Etude expérimentale du ruissellement et de l'érosion, sur les terres agricoles de Siliana (Tunisie)

Collinet Jean (*), Testouri Jebari Sihem (**)

Région de Siliana (Tell tunisien, juin 2000)

Institut National de Recherches en Génie Rural et Eaux et Forêts

Direction des Sols

Institut de Recherches pour le Développement

*) *pédologue IRD mission Tunis*
(**) *agronome INRGREF Tunis*

Plan

	pages
Résumé	3
Préambule	3
PARTIE I : PROBLEMATIQUE	
Objectifs	4
Prospective	4
PARTIE II : MILIEU PHYSIQUE ET ACTIVITES HUMAINES	
2.1 Climat	6
2.2 Géologie, géomorphologie	7
2.3 Conditions de la pédogénèse, implications sur la dynamique actuelle	8
2.4 Ressources en eau, hydrologie	10
2.5 Travaux de C E S	11
2.6 Contexte socio-économique	11
2.7 Occupation des sols	11
PARTIE III : METHODE	
3.1 Principe	13
3.2 Matériel	13
3.3 Résumé des phénomènes observables	13
3.4 Régimes d'infiltration et diagnostics comportementaux	15
3.4.1 Rappels théoriques sur l'hydrodynamique superficielle des sols	15
3.4.2 Comportements hydrodynamiques superficiels	17
3.5 Mobilisation des terres érodibles	19
3.5.1 Analyse de la mobilisation initiale des terres, typologie	19
3.5.2 Approche des comportements érosifs, charges solides et ruissellement	21
3.6 Du diagnostic à la prévision des risques, le modèle M O B I L	21
PARTIE IV : RESULTATS, DISCUSSIONS	
4.1 Acquisition et traitement des données de la simulation de pluies	23
4.2 Analyse des caractéristiques pluviométriques naturelles	27
4.3 Mise en oeuvre du modèle	28
4.4 Résultats commentés	32
4.4.1 Influence des calendriers culturaux	35
4.4.2 Influence des érosivités	36
4.4.3 Influence des épandages d'éléments grossiers	37
CONCLUSION	39
BIBLIOGRAPHIE	41
ANNEXES	46

Préambule

Ce travail est le résultat d'une collaboration entre trois organismes: l'INRGREF (Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts de Tunisie), la DS (Direction des Sols de Tunisie) et l'IRD (Institut de Recherche pour le Dévelopement - ex ORSTOM -).
Les données de bases ayant permis de mener cette étude proviennent d'expérimentations menées à l'aide d'un simulateur de pluies mis en oeuvre en septembre 1987 dans la région de Siliana par une équipe franco-tunisienne composées de A. Bahri, D. Bécim, A. Mtimet, R. Pontanier, A Sadok et de quatre étudiants de l'INAT (Institut National Agronomique de Tunis).

Résumé

Cette étude propose une méthode de mesure des érosions aréolaires sur les sols calcimagnésiques plus ou moins encroûtés calcaires et emblavés du terroir de Siliana, en Tunisie centrale semi aride recevant moins de 400mm de pluies. Elle entre dans les thèmes de recherches des programmes HYDROMED et AMBRE sur les potentialités et risques de petits bassins versants alimentant des retenues ou des barrages collinaires.
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 (R(I)) s'établissant entre les intensités de ruissellements et les intensités des pluies puis celles s'établissant entre les charges solides et les intensités de ruissellement (Cs(R)) . Cette analyse est confrontée avec celle des intensités des pluies naturelles (I max 5') susceptibles de provoquer les premiers ruissellements pour différentes situations culturales saisonnières. Cette analyse est à l'origine du modèle MOBIL.
Les résultats montrent que lorsque les premières pluies tombent sur des sols fraîchement labourés l'érosion aréolaire annuelle mobilise 5,5 t/ha/an en année normale (P 369mm et Rsi 57 t.m/ha.h) et 8,0 t/ha/an en année agressive (P 588mm, Rsi 130). La majorité de l'érosion annuelle (50 à 80%) provient des périodes orageuses post-récolte. Si les premières pluies arrivent avant les labours, les érosions deviennent très importantes avec, respectivement, quelque 20 et 40 t/ha/an .
Les risques érosifs sont liés au décalage entre les périodes de préparation des terres et d'apparition des pluies : un labour à grosses mottes est susceptible d'infiltrer les première averses violentes de la saison pluvieuse. Dans le détail, tout dépend de la résistance structurale des labours et surtout de leurs capacités à se restructurer sous les effets des dessiccations superficielles intervenant entre des trains d'averses éloignés. Dans ce cas la nature cristallographique des argiles devient un très bon indicateur comportemental.

PARTIE I

PROBLEMATIQUE

Objectifs

Cette étude est une contribution au thème général portant sur la conservation des eaux et des sols en Tunisie. Elle prétend fournir des informations sur les risques érosifs d'une céréaliculture sur deux catégories de sols représentatifs de la région du Haut Tell tunisien semi-aride.
Ces risques sont évalués selon deux calendriers culturaux et pour deux érosivités de pluies imitant les agressivités climatiques d'une année "normale" (1996) et celles d'une année plus "agressive" (1999).

Le modèle MOBIL s'appuie sur une interprétation des données obtenues sous simulation de pluies permettant d'expliquer des comportements hydrodynamiques et érosifs. Ce modèle fournit, pour différentes situations : types de sols , couverts végétaux, travail des terres et divers évènements pluviométriques, les pertes en terres globales par campagne agricole. Il permet aussi de suivre l'évolution de ces érosions tout au long de l'année en repérant les façons culturales et calendriers culturaux qui imposent les plus forts risques à des sols de vulnérabilités connues.

Il constitue donc une aide intéressante à la prise de décision pour tous problèmes de C E S.

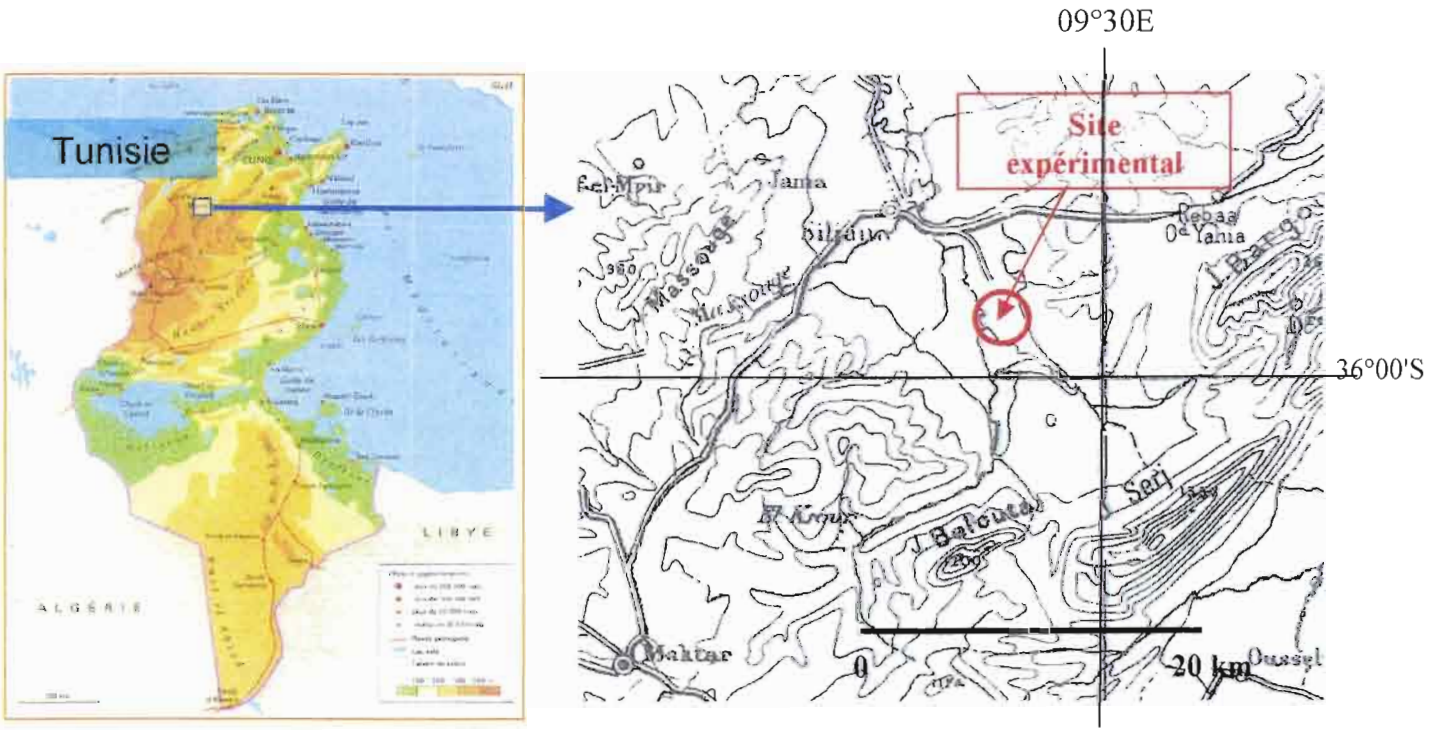
Prospective

Les comportements d'une vingtaine de sites ont été testés sous pluies simulées depuis 1985 sur une grande partie du semi-aride tunisien, le retraitement de leurs données permet de prévoir une synthèse expliquant les dynamiques actuelles des agrosystèmes par unités paysagiques représentatives.
L'interprétation des données expérimentales, telle qu'elle est présentée dans cette étude, et telle qu'elle sera poursuivie sur les autres sites expérimentaux, permettra d'identifier des indicateurs comportementaux conduisant à une spatialisation d'informations utiles. Le couplage de ces informations dynamiques avec une analyse des paysages sera la base d'un système d'information géographique fournissant des cartes d' iso-potentialités ou d'iso-risques liés à l'utilisation des sols.

PARTIE II

MILIEU PHYSIQUE ET ACTIVITES HUMAINES

figure 1 : localisation du site expérimental de Siliana



Le site expérimental est localisé à une dizaine de km de la localité de Siliana **(fig. 1)**. Ce terroir est représentatif d'une partie des activités agricoles du gouvernorat du même nom. Ce gouvernorat couvre 467 000ha soit 28% de la superficie de la région du nord-ouest tunisien et 3% du territoire national. Les villes importantes sont Siliana, Bouarada, Makthar, Rouhia et Gaafour.

Le nord du gouvernorat est peu accidenté avec de larges plaines délimitées par des djebels de faible altitude; les plaines de quelque 10km de largeur sont celles des oueds Siliana et Tessa qui constituent les principaux affluents de l'oued Medjerda. Le sud du gouvernorat est plus accidenté avec des chaînes montagneuses encadrant des plaines plus étroites, ce sont celles des oueds Nebhana, Zeroud et Marguellil.

2.1 Climat

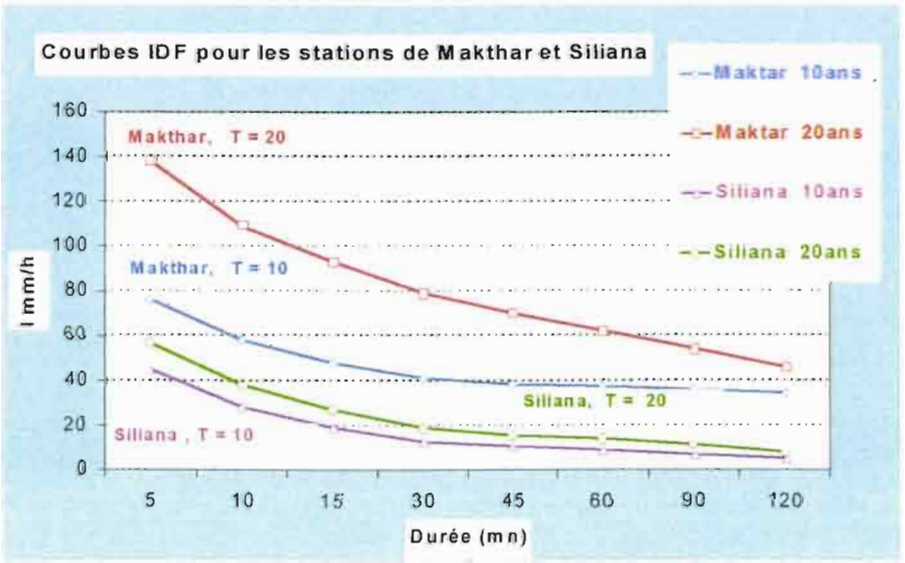
Les informations climatiques proviennent de la station météorologique de Siliana.
La région appartient au bioclimat semi-aride moyen dans sa nuance continentale avec une forte amplitude thermique maximale annuelle de 32°C et des humidités moyennes plus faibles que près de la côte.
L'aridité, évaluée par le coefficient Q_2 d'Emberger, est égale à 44 à Siliana, 55 à Maktar ; rappelons que ce coefficient oscille entre 35 et 70 pour définir le bioclimat semi-aride. La pluviométrie annuelle est comprise entre 300 mm en plaine et 500mm dans les zones montagneuses. Les 433mm de Siliana sont déficitaires par rapport à ce que l'on a en altitude (Makthar). Comme en d'autres régions de la Tunisie les irrégularités interannuelles et saisonnières sont fortes.

Tableau I : pluviométries moyennes mensuelles (Siliana 1974-1997)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P. moy. (mm)	34.7	38.3	45.1	30.6	33.3	10.4	5.5	13.9	40.7	37.5	40.6	31.1

Tableau II : moyennes pluviométriques saisonnières

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	**Année**
P. moy. (mm)	189.94	104.23	109.07	29.8	433.04
Pourcentage (%)	44	24	25	7	100



Des abaques "intensité / durée / fréquence" (IDF) ont pu être dressées pour les stations de Makthar (+ 900m) et de Siliana (+ 430m) ; on y observe une agressivité nettement plus forte pour Makthar, ceci va à l'encontre de ce que l'on observe généralement en ce qui concerne l'effet de l'altitude sur l'énergie des pluies, peut-être s'agit-il plus simplement d'un problème d'exposition

Figure 2: Courbes I D F des pluies sur les stations de Makthar et de Siliana

Q2 Emberger = 2000 P / (moyenne des températures maxi.)²-(moyenne des températures mini.)²

2.2. Géologie et géomorphologie

Le substratum géologique est exclusivement constitué de roches sédimentaires appartenant au Crétacé, au Tertiaire et au Quaternaire.
Le terroir de Siliana s'inscrit dans un synclinal à flancs Sénonien (Crétacé supérieur) et coeur Oligocène (Tertiaire). Cette structure est représentative d'une large bande de territoire s'étendant de Tunis à Kasserine où les différentes orogénèses ont donné des alignements NE - SO d'anticlinoriums et de synclinoriums d'amplitudes variables, séparés par des zones moins plissées aplanies en longs glacis dès le début du Quaternaire. Ces zones aplanies furent ensuite creusées de larges vallées et plus moins comblées par des colluvions et alluvions

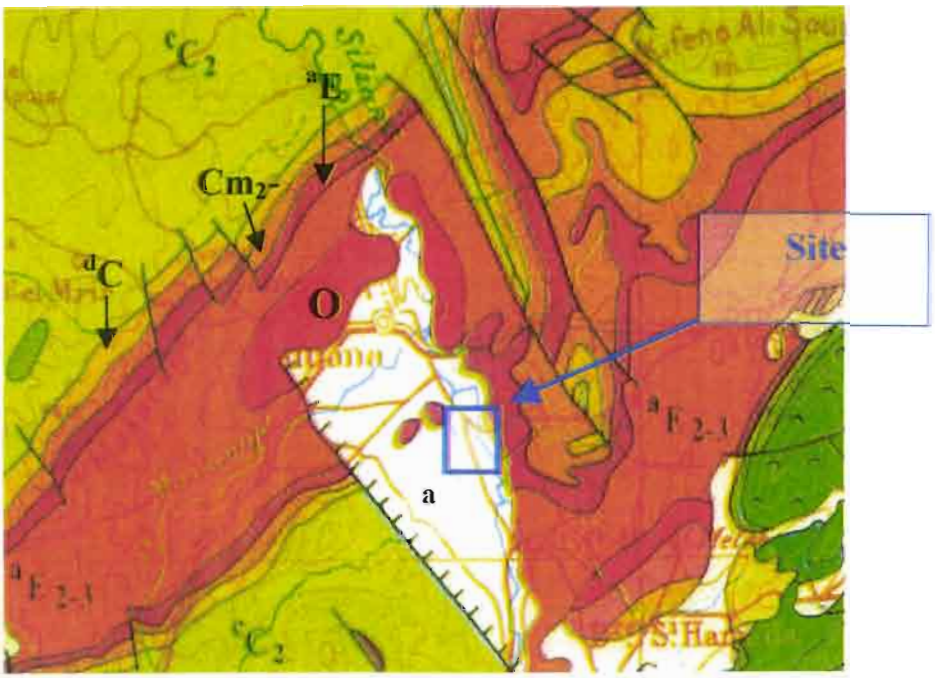


Figure 3: Esquisse géologique de la région de Siliana (d'après la carte du Service Géologique National 1985 à 1/500 000)

Stratigraphie:
- $^{c}C_2$, Sénonien inférieur (-88 Ma) : marnes à intercalations calcaires,
- $^{d}C_2$, Sénonien supérieur : calcaires crayeux blancs,
- Cm_2-P, passage au Tertiaire (-65 Ma) avec le Maestrichtien - Paléocène : argiles à minces intercalations calcaires,
- $^{n}E_1$, Yprésien et Lutétien : calcaires à nummulites, calcaires dolomitiques, couches phosphatées,
- $^{a}E_{2-3}$, Lutétien et Priabonien : argiles et lumachelles pouvant passer à des évaporites,
- O, Oligocène indifférencié (-35 à -25 Ma): alternances argilo-gréseuses formant le coeur du synclinal au N-O de Siliana,
- aQ, Quaternaire: alluvions, colluvions récents comblant la dépression NO - SE de Siliana.

Cette structure, avec des crêts pouvant évoquer un style "jurassien", se complique lorsque, occasionnellement, la tectonique devient cassante avec des faillages transversaux accompagnés ou non du coulissage des formations "cassées". Cette particularité est à l'origine de la désignation géostructurale de ce domaine en "zone des fossés transversaux et des dômes" (Castany, 1953 - Jauzein, 1967, Jauzein et Coque, 1967). Ceci apparaît sur la reproduction de carte géologique de la **figure 3.**
Sans entrer dans le détail, on note que l'alternance de roches dures et tendres explique les formes de modelé résultant de l'érosion hydrique dans cette région où les cuestas et long revers plans correspondent aux épais bancs calcaires et où les dépressions ou bad-lands correspondent aux marnes et argilites. Les zones "vulnérables" sur marnes et argilites sont parfois protégées par des reliquats d'encroûtements calcaires. Dans la région, restes de glacis et encroûtements datent de la fin du Quaternaire moyen (équivalent : Tensiftien marocain) et correspondent aux glaciations

européennes du Riss, donc de -0,30 à - 0,12 Ma (R.Coque, A.Jauzein, 1965 , A. Ruellan , 1971 - Ph. Blancanneaux, 1989, Th. Vogt, 1984).

Cette morphologie en cuestas sur calcaires, de ravins ou bad-lands sur marnes et de glacis plus ou moins protégés par des encroûtements est particulièrement visible de part et d'autre de la route descendant sur Siliana ou encore en parcourant le petit bassin versant voisin de l'oued El Hnach.

2.3 Conditions de la pédogénèse, répartition des sols, implications sur la dynamique actuelle,

Du fait du climat, l'altéropédogénèse actuelle est très peu intense dans la zone étudiée et il s'y détruit plus de couvertures pédologiques anciennes qu'il ne s'en différencie de nouvelles sauf dans les zones moins drainées favorisant l'hydromorphie voire une vertisolisation récente facilitée par une nette lithodépendance de sols héritant des argiles gonflantes déjà contenues dans les roches-mères.

On est trop au nord et dans des zones relativement drainantes pour observer les salinisations ou les alcalinisations qui deviennent plus fréquentes sous les bioclimats plus arides du sud (plaine de Kairouan). La lithodépendance entraîne par contre une gypsification des sols situés à l'aplomb de certaines marnes Eocènes.

La différenciation actuelle des sols dépend des intensités de l'érosion , voire de mouvements de masse sur fortes pentes. La profondeur des profils est liée à l'intensité de cette abrasion confrontée à la plus ou moins grande résistance de matériaux qui, rappellons le, sont assez souvent encroûtés.

Les teneurs en matière organique sont basses (médiane vers 0,7 %) et ce pour différentes causes:

- faiblesse des productions naturelles de biomasse, ancienneté de l'occupation des terres,
- sous ce climat, les processus de minéralisation l'emportent toujours sur ceux de l'humification, -
- très faibles restitutions organiques imposées par l'errance des troupeaux et l'exportation des pailles vendues pour les stabulations du nord du pays.

Sur marno-calcaires et calcaires qui représentent 75% des substratums, les textures oscillent entre le limono-argileux sur marnes calcaires et le limono-sableux fin sur calcaires, les sables grossiers sont rares. Cette granulométrie favorise la battance des sols, ce qui limite considérablement les conductivités hydrauliques superficielles. On trouve par contre des textures plus fines, argileuses à très argileuses sur les marnes argileuses et argilites, soit sur 25% des surfaces qui correspondent, lorsque ces roches affleurent, aux zones ravinées voire aux bad-lands.

Les conditions et modalités de la structuration des agrégats natuels ou de la restructuration des mottes de labour ont une importance prépondérante pour le statut hydrophysique des sols.

Dans un pédo-environnement à faible taux de colloïdes organiques, à faible activité micro-organique, à complexes absorbant saturé par des cations alcalino terreux voire alcalins, à faibles taux de sesquioxydes métalliques, une grande part du comportement des sols est liée aux taux d'argiles et surtout à la cristallographie de ces argiles.

Les sols contenant assez d'argiles gonflantes développent des structures naturelles fragmentaires nettes et stables. Le travail de ces sols fournit des mottes susceptibles de régénérer, par dessiccation, les mêmes structures nettes et stables favorisant l'infiltration et permettant le maintien de fortes rugosités, ce qui limite l'abrasion liée aux flux hydriques. Nous verrons cependant ultérieurement que si ces sols à structure stable sont susceptibles de limiter les ruissellements, au moins par l'infiltration des premières pluies, ils peuvent aussi, malheureusement, fournir de très fortes charges solides.

Dans la région de Siliana les unités pédologiques exprimées selon la classification française des sols de 1967 (CPCS) reproduisent assez fidèlement les limites des étages géologiques. Le décodage de cette taxonomie est possible dans la mesure où ces unités coïncident souvent avec les contours des formations géologiques.

a) sur les marnes à intercalations calcaires du Sénonien inférieur ($^{c}C_2$), on trouve la juxtaposition suivante:

- des sols calcimagnésiques sur les calcaires, il sont saturés en Ca CO_3 actif,
- des sols bruns sur les passages plus marneux, ils sont souvent décarbonatés, ont des teneurs un peu plus forte en matière organique (protection par l'argile) et possèdent une structuration généralement plus affirmée,
- des lithosols ou des régosols sur croûtes calcaires, ils sont peu épais et à charge importante en graviers et cailloux, ce qui limite le volume de terre susceptible de stocker les réserves hydriques.

b) sur les calcaires crayeux blancs ($^{d}C_2$), les argiles à intercalations calcaires (CM_2-P), les calcaires à nummulites et les calcaires dolomitiques ($^{n}E_1$) qui forment le passage du Crétacé à l'Eocène, on trouve une juxtaposition de sols calcimagnésiques sur les strates les plus calcaires et de sols vertiques sur les strates les plus argileuses; cette couverture pédologique est constituée d'unités à nettes variations texturales et structurales latérales.

c) sur les argiles et lumachelles du Lutétien ($^{a}E_{2-3}$) et les argiles de l'Oligocène (O) on retrouve les mêmes différenciations que précédemment avec des vertisols plus fréquents,

d) enfin, les colluvions et alluvions des bas de versant et des vallées (^{a}Q) reçoivent des sols peu évolués d'apports dont les profondeurs et textures dépendent étroitement de l'origine de ces apports. Les plus profonds possèdent souvent une texture équilibrée, ce sont les terres céréalières des larges vallées. D'autres sols proviennent directement du démantèlement des croûtes calcaires, ils sont caillouteux et peu épais donc nettement moins intéressants.

Les expérimentations de simulation de pluies se déroulèrent sur ces deux derniers types de sols meubles et encroûtés et à argiles peu actives dans les colluvions. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le **tableau III**

Tableau III: caractéristiques résumées des sols des parcelles de simulation de pluies.

PARCELLE	SM 1	SM 2	SM 3	SML 1	SML 2	SML 3	SMA 1	SMA 3	SMA 4
position topograph.	amont	milieu	aval	aval	milieu	amont	même niveau du versant		
pente %	19	12	10	13	10	8	12	9	15
roche mère	marnes	marnes	marnes	colluvion marneux concrétion	colluvion marneux concrétion	colluvion marneux concrétion	croûte fragm.	croûte fragm.	croûte fragm.
profondeur C ou R	30cm	30cm	30cm	70cm	70cm	70cm	0 cm	0 cm	0 cm
horizons pédo.	Ap/C	Ap/C	Ap/C	Ap/C/R	Ap/C/R	Ap/C/R	Cca	Cca	Cca
A+L %	50	50	45	48	50	54	49	62	63
dév. struct.	fort	moyen	moyen	faible	fort	fort	indéterm	indéterm	indéterm
E.G. %	0	0	0	0	0	0	36	12	7
utilisation	reste labour	jachère	blé + adventi.	jachère nue	labour frais	semis blé	jachère nue	jachère chaumes	labour frais
états des surfaces	fentes	pell. battance	fentes	pell. battance	fentes	pell.. battance	épandage EG	épandage EG	épandage EG

2.4 Ressources en eau, hydrologie

Les ressources en eau du gouvernorat sont estimées à 191.10^6 m^3, on distingue essentiellement :

a) les eaux de surface estimées font 170.10^6 m^3 dont 58.10^6 m^3 sont mobilisées à partir des barrages de Siliana et de Lakhmès et 70 $.10^6$ m^3 dans les barrages de Sidi Salem et Nebhana en dehors des limites du gouvernorat. Le taux de mobilisation des eaux de surface atteint donc 75%.

b) les eaux souterraines sont estimées à 21.10^6 m^3 dont 11.10^6 m^3 proviennent des nappes profondes et 11.10^6 m^3 des nappes phréatiques. La mobilisation de ces ressources est assurée par 41 forages et 1700 puits de surface.

La capacité de mobilisation des ressources en eau demeure insuffisante pour les besoins du gouvernorat.

L'oued Siliana fait partie du bassin versant de la Medjerda, il prend naissance dans les versants du nord de la dorsale tunisienne (Djebel Serdj et Djebel Bargou), son débit augmente après sa confluence avec l'oued Lakhmés au niveau de Siliana. En amont de Siliana, l'oued Siliana et ses affluents de la rive gauche traversent les dépôts alluviaux et colluviaux meubles du Quaternaire qu'ils incisent profondément jusqu'aux encroûtements. En aval de Siliana, l'oued et ses affluents inscrivent leurs méandres dans les marnes peu perméables du Santonien.

2.5 Travaux de CES

La zone étudiée contient de nombreux travaux de CES tels que des lacs collinaires (El Hnach entr'autres) et un abondant réseau de banquettes de terre particulièrement efficaces (C E S 1995). Dans les zones marneuses, les corrections de ravins et ravines par murettes, fascines et divers empierrements ont une efficacité correcte en plaine, mais celle-ci se limite considérablement dans les piémonts plus pentus où la seule protection est assurée naturellement par les encroûtements calcaires recouvrant les parties de glacis sur ces marnes et argilites.

Grâce à un effort soutenu de reboisement et d'entretien des forêts plus anciennes, le taux de boisement du Gouvernorat de Siliana atteignait 23% en 1994 avec près de 110.000ha de forêts et de garrigues arbustives. Ce taux, appréciable dans ce bioclimat sub-aride, est seulement dépassé par celui des régions septentrionales plus humides (Zaghouan, Jendouba, Bizerte).

L'assolement est classiquement biennal de type jachère / blé. En vallée, on assiste depuis quelques années à l'introduction de légumineuses fourragères qui amélioreraient lentement la fertilité des sols, surtout au niveau de son bilan organique, et passeraient pour permettre un accroissement de la production céréalière lorsque ces légumineuses se substituent à l'année de jachère.

Les arbres fruitiers sont rares, ils commencent à être introduits en aval des retenues collinaires où l'irrigation facilite la reprise des jeunes plants. Sur les rives de l'oued et les terrasses, on pratique le maraîchage irrigué par pompage dans les mares délaissées par l'oued puis dans un alignement de puits occupant les lits majeurs ; malheureusement, ces nappes superficielles se rabattent rapidement en été.

2.6 Contexte socio-économique

Avec ses 239 600 habitants, dont 71% de ruraux, le gouvernorat de Siliana représente 3% de la population totale du pays. Le flux migratoire sortant est estimé à environ 3% l'an. Les délégations les plus touchées par ce phénomène sont celles de Makthar et de Bargou.
Les habitants tirent essentiellement leurs ressources d'une agriculture basée sur l'élevage ovin et la céréaliculture qui produiraient respectivement 10 000 et 9 000DT de valeur brute. Par rapport aux potentialités agronomiques du gouvernorat et malgré une récente évolution, le volume de production enregistré demeure faible. Les rendements sont loin d'être satisfaisants, enfin les services agricoles connaissent des problèmes de mécanisation, d'approvisionnement, de capacité de stockage, d'écoulement de la production.
La situation foncière est caractérisée par la coexistence de la petite et de la moyenne exploitation . Comme dans d'autres régions, la petite agriculture, très sensible aux aléas climatiques, est refoulée sur les piémonts des djebels, donc sur des terres généralement moins fertiles et à faibles réserves hydriques.
Cette région est parmi celles qui sont les moins subventionnées, elle est économiquement et démographiquement déprimée. L'exode rural assez prononcé et le manque de main d'œuvre agricole saisonnière qualifiée sont des problèmes contre lesquels butteront tous projets d'intensification des systèmes de culture.

2.7 L'occupation des sols

Les terres agricoles représentent environ 90% de la superficie du gouvernorat. Ces terres sont en relief accidenté puisque 60% de leurs surfaces ont des pentes > 5% donc sujettes à l'érosion , elles se répartissent comme suit :

- 300 000 ha de terres agricoles
- 110 000 ha de forêts et de garrigues arbustives
- 20 000 ha de parcours permanents.

Les céréales, et particulièrement le blé dur, occupent plus de 53% des surfaces cultivées. Sur ces sols souvent minces, donc à faibles réserves hydriques, les rendements restent faibles (5 à 10 qx/ha).

Tableau IV : utilisation actuelle des sols *(selon le VIIIème plan agricole régional, Groupement de Siliana)*

CULTURES	*SUPERFICIES*	*%*
Céréales	157 700 ha	53
Jachères	63 800 ha	21
Légumineuses	4 800 ha	2
Fourrages	30 000 ha	10
Arboriculture	41 500 ha	14
Total	297 800 ha	100

Compte tenu des conditions naturelles (climat, modelé) et du potentiel agricole du gouvernorat, on peut considérer que les principaux freins au développement sont :

- l'érosion qui concerne 80% des terres agricoles soit environ 240 000ha ;
- la faible production des terres céréalières et de l'élevage ;
- la sous-exploitation des ressources en eau et surtout des eaux de surface,
- le faible développement du secteur arboricole,
- enfin, le manque des services techniques agricoles à proximité des exploitations.

PARTIE III

METHODE

3.1. Principe

Les quantifications des ruissellements et des érosions sont obtenues expérimentalement en traitant les données issues des parcelles de pluies simulées.

Les recherches sur la genèse des ruissellements et sur les causes des érosions partent de deux séries d'analyses:

a) celles établissant les relations entre les intensités des ruissellements et les intensités des pluies,

b) 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 hyètogrammes des pluies naturelles.

3.2. 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 en 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 $1m^2$, 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.

3.3 Résumé des phénomènes observables

Les protocoles expérimentaux se sont efforcés de concilier:
- la simulation d'évènements climatiques réalistes, donc respectant les conditions climatiques locales et notamment l'agressivité des averses repérée par leurs abaques IDF,
- l'analyse du comportement d'un sol dans des situations représentatives de couverts ou d'usages différents,
- l'analyse du comportement de différents sols dont on se sera efforcé d'isoler les seuls effets de la différenciation pédologique.

L'hydrogramme de ruissellement de la **figure 4** sert de base à toutes informations traitant de l'hydrodynamique du sol placé dans une situation donnée et soumis à un évènement pluviométrique donné.

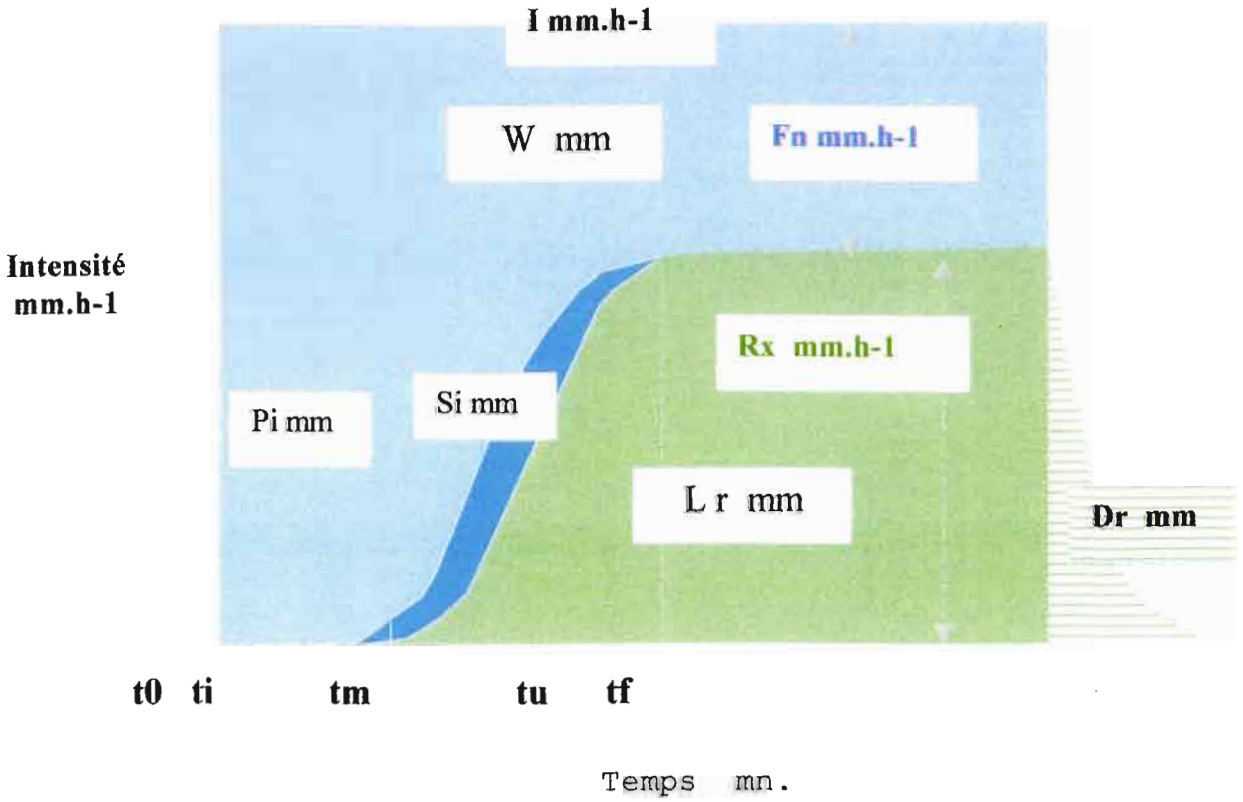


Figure 4: Hydrogramme théorique de ruissellement et d'infiltration obtenu sous simulateur

Le temps (minutes) est porté en abcisse. En ordonnée figurent les intensités ($mm.h^{-1}$) des différents termes du bilan qui sont:
- la ou les intensité(s) de l'averse simulée **I** à l'instant **t**,
- l'intensité du ruissellement $\mathbf{R_t}$, et son inverse **I-R** qui est l'intensité d'infiltration $\mathbf{F_t}$.

L'hydrogramme de ruissellement présente quatre phases qui sont:
- la <u>phase d'imbibition</u>, de l'origine **to** à **ti** pendant laquelle tombe une hauteur de pluie **Pi** ne donnant aucun ruissellement parce qu'en en tous points de la parcelle, **I < F**, situation permettant

l'infiltration d'une lame **Wi** (mm). Il se forme ensuite des flaques là où **I > F**, c'est le stockage superficiel **Si** (mm) et on a ainsi:

$$Pi = Wi + Si$$

- la phase de régime transitoire de **ti** à **tm**, 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 **Fn**.
- la phase de régime permanent de **tm** à **tu**, pendant laquelle au régime permanent minimum d'infiltration **Fn** correspond un régime maximum permanent de ruissellement **Rx** tel que **Fn = I - Rx**,
- le tarissement des écoulements en fin de pluie, de **tu** à la fin du ruissellement **tf**, et 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 déposent 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:

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

3.4. Régimes d'infiltration et diagnostics comportementaux

Le protocole expérimental prévoit, par site, quelques averses simulées ininterrompues et à intensités variables qui permettent de tracer les droites exprimant les relations **Fn(Im)** ou encore **Rx(Im)**. L'exploitation de cette relation, et des paramètres qui en découlent, est riche d'enseignements sur la possibilité de diagnostiquer des comportements spécifiques de chaque situation.

3.4.1. Rappel théorique sur l'hydrodynamique superficielle des sols

Pendant la phase préliminaire, ou phase d'imbibition, les intensités d'infiltration du sol **F(t)** restent, en tous points de la parcelle, supérieures à l'intensité de la pluie simulée **(Im)**.
Pendant la phase transitoire, la diminution du régime d'infiltration provoque les débuts du ruissellement. Aucun modèle physique n'est totalement satisfaisant pour expliquer l'infiltration dans notre schéma expérimental. Cette infiltration et son refus, le ruissellement, résultent des effets de différentes choses: de la conductivité s'exerçant sur des corps multicouches, de la diffusion d'un milieu saturé vers un milieu non ou moins saturé, donc de circulations de flux sous les influences de potentiels hydriques gravitaires, matriciels, etc..Il convient, enfin, de signaler la reprise évaporatoire entre deux averses consécutives s'exerçant sur un matériau aux organisations porales forcément modifiées.

Dans un souci de simplification sans trop perdre d'information, il est apparu que le modèle de Green et Ampt (1911) restait le plus intéressant pour rendre compte du processus hydrodynamique global, ce moyennant les acceptations suivantes:

a) une extension de la loi de Darcy à des infiltrations en milieu non saturé substituant le potentiel matriciel au seul potentiel gravitaire,

Darcy état saturé (rappel) Darcy état non saturé (rappel)

$$q = K_{sat} \frac{H}{L} \qquad q = K \Psi \frac{d\Psi}{dx}$$

avec...
q *= densité de flux, soit débit rapporté à une unité de surface,*
H *= hauteur de la colonne de sol saturé + hauteur de la lame d'eau maintenue en surface,*
L *= hauteur de la colonne de sol saturé,*
K_{sat} *= conductivité hydraulique à saturation,*
Ψ *= potentiel matriciel,*
$d\Psi/dx$ *= gradient local de ce potentiel.*

b) la conductivité hydraulique est considérée comme constante sur toute l'épaisseur du sol... ceci est évidemment contestable pour les modèles multicouches, et, d'une façon générale, pour les sols dont la conductivité hydraulique K_{sat} est fortement contrôlée par la résistance hydraulique de l'organisation pelliculaire de la surface du sol.

c) par contre, l'accent porté sur le déficit de saturation et la prise en compte du cumul des infiltrations cumulées antérieures **W(t)** sont bien adaptés aux performances du dispositif.

L'intensité d'infiltration à l'instant " **t** " s'exprime de la façon suivante:

$$F(t) = K_{sat} \left(1 + \frac{\Psi_f \Delta i}{W(t)} \right) \qquad (1)$$

avec:
K_{sat} *= conductivité hydraulique saturée du sol*
Ψ_f *= potentiel matriciel à la profondeur considérée*
Δi *= déficit de saturation du sol à la profondeur considérée,*
$W(t)$ *= lame d'eau infiltrée cumulée depuis le début de la pluie,*

<u>Pendant la phase d'imbibition</u> **(Pi)** où l'intensité d'infiltration égale l'intensité de la pluie, l'équation (1) donne:

$$F(ti) = I = K_{sat} \left(1 + \frac{\Psi_f \Delta i}{Pi}\right) \qquad (2)$$

il existe une durée de pluie pour laquelle, quel que soit le déficit de saturation du sol, le régime d'infiltration <u>**Fn** devient constant</u>, ainsi on a, en fin d'averse:

$$F(tu) = Fn = K_{sat} \left(1 + \frac{\Psi_f \Delta i}{W(tu)} \right) \qquad (3)$$

K_{sat} , et Ψ_f, se calculent à partir des équations (2) et (3)

$$K_{sat} = \frac{(Fn.W(tu)) - Pi \,.\, I}{Wtu - Pi} \qquad (4)$$

Les analyses antérieures de Valentin (1981) ont démontré la bonne correspondance entre cette conductivité calculée à partir de l'équation (4) et celle mesurée sous simulation de pluie.

3.4.2. Comportements hydrodynamiques superficiels

Les travaux concernant l'influence des intensités des pluies sur **Fn** ou **Rx** sont rares et leurs conclusions sont parfois 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:

Fn, ou Rx, sont susceptibles de varier avec l'intensité de l'averse Im

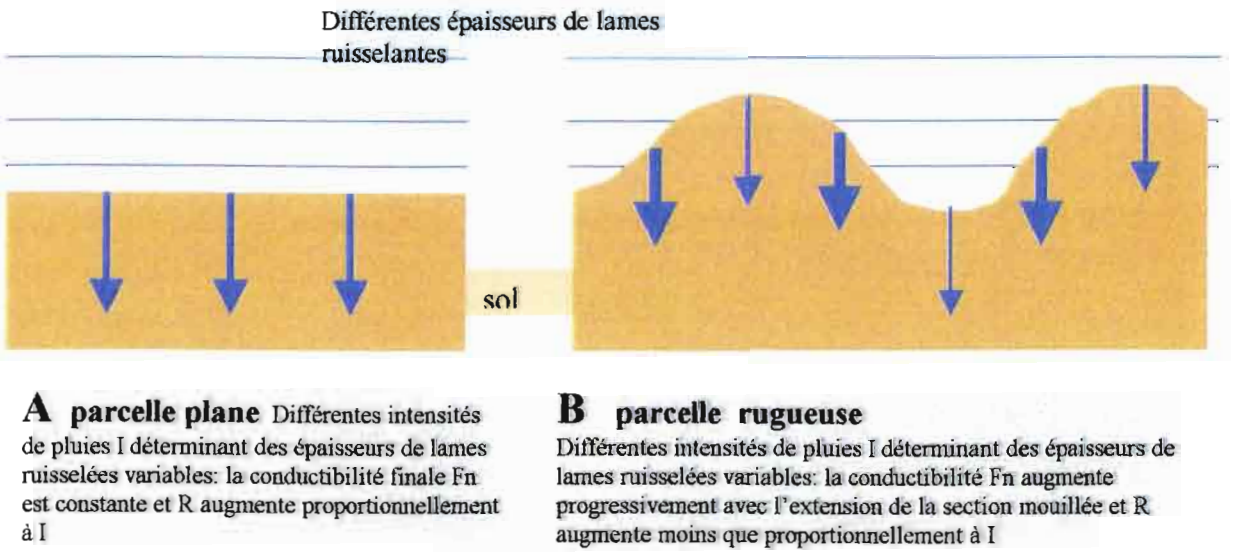


Figure 5 : Etats des surfaces et variation des conductibilités hydrauliques saturées sur parcelles

Cette dépendance, qui peut paraître étonnante, traduit en fait la variabilité latérale de la conductivité hydraulique K_{sat} sur les parcelles humides.

Cette variabilité, qui est schématisée sur les deux types de surface de la **figure 5,** s'explique de la façon suivante:

- si K_{sat} est constante, c'est que l'intensité d'infiltration à régime constant **Fn**, qui dépend du déficit de saturation du sol, devient égale à K_{sat} lorsque, en tous point de la parcelle mouillée et

sous lame ruisselante, **Im** devient supérieure à K_{sat}, c'est le cas des surfaces formant très rapidement des organisations pelliculaires (cas **A**) ,

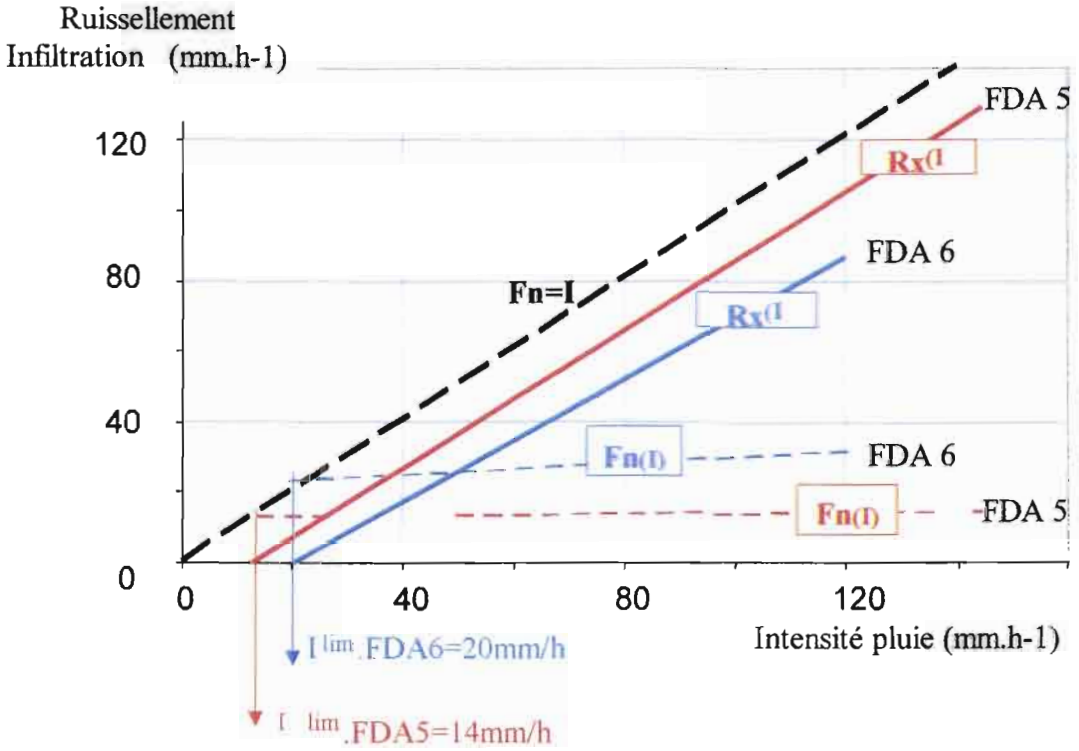
- si K_{sat} varie d'un point à un autre, le nombre de sites où **Im** > K_{sat} augmente jusqu'à une intensité maximale où cette **Im** deviendrait partout supérieure à K_{sat}., c'est le cas de surfaces irrégulières, rugueuses, mouillées mais inégalement immergées sous une lame ruisselante pour différentes raisons: travail du sol, activité biologique, micromodelé, couvert végétal (cas **B**) .

Sur ces parcelles hétérogènes, la fonction Fn(I), est donc croissante et monotone de la forme: $Fn = aI + b$

. . . où le paramètre de pente " a " donne une information sur l'hétérogénéité du comportement hydrique.

Sur une parcelle donnée **(Figure 6)** il y aura un faisceau de droites **Fn(I)** correspondant à différents états d'humectation antérieure des sols et dont les pentes **"a"** des droites de régression de Fn en I.

Figure 6: relations Rx (I) et Fn (I), obtention des intensités limites I l.



varient en raison des variations d'une conductivité hydraulique qui, mesurée à l'exutoire du canal de ruissellement, intégre les comportements de toute la parcelle.

En ce qui concerne la relation Fn(I) :

- 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.

On remarque que l'intersection de la droite Fn(I) avec la bissectrice Fn = I, détermine, par projection sur l'axe des abcisses, un point correspondant à l'intensité

minimale de la pluie provoquant le premier ruissellement, il s'agit de l' intensité limite I lim.

On note que cette intensité limite pourrait être aussi déterminée expérimentalement en diminuant progressivement l'intensité de la pluie jusqu'à l'arrêt du ruissellement.

Sous simulateur de pluies où Fn = Im - Rx, Rx varie corrélativement en fonction de Im selon l'équation: Rx = ((1-a) Im) - b

L'intensité limite de la pluie provoquant les premiers ruissellements $\mathbf{I_{lim.}}$ s'obtient de la façon suivante:

$$\mathbf{I_{lim.}} = \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{1 - a}}$$

Le même raisonnement que précédemment montre que, sur une parcelle donnée, il y aura un faisceau de droites **Rx(I)** correspondant à différents états d'humectation antérieure du sol .

S'agissant d'une étude portant sur l'érosion, générée par des ruissellements, la relation **Rx(Im)** sera ultérieurement la seule utilisée.

3.5. La mobilisation des terres érodibles

Les évolutions des charges solides avec le temps décrivent des courbes dont les aspects sont très instructifs quant aux modalités des pertes en terre selon les situations testées et les évènements imités.
On peut aussi accéder à une information plus synthétique en exprimant l'évolution des charges solides en fonction des intensités de ruissellement, cette présentation traduit les évolutions probables de champs selon leurs situations culturales.

3.5.1. Analyse de la mobilisation initiale des terres, typologie de cette mobilisation

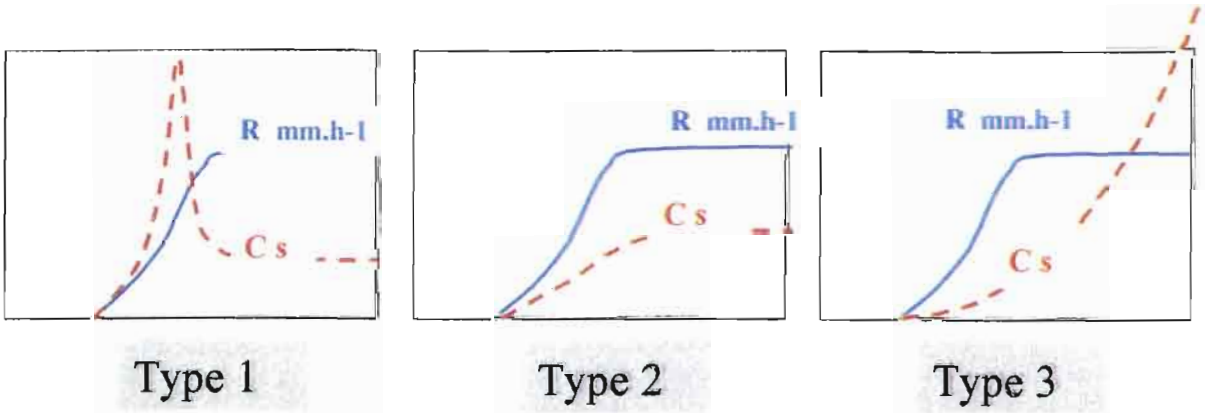


Figure 7: typologie partielle des turbidigrammes

Des travaux antérieurs, menés avec d'autres dispositifs (Hudson, 1973 - De Ploey et Moeyerson, 1976 - Chukwuma, Schwab et Edwards, 1979) ou avec différents simulateurs mis en oeuvre sur de nombreux autres sites de la zone intertropicale (Collinet, Lafforgue, 1975 - Collinet, Lafforgue, 1979; Collinet, Valentin, 1979, 1985 - Valentin, 1981 - Collinet 1988, Collinet, Zante, Agrébaoui, Dridi 1999) ont permis de dégager une véritable typologie de ces enregistrements quasiment en continu des charges solides.
Dans ces essais tunisiens, on retrouve les 3 types illustrant les modes de mobilisation les plus fréquemment observés sur d'autres continents **(figure 7)**
Le premier type de turbidigramme traduit les processus suivants :

- le pic de charge correspond aux sédiments abandonnés sur la parcelle lors du tarissement du flux de ruissellement de l'averse précédente, additionnés de ce qui provient du détachement de particules du sol non encore totalement couvert par la lame ruissellante de la pluie en cours (érosion aréolaire liée à l'effet splash).
- le palier des charges solides correspond à la seule abrasion du flux de ruissellement pendant la phase de régime constant du ruissellement. Ce palier est bas si le flux est laminaire (parcelles lissées), il est plus important pour des flux turbulents générés par toutes rugosités superficielles (autre forme d'érosion aréolaire liée à la seule abrasion du courant de ruissellement).

Le tracé du deuxième type de turbidigramme traduit la prédominance d'une seule composante qui est la charge solide d'un flux, modérément abrasif. Il s'agit le plus souvent de parcelles résistantes, lissées et à faible infiltrabilité. Le ruissellement s'y instaure rapidement et l'épaisseur de la lame ruisselante intercepte l'énergie des pluies limitant de ce fait le " splash ".

Le troisième type traduit une détachabilité croissant fortement pendant l'averse. On passe d'une abrasion aréolaire, en nappe, à une abrasion soit encore en nappe mais devenant fortement turbulente, soit à une abrasion concentrée linéaire générant une charge provenant du cisaillement du sol en rigoles. Dans ce dernier cas **(fig.8)**, l'augmentation de la charge s'explique par la conjonction du cisaillement du sol en rigoles et de la reprise de l'effet splash sur des portions de parcelles exondées par canalisation des flux de ruissellement dans les incisions .

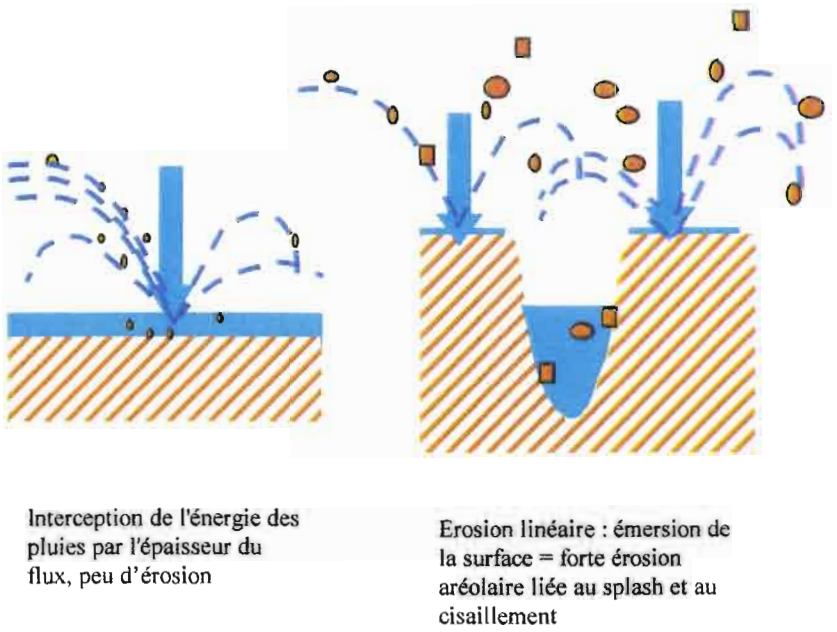


Figure 8: passage d'une érosion aréolaire à une érosion linéaire

3.5.2 Approche des comportements érosifs : évolution des charges solides avec le ruissellement

Le comportement érosif peut être correctement abordé en suivant l'évolution des abrasions avec l'intensification des écoulements. Cette expression permet d'évaluer la résistance d'un champ à

l'érosion, c'est aussi une bonne occasion pour vérifier qu' abrasion et ruissellement ne progressent pas toujours dans le même sens.
Les graphiques de la **figure 9** montrent deux évolutions opposées (Collinet, Asseline, Jimenez, Bermudez 1998).
Le premier exemple est tiré d' expériences de simulations de pluies sur des sols volcaniques jeunes (Vitrandisols) d'Amérique centrale, sols très peu cohérents donc très fragiles. Les évolutions des charges solides en fonction des intensités de ruissellement **(Cs(R))** traduisent une situation très dangereuse d'exacerbation de l'abrasion avec l'intensification de l'écoulement et ce, avec une asymptote élevée (vers 55 $g.l^{-1}$).
Le second exemple est tiré d'essais sur sols fersiallitiques lessivés rouges argileux de plaine (Typudalfs) sujets à la formation de pellicules superficielles, il illustre au contraire une nette tendance à la stabilisation de l'abrasion vers des charges solides devenant très faibles avec l'intensification des écoulements (Collinet, Bornemisza, Segura, 1999).

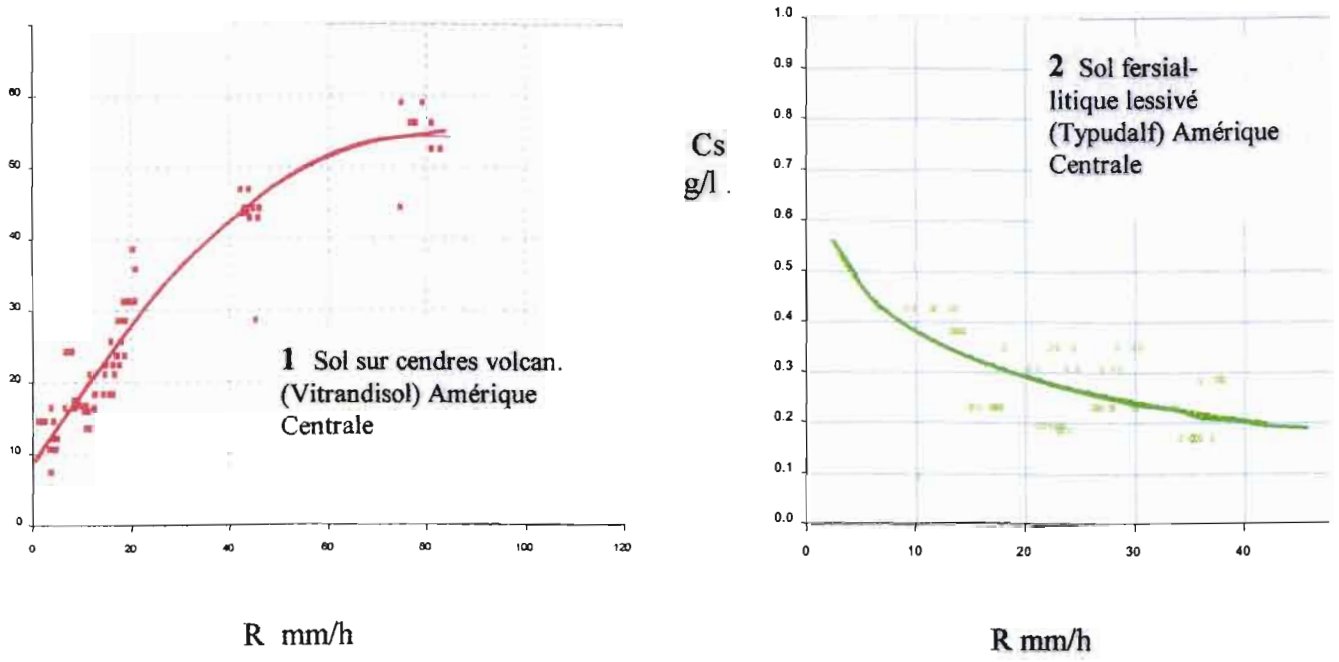


Figure 9: Deux comportements érosifs révélés par l'analyse Cs (R)

3.6. Du diagnostic à la prévision des risques par l'intégration de la pluviométrie naturelle : modèle M O B I L

Les deux informations comportementales précédentes, d'abord R(I) puis Cs (R) sont utilisées pour une prévision de l'érosion en analysant les caractéristiques d'averses naturelles efficaces où une partie des intensités de pluies sont supérieures aux intensités limites déterminées sur parcelles. On transpose dans les hyètogrammes de ces trains d'averses naturelles, les équations de régression ad hoc de R(I) pour avoir des prévisions de ruissellement , puis des équations ad hoc de Cs (R) pour accéder aux érosions en intégrant les durées des averses efficaces, ces durées sont déduites des hyètogrammes naturels. **(fig.10)**

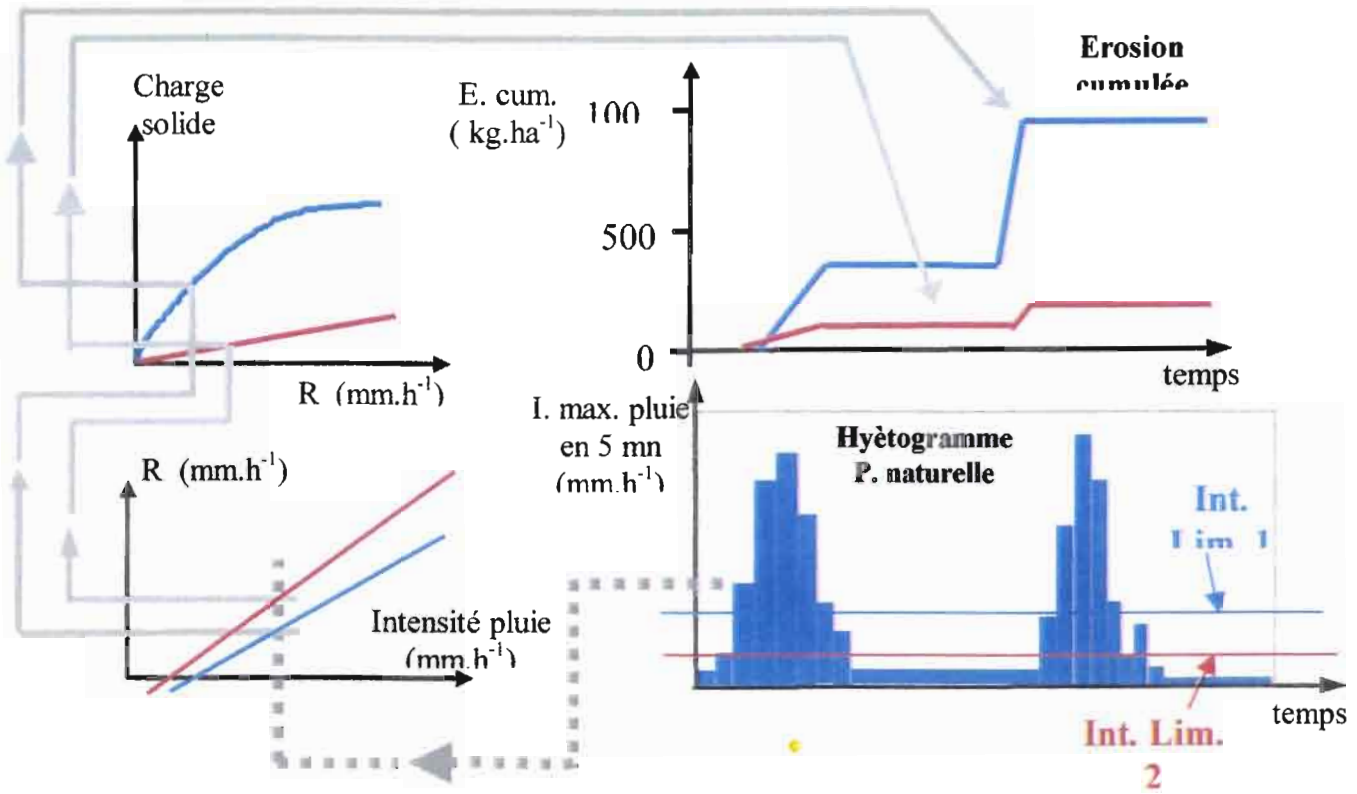


Figure 10: Modèle de prévision de la mobilisation des terres érodibles par couplage des données expérimentales et naturelles - M O B I L

Il faut noter que l'exiguïté des parcelles utilisées ne permet pas de mesurer toutes les composantes de l'érosion sur versant, en effet si la mobilisation initiale des terres érodibles est bien caractérisée, il s'agit de l'érosion aréolaire, le dispositif expérimental ne peut prétendre mettre en évidence toute l'abrasion liée à un flux qui ne peut atteindre sa vitesse limite sur 1m de longueur de versant. On note cependant que les prémices de cette abrasion par cisaillement sont détectés sur les surfaces les plus sensibles.

PARTIE IV

RESULTATS, DISCUSSIONS

L'utilisation des données expérimentales issues de la simulation de pluies passe par différentes étapes qui sont présentées et commentées dans cette quatrième partie:
- acquisition et traitement des données brutes fournies par la simulation de pluies,
- analyse des caractéristiques énergétiques des précipitations naturelles,
- croisement des données précédentes et mise en oeuvre du modèle pour une évaluation des risques érosifs.

L'évaluation des risques érosifs ne présente un intérêt que si l'on peut relativiser leurs niveaux respectifs pour les différentes situations (type de sol, travail du sol, culture, évolution du couvert) et pour les différents évènements pluviométriques du terroir considéré. Cette comparaison des risques fournira différentes informations utiles pour orienter les mesures de protection et gestion des eaux et des sols.

4.1. Acquisition et traitement des données de la simulation de pluies

Tableau V : exemples de données hydrodynamiques et érosives collectées au sortir d'une parcelle de simulation de pluies (Martini, Derouich, Pontanier, 1991)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
SML 1	PLUIE	IK	I5	Pu	Rx	T. prélèv.	R	Cs
			mm.h-1	mm	mm.h-1	mn	mm.h-1	g.l-1
	P11	0.0	20	5.0	0			
	P12	5.0	40	10.0	30.7	20	30.85	18.41
						24	29.79	28.85
						27	38.45	33.63
	P13	15.0	80	20.0	63.1	35	56.4	56.08
						39	61.71	58.9
						43	59.14	61.92
	P21	21.2	40	13.3	36.7	8	23.35	26.62
						13	35.25	39.25
						17	33.23	33.11
	P22	34.5	67	16.8	66.4	24	56.39	56.75
						28	60.42	57.43
						32	57.86	63.71
	P3T	51.3	120	20.0	112.62	1	101.25	86.73
						5	100.1	83.34
						8	108.1	74.32
	P41	42.8	125	10.4	119	2	72	82.55
	P42	53.2	100	16.7	100	7	99	101.177
						11	99	100.714
	P43	69.9	20	1.7	0.002	16	27.64	42.23

Légende du tableau V

colonne 1: nom de la parcelle
2: numéro de l'averse simulée
3: indice pluviométrique IK_n de Kohler et Linsley (1951) utilisé en l'absence de mesure humidimétrique directe du sol : $IKn = (IK_{n-1} + P_{n-1})\, e^{-at}$

avec.. IK_n = valeur de l'indice avant la pluie n
IK_{n-1} = valeur de l'indice avant la pluie n-1
P_{n-1} = hauteur de la pluie n-1
t = temps, en fraction de jours, séparant la fin de la pluie n-1 de la pluie n,
a = coefficient d'ajustement voisin = 0,5

(dans le bioclimat subaride tunisien, IK de 0 à 5 = sol sec à frais, IK de 5 à 50 humide, IK > 50 entre capacité au champ et saturation),
4: Im = intensité pré-réglée de la pluie simulée
5: Pu = hauteur de la pluie
6: Rx = intensité du ruissellement en régime constant
7: T = temps de prélèvement, depuis le début de l'averse, de l'échantillon pour mesures des charges solides,
8: R = intensité du ruissellement correspondant à ce temps de prélèvement
9: Cs = charge solide de l'échantillon.

Le principe de fonctionnement de l'appareil de simulation de pluies a déjà été présenté dans le partie III. La première interprétation des informations collectées au sortir d'une parcelle expérimentale se présente comme indiqué sur le **tableau V**.

La transformation des données précédentes en données plus élaborées fournit deux types d'informations:

a) <u>hydrodynamiques :</u> l'intensité limite des pluies provoquant les premiers ruissellements ($\mathbf{I_{lim}}$. en $mm.h^{-1}$) et les équations de régressions **R(Im)** des intensités de ruissellements à régime constant en fonction des intensités de pluies du protocole expérimental.

b) <u>l'érosion</u>: celle ci est obtenue par le calcul du débit solide produit par m^2 et par unité de temps ; ce calcul part des charges solides (**Cs** en $g.l^{-1}$) mesurées au sortir du canal de ruissellement et des intensités de ruissellements lues sur le limnigramme.

Ces informations expérimentales sont complétées par différentes informations <u>environnementales</u> comme celles consignées sur le **tableau VI**, elles permettent de sélectionner les parcelles dont le comportement se rapproche le mieux des situations culturales rencontrées naturellement et d'établir ainsi les relations entre « états de surface » et comportements.

Tableau VI: Etats de surfaces des parcelles de SILIANA

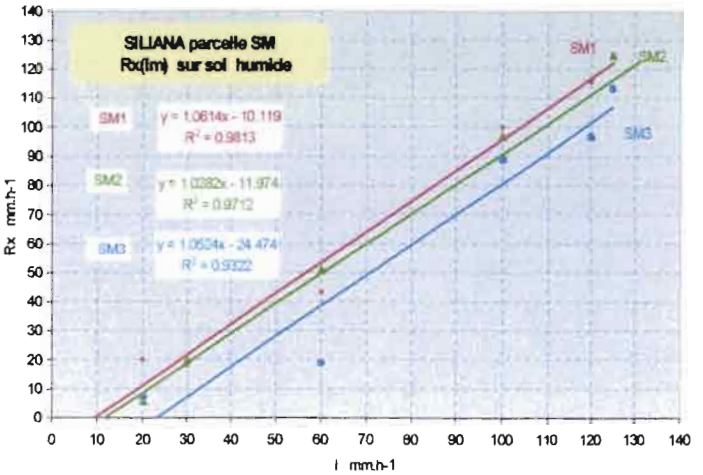
Parcelles	types occup.	pente %	rugos %	vég. sol %	arg,lim %	pell. batt. %	pell. struct. %	couvr sabl %	grav. %	caillx. %	fentes %
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
SM1	labour	19	4.6	5.3	52	45	45	0	0	0	4
SM2	jachère	12	0.8	2.8	50	78	18	0	0.8	0.3	0
SM3	blé maturité	10	1.7	16.3	45	59	23	0	0	0	0.5
SML 1	jachère nue	13	0.5	2	48	72	16	0	4	1	5
SML 2	labour	10	4.2	23.3	50	16	54	0	0	0	6
SML 3	semis, levée	8	1.1	15.5	54	54	24	0	2	0	4
SMA 1	jachère	12	0.9	0.5	49	44	20	0	34	2	0
SMA3	levée blé	9	1.3	50	68	28	9	0	12	0	0
SMA 4	labour	15	9.4	?	62	33	12	0	6	1	1

Légende du tableau VI

colonne 1: types d'occupation de sols
2: pente topographique %
3: coef. de rugosité = inverse du rapport de la longueur d'un segment de profil réel du sol sur la longueur du même segment projeté, diverses méthodes d'obtention (chaînette, rugosimétre aiguilles, rugosimétre laser)
4: débris végétaux sur le sol, en %
5: taux d'argile (<2mm) + limons (2 à 50 mm), en %
6: pellicule de battance, organisation plasmique plus ou moins épaisse, peu perméable, peu friable, en surface du sol, résultant d'un tri granulométrique à l'issue de pluies agressives, en %
7: pellicule structurale, mince organisation plasmique perméable, friable, résultant d'une "fonte" limitée des agrégats ou des mottes de labour sous l'effet de pluies peu agressives, en %
8: recouvrement meuble de sables déliés provenant de la battance des pluies ou de toutes autres causes de désagrégation du sol, en %
9: épandage d'éléments grossiers à granulométrie de graviers (de 2 à 20 mm de diamétre) en %,
10: épandage d'éléments grossiers à granulométrie de cailloux (de 20 à 200 mm de diamétre) en %,
11: % de surface parcourue par des fentes provenant, le plus souvent, de la dessiccation du sol.

La combinaison des informations (a) et (b) permet de calculer les équations de régressions **Cs(R)** des charges solides en fonction des intensités du ruissellement.

La **figure 11** présente un exemple de comportement dynamique de trois parcelles, comportement illustré par le développement des relations **R(I)** et **Cs(R).**



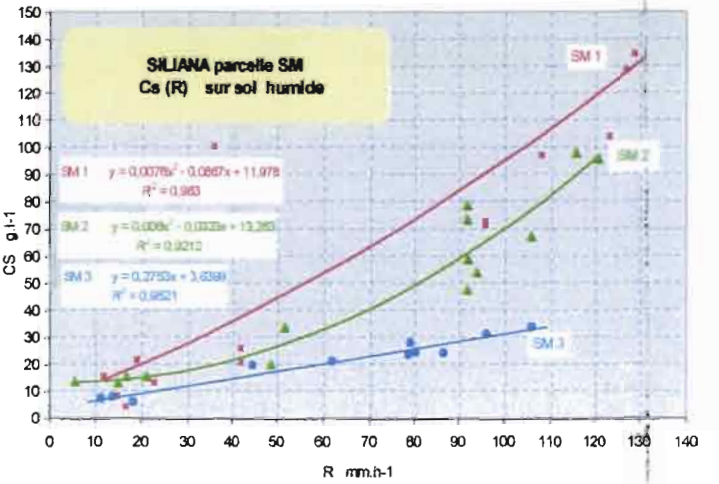


Figure 11: exemples de relations R (Im) et Cs(R) de parcelles de simulation de pluies

Le **tableau VII** donne les intensités limites et les différentes équations de régression pour la totalité des parcelles dont les expressions graphiques sont portées en en **annexe** p46 et suivantes.

Tableau VII: intensités limites et équations des relations exprimant les comportements hydrodynamiques et érosifs des parcelles

Parcelles	occupation	Int. lim mm.h-1	équations	
			Rx (Im) et r^2	Cs (R) et r^2
SM1	labour	9.5	Rx = 1.061Im - 10.119 (0.981)	Cs = 0.0076R² - 0.0867R + 11.978 (0.983)
SM2	jachère	11.6	Rx = 1.028Im - 11.974 (0.971)	Cs = 0.0060R² - 0.0333R + 13.263 (0.921)
SM3	blé maturité	23.3	Rx = 1.052Im - 24.474 (0.932)	Cs = 0.2752R + 3.6399 (0.952)
SML 1	jachère nue	6.4	Rx = 1.003Im - 6.446 (0.973)	Cs = -0.0049R² + 1.3922R - 2.7126 (0.869)
SML 2	labour	*> 42.2*	*Rx = 0.073Im - 3.085 (0.899)*	*Rx non atteint, Cs = 4,38 g.l-1 à 120mm.h-1*
SML 3	semi, levée	15.7	Rx = 0.995Im - 15.673 (0.988)	Cs = 0.0042R² - 0.3528R + 25.442 (0.793)
SMA 1	jachère	2.2	Rx = 0.952Im - 2.062 (0.958)	Cs = 0.0027R² - 0.1257R + 9.9969 (0.701)
SMA3	levée blé	21.2	Rx = 1.099Im - 23.325 (0.973)	Cs = 0.0158R + 0.8193 (0.819)
SMA 4	labour	12.1	Rx = 0.915Im - 11.087 (0.896)	Cs = 0.0001R² + 0.0152R + 2.3491 (0.687)

Relations **Rx(Im)**

Sur les sols meubles des parcelles SM et SML, les intensités limites des pluies provoquant les premiers ruissellements sur sols humides oscillent entre 2,2 $mm.h^{-1}$ et 23,3 $mm.h^{-1}$ (respectivement SMA 1 et SM 3), on note une assez forte variation des conductivités superficielles, on note aussi que celles-ci sont déviées vers d'assez faibles valeurs des intensités limites. Ces sols ruissellent rapidement, l'infiltrabilité générale est plus contrôlée par les porosités superficielles que par le déficit de saturation hydrique du sol, on est typiquement dans un système hydroynamique "hortonien".

Ces variations de l'intensité limite sont liées à différentes "rugosités", celles dues au labour récent (SML2) ménageant de fortes détentions superficielles et celles dues au développement du blé mûr couvrant 60 à 80% des surfaces et interceptant une partie des précipitations (SM3).
On constate, d'autre part, que les pentes des droites de régression varient peu d'un site à l'autre ce qui dénote une stabilité des organisations superficielles une fois qu'elles sont construites.

Relations **Cs(R)**

Elles illustrent trois comportements déjà développés dans le & 3.5.2.:

a) une érosion qui croît plus ou moins fortement avec les intensités du ruissellement traduit, soit le début d'une érosion linéaire, soit la reprise d' une érosion aréolaire sur une terre déstabilisée par l'augmentation de l'intensité de la pluie, (parcelles SM1, SM2, SMA2 et, à moindre titre, parcelles SM3 et SMA1),

b) après un accroissement puis une stabilisation du niveau d'érosion, on a une atténuation de la capacité abrasive d'un flux devenant trop chargé, c'est le cas de la parcelle SML1,

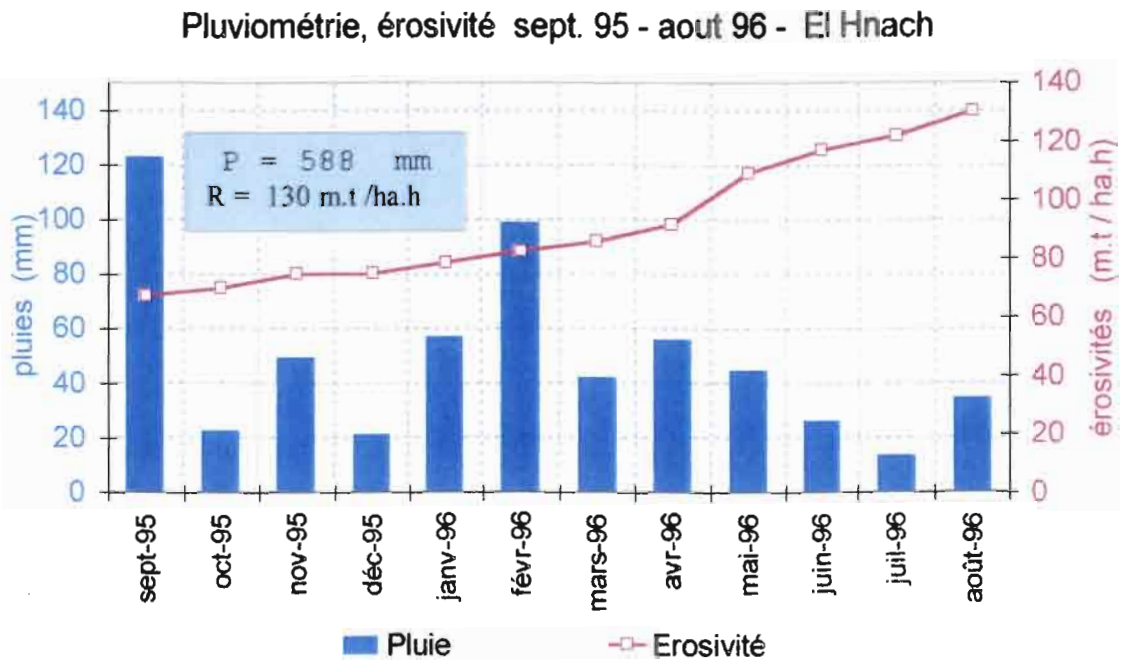
c) un faible niveau d'érosion et une quasi-indépendance des charges par rapport aux intensités des flux indiquent des parcelles stabilisées, lissées, où la lame ruisselante intercepte l'énergie des pluies (parcelles SMA3, SMA4, et, à moindre titre, de SML3).

4.2. Analyse des caractéristiques pluviométriques naturelles

Le modèle se fonde sur une assimilation des effets des intensités programmées sur simulateur à ceux d'intensités de pluies naturelles. On s'attache à prévoir ces effets sur deux évènements : une année à agressivité pluviométrique normale, la seconde année étant nettement plus agressive. Une durée suffisante de relevés et un dépouillement précis des intensités sont nécessaires pour mettre en oeuvre le modèle. On a utilisé pour cela les données pluviométriques de la retenue collinaire de EL HNACH située à 5 km du site expérimental de SILIANA.

Les années normales et agressives sont sélectionnées selon leurs indices d'érosivités **R** exprimés en système international MTS approché (*) avec Rsi = 1,702 Rus, pour passer du R_{US} = foot . long ton / acre . hour au R_{SI} = mètre . tonne / hectare . heure (* secondes du MTS remplacées par des heures)
L'érosivité cumulée par période considérée est calculée pour des intensités maximales de pluies en 5 minutes et non pas 30 minutes, ce que les pluviographes récents installés sur les petits bassins permettent d'obtenir.
On a retenu, comme année agressive, septembre 1995 à août 1996 qui totalise une érosivité annuelle de 130 unités s.i. et comme année normale la période de septembre 1998 à août 1999 avec un R de 57 unités s.i.. (**figure 12**)

On sélectionne, pour ces deux années, les averses dont les intensités maximales en 5 minutes sont efficaces pour le modèle, donc celles qui dépassant les intensités limites provoquant les premiers ruissellements sur les différentes parcelles reproduisant les différentes situations culturales de l'année. Les graphiques de la **figure 13** illustrent cette procédure du choix des intensités efficaces sur deux exemples.



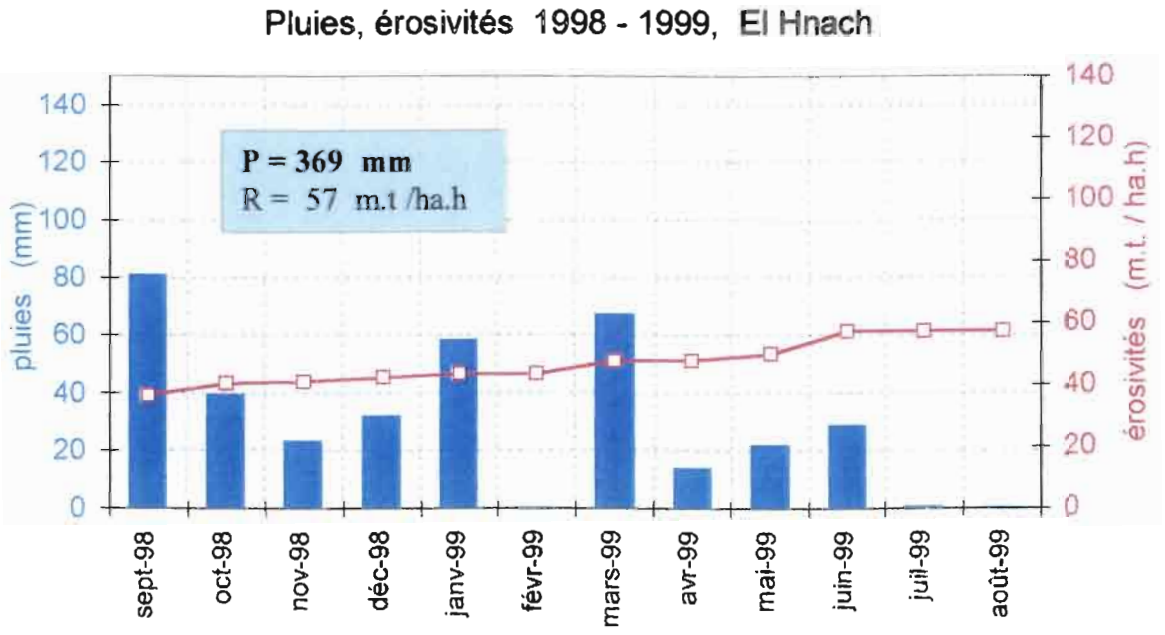


Figure 12 : pluviométries et érosivités des années 1995–96 et 1998–99 sur El Hnach

4.3 Mise en oeuvre du modèle

Le modèle fonctionne en appliquant les équations de régression **Rx(Im)** puis **Cs(R)** des parcelles représentatives des états successifs des terres travaillées avec leurs couverts végétaux et soumis aux précipitations durant une année.

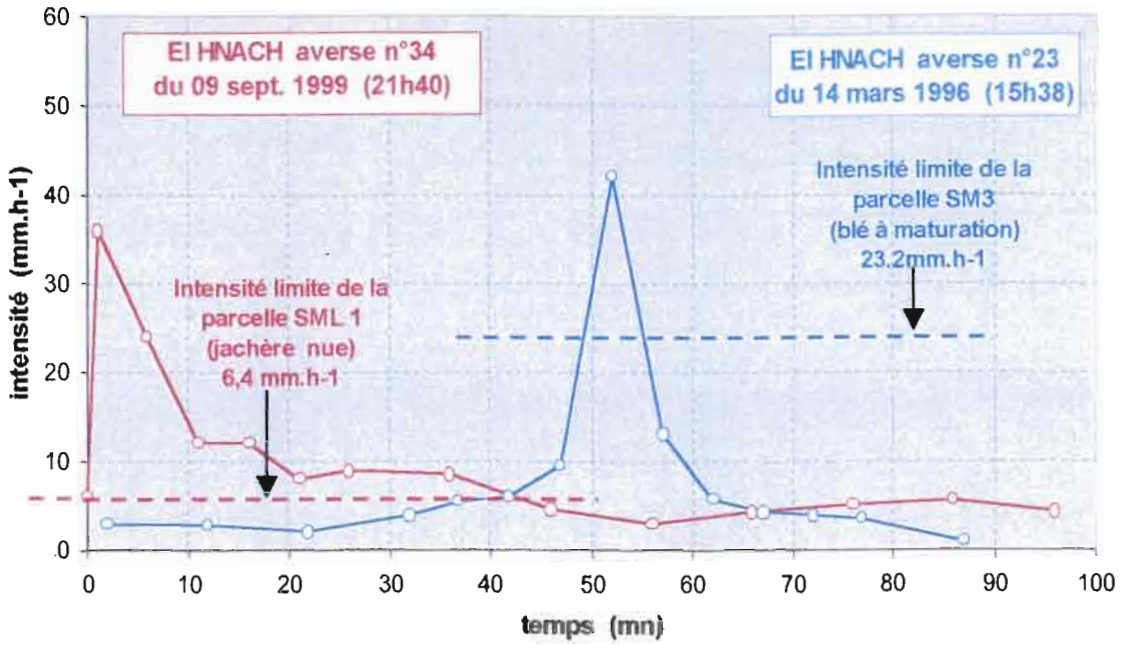


Figure 13: sélection des intensités efficaces d'averses naturelles par les intensités limites mesurées expérimentalement

Les **tableaux IX et X**, ci après, développent toutes les combinaisons utilisées dans le modèle.

On y découvre d'abord un calendrier cultural récapitulant les différents états des terres et des couverts végétaux durant toute l'année agricole. Le **tableau IX** prend l'option d'un labour commençant fin septembre, le **tableau X** celui d'un labour plus précoce de début décembre. Ce "calage" du calendrier est la chose primordiale à considérer dans la détermination des risques érosifs.

Viennent ensuite deux sous-tableaux : le premier concerne des comportements des sols meubles non encroûtés, ce que représentent les parcelles SML et SM (cf. aussi les **tableaux III et VI**). le second concerne les sols à encroûtements carbonatés calcaires fragmentés par le labour, ce que représentent les parcelles SMA.

Dans chaque sous-tableau ont été prévus les effets des agressivités des pluies; on a ainsi retenu l'année 1995-96 à forte agressivité, l'année 1998-99 à agressivité "normale".

Dans chacun de ces derniers compartiments, on a fait coïncider les différents types de parcelles avec des numéros d'averses sélectionnées pour leurs intensités efficaces (**fig. 12**).

Les érosions individuelles ou cumulées, issues des effets de chaque croisement "évènements x situations" sont calculées dans un tableur prenant en compte les équations du **tableau VII**.

Tableau n° X SILIANA - pluviométrie EL HNACH - céréales - calendrier cultural B -

calage cultural B selon J.M.Masson (1971) sub-aride Tunisien avec un blé d'hiver de 240 jours, application à deux types de sols avec deux types d'agressivités pluviométriques: (a) 1995 - 1996 aux pluies très agressives, (b) 1998 -1999 agressivité moyenne.

	septembre			octobre			novembre			décembre			janvier			février			mars			avril			mai			juin			juillet			août		
décades	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C1 labour																																				
C2 semis, levée																																				
C3 matur., récolte																																				
C4 jachères																																				

Terres meubles sans croûtes

a) Année 1995-1996 à forte agressivité des pluies

Sites	SML 2	SM 1	SML 3	SM 3	SM 2	SML1
Intensités limites	42,4	9,5	15,7	23,2	11,6	6,4
Choix des averses	37, 38, 42, 44, 47	49, 50, 51	53, 1, 11	23, 34, 37, 39, 41	43, 44, 45	46, 49, 50

b) Année 1998-1999 à agressivité moyenne des pluies

Sites	SML 2	SM 1	SML 3	SM 3	SM 2	SML1
Intensités limites	42,4	9,5	15,7	23,2	11,6	6,4
Choix des averses	aucune	42, 43	aucune	21,	30, 32, 33,	aucune

Terres avec fragments de croûtes sur au moins 50cm

a) Année 1995-1996 à forte agressivité des pluies

Sites	SMA 4	SMA 3	SMA 1
Intensités limites	12,1	21,2	2,2
Choix des averses	36, 37, 38, 39, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 49, 50	1	23, 24, 26, 28, 30, 31, 34, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 46, 49, 50

b) Année 1998-1999 à agressivité moyenne des pluies

Sites	SMA 4	SMA 3	SMA 1
Intensités limites	12,1	21,2	2,2
Choix des averses	34, 35, 36, 42, 43	aucune	10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 25, 27, 30, 32, 33

Tableau n° IX SILIANA - pluviométrie El HNACH - céréales - calendrier cultural A -

calage cultural A selon FAO zone sub-aride méditerranéenne avec blé d'hiver de 240 jours, application à deux types de sols, avec deux types d'agressivités pluviométriques: (a) 1995 - 1996 aux pluies très agressives, (b) 1998 -1999 agressivité moyenne

	septembre			octobre			novembre			décembre			janvier			février			mars			avril			mai			juin			juillet			août		
décades	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C1 labour																																				
C2 semis, levée																																				
C3 matur., récolte																																				
C4 jachères																																				

Terres meubles sans croûtes

a) Année 1995-1996 à forte agressivité des pluies

Sites	SML 1	SML 2	SM 1	SML 3	SM 3	SM 2	SML1
Intensités limites	6,4	42,4	9,5	15,7	23,2	11,6	6,4
Choix des averses	36 37 38 39 41 42 44 45 46 47	aucune	53	1, 11, 23	34, 37, 39	41, 43, 44, 45	46, 49, 50

b) Année 1998-1999 à agressivité moyenne des pluies

Sites	SML 1	SML 2	SM 1	SML 3	SM 3	SM 2	SML1
Intensités limites	6,4	42,4	9,5	15,7	23,2	11,6	6,4
Choix des averses	34, 35, 36, 40*	aucune	aucune	8	21	27, 30, 32, 33	aucune

Terres avec fragments de croûtes sur au moins 50cm

a) Année 1995-1996 à forte agressivité des pluies

Sites	SMA 1	SMA 4	SMA 3	SMA 1
Intensités limites	2,2	12,1	21,2	2,2
Choix des averses	36 37 38 39 41 42 44 45 46 47	50, 53	1, 23	26, 28, 30, 31, 34, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 46, 49, 50

b) Année 1998-1999 à agressivité moyenne des pluies

Sites	SMA 1	SMA 4	SMA 3	SMA 1
Intensités limites	2,2	12,1	21,2	2,2
Choix des averses	34, 35, 36, 40*	42, 43	aucune	14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 25, 27, 30, 32, 33

4.4 Résultats commentés

Le tableau XI résume les érosions observées pour toutes les situations et tous les évènements expérimentaux évoqués précédemment.

Tableau XI: récapitulatif des érosions saisonnières et annuelles

Calendrier		A - labour tardif (octobre)								B - labour précoce (septembre)							
Sols		meubles				encroûtés				meubles				encroûtés			
Erosivités R s.i.		57		130		57		130		57		130		57		130	
Erosions tonnes/ha, % année		t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
Situations	Jachère nue	17,9	80	35,5	81	5,5	45	10,7	62	-	-	-	-	-	-	-	-
	Labour	0	0	1	2	0,1	0	0	0	0,6	11	0,7	10	0,2	3	1	11
	Semis,levée	0,1	0	0,9	2	0	0	0	0	0,6	11	3,1	44	0,2	3	0,2	2
	Maturation	0,1	0	0,8	2	3,7	31	3,1	18	1,8	32	2,3	32	5	86	4,5	51
	Jachère	4,3	20	5,6	13	2,9	24	3,5	20	2,6	46	1	14	0,4	7,5	3,1	35
Totaux		**22,5**		**43,8**		**12,2**		**17,4**		**5,6**		**7,0**		**5,8**		**8,8**	

A un premier niveau d'analyse considérant les bilans annuels, on note trois choses:

- une forte influence du calage du calendrier cultural par rapport à l'arrivée des premières pluies agressives d'automne,
- l'effet d'un labour précoce permettant d'infiltrer ces premières averses avant l'effondrement des mottes, cet effet est plus important sur sols meubles que sur sols à épandages superficiels d'éléments grossiers,
- une augmentation des érosions du fait de l'accroissement des érosivités qui apparaît dans toutes les situation mais aussi un effet plus important de cette érosivité sur les sols meubles ayant subi un labour tardif.

Le second niveau d'analyse s'appuie sur les comportements particuliers des terres aux différents stades phénologiques, les figures 13 à 16 présentent les évolutions des érosions en relation avec:
- le calendrier cultural,
- deux érosivités annuelles,
- deux types de sols.

Les courbes représentent les cumuls des érosions avec une courbe rouge (A) pour une évolution de l'érosion consécutive à un labour tardif début octobre et une courbe bleue (B) pour un labour précoce du début septembre.
Les différents stades phénologiques figurent en abcisse : bandeaux bleus (B) pour un labour précoce de début septembre, bandeau rouge (A) pour un labour tardif de début octobre. Les durées de ces différents stades sont repérables sur l'échelle décadaire de l'abcisse.
Les effets des deux calendriers culturaux **A** et **B** sont regroupés sur un même graphique, par contre le croisement des situations "érosivité x type de sols" donne 4 graphiques.

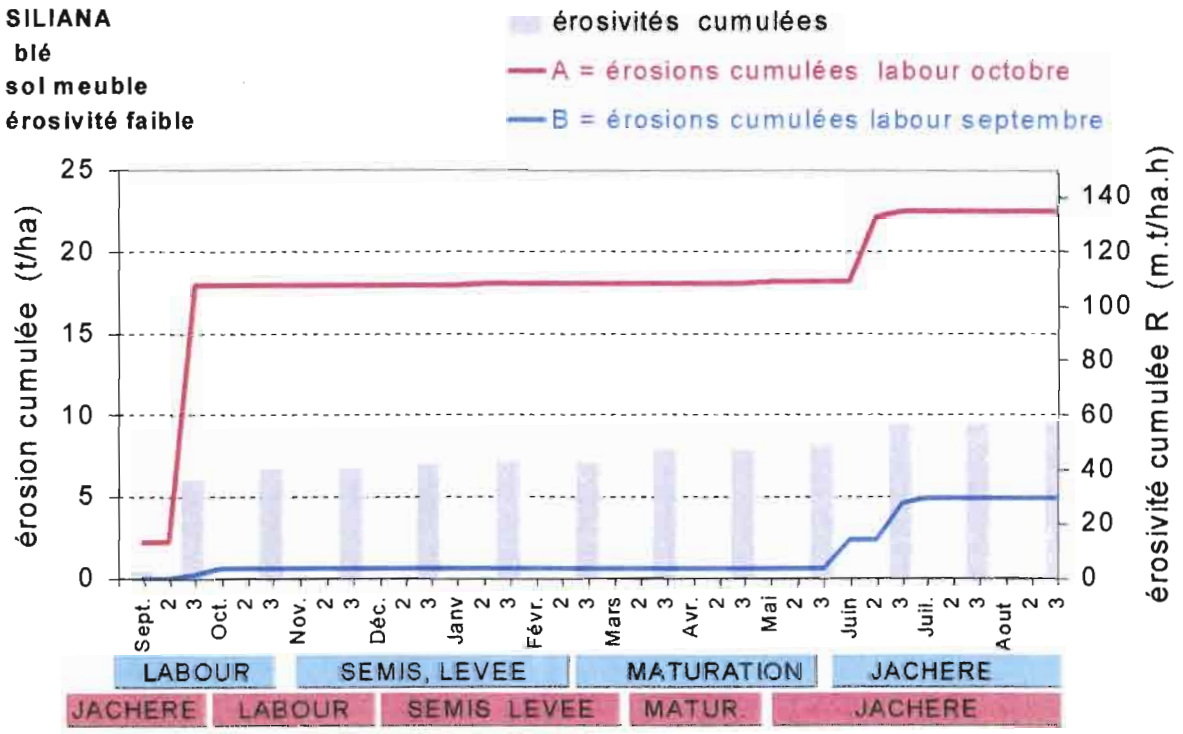


Figure 13 : Siliana: sol meuble, érosivité faible (R = 57)

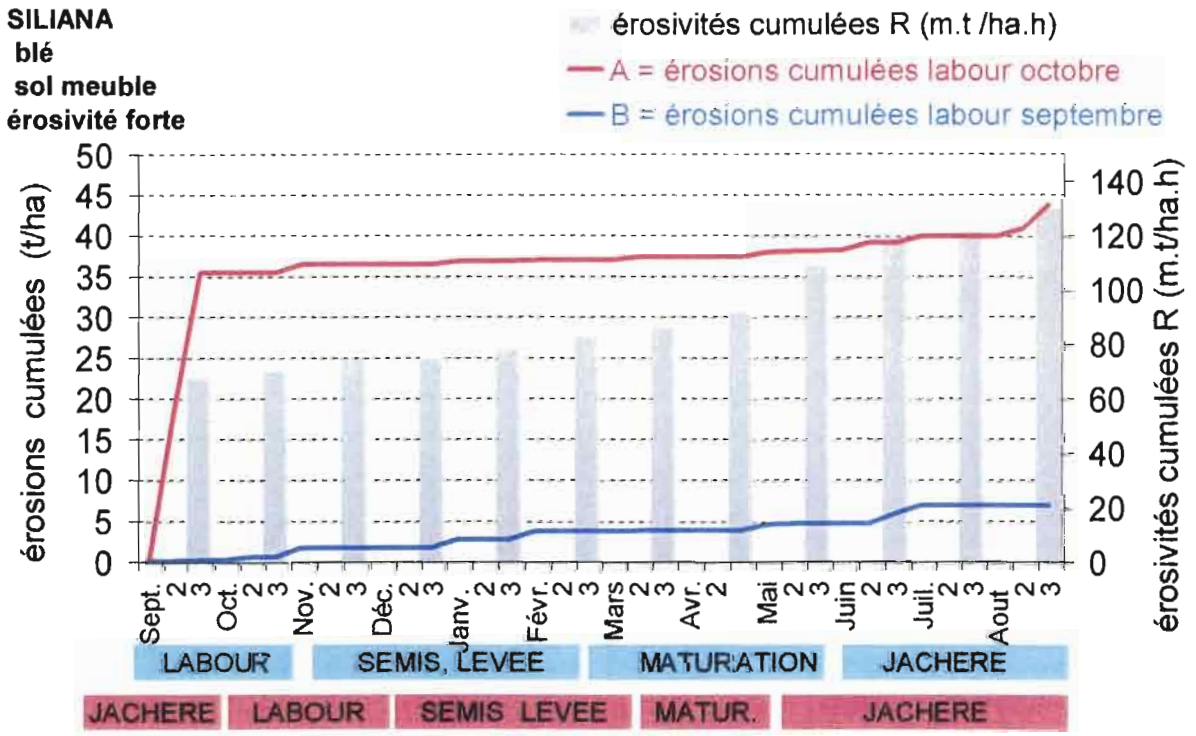


Figure 14 : Siliana, sol meuble, érosivité forte (R 130)

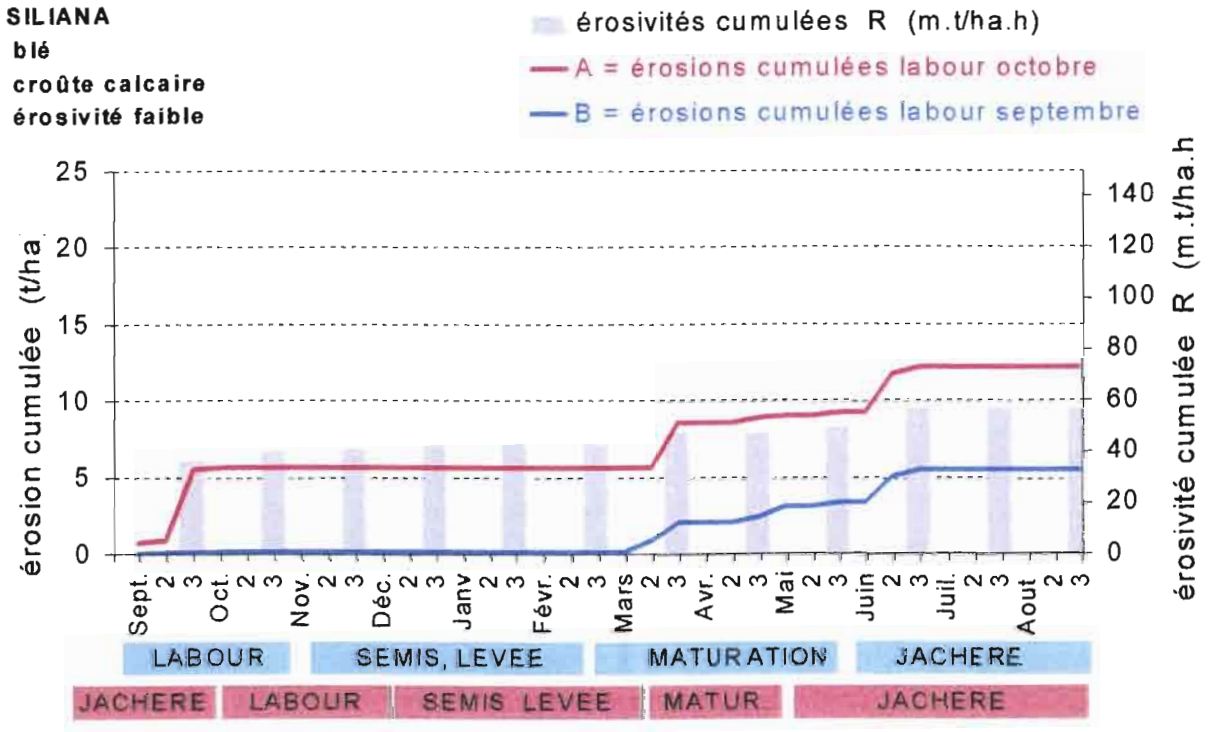


Figure 15 : Siliana, sol encroûté, érosivité faible (R= 57)

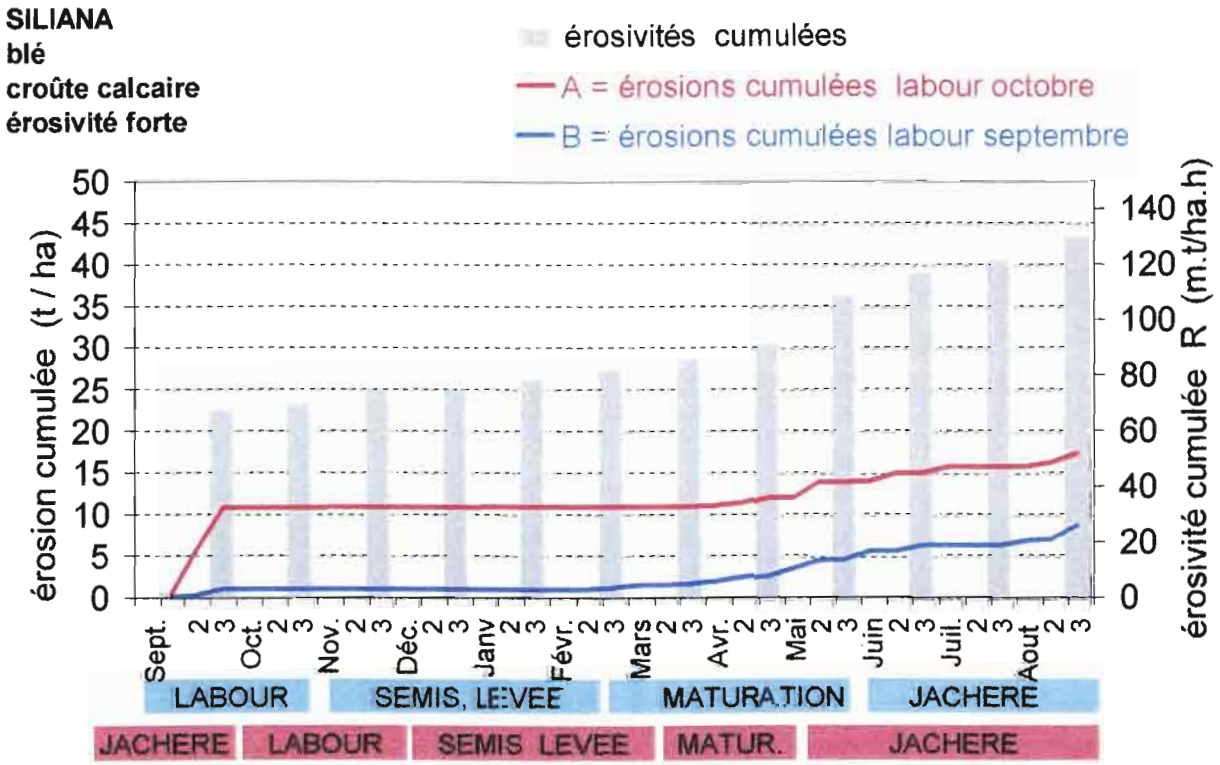


Figure 16 : Siliana, sol encroûté, érosivité forte (R = 130)

4.4.1 Influence des calendriers culturaux

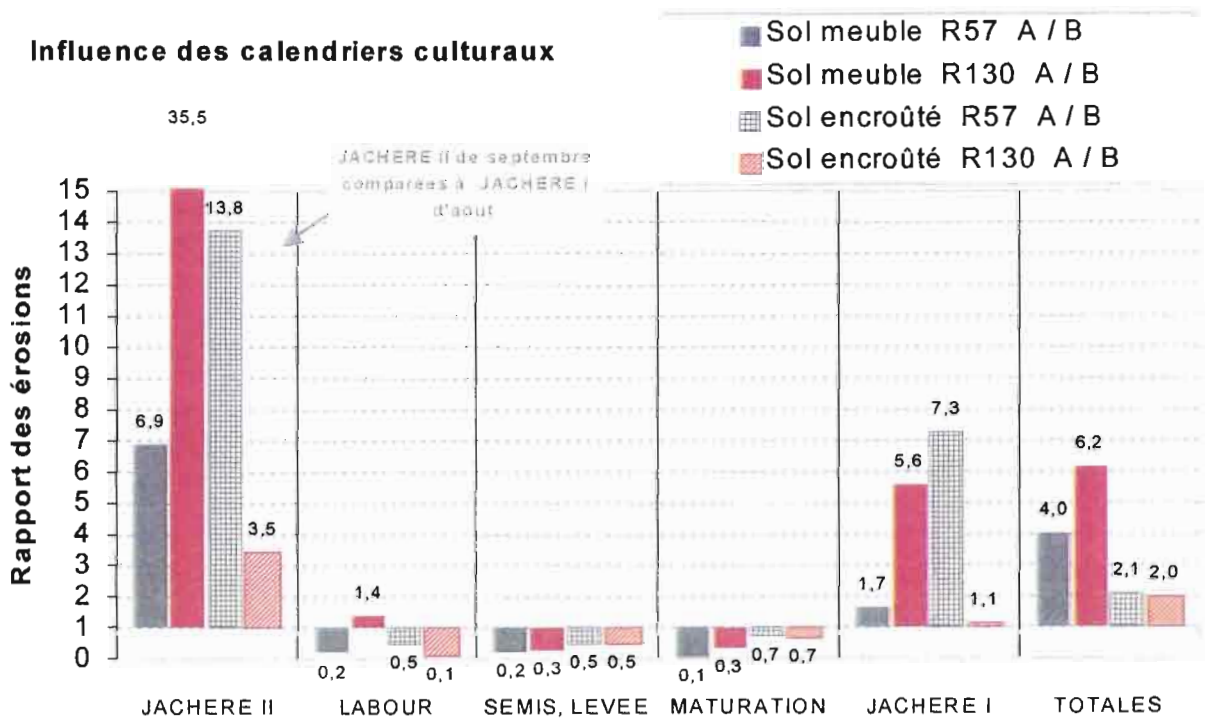


Figure 17: Siliana, influence des deux calendriers culturaux sur l'érosion

Les graphiques des **figures 13 et 14** comparent les comportements érosifs d'une même terre meuble selon deux calendriers culturaux. Les histogrammes de la **figure 17** représentent les rapports entre les érosions d'une terre labourée début octobre (A) et celles d'une terre labourée en début septembre (B).

En année normale, les quelque 40 points d'érosivité de la troisième décade de septembre font la différence entre: (a) les terres meubles labourées perméables qui ont une intensité limite I_{lim} de 42,4mm /h, et une structure assez stable donc peu érodibles (0,6 t/ha), et (b) ces même terres en jachères nues qui sont sept fois moins perméables (I_{lim}= 6,4mm/h) et où les ruissellements font perdre près de 18 t/ha.

En année agressive, on observe le même processus avec cette fois, une érosion de 35,5 t/ha.

Par la suite, les plus fortes érosions relatives des sols labourés précocement, ce qu'attestent des rapports A/B <1 pendant les semis, levées et maturations, s'expliquent par un décalage dans le temps du processus d'effondrement des mottes de labour en fin d'hiver et au printemps.

Au bilan, un labour précoce n'érode que 10% des terres perdues annuellement, par contre, un labour tardif est à l'origine de 80% de ces érosions annuelles!

4.4.2 Influence des érosivités

S'il est logique de dire que l'érosion hydrique augmente avec l'agressivité des pluies, on note aussi que cette relation est rarement strictement linéaire. En effet, les systèmes subissant l'énergie des pluies et l'abrasion des premiers écoulements évoluent plus ou moins rapidement soit dans le sens d'une atténuation de leur fragilité (1), soit, et c'est plus grave, dans le sens d'une fragilisation (2).

Si l'on reprend les arguments développés dans les paragraphes 3.4.1. et 3.5.1., on peut dire que :

- dans le premier cas, la stabilisation est la conséquence d'une interception de l'énergie des pluies par un lit d'éléments grossiers, par des végétaux vivants, par leurs débris ou encore par la lame d'eau ruisselante dont l'épaisseur résulte de la micro-topographie, mais aussi d'une diminution de la conductivité hydraulique saturée superficielle.
- dans le second cas, l'accroissement de l'érosion est liée à une déstabilisation des organisations superficielles et aux conséquences de cette déstabilisation : abrasion aréolaire amenant à l'affleurement des matériaux plus fragiles, abrasion linéaire incisant les surfaces et restaurant 100% des effets des énergies des pluies du fait de l'exondation d'une partie des surfaces.

Sur sols meubles (fig. 13, 14 et 18) la comparaison des effets des érosivités cumulées en année agressive (R130) et en année plus calme (R57) montre une atténuation progressive de cet effet sur les pertes en terres depuis le labour (rapport = 10) jusqu'à la jachère nue (rapport = 1,3)

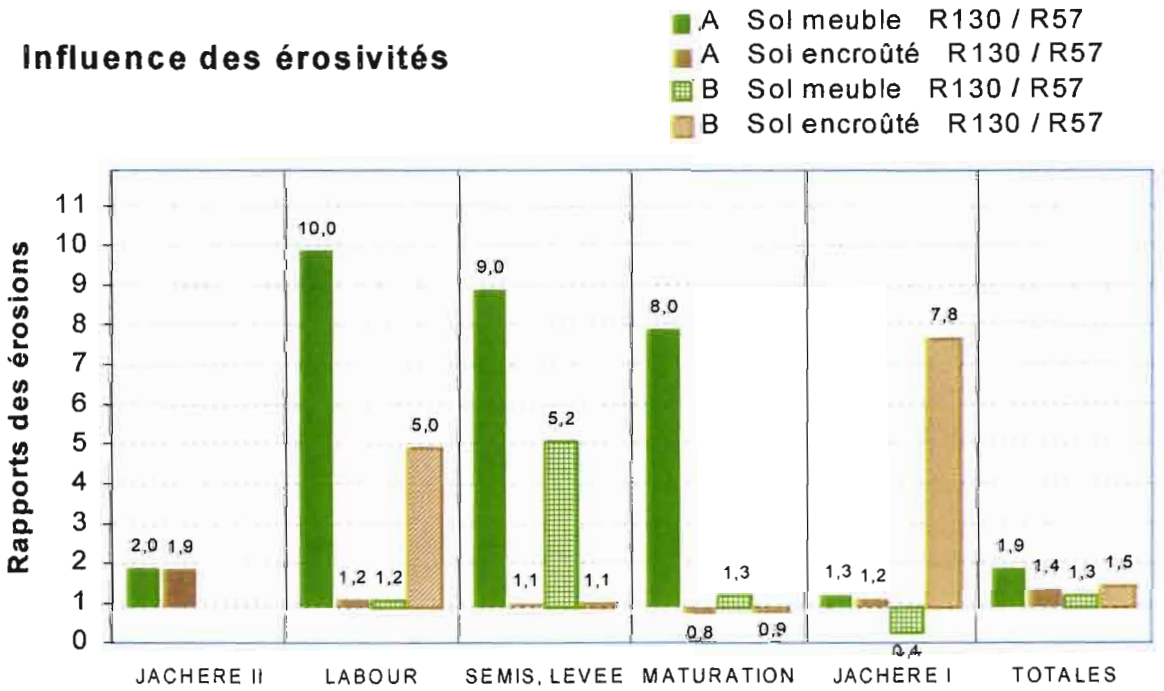


Figure 18 : Siliana, influence des érosivités des pluies sur l'érosion

Sur sols à épandages superficiels d'éléments grossiers (sols encroûtés, **fig. 15, 16** et **18**), l'effet de l'érosivité des pluies est considérablement atténué sauf sur le labour (rapport = 5,0) car celui-ci

mélange les matériaux meubles et grossiers, ce n'est qu'aux stades suivant que se produit une ségrégations et se reconstitue l'épandage caillouteux protecteur superficiel qui atténue l'érosion.

4.4.3. Influence des épandages d'éléments grossiers

Les comportements hydriques et érosifs des terres cultivées sont modifiés par les charges en éléments grossiers de deux façons :
- atténuation de l'érosion par rapport à celle des terres meubles,
- influence estompée des variations de l'érosivité des pluies.

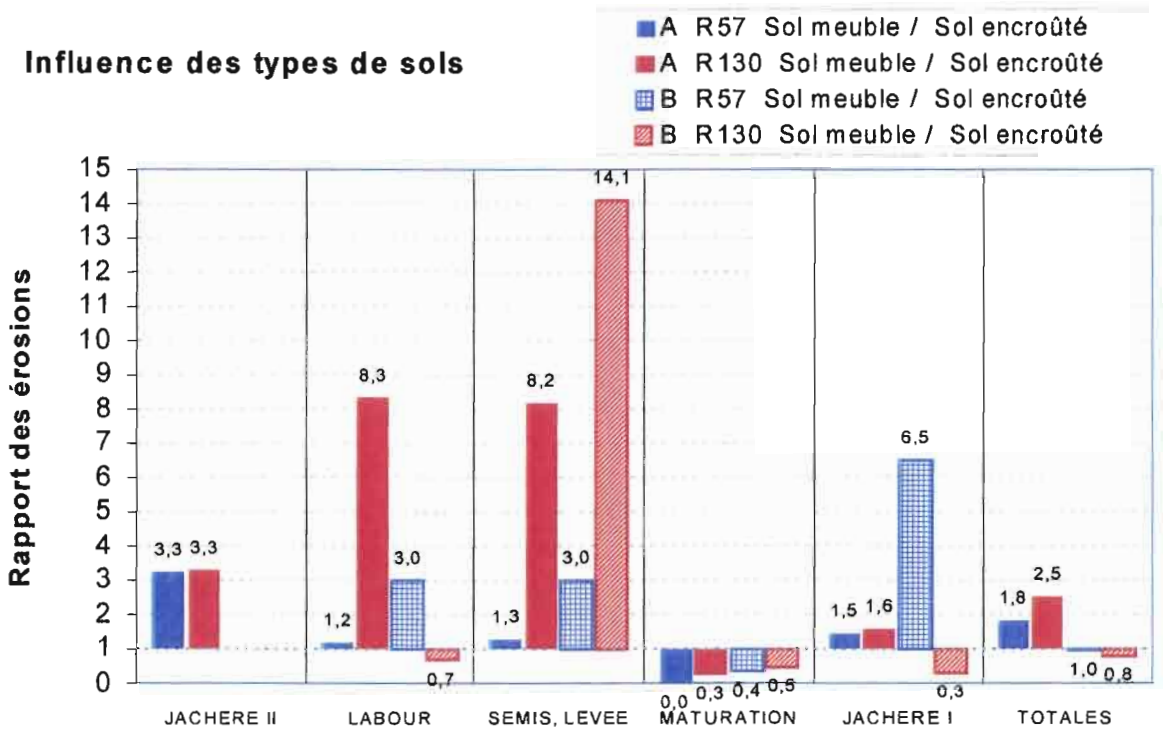


Figure 19 : Siliana, influence de l'épandage d'éléments grossiers sur l'érosion

Les éléments grossiers des sols limono-graveleux et caillouteux proviennent du broyage, par les façons culturales, de la croûte calcaire plus ou moins friable, située entre -30 et -50cm. La surface de ces sols s'enrichit relativement en éléments plus durs, (jusqu'à 37 %), au fur et à mesure que progresse l'érosion hydrique.

Sur ces sols caillouteux, le décalage du calendrier amenant les premières fortes pluies sur une terre encore en jachère en septembre (situation A) provoque une érosion 3,3 fois moins importante que sur sols meubles. On note que ce rapport reste le même quelles que soient les érosivités, les pertes passent de 17,9 à 5,5 t/ha avec R # 35 points et de 10,7 à 35,5 t/ha avec R # 70. Cette diminution est uniquement due à l'effet protecteur des graviers et cailloux et non pas à une diminution des écoulements ; en effet, ces terres ont tendance à ruisseler plus tôt ($I_{lim.}$ = 2,2 mm/h) que les terres meubles ($I_{lim.}$ = 6,4 mm/h).

Après le labour et jusqu'à la fin mars, ces épandages maintiennent des infiltrabilités plus fortes ($I_{lim.}$ = 21,2 mm/h) et durables et des mobilisations de terre plus faibles grâce à des charges souvent < 1g/l (cf. les relations CS (R) des parcelles SMA3 et SMA4, en **annexe**). Cette conjonction des deux facteurs explique des érosions 10 fois plus faibles sur ces sols encroûtés.

Ultérieurement le tassement du terrain (moisson, parcours du bétail) et l'enfoncement des éléments grossiers amènent des comportements voisins des deux types de sol pendant les pluies printanières par diminution de l'infiltrabilité sur les sols encroûtés.

CONCLUSION

De nombreuses campagnes de simulations de pluies sur petites parcelles ont été menées en Tunisie semi-aride depuis 1984 par des équipes conjointes de la Direction des Sols de Tunis et de l'IRD .
Ce travail important a permis de couvrir quelque 25 sites distribués sur la plupart des zones bio-climatiques et des domaines agro-pédologiques de la Tunisie. Il s'en dégage une information dense que de nouveaux traitements peuvent valoriser vers des diagnostics plus précis portant sur l'identification de marqueurs comportementaux . Le plus souvent ces marqueurs sont des organisations pédologiques modifiées ou non par les techniques culturales et dont les effets stabilisant ou fragilisant par rapport aux risques érosifs sont révélés par la simulation de pluies.

Un modèle (MOBIL) a été conçu pour transférer les données expérimentales vers des évènements pluviométriques réels et mesurer les érosions saisonnières et cumulatives donc annuelles pour différentes situations culturales et sur différents sols.

L'extrapolation d'informations obtenues sur $1m^2$ vers quelques fractions d'hectares se fait par pondération des superficies ; cette procédure reste judicieuse tant que l'on se situe dans un type d'érosion aréolaire (érosion en nappe + cisaillements en rigoles) et que l'on considère qu'il y a exportation des sédiments hors de la surface érodable. Le passage au versant et, a fortiori, au bassin versant, est un autre problème qui ne peut être traité qu'en utilisant d'autres modéles où il s'agit de caractériser la capacité abrasive et la compétence des flux tout au long de versants et d'axes de drainages.

Comme son nom l'indique, MOBIL ne traite que de la mobilisation initiale de terres par érosion aréolaire et de la prise en charge des éléments détachés du sol par le flux ; il ne traite pas de la capacité abrasive du flux dans un système se canalisant avec l'allongement du versant ou l'augmentation de sa pente.

Diverses observations se dégagent à l'issue de ce travail:

1) les sols calcimagnésiques, limono-argileux, emblavés, sur colluvions calcaires du terroir de Siliana fournissent, en <u>année normale</u> (P 369mm et érosivité Rsi de 57 points) environ 5,5 t/ha/an d'érosion aréolaire; en <u>année agressive</u> (P 588mm et Rsi 130), cette érosion passe à environ 8,0 t/ha/an .

2) un suivi saisonnier de cette érosion révèle la grande importance du <u>calage du calendrier cultural</u> par rapport à l'installation de la saison pluvieuse. Les premières pluies sont, en grande partie, infiltrées par les labours de septembre avec des érosions ne dépassant pas les quelques centaines de kg/ha . Par contre, ces pluies, intervenant sur des sols non encore labourés (jachère nue ou labours tardifs), sont à l'origine de 50 à 80 % des érosions annuelles qui atteignent dès lors environ 20 t/ha/an en année normale et plus de 40 t/ha/an en année agressive. Dans ce cas, à

l'érosion en nappe s'ajoute une composante de "cisaillement" annonçant de forts risques d'érosions ravinaires,

3) la limitation des érosions observée avec labour précoce est uniquement due à la limitation du ruissellement ; en effet, les charges solides sur sols nus, générées par des averses de 20 à 60mm/h dépassent souvent les 50g/l

4) les sols calcimagnésiques sur roches ou sur croûtes calcaires du terroir de Siliana sont fragiles, leur sort dépend de la vitesse de destruction du labour qui résulte, elle-même, de la distribution et de l'énergie des premières averses de la saison pluvieuse. Une forte agressivité des pluies au départ donnera une situation irrécupérable parce que, contrairement à d'autres sols différenciés sur roches plus marneuses, voire sur argilites, ces sols limoneux et peu organiques possèdent peu d'argiles actives, et ne peuvent donc pas reconstruire leurs structures par une dessiccation dans le cas de laps de temps assez longs entre les séquences pluvieuses. Ils forment, par contre, assez rapidement des pellicules de battance limitant la conductibilité hydraulique saturée superficielle donc favorisant les ruissellements.

5) pour de faibles érosivités de pluies, et au bilan annuel, les comportements érosifs globaux des sols graveleux et caillouteux, peu épais, sur croûtes calcaires, rejoignent ceux des sols meubles plus profonds parce que leur plus grande fragilité, liée à l'abondance des limons fins, est compensée par la protection assurée par un épandage superficiel en fragments de croûtes et roches calcaires s'accumulant relativement tout au long de l'année et interceptant l' énergie des averses.

6) sur ces sols, le système de banquettes en terre, abondamment développées dans cette région est d'une grande efficacité autant pour une limitation des ruissellements sur les versants donc d'une érosion linéaire autrement plus dangereuse, que pour ce qui concerne le stockage des sédiments sur les versants au niveau des canaux de ces banquettes.

Cette étude se poursuivra sur les autres sites expérimentaux inventoriés chaque fois que la localisation exacte, la qualité et la cohérence des données fournies par les campagnes de simulation de pluies le permettront.

--o--

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL J., BERNARD A. 1984
Etude des paramétres 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 Fasdo. Du m² au km². Etude des paramétres 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., GHEDOUI S., PEPIN Y. permanent
Annuaires hydrologiques des lacs collinaires - réseau pilote de surveillance hydrologique (1995 - 2000)

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., 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.

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

BLANCANNEAUX Ph. 1989
Les sols à accumulation calcaire de la Tunisie centrale et septentrionale, - notice et carte à 1/500000. ORSTOM mission de Tunis et Faculté des Sciences de Tunis) , multigraph. 113p. + annexes

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 Ppublics. Service des Mines de l'Industrie et de l'Energie. 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 Agricultral Research and Development Center. edit. by Wooster n° 125-79, 11p.

COLLINET J. LAFFORGUE A. 1975
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 perpectives. Applications agronomiques. Cahier ORSTOM, série Pédologie XVII, 4, pp 283-328.

COLLINET J. LAFFORGUE A. 1979
Mesures de ruissellements et d'érosions sous pluiessimulées pour quelques types de sols d ela 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 Ressources ". IAHS n°144, colloque de Hararé 1984 (Zimbabwé), 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.

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.

DE PLOEY J., MOEYERSONS J. 1976
Quantitative data on splash erosion, simulated on unvegatated slopes. Z / Geomorph. NF. supl. bull. 25. pp. 120-131.

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.

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.

LEPRUN J.C.., SILVEIRA da COSTA, SOBRAL FILHO R .M. 1986
Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. Cahier ORSTOM, série Pédologie XXII, 2, pp 223-233, 11 tabl. 1fig.

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. multigraph.

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, 213p + annexes, 1971.

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 Ch., PONTANIER R., AGREBAOUI S., DRIDI B. 1996
Evaluation des paramètresphysico-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 Ettiour. Memoire de 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.

RUELLAN A. 1971
Les sols à profils calcaires différenciés des plaines de la basse Moulouya (Maroc Occidental). Contribution à la connaissance des sols méditerranéens. Mémoire ORSTOM n°54., 302p.

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

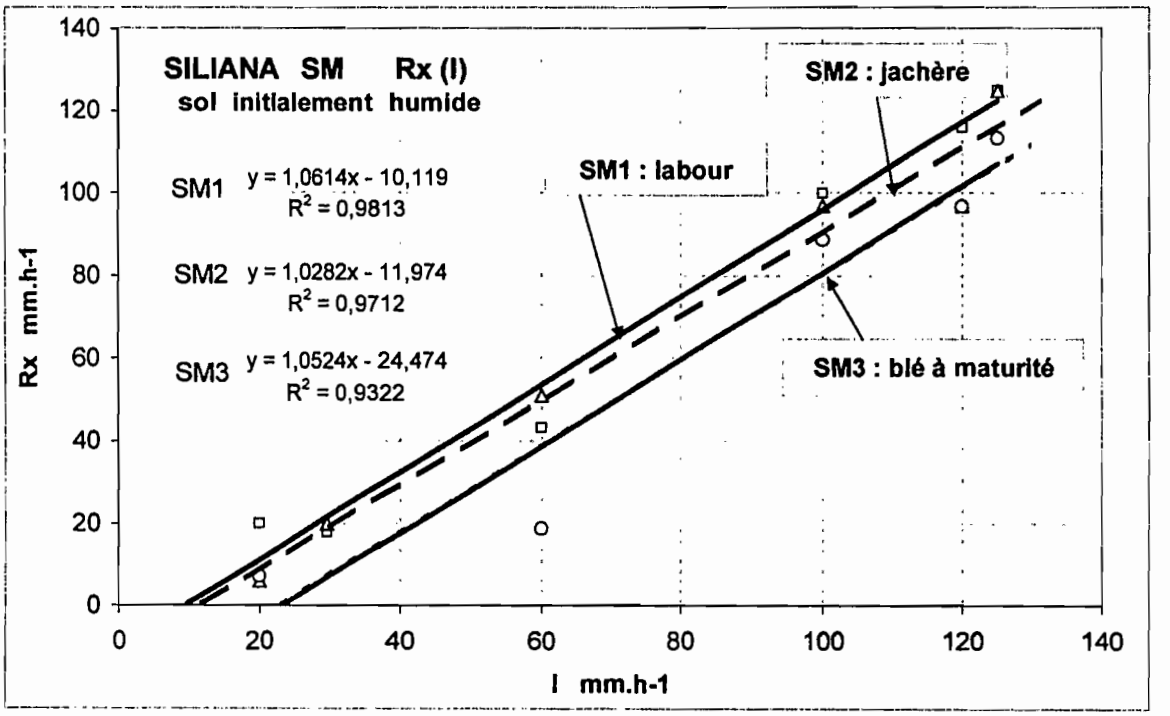
VALENTIN C. 1981
Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols des régions subdésertiques (Agadez, Niger) - dynamiques et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse Univ. Paris VII. collection ORSTOM "Etudes et Thèses" 1985. 259p.

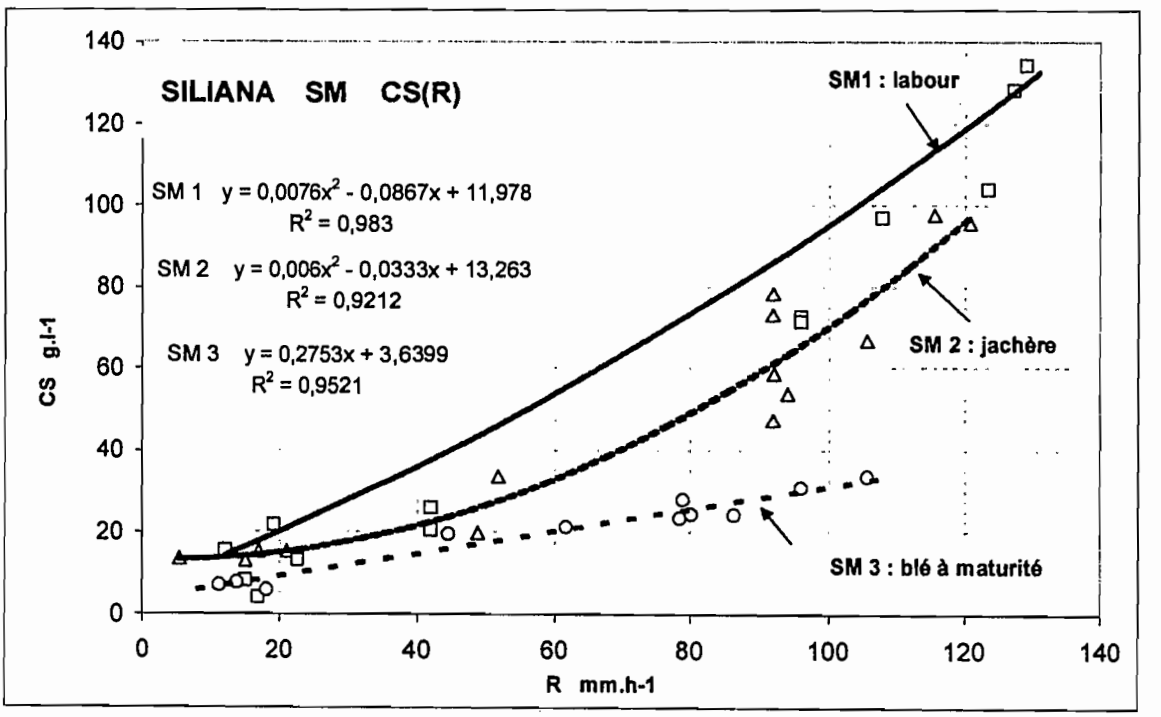
VALENTIN C. 1985
Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the sahelian zone. in Soil Erosion and Conservation, Soil Conservation Society of America. pp 51-65

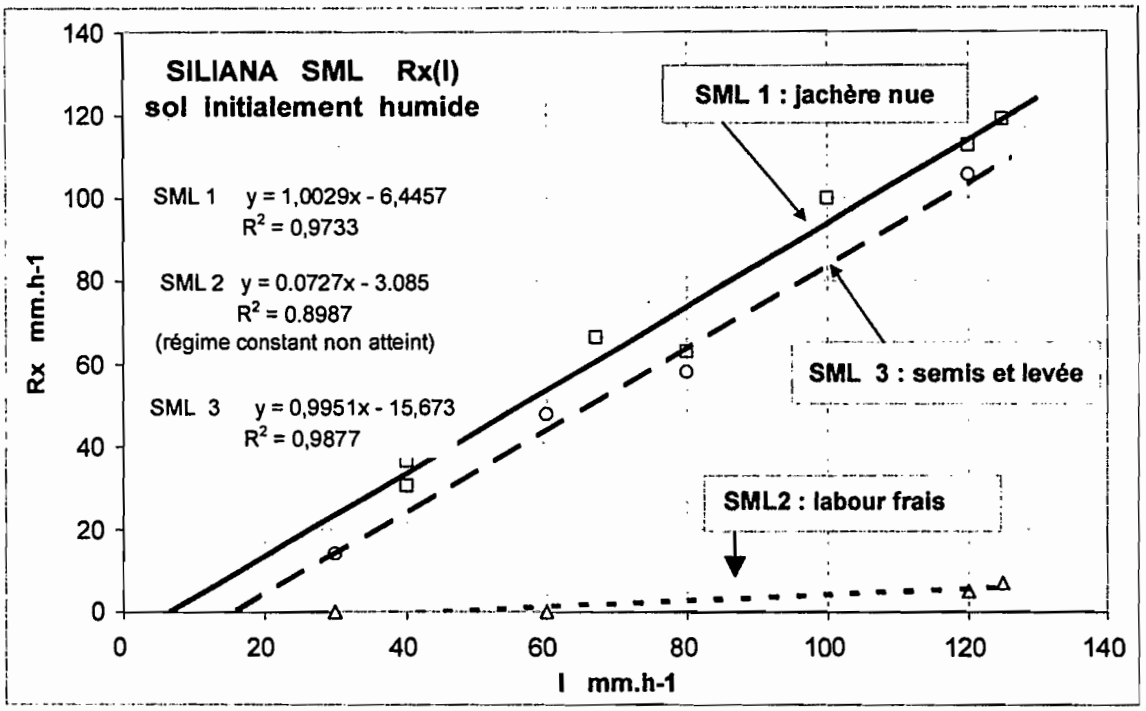
VOGT Th. , 1984
Croûtes calcaires: types et génèse. Exemples d'Afrique du Nord et de France méditerranéenne. Univ. Louis Pasteur de Strasbourg. Institut de Géographie. Labo. de Géogr. Phys. en Milieu Tempéré. (résumé thèse doctorat Paris VI avril 1983) , 228p.

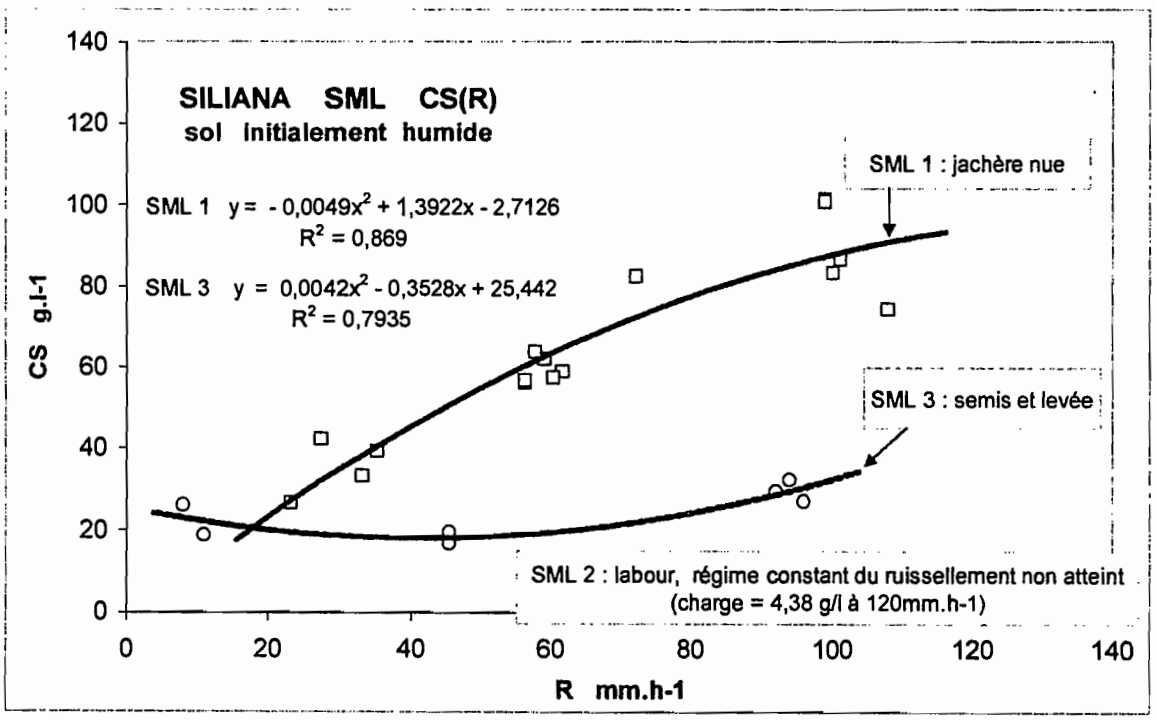
ANNEXE

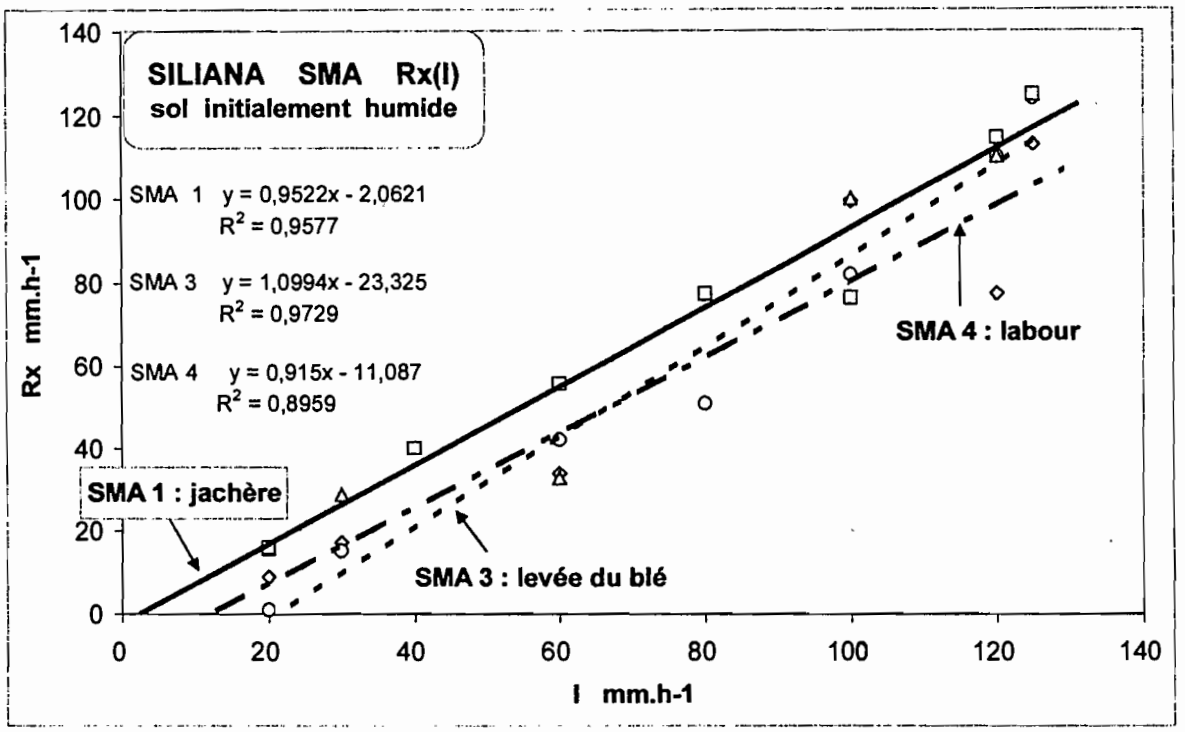
Relations R(I) et Cs(R) pour les parcelles SM, SML et SMA
du terroir de Siliana (Tell tunisien)

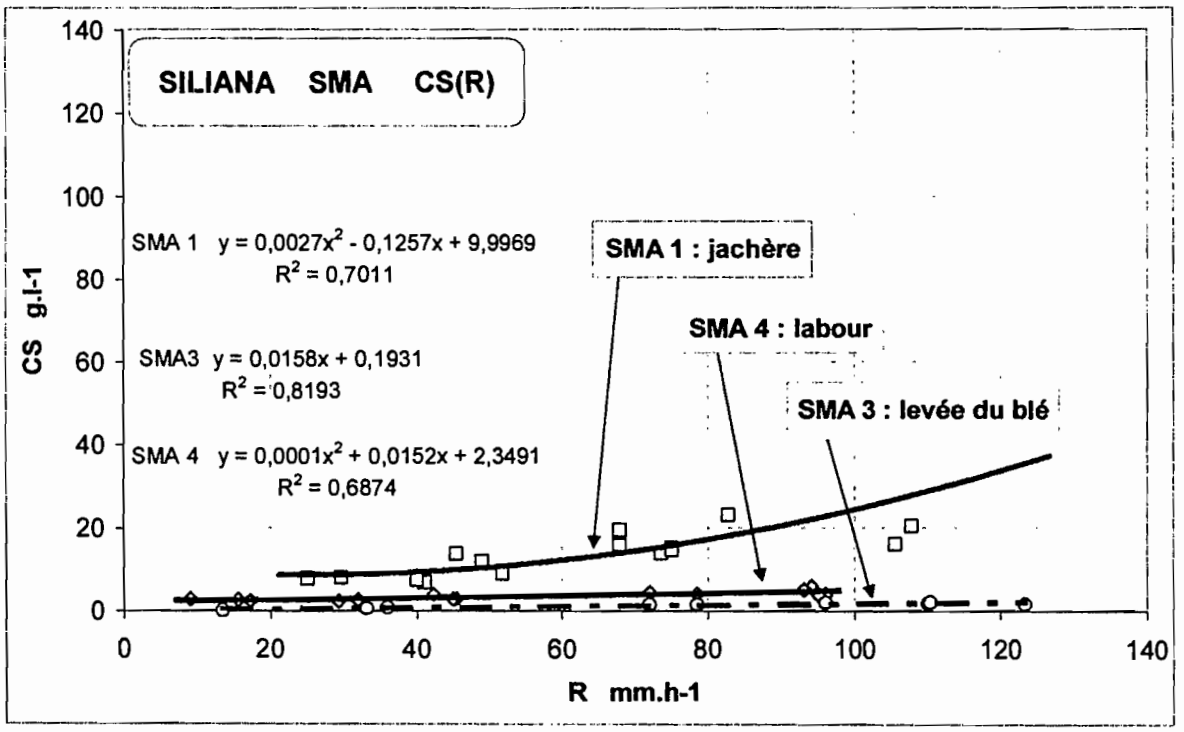





SILIANA SML Rx(I)
sol initialement humide
SML 1 : jachère nue
SML 1 y = 1,0029x - 6,4457
R² = 0,9733
SML 2 y = 0.0727x - 3.085
R² = 0.8987
(régime constant non atteint)
SML 3 : semis et levée
SML 3 y = 0,9951x - 15,673
R² = 0,9877
SML2 : labour frais
Rx mm.h-1
I mm.h-1
0
20
40
60
80
100
120
140


SILIANA SML CS(R)
sol initialement humide
SML 1 : jachère nue
SML 1 y = - 0,0049x² + 1,3922x - 2,7126
R² = 0,869
SML 3 y = 0,0042x² - 0,3528x + 25,442
R² = 0,7935
SML 3 : semis et levée
SML 2 : labour, régime constant du ruissellement non atteint
(charge = 4,38 g/l à 120mm.h-1)
CS g.l-1
R mm.h-1
0
20
40
60
80
100
120
140


SILIANA SMA Rx(I)
sol initialement humide
SMA 1 y = 0,9522x - 2,0621
R² = 0,9577
SMA 3 y = 1,0994x - 23,325
R² = 0,9729
SMA 4 y = 0,915x - 11,087
R² = 0,8959
SMA 1 : jachère
SMA 3 : levée du blé
SMA 4 : labour
Rx mm.h-1
I mm.h-1
0
20
40
60
80
100
120
140


SILIANA SMA CS(R)
SMA 1 y = 0,0027x² - 0,1257x + 9,9969
R² = 0,7011
SMA3 y = 0,0158x + 0,1931
R² = 0,8193
SMA 4 y = 0,0001x² + 0,0152x + 2,3491
R² = 0,6874
SMA 1 : jachère
SMA 4 : labour
SMA 3 : levée du blé
CS g.l-1
R mm.h-1
0
20
40
60
80
100
120
140