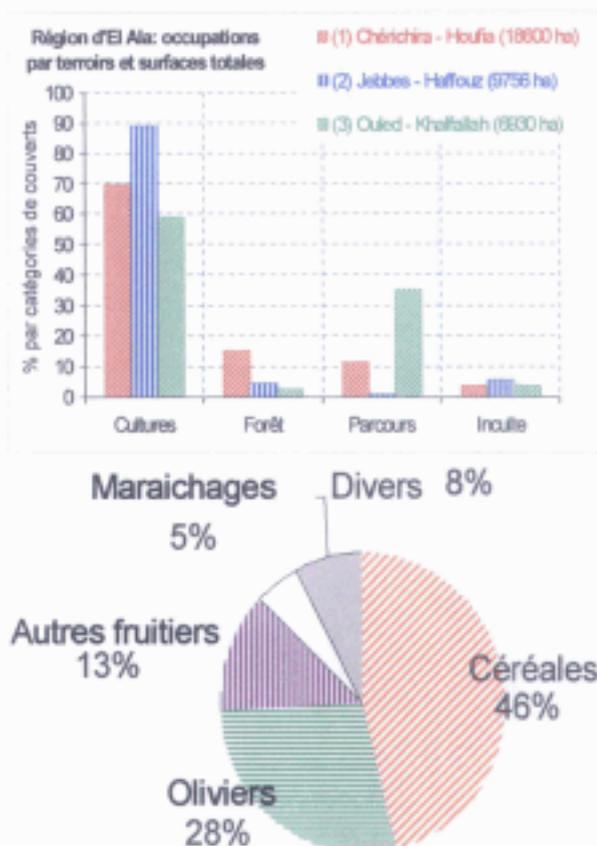
Les terroirs sont surtout consacrés aux productions végétales (fig. 4) On note que les terres dites « incultes » à affleurements rocheux ou sols squelettiques sont peu mentionnées.

Figure 4 : occupation des terres (histogramme) et systèmes culturaux (camembert)

Ceci ne signifie pas qu'il y ait beaucoup de terres réellement "arables" ; en effet, la mécanisation permet de classer dans cette catégorie ce qui résulte d'un « grattage » par rebondissement des disques de charrue rapidement tractée sur des terres trop minces et caillouteuses. Le fort déficit hydrique saisonnier est l'autre argument qui devrait inciter au déclassement de ces terres sans réserves hydriques suffisantes.

Le terroir a une occupation mixte céréalière (46%) et arboricole (41%), dont 28% d'oliviers. Il laisse 10% aux cultures irriguées grâce aux retenues collinaires ou à la proximité de l'oued Merghellil. Dans une région où les rendements en céréales basculent sous les 10 q / ha, en année normale, ces terroirs effectuent fréquemment des reconversions arboricoles au dépens des emblavures.

Le système de « polyculture-élevage ovin en sec » nécessitant de grandes parcelles (# 25 ha) domine loin des grands oueds et des fortes densités de puits, ce système est plutôt fréquent vers l'ouest. Un second système que l'on pourrait appeler « polyculture vivrière diversifiée » avec combinaison : céréales + fourrage en petites superficies (<5ha) + cultures maraichères irriguées, + arboriculture encadrée irriguée + petit élevage bovin, domine près des ressources en eau qui sont la plupart du temps des pompages dans le Merghellil ou dans les 7 retenues collinaires de la zone. Il serait cependant abusif de parler ici de réel système irrigué comme c'est le cas dans la grande plaine de Kairouan.



2 Méthodes

2.1 Principes

Deux sortes de variables sont étudiées simultanément :
des variables environnementales qui sont à l'origine du fonctionnement du système de ravins,
des variables intrinsèques qui décrivent le système et expliquent ses variations de production de sédiments. L'organigramme de la figure 5, montre l'articulation des différentes actions aboutissant à une quantification des sédiments produits, transmis, ou retenus sur un versant soumis au ravinement.

Les variables environnementales

Les variables environnementales permettent l'établissement de différentes relations entre la topographie, les situations culturales et les événements climatiques en amont et en périphérie du système de ravins pour prévoir des écoulements, donc des risques de ravinement en aval. Les résultats d'une étude antérieure (15, 16) sont alors utilisés pour identifier les périodes d'écoulements, d'érosions et surtout leurs intensités en relation avec les événements pluvieux et les situations culturales de différents sols.

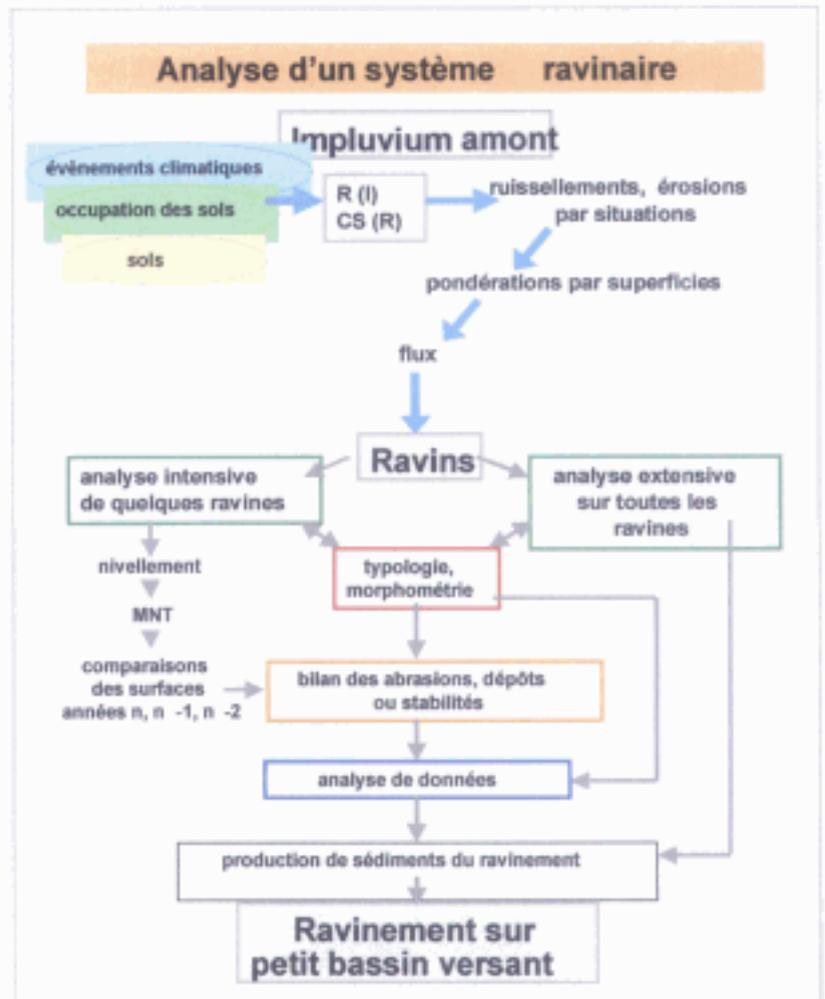
Figure 5 : organisation de la recherche sur le ravinement

Les variables intrinsèques

De façon générale, on combine des mesures morphométriques avec des observations typologiques utiles effectuées sur les ravins caractéristiques du milieu étudié.

Les données *quantitatives* (à gauche sur l'organigramme) sont issues de nivellements topographiques effectués à des époques différentes, de leurs traitements pour créer autant de modèles numériques de terrains (MNT) qui sont des fichiers numériques des altitudes permettant tous calculs à partir de comparaisons des surfaces courbes levées à différentes époques et de toutes restitutions cartographiques .

Ces données sont confrontées aux données *qualitatives* (à droite sur l'organigramme) issues d'une description des différents éléments du système. Ces informations concernent autant la nature et l'organisation des matériaux constituant les berges, lits et têtes, que différentes mensurations établissant les dimensions et proportions respectives de chacun de ces éléments.



Le tableau II résume quelques saisies descriptives sur un exemple de site. Des relations sont enfin établies entre ces catégories de données pour une extrapolation des productions de terres érodées ou déplacées sur un versant, voire un bassin versant.

Tableau I I : exemple de données descriptives saisies sur le terrain

lieu et n°	typo.	versant m	distances m	surfaces m2	pente %	exposition	aspect profil
ravine 1	1	2	3	4	5	6	7
rive droite							
aval 1	VIF2	6	12,05	72,30	30	nord-est	rectiligne
2	MM1	4,19	29,25	122,56	27	nord-est	en ME
3	MM2	7,03	28,62	201,20	19,5	est-nord-est	en ME
4	MM2	12,37	27,58	341,16	13	nord-est	rectiligne
rav. lat. 1x 5	VIF1	1,27	66,2	84,07	47	est-sud-est	rectiligne
6	H1	9,42	26,54	250,01	10	est-nord-est	rectiligne

colonne 1 : caractérisation des berges (ici berge droite) avec :

- VIF1 = surface vive sur au moins 75% VIF2 = surface vive sur au moins 50%
- H1 = surface enherbée sur au moins 75% H2 = surface enherbée sur au moins 50%
- MM1 = mouvements de masse avec enherbement de 0 à 25% MM2 –ido-, enherbement de 25 à 50%, etc..
- Il existe d'autres descripteurs pour les fissures, creep, pellicules structurales, efflorescences, etc..

col.2 : mensuration versant col.3 : distances entre deux observations col.4 : surface de berges correspondant aux caractéristiques col.5 : pente de la berge col.6 : exposition de la berge col.7 : description du profil de versant, d'autres descripteurs existent.

2. 2. Techniques de terrain

Tachéométrie laser sur grandes surfaces: principe et traitement des données

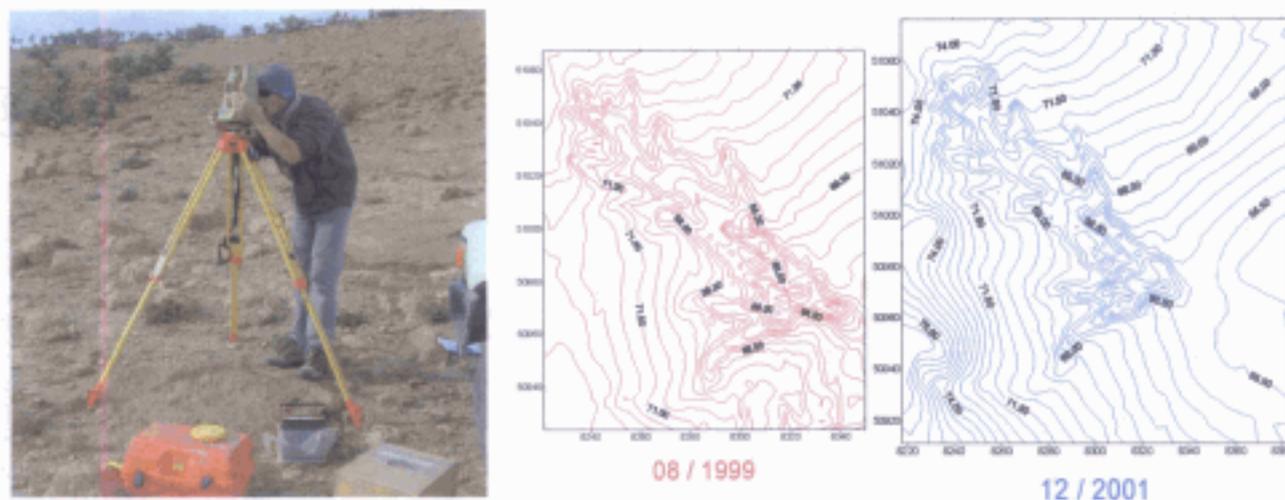


Figure 6 : tachéométrie laser des grandes surfaces

Le nivellement s'effectue au tachéomètre. Le principe de la tachéométrie laser, extrêmement résumé ici, est une mesure initiale de durée du trajet aller-retour d'un rayon laser émis par le tachéomètre, atteignant le miroir du jalon et réfléchi vers le chrono-lecteur du tachéomètre. La densité du jalonnement dépend de la précision désirée et de l'ampleur du ravinement, 1 500 à 2 000 points ont été levés par exemple sur les quelque 2,5 ha du ravin étudié et pour ce faire, trois journées avec trois opérateurs ont été nécessaires (1 opérateur sur tachéomètre + 1 jalonneur + 1 descripteur).

Les cotes stockées en mémoire du tachéomètre sont ensuite transformées en coordonnées X, Y, Z. Le traitement final s'opère dans un logiciel (Surfer) pouvant générer des MNT. Le transfert des coordonnées donne une carte topographique en 2D voire en 3D qui ne présente d'autre

intérêt qu'une visualisation facile de toutes ruptures de pentes. Le tracé des courbes de niveau résulte d'une opération géostatistique de krigeage ce qui implique qu'il y a finalement une équidistance optimale de courbes en deçà et au-delà de laquelle il n'est pas ou plus judicieux de travailler.

Mesure sur sections fixes au distomètre laser

La seule utilisation de la tachéométrie ne permet pas de répondre à toutes les questions, aussi suivons-nous des évolutions de profils en travers sur 8 transversales, ou sections, matérialisées par des bornes inamovibles.

Le principe s'apparente à la tachéométrie laser, c'est une mesure de durée d'un aller- retour de rayon laser percutant cette fois une surface de sol et non plus un miroir. Le dispositif comprend un distomètre du commerce à mémoire de masse + un niveau digital de menuisier qui fait office d'alidade ; l'ensemble est monté sur une platine de photographe fixée sur un piètement métallique démontable s'ajustant aux bornes fixes de la transversale (photo de la figure 7)

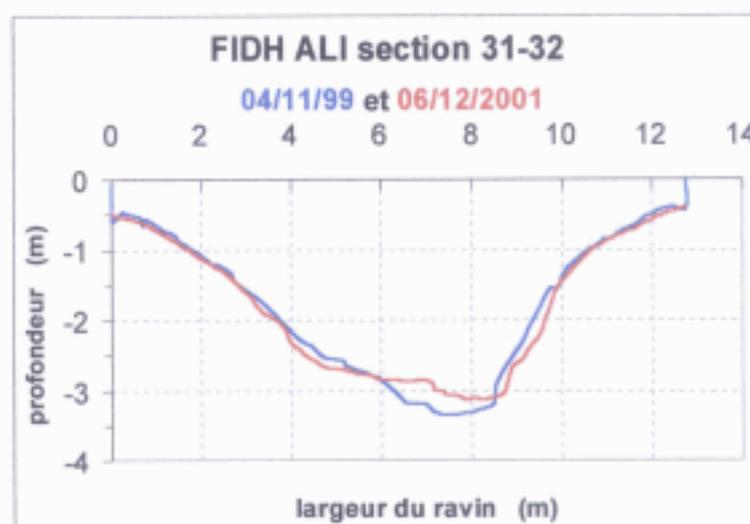


Figure 7: distomètre laser installé sur un site de mesure de Fidh Ali

Ce dispositif donne des informations plus précises mais plus « sectorielles » que précédemment. Les angles et distances permettent de calculer et tracer les deux profils 1999 et 2001 du graphique de la figure 7, sur cette superposition de deux profils en travers on détecte les zones de stabilité, de remblais ou les excavations à un an et demi d'intervalle.

3 Résultats, interprétations

Le travail porte sur un système de ravins situé en amont du bassin de Fidh Ali (fig. 3), de 1,31 ha de surface développée et contenu dans un impluvium de 7,5 ha. Deux objectifs ont été retenus :

1. une quantification des pertes et gains en sols et sédiments, le levé global, illustré par la carte des isovaleurs de la figure 8a, ne suffit pas car il faut connaître la nature et les masses

volumiques spécifiques des matériaux correspondant aux unités d'iso-dépôts ou d'iso-ablations détectées par le MNT. Pour cela, on fractionne le ravin principal et les 10 ravins secondaires (figure 8b) en autant de tronçons que nécessaires pour obtenir la meilleure définition du binôme « type de matériau – bilan ».

- ce fractionnement permet en outre d'étudier les inter-relations des couples « abrasion ou dépôts - caractéristiques géométrique des ravins » sur un effectif très important, donc mieux approcher le fonctionnement du système.

3.1. Bilan des dépôts et abrasions sur l'ensemble du ravin

Principes

Figure 8 : ablations, gonflements et dépôts :

- sur l'ensemble du ravin,
- sur des sections des 10 ravins secondaires

Sur l'ensemble du ravin, la comparaison des levés d'août 1999 et de décembre 2001 donne une carte d'iso-valeurs d'ablations et de dépôts (fig. 8a). L'échelle, non métrique, donne, en couleur foncée, les dépôts et les ablations, en couleur claire. Le « ruban » intercalaire (vert) représente les zones restées stables entre les deux levés. Un tracé des courbes de niveau rappelle la topographie à laquelle ne correspond pas le contour des unités de la carte des iso-valeurs. A cette échelle, on note une différence de comportements entre la rive gauche où dominant soit des gonflements de parois soit des dépôts et la rive droite ainsi que la plupart des têtes de ravine de l'amont où dominent les "abrasions".

Les levés MNT donnent des informations volumiques, or la mobilisation par désengrènement ou foisonnement d'éléments à partir d'un matériau rigide et en place se fait par fragmentation, parfois liquéfaction, voire dissolution de ciments salins. On se retrouve ainsi avec des matériaux remaniés encore en place (gonflement) ou colluvionnés sur les berges ou dans le lit, dans les deux cas ils ont une plus faible masse volumique, ce qui est

Figure 8 a

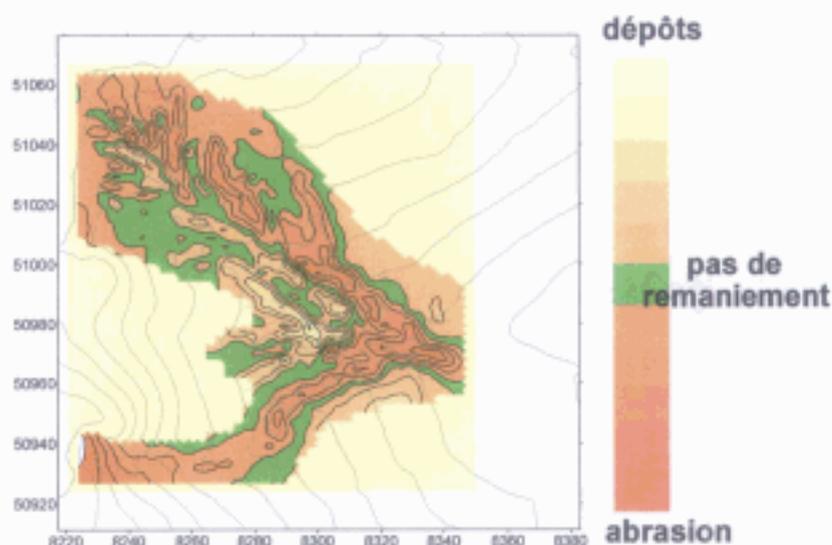
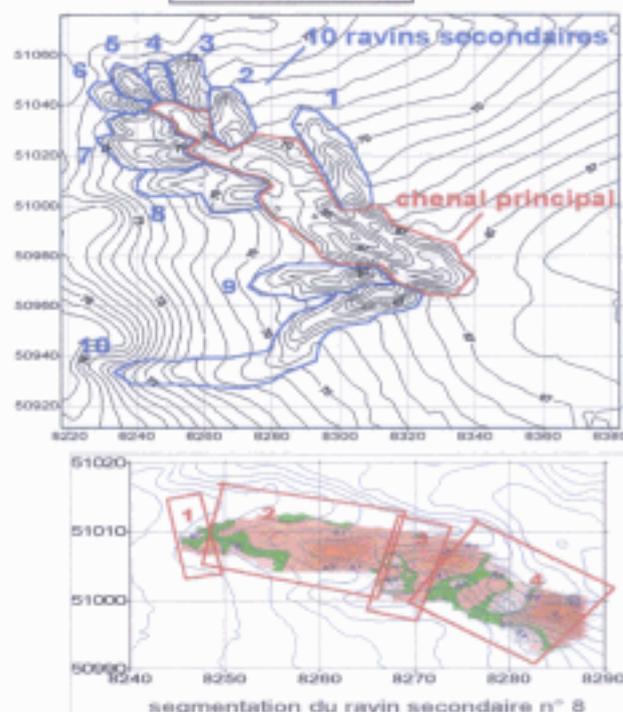


Figure 8 b



particulièrement sensible sur les sols gypseux à argiles gonflantes. Lorsque l'entaille atteint les altérites de marnes ou argilites un processus similaire se produit par foisonnement de ces roches litées. Les masses volumiques des principaux matériaux en place ou remaniés sont les suivantes :

sols argileux agrégés, en place = 1.44
 argilites foisonnantes sur berges = 1.75
 colluvions d'agrégats de sols = 0.75
 colluvions de plaquettes d'argilites = 1.23
 sédiments sableux fins de lit = 1.35
 lamelles de gypse et d'argilites = 1.35

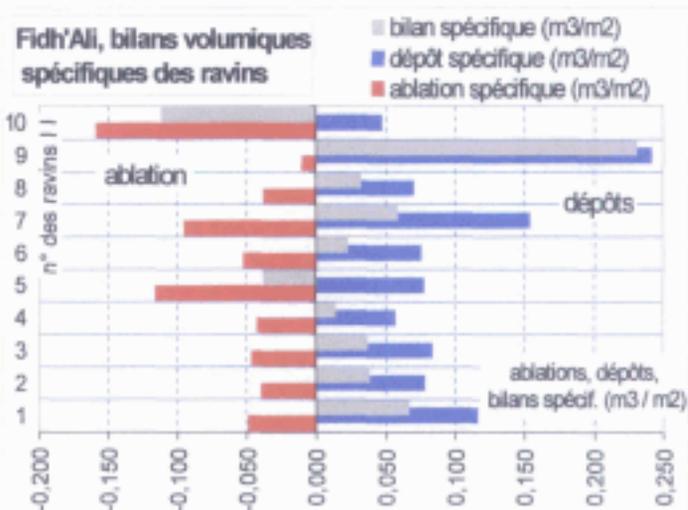


Figure 9 : bilans volumiques mesurés sur les 10 ravins secondaires

Sur chacun des 10 ravins secondaires, la superposition des levés de 1999 et de 2001 a permis de quantifier ablations et dépôts volumiques (figure 9). puis pondéraux (résultats encadrés ci-dessous) en considérant les masses spécifiques et superficies occupées par chaque matériau remanié

Résultats

Les bilans pondéraux résumés ci-dessous, prouvent que dans toutes méthodes s'appuyant sur des nivellements et fournissant donc des différences de cotes transformées en volumes puis en masses, il est obligatoire de connaître très exactement la nature des matériaux participant aux remaniements et de les localiser très précisément sur des berges et des lits.

10 ravins secondaires

- surface développée = 4186 m²
- ablation = 331 m³
- excédent = 432 m³
- bilan pondéral spécifique (*) = **ablation de 0.026 t/m²**

chenal

- surface développée du chenal principal = 6124 m²
- ablation sur le chenal = 3646 m³
- excédent sur le chenal = 4127 m³
- bilan pondéral spécifique (*) = **ablation de 0.085 t/m²**

ravin A

- surface développée = 10 310 m²
- ablation = 3977 m³
- excédent = 4559 m³
- bilan pondéral spécifique (*) = **ablation de 0.061 t/m²**

bilan annuel ramené à la surface de l'impluvium

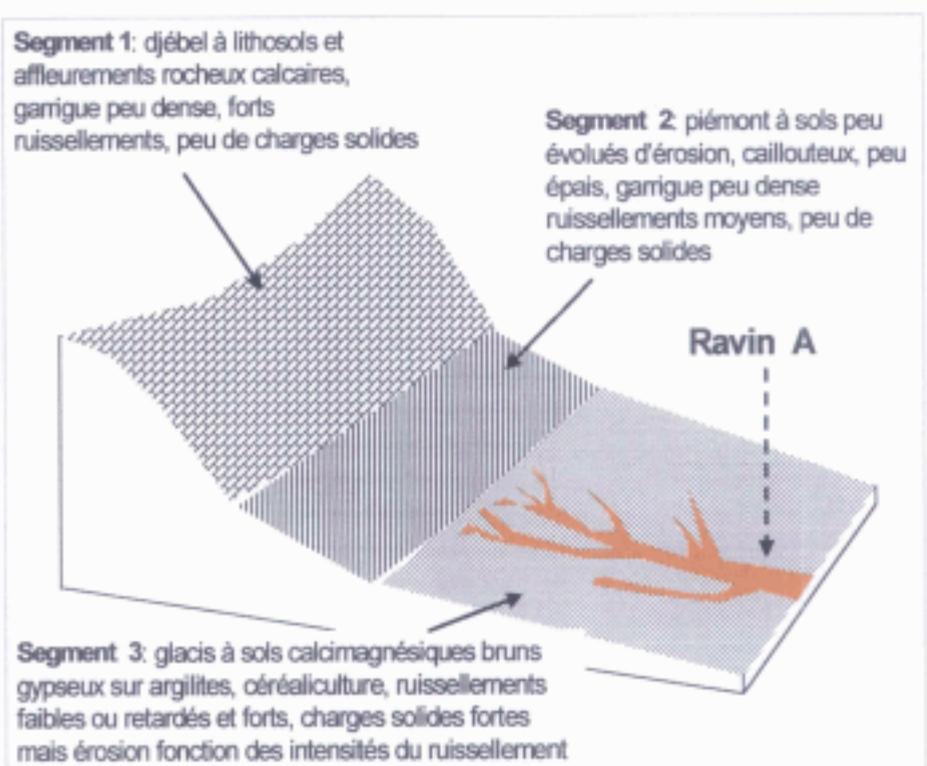
- surface projetée de l'impluvium = 75 000 m²
- période de mesure = 2 ans
- **sédiments produits annuellement par ce ravin: 42 t /ha**

3.2. Fonctionnement, rôle des variables environnementales

Genèse des flux : comportements hydrodynamique et érosifs de l'impluvium

La figure 10 identifie les trois segments constituant l'impluvium du ravin, chacun d'eux a un comportement hydrodynamique et érosif particulier. Les relations pluies / débits de ruissellement ayant été établies sous pluies simulées (15, 16) sur les segments les plus représentatifs de Fidh Ali, il est possible de prévoir les périodes et les intensités des ruissellements et les érosions aréolaires des sols de cet impluvium.

Fig.10: distribution des couvertures pédologiques et comportements résumés



segments 1 et 2 : les ruissellements sont peu chargés (0,25 g/l), les érosions font 0,5 à 1,0 t/ha/an

segment 3 : les ruissellements sont nettement plus chargés (0,8g/l) d'où des érosions de 1,0 à 6,5 t/ha/an malgré des intensités de ruissellement plus faibles que celles des segments 1 et 2.

Les pluies efficaces ont représenté :

- 50% des 143mm de pluie de 09/1999 à 08/2000,
- 40% des 102mm des pluie de 09/2000 à 08/2001,
- 65% des 129mm de pluie déjà enregistrée de 09/2001 à 12/2001.

Seuls cinq ruissellements dépassèrent les 5 mm de août 1999 à décembre 2001. Parmi ceux-ci trois furent voisins ou légèrement supérieurs à 20 mm en mai 2000, septembre et octobre 2001 qui furent, toutes proportions étant gardées, les périodes les plus « agressives » avec incisions de berge et début de reprise des stocks de sédiments des lits.

L' humidité antérieure des sols et des altérites: influence sur les remaniements de berges

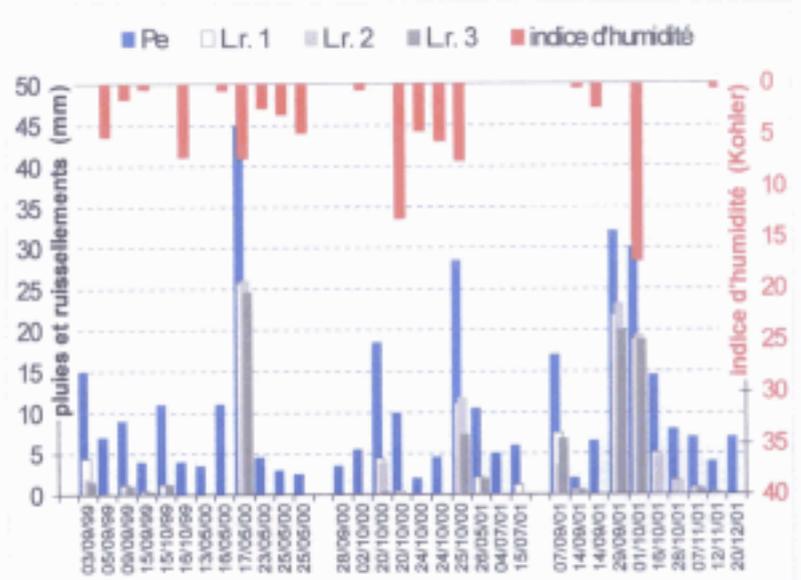
L'analyse précédente fournit des informations sur les périodes et intensités des ruissellements susceptibles de fournir des flux transitant de l'impluvium au lit du ravin. Une seconde analyse partant des caractéristiques d'humectations initiales des sols permet de prévoir les comportements mécaniques des sols en surplomb des ravins et ainsi leurs risques d'éboulement par perte de cohésion, voire les coulées boueuses de leurs horizons supérieurs.

La figure 11 regroupe, avec une même abscisse de dates, les pluies, les lames ruisselées des trois segments (Lr 1 à 3) et les indices d'humidité IK de Kohler, Linsley (16, 17).

Les conditions d'humectation considérées isolément ou couplées avec des informations sur le ruissellement ont permis de dater les probabilités de remaniements de berges suivantes:

- mouvements de masse rigides ou boueux sur les parois de terres ayant perdu leurs cohésions ou ayant atteint leurs limites de liquidité → 17/05/00, 20/10/00, 25/10/00, 29/09/01 et 01/10/01
- incisions en rigoles des berges par des ruissellements de versant, voire par des résurgences de drainage (piping) → 17/05/00, 29/09/01 et 01/10/01.

Figure 11 : pluies, lames ruisselées, et indices d'humidité IK (Kohler, Linsley) sur l'impluvium



3.3. Fonctionnement, rôle des caractéristiques intrinsèques des ravins

Rôle de la géométrie des ravins sur la partition abrasion / dépôt

On a recherché des expressions mathématiques des caractéristiques géométriques des ravins les plus susceptibles d'interférer sur la partition entre l'abrasion et le dépôt ; on a finalement retenu :

- (1) un premier coefficient de forme qui est le rapport surface développée du lit / surface développée des berges
- (2) un second coefficient de forme qui est le rapport largeur / profondeur du ravin

Pour améliorer les performances des analyses, on a augmenté l'effectif des données en fragmentant les 10 ravins secondaires en différents tronçons aux limites longitudinales déterminées par les inflexions de pente des profils en long. Chaque segment est ensuite traité en autant de MNT. Comme précédemment, on obtient différentes zones d'iso-excédents et d'iso-ablations sur lesquelles sont calculés des bilans volumiques en tenant compte des superficies développées de chacune d'entre elles. On relie ensuite ces bilans aux deux coefficients de forme.

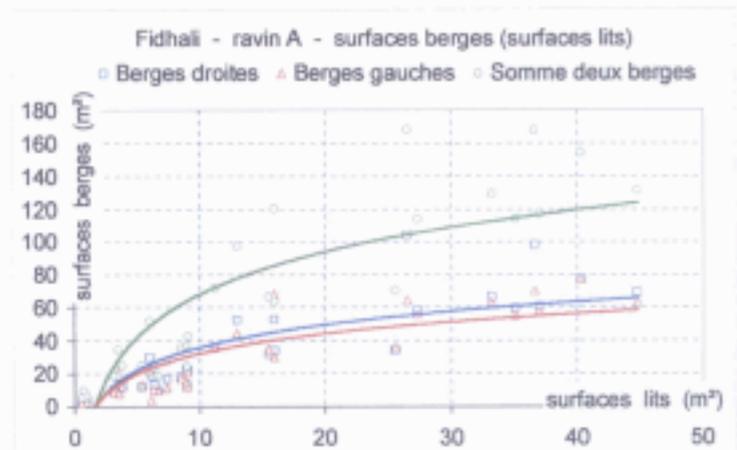
Premier coefficient de forme : surface lit / surfaces berges

Cette distribution est représentée sur la figure 12.

Figure 12: rapport des surfaces lits / surfaces berges et activités ravinaires

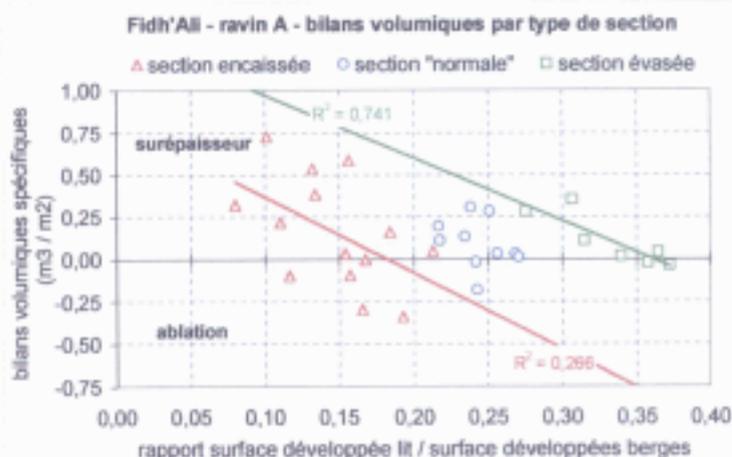
Le rapport des deux surfaces tend vers une asymptote, ce qui traduit deux choses:

- vers les faibles superficies, il s'établit un équilibre entre le creusement du lit et l'ajustement des pentes des parois à ce creusement,



- vers les grandes superficies, le système de ravins se dégrade, les lits plans s'élargissent, les berges ont des superficies développées constantes car elles sont de moins en moins remaniées par des réajustements de leurs pentes d'équilibre puisque les lits se creusent peu.

Figure 13: partition ablation / excédent selon la géométrie des ravins



L'expression des bilans volumiques des segments sur les 10 ravins en fonction de ce premier coefficient de forme donne un nuage de points. Par contre, la recherche d'un classement aboutit à discriminer trois populations (fig. 13) délimitées par les coefficients de forme suivants :

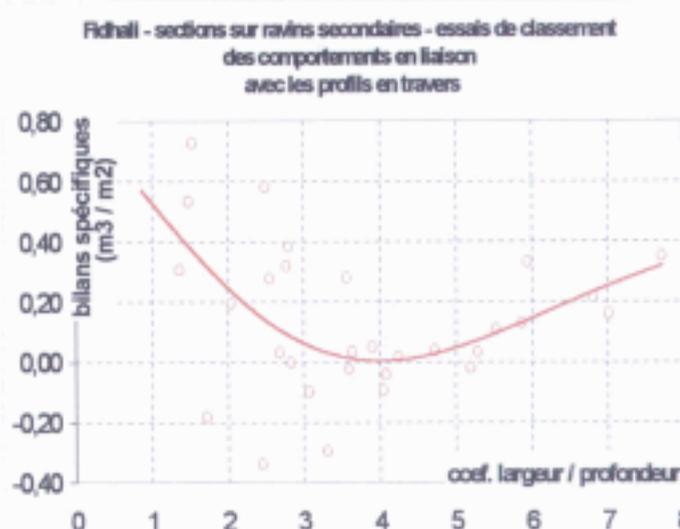
- un coef. $< 0,216$ indique un système de ravins jeune avec des sections en V étroits indiquant une forte dynamique de creusement,
- un coef. $> 0,276$ indique les sections larges et évasées de systèmes amortis,
- les coef. intermédiaires (0,215 à 0,275) indiquent un système "mature" en trapèze inversé

Second coefficient de forme: largeur / profondeur du ravin

La mise en relation du bilan de chaque section avec ce second coefficient de forme (fig. 14) fait apparaître un assez net changement de comportement pour une incision ravinatoire définie par le coef. 4,2.

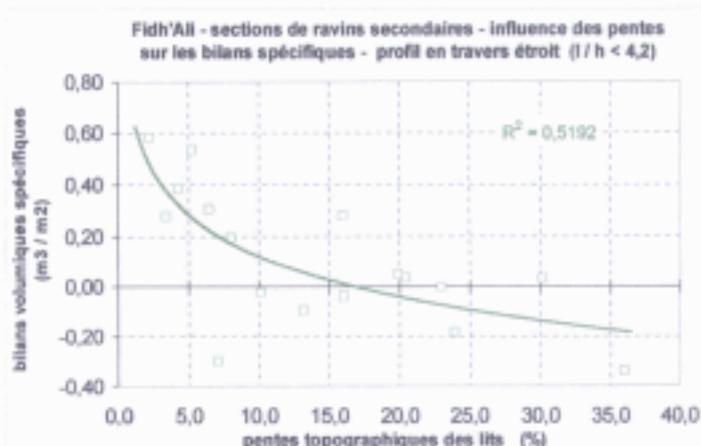
- en dessous de cette valeur on a un profil en travers étroit et nettement incisé,
- un coefficient $> 4,2$ indique un profil évasé.

Figure 14: classement des comportements érosifs en fonction du second coefficient de forme largeur / profondeur



L'expression des bilans volumiques en fonction des pentes longitudinales des lits de ravins fortement incisés (coef. $< 4,2$) montre un changement de dynamique vers 17% de pente de lit, qui correspond à une pente de versant de 7 à 8%, et un coefficient de détermination meilleur que dans l'analyse opérée avec le premier coefficient de forme. (Fig. 15) On détecte peu de relations dans le cas des ravins très évasés.

Figure 15: bilans volumiques et partition abrasion - dépôt en fonction de la pente longitudinale du lit



Dans le cas de ravins incisés, la dynamique est active, les réajustements des profils de berges aux incisions ou dépôts de lits sont rapides et continus et cela est détecté par la méthode. Dans le second cas, les augmentations de pente se traduisent par des incisions décimétriques dont les flux divergent dans un large lit plan, ce surcreusement étroit et peu profond est observable mais peu détecté par la méthode.

3. 4 Résumé : scénarios de fonctionnement et prévision de production de sédiments

La compilation des informations provenant des ateliers de Fidh Ali (cette étude) et de Kamech (autre étude dans le Cap Bon) permettent de quantifier les remaniements liés à l'érosion ravinante pour différents scénarios issus d'évènements pluviométriques variés (tableau II).

Dans le tableau II, on note qu'il n'y a pas de sortie de sédiments du système dans les trois premiers scénarios : (1) éboulement d'agrégats dans le lit, (2) creep ou solifluxion sur berges, (3) résurgence du drainage, piping et cisaillement en rigole des berges.

Par contre, il y a évacuation, transfert sur le versant puis dans l'exutoire des sédiments dans le scénario 4 qui correspond à une année très humide et agressive. La simulation faite à l'aide du MNT en généralisant les zones à forte production donne une érosion de 100 à 175 t/ha/an ce qui est conforme aux données circum-méditerranéenne évoquées en introduction.

Tableau II : Scénarios de fonctionnement et prévisions de production du ravin A - les quantifications valent pour la période août 1999 à décembre 2001.

Scénarios Saisons Occurrences	Causes	Processus	Effets	Productions Quantifications
Scénario 1 Sèche Occurrence annuelle	Dynamique structurale des sols. Foisonnement des roches litées. Exposition des berges. Vent. Piétinement du bétail. Gravité	Ameublissement, perte de cohésion sèche des matériaux par : (a) désengrenage des agrégats, (b) délitages des roches, Eboulement .	Gonflement en haut de berges. Ablation en bas de berges. Accumulation dans le lit	Quantification délicate car ce processus est hétérogène mais des relations fiables peuvent être dégagées avec les orientations des berges révélant les durées d'insolation.
Scénario 2 Humide, pluies peu agressives Occurrence annuelle	Perte de cohésion d'une partie du sol par : (a) limite de liquidité, (b) dissolution de sels, Conjonction (a) + (b) due au fort drainage de la saison intermédiaire. Gravité	Mouvements de masse divers : a) solifluxion en milieu boueux b) creep, coup de cuiller, en planche, en touches de piano en milieu rigide	Ablation en haut de berges. Gonflement en bas de berges. Lit encombré par des barrages terreux.	Si gonflement de produits de solifluxion = 0,010 à 0,015 m ³ /m ² soit 0,010 à 0,015 t/m ² . Si gonflement de produits de glissements solides = 0,020 à 0,040 m ³ /m ² soit 0,016 à 0,032 t/m ²
Scénario 3 Humide, pluies agressives Occurrence de 2 à 5 ans	Ecoulements superficiels sur champ Résurgence du drainage hypodermique ou profond (piping) débouchant sur les berges Effet d'impluvium des berges.	Cisaillement en rigoles sur la partie meuble (sol soliflué), en haut, entaille dans le sol, en bas , entaille dans la roche puisque capacité abrasive plus forte du flux.	Cannelures sur berges. Accélération de l'abrasion des zones d'inter- cannelure non couvertes par les flux	Abrasion en rigoles = 0.005 à 0.010 m ³ /m ² soit 0,008 à 0,016 t/m ²
Scénario 4 Très humide, pluies agressives Occurrence de 10ans et plus	Flux de lit par genèse d'importants écoulements sur les impluviums de l'amont	Abrasion générale de lit. Surcreusement de « sauts » Ramifications latérales et recul des têtes sur plusieurs mètres par an	Evacuation des stocks de sédiments issus des processus précédents. Réajustement des profils des berges à l'approfondisse- ment du lit par divers processus	Abrasion sur lit + transports stocks = 0,050 à 0,080 m ³ /m ² soit 0,075 à 0,120 t/m ² . Reprise matériaux éboulés = 0,020 à 0,040 m ³ /m ² soit 0,016 à 0,032 t/m ² Total = 0,090 à 0,150 t/m ²

Conclusion

Les terres cultivées sur marnes gypseuses de la Tunisie centrale sont sensibles au ravinement sur des versants > 7% de pente.

A l'issue des deux années de mesures, ce travail démontre que l'érosion ravinante mobilise 42 t / ha / an de sédiments au sortir des 7,5 ha du système

En année peu pluvieuse, situation observée (300mm), ces sédiments restent dans les ravins ou se déposent sur le versant immédiatement au sortir du ravin.

En année pluvieuse (# 500mm) ils peuvent être transférés totalement en vallée ou, comme ici, dans la retenue collinaire où des mesures bathymétriques montrent effectivement une dégradation spécifique de 40 à 50 t/ha/an pour un bassin de 212 ha dans lequel une étude antérieure a démontré que l'érosion aréolaire de 0,4 à 2,5 t/ha/an ne représentait que 1 à 5 % de la dégradation spécifique du bassin.

En année très pluvieuse (>> 500mm), une simulation de conditions agressives (scénario n°4 du tableau II) par extension des surfaces sensibles et actives repérées sur le M N T montre que la production de sédiments oscillerait de 0,090 à 0,150 t/m². Ceci, toujours rapporté aux 7,5 ha du système, donnerait 124 à 206 t/ha/an, ce qui est cohérent avec les valeurs données pour le pourtour méditerranéen dans des conditions similaires.

Le M N T couplé avec les observations du terrain montre que s'il n'y a pas chaque année exportation des sédiments, le système ne reste pas inerte pour autant. Il subit en effet d'importants remaniements de berges liés à une forte dynamique structurale saisonnière due aux argiles gonflantes et au gypse.

Sur les champs limitrophes, cette même dynamique structurale crée de la macroporosité fissurale qui permet de drainer 70 à 100mm des premières pluies ce qui favorise les dissolutions internes des sels (18) et le creusement de galeries pouvant amorcer le ravinement.

Une voie intéressante de modélisation de l'érosion linéaire accentuée serait de compléter les paramètres d'entrée des modèles hydrologiques distribués par des informations portant sur les charges et vitesses des flux ainsi que sur les modifications de leurs capacités de transport ou d'abrasion liées à leurs confluences, ceci commandant finalement une partition abrasion, transport, dépôt en tous lieux d'un versant et une prévision des érosions à un exutoire donné.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **MARGAT J.**, 2002 - La sédimentation des réservoirs et ses conséquences sur la maîtrise des ressources en eau dans le monde. C R Académie d'Agriculture de France, 88, : 105-114.
- 2 **DUNGLAS J.**, 2002 - Erosion de bassins versants et gestion des barrages. C R Académie d'Agriculture de France, 2002, 88 : 119 - 121.
- 3 **GAO B., HUA S.**, 1982 - Gully correction and utilization in gullied rolling loess on the middle reaches of the Yellow River. - abstract de Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Commission, Beijing, 20p.
- 4 **SIRVENT J., DESIR G., GUTIERREZ M., SANCHO C., BENITO G.**, 1997. - Erosion rates in badland areas recorded by collectors, érosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE - Spain). *Geomorphology* n°18, : 61-75.
- 5 **TORRI D., COLICA A., ROCKWELL D.**, 1994.- Preliminary study of the erosion mechanisms in biancana badland (Tuscany, Italy). *Catena* n°23, : 281-294.
- 6 **C E M A G R E F**, 1993. - Recherche sur la fixation de sols et essais de comportements des fixateurs et matériaux composites pour la revégétalisation en zones extrêmes. *Rapp. Etude.* 44p.
- 7 **GOMER D.**, 1994. - Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen - traduction française (PASCHEN H. et VOGT H.) de la thèse soutenue à l'Université Technique de Karlsruhe. Collab. Agence Nationale Ressources Hydrauliques (Algérie) G T Z (Allemagne) dans le cadre du "Projet Pilote d'Aménagement Intégré du BV de l'Oueds Mina" - 207 p + 25 annexes.
- 8 **VOGT H., PASCHEN H., et al.**, 1996. - L'aménagement des zones marneuses dans les bassins versants des montagnes de l'Atlas tellien semi-aride - G T Z - 142p.
- 9 **SFAR F M., SNANE M.HH., MLAOUHI A., MEGDICHE M.F.**, 1999. - Importance du facteur lithologique sur le développement des ravins du bassin versant de l'oued Maiez en Tunisie Centrale. *Bull.Eng.Geol.Env.* n° 57 : 285-293.
- 10 **CHEVALLIER P., FRITSH E., JANEAU L., VALENTIN C.**, 1990. - Les fonctionnements hydrodynamiques aux échelles ponctuelles., aux échelles du bassin versant , le fonctionnement hydrologique du bassin versant. ORSTOM, col. Colloques et Séminaires : 148 – 223.
- 11 **BLONG R.J., GRAHAM O.P., VENESS J.A.**, 1982. - The role of didewall processes in gully development; some NSW exemples. *Earth Surface Processes and Landforms.* vol. 7 :381-385
- 12 **STOCKING M.A.**, 1978. - Examination of the factors controlling gully growth on cohésive fine sands in Rhodesia . Univ. of Edinburgh, Departm. of Geography. - Working Paper for Workshop on Assessment of Erosion, Ghent (Belgique) febr. - march 1978. 9p.
- 13 **DOS REIS CASTRO Nilza Maria**, 1996. - Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique du sud du Brésil (Rio Grande do Sul). Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg , mention Géographie Physique (27/03/1996). 224 p.
- 14 **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., GUILLERM L., JACQUINET JC., LE FLOC'H E., SCHOENENBERGER A., SOLER A., VAN SWINDEREN H. Editée 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.
- 15 **COLLINET J., ZANTE P., ATTIA R. , DRIDI B., AGREBAOUI S.**, 2002. - Analyse expérimentale de l'érosion aréolaire sur le bassin versant du lac collinaire de Fidh'Ali (Tunisie). Institut de Recherches pour le Développement (mission de Tunis) - Direction des Sols (Tunis). 55p.
- 16 **COLLINET J., ZANTE P, DRIDI B. , AGREBAOUI S.** 1999. - Simulation de pluies sur deux sites du bassin versant de Fidh Ali (Tunisie) - premiers résultats., INRGREF, Direction des Sols. IRD. multigraph. 5p.+ 1 carte pédo + annexes.
- 17 **KOHLER M.A., LINSLEY R.K.**, 1951. - Predicting the runoff from storm rainfall. Weather Bureau. U.S.Department of Commerce. Research Paper n° 34. Washington, 9 p. 8 fig.
- 18 **CHEVALLIER P.**, 1983.- L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cah. ORSOM, série Hydrologie*, vol XX, n° 3-4 :179-189.
- 19 **REYES GOMEZ VM.**, 1999 -Dissolution interne d'un sol gypseux, cas des têtes de ravine d'un bassin versant en milieu méditerranéen, petit barrage collinaire de Fidh Ali (Tunisie). Mémoire de stage de DEA, Université de Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc -I R D Unité GP623 – UR2 Unité Hydrophysique des sols et programme HYDROMED, atelier de Tunisie. 92p. + 18p. annexes.
- 20 **ROOSE E., CHEBBANI R., BOUROUGAA L.**, 2000 - Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Synthèse Sécheresse 2000 ;11 (4) : 317-26*

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Collinet, J.; Zante, P. - Le ravinement sur marnes gypseuses en Tunisie semi-aride, pp. 301-319, Bulletin du RESEAU EROSION n° 21, 2002.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr