

Analyse expérimentale de l'érosion aréolaire sur le bassin versant du lac collinaire de Fidh Ali (Tunisie)

COLLINET Jean (1), ZANTE Patrick (1), ATTIA Rafla (2)
DRIDI Becim (3), AGREBAOUI Sadok (3)

Tunis, mai 2002



**Direction des
Sols**

**Institut de
Recherches pour le
Développement**

1 pédologues. mission I R D / INRGREF Tunis.
2 géomorphologue, Direction des Sols Tunis,
3 techniciens. Direction Sols Tunis

التحليل التطبيقي لظاهرة الإنجراف السطحي بحوض البحيرة الجبليّة فيض علي (القيروان)

الخلاصة

هذه الدراسة مكنت من تحديد كمية الإنجراف السطحي للترب الكلسية الداكنة القائمة على الصلصال الجبسي والكلس الرملي، (gréseux) المزروعة، بحوض البحيرة الجبليّة فيض علي بمنطقة شبه جافة بتونس الوسطى، (القيروان) تسقط بها 350 ملم من الأمطار. المعلومات الأساسية متأتية من قطع كانت موضع تجارب محاكاة للأمطار حسب بروتوكولات تأخذ بعين الاعتبار الأوضاع الزراعية وطاقت الأمطار الطبيعية لهذه المنطقة.

تم تحليل العلاقات بين شدة السيالان وشدة الأمطار، وكذلك العلاقات الرابطة بين الإحمال الصلبة وتدفق السيالان. إدماج المعلومات التجريبية مع تلك المتأتية من أحداث طبيعية مكن من إقامة نموذج (Mobil) بين الفوارق في الحساسية بين نوعي التربة الذين يغطيان 75% من الحوض.

Préambule

Ce travail est le résultat d'une collaboration entre la Direction des Sols de Tunisie (D/Sols de Tunis) et l'Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM, mission I R D de Tunis). Les données de bases ayant permis de mener cette étude proviennent d'expérimentations effectuées à l'aide d'un matériel commun, le simulateur de pluies mis en œuvre en mars et avril 1999 sur le bassin versant de Fidh Ali par une équipe franco-tunisienne dans le cadre du programme « Comportement, conservation, gestion des terres cultivées soumises à l'érosion hydrique » de la convention D/Sols – I R D

Résumé

Cette étude a permis de quantifier l'érosion aréolaire des sols calcimagnésiques bruns calcaires sur marnes gypseuses et sur calcaires gréseux, emblavés, du bassin de la retenue collinéaire de Fidh Ali, en Tunisie semi-aride recevant 350mm.

Les informations de base proviennent de parcelles expérimentales soumises à une simulation de pluies selon des protocoles respectant les situations culturales et les énergies des précipitations naturelles de cette région.

Cette analyse utilise les relations s'établissant entre les intensités de ruissellement et les intensités des pluies, puis celles s'établissant entre les charges solides et les débits de ruissellement. La combinaison d'informations expérimentales avec celles issues d'événements naturels a permis de construire un modèle (MOBIL) révélant les différences de vulnérabilité de deux types de sols qui occupent 75% du bassin. Quatre points ressortent de ce travail :

1) L'érosion aréolaire annuelle des sols sur calcaires gréseux est faible (0,44 à 1,14 t/ha/an) celle des sols sur marnes gypseuses est faible à moyenne (0,71 à 2,47 t/ha/an), elle ne constitue que 5 % de l'érosion globale du bassin, le reste provient d'une très forte érosion ravinaire qui amène l'érosion globale du bassin vers les 40t/ha/an (mesures bathymétriques).

2) Pour une érosivité pluviométrique constante, on observe :

- une plus forte érodibilité des sols sur marnes à cause de la fourniture de fortes charges solides même si les ruissellements sont limités par une rugosité et une porosité durables du fait de la présence d'argiles gonflantes qui expliquent une forte dynamique restructurante par les alternances dessiccations / humidifications superficielles,
- une plus faible érodibilité des sols sur calcaires plus ou moins gréseux, moins argileux, donc moins riches en argiles gonflantes ; leurs structures s'effondrent et leurs surfaces se lissent plus rapidement ce qui limite la détachabilité parce que les flux de ruissellement restent laminaires et que l'épaisseur de la lame ruisselante intercepte l'énergie des pluies.

3) Le cumul des érosivités annuelles fait apparaître un rapport d'érodibilité sols marneux / sols calcaire qui passe de 1,7 en année faiblement érosive à 3,0 en année moyennement érosive ; ce rapport redescend en année très agressive car les comportements se rejoignent par effondrement des structures donc diminution de la conductibilité des sols sur marnes avec le cumul des pluies.

4) Ce travail confirme ce que des études antérieures ont déjà révélé : la nature cristallographique des argiles est un très bon indicateur comportemental.

Plan

	pages
PREMIERE PARTIE : PROBLEMATIQUE	
Objectifs	5
Prospective	5
DEUXIEME PARTIE : MILIEU PHYSIQUE, ACTIVITES HUMAINES	6
2.1. Localisation	6
2.2. Climat	8
2.3. Géologie	10
2.4. Couvertures pédologiques et dynamiques actuelles	12
2.4.1. Les sols en tant qu'indicateurs comportementaux	12
2.4.2. Hypothèses sur la dynamique générale du bassin	14
2.5. Occupation et utilisation des terres	17
2.5.1. Démographie, tenure des terres, occupation des sols	18
2.5.2. Productions végétales et animales	19
TROISIEME PARTIE : METHODES	20
3.1. La simulation de pluies	21
3.1.1. Matériel	21
3.1.2. L'hydrogramme de ruissellement et d'infiltration	22
3.1.3. Les comportements hydrodynamiques superficiels	23
3.1.4. La mobilisation des terres érodibles	25
3.2. Du diagnostic à la prévision des risques : le modèle MOBIL	26
QUATRIEME PARTIE : RESULTATS, DISCUSSIONS	28
4.1. Analyse des averses naturelles	28
4.2. Sites et protocoles expérimentaux	30
4.2.1. Les sites	30
4.2.2. Les protocoles expérimentaux	34
4.3. Comportements hydrodynamiques	36
4.3.1. Qualité des eaux d'aspersion	36
4.3.2. Lames ruisselées	37
4.3.3. Conductivités hydrauliques	38
4.3.4. Relations $R_x (I)$	38
4.4. Comportements érosifs	39
4.4.1. Relations $C_s (R)$	40
4.4.2. Choix des parcelles de simulation de pluies	40
4.4.3. Mise en oeuvre du modèle	41
4.4.4. Bilan des érosions cumulées	42
4.4.5. Comparaison des comportements	44
4.4.6. Contribution de l'érosion aréolaire dans l'érosion générale du bassin	45
CONCLUSION	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50-55

Liste des figures

- 1 : localisation du bassin versant de Fidh Ali
- 2 : pluviométrie et bioclimats tunisiens
- 3 : géologie régionale et coupe dans l'anticlinal du bassin
- 4 : esquisse pédologique du bassin versant
- 5 : les régions naturelles jouxtant le bassin versant de Fidh Ali
- 6 : trois terroirs : tenure des terres et occupation des sols
- 7 : productions végétales
- 8 : productions animales
- 9 : hydrogramme théorique de ruissellement et d'infiltration
- 10 : relations rugosité : conductivité hydraulique saturée
- 11 : relations $R_x(I)$ et $F_n(I)$, obtention des intensités limitées
- 12 : évolution des charges solides en fonction du temps sous simulation de pluies
- 13 : exemple de comportement érosif sur sols calcimagnésiques meubles
- 14 : exemple de comportement érosif sur sols calcimagnésiques à croûte calcaire
- 15 : routine de M O B I L
- 16 : abaques I/D/F sur Kairouan
- 17 : exemple de hyétogramme dressé par le logiciel PLUVIOM
- 18 : trois années à érosivités faibles, moyennes, fortes
- 19 : lames ruisselées cumulées des sols bruns calcaires et bruns gypseux
- 20 : analyse de la relation $K_{hsat.}(SP)$ sur les deux sols
- 21 : analyse de la relation $R_x(I)$ sur un sol brun gypseux (exemple)
- 22 : évolution des érosions en année faiblement agressive
- 23 : évolution des érosions en année moyennement agressive
- 24 : évolution des érosions en année fortement agressive
- 25 : relations érosion / érosivité par averses individuelles
- 26 : comparaison des érodibilités des sols bruns gypseux et bruns calcaires

Liste des tableaux

- I : caractéristiques analytiques des sols de deux sites
- II : situation des parcelles, protocole expérimental et données brutes
- III : charges ioniques des eaux de pluies, ruissellements et drainages
- IV : relations $SL(SP)$
- V : analyse des relations $R(I)$ et intensités limites
- VI : analyse des relations $C_s(R)$
- VII : choix des parcelles de simulation de pluies
- VIII : exemple de traitement des données dans M O B I L
- IX : bilan annuel des érosions sur les différents sites
- X : bilan des écoulements et érosions mesurées au lac (annuaires hydrologiques 1994-1999)
- XI : un exemple de scénario érosif sur un versant de Fidh Ali.

PREMIERE PARTIE

PROBLEMATIQUE

Objectifs

Cette étude est une contribution au thème général portant sur la conservation des eaux et des sols dans les régions semi-arides cultivées tunisiennes. Elle fournit des informations sur les ruissellements et risques érosifs issus d'une céréaliculture sur différentes catégories de sols représentatifs de la "dorsale" tunisienne. La méthode utilise la simulation de pluies sur petites parcelles installées sur des sites représentatifs des sols et cultures pratiquées dans le bassin versant. Les données permettent de construire un modèle-relais déterministe combinant les informations sur les pluies naturelles et celles issues de l'expérimentation. Ce modèle peut être couplé aux modèles distribués visant la prévision des écoulements et des érosions aux échelles des petits et moyens bassins versants.

Prospective

Les comportements d'une vingtaine de sites ont été testés sous pluies simulées depuis 1985 sur une grande partie de la Tunisie par des équipes de la Direction des Sols et de l' ORSTOM (actuellement IRD). Des compléments d'informations expérimentales et surtout de nouveaux traitements de l'ensemble des données déjà disponibles permettront de quantifier et d'expliquer les dynamiques actuelles des versants cultivés dans les régions semi-arides et arides du Haut Tell, de la Dorsale et des Hautes Steppes tunisiennes. La poursuite de ce travail sur un plus grand nombre de régions, couplé avec l'analyse de leurs paysages, dégagera des connaissances transmissibles sous la forme de cartes d'isopotentialités ou d'isorisques liés à l'utilisation des sols .

DEUXIEME PARTIE

MILIEU PHYSIQUE ET ACTIVITES HUMAINES

2.1 Localisation

Les deux sites expérimentaux sont situés dans le bassin versant de Fidh Ali qui est compris dans le gouvernorat de Kairouan et la délégation territoriale d'Haffouz. Ce petit bassin versant (35°42'40" N , 09°36'13") est situé à 15km au nord ouest de la localité d'Haffouz (fig. 1), il est tributaire, en rive gauche, de l'oued Merghellil à quelque 20 km en amont du barrage d'El Haouareb. C'est une des 470 retenues collinaires actuellement construites sur les quelque 1000 prévues par la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols de la Tunisie. Le bassin versant de Fidh Ali a une superficie de 212,5ha et alimente une retenue de 134 710 m³ lors de sa construction en 1991 que la sédimentation a ramené , en dix ans, à 85 000m³.

Les documents de base suivants ont été utilisés :

- photographie aérienne : 1/20 000, panchromatique, mission MAPS (M 8951) 1988-1989, photos n°118 et 119, clichés pris à 11h24' probablement en hiver (sols nus).

- topographie : carte topographique à 1/50 000 n°62 d'Haffouz, agrandie au 1/20 000 (Lambert # 269/470)

- géologie : (a) feuille n°62 Haffouz à 1/50 000, (b) carte géologique de la Tunisie à 1/500 000 de Ghali, Karray, Bensalem,(1993), d'après les travaux de Castany (1946-47),

- pédologie: (a) carte des ressources en sols de la Tunisie, feuille de Kairouan à 1/200 000 de Barbery , Mohdi (1983), (b) esquisse pédologique du bassin de Fidh Ali de Collinet, Zante (1999).

- hydrologie : annuaires hydrologiques des lacs collinaires, réseau pilote de surveillance hydrologique (annuel), CES - IRD de Albergel, Guiguen, Pépin, Ben Younes Louati, Selmi, Jenhaoui, Boufaroua, Ghedoui, El Faleh, Debabria, Ben Youssef (ac 1994 pour Fidh Ali).

- climatologie : (a) carte des étages bioclimatiques de la Tunisie à 2 000 000 de M. Gounot, H.N. LE Houerou (1955), (b) carte bioclimatique de la Tunisie septentrionale à 1/500 000 de M.Gounot, H.N. Le Houerou et al. – Secrétariat au Plan et Economie Nationale de Tunisie, CNRS Paris, CEPE Montpellier (1967), (c) Climatologie et Bioclimatologie de la Tunisie septentrionale dans les Annales de l'INRA Tunis, vol.41, Fasc.1 (1968) à 1 / 1 000 000 de M.A. Nabli, A. Carrière - Fac. des Sciences de Tunis + CNRS France – (1986)



Figure 1 : localisation du bassin versant de Fidh Ali

2.2 Climat

Les informations climatiques nécessitant une longue période d'observations font référence au poste pluviométrique d'Oueslatia situé à 12km au nord du bassin, celles nécessitant une analyse plus fine par averse proviennent de la station installée sur le barrage de Fidh Ali.

La région contenant le bassin versant se situe en limite des domaines pluviométriques « telliens », au nord, avec des précipitations > 400mm qui passe pour être la limite méridionale d'une céréaliculture en sec et du domaine « steppique » s'étendant au sud jusqu'à l'isohyète 150mm (fig. 2). Si, aux distributions pluviométriques, s'ajoute l'analyse des températures et de l'humidité de l'air, on peut alors distinguer plus finement des « étages » bioclimatiques eux-mêmes subdivisés en « sous-étages » selon des conditions thermiques qu'imposent l'éloignement de la mer et parfois l'altitude. Fidh Ali est ainsi en limite des deux bioclimats méditerranéens suivants:

-semi-aride inférieur à hiver tempéré dans sa nuance continentale où les précipitations oscillent de 300 à 600mm par an avec 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,

- aride supérieur également à hiver tempéré avec 150 à 300mm par an, une longue saison sèche de 8 à 12 mois, une amplitude thermique maximale de 18 à 20°C.

A Ousseltia (1926 à 1990 et 1994 à 1995, 25 km nord de Fidh Ali, altitude +500 m) la pluviométrie est la suivante :

P. d'occurrence décennale sèche = 209 mm,

P. décennale humide = 572 mm,

P. médiane = 332 mm,

P. moyenne = 375 mm.

En saison humide, la pluie se distribue en deux maximums médians identiques de quelque 35 mm en septembre et en avril-mai encadrant un ralentissement jusqu'à 18 mm centré sur janvier. La saison sèche présente un minimum médian inférieur à 5 mm centré sur juillet. La pluie centennale humide atteindrait les 800mm.

Les caractéristiques thermiques sont les suivantes :

T. moyenne des minimums de janvier = 3^o4 C,

T. moyenne des maximums de juillet = 34^o2 C,

Amplitude thermique moyenne annuelle = 17^o1 C.

Dans la région de Fidh Ali, le quotient pluviothermique d'Emberger, calculé selon sa seconde formulation, est voisin de 40.

$$Q2 = 2 P / (M^2 - m^2)$$

avec P = pluviométrie moyenne annuelle (mm),

M = moyenne des températures maximums de juillet (°C),

m = moyenne des températures minimums de janvier(°C).

Rappelons que, selon Le Houerou (1969), les relations entre le Q2 d'Emberger et la distribution des sous-étages bioclimatiques sont les suivantes :

Sub-humide : Q2 de 70 à 120 (P de 600 à 800mm)

Semi-aride supérieur : 45 à 70 (P. de 400 à 600mm)

Semi-aride inférieur : 33 à 45 (P. de 300 à 400mm)

Aride supérieur : 23 à 35 (P. de 200 à 300mm)

Aride inférieur : 10 à 23 (P. de 100 à 200mm)

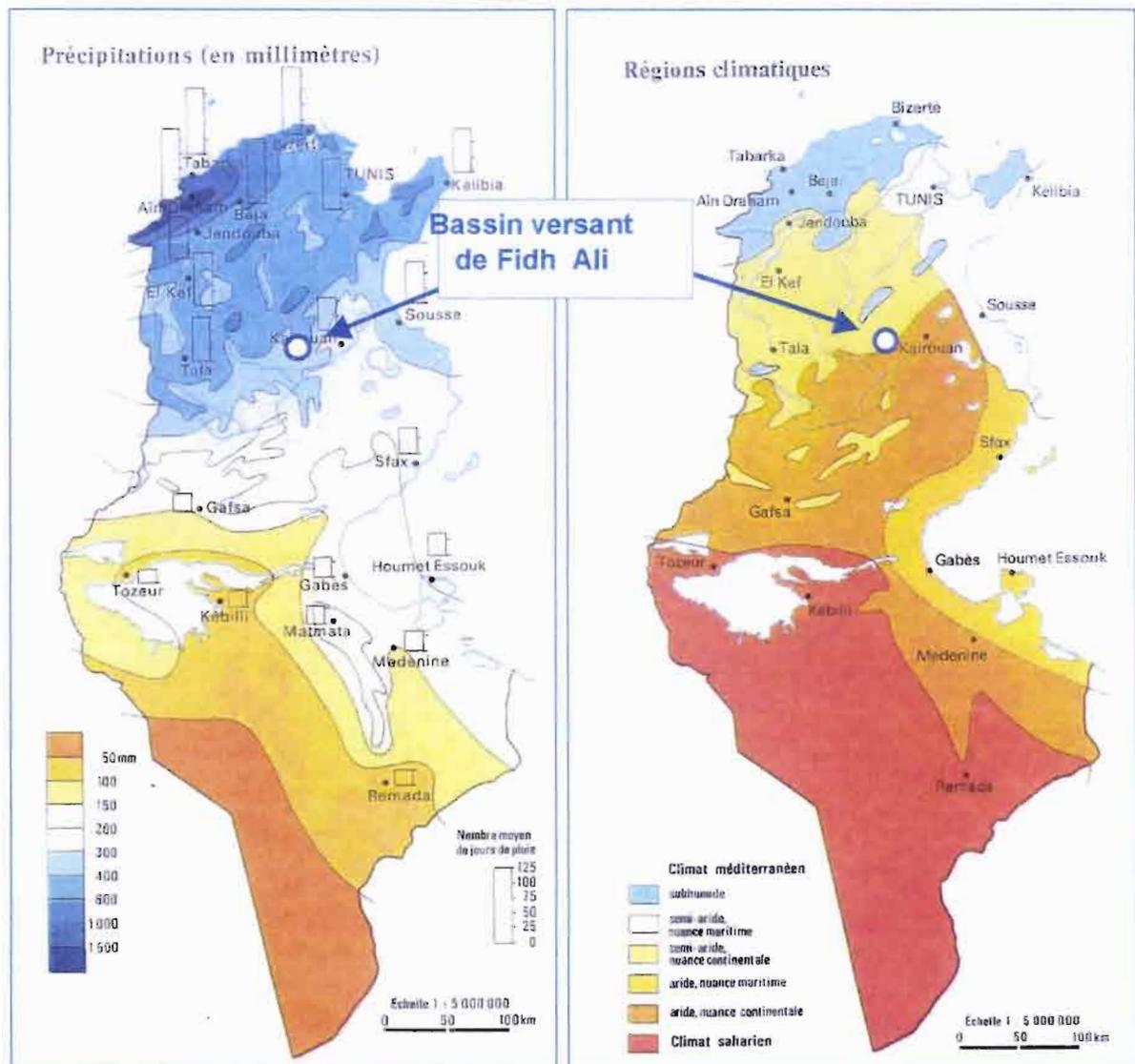


Figure 2: pluviométrie et bioclimats tunisiens, d'après les cartes bioclimatiques de la Tunisie – CNRS Paris, Faculté des Sciences de Tunis par Gounot. et Le Houerou 1955, 1967, Atlas Tunisie JA 1979)

2.3 Géologie

Le bassin versant est situé en limite de la Dorsale tunisienne au nord ouest et de la Haute steppe au sud. Il occupe une petite partie de la voûte érodée d'un anticlinal orienté NE-SO, de quelque 12 à 15 km de large et à flancs dissymétriques (figure 3). Les plus forts pendages ($>10^\circ$) sont situés sur le flanc sud-est, donc en rive droite du bassin versant, les plus faibles, sur le flanc nord-ouest, en rive gauche. On note l'antécédence de l'oued Merghellil qui recoupe perpendiculairement l'axe du synclinal, par contre certains de ses affluents sont conformes.

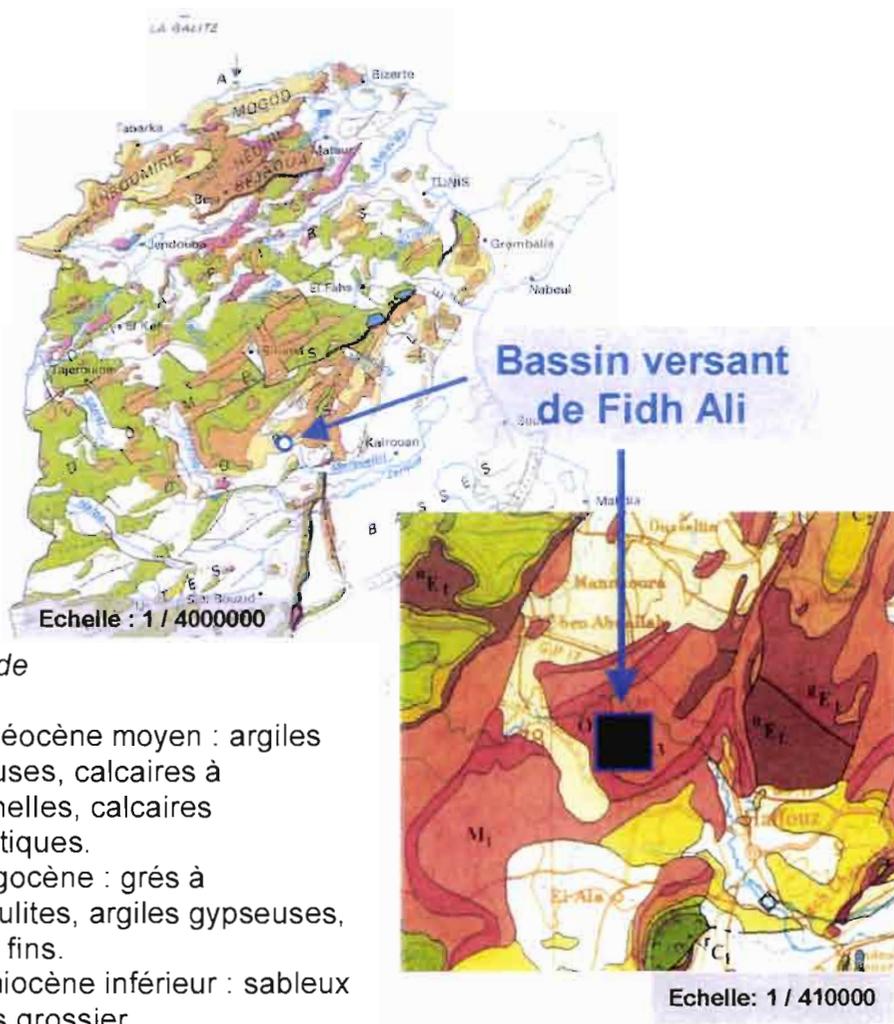
Les roches sont essentiellement du Tertiaire, elles proviennent des formations épicontinentales (calcaires coquilliers) et lagunaires peu profondes (marnes gypseuses) ceinturant « l'île de Kasserine » émergée à peu près définitivement depuis le Sénonien. Bien après, la tectonique plio-quadernaire s'est exercée sur des matériaux de rigidités différentes et a donné des plissements en étroits synclinaux et large anticlinaux à fond plat. L'ensemble est localement peu faillé contrairement à ce que l'on observe plus au nord.

La coupe schématique de la figure 3 résume les formations depuis les flancs jusqu'à l'axe de l'anticlinal. Des plus récentes au plus anciennes les formations ont été inventoriées de la façon suivante:

- Miocène inférieur (Ma, Aquitanien) - sableux fin puis sableux grossier,
- Oligocène (O) - grès à Nummulites, intercalations d'argiles gypseuses et de sables fins,
- Eocène (El -p, Lutétien supérieur et Priabonien) - argiles gypseuses et calcaires lumachelliques,
- Eocène (El 1-2, Lutétien moyen et inférieur) - argiles parfois phosphatées, lumachelles, calcaires dolomitiques.

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. Le nord-est et l'est du bassin versant sont plutôt situés sur des bancs de calcaires coquilliers plus épais, à plus faible pendage et qui forment quelques barres émoussées dans le paysage.

Les variations lithologiques auront une grande importance sur la différenciation des sols et, par voie de conséquence, sur leurs comportements hydrodynamiques et érosifs.



Légende

- E 2-3**- éocène moyen : argiles gypseuses, calcaires à lumachelles, calcaires dolomitiques.
- O** - oligocène : grès à Nummulites, argiles gypseuses, sables fins.
- M1** - miocène inférieur : sableux fin puis grossier.

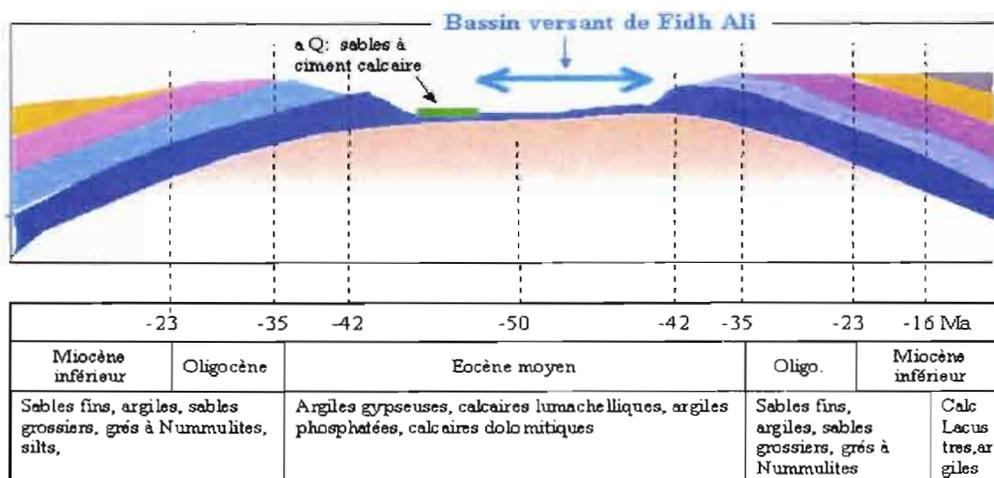


Figure 3 : géologie régionale et coupe dans l'anticlinal du bassin de Fidh Ali

2.4. Couvertures pédologiques et dynamiques actuelles

L'esquisse pédologique de la figure 4 montre différentes unités cartographiques d'unités simples ou d'associations de sols distinguées par des caractéristiques physiques et chimiques ayant une implication sur des comportements hydrodynamiques et érosifs. Un rappel taxonomique permet cependant d'établir toutes liaisons avec les autres cartes de la région.

Ce bassin versant est actuellement cultivé à près de 80%, le travail du sol consiste en un labour à la charrue à disques et, éventuellement, en un passage croisé d'un cultivateur juste avant le semis des céréales. Les perturbations du profil cultural sur le profil pédologique n'atteignent guère plus de 25cm de profondeur.

2.4.1. Les sols en tant qu'indicateurs comportementaux

Unité 1 : lithosols et affleurements rocheux calcaires

Ils correspondent aux surfaces très claires de la photographie aérienne. Cette unité qui est peu étendue dessine des bandes étroites vers l'est et le sud-est du bassin à l'aplomb des barres rocheuses sur les calcaires coquilliers de l'Eocène. Ce sol, également contenu dans l'unité 2, génère de forts ruissellements mais ne cède pas de charges solides.

Unité 2 : sols peu évolués non climatiques d'érosion, lithosoliques sur calcaires.

Ce sont des épandages de graviers, cailloux et rares blocs calcaires (> 20% en surface). Cette unité est surtout représentée en aval du bassin versant où prédominent des bancs calcaires coquilliers plus épais du Lutétien inférieur à moyen ainsi que sur les limites Est du bassin, sur les lumachelles. Cette unité ruisselle moins car un certain stockage hydrique est possible dans la nappe de gravats qui introduit d'autre part une forte rugosité limitant la vitesse des flux, elle fournit peu de charges solides.

Unité 3 : sols peu évolués non climatiques d'érosion, régosoliques, sur argiles gypseuses de l'Eocène.

Cette unité correspond aux berges en U, ou en V plus ou moins ouverts, des ravins entaillant sur plusieurs mètres les bancs argileux et marneux les plus friables. Cette unité souligne donc plus ou moins largement le réseau hydrographique du bassin versant. On y découvre essentiellement une mise en affleurement des argiles gypseuses (horizons C ou R). Les matériaux de ces berges présentent deux aspects : il s'agit, soit d'un matériau meuble avec une structure « soufflée », soit d'une pellicule superficielle gypseuse, sombre, consolidée, mais fragile et rapidement solubilisée dès les premières pluies. Cette pellicule ne joue donc aucun rôle direct dans la réorientation des flux hydriques superficiels. Les efflorescences gypseuses blanchâtres sont généralisées en bas des berges

Unité 4 : sols calcimagnésiques, saturés, bruns calcaires, modaux ou sols calcimagnésiques, carbonatés, bruns calcaires, épais sur calcaires et argiles de l'Eocène.

La pédogénèse est essentiellement influencée par des matériaux issus des bancs calcaires. Ce sont des sols meubles, épais (>50cm), à structure faiblement à moyennement développée, sans ou presque sans épandages d'EG (<20%). En profondeur on rencontre :

- soit des croûtes ou concrétions carbonatées au delà de 50cm, on passe alors du sous-groupe modal au sous-groupe "encroûté calcaire",
- soit des bancs marneux n'intervenant pas ou peu sur la pédogénèse du haut du profil.

Si la surface est sèche on n'observe pas ou très peu de fissurations superficielles. Si le terrain est labouré, les mottes se désagrègent rapidement et voisinent avec des pellicules de battance ou des pellicules structurales dont les premières strates sont sableuses fines à limoneuses: ils ruissellent rapidement et fortement mais fournissent peu de charges solides puisque la lame de ruissellement intercepte les énergies des gouttes de pluie.

Unité 5 : sols calcimagnésiques bruns gypseux sur calcaires et argiles de l'Eocène.

La pédogénèse est essentiellement influencée par des matériaux d'altération issus des argiles gypseuses. Les surfaces de ces sols sont foncées, ces sols sont meubles et généralement épais (>50cm). La structure du profil est moyennement développée quand le matériau est frais à humide. On y trouve peu d'épandages d'éléments grossiers mais des efflorescences blanchâtres sur les faces au vent des mottes et agrégats. La forte rugosité des surfaces labourées est un très bon indicateur de l'extension de cette unité, elle est liée au débit, par dessiccation, des mottes de labour en sous-structures polyédriques subanguleuses moyennes et fines très nettes. Il en résulte une faible cohésion inter-agrégat, un aspect "soufflé" des surfaces, une forte porosité et une masse spécifique faible. Les écoulements sont retardés car ces sols ont une forte rétention hydrique liée à leurs fissurations au moins en début de saison pluvieuse. Leurs structures résistent assez longtemps et maintiennent une forte rugosité superficielle, ils fournissent ainsi l'essentiel des charges solides du bassin car les lames ruisselantes ne les protègent pas contre l'énergie des pluies.

Unité 6 : juxtaposition des unités 2, 4 et 5, sans épandage superficiel de paillettes gypseuses.

La distribution en bandes parallèles de sols sur calcaire et sur argiles gypseuses correspond aux affleurements alternés de bancs argilo-marno-gypseux redressés larges et de bancs calcaires plus minces. Cette alternance explique la difficulté d'une cartographie en unités pures. Vers le nord du bassin versant, les pentes sont plus faibles aussi les unités 2 ou 4 et 5 couvrent-elles des surfaces équivalentes. Cette unité correspond aux paysages ondulés du piémont incisé par le ravinement mais pas encore par des bad-lands.

Unité 7 : juxtaposition des unités 5 et 1, 2, 4.

Dans cette juxtaposition, l'unité 5 prédomine. On note un épandage généralisé de paillettes gypseuses en surface et des caractéristiques structurales superficielles identiques, voire encore plus affirmées que celles des sols de l'unité 5. Ici, le recouplement des sommets de berges et l'enfoncement du réseau des ravins forment un paysage de bad-lands typique.

L'épandage superficiel des lames de gypse est un indicateur intéressant de la dynamique érosive des versants :

- Dans l'unité 6, le rajeunissement des sols se limite aux portions vives du réseau de ravines, les champs non ravinés ne subissent qu'une érosion en nappe modérée par la limitation des ruissellements et qu'un appauvrissement superficiel en argiles et limons fins. Ceci amène une accumulation superficielle relative en éléments grossiers peu altérables tandis que les éléments solubilisables concentrés en surface par le même processus finissent par disparaître.
- Par contre, dans les bad-lands de l'unité 7, le rajeunissement des sols par érosion renouvelle incessamment la charge superficielle de lames de gypse dégagées des roches sous-jacentes.

2.4.2 Hypothèses sur la dynamique du versant

La morphologie du bassin versant, le tracé de son réseau hydrographique, la nature et la distribution de ses couvertures pédologiques, permettent de formuler quelques hypothèses de travail quant à son comportement hydrodynamique et érosif. La dissymétrie des flancs anticlinaux, le rejet du réseau hydrographique vers le front des affleurements du flanc sud, l'utilisation des sols et les pédogénèses en résultant donnent, vers les deux rives du bassin versant, des ensembles aux comportements différents.

Ensembles rives droites

Cette surface est drainée par les réseaux hydrographiques B (cf. carte pédologique), C, D et E occupant 40%, soit 85 ha, du bassin versant vers ses limites ouest et sud-ouest. Là, chaque système hydrographique est divisé en deux parties :

- en amont, on a un éventail de chenaux fortement divergents et creusant intensément le piémont du djebel,
- en aval, les confluences donnent un chenal unique transférant écoulements et charges solides de l'amont; ce chenal fournit aussi sa propre charge arrachée soit aux berges, soit aux fonds de lit.

Les profils en travers des berges informent sur les modes d'érosion : les incisions de fond de lit en milieu homogène donnent des profils en U, les érosions de berge en V caractérisent plutôt des matériaux plus hétérogènes avec des abrasions de flancs plus importantes que le creusement des lits. Sur Fidh Ali, les profils en V irréguliers sont plus fréquents du fait de l'intercalation de bancs résistants (calcaires, marno-calcaires, grès) dans les marnes et argilites plus tendres.

En amont des réseaux B, C et E, la densification des ravins aboutit à la formation de « badlands » profondément incisés. Cette zone correspond aux argiles gypseuses à plus faibles intercalations de bancs calcaires de l'unité 7.

Les érosions de berges de ravins sur argiles gypseuses proviennent moins de l'abrasion hydrique qui est insignifiante en année peu pluvieuse que d'éboulements gravitaires des agrégats détachés d'un substrat très peu cohérent. De même, la seule dissipation des énergies des gouttes de pluies suffit, sur les parois les plus pentues, à déclencher ces mêmes éboulements.

Les abrasions de fond de lit dépendent de la résistance des couches rencontrées par les flux. Les dalles calcaires déterminent généralement des ressauts dans les profils en long, elles contribuent à restituer de l'énergie aux flux qui creusent des excavations en aval (marmites) d'où peuvent remonter latéralement de courtes ravines.

Sur cette rive de bassin, l'hétérogénéité des strates et de plus fortes pentes sont les facteurs qui entretiennent une forte érosion linéaire. Malgré cette forte érosion, les stocks de fond de lit sont insignifiants parce que les écoulements restent le plus souvent compétents. Les sols étant très argileux ($A+LF > 60\%$), les flux prennent facilement en charge des suspensions fines et des pseudo-solutions évacuées jusqu'au lac.

Ensembles rives gauches

Cette surface draine l'eau vers les réseaux A et vers la plus grande partie du réseau B. Elle occupe environ 60% du BV, (130ha). Bien que très cultivée, c'est la partie la moins érodée du bassin versant comme l'atteste une densité de ravins et ravines nettement plus faible. On note cependant deux zones actives:

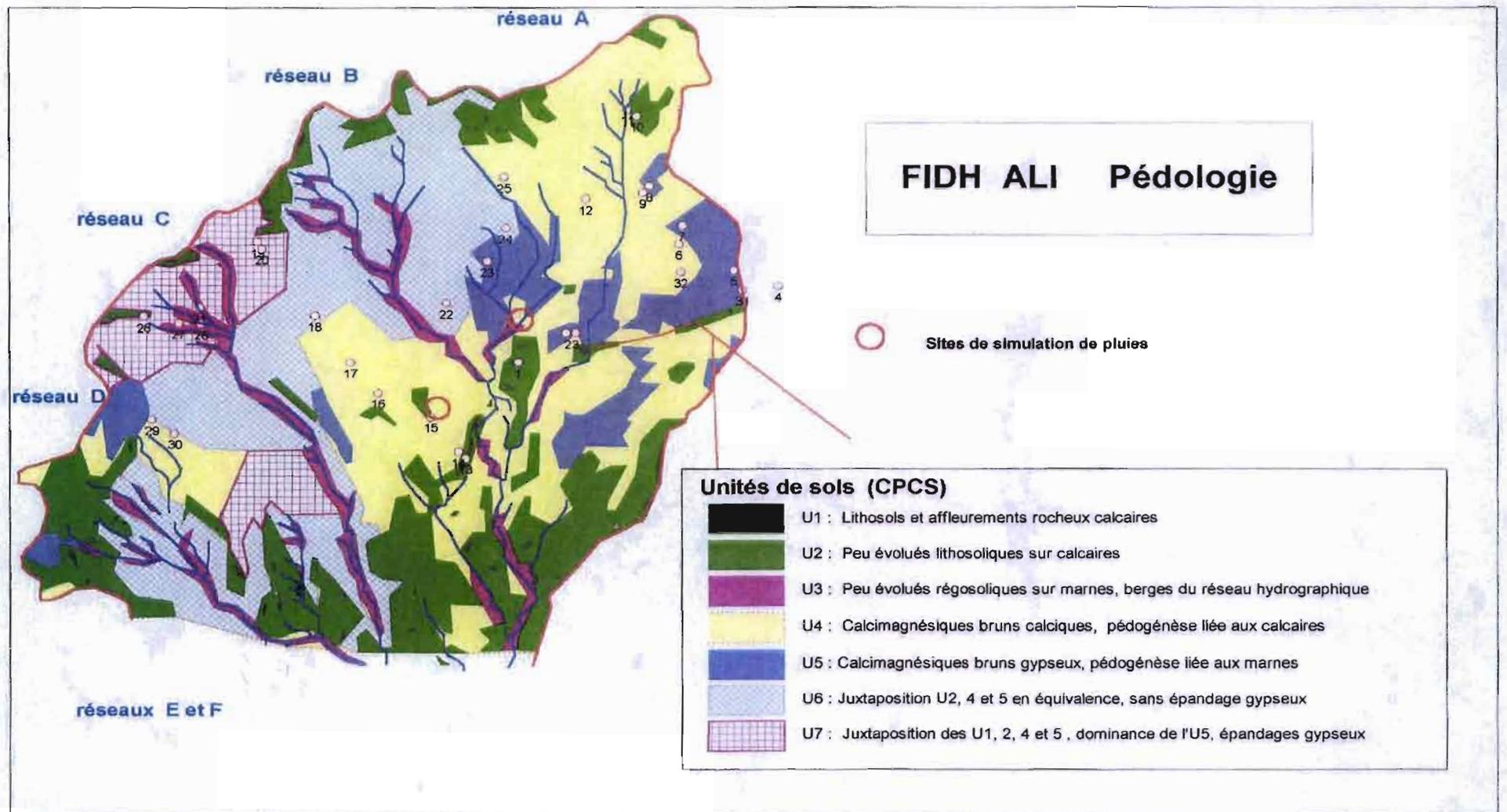


Figure 4 : Esquisse pédologique du bassin versant du lac collinaire de Fidh Ali (J.Collinet, P. Zante 1999)

- le piémont plus pentu du djebel sur une bande de quelque 250 à 300m occupée par les éventails de ravines des réseaux A et partie de B,
- près du lac, la zone également plus pentue de la confluence de l'axe drainant ces systèmes A et B avec celui collectant les systèmes C, D et E de la rive droite.

La quasi-totalité de cette partie de versant est cultivée en céréales à faible rendement (probablement <5 q./ha) après un travail du sol assez superficiel effectué par un passage rapide d'une charrue multidisques et d'un griffage au cultivateur. Les observations faites peu de temps après les labours et les premières averses montrent des matériaux possédant encore une assez grande perméabilité. La différence de comportement entre les sols des unités 4 et 5 a les répercussions suivantes :

- la forte dynamique restructurante et la fissuration estivale des sols bruns gypseux permettent le drainage des premières averses de la saison pluvieuse. Ces flux, réorientés latéralement au-dessus des horizons d'altération moins perméables, provoquent une érosion souterraine facilitée par la dissolution d'une partie des cristaux de gypse. Ce processus amène le creusement de galeries souterraines (« piping ») qui sont souvent à l'origine de ravines, par effondrement des voûtes des galeries.
- ce creusement de galeries est peu fréquent sur les sols bruns calcaires à texture plus grossière favorisant plus le colmatage des surfaces donc les ruissellements que les drainages profonds.

Au bilan, sur plusieurs années, deux processus combinent leurs effets: la mobilisation des terres sur les champs et sur les flancs de ravins et le transfert de ces matériaux détachés vers l'exutoire :

- en année peu humide, les processus de mobilisation dominant mais le transfert est nul ou peu important. La mobilisation des terres sur les champs est étudiée sous simulation de pluies dans notre analyse expérimentale. La part prise par l'éboulement gravitaire sur les flancs des ravins fera l'objet d'une autre étude, elle est en effet importante dans les unités 3, 5 et 7. Ainsi se constitue un stock de matériaux « mobilisables » sur champs et dans les lits de ravines et ravins, stocks non évacués car les débits des flux aréolaires et linéaires sont trop faibles pour être compétents.
- en année humide, les stocks délaissés de l'année précédente sont repris, il s'y ajoute les charges solides dues aux capacités abrasives des écoulements de l'année en cours. Tout va dépendre de la distribution des stocks sur les versants, donc des positions respectives des sols bruns calcaires à colmatage rapide des surfaces par rapport aux sols bruns gypseux, à colmatage plus tardif et, enfin, aux affleurements rocheux imperméables et non érodibles. Les premiers fournissent peu de charges solides et beaucoup de ruissellements, les deuxièmes de fortes charges et l'ensemble du flux est transféré, éventuellement avec dilution, sur le troisième, vers l'exutoire.

2.5. Occupation et utilisation des terres

Les potentialités d'une région sont liées à ses caractéristiques physiques mais aussi et surtout à la façon dont l'homme s'y est installé et utilise le milieu pour toutes productions végétales et animales utiles. C'est de la combinaison de ses différents modes d'utilisations que sortent réussites ou échecs, ces derniers étant amplifiés par le risque climatique toujours important dans le monde méditerranéen.

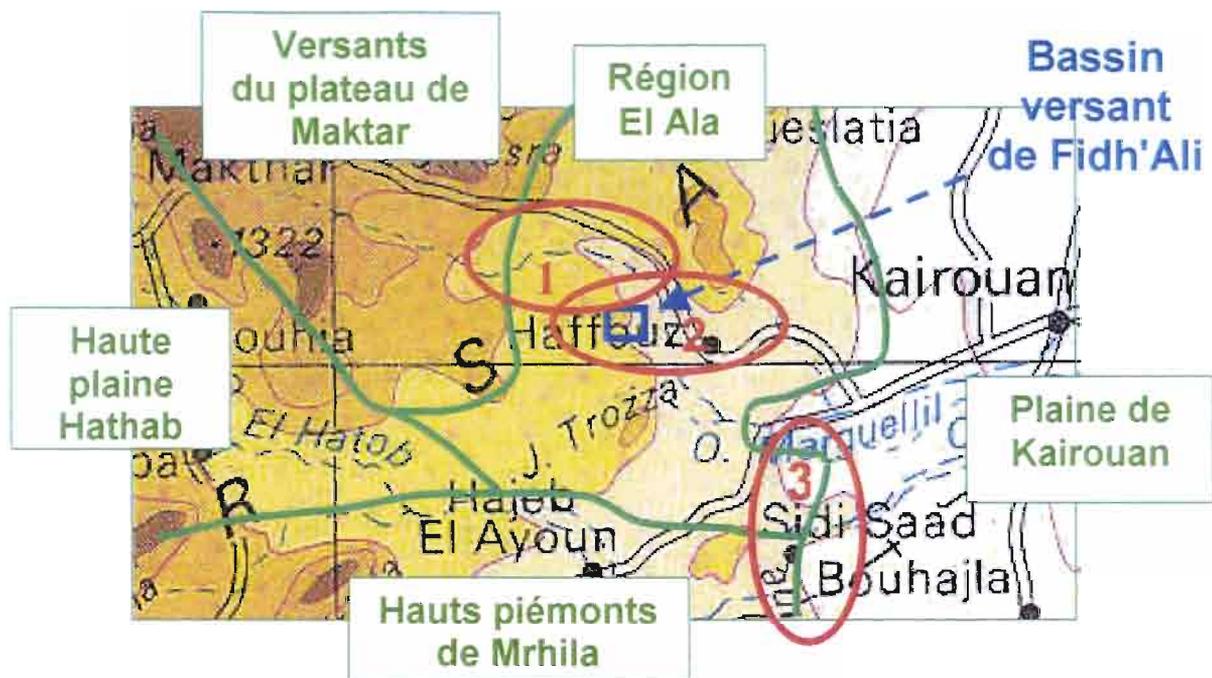


Figure : 5 : Grandes régions naturelles et terroirs voisins du bassin versant de Fidh Ali :
1 = Chérichira Houfia, 2 = Jebbes – Haffouz, 3 = Ouled Khalfallah

Le bassin versant de Fidh'Ali s'inscrit entre les terroirs de Chérichira (n°1) et Jebbes (n°2). Cette zone assez accidentée (terres ed epentes > 60%) est située entre les reliefs des retombées du plateau de Makhtar au nord - ouest, de Hathab et les piémonts de Mrhila à l'ouest et au sud , et la plaine très peu déclive de Kairouan à l'est.

2.5.1. Démographie, tenure des terres, occupation des sols

Tableau I : Démographie de la grande région d'El Ala (d'après les CRA concernés)

	1) Chérichra -Houfia	2) Jebbes – Haffouz (dont Fidh Ali)	3) Ouled Khalfallah
Population (hab.)	8840	8440	7205
Ménages (et taille)	1645 (5)	600 (6)	585 (6)
Nombre de douars	36	10	22
Densités (hab./km ²)	47	86	104

Les densités vont de 50 à 100 hab./km², l'habitat est particulièrement dispersé dans le terroir de Chérichira.

La structure foncière dans ces zones de dorsale à fort déficit hydrique est complexe : elle comporte des terres privatives, des terres sans immatriculation et d'autres en indivision. Les terroirs de Chérichira et de Jebbes présentent des tenures voisines (fig. 6) avec 80% de parcelles de moins de 10ha dont une moitié de moins de 5 ha. Ce mode de tenure aurait dû faciliter toutes applications de systèmes mécaniques de CES (corrections de ravins, banquettes , murettes etc..) mais une incitation insuffisante auprès des populations n'a pas permis d'enrayer à temps le développement de ravinelements en terres marneuses.

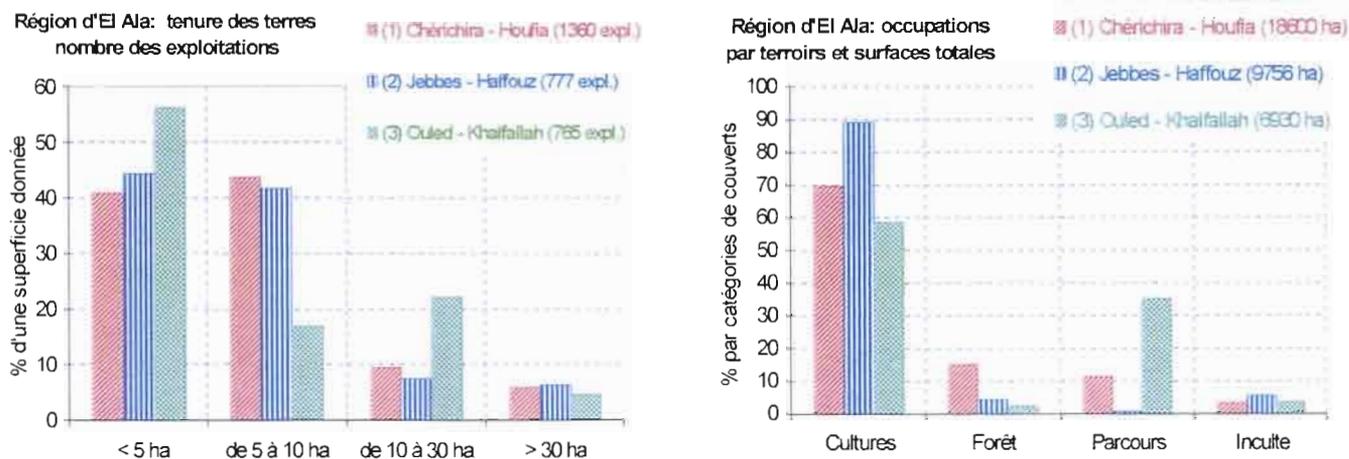


Figure 6 : trois terroirs de la région naturelle de El Ala, tenure des terres et occupation des sols

Les terroirs de Chérichira et de Jebbes sont surtout consacrés aux productions végétales. Le terroir de Ouled Khalfallah garde 35% de terres de parcours pour les ovins auxquelles s'ajoutent probablement les vaines pâtures sur terres emblavées. On note que les terres qualifiées d'incultes (affleurements rocheux, sols squelettiques) sont très peu étendues sur les 3 terroirs, ceci ne correspond pas à l'extension des sols très peu épais impossibles à labourer au soc et travaillés superficiellement au disque, cela donne une idée de la forte pression foncière existant dans la zone et de la mauvaise qualité de bien des terres classées en « cultivables ».

2.5.2 Productions végétales et animales

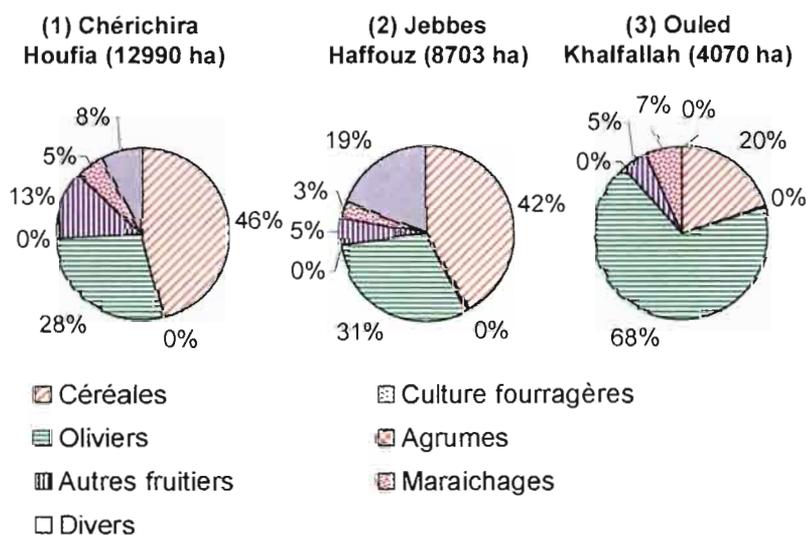


Figure 7 : production végétale

Le terroir de Chérichira (fig.7) a une occupation mixte céréalière (46%) et arboricole (46%), dont 28% d'oliviers. Celui de Jebbes est céréalière (42%), arboricole (39%) et 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 5 q/ha, en année normale. Le terroir d'Ouled Khalfallah est un exemple typique d'une forte reconversion arboricole s'effectuant au dépens des emblavures avec 68% d'oliveraies.

L'élevage ovin (fig. 8) occupe la première place avec toujours plus de 80% du bétail dans les trois terroirs et des charges excédant souvent les 50 têtes /ha. C'est traditionnellement un élevage se nourrissant sur des parcours naturels et en vaine pâture voire dans les emblavures destinées au fourrage en années sèches.

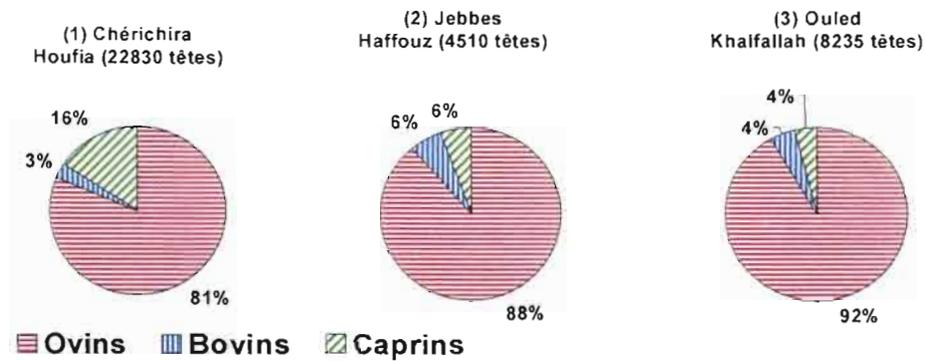


Figure 8 : production animale

D'après cette analyse, les systèmes de productions varient en fonction du relief, donc des sols, et aussi beaucoup de la disponibilité en eau.

Le système de « polyculture-élevage ovin en sec » nécessitant de grandes parcelles (en moyenne 25 ha) domine loin des grands oueds et des plus fortes densités de puits, donc plutôt vers l'ouest.

Un second système que l'on pourrait appeler « polyculture vivrière diversifiée » avec combinaison de céréales + fourrage en petites superficies (<5ha), de cultures maraichères irriguées, d'une jeune arboriculture irriguée encadrée et un 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, malheureusement assez souvent temporaires, de la zone.

Il serait cependant abusif de parler ici de réel système irrigué comme c'est le cas, dans la plaine de Kairouan, où le système s'est construit autour des possibilités offertes par les sondages et les quelques milliers de puits répertoriés dans cette plaine, dont 850 dans le seul interfluve Merghellil – Zéroud à l'ouest de Kairouan.

TROISIEME PARTIE

METHODES

Notre objectif est une prévision des risques érosifs sur les versants d'un bassin dont l'exutoire est un lac. La procédure est une combinaison d'informations expérimentales sur l'érosion avec des données issues d'évènements naturels. Une partie de l'information provient de l'analyse des pluies naturelles pour pouvoir quantifier leurs caractéristiques énergétiques, choisir les protocoles expérimentaux réalistes de simulation de pluies sur deux sites représentatifs des terres cultivées du bassin versant. De cette confrontation est sorti un modèle de prévision des érosions aréolaires sur une partie de versants cultivés.

3.1. La simulation de pluies

Le matériel utilisé, sa mise en oeuvre et les données qu'il permet d'obtenir ont été décrits dans un travail similaire récent (Collinet J., Testouri Jebari S., 2001). Nous n'en ferons donc qu'un résumé ici.

Sous simulation de pluies, les recherches sur la genèse des ruissellements et sur la mobilisation initiale des terres érodibles partent de deux séries d'analyses:

- celles établissant les relations entre les intensités des ruissellements et les intensités des pluies,
- celles suivant l'évolution des charges solides en fonction des intensités des ruissellements.

Ces deux types d'analyses s'appliquent à toutes les situations rencontrées (sols, rugosités liées à son travail, développement de différents couverts végétaux, éventuellement épandages superficiels d'éléments grossiers).

Les informations expérimentales ainsi dégagées peuvent facilement être couplées avec les données provenant de l'analyse des hyétogrammes des pluies naturelles (cf.§ 4.1.).

3.1.1. Matériel

Le simulateur de pluies utilisé est du même type que celui mis au point par Asseline et Valentin (1978) et perfectionné ensuite par les mêmes inventeurs ainsi que par les équipes qui le mirent en oeuvre ultérieurement dans différents pays, dont la Tunisie : Asseline, 1984 - Escadafal, 1984 - Asseline, Escadafal, Mtimet, 1986 - Mtimet 1987 - Asseline, Bahri, Hentati, Mtimet, Pontanier 1989 - Agrebaoui, Attia, Derouiche, Dridi, Mtimet, Pontanier, 1996 - Collinet, Zante 1999 - Batita 2000.

Cet appareil comporte un système d'aspersion oscillant délivrant différentes intensités de pluies (de 15 à 140 mm.h⁻¹) sur une parcelle de 1m², enfoncée de 5 à 8 cm dans le sol et munie d'un canal de ruissellement.

L'exutoire du canal fournit deux types d'informations : les ruissellements et la mobilisation initiale des terres exportables. Les intensités de ruissellement peuvent être enregistrées soit en continu, par un système limnigraphique, soit de façon discontinue, par la mesure de quantités d'eaux prélevées pendant des périodes connues. La première procédure, adoptée en Tunisie, fournit des hydrogrammes de ruissellement. La prise d'échantillons d'eaux de ruissellement permet de suivre l'évolution des charges solides en fonction du temps ou turbidigramme.

Les protocoles expérimentaux s'efforcent de concilier:

- la simulation d'événements climatiques respectant les conditions climatiques locales et notamment l'agressivité des averses repérée par leurs abaques I/D/F (§ 4.1.),
- l'analyse du comportement de terres cultivées dans des situations représentatives de couverts ou d'usages différents,
- les comportements des sols les plus largement représentés sur le bassin.

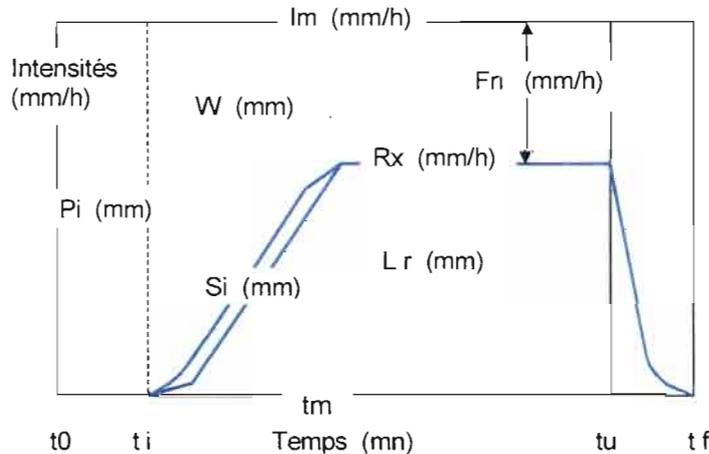
3.1.2. L'hydrogramme de ruissellement et d'infiltration

L'hydrogramme de ruissellement de la figure 9 est la base de toutes informations traitant de l'hydrodynamique du sol placé dans une situation donnée et soumis à un événement pluviométrique particulier.

Le temps est porté en abscisse. En ordonnée figurent toutes les intensités ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) des termes du bilan qui sont:

- la ou les intensité(s) de l'averse simulée I à l'instant t ,
- l'intensité du ruissellement $R_{t,}$,
- son inverse $F_t = I - R$ qui est l'intensité d'infiltration.

L'hydrogramme de ruissellement présente quatre phases qui sont:



- la phase d'imbibition, de l'origine t_0 à t_i pendant laquelle tombe une hauteur de pluie P_i ne donnant aucun ruissellement parce qu'en tous points de la parcelle, $I < F$, situation permettant l'infiltration d'une lame W_i (mm). Il se forme ensuite des flaques là où $I > F$, c'est le stockage superficiel S_i (mm) et on a ainsi:

$$P_i = W_i + S_i$$

Figure 9 : hydrogramme théorique de ruissellement et d'infiltration obtenu sous simulateur de pluies.

- la phase de régime transitoire de t_i à t_m , lorsque la capacité d'infiltration devient inférieure à I , les flaques deviennent coalescentes, débordent et communiquent avec le canal de ruissellement. L'intensité d'infiltration du sol continue à décroître jusqu'à une valeur minimum F_n .
- la phase de régime permanent de t_m à t_u , pendant laquelle, au régime permanent minimum d'infiltration F_n , correspond un régime permanent de ruissellement R_x tel que $F_n = I - R_x$,

- le **tarissement** des écoulements en fin de pluie, de **tu** à la fin du ruissellement **tf**, qui est enregistré difficilement sur 1 m² de parcelle. Il constitue la phase de vidange quantifiable par la lame de détention superficielle récupérable **Dr** (mm) qui est la résultante de l'épuisement du ruissellement et de ce qui continue à s'infiltrer. Pendant cette phase, la plupart des éléments pris en charge par le ruissellement se dépose sur la parcelle.

Ce diagramme fournit, en outre, différentes hauteurs de lame d'eau qui sont:

- **Pu** hauteur totale de la pluie, encore appelée "pluie utile",
- **Pi** pluie d'imbibition déjà définie,
- **Lr** lame ruisselée,
- **W** lame infiltrée.

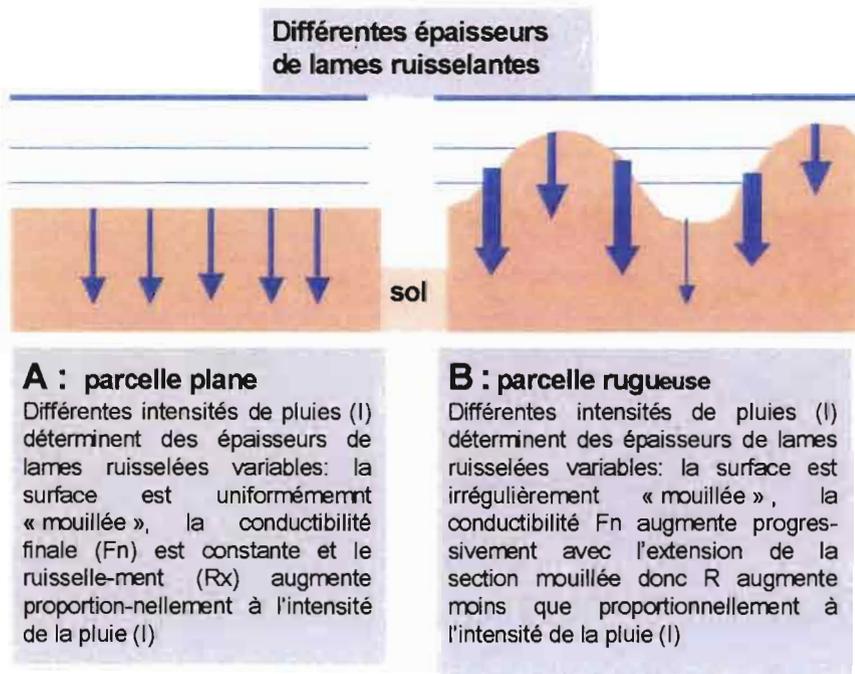
On calcule aussi facilement le coefficient de ruissellement utile:

$$Kru \% = 100(Lr + Dr) / Pu.$$

3.1.3. Les comportements hydrodynamiques superficiels

Les travaux concernant l'influence des intensités des pluies sur **Fn** ou **Rx** donnent souvent des conclusions contradictoires. Les interprétations apportées par Lafforgue et Naah dès 1976 et sur lesquelles s'appuient les développements qui suivent ont été largement vérifiées par d'autres expérimentateurs en simulation de pluies: Collinet, Lafforgue 1975, 1979 - Lafforgue, Casenave 1980 - Lafforgue 1977 - 1981 - Collinet et Valentin 1979, 1985 - Casenave 1982 - Albergel, Bernard 1984 - Valentin 1981, 1985 - Chevallier 1986 - Escadafal, Mtimet, Asseline 1986 - Albergel 1987 - Thébé 1987 - Casenave et Valentin 1988 - Collinet 1988.

De ces travaux résulte le constat que, sur parcelle, l'intensité d'infiltration minimale **Fn** ou l'intensité maximale de ruissellement à régime constant **Rx** varie avec l'intensité de la pluie.



Cette dépendance peut paraître étonnante, elle traduit en fait la variabilité latérale de la conductivité hydraulique saturée **K_{sat}**, effet facilement détecté sur une parcelle de simulation de pluies où elle équivaut à l'intensité finale d'infiltration à régime constant **Fn** mesurée au sortir d'une parcelle où l'on supposera un comportement infiltrométrique homogène en tous points.

Figure 10 : relations rugosité - conductivité hydraulique saturée sur parcelle de simulation de pluies

Cette conductivité saturée locale est plus difficile à détecter au champ du fait de l'effet intégrateur d'une plus grande surface.

Cette variabilité, schématisée sur les deux surfaces de la figure 10, s'explique de la façon suivante

- **Cas A** Si K_{sat} est constante, c'est que l'intensité d'infiltration à régime constant F_n , et fonction du déficit de saturation du sol, devient égale à K_{sat} lorsque, en tous points de la parcelle uniformément mouillée sous une lame ruisselante, I_m devient supérieure à K_{sat} . Cette situation A correspond à celle de surfaces formant très rapidement des organisations pelliculaires, devenant planes, et ayant, pour une intensité d'averse constante, une lame ruisselante d'épaisseur constante en tous points.
- **Cas B** si K_{sat} varie d'un point à un autre, le nombre de sites où $I_m > K_{sat}$ augmente jusqu'à une intensité maximale où I_m deviendrait partout supérieure à K_{sat} . C'est le cas de surfaces de sols irrégulières, de sols travaillés, à forte activité biologique, à couvert végétal dense donc de toutes parcelles rugueuses et de ce fait inégalement immergées sous une lame ruisselante pour des intensités d'averses croissantes.

La traduction graphique de ces comportements apparaît sur la figure 11. Sur une parcelle donnée (sol, organisations superficielles, pente topographique, couverture végétale, pratique culturale) on a un faisceau de droites $F_n(I)$ correspondant à différents états d'humectation antérieure des sols et dont les pentes "a" des droites de régression de F_n en I varient en raison des variations de la conductivité hydraulique. C'est ainsi que dans la relation $F_n = aI + b$:

- des pentes "a" faibles témoignent d'un contrôle important de l'infiltrabilité par des organisations imperméabilisant la surface.

- des pentes "a" fortes témoignent du maintien d'une grande infiltrabilité superficielle résultant d'une forte hétérogénéité des conductivités sur la parcelle.

L'intersection de la droite $F_n(I)$ avec la bissectrice matérialisant une réaction d'infiltrabilité totale ($F_n = I$) détermine, par projection sur l'axe des abscisses un point correspondant à l'intensité minimale de la pluie provoquant les premiers ruissellements.

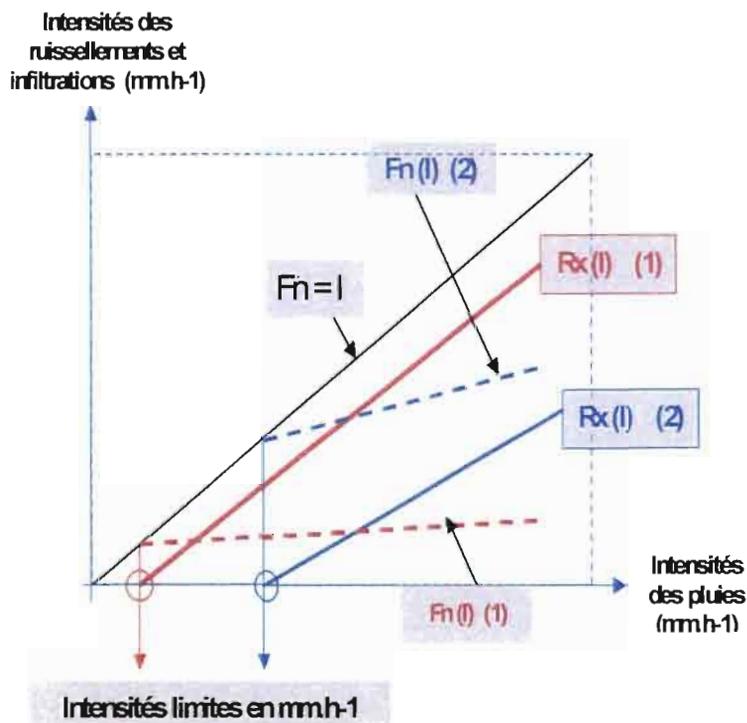


Figure 11 : relations $R_x(I)$ et $F_n(I)$ et obtention des intensités limites des averses provoquant les premiers ruissellements.

Cette intensité limite peut aussi être déterminée expérimentalement en diminuant progressivement l'intensité de la pluie jusqu'à l'arrêt du ruissellement.

Sur ce graphique, on constate aussi qu'aux faisceaux de droites représentant les relations $F_n(I)$ correspondent autant de faisceaux de droites se rapportant à la relation $R_x(I)$

3.1.4. La mobilisation des terres érodibles

Les évolutions des charges solides avec le temps décrivent des courbes dont les aspects informent sur les modalités des pertes en terre pour différentes situations culturales et évènements pluvieux, chacune des situations fournit un enregistrement "typé" de l'évolution des charges solides tout au long de l'averse. (fig. 12).

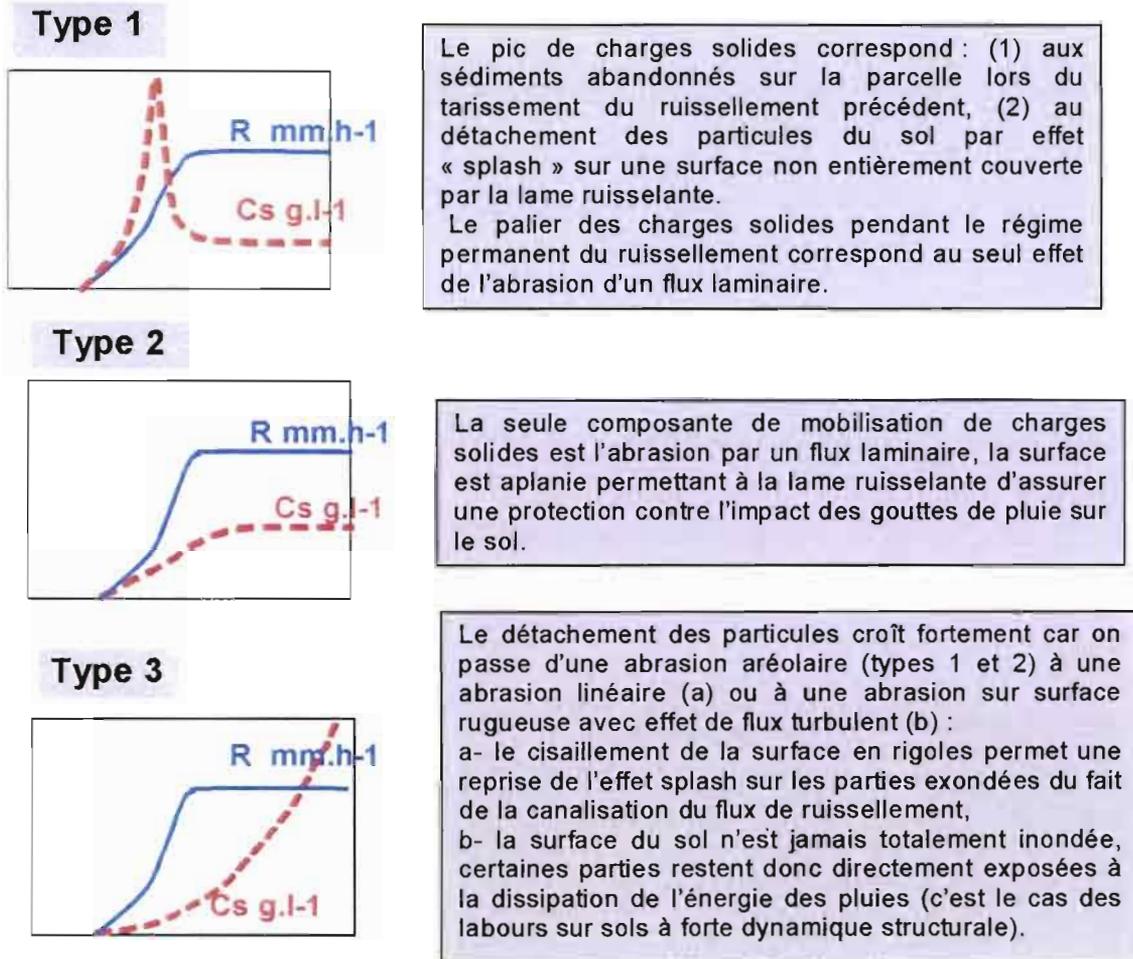
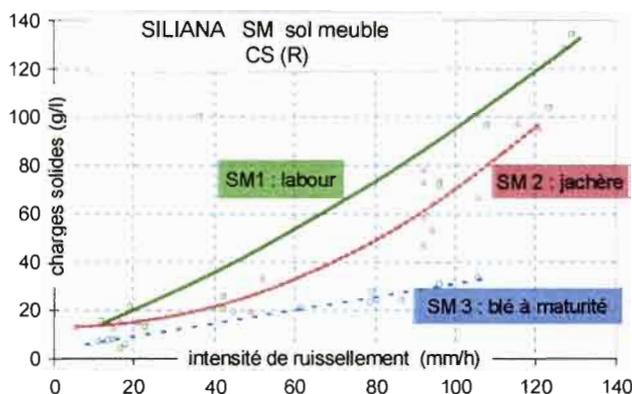


Figure 12 : différents scénarios sur l'évolution des charges solides en fonction du temps.

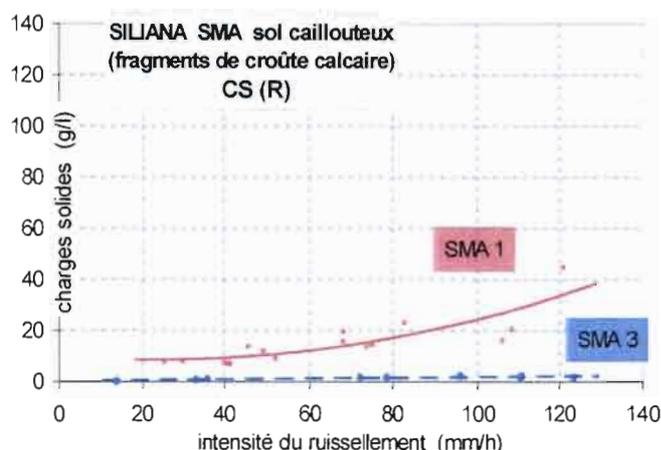


Cette typologie est une des conclusions de travaux réalisés depuis de nombreuses années, sous pluies simulées, sur différents continents (Collinet, Lafforgue, 1975 - Collinet, Lafforgue, 1979; Valentin, 1981; Collinet, Valentin, 1979, 1985 ; Collinet 1988; Collinet 1999, Collinet, Zante, Agrébaoui, Dridi 1999).

Figure 13 : comportement érosif sur sols calcimagnésiques bruns calcaires meubles

Si on exprime ensuite ces charges solides en fonction des intensités de ruissellement, on obtient une information synthétique sur l'évolution de l'érosion en combinant les différentes causes intervenant simultanément dans ce processus : détachabilité liée à l'énergie des pluies, à l'abrasion du flux, charges exportées donc compétence du flux en fonction de sa vitesse et de sa charge et de son mode d'écoulement (laminaire, turbulent).

Les graphiques des figures 13 et 14 extraits d'un travail antérieur (Collinet J., Testouri Jebari Sihem - 2001) montrent différents comportements érosifs de terres cultivées dans le semi-aride de Tunisie.



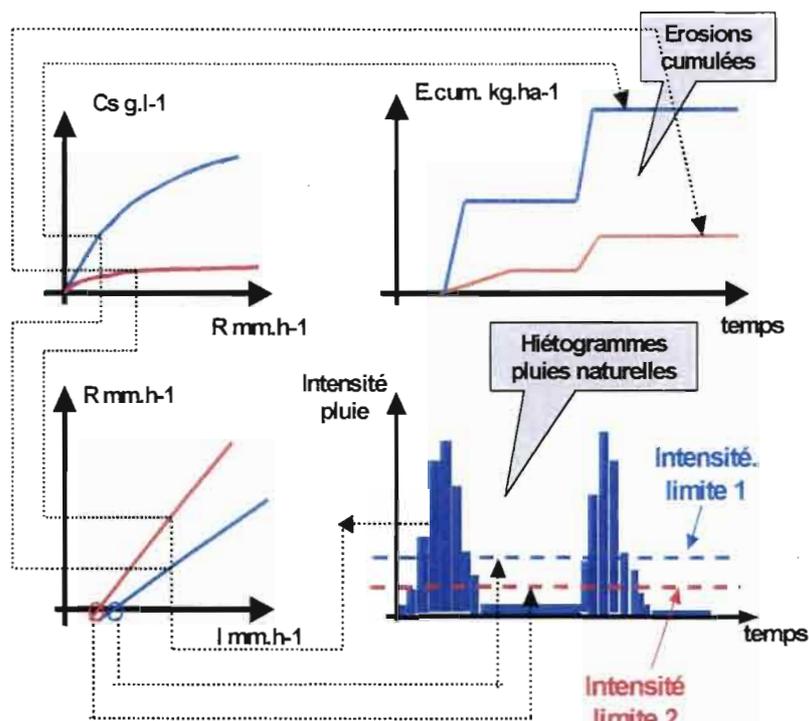
Les deux graphiques représentent les évolutions des charges solides en fonction des intensités de ruissellement de terres cultivées dans la région de Siliana (Tunisie semi-aride). Les sols sont calcimagnésique bruns calcaires limono-argileux, la série SM correspond à des sols meubles profonds, la série SMA à des sols graveleux et caillouteux sur croûtes calcaires.

Les parcelles SM1 et SM2 montrent une situation dangereuse d'exacerbation des abrasions avec l'intensification des écoulements.

Figure 14 : exemple de comportement érosif sur sols calcimagnésiques bruns calcaires à forte charge et épandage superficiel d'éléments grossiers.

Les parcelles SM3, SMA1 et SMA3 illustrent une érosion faible, voire une indépendance entre l'abrasion et l'écoulement (SMA3), traduisant l'effet protecteur des épandages de fragments de croûte calcaire accumulés relativement en surface au dessus du profil meuble.

3.2 Du diagnostic à la prévision des risques : le modèle MOBIL



Les informations précédentes précisant les relations $R(I)$ puis $Cs(R)$ sont utilisées pour calculer les érosions aréolaires en procédant de la façon suivante :

- établissement des relations $R(I)$ et $Cs(R)$ sur les parcelles d'un site représentatif d'une situation donnée, détermination de l'intensité limite I_{lim} de la pluie provoquant les premiers ruissellements,

Figure 15: routine du modèle MOBIL

- identification des averses naturelles ayant des intensités égales ou supérieures à l'intensité limite du site (averses efficaces),
- calcul (tableur) des intensités de ruissellements satisfaisant la relation $R(I)$,
- calcul des charges solides satisfaisant la relation $Cs(R)$ des averses efficaces,
- calcul des débits solides, produits des charges par les intensités de ruissellement

$$Q_s = C_s \cdot R,$$

- calcul des érosions partielles en tenant compte des durées des averses efficaces; le cumul des érosions partielles donnant une érosion globale pour un événement ou une série d'évènements.

Les connexions du diagramme de la figure 15 constituent la routine du modèle M O B I L (comme "mobilisation" initiale des terres érodibles).

Par rapport à l'érosion globale, et du fait de l'exiguïté de la parcelle, toutes les composantes de l'érosion ne pouvant pas être mesurées ; en effet, si la mobilisation initiale des terres érodibles (érosion aréolaire) est correctement caractérisée, le dispositif expérimental ne peut pas mettre en évidence l'abrasion liée à un flux canalisé parce que ce dernier ne peut pas atteindre sa vitesse limite sur 1m de parcelle, longueur sur laquelle il ne possède ni capacité abrasive ni compétence suffisantes pour caractériser les effets d'une érosion linéaire. Les effets d'une abrasion de flux turbulent sont par contre bien mis en évidence sur parcelle

Une autre opération de recherche sur l'érosion linéaire et ses effets est en cours sur deux bassins versants cultivés sur sols marneux, nous l'évoquerons en fin de ce travail.

QUATRIEME PARTIE

RESULTATS , DISCUSSIONS

Résultats et commentaires s'articulent de la façon suivante:

1. analyse des averses naturelles,
2. présentation des sites et du protocole expérimental
3. étude des relations $R(I)$ et $C_s(R)$ d'après les données obtenues sous pluies simulées et calcul des intensité limite I_{lim} .
4. transfert "pluies naturelles", calcul des intensités de ruissellement satisfaisant les relations $R(I)$ et $C_s(R)$,
5. calcul des érosions partielles et cumulées pour toutes situations,
6. comparaison des comportements concernant l'érosion aréolaire à l'échelle du versant .

4.1. Analyses des averses naturelles

En simulation de pluies, les protocoles expérimentaux doivent être réalistes en imitant le mieux possible les caractéristiques énergétiques des pluies naturelles notamment en ce qui concerne les effets d'évènements exceptionnels qui sont ceux qui marquent le plus le paysage.

La sélection de ces évènements pluviométriques passe par l'utilisation d'analyses statistiques effectuées sur les données de stations météorologiques. Pour cela, on utilise les abaques Intensité / Durées / Fréquences telles que celles qui furent calculées sur Kairouan

La figure 16 présente les durées des averses pour toutes intensités ayant des périodes de retour de 1, 5, 10, 20 et 50 ans. Ces abaques proviennent des travaux de J. Guiscafré (1978) repris en

annexe B6 du « Guide de Conservation des Eaux et du Sol (DCES - PNUD/FAO-TUN / 86 / 020 de 1995).

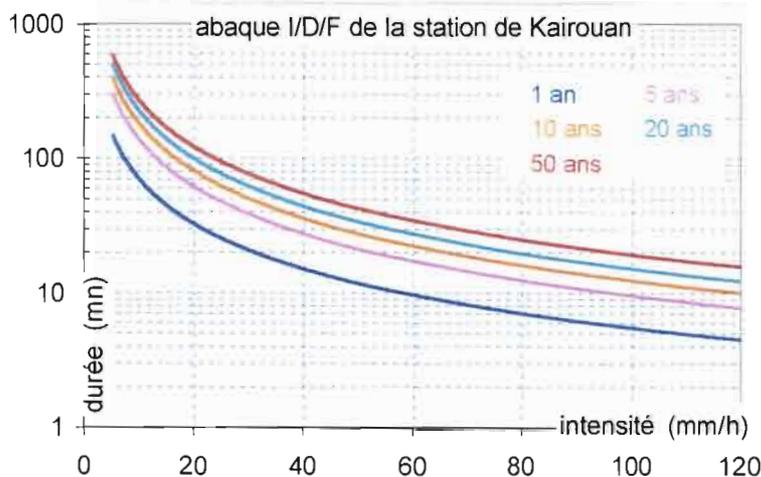
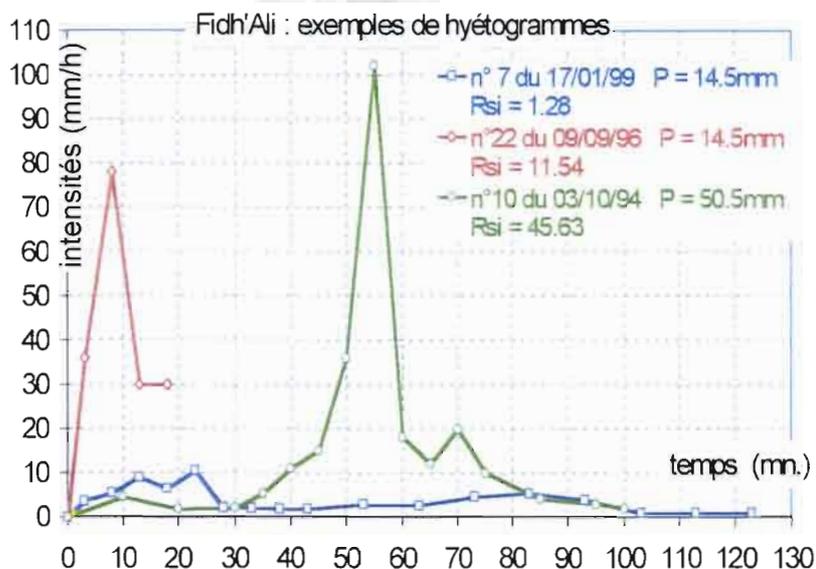


Figure 16: Abaques I/D/F des pluies sur la station de Kairouan

La modélisation a besoin, d'autre part, des enregistrements précis des variations des intensités de chaque averse efficace, c'est à dire susceptible de provoquer les premiers écoulements.

Les enregistrements pluviographiques de chaque retenue collinaire et leurs dépouillements par le programme PLUVIOM (I R D ex-ORSTOM, équipe du Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier, J.F. Boyer, A. Crespy, C. Dieulin et al.- 1994) permettent de dresser les



hyétogrammes dont trois exemples sont représentés sur la figure 17 pour illustrer la disparité des événements rencontrés : l'averse n°10 du 3 octobre 1994 fut particulièrement agressive, son érosivité représente d'ailleurs 50% des valeurs cumulées sur l'année 1994-95, ce pour une hauteur de 50,5mm. Les averses n°22 de 1996 et n°7 de 1999 confirment, pour des événements isolés l'indépendance des hauteurs de pluies et de leurs érosivités.

Figure 17: Fidh'Ali, exemples de hyétogrammes d'après PLUVIOM (Hydrologie IRD Montpellier - 1994)

Concernant l'érosivité, rappelons que R. Wischmeier W.H. (1959) a calculé un « index » de pluies qui caractérise leur susceptibilité à éroder la surface du sol. Cet index fut établi statistiquement à l'aide de régressions menées sur plus de 10 000 résultats provenant de parcelles d'érosion appartenant à 45 sites du Middle Ouest américain. Ce paramètre est encore largement utilisé soit individuellement soit dans les équations de prévision des pertes en terre (Wischmeier W.H. et Smith D.D. - 1962).

S'il était judicieux d'émettre des doutes sur le caractère « universelle » de l'équation des pertes en terres, telle qu'elle était qualifiée à l'époque, l'utilisation de l'« index pluie » a posé moins de problèmes car il a été validé depuis une trentaine d'année par des expériences menées un peu partout dans le monde.

Rappelons donc que cet « indice d'érosivité R » est le produit de l'énergie que disperse au niveau du sol chaque segment d'une séquence pluvieuse par son intensité maximale pendant un laps de temps donné. Sa formulation est la suivante :

$$R = k \cdot E \cdot I_t \max$$

avec E = énergie cinétique en joules. mm de pluie/m²

$I_t \max$ = intensité maximale en mm/h, pendant un laps de temps « t », ,

k = constante dépendant du système d'unité.

Dans le système international (si), et après simplification, Rsi devrait s'exprimer en système international (MKpS) en joules /m². s. Dans cette étude on lui a substitué, par commodité, le mégajoules / hectare .heure., soit Mj/ha.h, dont la conversion en unités anglosaxonnes est :

$$R_{us} = 0.587 R_{si}$$

Cette formulation soulève deux problèmes :

- celui des énergies cinétiques dispersées par les averses selon les régions et l'altitude, car le diamètre et la densité des gouttes de pluies arrivant au sol peuvent varier malgré des hauteurs de pluies voisines. Il est important de vérifier expérimentalement ces paramètres tout au long d'une année en des sites représentatifs de lieux où l'on prévoit des risques érosifs. De nombreuses méthodes existent C. Valentin (1979), J. Asseline, C. Valentin (1980), adaptations de celle de N.W. Hudson (1973).

- celui de la **durée de lecture des intensités maximales** ; les durées généralement proposées sont de 30 minutes, ceci peut être correct pour un régime climatique de mousson (Asie, Afrique intertropicale) où des régimes homogènes s'instaurent « assez » longuement, cela n'est plus valable pour les régimes méditerranéens cycloniques de saison fraîche ou orageux

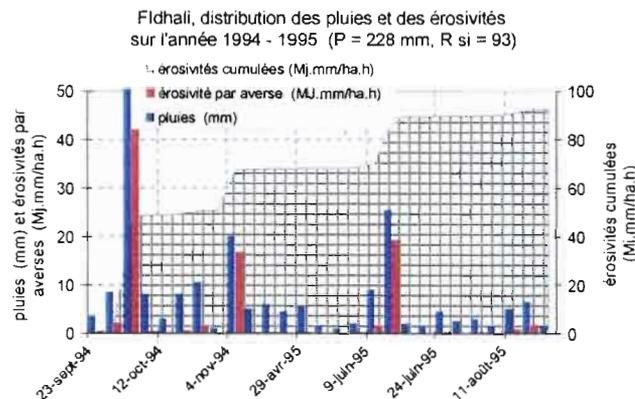
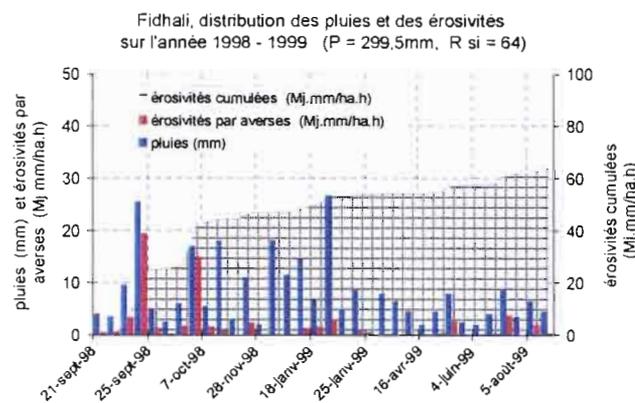
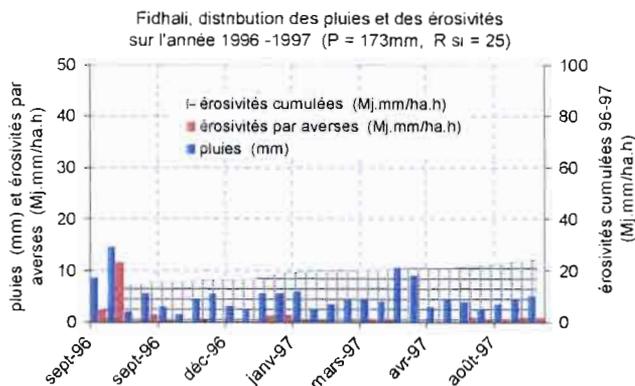


Figure 18: Fidh'Ali, trois années à érosivités faibles, moyennes et fortes

4.2. Sites et protocoles expérimentaux

4.2.1. Les sites

Neuf parcelles de simulations de pluies ont été installées en mars et avril 1999 sur deux sites expérimentaux du bassin versant du lac collinaire de Fidh'Ali. Ces sites permettent de caractériser les comportements de sols dont les unités occupent les deux tiers du bassin (fig.4). Ce sont les sols calcimagnésiques bruns calcaires à tendance verticale sur marnes gypseuses

de saison chaude où les intensités varient fortement sur des périodes courtes. Dans ce second cas, il faut des lectures plus courtes pour pouvoir apprécier et utiliser les « pics d'énergie » à l'origine des plus fortes abrasions. C'est la solution du logiciel PLUVIOM avec des lectures de I.max. sur 5 minutes pendant les 45 minutes contenant le pic d'intensité puis sur 10 minutes en deçà et au delà de cette période. (fig.17)

Dans cette étude, les analyses effectuées sur les hauteurs et les intensités d'averses permettent de connaître leurs énergies (Rsi).

On ainsi pu retenir, entre 1993 et 2000, trois années agronomiques d'agressivités bien tranchées:

- agressivité faible du 01/09/1996 au 31/08/1997 avec P. = 173 mm, R.si = 25,
- agressivité moyenne du 01/09/1998 au 31/08/1999 avec P. = 299 mm, R.si = 64,
- agressivité forte du 01/09/1994 au 31/08/1995 avec P. = 228 mm, R.si = 93.

La distribution des hauteurs et des érosivités individuelles puis cumulées sont représentées sur les graphiques de la figure 18. La faiblesse des relations entre hauteurs et érosivités des précipitations apparaît nettement en comparant les années moyennement et fortement érosives. Ces trois années - références nous ont permis de construire le modèle.

(unité 5, et juxtapositions 6 et 7) et les sols calcimagnésiques bruns calcaires modaux sur calcaires marneux (unité 4).

Site 1 : sol calcimagnésique brun calcaire, vertique, sur marnes gypseuses, FDA 1 à 4

Situation générale

Champ emblavé, labour effondré laissant des enrayures de 60 à 65 cm de période et de 3 à 4cm d'amplitude. Pente générale du site de 3,8 à 4,2%.

Surface du sol

Deux différenciations : (a) 80% de pellicules structurales + mottes de labour en cours de désagrégation et 20% de pellicules de battance (parcelle FDA1) - (b) situation inverse : les pellicules de battance prédominent et il y a peu de mottes résiduelles (FDA3).

La distribution de ces deux zones dépend de la texture donc de la position topographique : la texture plus grossière des ensellements de versant et des axes de drainage favorise la battance sur des interstratifications de sédiments, les textures plus fines du reste de la forme donnent des pellicules structurales fragiles et perméables sur des horizons remaniés et poreux.

Les jachères proches des ravines ou sur pentes >7% sont couvertes de 40% d'adventices de 15 à 20cm de hauteur, le reste est un sol nu à pellicule structurale finement fissurée (FDA 4).

Le blé est très clairsemé et n'atteint que 20 à 30 cm de haut (avril), ce qui laisse supposer un rendement << 5 q/ha.

Profil de sol caractéristique du site (FDA 1 à 4)

Profil "perturbé" sur 13 à 17cm par le labour, la roche mère en place apparaît à -85cm, on distingue les horizons suivants:

0/2cm: Ap 11, sec, brun jaunâtre en sec et en humide (10YR5/4), limono-argileux, structure fragmentaire très développée grenue et grumeleuse de 4 à 6mm et de 10 à 15mm, agrégats fermes, poreux interstitiel, aucune activité faunique, transition brutale, régulière.

2/13 ou 17cm: Ap 12 frais, brun jaunâtre en sec (10YR5/4) et 10YR5/5 en humide, <5% de graviers et cailloux calcaires et gypseux, limono-argileux, structure polyédrique 30 à 40mm à sous structure polyédrique 8 à 10mm, faces luisantes (MO), très forte porosité interstitielle, racines fines sous le blé, aucune activité faunique, transition tranchée ondulée.

13 ou 17/35cm: AB sec, brun jaunâtre en sec et en humide (10YR5/4), limono-argileux, <5% de graviers et cailloux calcaires et gypseux, structure massive à débits polyédriques de 15 à 20mm, peu poreux, aucun tube, fines fissures verticales à faces luisantes, transition distincte et ondulée de teinte.

35/50 ou 60cm: B2 frais, brun jaunâtre en humide (10YR5/6), rares taches rouilles et noirâtres (hydromorphie ?), limono-argileux, < 5% de graviers de gypses fibreux (5 à 10mm), structure fragmentaire peu développée polyédrique 10 à 20mm, fissures striées obliques (35°), peu poreux interstitiel, aucun tube, transition distincte ondulée.

50 ou 60 /85cm: BC frais, brun jaunâtre en humide (10YR5/7), horizon meuble, mélange de fragments d'altérites résultant du foisonnement des argilites qui donnent des plaquettes de 25 à 30mm et de matériau pédoplasmé, nombreux fragments de calcaires et de lames de gypse, hétérogène aussi par des teintes rappelant la roche mère, texture limoneuse à limono-argileux,

85cm: C puis R argilites en place, débit lamellaire et conchoïdal, bariolage de teintes brun-olive (2,5Y4/4), noir (5Y2/1) et olive (5Y4/4).

Résumé et interprétations (cf. données analytiques du tableau I)

Ce profil est rajeuni par érosion, l'argilogénèse est faible, les limons dominant. Le labour provoque un remaniement de 17cm seulement où se déroule la dynamique structurale saisonnière liée aux alternances d'humectations et de dessiccations procurant l'essentiel de la

porosité dans ce matériau à texture fine. La dynamique structurale profonde est soit occasionnelle en année très humide, soit inactuelle car liée à une ancienne pédogénèse verticale. Entre la surface et la profondeur se trouve un horizon AB peu perméable, peut-être une semelle de labour

Ces orientations pédogénétiques peuvent varier latéralement avec un développement, un affinement des structures et une diminution de la cohésion inétra-agrégats ; c'est la répercussion des augmentations vers -50cm des charges en gypse et parfois en halites, modifications détectables par l'accroissement relatif des teneurs en SO₄⁻⁻ et Cl⁻.

L'activité actuelle de la faune est nulle à très faible, ce qui explique l'absence de porosités tubulaires et vésiculaires.

Le stockage hydrique annuel est beaucoup plus faible et superficiel en année normale que ne le laisse supposer l'épaisseur de matériaux meubles (85cm), il dépend ici essentiellement de la faible profondeur du travail du sol. En début avril, la porosité totale de ces horizons remaniés par le labour fait de 55 à 58% (elle descend à 40% en profondeur), la capacité au champ y oscille de 32 à 35% (volumique), la détention hydrique macroporeuse interstitielle située entre ces deux seuils atteindrait ainsi 2 à 2,5mm/cm soit 30 à 37mm de stockage maximum jusqu'au sommet de l'horizon AB massif, avant l'apparition des premiers ruissellements.

Tableau I : Caractéristiques analytiques des sols représentatifs des deux sites

Sites	Sol calcimagnésique brun calcaire vertique sur marnes gypseuses				Sol calcimagnésique brun calcaire polyphasé sur calcaire marneux			
	FDA 1 à FDA 4				FDA 5 à FDA 7			
parcelles								
prof. (cm)	0/10	20/25	40/50	75/80	0/7	25/30	55/60	80/90
horizons	Ap	AB	B2	BC	Ap	AB ca	B22ca	II B23ca
argile %	9	10	9	12	22.5	39	40	18
limon fin	71	70	73	65	0.5	9	11	10
limon gros.	2	10	8	7	7	5	6	5
sables fins	13	8	8	13	45	35	29	42
sables gros.	5	2	2	2	23	11	13	13
EG > 2mm	<5	<5	<5	30	<5	5	30	10
Calc. tot. %	18		11			13		
Ca ⁺⁺ mmol/L	33.8	29.2	25.0	20.4				
Mg ⁺⁺ mmol/L	2.4	3.1	2.5	3.7				
K ⁺ mmol/L	0.3	0.2	0.2	0.2				
Na ⁺ mmol/L	0.8	3.9	6.2	17.3				
Gypse %	16		17	25				
C E μS/cm terre/eau =1/5	2088	2480	2585	3250				
MO %	0.7	0.8			0.7	1.4		
eau % pF2.8	32	38	44		11	19	24	18
eau % pF4.2	21		32		7	11	15	11

Site 2 sur sol calcimagnésique brun calcaire, modal, sur calcaires marneux (FDA 5 à 7)

Situation générale

Champ emblavé, labour effondré laissant des enrayures dans le sens de la pente, 65cm de période et, en début avril, 3cm d'amplitude. Pente générale du versant = 4,5% mais les parcelles installées dans le sens de l'enrayure ont une pente de 1,5%.

Surfaces

Toute la surface est assez fortement colmatée avec les particularités suivantes:

Parcelle FDA 5 = 80% de pellicule de battance, 10% de dépôts sableux dans les creux, 10% de pellicules structurales,

FDA 6 = 65% de pellicules de battance, 20% de pellicules structurales, 15% de dépôts sableux, FDA 7 = 75% de pellicules de battance, 15% de pellicules structurales, 10% de dépôts sableux. La régénération structurale pendant les phases de dessèchement sont très faibles. Le blé est moins clairsemé que sur le site 1 mais les pieds ne dépassent pas 27cm.

Profil de sols caractéristique du site 2 (FDA 5 à 7)

Le profil est remanié sur 15cm par le labour. Le sol meuble fait plus de 100cm d'épaisseur.

0/15cm : Ap1, sec, brun jaunâtre en sec (8,75YR5/6), 10YR5/4 en humide, sans taches, sablo-limoneux, <5% de fragments de coquilles d'huitres dominantes, structure fragmentaire peu nette polyédrique subanguleuse de 10 à 20mm associée à particulaire, ensemble meuble et poreux interstitiel, pas de tubes, transition distincte ondulée de structure.

15/30cm : ABca, frais brun jaunâtre en sec (10YR5/6), 10Y55/5 si humide, taches plus sombres associées aux fissures et faces d'agrégats, 5% de ponctuation blanches de carbonates (5mm) + imprégnations diffuses beiges (mélange carbonates + MO) ou en trainées orthogonales, argilo-sableux avec SF, structure fragmentaire moyennement développée polyédrique anguleuse, faces luisantes, fines fissurations verticales tous les 8cm, ensemble ferme, transition distincte et régulière de couleur et structure.

30/50cm : B21ca, frais, brun jaunâtre (10YR5/8), nets revêtements MO sur fissures plus sombres (10YR5/4), 20% amas carbonatés blancs de 5 à 20mm à limites anguleuses nettes (isomorphose d'agrégats), argilo-sableux avec SF, structure fragmentaire peu nette, tendance prismatique avec fissures verticales fines enduites MO, sous-structuration en profondeur en polyèdres de 10mm, ferme, peu poreux, transition régulière progressive par accroissement des carbonates et affirmation des prismes.

50/65cm : probablement un horizon IIB22ca, frais, brun jaunâtre (10YR5/5), taches MO sur les prismes, 30% d'amas carbonatés blancs rectangulaires à limites nettes (10 à 20mm), plus rarement en trainées verticales sur certaines fentes, argilo-sableux avec sables fins dominants, structure fragmentaire très nette, prismatique (60mm) à sous-structures cubiques et polyédrique anguleuse de 15mm, stries peu nettes sur certaines faces, ensemble ferme, porosité intrastictielle, transition texturale nette régulière.

65/105cm : II B23ca, frais, plus clair que l'horizon précédent, 5 à 10 % d'amas carbonatés, forte hétérogénéité texturale argileuse dans la masse des agrégats, sableuse dans les interstices inter-agrégats, structure plus affirmée qu'au dessus, prismatique de 80mm de haut, slicken sides nets sur certaines faces obliques des bases de prismes.

Résumé et interprétations (cf. données analytiques du tableau I)

Ce profil de sol brun calcaire sur calcaires marneux est à la fois polygénique et polyphasé.

Sa partie supérieure est allochtone, formée au dépens de colluvions d'origine calcaire, au delà de 50cm une partie autochtone se différencie à partir de calcaires marneux.

Les pédogénèses calcimorphes et vertiques superposent leurs effets, la chronique suivante est vraisemblable:

- climat plus humide chaud et contrasté (P# 800 à 1000mm) permettant une vertisolisation et le colluvionnement de matériaux grossiers provenant du djebel amont à lumachelles,
- remplissages sableux dans les interstices ouverts des prismes autant par action éolienne que par ruissellement et colluvionnement (intérêt d'une macroscopie des sables),
- évolution vers un climat moins humide mais contrasté avec une saison froide permettant une solubilisation bicarbonatée des calcaires en surface renforcée par une activité micro et mésobiologique plus intense qu'actuellement (pression CO₂, acidité),
- réprécipitation modérée en amas et concrétions friables entre -50 à -65cm donc en limite supérieure des différenciations vertiques.

L'isomorphisme carbonaté des agrégats anguleux plaident pour l'antériorité de la vertisolisation.

Du point de vue hydrodynamique, les conductivités superficielles sont plus faibles sur ce site. Les différents traits morphologiques tels que l'entraînement des carbonates, les revêtements verticaux divers, qui laisseraient supposer des lessivages, donc des drainages importants sont inactuels. De même, la formation des « slicken-sides » en profondeur nécessitent des phases de saturations hydriques et de dessiccations actuellement difficiles à imaginer même en année humide.

Du point de vue hydrique, dans le profil cultural, le stock d'eau utilisable par les plantes est faible du fait d'une texture grossière, il est dévié vers de faibles humidités: on est dans la situation d'une eau facilement utilisable mais en faible quantité, c'est l'inverse de ce que l'on constate sur les sols bruns gypseux du site 1.

4.2.2 Les protocoles expérimentaux

Le tableau II présente simultanément le protocole expérimental utilisé (succession d'averses d'intensités et de durées pré-réglées), et les résultats bruts issus des premiers dépouillement des hydrogrammes.

Le protocole expérimental doit concilier différentes choses:

- imiter des événements pluvieux réalistes tant en durée qu'en intensité, ceci agissant sur les caractéristiques hydrophysiques et mécaniques des organisations structurales superficielles, donc finalement sur leurs conductivités hydrauliques sur sols sec à humide (Kh.sec ou Kh.sat),
- disposer de différents temps de ressuyages entre des averses consécutives, ceci interfère:
 - sur la conductivité superficielle par modification des structures liée aux alternances d'humidité,
 - sur le déficit de saturation du réservoir-sol relié au différentiel apports - reprises évaporatoires.
- travailler sur différentes situations culturales soit imitées (labour récent), soit correspondant aux situations trouvées sur le terrain au moment de l'intervention (labour effondré, couverts de différentes densités, jachère).

Tableau II: Fidh'Ali - situation des parcelles, protocole expérimental, données brutes

pluies	date	heure	ta	I	tu	Pu	Pi	Lr	Li	Kr	Rx	Fn
			h.mn.	mm.h-1	mn	mm	mm	mm	mm		%	mm.h-1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sol calcimagnésique brun calcaire, vertique, sur marnes gypseuses (FDA 1 à FDA 4)												
FDA 1 : parcelle du site SBGypseux (amont), pente 2%, labour récent, pellicule structurale >> pellicule de battance, blé 40% de recouvrement, 20 à 25cm de haut - autres caractéristiques: cf. tableau I -												
P1	25/03/99	14h33	maxi	31.6	20	10.5		0	10.5		0	>31.6
				46.5	15	11.6		0	11.6		0	>46.5
				61	15	15.2					10.6	50.4
				86.5	10	14.4					52.6	33.9
				144.2	10	24					127	17.2
totaux	25/03/99	16h03			70	75.7	22.5	26.9	48.8	35.5	Khsec = 51,3	
P2	26/03/99	15h12	23h48	31.6	20	10.5					14.9	16.7
				46.5	15	11.6					33	13.5
				61	15	15.2					49.1	11.9
P3	26/03/99	16h03	0h30	86.5	10	14.4					77.5	9.0
totaux	26/03/99	16h33			60	51.7	2.3	34	17.7	65.8	Khsec = 17.8	
FDA 2 : même situation que FDA 1, protocole court.												
P1	25/03/99	12h10	maxi	31.6	20	10.5		0	10.5			>31.6
				46.5	15	11.6		0	11.6			>46.5
				61	15	15.2					18.2	42.8
				86.5	10	14.4					69.5	17
				144.7	10	24					122.7	21.5
totaux	25/03/99	13h20			70	75.7	19.7	31.8	43.9	42	Khsec = 38.7	

FDA 3 : parcelle du site SBGypseux (amont), pente 3.8%, labour effondré, pellicule structurale >> pellicule de battance, blé 40% de recouvrement, 25cm - autres caractéristiques: cf. tableau I

P1	25/03/99	10h03	Maxi	31.6	20	10.5		0	1.5			>31.6	
				46.5	15	11.6						10.5	36
				61	15	15.2						32.9	28.1
				86.5	10	14.4						66.9	19.6
				144.2	7	16.8						115.1	29.1
<i>totaux</i>	25/03/99	11h10			67	68.5	21.7	32.2	36.3	47		<i>Khsec = 30.7</i>	
P2	26/03/99	13h00	25h50	31.6	20	10.5						13.9	17.7
				46.5	15	11.6						25	21.5
				61	15	15.2						42.8	18.2
P3	26/03/99	14h21	0h30	86.5	10	14.4						78.4	8.1
<i>totaux</i>	26/03/99	14h51			60	51.7	2.4	30.9	20.8	59.8		<i>Khsat = 23.0</i>	

FDA 4 : parcelle du site SBGypseux (aval) pente 9%, jachère, recouvrement 35% par diverses adventices rases - autres caractéristiques: cf. tableau I -

P1	25/03/99	16h54	maxi	31.6	20	10.5		0	10.5		0	>31.6	
				46.5	15	11.6					6	40.5	
				61	15	15.2					16.9	44.1	
				86.5	10	14.4					43.8	42.7	
				144.2	10	24					93.2	51	
<i>totaux</i>	25/03/99	18h04			70	75.7	10.5	27.3	48.4	36		<i>Khsec = 40.2</i>	
P2	26/03/99	10h00	15h56	31.6	20	10.5						14.5	17.1
				46.5	15	11.6						27.9	18.6
				61	15	15.2						44.6	16.4
P3	26/03/99	11h21	0h30	86.5	10	14.4						68.2	18.3
<i>totaux</i>	26/03/99	11h51			60	51.7	3.3	30.3	21.4	58.6		<i>Khsat = 17.2</i>	

Sol calcimagnésique brun calcaire, modal, sur calcaires marneux (FDA 5 à FDA 7)

FDA 5 : parcelle amont du site SBCalcaire, pente 1%, labour effondré, enrayures nettes avec 48cm de période, parcelles dans le sens du labour, pellicule battance >> pellicule structurale, blé 30% de recouvrement, 28cm de haut - autres caractéristiques: cf. tableau I -

P1	06/04/99	12h50	maxi	31	20	10.3		0	10.3	0	0	>31	
				41.9	15	10.5					1.9	40	
				60	15	15					34	26	
				84.7	10	14.1					64.9	19.8	
				120	10	20					109	11	
<i>totaux</i>	06/04/99	14h00			70	69.9	10.5	30.5	39.4	43.6		<i>Khsec = 37.7</i>	
P2	07/04/99	14h35	24h35	31	20	10.3						14.5	17.1
				41.9	15	10.5						27.9	14
				60	15	15						44.6	15.4
P3	07/04/99	15h55	0h30	84.7	10	14.1						73.5	11.2
<i>totaux</i>	07/04/99	16h25			60	49.9	3.1	27.8	22.1	55.7		<i>Khsat = 17.3</i>	

FDA 6 : parcelle médiane du site SBCalcaire, pente 1%, labour récent, enrayures nettes avec 48cm de période, parcelles dans le sens du labour, pellicule structurale = pellicule battance, blé recouvrement 30%, 28cm - autres caractéristiques: cf. tableau I -

P1	06/04/99	14h41	maxi	31	20	10.3		0	10.3	0	0	>31	
				41.9	15	10.5		0	10.5	0	0	>41.9	
				60	15	15					8.8	51.2	
				84.7	10	14.1					53.7	30.9	
				120	10	20					87.8	32.2	
					70	69.9	21.8	20.5	49.4	29.3		<i>Khsec = 49.5</i>	
P2	07/04/99	12h05	20h14	31	20	10.3						14.5	17.1
				41.9	15	10.5						27.9	18.6
				60	15	15						44.6	16.4
P3	07/04/99	11h23	0h30	84.7	10	14.1						80	4.7
<i>totaux</i>	07/04/99	12h53			60	49.9	1.6	31.5	18.4	63.1		<i>Khsat = 19.6</i>	

FDA 7 : parcelle aval du site SBCalcaire, pente 1%, labour récent, enrayures nettes, 48cm de période, parcelles dans le sens du labour, autant de pellicule structurale que de pellicule de battance, recouvrement du blé = 30%, hauteur = 28cm - autres caractéristiques: cf. tableau I -

P1	06/04/99	16h26	maxi	31	20	10.3		0	10.3	0	0	>31	
				41.9	15	10.5					6.8	35.19	
				60	15	15					19.3	40.7	
				84.7	10	14.1					50	34.7	
				120	10	20					80	40	
					70	69.9	14.5	24.1	45.8	34.5		<i>Khsec = 36.2</i>	
P2	07/04/99	10h03	16h27	31	20	10.3						8.4	22.6
				41.9	15	10.5						27.9	13.9
				60	15	15						46.7	13.3
P3	07/04/99	11h23	0h30	84.7	10	14.1						76.6	8.1
<i>totaux</i>	07/04/99	12h53			60	49.9	2.8	28	21.9	56.1		<i>Khsat = 22.0</i>	

Légende du tableau II :

- 1, 2, 3 : numéro de l'averse, date et heure du début et de la fin de l'averse,
- 4 : temps de ressuyage des sols des parcelles entre deux pluies consécutives,
- 5 : intensité pré-réglée de l'averse simulée isolée, ou train d'averses d'intensités différentes,
- 6 : durée de l'averse ,
- 7 : hauteur de pluie correspondante soit $0.0166 \times (I \times t_u)$,
- 8 : hauteur de pluie d'imbibition ou pluie préliminaire infiltrée avant l'apparition des premiers ruissellements,
- 9 : hauteur de la lame ruisselée, mesurée sur l'hydrogramme de ruissellement,
- 10 : hauteur de la lame infiltrée ($P_u - L_r$),
- 11 : coefficient de ruissellement $100 \times (L_r/P_u)$,
- 12 : intensité du ruissellement à régime constant, lue sur le limnigramme ou sur l'hydrogramme de ruissellement,
- 13 : intensité d'infiltration finale à régime constant ($I-R_x$)

4.3. Comportements hydrodynamiques

Ces comportements sont analysés à partir des résultats de la simulation de pluie puis reportés, après traitement, sous conditions d'averses naturelles. Les diagnostics s'établissent ainsi progressivement :

- en comparant les lames ruisselées mesurées, calculées pour les deux sols et pour trois érosivités annuelles des pluies,
- en exprimant les conductivités hydrauliques en fonction de hauteurs cumulées des averses,
- enfin, en analysant les relations liant les intensités du ruissellement en régime constant à celles des averses simulées.

4.3.1. Qualité des eaux d'aspersion

La qualité de l'eau utilisée en simulation de pluie a une grande importance sur les modifications structurales des surfaces. Les études de M. Agassi et al. (1986) sur des sols voisins de la zone méditerranéenne ont mis en évidence le rôle de la salinité des eaux d'irrigation sur la dispersion ou la floculation des argiles des surfaces. L'irrigation avec des eaux peu salines fait passer en solution les cations monovalents du complexe absorbant du sol. Le NaCO_3H formé dans les solutions du sol à plus forte tension de CO_2 disperse les argiles ce qui augmente le risque de colmatages pelliculaires des surfaces donc de diminution de la conductivité hydraulique. L'utilisation d'eaux à plus fortes charges électrolytique limite cette expulsion cationique du complexe absorbant et tend à maintenir les structures superficielles en l'état, donc une bonne infiltrabilité superficielle. Ces processus du passage des sols salés encore structurés aux sols alcalinisés aux argiles dispersées sont bien connus des altérologues et pédologues travaillant sur les sols salés, il en est fait notamment état dans la thèse de K. Belkhodja 1970 pour les sols de la plaine de Kairouan.

Ce qui vaut pour la qualité des eaux d'irrigation vaut aussi pour une aspersion par simulation de pluie à cela près que, imitant des précipitations naturelles, nous utilisons les eaux les moins chargées possibles. Celle de la simulation de Fidh Ali provenait d'un réseau de distribution d'eau potable et avaient les caractéristiques ioniques indiquées dans le tableau III ci dessous.

Tableau III : charges ioniques des eaux de pluie, de ruissellement et de drainage, d'après le mémoire de DEA de V. M. Reyes Gomez , 1999.

Qualité des eaux..	pH	CE	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
		mS/cm	mg/L						
de pluies	7.82	349	183.0	213.4	18.0	128.0	7.2	15.3	11.9
de ruissellement.	7.71	485	195.4	431.8	31.9	209.3	19.2	17.2	12.4
de drainage à 20cm	7.76	3276	171.2	4371.5	37.6	1334.0	206.0	253.0	14.0
de drainage à 50cm	7.62	6715	169.9	5440.1	402.1	1164.3	164.3	1272.0	17.5

Les charges ioniques des eaux de pluies sont faibles, celles-ci arrosant des horizons superficiels eux-mêmes peu salés. les charges des eaux de ruissellement ne sont guère plus élevées. Il en va tout autrement en profondeur et, sans entrer dans le détail de ce qui est développé dans le mémoire de V.M.Reyes Gomez (1999), il apparaît que les modifications des charges ioniques des eaux de drainage répercutent une nette dissolution du gypse (augmentation des S04--) et, en plus faible quantité, des halites en profondeur tandis qu'y précipiterait la calcite.

En résumé, ces analyses montrent que la faible charge ionique des eaux de pluie:

- a peu d'effet sur tous éventuels remaniements structuraux d'origine physico-chimique des premiers décimètres de sols car ceux-ci sont initialement peu salés avec le lessivage dû aux pluies antérieures et aux faibles possibilités de concentrations par évaporation,
- a par contre un effet important sur la dispersion des argiles gypseuses et la dissolution du gypse en profondeur avec tout ce que cela implique pour la préparation d'une érosion ravinatoire par suffosion et creusement de tunnels. Ceci fait l'objet d'une autre action de recherche

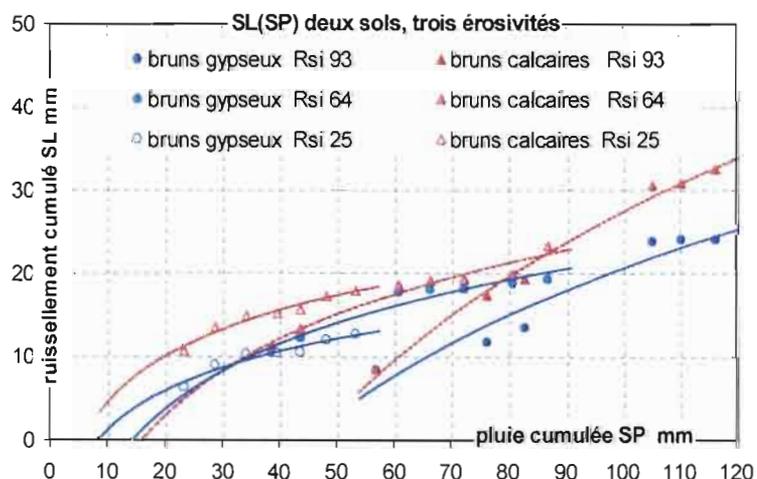
4.3.2. Lames ruisselées

Le tableau IV reportent différentes équations démontrant les évolutions des lames ruisselées pour les averses naturelles efficaces des trois années retenues pour leurs agressivités croissantes. Ce traitement par années séparées met en évidence, sur les courbes correspondantes de la figure 19 une hydraulicité différente des sols qui ont subi des cumuls d'énergie différents. D'une façon générale, les sols bruns gypseux ruissellent moins que les sols brun calcaires.

Tableau IV : relations SL (SP) et coefficients de ruissellement

sols	SP an	SR an	SL(SP)	r ²	kr %
Brun gypseux	173	25	$Y = 6.2010 \text{ Ln } x - 12.176$	(0.9793)	16.38
	299	64	$Y = 6.4318 \text{ Ln } x - 10.143$	(0.9156)	19.48
	228	93	$Y = 25.2320 \text{ Ln } x - 95.449$	(0.9278)	20.75
Brun calcaire	173	25	$Y = 8.3570 \text{ Ln } x - 15.189$	(0.9898)	23.29
	299	64	$Y = 7.0635 \text{ Ln } x - 11.282$	(0.9069)	21.25
	228	93	$Y = 34.8730 \text{ Ln } x - 133.09$	(0.9892)	27.51

Pour un sol donné, les sections de courbes exprimant l'accroissement normal de la lame ruisselée cumulée (SL) avec la hauteur cumulée des pluies (SP) ont des pentes croissantes depuis l'année faiblement érosive (Rsi 25) jusqu'à l'année fortement érosive (Rsi 93).



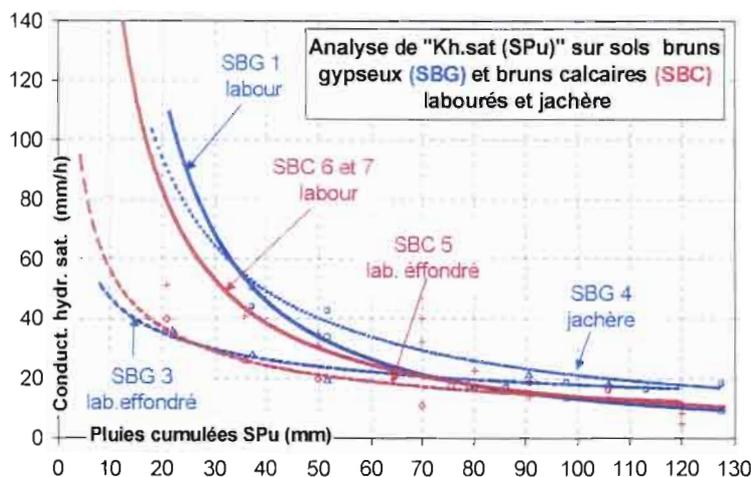
Ceci indique une action importante de l'érosivité des pluies sur l'organisation structurale des surfaces donc, finalement, sur l'infiltrabilité elle-même.

Figure 19 : Fidh'Ali, lames ruisselées cumulées des sols bruns calcaires et bruns gypseux

4.3.3. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique superficielles des sols permet de départager grossièrement les comportements des différents sols pour différentes situations. Il est possible de suivre l'évolution de cette conductivité depuis les sols humides jusqu'aux sols saturés. Il est par contre plus délicat de la caractériser sur sol sec ou frais car il faudrait alors "approcher" l'infiltrabilité maximale donc réaliser une première pluie d'intensité suffisamment forte pour atteindre une valeur de K_h théorique sur sol initialement "sec" pendant un laps de temps minimum donc avec une hauteur de pluie minimale. Dans le cadre de nos essais, cette procédure est irréaliste car l'énergie dispersée modifierait fortement et durablement cette infiltrabilité, condamnant dès lors tous essais ultérieurs.

Compte tenu des réserves précédentes, la figure 20 reproduit différentes expressions de cette conductivité sur sol superficiellement frais à très humide en fonction du cumul des averses. La



distribution des faisceaux de courbes révèle les points suivants:

- le colmatage des surfaces, lié au cumul des pluies et de leurs énergies, uniformise les comportements au delà d'une hauteur SPu # 75mm, cumul où K_h oscille entre 17 et 25mm/h, puis décroît lentement jusqu'à un palier vers 10 mm/h,

Figure 20: Fidh'Ali, $K_h.sat = f(SPu)$ sur les sols bruns gypseux (SBG) et bruns calcaires (SBC)

"différenciation des sols", répercuté sur la résistance structurale des labours, se manifeste avec, à l'intérieur de chaque faisceau, des conductivités constamment supérieures sur sols bruns gypseux qui résistent mieux (SBG1) ou parce qu'ils régénèrent mieux des structures poreuses pour de plus longues périodes de dessiccation entre deux averses (SBG3).

- la jachère sur sol brun gypseux (SBG4) présente, au delà de 30mm de pluies cumulées, une infiltrabilité constamment supérieure à celle de toutes autres situations.

- en deçà des 75mm, l'effet

4.3.4. Relation $R_x(I)$

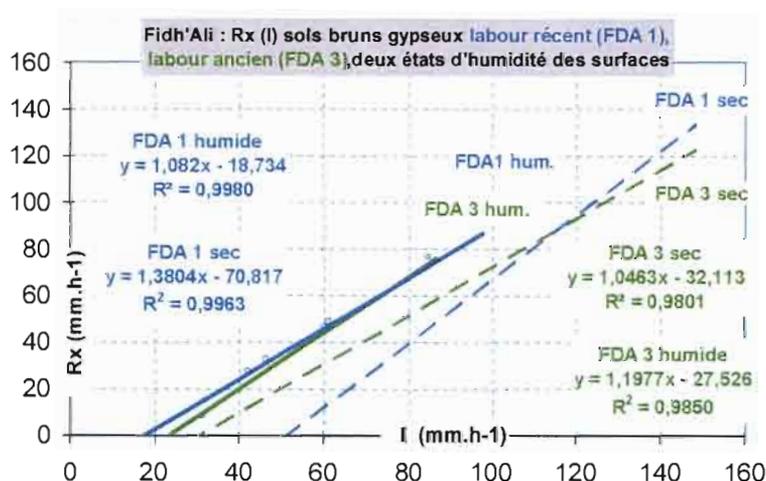


Figure 21: Fidh'Ali, analyse de la relations $R_x(I)$ sur sol brun gypseux

Les quatre exemples de la figure 21 proviennent du dépouillement d'un des hydrogrammes issus des 7 parcelles. La totalité des relations mesurées puis calculées sont reportées dans le tableau V, elles permettent :

- de formuler les équations reliant les intensités de ruissellement aux intensités des pluies puis, ultérieurement, les

- quantités de terre érodées aux intensités de ruissellement,
- de calculer les intensités limites des pluies provoquant les ruissellements.

Tableau V : Analyse des relations R(I) et intensités limites

Situations	Parcelles et humidités	R (I)	r ²	Int. lim. (mm/h)
Sol brun gypseux, labour récent	FDA 1 sec	$y = 1.3804x - 70.817$	0.996	51.30
	FDA 1 humide	$y = 1.0820x - 18.734$	0.998	17.34
	FDA 2 frais	$y = 1.1991x - 46.458$	0.958	38.74
Sol brun gypseux, labour effondré	FDA 3 sec	$y = 1.0463x - 32.113$	0.980	30.69
	FDA 3 humide	$y = 1.1977x - 27.526$	0.985	22.98
Sol brun gypseux, jachère 1 an	FDA 4 sec	$y = 0.9019x - 36.281$	0.998	40.23
	FDA 4 humide	$y = 0.9890x - 16.979$	0.998	17.17
Sol brun calcaire, labour récent	FDA 6 sec	$y = 1.2926x - 63.952$	0.968	49.47
	FDA 6 humide	$y = 1.2011x - 23.589$	0.991	19.64
	FDA 7 sec	$y = 0.9662x - 35.033$	0.992	36.26
	FDA 7 humide	$y = 1.2322x - 27.133$	0.992	22.02
Sol brun calcaire labour effondré	FDA 5 sec	$y = 1.3461x - 50.727$	0.994	37.68
	FDA 5 humide	$y = 1.0820x - 18.734$	0.998	17.31

Le tableau V résume les comportements hydrodynamiques de tous les sites.

En se référant aussi au contenu du paragraphe 3.1.3., on note :

- une rugosité maximale sur les surfaces des parcelles partiellement enherbées des jachères de l'année (FDA 4),
- un effet important du temps de ressuyage des sols entre les averses sur les intensités limites des pluies provoquant les premiers ruissellements: sur sol initialement *sec à frais* les intensités limites varient de 50mm/h (labour récent) à 30mm/h (labour ancien), sur sol *saturé*, ces bornes vont de 23 mm/h à 17mm/h,
- les sols bruns gypseux récemment labourés ruissellent moins, les jachère annuelles et les sols bruns calcaires aux labours effondrés ruissellent plus.

4.4. Comportements érosifs

Les érosions sont mesurées sous simulation de pluies, puis calculées avec le modèle **MOBIL**, selon la procédure développée dans le paragraphe 3.2.

Situations		Cs (R)	r ²
Sol brun gypseux, labour récent	FDA 1	$Y = 0.244x + 1.8402$	0.9171
	FDA 2	$Y = 0.244x + 1.8402$	0.9171
Sol brun gypseux, lab. effondré	FDA 3	$Y = 0.362x^{0.7622}$	0.6916
Sol brun gypseux, jachère 1 an	FDA 4	$Y = 0.0983x + 3.6902$	0.5212
Sol brun calcaire, labour récent	FDA 6	$Y = 0.0525x + 2.0507$	0.5237
	FDA 7	$Y = 1.2498x^{0.2335}$	0.6673
Sol brun calcaire labour effondré	FDA 5	$Y = 0.0036x + 2.3322$	0.0106

Tableau VI: analyse des relations Cs (R)

On présente ici successivement

- les équations provenant du traitement des données de la simulation de pluies et rendant compte des évolutions des charges solides (Tabl. VI),
- le choix des parcelles représentant l'évolution annuelle des terres cultivées (Tabl. VII)
- le fonctionnement du modèle (Tabl. VIII),
- un récapitulatif des érosions cumulées pour 2 sols et 3 érosivités annuelles, (fig. 19 à 21),
- une analyse comparative des comportements érosifs (fig. 22, 23)

4.4.1. Relations Cs (R)

Les relations du tableau VI portent seulement sur sols initialement humides car les charges solides provenant des premiers ruissellements sur sol sec à frais sont trop peu nombreuses.

On peut se référer au paragraphe 3.1.4. pour comprendre que les charges très importantes des premiers flux donnent peu d'érosion car leurs débits sont très faibles.

La partition des comportement se manifeste nettement avec des charges solides croissant fortement et quasi constamment sur les parcelles des sols bruns gypseux (FDA 1 à 4) et des

4.4.2. Choix des parcelles de simulation représentatives des dynamiques annuelles

Le tableau VII regroupent les informations permettant d'actionner le modèle M O B I L.

La cellule du haut (C1 à C4) est divisée en colonnes présentant, par décades, les différents stades d'une culture de blé depuis le labour jusqu'à la jachère nue suivant la moisson et l'exportation des chaumes par parcours du bétail. Chacun de ces stades correspond à différents états de surface dont les comportements ont été testés sous simulation de pluie.

En dessous, différentes cellules regroupent les numéros de parcelles de pluies simulées retenues pour les sols bruns gypseux à forte dynamique structurale et bruns calcaires à faible dynamique du fait d'une texture plus grossière. Les cellules sont subdivisées chacune en trois sous-cellules délimitant trois années agricoles d'agressivités normales, fortes et faibles.

Tableau VII : choix des parcelles en relation avec les situations culturales et les évènements pluvieux

BV de Fidhali (Tunisie): choix des parcelles de simulation de pluies																		
1) culture céréalière (blé d'hiver de # 220 jours)																		
2) un labour effectué début octobre																		
3) deux types de sols : bruns gypseux et bruns calcaires, tous deux à argiles gonflantes																		
4) année agronomique 96-97 avec une érosivité R = 25 Mj/ha.h, 98-99 avec R = 64 et 94-95 avec R = 93																		
mois	septembre			octobre			novembre			décembre			janvier			février		
décades	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C1 labour				XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX														
C2 semis, levée										XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX								
C3 matur., moisson																		
C4 jachère	XXXXXXXXXXXX																	
sols bruns gypseux (A + L = 83%, forte régénération structurale)																		
année normale 98 - 99 R = 64																		
sites																		
intensités limites	FDA 4			FDA 1			FDA 2			FDA 3								
pluies natur.	s 40,2	h17,17	h17,17	s 51,0	s 51,0	s 51,0	s 51,0	s 38,7	s 30,7	s 30,7	s 30,7	s 30,7	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0
			28 29 30 31	34 35										8				
année forte 94 - 95 R = 93																		
sites																		
intensités limites	FDA 4			FDA 1			FDA 2			FDA 3								
pluies natur.	s 40,2	h17,17	h17,17	s 51,0	s>55	s 51,0	s 38,7	s 30,7	s 30,7	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0
			9	10			19											
année faible 96 - 97 R = 25																		
sites																		
intensités limites	FDA 4			FDA 1			FDA 2			FDA 3								
pluies natur.	s 40,2	h17,17	h17,17	s>55	s>55	s>55	s 51,0	s 38,7	s38,7	h22,98	s 30,7	s 30,7	s30,7	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0	h23,0
	21 22	24												2 3				
sols bruns calcaire (A + L = 29%, faible régénération structurale)																		
année normale 98 - 99 R = 64																		
sites																		
intensités limites	FDA 5			FDA 6														FD
pluies natur.	s 37,7	h17,31	h17,31	s 49,47	s 49,47	s 49,47	s 49,47	h19,6	h19,6	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00
			28 29 30 31	34 35											8			
année forte 94 - 95 R = 93																		
sites																		
intensités limites	FDA 5			FDA 6														FD
pluies natur.	s 37,7	h17,31	h17,31	s 49,47	s 49,47	s 49,47	s 49,47	h19,6	h19,6	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00
			9	10			19											
année faible 96 - 97 R = 25																		
sites																		
intensités limites	FDA 5			FDA 6														FD
pluies natur.	s 37,7	h17,31	h17,31	s 49,47	s 49,47	s 49,47	s 49,47	19,6	19,6	h22,98	s36,26	s36,26	s36,26	h22,00	h22,00	h22,00	h22,00	s36,26
	21 22	24												2 3				
décades	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
mois	septembre			octobre			novembre			décembre			janvier			février		

Tableau VIII : exemple de traitement de données dans M O B I L

Fidhali, bié, labour 01/10, sol brun gypseux, érosivité moyenne, Rsi = 64, année agricole 01/09/1998 - 31/08/1999											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
num. av.	int.lim.	date	heure h.mn.s.	temps mn	durées mn	intensités mm/h	int. ruiss. mm/h	charges g/l	lame ruiss. mm	érosion kg/ha	cumul kg/ha
30	17.10	24/09/98	3h18	1	1	5,50					182,300
				11	10	3,20					182,300
				21	10	2,30					182,300
				31	10	21,90	4,68	4,14	0,39	16,1	198,450
				36	5	21,00	3,79	4,06	0,32	12,8	211,257
				41	5	24,00	6,76	4,34	0,56	24,4	235,700
				46	5	36,00	18,63	5,48	1,55	85,1	320,813
				51	5	60,00	42,36	7,77	3,53	274,3	595,085
				56	5	13,50					595,085
				61	5	22,50	5,27	4,20	0,44	18,4	613,534
				66	5	24,00	6,76	4,34	0,56	24,4	637,977
				71	5	7,00					637,977
				76	5	8,50					637,977
				86	10	18,00	0,82	3,77	0,0	0,0	637,977
											637,977

- colonne 9 : charges solides correspondant à chaque intensité de ruissellement et qui sont calculées par l'équation (Cs (R)) caractéristique du comportement érosif de la parcelle (cf tabl. V) soit : $Cs = 0.0982 \cdot R + 3.6902$
- colonne 10 : lame ruisselée obtenue par : $Lr = 0.0166 \cdot R \cdot t$
- colonne 11 : érosions partielles, produits des lames ruisselées par les charges solides correspondantes soit : $E = 10 \cdot Lr \cdot Cs$
- colonne 12 : érosions cumulées par averses puis pour la totalité du site (sur tableur complet).

On note enfin que cette averse n°30 a fourni : $638 - 182 = 456 \text{ kg/ha}$ soit un quart de l'érosion annuelle du site ce qui est une contribution très importante à l'érosion annuelle.

4.4.4. Bilan des érosions cumulées

Le tableau IX résume les pertes en terres cumulées annuelles par site ; rappelons que les trois années agricoles ont été retenues pour leurs différences d'agressivité et non pour leurs pluviométries.

Tableau IX : Fidh'Ali, bilan des érosions annuelles sur les différents sites

Erosivité Rsi. Mj.mm/ha.h	Sols	Pluies annuelles SP mm	Coef. ruissell. annuel kr %	Erosion. annuelle. SE kg/ha	Appréciation globale
25	Bruns gypseux	173	7.35	707	Faible
	Bruns calcaires		10.38	439	Très faible
64	Bruns gypseux	299	6.46	1783	Moyenne
	Bruns calcaires		7.78	733	Faible
93	Bruns gypseux	228	10.57	2469	Moyenne
	Bruns calcaires		14.26	1145	Moyenne

Pour une érosion aréolaire en milieu méditerranéen l'échelle des risques est la suivante :

- 0 – 500 kg/ha = érosion très faible,
- 500 – 1000 = faible,
- 1000 – 2500 = érosion moyenne,
- 2500 – 7500 = érosion forte,
- > 7500 = très forte

Au bilan, les érosions aréolaires restent faibles (sols bruns calcaires) à moyennes (sols bruns gypseux) sur les versants de Fidh'Ali. La comparaison des comportements est utile pour

identifier les parts prises respectivement par les deux termes du produit "ruissellement . charges solides" dans le cas de pluies d'agressivités croissantes.

Les graphiques des figures 19, 20 et 21 permettent de visualiser les évolution des pertes en terres provenant des deux types de sols et pour des agressivités pluviométriques croissantes, on note :

- les érosions des sols bruns gypseux (SBG) sont constamment plus fortes que celles des sols bruns calcaires (SBC),

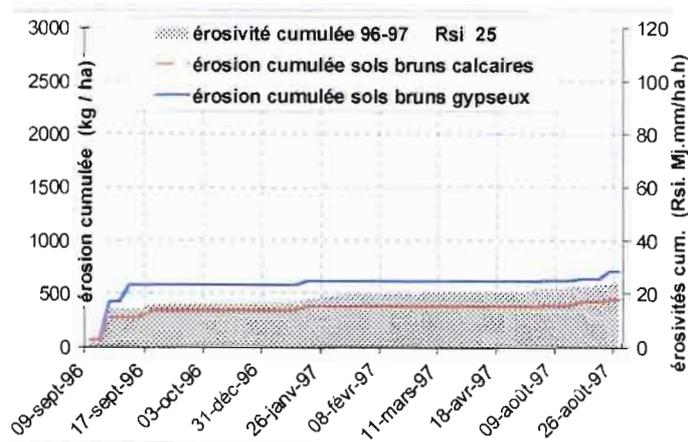
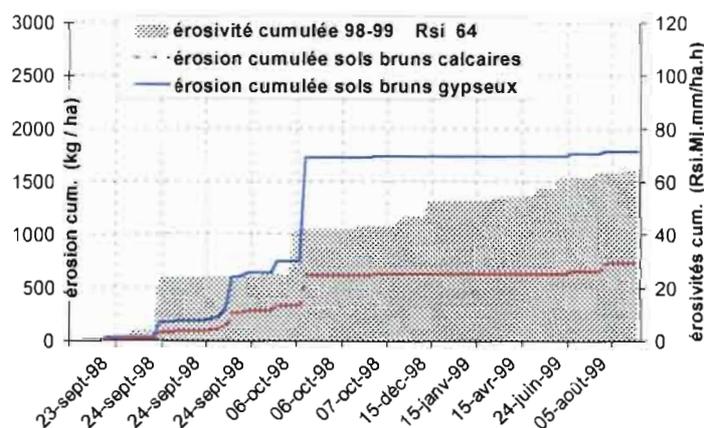


Figure 22: Fidh'Ali, évolution des érosions en année de faible agressivité

- les courbes traçant ces cumuls d'érosion semblent homothétiques, ceci indiquerait un effet univoque des érosivités des averses sur les deux matériaux
- en année de **faible agressivité** (fig.22), la quasi totalité des terres érodées provient de deux à trois averses de septembre: qui représentent 60% du Rsi annuel et sont à l'origine de 70% à 80% des pertes en terre de l'année,

Figure 23: Fidh'Ali, évolution des érosions en année d'agressivité moyenne



tombant sur des *labours frais*, fournit, à elle seule, 45% des érosions annuelles sur SBC et 65% sur SBG !

- année d'**agressivité moyenne** : la non concordance des époques de forte agressivité pluviale et de grande fragilité des terres a pour effet de limiter l'érosion, c'est ainsi que sur la figure 23, l'averse du 25/09/98, avec une érosivité de 40 points, génère des ruissellements importants mais peu de charges car elle tombe sur les jachères des sols bruns calcaires (SBC) et bruns gypseux (SBG),
- par contre, l'averse du 07/10/98, avec seulement 30 points d'érosivité,

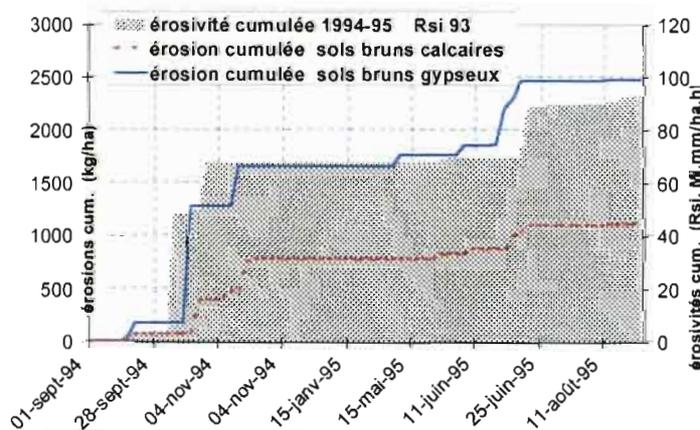


Figure 24: Fidh'Ali, évolution des érosions en année de forte agressivité

- l'année 1994-1995 fut **très agressive**, il y eu deux périodes de gros dégats du fait de la concordance entre l'agressivité des pluies et la fragilité des sols : (a) en octobre 94 où une averse de 90 points d'agressivité, tombant sur un labour frais, a fourni 40% (SBC) et 50% (SBG) des érosions annuelles, (b) en été avec l'effet aggravant d'un orage de 40

points d Rsi tombant sur des terres moissonnées moins protégées.

4.4.5. Comparaison des comportements

La différence de comportement érosif ressort clairement sur le graphique de la figure 25 montrant l'augmentation des pertes en terres avec l'érosivité et ce, pour toutes les averses efficaces considérées individuellement.

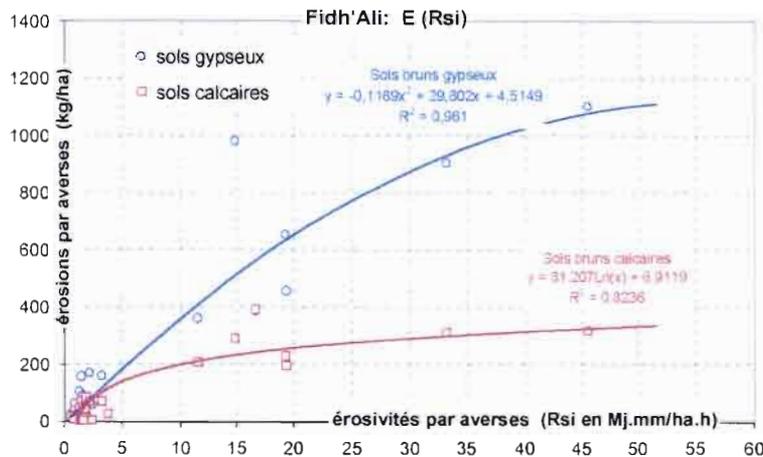
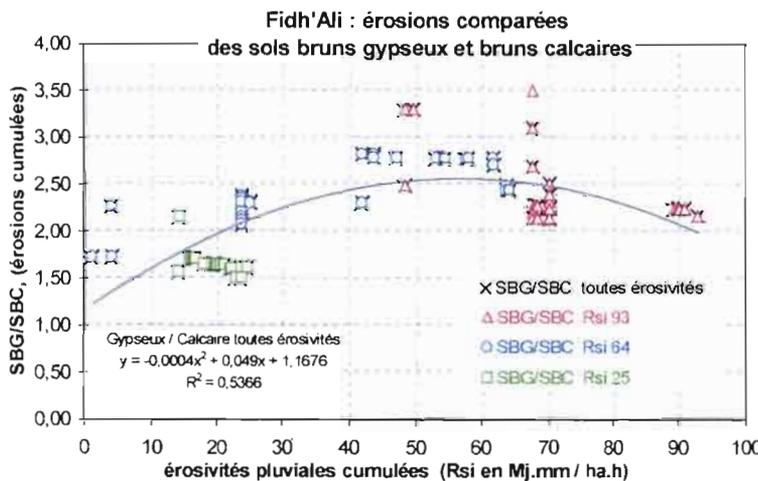


Figure 25 : Fidh'Ali, relation érosion - érosivité par averses individuelles

Selon ce mode de représentation, l'effectif des données est plus important vers les faibles érosivités que vers les fortes, d'où la nécessité d'un second niveau d'analyse exprimant, cette fois, le rapport entre les érosions cumulées des sols bruns gypseux et celles des sols bruns calcaire en fonction des érosivités cumulées (fig. 26).



Les sols bruns gypseux s'érodent plus que les sols calcaires mais on constate en plus que le rapport de leurs érodibilités n'est pas constant, aussi l'homothétie de comportement, évoquée dans le paragraphe 4.4.4 n'était-elle qu'une apparence.

La différence est maximale pour une érosivité cumulée de 55 points où le rapport atteint 2,7. Au delà, donc en année fortement agressive, ces comportements se rapprochent de nouveau.

Figure 26 : Fidh'Ali, comparaison des érodibilités des sols bruns gypseux et bruns calcaires

L'effet des modifications structurales superficielles sur la diminution des infiltrabilités peut être commenté de la façon suivante :

- sur les deux sols se constitue une pellicule de moins en moins perméable contrôlant directement l'infiltrabilité et indirectement la détachabilité par des mécanismes qui ont déjà été expliqués dans les paragraphes 3.1.3 et 3.1.4,
- le contrôle d'infiltrabilité est plus rapidement atteint sur le **sol brun calcaire** qui tend à se colmater et à se lisser donc à mobiliser moins de charges solides pour les raisons que nous rappelons : interception de l'énergie par l'épaisseur de la lame ruisselante + diminution de la rugosité donc prédominance d'un flux laminaire moins érosif. L'augmentation de l'érosion est ici uniquement liée à l'augmentation du ruissellement puisque les charges solides diminuent avec le cumul des pluies,
- sur sols **bruns gypseux**, colmatages et lissages sont plus longs à obtenir du fait d'une meilleure résistance structurale et surtout d'une régénération de la rugosité par dynamique structurale liée aux effets des alternances d'humectation et de dessiccation des surfaces. L'augmentation de l'érosion est liée surtout à une forte et longue mobilisation de sédiments au dépens des mottes et agrégats exondés, à un flux turbulent plus érosifs même si son débit tend à croître moins rapidement que précédemment avec le cumul des averses.

au dépens des mottes et agrégats exondés, à un flux turbulent plus érosifs même si son débit tend à croître moins rapidement que précédemment avec le cumul des averses.

4.4.6. Contribution de l'érosion aréolaire dans l'érosion générale du bassin

L'érosion globale du bassin versant est mesurée par bathymétrie en rapportant les différences de volumes de sédiments déposés dans la retenue d'une année sur l'autre à la superficie du bassin (S = 212,5 ha). On constate que Fidh'Ali fait partie des retenues collinaires dont les bassins présentent les plus fortes érosions avec des valeurs oscillant de 40 à 50 t/ha/an (tabl. X, ligne 8). En mettant les choses au pire, c'est à dire en considérant un bassin versant uniquement occupé par les sols les plus érodibles avec un transfert total des sédiments vers l'exutoire et ce, en année très agressive, l'érosion aréolaire n'atteindrait que quelque 2,5 t/ha/an soit 20 fois moins que ce que révèle la bathymétrie.

Ceci met en évidence l'importante disproportion entre l'érosion ravinatoire et l'érosion aréolaires. Des travaux récents sur les ravines des bassins de Fidhali et de Kamech (presqu'île du Cap Bon) montrent que les seuls systèmes ravinaires peuvent produire plusieurs centaines de tonnes de terre par hectare. Ces valeurs sont, heureusement, rarement mesurées aux exutoires parce qu'une grande partie des terres mobilisées se déposent sur les versants et ne sont transmises vers l'aval que progressivement par les flux les plus compétents des années les plus agressives.

L'analyse de l'ensemble des processus hydrodynamiques et érosifs provoquant l'érosion aréolaire reste cependant très opportune pour deux raisons :

- l'érosion ravinatoire ne peut se déclencher que s'il y a, en amont, formation d'un écoulement dont la capacité abrasive se renforce ensuite soit par augmentation de sa vitesse avec une accentuation de la pente soit par augmentation du débit avec, par exemple, des confluences de flux initialement aréolaires. L'analyse, sous simulation de pluies, des effets des transformations structurales des surfaces amenant le contrôle des conductivités hydrauliques garde ici toute sa valeur,
- la charge solide des flux se canalisant et provoquant le ravinement influe sur leurs capacités abrasives donc sur l'extension ou l'atténuation de ce ravinement. Là encore le suivi de l'évolution des charges solides et la typologie des turbidigrammes dégagés par la simulation de pluies permet de prévoir la « qualité » des flux entrant dans les systèmes ravinaires

Tableau X: - bilan des ruissellements et érosions mesurés au lac de Fidh'Ali

			1994	1995	1996	1997	1998	1999
Pluviométrie	mm	1	272	495	173	369	299	184
Volume écoulé	m3	2	110700	103800	5820	32852	39870	40050
Lame écoulée	mm	3	52.2	49.0	3.4	15.5	18.8	18.9
K. écoulement	%	4	19.2	9.9	2.0	4.2	6.3	10.3
Volume ruisselé	m3	5	97740	94218	5065	31137	37681	39357
Lame ruisselée	mm	6	46.1	44.4	2.4	14.7	17.8	18.6
K. ruissellement	%	7	16.9	9.0	1.4	4.0	5.9	10.1
Erosion	t/ha/an	8	41.82	-	52.6	46.8	-	44.2
Charges spécif.	g/l	9	91	-	2192	318	-	238
Nombre de crues		10	4	20	4	12	11	6
Date crue max.		11	03/10/94	20.06.95	09.09.96	17.09.97	06.10.98	18.05.00
P max.	mm	12	50.5	28.0	23.5	17.0	17.0	45.0
Volume ruiss. max.	mm	13	80200	28620	3296	11714	21490	33155
Lame ruiss. max.	mm	14	37.8	13.5	1.5	5.5	10.1	15.6
K. ruisselé max.	%	15	74.8	48.2	6.4	32.3	59.4	34.7
Erosion de la crue	t/ha	16	(34.3)	(12.2)	(32.9)	(17.5)	(35.0)	(37.1)

Légende :

- lignes 1 et 12: pluviométrie annuelle et pluie annuelle maximale à l'origine de la crue,
- 2 : volume écoulé dans le lac sur l'année = volumes ruisselés + apports souterrains,
- 5 et 13 : volumes ruisselés, flux superficiels obtenu par dépouillement des hydrogrammes, soit cumulés sur l'année, soit pour une crue importante,
- 3, 6 et 14 : lames d'eau écoulées ou ruisselées = volumes / superficie du bassin, exprimées en mm,
- 4, 7 et 15 : coefficients d'écoulement ou de ruissellement soit moyen annuel, soit instantané (crue)
- 8 et 16 : érosion en t/ha soit annuelle, mesurée par différence de volumes de sédiments déposés dans le lac à l'issue d'une année, soit pour une crue, et alors, évaluée par le produit lame ruisselée (14) x charge solide spécifique (9),
- 9 : charge solide = rapport érosion / lame ruisselée, exprimée en grammes par litre.

A l'échelle d'un versant, il est important de tenir compte de l'ordre de succession des « segments ». Ces segments sont des portions de versant définies par une pente, un contenu sol et un type de couvert végétal . Ce sont des mailles comportementales élémentaires dont les juxtapositions ou les associations expliquent la dynamique du versant. Ce versant constitue une partie ou la totalité d'une d'unité « paysagère ». Ajoutons enfin qu'il est possible que divers « paysages » s'associent à leur tour en unités plus vastes. Dans cette articulation de formes naturelles, l'exutoire de la retenue de Fidh'Ali ferme une portion de paysage, soit ici 3 à 4 segments, dont on connaît les comportements intrinsèques par l'observation et l'expérimentation. Ceux-ci permettent de prévoir le comportement de l'unité d'ordre immédiatement supérieur : la portion du versant du bassin de Fidh'Ali.

Fidh'Ali est un des sites-ateliers prévu pour réaliser un document qualifiant et quantifiant les risques érosifs. Celui-ci s'appuiera sur la carte pédologique, sur une carte géomorphologique, sur les évolutions des couverts végétaux et des techniques culturales et enfin, sur les informations expérimentales disponibles.

Le tableau XI ci dessous est un exemple de traitement des informations menant à des "scénarios à risques érosifs". La procédure est indiquée pour une portion de paysage à trois segments, ce qui est représentatif de la moitié des situations du bassin

- la colonne 1 prévoit deux agressivités pluviométriques annuelles s'exerçant entre septembre et janvier sur des sols de jachère puis des labours de décembre,
- la colonne 2 décrit, de façon condensée, des situations physiographiques,
- la colonne 3 explique les réactions intrinsèques des segments et la dynamique générale du versant,
- la colonne 4 quantifie les pertes prévisibles pour la portion de versant, cette quantification s'appuyant sur l'observation et l'expérimentation.

Tableau XI : un scénario érosif sur un versant de Fidh'Ali, septembre à janvier, céréaliculture .

Energie	Physiographie versant	Comportement versant	Production
1	2	3	4
Année agressive (Rsi >100)	<p><u>Segment 1</u> : 250m de sol squelettique sur lumachelles, profil plan, pente > 30%</p> <p><u>Segment 2</u> : 1000m de sols calcimagnésiques sur mames gypseuses, profil plan, pente 5%</p> <p><u>Segment 3</u> : 500m de sols peu évolué à squelettique sur dalle calcaire sans épandage d'éléments grossiers, profil convexe, pente de 7 à 15%</p> <p><u>Exutoire</u> = lac</p>	<p>(1) important flux à forte vitesse, non chargé donc à forte capacité abrasive et forte compétence (2) diminution de la capacité abrasive par augmentation de la charge mais canalisation des flux par diminution rapide de la conductivité due aux désagréations et colmatages, (3) transmission totale des produits de l'amont vers l'aval, restauration de la compétence par augmentation des vitesses de flux.</p> <p>Pas de dépôt sur cette portion de versant.</p>	<p>>50 t/ha/an dont : 90% ravinement (2). 10% aréolaire (2, 3)</p>
Année peu agressive Rsi < 50	ido	<p>(1) dynamique -ido- mais flux moins importants, (2) absorption des 2/3 du flux amont, pas de canalisation du flux, long maintien de la rugosité donc très fortes charges solides évacuées pour de rares dépassements des intensités limites, faible compétence de flux très chargés, dépôts dès ce segment, (3) rien ne vient de l'amont, ce segment joue uniquement le rôle d'impluvium produisant des flux non chargés.</p>	<p>0 à 3 t/ha/an dont : 0% ravinement 100% aréolaire (3)</p>

CONCLUSION

L'objectif de ce travail est une prévision des risques érosifs sur les versants d'un bassin dont l'exutoire est un lac recevant des eaux plus ou moins chargées de sédiments. La combinaison d'informations expérimentales avec des données issues d'évènements naturels a permis d'identifier le niveau de vulnérabilité des différents segments composant le versant. Ce travail a mené à la conception d'un modèle déterministe qui servira de module à d'autres modèles distribués utilisables pour calculer des écoulements et des érosions à une échelle plus vaste.

Dans cette prévision du risque érosif, notre méthode ne concerne que la partie aréolaire de l'érosion hydrique globale. Elle ne peut en effet, quantifier les pertes par érosion ravinatoire, mouvements de masse, éboulement de berges d'oued et encore moins par érosion éolienne.

L'érosion aréolaire des champs du bassin consiste en l'articulation des processus suivants :

- mobilisation initiale d'éléments à partir de terres agrégées naturellement ou en mottes de labour et constitution d'un matériau dispersé, non cohérent : le sédiment,
- prise en charge de ce sédiment par un flux de ruissellement sous forme de suspension ou de pseudo-solutions,
- abrasion liée aux effets directs d'un flux plus ou moins chargé sur la surface du sol, ce flux étant laminaire en surface plane et turbulent en surface rugueuse.

Sur Fidh Ali, et dans ce cadre, l'érosion aréolaire a atteint 0,4 à 2,5 t/ha/an, ce qui ne représente que 1 à 5% des quelque 40 à 50 t/ha/an de l'érosion globale mesurée par bathymétrie au niveau du lac. La majorité des pertes provient en effet du cisaillement d'un tiers de la superficie du bassin soit par des systèmes ravinaires vifs et profonds (cf. photo de couverture) soit par l'extension de bad lands, stade extrême de la dégradation. Les pertes en terres dues au ravinement, mesurées dans une autre opération de recherche, sont cohérentes avec celles que donne la différence : pertes globales - pertes liées à la seule érosion aréolaire.

Malgré cette disproportion, l'analyse de l'érosion aréolaire sous pluies simulées reste opportune pour les raisons suivantes:

1) - elle informe sur les conditions de formation des écoulements en différents lieux du versant cultivé, ces écoulements pouvant ensuite confluer et se canaliser pour donner une érosion ravinatoire. Cette analyse permet d'expliquer les comportements hydrodynamiques et érosifs de sols et de couverts différents. Les résultats d'études antérieures, utilisant la même méthode en d'autres lieux, se trouvent confirmés pour ce qui est de la différence fondamentale de comportements entre des sols formés sur des marnes gypseuses et ceux formés sur des calcaires plus ou moins gréseux. Cette différence est liée à des dynamiques structurales saisonnières répercutant les propriétés des smectites ou autres argiles « gonflantes » ou encore les effets des charges salines (gypse, halite) de ces marnes. Elle se révèle par :

- une plus forte érodibilité des sols sur marnes essentiellement par la fourniture de fortes charges solides même si les ruissellements sont limités par une rugosité et une porosité persistant plus longtemps du fait de la résistance structurale,
- une plus faible érodibilité des sols sur calcaires plus ou moins gréseux, moins argileux, donc moins riches en argiles gonflantes, car leurs structures s'effondrent et leurs surfaces se lissent plus rapidement, deux caractéristiques qui limitent la détachabilité puisque les flux

de ruissellement y restent laminaires et qu'une plus forte épaisseur de lame ruisselante intercepte l'énergie des pluies.

2) - pour un événement pluviométrique donné, la méthode permet une mesure précise des variations de la charge solide dans le temps et dans l'espace. La charge solide modifiant la capacité abrasive du flux interfère sur l'extension ou l'atténuation du ravinement. Dans toutes tentatives de spatialisation il convient donc de considérer attentivement la vulnérabilité des portions de versants traversées par le flux, en effet :

- la charge solide augmente si le flux chemine au travers d'une zone de sols à faible stabilité structurale, de sols dénudés, à plus forte pente,
- cette charge peut diminuer si ce flux reçoit en confluence une eau moins chargée provenant, par exemple, d'une zone à affleurements rocheux cohérents.

Dans des conditions de faible agressivité annuelle des pluies le rapport des érosions « sols sur marnes / sols sur calcaire » reste voisin de 1,7. Dans des conditions de forte agressivité annuelle ce rapport passe à 3,0 car les structures relativement plus résistantes des sols sur marnes finissent par s'effondrer au delà d'un seuil d'érosivité pluviale de quelque 50 points ce qui correspond à 78% des précipitations d'une année moyennement agressive.

Sur Fidh Ali on peut expliquer le "hiatus" entre les pertes liées à l'érosion aréolaire et celles fournies par l'érosion ravinatoire. Sur les marnes gypseuses le ravinement est plus la conséquence du "piping" préparant les axes de ce ravinement par effondrement des voûtes des galeries que de la seule augmentation de la capacité abrasive des écoulements de surface par augmentation de la vitesse de flux avec la pente topographique. Il est cependant raisonnable de penser que les deux processus sont liés dans des conditions où il est difficile de distinguer les causes des effets : le drainage oblique, dont l'accentuation est la cause ou la conséquence du "piping", est forcément à son tour collecté en profondeur des ensemblés du versant qui sont également les lieux de canalisation des eaux superficielles.

La portée de cette étude dépasse la seule quantification de pertes en terres liées à un mode particulier d'érosion : c'est aussi une méthode d'analyse de processus sur la dynamique érosive actuelle de versants cultivés.

L'insertion de ces résultats dans un modèle distribué révélant des fonctions de transferts crédibles et vérifiables ainsi que le couplage avec une analyse des paysages ouvriront sur toutes possibilités de régionalisation des données sur les risques érosifs, sur toutes simulations de changements d'usage, sur toutes préconisations de techniques de conservation des eaux et des sols.

Références bibliographiques

AGASSI M., BENYAMINI Y., MORIN J., MARISH S., EZRA H. 1986

The Israeli concept for runoff and erosion control in semi-arid and arid zones in mediterranean basin. Ministry of Agriculture, Soil Conservation Drainage Division, Agricultural Resaeach Organisation, Soil Erosion Research Station (Rupin Institute). Paper submitted to PAP, Regional Activity Center (UNEP-SPLIT).76p.

ALBERGEL J., BERNARD A. 1984

Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de Kazanga. ORSTOM. Centre de Ouagadougou. 104p. multigraph.

ALBERGEL J., 1987

Génèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Doct. Univers. Paris VI. 336p., multigraph

ALBERGEL J. BEN YOUNESS M., BOUFAROUA M., DEBABRIA A., GUIGUEN N., JENHAOUI Z., GHEDOU S., PEPIN Y. (parution annuelle depuis 1994)

Annuaire hydrologiques des lacs collinaires - réseau pilote de surveillance hydrologique

ANNALES DE L'INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES AGRONOMIQUES DE TUNISIE 1968

Numéro spécial : « Climatologie et Bioclimat de la Tunisie Septentrionale (cartes et tableaux) vol. 41, fasc. 1. : cartes des postes météorologiques de la Tunisie septentrionale, diagrammes des bioclimats méditerranéens, cartes des température moyennes annuelles maxi. et mini., cartes pluviométriques annuelles, pluriannuelles à 1/ 1 000 000, dressées par BORTOLI L (1966).

ASSELINE J., VALENTIN C. 1978

Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrologie, 15 (4), pp.321-349.

ASSELINE J. 1984

Notice technique. Particularités du nouvel infiltromètre à aspersion construit à Gabés. Direction des Sols Tunis. 16p.

ASSELINE J., BAHRI A., HENTATI M., MTIMET A., PONTANIER R. 1989

Contribution à l'établissement de normes édaphiques et hydriques à l'aide de la simulation de pluies en vue du développement d'une agriculture en Tunisie aride. Sols de Tunisie. Bull. n°14. Direction des Sols.

BARBERY J., MOHDI M. 1983

Carte des ressources en sols de la Tunisie – feuille de Kairouan à 1/100 000. ORSTOM, mission de Tunis et Direction des Ressources en Eau et en Sol, publi. ES 202 . 49. , 1 carte hor texte 1/100 000.

BATITA N. 2000

Contribution à l'étude des comportements hydrologiques et érosifs d'un bassin versant de lac collinaire (Kamech)- projet de fin d'étude du cycle d'Ingénieur INAT Tunis, année 1999-2000, encadreurs MM. Habaieb H., Collinet J., Zante P., 74p. + annexes

BELKHODJA K 1972

Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale), contribution à l'étude de leur mise en valeur. DRES, Division des sols, Bulletin n° 4, "Sols de Tunisie", extrait Thèse Doctorale Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse du 19/11/1970 sous la direction du Prof. H.Margulis. 104p., 25 photos., 50 figures.

BELKHODJA K., BORTOLI L., COINTEPAS JP., DIMANCHE P., FOURNET A., JACQUINET JC., MORI A., 1973

Notice et carte pédologique à 1/500 000 de la Tunisie. Ministère de l'Agriculture, Direction des Ressources en Eau et en Sol – Division des Sols, n° spécial de « Sols de Tunisie » (Bulletin de la Division des Sols n°5. 185 p. + 1 carte à 1/500 000.

BOYER JF., CRESPIY A., DIEULIN C., GUISCAFRE J., L'HÔTE Y., RAOUS P. (1994)
PLUVIOM, logiciel de gestion des données pluviométriques – Manuel d'utilisation, ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie (Montpellier), 200p.

CASENAVE A. 1982

Le minisimulateur de pluies. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures Cahier ORSTOM, série Hydrologie XIX, 4, pp 207-227

CASENAVE A., VALENTIN C. 1988

Les états de surface de la zone sahélienne - influence sur l'infiltration. coll. ORSTOM. "Didactique" 229p., 37 fig., 11tabl., 10 cartes, 195 photos.

CASTANY A. 1953

Carte géologique de la Tunisie au 1/500 000 (deuxième édition). Direction des Travaux Publics. Service des Mines de l'Industrie et de l'Energie. S E F A N 1953 Tunis. 143p. 1 carte géologique à 1/500 000, annexes de 14 planches.

CES, 1995

Guide de conservation des eaux et du Sol, projet PNUD / FAO, TUN/86/020. Ministère de l'Agriculture, Direction de la Conservation des Eaux et des Sols, 274 p., Tunis, 1995.

CHEVALLIER P. 1986

Simulation de pluies, télédétection, modélisation. Exemple de la mare d'Oursi (Burkina Faso) Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. collection ORSTOM "Colloques et Séminaires". pp. 90-104.

CHUKWUMA G.O., SCHWAB G.O., EDWARDS W.M. 1979

Rainfall - runoff factors for sediment yield from small watersheds. Journal article of the Ohio Agricultural Research and Development Center. edit. by Wooster n° 125-79, 11p.

Collectif AMBRE 2002

Le bassin versant de Fidh'Ali (dorsale – Hautes Steppes, Tunisie) – atelier d'études intégrées des eaux et des sols. Mission IRD de Tunis et Centre IRD Montpellier. 16p.

Compte rendu d'une mission de simulation de pluies en Haute Volta. ORSTOM. Centre d'Adiopodoumé. Centre de Ouagadougou. 27p. multigraph. + annexes.

COLLINET J., VALENTIN C. 1979

Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, série Pédologie XVII, 4, pp 283-328.

COLLINET J. LAFFORGUE A. 1979

Mesures de ruissellements et d'érosions sous pluies simulées pour quelques types de sols de la Haute Volta. ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé. 129p. multigraph. 123 fig. hors texte.

COLLINET J., VALENTIN C. 1985

Evaluation of factors influencing water erosion in West Africa using rainfall simulation. In: Challenges in Africa Hydrology and Water Resources ". IAHS n°144, colloque de Hararé 1984 (Zimbabwe), pp. 451-461.

COLLINET J. 1988

Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'ouest - évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse Doct. Univers. Louis Pasteur, Strasbourg. Collection ORSTOM Etudes et Thèses microfichées 1989. 513p.

COLLINET J., ASSELINE J., JIMENEZ F., BERMUDEZ A. T. 1998

Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols volcaniques au Costa Rica, CATIE, Turrialba 23 p., 12 fig., 7 tabl.

COLLINET J., BORNEMISZA E., SEGURA A. 1999

Los suelos cafetaleros en America Central y su fertilizacion. in "Desafios de la Caficultura en Centro America" edit. Bertrand B. et Rapidel B. collaborations: CIRAD, IRD, MAE France, IICA Promecafe. pp 95-137.

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.

COLLINET J., TESTOURI JEBARI S., 2001

Etude expérimentale du ruissellement et de l'érosion sur les terres agricoles de Siliana (Tunisie). Institut National de Recherches en Génie Rural et Eaux et Forêts (Tunis), Direction des Sols (Tunis), Institut de Recherches pour le Développement (mission de Tunis).48p.

COQUE R., JAUZEIN A. 1965

Essai d'une carte néotectonique de la Tunisie au 1/1000 000. Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique. Paris, 2ème série, vol. 7, fasc. 3 pp.253-265.

CPCS. 1967

Classification des sols, par "Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols". coord. J. Boulaine + 27 auteurs. Labo. de Géologie-Pédologie de l'ENSA de Grignon. 87p.

ESDADAFAL R., MTIMET A., ASSELINE J. 1986

Etude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar - Sud Tunisien) Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Sols de Tunisie ES 231 -, Direction des Sols de Tunis, 63p.

FAKHFAKH M, LACLAVERE G. 1979

Atlas de Tunisie préface MZALI M., études de BCHIR M., BELLIL M., DLALA H., DHIEB M., EL AOUANI M., KARRAY R., LABAÏED H., MAHJOUBI A., MAKHLOUF E., ZOUARI T., collaboration de CASTANY G., COQUE R., DRESCH J., SOUISSI A. Editions Jeune Afrique, av. des Ternes 75017 Paris. 72p.

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.

GUISCAFRE 1978

Abaques I/D/F de différentes régions de la Tunisie, reprise en annexe B6 du « Guide de Conservation des Eaux et des Sols (DCES – PNUD/FAO – TUN/86/020 de 1995).

HUDSON N.W., 1973

Soil Conservation - Batsford édit. London. 320p.

JAUZEIN A., COQUE R. et al. 1967

The Geomorphology and Quaternary Geology of Tunisia in: Guidebook to the geology and history of Tunisia. (The Petrol. Explor. Soc. of Libya 9th Annual Field Confer. 1967) pp.227-257.

JAUZEIN A. 1967

Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunisienne -Tunisie septentrionale. in Mines et Géologie de Tunis n°22, vol. 4, 475p. (extrait d'une thèse doc. Fac. Sciences de Paris, juin 1962).

LAFFORGUE A., NAAH G. 1976

Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cahier ORSTOM, série Hydrologie XIII, 3, pp195-237.

LAFFORGUE A. 1977

Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Cahier ORSTOM, série Hydrologie XIV, 4, pp 299 - 344.

LAFFORGUE A. CASENAVE A. 1980

Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transferts pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluies. La Houille Blanche. n°4-5. pp 243-249.

Le FLOC'H B., GOUNOT M., NABLI M A. 1986

Carte bioclimatique de la Tunisie à 1/1 000 000. , d'après : (a) les documents de GOUNOT et LE HOUEROU sur les « Etages Bioclimatiques à 1 / 2 000 000 » (1955), (b) la carte bioclimatique de la Tunisie septentrionale à 1 /500 000 de GOUNOT et LE HOUEROU (1967) avec les collaborations 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. Subvention CNRS Paris pour Faculté des Sciences de Tunis, carte dessinée Centre L.EMBERGER de Montpellier par CARRIERE A. 1 carte couleur + légende.

MARTINI P., DEROUICH M.C., PONTANIER R. 1991
Gestion et exploitation des données de simulation de pluies en Tunisie (DSSIMUL) - Direction des Sols - ORSTOM. 17p. multigr.

MASSON J.M., 1971
L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse USTL (Montpellier), 213p + annexes.

MTIMET A., 1987
Evaluation de la sensibilité de ssols arides à l'érosion hydrique (étude de simulation de pluies sur les sols d'un microbassin type "Jessour" à Matmata (Tunisie pré-saharienne). Ministère Agriculture. Direction des Sols, ES240. 51p.

MTIMET A., ATTIA R., DEROUICHE C., PONTANIER R., AGREBAOUI S., DRIDI B., 1996
Evaluation des paramètres physico-hydriques de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique (référentiel sur l'érodabilité des terres en Tunisie). Ministère Agriculture. Direction des Sols, ES292. 120p.

NASRI S., 1990
Contribution à l'étude de la dynamique érosive dans le bassin versant de l'oued Ettieur. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation de l'INAT de Tunis, 90p.

PONTANIER R., MOUKOURI KUOH H., SAYOL R., SEYNI BOUKAR L., THEBE B. 1986
Apport de l'infiltrométrie à asperion pour l'évaluation des ressources en sol des zones soudano-sahéliennes du Cameroun. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. collection ORSTOM "Colloques et Séminaires". pp.165-189.

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.

ROOSE J. 1976
Use of the universal equation to predict erosion in West Africa. Abstract from "Soil Erosion" from SCSA Ankeny, Iowa., et Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, (Ivory Coast). pp 60-74.

THEBE B. 1987
Hydrodynamique de quelques sols du nord Cameroun - bassin versant de Mouda - contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse doct. Univers. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 306p. multigraph.

VALENTIN C. 1979
Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols. In "Actes du colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu méditerranéen". Edit. par Vogt H., et Vogt T. (ULP UFR Géographie Strasbourg). pp.117-122.

VALENTIN C. 1981

Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols des régions subdésertiques (Agadez, Niger) - dynamiques et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse Univ. Paris VII. collection ORSTOM "Etudes et Thèses" 1985. 259p.

VALENTIN C. 1985

Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the sahelian zone, Soil Erosion and Conservation, Soil Conservation Society of America. pp 51-65

VOGT Th., 1984

Croûtes calcaires: types et génèse. Exemples d'Afrique du Nord et de France méditerranéenne. Univ. Louis Pasteur de Strasbourg. Institut de Géographie. Labo. de Géogr. Phys. en Milieu Tempéré. (résumé thèse doctorat Paris VI avril 1983) , 228p.

WISCHMEIER W H., SMITH D D. 1960

An universal soil loss equation to guide conservation farm planing. Abstract from: 7th International Congress of Soil science, Madison, Wisconsin, USA .pp.418-425.

WISCHMEIER W H., 1972

Upslope erosion analysis , abstract from: "Environmental Impact on Rivers" CSU Fort Collins Colorado 80521. pp.15-26.

-----0-----