

**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**



Diplôme d'études approfondies 'Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental'

**Modélisation de l'érosion hydrique sur deux parcelles de vigne à itinéraires culturels
différents en milieu méditerranéen.**

Par : BEN HAMMADI Marouan

Soutenue le 29 juin 2005 devant le jury composé de :

Michel DESBORDES	Professeur UM II, Montpellier
Alain DELACOURT	Professeur ENGREF, Montpellier
Jean ALBERGEL	LISAH IRD, Montpellier
Damien RACLOT	LISAH, Montpellier

Sommaire

Sommaire	3
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
Introduction	8
I. L'érosion hydrique	9
I.1 Définition	9
I.2 Etat de l'érosion en milieu méditerranéen	11
I.3 Mécanismes de l'érosion hydrique	11
I.3.1 Figures typiques de l'érosion hydrique sur le milieu agricole méditerranéen	12
I.3.2 Les différentes formes d'érosion en milieu méditerranéen	12
I.3.3 Dégâts provoqués par l'érosion hydrique	13
I.3.3.i Dégâts en milieu agricole	13
I.3.3.ii Erosion de vignobles et de vergers	14
a) L'érosion dans les vignobles par concentration de ruissellement	14
b) L'érosion dans les vignobles par décapages d'un sol ameubli	14
I.3.3.iii Dégâts de l'érosion hydrique sur le milieu urbain	14
I.3.3.iv Pollution de l'eau provoquée par l'érosion hydrique	15
I.4 Facteurs physiques favorables à l'érosion hydrique	15
• La topographie	15
• La végétation	15
• La lithologie	16
• Les pratiques culturales	16
• Les sols	16
• Le climat	17
II. Modélisation de l'érosion hydrique	20
II.1.1 Typologie des modèles hydrologiques	20
a) Les modèles physiques :	20
b) Les modèles réduits	21
c) Les modèles mathématiques	21
II.2 Présentation du modèle WEPP	22
II.3 Les concepts de base du modèle WEPP	24
II.3.1 Les sous modèles de WEPP	24
II.3.1.i Sous modèle climat :	24
II.3.1.ii Sous modèle sol :	24
II.3.1.iii Sous modèle gestion du sol et pratiques culturales	25
II.3.1.iv Sous modèle infiltration	26
II.3.1.v Sous modèle bilan hydrique et percolation	26
II.3.1.vi Le sous modèle de production et de transfert de sédiments	27
a) La composante de détachement dans l'interrill et apports de sédiments en rill	27
b) La capacité de détachement	27
d) La capacité de transport et du cisaillement	28
III. Matériel et Méthode	29
III.1 Présentation du bassin versant de Roujan	29
III.1.1 Localisation	29
III.1.2 Caractéristique du bassin	29
a) Le climat	29
b) L'évapotranspiration potentielle	30
c) La géologie	30

d) La géomorphologie	30
e) Les caractéristiques pédologiques.....	31
f) Occupation du sol	31
g) Présentation des parcelles d'études.....	32
• La parcelle AW 6	32
• La parcelle AW 54	32
h) Dispositifs et mesures sur les deux parcelles d'étude.....	33
III.2 Paramétrisation du modèle	35
III.2.1 Le climat.....	35
a) Les paramètres du sol.....	35
b) Estimation du pourcentage de saturation initial (la méthode a été proposée par Votz.M)	37
III.2.3 Coefficient de rugosité :	38
III.2.4 La topographie.....	38
III.2.5 La gestion du sol et les pratiques culturales	38
III.2.6 Résultats du modèle WEPP	40
III.2.7 Mesure du ruissellement et de l'érosion sur la parcelle d'étude	40
III.2.8 Analyse de sensibilité du modèle	41
IV. Résultats et discussion	42
IV.1 Estimation globale du fonctionnement du modèle.....	42
IV.1.1 Le ruissellement :	42
IV.1.2 Estimation de l'érosion	42
IV.2. Parcelle non travaillée AW 6	44
IV.2.1 Ruissellement sur la parcelle non travaillée.....	44
IV.2.2 Pertes en terre sur la parcelle non travaillée	45
IV.3. Parcelle travaillée AW 54	46
IV.3.1 Le ruissellement	47
IV.3.2 Pertes en sol	48
IV.4. Comparaison entre les deux parcelles d'étude.....	49
IV.4.1 Comparaison entre les valeurs de ruissellements mesurés.....	49
IV.4.2 Comparaison entre les pertes de sol mesurées sur les deux parcelles.....	50
IV.4.3 Analyse de variation de certains paramètres du modèle WEPP	53
IV.4.3.1 Les précipitations	53
IV.4.3.2 La rugosité initiale avant le dernier labour	53
IV.4.3.3 La conductivité hydraulique effective.....	54
IV.4.3.4 La topographie	54
IV.4.3.5 Le pourcentage de couverture du sol par la vigne	55
IV.4.3.5 Le pourcentage de saturation du sol.....	55
IV.4.3.6 Variation du nombre de jour depuis le dernier labour	56
IV.4.3.7 Les caractéristiques de l'érodibilité du sol.....	56
• Variation de K_i (érodibilité de l'interrill ajustée).....	56
• Variation de τ_c	56
Conclusion.....	58
Résumé	59
Summary	60
ANNEXE I	66
ANNEXE II.....	67
Annexe III	70
ANNEXE IV.....	74

Liste des figures

Fig.1 Régions affectées par la dégradation des terres dans le bassin méditerranéen. (L'érosion hydrique dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique R.Bou Kheir et al.2001).....	10
Fig.2 Structure d'un bassin versant dans le modèle WEPP. (D.C Flanagan (1995), J.C. Ascough II, A.D. Nicks, M.A. Nearing (1989) et J.M. Laflen).	22
Fig.3 Interaction entre les différents sous modèle du modèle WEPP (D.C Flanagan (1995), J.C. Ascough II, A.D. Nicks, M.A. Nearing (1989) et J.M. Laflen).	23
Fig.4 Pourcentage de couverture végétale des parcelles de vignes (HEBRARD.O, 2004)	39
Fig.5 Exemple de calcul des pertes en terre pour l'événement du 05/06/97 (NT).....	40
Fig.6 Comparaison globale entre les valeurs de ruissellement estimé par WEPP et mesuré...	42
Fig. 7 Pertes en sol estimé par le modèle WEPP en fonction Pertes en sol mesuré.....	43
Fig.8 Comparaison entre le ruissellement mesuré et estimé par le modèle WEPP sur la parcelle non travaillée	45
Fig.9 Comparaison entre les pertes en sol mesurées et estimées par le modèle WEPP sur la parcelle non travaillée	45
Fig.10 Comparaison entre le ruissellement mesuré et estimé par le modèle WEPP sur la parcelle travaillée	48
Fig.11 Comparaison entre les pertes en sol mesurées et estimées par le modèle WEPP sur la parcelle travaillée	48
Fig.12 Comparaison entre les ruissellements mesurés sur les deux parcelles d'étude.	49
Fig.13 Comparaison entre les pertes en sol mesurés sur les deux parcelles d'étude.	50

Liste des tableaux

Tab.1 Pertes en sol sur quelques bassins versants méditerranéen (C. Kosmas et al. 1997).....	17
Tab. 2 Moyenne des pertes en sédiments en sous sol pour différentes cultures (C. Kosmas et al.1997).....	18
Tab. 3 Energie développée par différents processus (d'après HEUSCH, 1970).....	19
Tab. 4 Différences d'échelle de l'érosion hydrique (d'après HEUSCH, 1970).....	19
Tab.5 Pluviométrie mensuelle et annuelle moyenne P (mm), mesurées à la station météorologique du bassin versant de 1993 à 2003. Ecart types σ (Olivier Hebrard, 2004)	30
Tab.6 Evapotranspiration potentielle mensuelle et annuelle moyenne (ETP moy), en mm mesurées à la station météorologique du bassin versant de 1993 à 2003. Ecart types σ (Olivier Hebrard, 2004).....	30
Tab.7 Tableau comparatif des deux parcelles du bassin versant de Roujan (Coulouma, 1998).	33
Tab.8 Paramètres caractéristiques de sol nécessaires pour le modèle WEPP.....	35
Tab.9 Rugosités initiales après le dernier labour en fonction des cumuls de pluie.....	38
Tab.11 Pluviométrie annuelle pour les années d'étude.....	Erreur ! Signet non défini.
Tab.12 Caractéristiques des pluies érosives sur les deux parcelles du bassin versant de Roujan	43
Tab.13 Comparaison entre les valeurs mesurés et prédites pour les deux parcelles d'étude... ..	44
Tab.14. tableau comparatif entre les valeurs mesurés et prédites sur la parcelle non travaillée.	44
Tab.15. tableau comparatif entre les valeurs mesurés et prédites sur la parcelle non travaillée.	46
Tab.16 Valeurs de la conductivité hydraulique effective et la rugosité initiale depuis le dernier labour sur la parcelle travaillée.	47
Tab.17 Modèle d'estimation de l'érosion hydrique. (Jetten et al., octobre 1996).	51
Tab.18 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation des précipitations.....	53
Tab.19 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation de la rugosité.	53
Tab.20 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation de la conductivité hydraulique effective.	54
Tab.21 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la de la pente.....	54
Tab.22 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation du pourcentage de couverture végétale.	55
Tab.23 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation du pourcentage de couverture végétale	55
Tab. 25 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de l'événement	56
Tab.26 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction τ_c . ..	56

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à M. VOLTZ Marc, Directeur du LISAH, pour m'avoir accueilli dans son équipe pour mon mémoire de DEA.

Je remercie plus particulièrement M.ALBERGEL Jean, pour m'avoir encadré tout au long de stage et surtout pour le courage dont il a fait preuve en survivant aux corrections.

Je remercie aussi M.RACLOT Damien pour son co-encadrement ses corrections ainsi que ses conseils.

J'ai plusieurs fois sollicité M.ANDRIEUX Patrick pour les données sur le bassin versant de Roujan. Je le remercie beaucoup pour sa gentillesse et son aide.

Je remercie M.MOUSSA Roger pour m'avoir présenté à M.Albergel Jean et pour son aide et sa correction .

Je remercie M.LEBISSONNAIS Yves pour le suivi de mon rapport et les différents corrections et idées

Je remercie M. COLIN François, pour son aide et ses conseils.

Je remercie finalement toute l'équipe de recherche LISAH ainsi que mes deux amis Thierry et Arthur.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma famille pour la chance qu'elle m'a offert.

Introduction

L'érosion est un processus de dégradation du sol observé partout dans le monde. C'est un phénomène naturel provoqué par les spécificités du relief et du climat. L'érosion contribue à l'enrichissement des terres et des écosystèmes en aval. Elle a été mise en évidence depuis l'antiquité. L'érosion connaît actuellement une amplification avec l'exploitation agricole mal conduite dans certains secteurs, l'accroissement démographique dans les zones rurales pauvres, la salinisation du sol, le surpâturage, et la consommation d'espace par l'urbanisation.

Le bassin méditerranéen est fortement menacé par l'érosion hydrique, car les sols sont fragilisés par des pluies irrégulières le plus souvent violentes et orageuses. De plus le relief méditerranéen est très accidenté et les gradients de pente sont très importants. Le sol en milieu méditerranéen est le fruit des interactions entre processus naturels de la pédogenèse et les activités des sociétés humaines qui se sont développées dans cette région. L'érosion dégrade le sol qui constitue le support non renouvelable et indispensable pour tout développement d'une activité agricole.

Des études diverses ont été menées sur l'érosion hydrique en milieu méditerranéen. En effet ce phénomène ne passe pas inaperçu aux yeux des agriculteurs. Il touche fortement la viticulture en milieu méditerranéen. La vigne est une culture pérenne, souvent installée dans des zones pentues. Elle est sensible à la sécheresse et aux fortes pluies orageuses. La dégradation du sol est accentuée par la succession des années pluvieuses, qui augmente considérablement les pertes en sol sur les bassins versants. Les parcelles de vigne sont marquées par la présence des adventices dans les inters rangs. Ils gênent la croissance de la vignes. Il est alors nécessaire de les éliminer soit par désherbage chimique, soit par un travail mécanique du sol. Pour évaluer l'impact des différentes pratiques culturales sur l'érosion hydrique l'unité UMR LISAH étudie un petit bassin versant viticole expérimental situé dans le département de l'Hérault, dans la commune de Roujan (Voltz et al.1992).

Le développement de l'outil informatique a permis de concevoir des modèles de prédiction de l'érosion prenant en compte les pratiques culturales mises en œuvre par les agriculteurs. Ces modèles constituent un outil d'aide à la décision pour mettre en évidence les facteurs déterminants de l'érosion. Le travail consiste à comparer les résultats prédits par le modèle et ceux mesurés sur le terrain. Cette étude permettra de déterminer les paramètres influant sur l'érosion hydrique et le degré d'impact des différentes pratiques culturales sur la production de l'érosion. Pour cela on a choisi deux parcelles du bassin versant de Roujan. La première est labourée mécaniquement et la deuxième est désherbée chimiquement.

Le présent document est organisé en quatre parties :

1. Une première partie comprend une étude bibliographique sur l'érosion hydrique en milieu méditerranéen.
2. Une deuxième partie porte sur la modélisation hydrologique. Elle décrit le modèle WEPP(D.C Flanagan et al. ; 1995).
3. Une troisième partie décrit le bassin versant et les caractéristiques de chaque parcelle.
4. Une dernière partie présente la mise en œuvre du modèle WEPP sur les deux parcelles du bassin versant de Roujan .

I. L'érosion hydrique

I.1 Définition

L'érosion est un problème vieux comme le monde et nombreuses sont les civilisations qui s'y sont heurtées. L'érosion hydrique est un phénomène très complexe, qui met en interaction plusieurs facteurs tels que la topographie, le climat, le sol, les aménagements et les pratiques culturales. Elle se produit à la suite de fortes pluies sous la forme d'orage intense de courte durée observé lors des changements de saison (à l'automne et au printemps) ou à la suite des pluies volumineuses étalées dans le temps, qui saturent le sol. Dans ces deux cas, les eaux de pluie ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol alors elles ruissellent en emportant les particules de terre. Le refus d'infiltration du sol se produit lorsque la capacité d'infiltration du sol en eau est dépassée. Il existe deux types de ruissellement, le premier est appelé ruissellement **Hortonien**, qui se produit en cas du refus d'infiltration des eaux de pluie. Ce refus est dû au dépassement de la capacité d'infiltration du sol par l'intensité de la pluie. Le deuxième type de ruissellement se produit dans le cas d'une précipitation sur une zone saturée par une nappe. Il est appelé 'ruissellement par saturation'.

Ces deux types de ruissellement se produisent séparément et sont en relation directe avec les caractéristiques du milieu mais il est possible d'observer une combinaison des deux types de ruissellement sur un même bassin versant.

Le ruissellement de l'eau déclenche un processus d'arrachage et de transport des particules appelé 'érosion'. Il existe plusieurs types d'érosion. On distingue classiquement l'érosion en nappe appelée aussi érosion diffuse (Interrill), l'érosion en rigole appelée aussi érosion linéaire (rill) et l'érosion en ravine (gullies). L'érosion linéaire provoque des petites incisions linéaires sur la surface des champs ou sur les parcelles. Elle se produit lorsque le ruissellement se manifeste par des griffes (centimétriques) ou des rigoles (quelques décimètres) de profondeur.

L'érosion est un phénomène qui touche fortement le milieu méditerranéen. Plusieurs facteurs concourent dans cette région du monde à la dégradation des sols et au transport des matériaux solides dans les bassins. On peut distinguer :

- Les facteurs géologiques : les orogénèses du tertiaire Qui ont affecté tout le pourtour méditerranéen. Elles ont construit des reliefs importants. La tectonique récente provoque une remontée qui est à l'origine du rééquilibrage des profils longitudinaux des cours d'eau dans les sens de leur approfondissement.
- Les facteurs pédologiques : les sols qui résultent d'une pédogenèse récente sur un matériel marno-calcaires sont peu consolidés et se désagrègent facilement. Leur pauvreté en matière organique ne leur permet pas de résister à l'agressivité des pluies (sol à faible structure).
- Les facteurs climatiques : la pluviogenèse régionale en Méditerranée met en œuvre des orages très violents. Ils résultent du refroidissement brutal des masses d'air chaud formées sur la méditerranée et bloquées sur les continents par les reliefs en bordure des côtes.
- Des facteurs anthropiques : le bassin versant méditerranéen a été occupé par des civilisations agricoles les plus anciennes. Le déboisement et les défrichements sont anciens. Elles privent les sols d'une protection contre l'érosion.

Cette érosion se manifeste sous plusieurs formes :

- La plus courante est la dégradation par les précipitations des mottes de terre à la surface du sol et l'entraînement de fines particules jusqu'aux cours d'eau.
- Sur les versants où la pente permet une bonne circulation des eaux de ruissellement, il se forme des ravines et des ravins caractérisés par un transport de sol beaucoup plus importants.
- A l'occasion d'événements pluvieux importants, des pans entiers de la couverture pédologique peuvent être emportés : c'est l'érosion en masse.

Les régions les plus affectées par l'érosion hydrique en milieu méditerranéen sont données par la figure suivante (Bou Kheir et al.; 2001) :

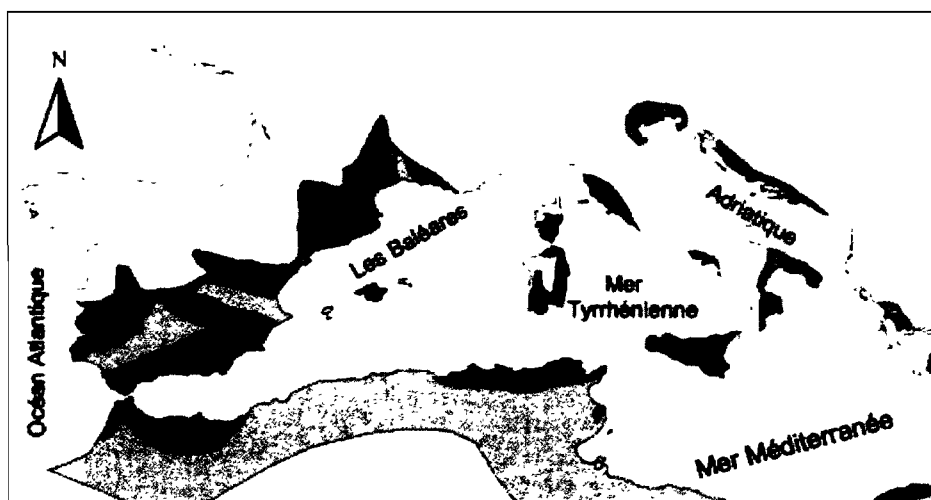


Fig.1 Régions affectées par la dégradation des terres dans le bassin méditerranéen. (Bou Kheir et al.; 2001)

La rive sud de la Méditerranée est également touchée par l'érosion éolienne. Ce type d'érosion est observé dans les zones arides et semi-arides. C'est un phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui transporte et arrache les particules de sol. L'impact de ce type d'érosion dépend de la vitesse du vent, de la densité des particules, de l'humidité du sol et du couvert végétal.

L'impact des différents types d'érosion provoque d'énormes pertes en terre. Face à cette situation, plusieurs études ont été publiées à travers le monde montrant l'état et la gravité de ce phénomène. La FAO (Roose E. ; 1994) considère que l'érosion normale dans les terres cultivées en pente est de 12 t/ha/an. Au delà de cette valeur on considère que le développement agricole n'est plus durable. Dans cette étude on s'intéresse uniquement à l'étude de l'érosion hydrique en milieu méditerranéen et plus particulièrement en milieu viticole.

I.2 Etat de l'érosion en milieu méditerranéen

L'érosion hydrique dégrade l'état et les caractéristiques des sols. Elle est particulièrement néfaste en milieu méditerranéen. Des taux d'érosion croissants ont été enregistrés dans plusieurs pays. L'Algérie est menacée sur 45 % des zones Tellienues soit 12 millions d'hectare (Chebbani et al, 1999), la Grèce est menacée sur 35 % des terres cultivées totales, le Maroc 40 %, des prévisions de la FAO au Liban donnent des chiffres de 50 à 70 tonnes/ha/an (la conservation et l'aménagement des sols dans les pays en voie de développement, bulletin pédologique 33 : 98 p), la Syrie a une moyenne de perte variant entre 50 et 200 t/ha/an, 45 % de la superficie totale de la Tunisie est menacée (Chevallier et al. 1995 ; Boussema 1996) La Turquie enregistre une perte de sol en moyenne sur 50 % de sa superficie (soit presque 500 à 600 millions de tonnes/an). Dans le sud de la France 34 % de la surface cultivée est menacée (Le Bissonais et al.; 1998). Ce pourcentage est variable en fonction du changement des conditions climatiques, de l'occupation du sol et des différents aménagements. Il varie entre 11 et 21 t/ha/an. La situation est relativement plus grave en Espagne, l'Italie et le Portugal où le pourcentage de perte en terre est supérieur à 22 t/ha/an (OCDE 2001).

I.3 Mécanismes de l'érosion hydrique

Le processus de l'érosion hydrique en milieu agricole se produit suivant les deux formes principales suivantes :

1. Le détachement des particules de sol est provoqué par l'impact des gouttes de pluie. Elles brisent les agrégats du sol en éléments plus fins et conduisent progressivement à la formation d'une croûte superficielle de quelques millimètres appelée aussi croûte de battance. Cette dernière entraîne une diminution notable de l'infiltration de l'eau dans le sol. L'excès d'eau s'accumule en surface (formation de flaques) puis ruisselle, transportant des particules de sol et de nutriments. (Le Bissonais et al, 1998).
2. La deuxième forme de détachement est liée à la force tractrice des écoulements. En fonction de la capacité de transport du ruissellement, apparaissent des incisions linéaires, plus au moins espacées, que l'on appelle griffures, rigoles ou ravines, selon leur dimension. Elles sont inhérentes aux irrégularités de la topographie ou induites par les activités agricoles. L'importance du flux de détachement est alors contrôlée à la fois par les caractéristiques des écoulements (vitesse, débit de pointe), par la résistance du sol à l'arrachement et la teneur en matières en suspension (MES) de l'eau de ruissellement. (Le Bissonais et al.;1998).

I.3.1 Figures typiques de l'érosion hydrique sur le milieu agricole méditerranéen

Le climat méditerranéen est contrasté. Il est souvent marqué par des orages violents qui surviennent généralement après une longue période de sécheresse. L'association du climat ainsi que des caractéristiques du sol et les pratiques culturales peuvent provoquer d'énormes dégâts sur les parcelles agricoles méditerranéennes. Les figures d'érosion typiques présents

dans le sud de la France, mais aussi en Espagne, en Italie et en Grèce (Le Bissonais et al, 1998).

- Les badlands où l'érosion sur des pentes fortes creusées par de profonds ravins
- L'érosion d'anciennes terrasses abandonnées
- L'érosion des zones récemment incendiées

I.3.2 Les différentes formes d'érosion en milieu méditerranéen

Les différentes formes d'érosion dépendent de l'intensité, de la durée de la pluie, des caractéristiques du sol, des pratiques culturales et la pente sur le terrain. Selon la combinaison et la localisation spatiale des deux mécanismes de détachement, de multiples phénomènes se distinguent. Ils sont réunis en plusieurs classes :

1. l'érosion en nappe est appelée aussi Sheet ou interrill érosion. Elle se traduit par un décapage sélectif plus au moins uniforme de la couche superficielle du sol. Elle est souvent à peine visible et concerne principalement les particules fines du sol (argile, limon et matière organique) ; (Le Bissonais et al, 1998) ;
2. l'érosion en rigole (rill): Elle est marquée par des rigoles sur la couche superficielle du sol. Elles sont généralement quasi-parallèles, à forte densité mais de dimension et de profondeur modestes (quelques décimètres) ; (Le Bissonais et al.;1998) ;
3. l'érosion par ruissellement concentré est matérialisée par de larges incisions, parfois profondes, très espacées et systématiquement localisées au niveau des chenaux de collecte du ruissellement (d'origine topographique ou agraire).
4. le ravinement : Il est observé à la suite d'un ruissellement concentré. Les facteurs qui influencent le ravinement sont :
 - le volume ruisselé (fonction de la surface du bassin, du degré de saturation des sols et leur capacité d'infiltration, de l'intensité et de la hauteur des pluies)
 - la vitesse du ruissellement (fonction de la pente, de la rugosité des surfaces, les aménagements)
 - la résistance du sol au cisaillement.
5. l'érosion mécanique sèche : C'est un processus peu connu, qui ne nécessite pas l'intervention de la pluie. Il s'agit d'un lent mouvement en masse des horizons superficiels, sous la pression des outils de travail du sol, qui aboutit au décapage des sommets des collines et l'accumulation au pied du versant de terres humifères sombres. (ROOSE.; 1991)
6. les mouvements de masse provoquent le décapage des versants, des coulées boueuses et des transports de masse considérables sans triage des matériaux.(ROOSE.;1991).

I.3.3 Dégâts provoqués par l'érosion hydrique

I.3.3.i Dégâts en milieu agricole

Les dégâts, dans le milieu agricole méditerranéen, sont variables suivant la position et le degré d'exposition des parcelles. Les rigoles et les ravines incisées par le ruissellement entraînent le déchaussement, l'arrachement des plants et la destruction des semis dans la zone de décapage. Sur les replats, souvent en bas de parcelle, le dépôt de la terre entraînée, provoque l'ensevelissement des semis ou des jeunes plants noyés sous la boue. Les ravines, même en dehors de leurs périodes d'activité, constituent une gêne pour le passage des engins agricoles. Lorsque les ravines sont trop profondes pour être franchies, les agriculteurs doivent travailler leurs parcelles morceau par morceau, ce qui augmente le temps de travail et les coûts de production.

L'importance de l'érosion peut être localement quantifiée en tonnes de sol (ou de terre) perdues par hectare et par an. Les distances de transport de sédiments sont variables et dépendent de l'intensité du phénomène. Les sédiments peuvent se déposer à proximité de leurs points d'arrachage ou être acheminés sur des longues distances jusqu'aux cours d'eau.

L'érosion hydrique a un grand impact sur la fertilité du sol, qui varie suivant la nature de l'érosion.

L'érosion sélective est observée dans les sols fins. Elle conduit à une perte de fertilité suite à l'exportation du sable fin riche en éléments fertilisants et en matière organique. La perte de fertilité du sol varie en fonction de sa profondeur (couche superficielle). Ainsi, sur un sol très épais le décapage passera longtemps inaperçu (Le Bissonais et al, 1998).

L'impact de l'érosion dépend aussi du caractère plus ou moins meuble de la roche mère. Sur les plateaux limoneux du sud de la France, le décapage par l'érosion en nappe d'une certaine épaisseur de sol se traduit par une dilution de la matière organique. Cette dilution est accentuée par le labour qui remonte en surface une nouvelle couche de limon.

Dans ce mémoire on s'intéresse plus particulièrement à l'impact des différents types d'érosion sur les parcelles de vigne en milieu méditerranéen.

I.3.3.ii Erosion de vignobles et de vergers

On peut distinguer deux principaux types d'érosion dans les inters rangs des cultures pérennes. Ils correspondent à des types de travail du sol.

a) L'érosion dans les vignobles par concentration de ruissellement

Ce système concerne les parcelles conduites en non culture, où le sol est traité chimiquement pour désherber les adventices. Il se tasse progressivement sous les passages successifs des roues des appareils utilisés dans les pratiques culturales (épandage de fertilisants et des produits phytosanitaires et les vendangeuses). La perméabilité des sols décroît progressivement. Cette situation favorise le ruissellement pour les pluies d'assez faible intensité, et l'eau acquiert ensuite une vitesse suffisante pour creuser des rigoles et des ravines. Cette incision favorise la destruction de la végétation herbacée en bas de la parcelle et dans les talwegs. Le non travail du sol facilite ultérieurement la concentration du ruissellement. Il se forme une croûte à la surface du sol qui résiste à l'incision, du fait du tassement du sol. Des écoulements boueux catastrophiques surviennent à l'aval des ravines.

b) L'érosion dans les vignobles par décapages d'un sol ameubli

Dans ce système de culture, l'érosion concerne les parcelles où les adventices sont traités mécaniquement par plusieurs labours (généralement en printemps et en été). L'intensité de l'érosion est liée à la forte érodibilité du sol régulièrement ameubli. Le travail du sol maintient une bonne infiltrabilité du sol. Par contre, sous une pluie de très forte intensité, le ruissellement entraîne facilement le sol ameubli et provoque des écoulements boueux aux conséquences catastrophiques.

Il est possible que ces deux types d'érosion de vignobles se succèdent en se juxtaposant dans l'espace, en fonction du mode de conduite des parcelles. Dans certains champs de vigne deux cultures différentes coexistent dans le même secteur. L'association de ces deux phénomènes entraîne sur le même versant les effets suivants (Le Bissonais et al.; 1998) :

- a) Lorsque la parcelle tassée (émettrice du ruissellement) est située en amont et la parcelle ameublie en aval, les risques sont augmentés.
- b) Inversement, lorsque la parcelle ameublie est située en amont, elle retarde l'apparition du ruissellement, et le sol de la parcelle tassée en aval a une bonne résistance à l'incision. Cette combinaison réduit les risques d'apparition d'écoulements boueux.

I.3.3.iii Dégâts de l'érosion hydrique sur le milieu urbain

Ces dégâts sont provoqués par les coulées boueuses catastrophiques qui se concentrent dans les bassins agricoles, dévalent le long du réseau des vallées et de vallons secs et provoquent des dégâts à l'encontre des bâtiments, des ouvrages d'art et des routes.

I.3.3.iv Pollution de l'eau provoquée par l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un facteur qui favorise la pollution des eaux superficielles. En effet, les eaux de ruissellement sont chargées en matières en suspension sur lesquels peuvent être fixés des éléments chimiques (fertilisants tels que phosphore, absorbés sur les particules de terre, produits phytosanitaires, etc.). L'érosion augmente la turbidité des cours d'eau et leur teneur en éléments eutrophisants. La gravité de cette pollution des eaux est due à la fois à son caractère chronique et à des épisodes érosifs exceptionnels induits par des pluies de faible fréquence de retour.

I.4 Facteurs physiques favorables à l'érosion hydrique

L'érosion hydrique, qui affecte les sols méditerranéens est fonction de multiples facteurs. Ces derniers sont plus au moins similaires partout dans le monde (Morgan 1986). A partir d'une analyse bibliographique, les principaux facteurs sont cités ci dessous en partant de la topographie à l'occupation du sol en passant par les pratiques culturales et le climat.

- **La topographie**

Dans les pays du pourtour méditerranéen, la tectonique a créé un paysage à la topographie accidentée. Le plissement alpin a fait surgir des chaînes de montagnes atteignant parfois jusqu'à 3000 voire 4000 m d'altitude, très plissées et fracturées, et creusées de vallées fréquemment encaissées. Les pentes sont donc souvent fortes. Il est admis que la pente est un des facteurs influençant le plus les pertes en sol par érosion hydrique. L'exposition des pentes peut avoir une importance, car sur celles exposées au sud qui ont une faible couverture végétale, l'érosion est très élevée (Posen et al., 1998). Sur les pentes concaves, l'érosion est la moins intense (D'Sousa et Morgan, 1976 ; FAO, 1976) et sur les pentes convexes la perte en terre est plus grande que sur les pentes rectilignes. La longueur de la pente est moins importante que son gradient et sa forme (Roose, 1994 ; FAO, 1983),

- **La végétation**

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou de résidus. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et de l'éclaboussement, ils tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration.

L'efficacité du couvert de végétation et de résidus à réduire l'érosion dépend du type, de l'étendue et de la densité du couvert végétal. La végétation et les résidus combinés, couvrant complètement le sol, interceptent la pluie et sont le moyen le plus efficace pour réduire les pertes de sol (forêt et pâturages permanents). Les résidus partiellement incorporés et leurs racines ont aussi leur importance, parce qu'ils facilitent l'infiltration.

- **La lithologie**

La présence des roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et par des sols et en conséquence la quantité du sol susceptible à être érodée (Kyrine et Judd, 1957 ; FAO ; Demmak, 1982). La susceptibilité à l'érosion est une estimation de la capacité de chaque sol à résister à l'érosion, basée sur ses caractéristiques physiques. Les sables, loam (terre grasse) tendent à s'éroder moins que les limons, sable fins et certains sols argileux. Une faible infiltration des roches affleurantes indique qu'une grande quantité de terre peut être importée. Les sols marneux lorsqu'ils sont secs, restent non érodibles mais, dès qu'ils atteignent une certaine humidité leur sensibilité à la détachabilité et au ruissellement augmente (Chebbani et al.; 1999). Les argilites, les marnes, les schistes, les basaltes et les gneiss sont très vulnérables au ravinement (Roose.; 1994). En Algérie, Demmak (1982,1984) a montré que les transports solides d'un bassin versant dépendaient de sa surface en roches de différents types (argileuses, marneuses, schisteuses, etc..).

- **Les pratiques culturales**

L'intensité de l'érosion hydrique des sols méditerranéens est affectée significativement par les activités humaines qui augmentent ou diminuent les pertes en terre (Bou kheir et al.; 2001). De plus les catastrophes naturelles comme les incendies détériorent les forêts existantes, ce qui favorise le ruissellement et une érosion plus importante.

La mise en culture d'un sol le rend sensible à l'érosion car la probabilité s'accroît d'avoir un sol nu lors des fortes précipitations (faible ou nulle interception des gouttes de pluie). Cela dépend de la nature de la plante cultivée et des techniques culturales. Les opérations culturales ont un effet sur les risques d'érosion du sol. Ceci comprend la profondeur, la direction et la période de labour, le type d'équipement utilisé et le nombre de passages.

- **Les sols**

Les principales caractéristiques des sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont les suivantes : la profondeur, la pierrosité, la granulométrie, la teneur en matière organique (Roose et al ; 1993), la nature minéralogique des argiles (Auzet, 1987, Y.le Bissonais et al, 1995), l'infiltrabilité (Papy et al, 1995) et la cohésion (Mériaux, 1961).

Les sols varient beaucoup dans le milieu méditerranéen. On en distingue plusieurs types tels que, les sols à texture grossière moins sensibles au détachement par la pluie, les horizons sableux pauvres en matières organiques qui se tassent permettant au ruissellement de devenir alors aussi fort que celui observé sur les sols argileux. On distingue aussi les sols limoneux ou limoneux sableux, qui sont très susceptibles à l'érosion hydrique. Toutefois les sols à textures fines sont moins sensibles que les sols limoneux, car leurs agrégats sont plus stables, mais cela varie suivant le type d'érosion. Plus de 60 % des sols méditerranéens comportent des fragments des roches dans l'horizon superficiel (Poesen, 1990). Ces fragments réduisent l'érodibilité : protection contre l'impact des gouttes de pluie et diminution de la vitesse du ruissellement réduisant sa capacité de détachement et de transport (Poesen et al., 1994).

- **Le climat**

Le climat méditerranéen est fortement tempéré. Des averses orageuses violentes de fréquences rares surviennent dans la période de changement de saison (à l'automne et en été). Ces pluies ont une forte intensité (Obbed et Tourasse, 1994; IGN, 1995) qui atteignent de 130mm/24h au Liban (Tayara, 1998), 298 mm mm/24h en Grèce (Groove, 1996), 400 mm/24h en Italie (Giordano, 1986), 790 mm/24h en Espagne (Lopez-Bermudez et Romero Diaz, 1993) et même 400 mm pendant moins de 4h dans la région de Nîmes au sud de la France. De plus, la variabilité des précipitations est très grande d'une année à une autre. Ces averses, tombant sur des sols déjà saturés, sont à l'origine de la formation des ravines, des mouvements de masse et des inondations (Allée, 1984 ; Gallart et Clotet Perrarnau, 1998 ; Garcia-Ruiz et al, 1994).

I.5 Influence de la végétation et des pratiques culturales sur l'érosion hydrique en milieu méditerranéen (C. Kosmas et al. 1997)

Plusieurs études en milieu méditerranéen ont montré l'impact des pratiques culturales et de la couverture végétale sur l'érosion hydrique en milieu agricole. Des études expérimentales ont été élaborées afin de comparer et d'évaluer l'effet de ces pratiques culturales et des précipitations, sur l'érosion hydrique. Cette étude se situe dans le cadre d'un projet de recherche pour l'Union Européenne intégrant le projet de recherche MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use). Pour ce programme plusieurs sites d'études ont été instrumentés dans plusieurs pays européens.

Dans la région méditerranéenne, sept sites d'étude ont été sélectionnés. Ils représentent différents paysages, unités lithologiques et différentes pratiques culturales. Les caractéristiques variantes des sites d'étude permettent de mesurer le degré d'influence de chaque paramètre. Les sites se trouvent au Portugal, en Espagne, en France, en Grèce et en Italie. Les caractéristiques des différents sites sont résumées dans le tableau suivant :

Pays	Site	Végétation	Pluie annuelle (mm)	Pente (%)	Perte en sol maximale (t/ha/an)
Portugal	Vale Formoso	Jachère blé	583	7-20	0.9
Espagne	El Ardal	Arbuste blé	276	9-38	0.9
Espagne	Ramba Honda	Arbuste annuel	280	15-42	0.6
France	Roussillon	vigne	582	5-10	4.6
Italie	Is Olias	Arbuste eucalyptus	540	12-31	0.65
Greece	Petalona	Arbuste blé	464	11-33	0.9
Greece	Spata	Vigne olive	496	7-23	4.6 0.03

Tab.1 Pertes en sol sur quelques bassins versants méditerranéen (C. Kosmas et al. ; 1997)

Cette étude démontre l'impact de la nature des végétations sur les mesures en pertes en sol dans le milieu méditerranéen. Les cultures pérennes d'olivier et d'eucalyptus résistent mieux que la vigne à l'impact des gouttes de pluies. En effet, le sol des parcelles de vigne est plus exposé aux pluies car elle couvre pas totalement le sol nu dans l'inter rang. Les pratiques culturales comme le labour et l'épandage des produits phytosanitaires influent sur la capacité d'infiltration du sol. En effet, sur les parcelles de vigne à Spata et en Roussillon, les sols sont généralement labourés deux fois au printemps et subissent un traitement de pesticide annuel. Les valeurs maximales de ruissellement et de transport de sédiments ont été observées dans ces deux sites d'étude. Le ruissellement enregistré peut atteindre un pourcentage de 31,8 % des précipitations moyennes annuelles. Les précipitations moyennes annuelles sont plus au moins importantes et elles variant entre 340 à 850 mm. Des grands événements pluvieux surviennent sur ces deux sites. En 1947 un épisode pluvieux de 700 mm en une seule journée a été enregistré dans le Roussillon et dans la région de Spata on a enregistré une pluie de 185 mm en une journée avec une intensité maximale de 335 mm/h en 1994. L'association des averses orageuses et la présence d'une croûte à la surface du sol augmentent le pourcentage de ruissellement sur les parcelles de vigne. Les valeurs de transport solide, mesuré sur les parcelles de vigne peuvent atteindre des valeurs de 67 t km⁻²an⁻¹ jusqu'à 460 t km⁻²an⁻¹.

Pour les parcelles d'oliviers la couverture des sols et l'interception des pluies sont les plus élevés parmi toutes les cultures pérennes. Sur le site de Spata en Espagne, ce pourcentage atteint les 90 % de la surface du sol. Il permet la diminution de la vitesse d'écoulement de l'eau. La valeur maximale de transport solide atteint les 2,8 t km⁻²an⁻¹. Les parcelles d'oliviers offrent une meilleure protection des sols accidentés. Ces résultats ont été prouvés sur des parcelles en Espagne, en Grèce et en Italie.

Cette étude confirme l'existence de relation entre les précipitations annuelles, l'écoulement et le transport de sédiments pour une certaine pratique culturale. Une autre relation est confirmée entre les précipitations annuelles et l'érosion hydrique dans le milieu méditerranéen. Un tableau récapitulatif résume ces relations entre les précipitations annuelles, l'écoulement et le transport de sédiments. On s'intéressera particulièrement aux cultures pérennes (vigne, olive, eucalyptus) dont les résultats sont énoncés dans le tableau suivant :

Culture	Pertes en sédiments sous sol (t km ⁻² an ⁻¹)
Vigne	142,8
Eucalyptus	23,8
Olives	0,8

Tab. 2 Moyenne des pertes en sédiments en sous sol pour différentes cultures (C. Kosmas et al.1997)

Des études expérimentales ont permis de fixer les ordres de grandeur des phénomènes d'érosion. L'échelle d'expérimentation dépend du type d'érosion : petite parcelle pour l'érosion en nappe et en rigoles, petits bassins versants pour l'érosion en ravines et grands bassins pour les glissements de terrains et les sapements des berges.

Ces études ont montré les résultats suivants (HEUSH, 1970)

Energie cinétique des pluies (780 mm)	10000 (Joules/m ² /an)
Energie des façons culturales (labour)	9000(Joules/m ² /an)
Energie du ruissellement hypodermique sur les versants	3700 (Joules/m ² /an)
Energie du ruissellement sur les versants	30 (Joules/m ² /an)
Energie d'écoulements aux stations de jaugeage	1000 à 2000000 (Joules/m ² /an)

Tab. 3 Energie développée par différents processus (HEUSCH, 1970)

On constate que l'énergie érosive des pluies est nettement supérieure à l'énergie disponible dans le ruissellement. Elle peut provoquer des glissements de terrains. L'analyse géomorphologique des formes d'érosion permet de prévoir les risques d'érosion en fonction de la nature de l'érosion et la particularité du terrain.

Erosion en nappe	1 (t/ha/an)
Erosion en rigole	10 (t/ha/an)
Erosion en ravine	100 (t/ha/an)
Glissement de terrain	1000 (t/ha/an)
Sapement des berges	10000 (t/ha/an)

Tab. 4 Différents impacts en fonction du type d'érosion hydrique (HEUSCH, 1970).

Simulation de pluie et érosion hydrique

Pour mieux comprendre les transferts de matière, un dispositif de simulation de pluie en laboratoire est mis en œuvre à l'INRA Orléans. Il permet de simuler différentes intensités (10 à 60 mm/h) sur des échantillons de sol correspondants à la « surface élémentaire représentative » d'une parcelle cultivée (10 m² sur 0,3 m de profondeur) avec une pente variante de 0 à 20 %. Les mesures effectuées ont pour objectifs principaux l'acquisition des références expérimentales nécessaires à l'élaboration de modèles. Ce dispositif permet l'appréciation, la quantification de l'érosion et la mesure de l'influence des différents paramètres intervenant soumis à l'énergie cinétique des gouttes de pluie à la surface et dans les premiers décimètres du sol.

Cette simulation en laboratoire permet de mesurer ponctuellement le ruissellement, d'évaluer les pertes en terres. Des simulations de pluie sont effectuées aussi in situ. Plusieurs appareils ont été testés comme à l'occasion d'une étude menée dans les Sud Aveyron (Asseline et al., 1994). L'objectif de cette étude était de mesurer les risques d'érosion, en nappe et linéaire, sur les sols cultivés. Les mesures sont effectuées à l'aide d'une pluie artificielle. Ces études expérimentales permettent d'évaluer :

- L'influence de l'état structural sur le partage infiltration ruissellement.
- Rôle de la rugosité de surface sur la détention et le ruissellement.
- Influence du couvert végétal et des résidus sur l'effet de la pluie et la redistribution des particules (terres spores pesticides).
- La résistance mécanique de la surface des sols à l'incision par le ruissellement.

II. Modélisation de l'érosion hydrique

II. 1 Définition : Un modèle est «une représentation sous forme quelconque d'un objet, d'un processus ou d'un système» (UNESCO, 1992). Un modèle mathématique est une adaptation de la réalité pour pouvoir lui appliquer les outils, les techniques et les théories mathématiques. Un modèle hydrologique est un ensemble d'équations mathématiques permettant une représentation simplifiée du milieu naturel. Il existe autant de modèles que d'hydrologues (Ambroise, 1999) puisque chaque modèle correspond à une problématique donnée (Resfsgaard, 1997). Les modèles mathématiques sont utilisés entre autres pour anticiper des événements ou des situations (prévoir le temps avec la météo).

Très pragmatiquement, l'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse "satisfaisante" aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie encore une fois à l'objectif assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle (modèle finalisé). On comprend mieux alors pourquoi, parmi l'infinité des modèles possibles d'un objet, qui traduisent chacun un type de "ressemblance", un modèle particulier, qui n'est pas nécessairement le plus complexe, puisse ou doit être préféré à tout autre.

Beven (2000) rappelle les cinq étapes dans toute démarche de modélisation :

1. le problème du choix du type de modèle et de la représentation du système ;
2. le choix des équations pour représenter le processus ;
3. la représentation du modèle sous forme d'un code informatique ;
4. la paramétrisation et le calage du modèle ;
5. la validation du modèle.

Le passage d'une étape à la suivante n'est possible que sous certaines approximations des étapes intermédiaires. Par conséquent, les incertitudes sur les résultats finaux de la modélisation sont tributaires de toutes les approximations des étapes intermédiaires (Chahinian, 2004).

Cette série d'équations mathématiques représente la façon dont un système complexe (une parcelle ou un bassin versant) transforme un ensemble de variables d'entrées (pluie, température, travail du sol) en variables de sorties (débits liquides et solides, concentration en MES). La modélisation de l'érosion permet par exemple :

1. de mettre à jour la sensibilité des sols à l'érosion.
2. et établir une échelle d'intensité des processus afin de donner la priorité aux interventions.
3. une évaluation rapide du rythme de l'érosion dans une région.

II.1.1 Typologie des modèles hydrologiques

On distingue les modèles physiques (ou modèles réduits), modèles analogiques et modèles mathématiques. Ces trois types de modèles entretiennent de nombreuses relations (Chahinian, 2004).

a) Les modèles physiques :

Il s'agit de fabriquer une maquette de la réalité. Ici la notion d'analogie est d'abord géométrique mais elle se base également sur de solides bases scientifiques, issues de

l'analyse adimensionnelle développée en mécanique des fluides et en thermodynamique. Il existe entre les grandeurs mesurables dans la réalité et celles mesurables sur le modèle des rapports de similitude. Ils peuvent être calculés a priori et assurent la transposabilité en vraie grandeur des résultats obtenus sur le modèle. La justification du modèle repose en définitive sur le fait que les mêmes équations régissent les phénomènes en vraie grandeur et en modèle réduit. C'est cette même raison qui justifie les nombreux **modèles analogiques**, physiques eux aussi. La modélisation de l'écoulement des eaux souterraines par des réseaux électriques où résistance, capacité et potentiel électrique simulant transmissivité, emmagasinement et charge hydraulique a eu son heure de gloire il y a une cinquantaine d'années.

b) Les modèles analogiques

Ils sont encore très utilisés, en particulier en raison de leur capacité à prendre en compte des conditions aux limites complexes mais aussi à cause de leur matérialité qui séduit souvent les maîtres d'ouvrage, les modèles analogiques ont pratiquement disparus au profit des modèles mathématiques pour des raisons de facilité de mise en oeuvre et surtout de coût.

c) Les modèles mathématiques (ou numériques)

Ils sont de nature déterministe, s'appuyant sur des équations phénoménologiques (modèles à base physique) ou sur des schémas de fonctionnement (modèles conceptuels), ou probabiliste (stochastique). Dans le premier cas c'est une valeur bien précise qui est associée aux variables et aux paramètres, alors que dans le second ce sont des distributions de probabilité qui sont associées à ces grandeurs. Les modèles mathématiques sont transitoires ou permanents selon que l'on prend ou non en compte une variation des variables modélisées au cours du temps. Ils sont distribués ou agrégés selon que l'on introduit ou non une variabilité spatiale de leurs paramètres (P. Hubert.; 1996).

II.1.2 Approches utilisées dans les modèles

Les modèles mathématiques ou numériques reposent sur une multitude d'approche :

- **l'approche empirique** : elle se base sur des équations empiriques expérimentales. Elle transforme les variables d'entrée en résultats à travers une boîte noire. Cette dernière est formée par un ensemble d'équations simples et réduites
- **l'approche par processus** : elle se base sur la représentation du processus ou du mécanisme qui agit sur le phénomène hydrologique. Elle regroupe les modèles conceptuels et physiques
- **l'approche spatiale** : elle se base sur une représentation du terrain d'étude d'une façon découpée. Elle regroupe les modèles globaux, semi distribués et distribués ou spatialisés.
- **l'approche temporelle** : elle prend en compte la variation des phénomènes en fonction du temps. Le facteur principal de cette approche est le temps de simulation.

Pour la modélisation de l'érosion il existe une multitude de modèle dont chacun possède son propre mode de simulation. On distingue :

- Les modèles à simulation continue comme par exemple MEDRUSH, AGNPS et ACRU qui permettent de simuler de longues périodes de temps avant un pas de temps variant entre une heure et une journée.

- Les modèles qui représentent le phénomène à l'échelle de l'événement comme KINEROS 2, EUROSEM, LISEM et EROSION3D
- Les modèles associés à une base SIG comme LISEM, EROSION3D, AGNPS et MEDRUSH.

II.2 Présentation du modèle WEPP

Face au développement des besoins des agriculteurs et la nécessité d'avoir des modèles facilement transposables partout dans le monde. Le département de recherche au département d'agriculture aux Etats-Unis (USDA) a conçu ce modèle basé sur plusieurs approches. Le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project) est un modèle à base physique dynamique et semi distribué (D.C Flanagan et al.;1995). Il a été développé par un groupe de médiation de scientifiques comprenant le service de forêt du USDA, le service agricole de recherches, le service de conservation de ressources naturelles, et le département du bureau de l'intérieur de la gestion de terre et de l'aperçu géologique (D.C Flanagan et al.;1995).

Les scientifiques de ces agences ont travaillé depuis 1985 pour développer WEPP et remplacer l'équation universelle de perte de sol (USLE), tout en s'appuyant sur des modèles existants. Ce modèle a été créé pour fournir aux agriculteurs un outil performant et simple à utiliser. Il est caractérisé par une interface graphique présentant une variation de pente sur une entité hydrologique donnée (bassin versant ou parcelle). Le modèle WEPP a été amélioré depuis la sortie de sa première version en 1984, par la suite diverses versions ont été éditées sur le net en libre téléchargement.

Le modèle WEPP pourra être utilisé à différentes échelles :

- une version Hillslope (versant ou petites entités hydrologiques) : dans le même versant le modèle pourra simuler jusqu'à 10 combinaisons de pente de sol et de culture appelé OFE (Overland Flow Element). Chaque OFE est une entité homogène pour le sol et la culture mais la pente peut varier. Toutes les entités homogènes sont soumises à un même climat.
- une version Watershed (bassin versant): chaque bassin versant est composé par des versants, canaux et retenues liées entre eux et soumises au même climat.

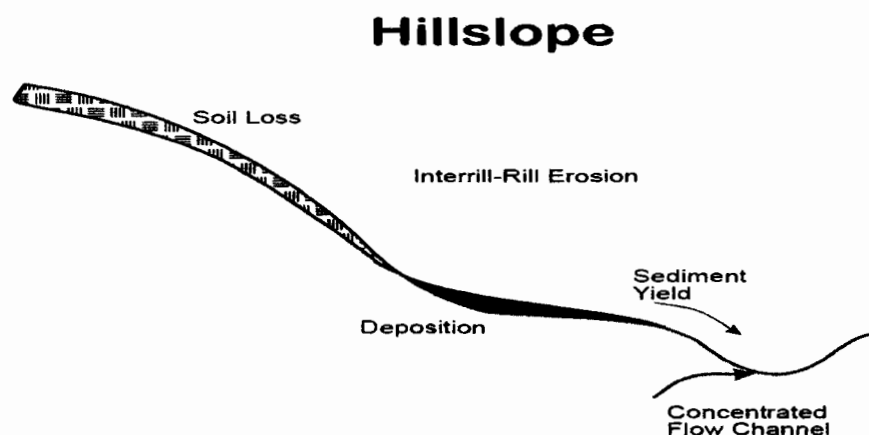


Fig.2 Structure de la version Hillslope dans le modèle WEPP. (D.C Flanagan et al.;1995)

Avec :

OFE (over flow element) combinaison sol culture

Hillslope sous-unité du bassin versant (parcelle, versant)

Channel tronçon du réseau hydrologique

Impoundment : Retenue

Outlet : exutoire

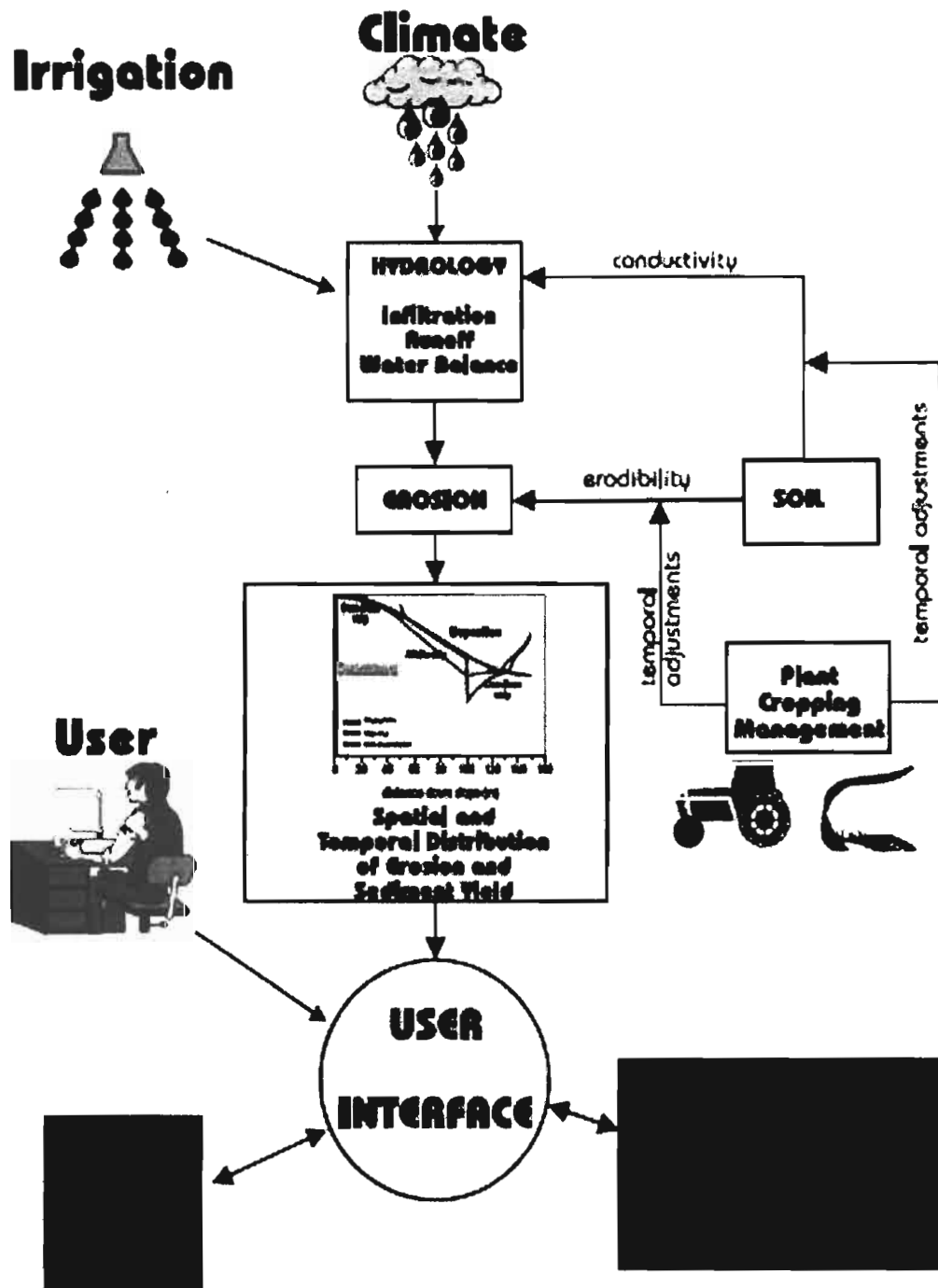


Fig.3 Interaction entre les différents sous modèle du modèle WEPP (D.C Flanagan et al.; 1995).

II.3 Les concepts de base du modèle WEPP

Dans le modèle WEPP, la perte en sol est estimée par plusieurs sous modèles dont chacun possède une équation qui gère son calcul et le traitement des données d'entrée. En ce qui concerne la production d'eau on distingue :

1. le modèle **CLIGEN** pour simuler les précipitations ainsi que les autres caractéristiques du climat
2. le modèle **Green et Ampt** pour estimer les proportions de l'infiltration et de ruissellement
3. le modèle **EPIC** (Williams.; 1990) pour la modélisation de la croissance des plantes et les pratiques culturales, qui estime les pertes par évapotranspiration.
4. l'équation de l'onde cinématique pour les écoulements à surface libre .

II.3.1 Sous-modèle climat :

Il est possible de simuler le climat à l'échelle de l'événement avec le modèle BPCDG ou Break Point Climate Generator for WEPP (D.C Flanagan et al.; 1995). Il est généralement utilisé lorsque on effectue des simulations à l'échelle d'un pas de temps réduit. Cette méthode présente plusieurs avantages :

- elle permet l'utilisation de données relatives à une averse observée et les autres paramètres climatiques journaliers correspondant
- elle est facile à utiliser, et les fichiers d'entrée peuvent être créés sur un simple éditeur de texte ou extraits à partir d'une base de donnée ;
- elle ne nécessite pas des traitements statistiques sur les données d'entrée sur la zone d'étude.

II.3.2 Sous modèle sol :

Le sous modèle sol contient des informations sur les caractéristiques physiques et la structure du sol et du sous-sol pour chaque parcelle. L'utilisateur introduit les paramètres du sol (le pourcentage de sable, argile, pierrosité, texture du sol, capacité d'échange cationique, pourcentage de saturation initiale).

Les paramètres à introduire sont :

1. la conductivité hydraulique effective, qui découle du principe de Green et Ampt (1911).
2. l'érodibilité de l'inter rill et dans le rill.
3. la contrainte de cisaillement.

Ces paramètres peuvent être introduits soit par l'utilisateur soit être calculés automatiquement par le modèle à partir différents composantes du sol. Chaque horizon de sol ne peut pas comprendre plus de huit couches.

II.3.3 Sous modèle gestion du sol et pratiques culturales

1. Ce module est constitué d'un module de croissance de plante EPIC (Williams, 1990). Il s'appuie sur la base d'un état initial, qui fixe un certain nombre de caractéristiques du sol. Ces paramètres sont le calendrier de la conduite culturale, l'état de la couverture végétale, le cumul de pluie depuis le dernier labour. Pour le travail à

l'échelle de l'évènement on a besoin d'introduire les paramètres correspondant à l'état du sol et de la plante.

II.3.4 Sous modèle infiltration

L'excès de précipitation est calculé à partir de la différence entre la quantité de pluie et l'infiltration du sol. L'équation pour le calcul de l'infiltration dans le modèle découle de l'équation de Green et Ampt pour une précipitation non permanente. La formule a été développée par CHU (1978)

$$f(t) = K_e (1 + (N_s/F))$$

Avec :

f : taux d'infiltration en cm/h

K_e : la conductivité hydraulique effective en cm/h

t : temps en heure

N_s : le potentiel matriciel effectif en cm

F : la profondeur de l'infiltration cumulative en cm.

le potentiel matriciel effectif est donné par la formule suivante : $N_s = (\eta_e - \theta) \psi$.

Avec :

η_e : la porosité effective sur la couche superficielle du sol (%).

θ : la teneur en eau initiale sur les 20 premiers cm de sol ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

ψ : le potentiel moyen de capillarité (cm)

II.3.5 Le sous modèle de production et de transfert de sédiments

$$dG / dX = D_f + D_i$$

Où :

G : la charge de sédiment (Kg/s/m)

X : la distance en bas de pente (m)

D_f : valeur de l'érosion en rill (Kg/s/m)

D_i : arrivée de sédiments de l'inter rill (Kg/s/m)

a) La composante de détachement dans l'interrill et apports de sédiments en rill

Le détachement des particules de sol se produit lorsque l'effort de cisaillement hydraulique est supérieur à l'effort de cisaillement critique du sol et quand la charge en sédiment est inférieure à la capacité de transport de sédiment (NSERL, 1995).

La valeur de l'érosion en rill est donnée par la formule suivante :

$$D_f = D_c (1 - G / T_c)$$

Avec D_c : capacité de détachement (Kg/ s.m^2) ;

G : charge en sédiment (Kg)

T_c : la capacité de transport (Kg/ s.m)

b) La capacité de détachement

Elle est estimée par la formule suivante

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c)$$

K_r : le paramètre d'érodibilité en rill (s/m^2)

τ_f : la contrainte de flux hydraulique sur la particule du sol (Pa)

τ_c : la contrainte de cisaillement du sol (Pa).

L'érodibilité en rill des sols K_r caractérise la tendance des particules à se détacher par le flux d'eau. Elle est estimée en fonction des différents pourcentages des composantes du sol. L'érodibilité du sol en rill caractérise la capacité des particules des sols à se détacher.

Elle peut être estimée par (WEP user summary) :

Si le pourcentage du sable est supérieur ou égal à 30 %

$$K_r = 0.00197 + 0.03 v_{fs} + 0.03863 e^{(-1.84 \text{ ORGMAT})}$$

$$\text{Sinon } K_r = 0.0069 + 0.134 e^{-20 \text{ clay}}$$

Avec : ORGMAT : le pourcentage de matière organique dans le sol étudié.

Clay : pourcentage d'argile dans le sol.

v_{fs} : pourcentage de sable fin

c) Le débit de sédiment en provenance de l'interrill

Le débit de sédiment en provenance de l'inter rill est proportionnel aux produits de l'intensité de pluie I_p , au ruissellement s_{ir} et l'érodibilité en inter rill

$$D_i = K_i * I_p * s_{ir}$$

Avec :

D_i : l'apport de sédiments dans l'interrill ($Kg/s/m^2$)

K_i : l'érodibilité en inter rill

I_p : intensité de la pluie (m/s)

s_{ir} : le taux de ruissellement dans l'inter rill

L'érodibilité en inter rill est calculée en fonction de la texture, de la matière organique et de la capacité au champ. Elle est estimée par les formules suivantes :

$$K_i = 2728000 + 19210000 v_{fs} \text{ pour un pourcentage de sable supérieur ou égal à 30 \%}$$

Généralement v_{fs} est estimé à 0.4.

$$K_i = 6054000 - 551300 \text{ clay pour un pourcentage de sable inférieur à 30 \%}$$

d) La capacité de transport et du cisaillement

La capacité de transport est donnée par la formule suivante : $T_c = K_t * \tau^{(3/2)}$

Où K_t est un coefficient empirique.

La contrainte de cisaillement du flux d'eau est calculée en bas de pente, en supposant que la section des rill (rigole) est rectangulaire et de largeur introduite par l'utilisateur. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\tau = \gamma R \sin a * fs/ft$$

avec τ : contrainte de cisaillement

γ : densité massique de l'eau

R : rayon hydraulique

a : pente

fs : facteur de friction sol nu

ft : facteur de friction du sol couvert

III. Matériel et Méthode

III.1 Présentation du bassin versant de Roujan

III.1.1 Localisation

Le bassin versant de Roujan est un bassin versant agricole à dominante viticole. Il est situé dans le département de l'Hérault, en Languedoc-Roussillon dans la commune de Roujan à 40 km au Nord-Est de Béziers (43° 30' Nord, 3 ° 19 'Est). La superficie du bassin versant de Roujan est de 91 ha. Il appartient au versant de la vallée de la Peyne 117 ha.

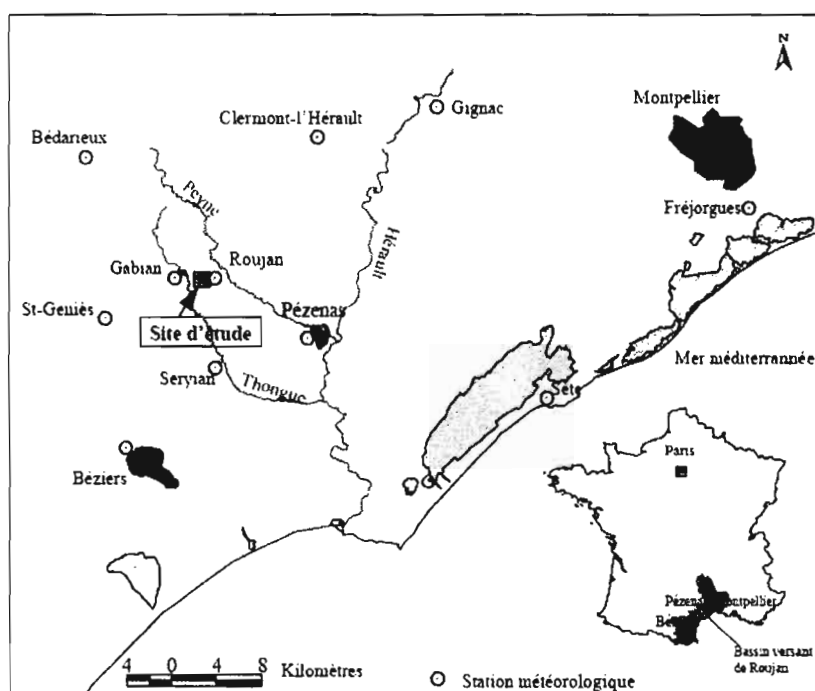


Fig.3 situation du bassin versant de Roujan

III.1.2 Caractéristique du bassin

a) Le climat

Le bassin versant est soumis à un climat méditerranéen sub-humide à saison sèche prolongée. La pluviométrie moyenne annuelle est de 700 à 800 mm. Le régime pluviométrique est caractérisé par une forte variabilité inter et intra annuelle. En effet, en 1996 la moyenne annuelle enregistrée est de l'ordre de 1600, elle est de 304 mm pour l'année 1998. Le régime pluvial est de type torrentiel à forte intensités réduit dans le temps, marqué par l'alternance de périodes pluviales et sèches prolongées. L'automne est la période de forte précipitation, accompagnée par une perturbation atmosphérique à grande échelle. Les masses d'air chaud situées à haute altitude rencontrent des masses d'air froid venant des zones polaires. La rencontre des deux climats fortement contrastés thermiquement engendre des grandes zones dépressionnaires à l'origine des cellules orageuses. Les pluies moyennes mensuelles sont énumérées dans le tableau suivant :

Année	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Jui.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annuel
P(moy)	81	55	31	50	53	35	23	50	91	112	117	90	788
σ	118	72	35	25	44	29	23	35	60	77	109	93	353

Tab.5 Pluviométrie mensuelle et annuelle mesurées de 1993 à 2003 (Olivier Hebrard, 2004)

b) L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration est la somme de la transpiration du couvert végétal et de l'évaporation du sol nu, lorsque la disponibilité en eau n'est pas limitante, et si l'on suppose qu'aucune résistance ne s'oppose aux transferts d'eau, ce flux tend vers une valeur dite potentielle.

Dans la région du bassin versant de Roujan l'évapotranspiration dépasse les 1000 mm avec un maximum en juillet et un minimum en décembre. L'évapotranspiration potentielle journalière varie de 0 à 7.5 mm et pourra dépasser une valeur de 8 mm exceptionnellement. Les valeurs de l'évapotranspiration mensuelles sont énumérées dans le tableau suivant :

Année	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai.	Jun.	Jui.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annuel
ETP (moy)	22	37	76	93	127	163	178	144	88	49	25	15	1017
σ	9	8	10	20	14	22	20	18	10	7	5	5	82

Tab.6 Evapotranspiration potentielle mensuelle et annuelle de 1993 à 2003 (Olivier Hebrard, 2004)

c) La géologie

Les caractéristiques géologiques du bassin sont dues à une forte transgression marine au Miocène moyen. Elle a été provoquée par l'effondrement de la chaîne méditerranéenne. Avant la fin du Miocène, la mer s'est retirée progressivement laissant la place à la géomorphologie actuelle formée au cours du Pliocène et du Quaternaire.

Au cours du Miocène les faciès observés varient entre les marnes finement gréseuses jusqu'à des bancs gréseux avec présence de bancs de calcaire isolés, variablement répartis dans l'espace. Ensuite des petites formations géologiques de cailloutis du Villafranchien de 1,5 m de longueur ont été observées. Des formations récentes ont apparues à la surface des bassins masquant la plupart des niveaux géologiques situés en dessous de la cote de 100 m.

d) La géomorphologie

Le bassin versant est formé par quatre unités géomorphologiques (Chahinian 2004):

- Le plateau qui culmine à 125 m et recouvre 27% de la superficie du bassin versant ;
- Les terrassettes qui couvrent 33 % de la superficie du bassin versant et qui se distinguent par leur forte pente (10 à 25 %) ;
- Les glacis qui présentent une pente plus douce (2-7 %) et couvrent 26 % de la superficie totale ;
- La dépression, située à 75 m d'altitude, présente une forme évasée, à faible pente (supérieure à 2 %) et recouvre 24 % de la superficie.

Les sols du bassin se sont développés sur des sédiments d'origine marine, lacustre et fluviale. Des prospections géologiques ont mis en évidence la présence d'une nappe souterraine libre. Celle-ci interagit avec les eaux de surface dans le bassin versant par l'intermédiaire du réseau de fossés selon un mécanisme relativement complexe dans le temps et dans l'espace (Marofi, 1999).

e) Les caractéristiques pédologiques

Sur le bassin versant de Roujan quatre ensembles géomorphologiques sont observés (FAO-UNESCO 1989, Soil map of the world at 1 : 5, 000,000, 2^{eme} édition. Food and agriculture organisation, Rome):

1. les sols du plateau : bien distingués par leurs positions topographiques, ils constituent une entité bien définie. Elle est divisée en deux types de sol :
 - les sols caillouteux de couleur rouge, à dominante carbonée mais pouvant être localement acides (nitosols, FAO, 1989) ;
 - les sols bruns calcaires (calcaire leptosol, 1989)
2. les sols des versants aménagés en terrassettes : il s'agit des sols calcaires, pauvres en matière organique (calcaric leptosol, FAO, 1989) ;
3. les sols du glacis et de la dépression centrale : ce sont des sols calcaires, aux profils faiblement différenciés, à texture limoneuse (Colluviosol calcaire, FAO, 1989) ;
4. les sols et les dépressions centrales : ce sont des sols calcaires, de texture moyenne à fine. Ces sols sont largement dominés par l'hydromorphie (gleyic cambisol, FAO, 1989) en raison de la présence des d'une nappe permanente fluctuante et d'une topographie assez plane.

f) Occupation du sol

Le bassin versant de Roujan a été fortement soumis aux différentes interventions de l'Homme pour les besoins de l'agriculture. La superficie totale du bassin de 91 ha est divisée en 237 parcelles cadastrales dont 154 sont cultivées. Ces parcelles cultivées ont des dimensions variables à majorité de petite superficie, ayant des formes assez irrégulières. Sur ces parcelles, différentes pratiques culturales existent, la plus importante est la vigne. On trouve aussi les friches et la garrigue, les céréales ainsi que d'autres pratiques culturales de moindre importance. Une étude effectuée au laboratoire des sciences des sols en juillet 1993 (Andrieux et al., 1993), indique que le pourcentage de vigne avoisine les 74 % soit 67.4 hectares. Ce pourcentage est atteint suite à la politique agricole conduite par l'Union Européenne. Cette politique impose une évolution des pratiques agricoles par le choix de nobles cépages nouvellement implantés et une forte croissance des pratiques d'arrachage des vignes sur les territoires les plus défavorables. Elle vise à augmenter la qualité du vin et la diminution des volumes produits.

Des contraintes sociales comme le vieillissement de la population et le manque de main d'œuvre ont également contribué à la modification des pratiques agricoles.

Deux types de pratiques agricoles peuvent être observés sur les parcelles de vigne en fonction de la technique de désherbage des inter-rangs :

- un désherbage mécanique par labour superficiel. Ces parcelles sont appelées parcelles travaillées ;
- un désherbage chimique par application d'herbicides. Ces parcelles sont appelées non labourées.

Ces pratiques de labour sur la parcelle travaillée peuvent changer d'une année sur l'autre et sont variables dans l'espace. Ainsi, il est possible d'observer des parcelles qui alternent des rangs labourés à des fréquences variant entre 1 sur 2 et 1 sur 9.

Nous allons nous intéresser à la modélisation de l'érosion sur deux parcelles de vigne du bassin de Roujan. Ces deux parcelles constituent la base expérimentale de cette étude. Cette modélisation évalue la quantité de terre érodée et transportée en fonction des caractéristiques de chaque parcelle. Pour cela on doit paramétrer ou estimer les différentes caractéristiques de chaque parcelle pour appliquer le modèle WEPP. Une étude comparative aura ensuite lieu pour voir les différents comportements érosifs de chaque parcelle en fonction de l'intensité, du cumul de pluie correspondant à l'événement pluvieux et de la différence des pratiques culturales et notamment en ce qui concerne l'entretien du sol.

g) Présentation des parcelles d'études

- **La parcelle non travaillée AW 6**

Cette parcelle de superficie 1200 m² située au Nord Est de l'exutoire du bassin versant. Elle appartient à une zone géomorphologique de terrassettes. La pente varie de 6 à 19 %. Le sol est limono sableux, de texture homogène caractérisé par une croûte de surface présente toute l'année. Cette parcelle est difficile d'accès par les appareils de labour mécanique. Un désherbage chimique intégral est alors mis en œuvre chaque printemps. La couche superficielle du sol présente des rigoles peu profondes suivant l'axe de l'inter rang.

- **La parcelle travaillée AW 54**

Cette parcelle est située au Sud Ouest de l'exutoire du bassin versant de Roujan. La superficie est plus étendue, de l'ordre de 3240 m². Elle présente de faibles pentes variant entre 2 et 10 %. Le sol est limono sableux, de texture hétérogène. Cette parcelle est labourée mécaniquement pour éliminer les herbes et les adventices situées dans l'inter rang, chaque fois qu'ils atteignent un certain niveau de croissance ou une certaine hauteur. On peut donc opter pour l'hypothèse que le sol est nu dans l'inter rang. Généralement le labour est effectué deux à trois fois par an en fonction de l'humidité du sol et la quantité d'adventice à éliminer. Des particules fines du sol sont décapées à l'amont et se déposent à l'aval.

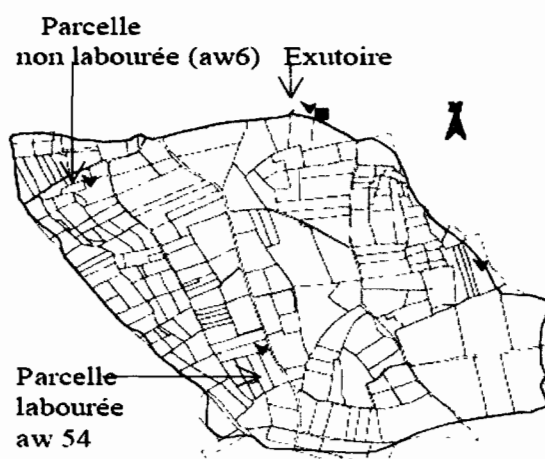


Fig.3 Parcellaire et position des deux parcelles expérimentales AW6 et AW 54 (Dispositifs pour l'étude du comportement des pesticides dans l'environnement .INRA Montpellier 2001).

Voici un tableau récapitulatif des différents paramètres pour chaque parcelle d'étude.

Paramètres	Parcelle AW 54 (T)	Parcelle AW 6 (NT)
Superficie (ha)	0,324	0,12
Orientation	NS	EW
Pente (%)	2-10	6-19
Longueur de pente (m)	108	60
Sol (Texture)	Limono sableux	Limono sableux
Argile < 2 μ m (%)	22	18,6
Limon 2-50 μ m (%)	48,5	55,4
Sable > 50 μ m (%)	29,5	26
Cépage	cinsault	aramon
Conduite	palissée (1,2 m)	gobelet
Travail et conduite	oui	non
Désherbage chimique	rang uniquement	total
Vendange	mécanique	manuelle

Tab.7 Tableau comparatif des deux parcelles du bassin versant de Roujan (Coulouma, 1998).

h) Dispositifs et mesures sur les deux parcelles d'étude

Les deux parcelles sont équipées d'un dispositif de mesure in situ formé par un pluviographe et une centrale d'acquisition des données. La pluviométrie est mesurée sur chacune des parcelles à l'aide d'un pluviographe à augets basculeurs de 0,5 mm. Elles sont isolées hydrologiquement par des fossés et des séparateurs d'écoulement en fibre de verre. Le ruissellement est ensuite reconduit vers un canal jaugeur de type venturi, permettant le calcul des différents débits à partir d'une hauteur d'eau mesurée dans le canal. Pour enregistrer les hauteurs d'eau, des capteurs sont actuellement associés à des nilomètres. Pour mesurer la quantité de matières en suspension dans l'écoulement des préleveurs d'échantillons automatiques (SIGMA 800 ; 24 échantillons de 330 ml) ont été installés . Ces préleveurs se

déclenchent automatiquement à chaque événement pluvieux pour échantillonner et prélever durant les crues.

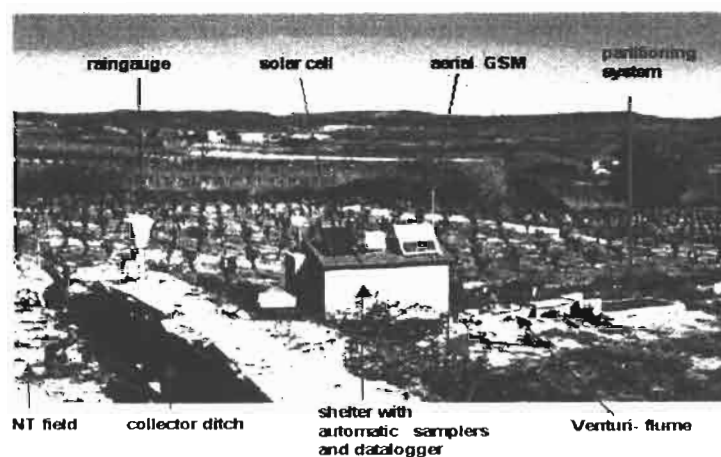


Fig6. Dispositifs de mesure et de prélèvements de sédiments à l'échelle de la parcelle (Coulouma 1998).

III.2 Paramétrisation du modèle

Le modèle WEPP est un modèle à base physique. Il est formé par des équations empiriques qui simule chaque composante du milieu. L'analyse de sensibilité nous donnent les paramètres qui influent le plus sur les résultats du modèle. Pour que le modèle arrive à différencier les deux parcelles on a utilisé une paramétrisation différente pour chacune d'elle. Pour les simulations 22 événements ont été présélectionnés et on a effectué les tests de simulation sur 20 d'entre eux.

III.2.1 Le climat

Pour générer le climat j'ai utilisé un modèle stochastique (Break Point) qui peut simuler le climat correspondant à chaque événement. Pour chaque averse on doit présenter l'éthéogramme correspondant. Il ne doit pas comprendre plus de 50 pas de temps sinon il n'effectue pas de simulation.

III.2.2. Le sol

a) Les paramètres du sol

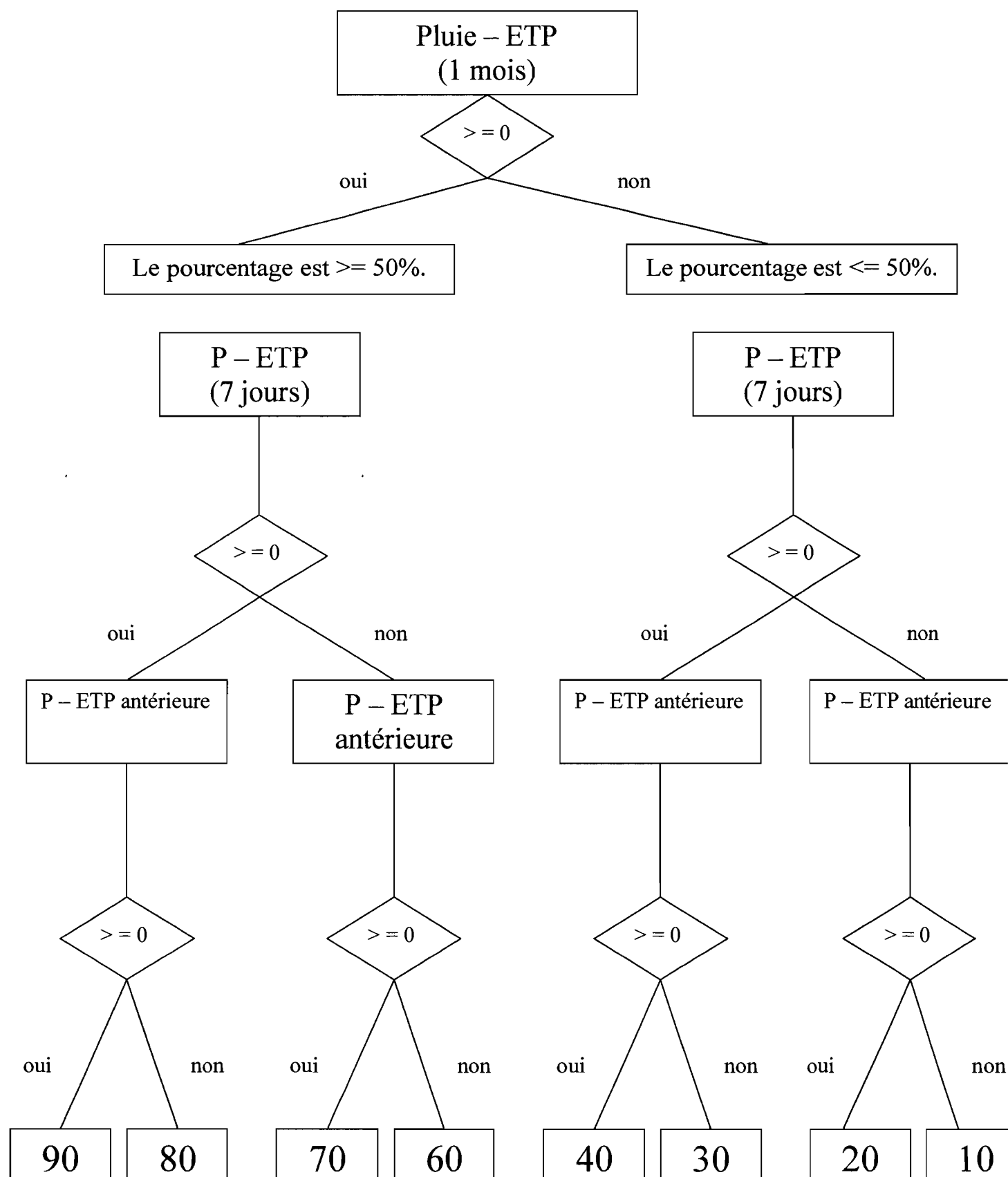
Les deux parcelles AW6 (T) et AW 54 (NT) ont des caractéristiques différentes :

AW 6	AW 54
Les paramètres de l'érodibilité du sol $K_i = 4,577 \cdot 10^6 \text{ kg s/m}^4$ $K_r = 0,0075 \text{ s/m}$ $T_c = 3,5 \text{ Pa}$ $K_{\text{eff}} = 7,8 \text{ mm/h}$	Les paramètres de l'érodibilité du sol $K_i = 5,37 \cdot 10^6 \text{ kg s/m}^4$ $K_r = 0,014 \text{ s/m}$ $T_c = 4,05 \text{ Pa}$ K_{eff} varie d'un événement à l'autre en fonction de la pluie cumulée depuis le dernier labour. Selon les travaux de Andrieux (1995) on estime qu'elle varie suivant la fonction suivante : $K = 180,69 P^{-0,6113} \text{ (mm/h)}$
La rugosité initiale après le dernier labour est fixée à 1 cm. Elle est supposée constante car il n'y a de travail du sol.	la rugosité initiale suit une loi décroissante de la même forme. Elle dépend de la pluie cumulée depuis le dernier labour.
Le pourcentage de saturation de sol varie d'un événement à l'autre en fonction de la quantité de pluie cumulée depuis le dernier labour.	Le pourcentage de saturation de sol varie d'un événement à l'autre en fonction de la quantité de pluie cumulée depuis le dernier labour.

Tab.8 Paramètres caractéristiques de sol nécessaires pour le modèle WEPP.

Le calcul des paramètres d'érodibilité du sol est effectué à partir des composantes du sol (pourcentage d'argile, de sable, de limon et de roches).

b) Estimation du pourcentage de saturation initial



Méthode de calcul du pourcentage de saturation initiale du sol

III.2.3 Coefficient de rugosité :

Ce paramètre est le coefficient de rugosité initiale depuis le dernier labour. Il suit une loi décroissante identique à celle du coefficient de conductivité hydraulique effective. Il dépend de la pluie cumulée depuis le dernier labour. Les valeurs de rugosités sur la parcelle travaillée sont données par le tableau suivant :

Pluie cumulée depuis le dernier labour (mm)	0-50	50-100	100-200	200-300	300-400
Rugosité (cm)	5	4	3	2	1

Tab.9 Rugosité initiale depuis le dernier labour en fonction des cumuls de pluie.

Pour la parcelle non travaillée la rugosité initiale est constante pour tout les événements car il n'y a du travail du sol.

III.2.4 La topographie

Dans ce module on introduit les caractéristiques des deux parcelles d'étude :

	Parcelle AW 6 (NT)	Parcelle AW 54 (T)
Surface (m ²)	1200	3240
L*I (m)	60*20	108*30
Dénivelé (m)	7,2	8
Pente (amont milieu aval) (%)	16-10-7	10-8-2

Tab.10 Topographie des deux parcelles d'études sur le bassin versant de Roujan (Andrieux.P et al.1998)

III.2.5 La gestion du sol et les pratiques culturales

Dans le cadre d'une simulation à l'échelle de l'événement on devra définir les conditions initiales de chaque événement. Il faudra alors introduire plusieurs données :

1. le pourcentage de couverture végétale dans l'inter rang
2. la rugosité initiale depuis le dernier labour

Le cycle de croissance de la vigne passe par quatre étapes :

1. du mois de novembre jusqu'au mois de février c'est le stade de repos végétatif. Au cours de cette période on considère que le pourcentage de couverture végétale est nul.
2. du mois de mars jusqu'au mois d'avril, c'est la période de débourrement marquée par l'apparition des bourgerons
3. du mois de mai jusqu'au mois de juillet, c'est la période d'apparition des fleurs et la nouaison
4. du mois d'août jusqu'au mois de septembre c'est la période de maturation des raisins et elle se termine à la récolte finale.

La densité de surface foliaire peut être considérée constante sur toute la période végétative. Il est donc nécessaire de déterminer le rayon de gobelets des vignes au cours de la période de floraison et de maturation.

Dans la littérature, on peut se baser sur les travaux effectués par 'HEBRARD. O'2004. Pour déterminer le rayon maximal des gobelets sur l'ensemble des parcelles de vigne. Il a utilisé un modèle de végétation (Riou, et al.1987) qui corrèle la croissance de la vigne et la température de l'air. Les rayons de gobelets qui ont été relevés sur l'ensemble des parcelles de vigne en gobelets du bassin versant en juillet 2002 sont compris entre 0,4 et 0,75 m, pour une moyenne de 0,57 plus ou moins 0,04 m.

Ces résultats seront utilisés pour les simulations sur les années 95, 97,98 et 99. Le cycle de croissance annuel de la vigne est supposé identique.

En conclusion, le pourcentage de couverture de végétation, sur la parcelle non travaillée AW 6, varie suivant les stades suivants :

- sur la période du mois de novembre jusqu'au mois de février il est faible 5 %;
- du mois de mars jusqu'au mois d'avril, le pourcentage de couverture est égal à 25 % ;
- du mois de mai jusqu'au mois de juillet, le pourcentage de couverture est égal à 55% ;
- du mois d'août jusqu'au mois de septembre, le pourcentage de couverture est égal à 35

Pour la parcelle AW 54 (travaillée), le pourcentage varie suivant les stades suivants :

- sur la période du mois de novembre jusqu'au mois de février il est faible 5 %;
- du mois de mars jusqu'au mois d'avril, le pourcentage de couverture est égal à 15 % ;
- du mois de mai jusqu'au mois de juillet, le pourcentage de couverture est égal à 35% ;
- du mois d'août jusqu'au mois de septembre, le pourcentage de couverture est égal à 25 %.

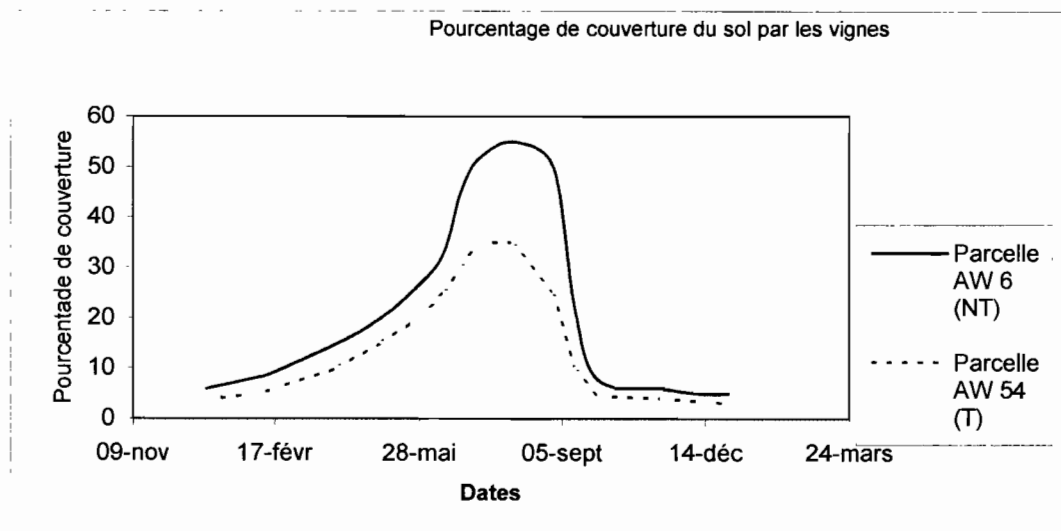


Fig.4 Pourcentage de couverture végétale des parcelles de vignes

III.2.6 Résultats du modèle WEPP

Les résultats du modèle WEPP sont :

1. la lame d'eau ruisselée (mm) ;
2. la quantité de sol érodée (Kg/m^2) ;
3. la quantité de sédiments sortant de la parcelle (t/ha).

Le modèle WEPP fournit en plus un rapport complet sur les différentes opérations calculées au cours de la simulation à différents pas de temps. On peut aussi visualiser les résultats sous forme de graphe ou de tableau (courbes d'évolution temporelle des différents paramètres).

La plupart des paramètres du modèle WEPP ont été estimés en se référant à des études réalisées à l'UMR LISAH. L'estimation des paramètres d'entrée augmente le pourcentage d'erreur dans les résultats calculés par WEPP. Il est alors nécessaire d'effectuer une analyse de sensibilité du modèle pour distinguer les paramètres les plus influant sur les résultats qu'il estime.

III.2.7 Mesure du ruissellement et de l'érosion sur la parcelle d'étude

Pour chaque événement pluvieux, on dispose des données de débit sur chaque parcelle. Les prélèvements d'eau sont effectués après une impulsion électrique de la centrale de pilotage. On considère l'instant d'impulsion comme instant de prélèvement sachant que le prélèvement dure une minute au maximum. A chaque prélèvement, on connaît la concentration en MES. C'est elle qui nous permet d'estimer les transports solides au cours de la crue. Le débit est connu au pas de temps de la minute. Un exemple de données est illustré par la figure suivante (crue du 05/06/97).

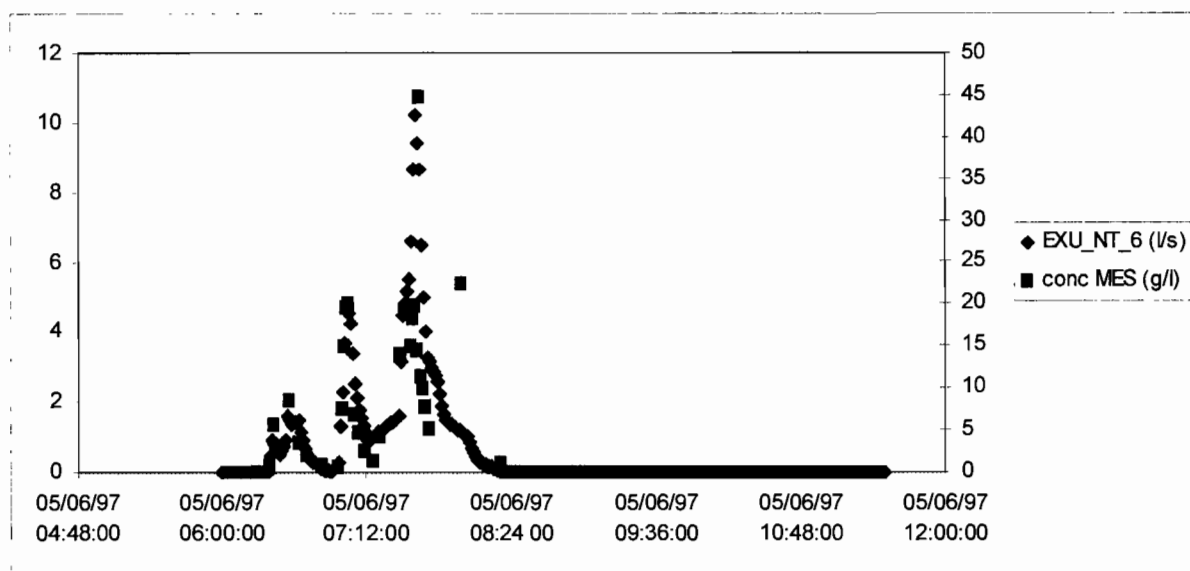


Fig.5 Exemple de calcul des pertes en terre pour l'événement du 05/06/97 (NT).

III.2.8 Analyse de sensibilité du modèle

Une analyse de sensibilité d'un modèle permet de distinguer les paramètres les plus importants et leurs influences respectives sur les résultats du modèle. Cette étude permet d'évaluer l'effet de chaque paramètre sur le résultat de la simulation.

L'analyse de sensibilité évalue aussi la rationalité du modèle, la validité des paramètres et fournit un aperçu du système physique simulé. Une étude sensibilité du modèle aux différents paramètres a été réalisée par M.A. Nearing and J.M. Laflen ;1990.

Cette étude évalue les variations de la prédiction d'érosion et la re-déposition de sédiments en fonction des variations des paramètres d'entrée sol, plantes (résidu ou couvert) topographie du terrain et données hydrologiques. Les auteurs de cette étude ont développé une formule du coefficient de sensibilité S.

$$S = [(O2- O1)/ O12] / [(I2-I1)/I12]$$

Avec:

I: paramètre d'entrée

O: résultat de sortie du modèle

Il ressort de cette analyse de classement des différents paramètres testés selon leur importance :

Les facteurs dominants :

Les intensités de précipitations

L'érodibilité des griffes

Les paramètres moyennement sensibles :

La conductivité hydraulique à saturation

L'érodibilité entre les griffes d'érosion

Les facteurs moins importants :

La hauteur du couvert

La couverture entre griffe

La densité apparente du sol

La largeur des griffes et espacement

L'humidité initiale

La répartition des sédiments

La sensibilité d'un paramètre dépend des conditions dans lesquels les tests ont été effectués, ainsi que la nature et les caractéristiques de la zone.

IV. Résultats et discussion

IV.1 Estimation globale du fonctionnement du modèle

IV.1.1 Le ruissellement :

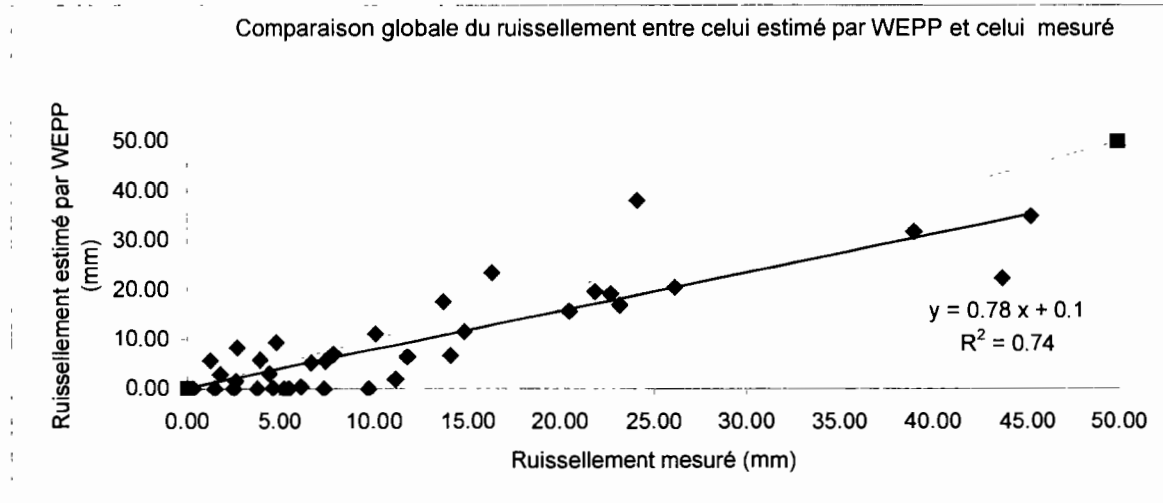


Fig.6 Comparaison globale entre les valeurs de ruissellement estimé par WEPP et mesuré.(2 parcelles confondues 44 événements)

Ce graphique donne une idée globale sur l'estimation du ruissellement sur les deux parcelles. On remarque que le coefficient de corrélation est significatif et permet d'apercevoir une bonne simulation par le modèle WEPP sans aucun calage des paramètres pour le ruissellement.

IV.1.2 Estimation de l'érosion

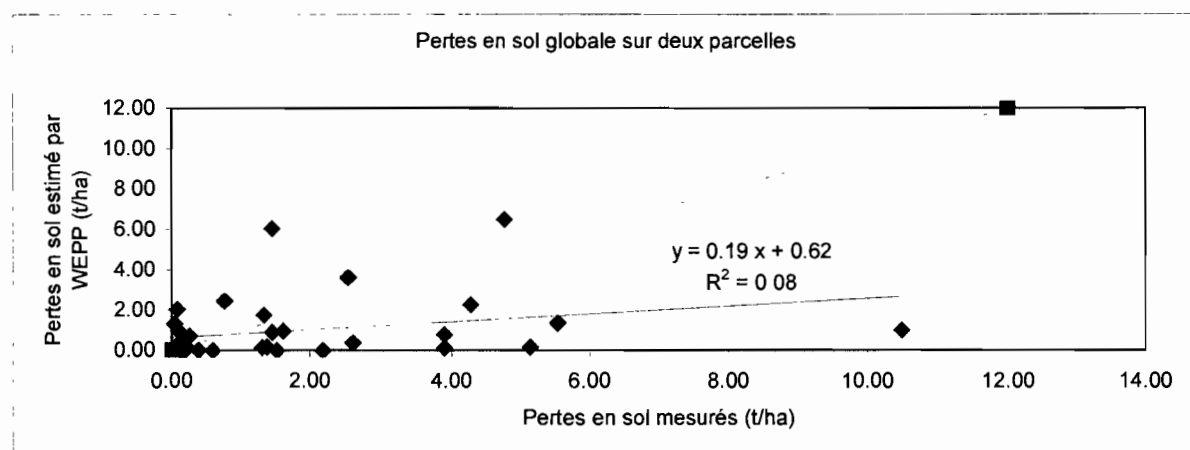


Fig. 7 Pertes en sol estimé par le modèle WEPP en fonction Pertes en sol mesuré

Le graphique suivant indique un coefficient de détermination trop faible. On conclut donc que le modèle prédit mal l'érosion hydrique sur l'ensemble des deux parcelles d'études.

Pour évaluer mieux l'effet des pratiques culturales sur chaque événement on dresse les caractéristiques de chaque événements. Le tableau suivant donne la date, l'heure le cumul de pluie ainsi que la durée de l'averse.

Date début	Date fin	Pluie sur AW6 NT (mm)	Pluie sur AW 54 T (mm)	Durée (min)
13/10/1995 13:00	13/10/1995 17:00	41	44	240
08/12/1995 16:00	09/12/1995 00:42	25	25	525
05/05/1997 16:30	05/05/1997 16:30	11,5	14	150
01/06/1997 14:50	01/06/1997 20:00	37,5	37,5	310
05/06/1997 06:00	05/06/1997 11:30	24	25	330
11/08/1997 03:00	11/08/1997 07:45	36,5	40,5	285
01/09/1997 21:30	02/09/1997 01:00	37	37	210
07/10/1997 13:45	07/10/1997 16:00	8	4,5	135
03/11/1997 20:00	04/11/1997 05:45	67	66,5	585
20/11/1997 12:00	20/11/1997 15:00	4	4	180
24/11/1997 09:00	24/11/1997 15:00	9,5	9,5	240
25/11/1997 09:00	25/11/1997 15:00	9	10	285
26/11/1997 07:00	26/11/1997 22:15	62	65,5	915
16/12/1998 03:00	16/12/1998 03:30	50,5	49,5	1435
29/04/1998 18:15	29/04/1998 21:30	16	16	195
02/05/1998 12:30	02/05/1998 16:00	9,5	9,5	210
07/09/1998 13:00	07/09/1998 17:30	38	60,5	270
26/04/1998 02:00	26/04/1998 06:30	12	16,5	270
03/05/1999 05:15	03/05/1999 16:00	96	118	645
17/05/1999 05:00	17/05/1999 14:30	37,5	50	570
02/08/1999 19:45	03/08/1999 00:00	19,5	28	225
06/08/1999 17:30	06/08/1999 21:30	64	84	125

Tab.11 Caractéristiques des pluies érosives sur les deux parcelles du bassin versant de Roujan

Voici un tableau qui récapitule les valeurs de ruissellement et pertes en terre mesuré et estimés par le modèle WEPP.

	Ruissellement total (mm)		Perte en sol totale (t/ha)	
	WEPP	Mesure	WEPP	Mesure
Parcelle AW 6 (NT)	222	325	19	49
Parcelle AW 54 (T)	132	125.8	16.56	9.89

Tab.12 Comparaison entre les valeurs mesurés et prédites pour les deux parcelles d'étude.

IV.2. Parcelle non travaillée AW 6

Voici un tableau récapitulatif des résultats et mesures sur la parcelle non travaillée

	Date	Ruissellement (mm)		Pertes en sol (t/ha)	
		Estimé	Mesuré	Perte en sol (t/ha)	Perte en sol (t/ha)
1	13/10/1995	15,72	20,49	0,911	1,45
2	08/12/1995	7	7,93	0,413	0,15
3	05/05/1997	0	5,53	0	1,52
4	01/06/1997	11,56	14,82	0,148	1,3
5	05/06/1997	11,15	10,13	0,168	1,37
6	11/08/1997	17,67	13,67	0,791	3,9
7	01/09/1997	16,97	23,16	6,5	4,78
8	07/10/1997	0	2,48	0	0,58
9	03/11/1997	31,81	39,02	3,616	2,54
10	20/11/1997	0	1,46	0	0,08
11	24/11/1997	--	--	--	--
12	25/11/1997	0,11	4,65	0,007	0,12
13	26/11/1997	--	--	--	--
14	16/12/1997	6,76	14,05	0,174	0,21
15	29/04/1998	6,52	11,75	1,364	5,55
16	02/05/1998	0	7,42	0	2,19
17	07/09/1998	19,66	21,85	2,295	4,28
18	26/04/1999	0,36	6,19	0,01	0,38
19	03/05/1999	22,47	43,67	0,975	1,61
20	17/05/1999	19,19	22,68	0,381	2,61
21	02/08/1999	0,01	9,75	0,135	3,9
22	06/08/1999	35	45,22	1	10,5

Tab.13. tableau comparatif entre les valeurs mesurées et prédites sur la parcelle non travaillée

IV.2.1 Ruissellement sur la parcelle non travaillée

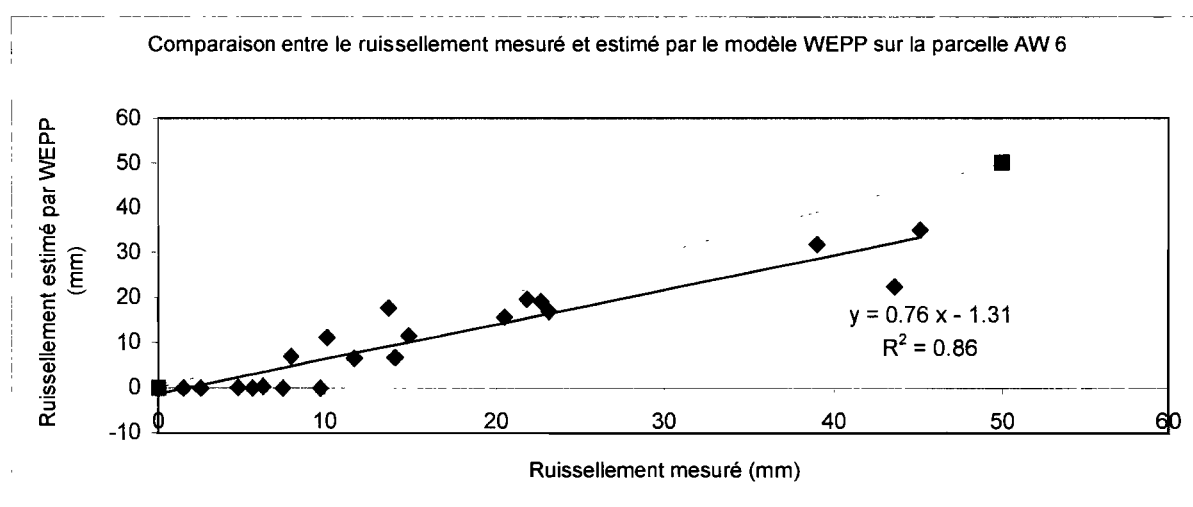


Fig.8 Comparaison entre le ruissellement mesuré et estimé par le modèle WEPP sur la parcelle non travaillée

Le ruissellement est globalement bien simulé par le modèle WEPP sur la parcelle AW 6. Le coefficient de corrélation ($R^2=0.86$) pour un échantillon de 22 événements est significatif pour conclure sur la bonne prédiction du ruissellement par le modèle WEPP.

Globalement un léger biais sous-estime le ruissellement sur cette parcelle. La dispersion des points est faible. On remarque que le modèle WEPP ne génère pas un ruissellement pour certains événements. Le pourcentage de saturation initiale influe sur la production de ruissellement. On va alors analyser différentes réponses du modèle pour différentes valeurs de pourcentage de saturation initiale du sol.

Par exemple l'événement du 25/11/97 a un fort pourcentage de saturation initiale mais le modèle ne prévoit pas de ruissellement. Le modèle WEPP fonctionne suivant un effet de seuil. En effet il ne produit pas de ruissellement pour une quantité de pluie inférieure à 15 mm.

IV.2.2 Pertes en terre sur la parcelle non travaillée

Sur le graphique suivant on observe un coefficient de détermination est trop faible qui indique une mauvaise prédiction de l'érosion sur la parcelle non travaillée.

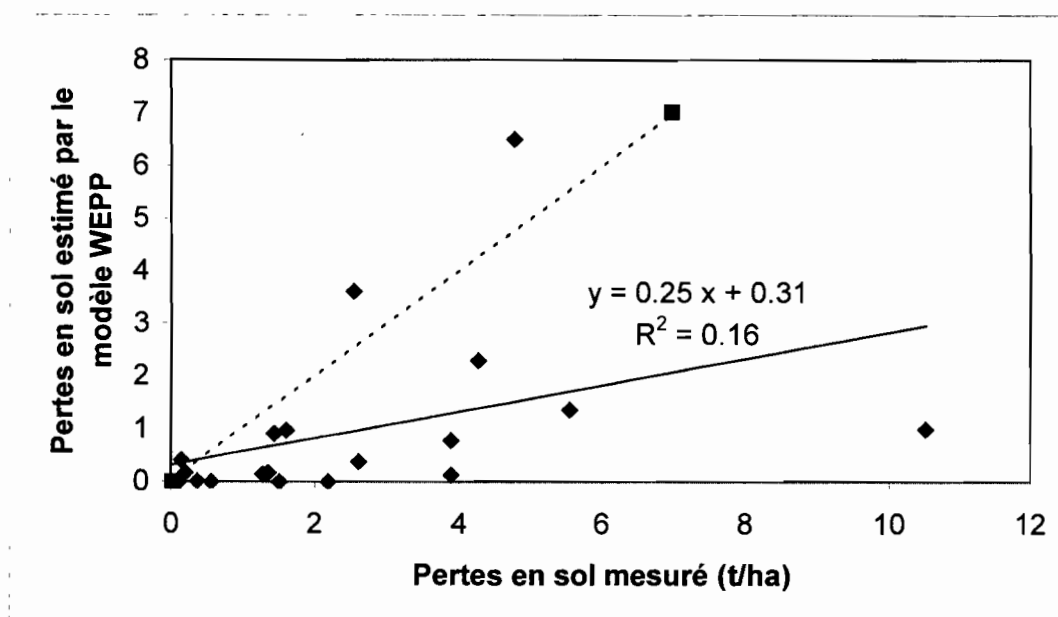


Fig.9 Comparaison entre les pertes en sol mesurées et estimées par le modèle WEPP sur la parcelle non travaillée

IV.3. Parcelle travaillée AW 54

Dans le tableau suivant on dresse les résultats mesurés et estimés par le modèle WEPP sur la parcelle travaillée AW 54.

Date	Résultats du modèle WEPP		Mesures sur la parcelle	
	Ruissellement estimé par WEPP (mm)	Ruissellement mesuré (mm)	Perte en sol estimée par WEPP (t/ha)	Perte en sol mesurée (t/ha)
13/10/1995	20.51	26.17	6.024	1.45
08/12/1995	5.82	3.93	0.132	0.06
05/05/1997	0	2.88	0	0.14
01/06/1997	3.08	4.45	0.19	0.05
05/06/1997	9.44	4.8	0.412	0.12
11/08/1997	8.39	2.65	0.737	0.25
01/09/1997	1.96	11.15	2.471	0.75
07/10/1997	0	0.13	0	0
03/11/1997	23.54	16.37	2.059	0.08
20/11/1997	0	0.31	0	0
24/11/1997	0	5.26	0	0
25/11/1997	0	0	0	0
26/11/1997	0	0	0	0
16/12/1997	1.56	2.58	0.227	0.13
29/04/1998	0	3.78	0	0.18
02/05/1998	0	0	0	0
07/09/1998	0	0	0	0
26/04/1999	2.93	1.75	0.148	0.04
03/05/1999	5.56	7.5	1.325	0.04
17/05/1999	5.27	6.73	1.747	1.32
02/08/1999	5.75	1.24	0.914	0.12
06/08/1999	38.21	24.11	0.175	5.16

Tab.14. tableau comparatif entre les valeurs mesurées et prédites sur la parcelle non travaillée.

Pour la parcelle travaillée AW 54 certains paramètres du modèle WEPP varient différemment. En premier lieu la conductivité hydraulique effective correspondante à chaque événement. Ce paramètre varie en fonction de différence de pluie et l'ETP sur certains périodes de temps choisis. Le deuxième paramètre est la rugosité initiale qui varie en fonction du cumul de pluie et le nombre de jours depuis le dernier labour. Les résultats de cette parcelle nous permettent d'évaluer l'impact des différents itinéraires culturaux sur la production du ruissellement et de pertes en sol.

Le tableau suivant donne les valeurs de conductivité hydraulique effective et de rugosité initiale correspondant à chaque événement.

N°	Date début	Date fin	K _e (mm/h)	Rugosité (cm)
1	13/10/1995 13:00	13/10/1995 17:00	7,5	4
2	08/12/1995 16:00	09/12/1995 00:42	12,4	5
3	05/05/1997 16:30	05/05/1997 16:30	3,3	0,5
4	01/06/1997 14:50	01/06/1997 20:00	35	5
5	05/06/1997 06:00	05/06/1997 11:30	14,2	4
6	11/08/1997 03:00	11/08/1997 07:45	18,5	4
7	01/09/1997 21:30	02/09/1997 01:00	10,8	4
8	07/10/1997 13:45	07/10/1997 16:00	8,9	2
9	03/11/1997 20:00	04/11/1997 05:45	28,9	2
10	20/11/1997 12:00	20/11/1997 15:00	6,9	2
11	24/11/1997 09:00	24/11/1997 15:00	6,7	2
12	25/11/1997 09:00	25/11/1997 15:00	4,2	2
13	26/11/1997 07:00	26/11/1997 22:15	4,2	2
14	16/12/1998 03:00	16/12/1998 03:30	3,8	2
15	29/04/1998 18:15	29/04/1998 21:30	3,2	0,5
16	02/05/1998 12:30	02/05/1998 16:00	3,1	0,5
17	07/09/1998 13:00	07/09/1998 17:30	16,9	4
18	26/04/1998 02:00	26/04/1998 06:30	24,2	4
19	03/05/1999 05:15	03/05/1999 16:00	35	5
20	17/05/1999 05:00	17/05/1999 14:30	9,8	3
21	02/08/1999 19:45	03/08/1999 00:00	25,2	5
22	06/08/1999 17:30	06/08/1999 21:30	15,5	5

Tab.15 Valeurs de la conductivité hydraulique effective et la rugosité initiale depuis le dernier labour sur la parcelle travaillée.

IV.3.1 Le ruissellement

Le graphique suivant indique une bonne corrélation entre les valeurs estimées par le modèle WEPP et celles mesurées expérimentalement à la parcelle. Le coefficient de détermination est important mais plus faible que celui de la parcelle non travaillée. Un léger biais surestime le ruissellement estimé. La dispersion des points est plus faible que celle de la parcelle non travaillée. Cette bonne estimation du ruissellement indique que la paramétrisation différenciée des deux parcelles est efficace et met en valeur la distinction des différents itinéraires culturaux des deux parcelles d'études par le modèle WEPP.

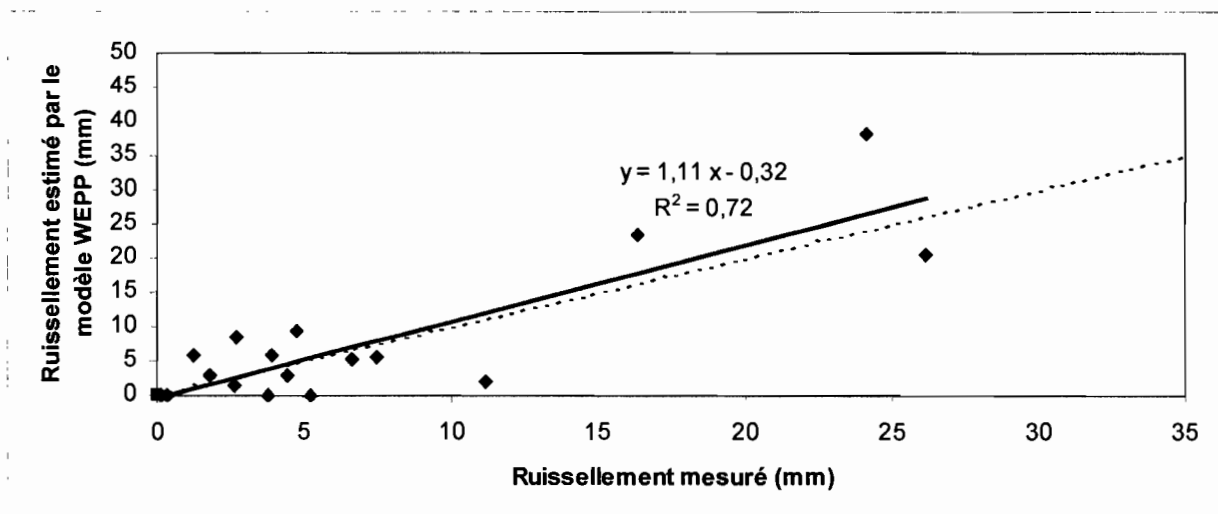


Fig.10 Comparaison entre le ruissellement mesuré et estimé par le modèle WEPP sur la parcelle travaillée

IV.3.2 Pertes en sol

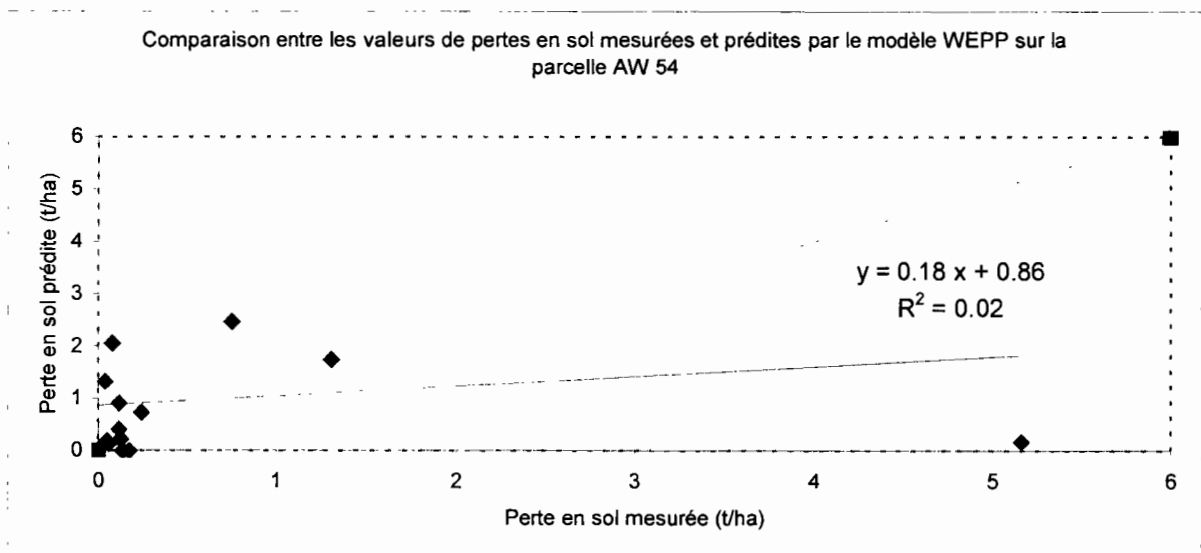


Fig.11 Comparaison entre les pertes en sol mesurées et estimées par le modèle WEPP sur la parcelle travaillée

Ce graphique indique un coefficient de détermination trop faible donc la prédiction de l'érosion hydrique par le modèle WEPP est erronée.

IV.4. Comparaison entre les deux parcelles d'étude

IV.4.1 Comparaison entre les valeurs de ruissellements mesurés

Pour observer les différentes mesures sur les deux parcelles on a dressé l'histogramme suivant. Il compare les valeurs de ruissellements mesurées sur les deux parcelles d'étude.

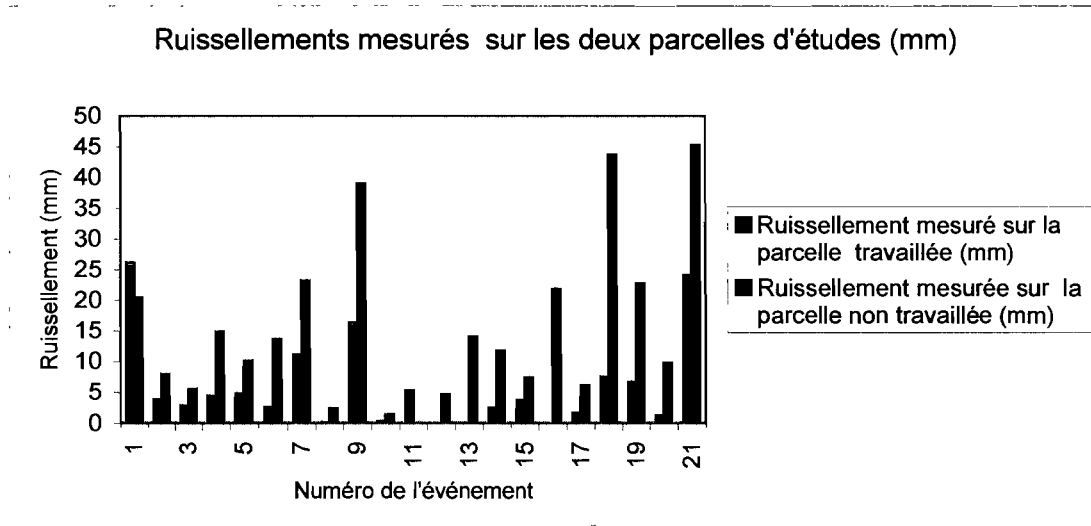


Fig.12 Comparaison entre les ruissellements mesurées sur les deux parcelles d'étude (sur l'échantillon de 20 événements sélectionnées).

D'après cet histogramme on remarque que le ruissellement est plus important sur la parcelle non travaillée que celui sur la parcelle travaillée.

La production du ruissellement est influencé par le pourcentage de couverture du sol par la vigne. Pour évaluer l'importance de ce paramètre on a choisi l'exemple de l'événement du 11/08/97. Le pourcentage de couverture végétale est maximal à cette date. Il atteint 55 % pour la parcelle non travaillée (largeur des rangs 1.20 m) et 35 % pour la parcelle travaillée (largeur des rangs 2.20 m). Le ruissellement mesuré à l'échelle de la parcelle non travaillée est de 13.67 mm avec une pluie cumulée de 37 mm, alors qu'on mesure 2.65 mm pour la parcelle travaillée avec une pluie sur l'événement de 41 mm. Cette observation montre que l'influence du pourcentage de couverte du sol par les vignes est secondaire par rapport à d'autres caractéristiques de la parcelle. Les valeurs de ruissellement obtenues peuvent être expliquée par l'influence de la pente plus raide sur la parcelle non travaillée. De plus la conductivité hydraulique sur la parcelle travaillée est importante 18 mm/h ce qui augmente considérablement la capacité d'infiltration du sol à cause du travail de la terre. Pour la parcelle non travaillée la conductivité est fixe et elle est égale à 7 mm/h.

IV.4.2 Comparaison entre les pertes de sol mesurées sur les deux parcelles

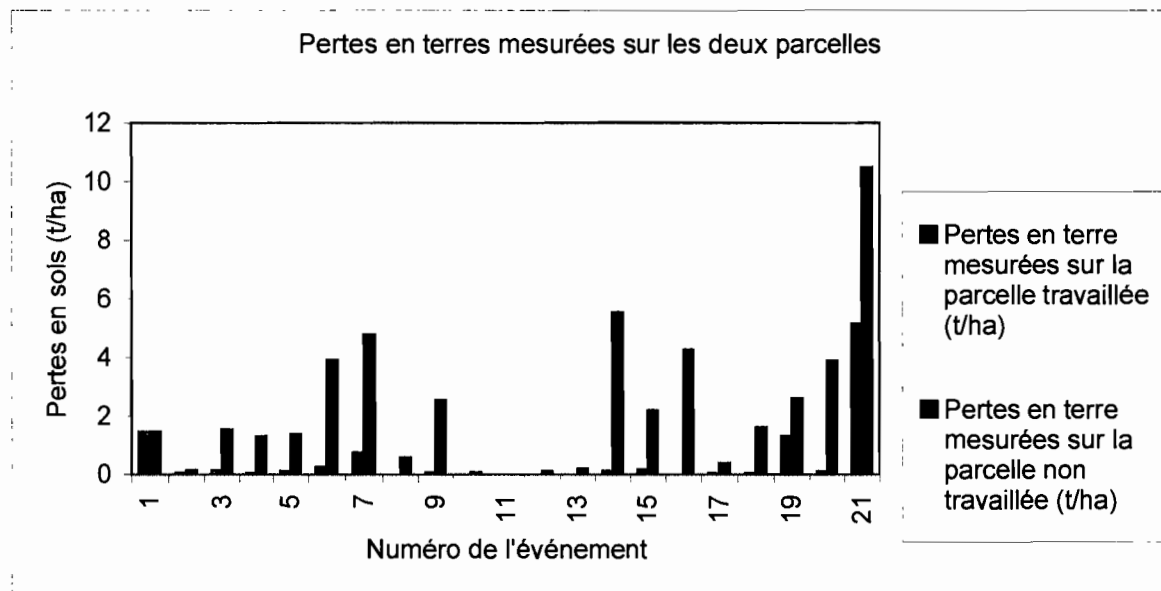


Fig.13 Comparaison entre les pertes en sol mesurés sur les deux parcelles d'étude.

Cet histogramme montre une importante différence entre les valeurs de perte en sol sur les deux parcelles. En effet, le ruissellement est plus important sur la parcelle non travaillée et l'augmentation de ce paramètre favorise le processus de détachement et transport des particules solides. Sur la parcelle non travaillée l'association du ruissellement important et l'existence d'une croûte superficielle qui limite l'infiltration de l'eau dans le sol favorisent le processus de détachement et de transport des particules solides. Par contre pour la parcelle travaillée le labour augmente la capacité d'infiltration du sol ce qui diminue énormément les lames ruisselées. L'augmentation de la rugosité du sol diminue considérablement les pertes en terre sur la parcelle travaillée. Donc sur le plan de la protection du sol, les agriculteurs doivent opter donc pour les parcelles de vigne labourées sur le bassin versant de Roujan pour protéger leurs sols de l'érosion hydrique.

Il est inutile de comparer les valeurs de pertes en sol prédites par le modèle WEPP car les erreurs d'estimation sont importantes.

Le modèle est bien conçu pour estimer le ruissellement sur la majorité des événements. Par contre il n'arrive pas à estimer les pertes en sédiments avec la paramétrisation que j'ai utilisé. Il y a deux possibilités explicatives ou bien le modèle ne décrit pas ou mal tous les processus ou bien la paramétrisation du modèle est erronée.

La première possibilité est rejetée car le modèle est une combinaison des sous modèles qui a prouvé leur validité. Toutefois des études scientifiques ont démontré que l'ensemble des modèles utilisés partout dans le monde pour estimer l'érosion hydrique, n'arrivent pas à donner des résultats satisfaisants. En effet, c'est ce qui ressort d'une étude effectuée par Jetten et al., (1996) dans la quelle ils ont testé un grand nombre de modèles de prédiction de l'érosion. Ces modèles présentent différentes conceptions il y en a ceux qui simulent à l'échelle de l'évènement ou en continue sur des durées de temps importantes, sur des grands bassins ou sur des petites parcelles. Les modèles étudiés sont regroupés dans le tableau suivant :

Modèle	Référence
CREAMS	Knisel, 1985
CSEP	Kirkby and Cox, 1995
EPIC	Williams, 1985
EUROSEM	Morgan et al., 1998 ; Quinton, 1994
GLEAMS	Knisel, 1991
USLE	Wischmeier et Smith, 1995
WEPP	Flanagan and Nearing., 1995
ACRU	Schulze, 1989; New and Schulze 1996
AGNPS	Young et al., 1989
EROSION3D	Von Werner and Schmidt, 1997
EUROSEM	Morgan et al., 1998 ; Quinton, 1994
KINEROS 2	Smith et al., 1995
LISEM	De Roo et al., 1996
MEDRUSH	Kirkby., 1998

Tab.16 Modèle d'estimation de l'érosion hydrique. (Jetten et al.; 1996).

Tous ces modèles arrivent plus au moins à estimer le ruissellement mais aucun d'eux n'arrive à bien estimer l'érosion hydrique. En effet, le processus de ruissellement est plus simple à modéliser car les facteurs déterminants sont bien connus.

L'erreur est au niveau de la paramétrisation du modèle WEPP. En premier lieu les fichiers climats doivent reconstituer le hyétogramme de l'averse. Le sous modèle climat à l'échelle de l'événement (Break Point) n'accepte pas plus de 50 points pour former ce graphique. Pour les événements de durée importante on est obligé de lisser les valeurs trouvées, pour constituer le fichier demandé. Cela influe sur les résultats obtenus. Pour les paramètres du sol un nombre très important parmi eux n'a pas fait l'objet d'une campagne de mesure. Les caractéristiques de l'érodibilité du sol sont calculées suivant des formules empiriques dépendant de composantes du sol.

De plus le modèle a besoin de la valeur de la conductivité hydraulique effective. Ce paramètre est différent de la conductivité hydraulique à saturation et j'ai utilisé les résultats des travaux effectués au laboratoire de sciences du sol (Léonard et Andrieux., 1998).

Pour la parcelle non travaillée AW 6 on a utilisé $K_e = 7 \text{ mm/h}$ alors que sur la parcelle travaillée elle varie suivant la formule $K_e = 180.69 P^{-0.6113}$ (communication personnelle Andrieux). Toutefois elle présente des anomalies sur les faibles valeurs de pluie. Pour cela on ajuste certaines fortes valeurs. De plus on remarque que pendant les simulations le modèle WEPP calcule un autre paramètre à partir du K_e appelé conductivité hydraulique à saturation équivalente. Les résultats du sous modèle sol dépendent de ce dernier paramètre.

Le pourcentage de saturation du sol n'a pas été non plus mesuré à la date de l'événement. Dans la littérature j'ai trouvé des méthodes de calcul appliquées au Etats Unies mais elles ne n'ont pas été validées pour les différents sols en milieu méditerranéen. On a choisi alors de travailler avec un méthode qui compare la pluie antérieure à l'évapotranspiration potentielle sur différentes périodes de temps précédant l'événement (1 mois, 1 semaine, la pluie antérieure, voir annexe III).

Pour les pratiques culturales, il y a trop de paramètres qui n'ont pas été mesurés comme le pourcentage de couverture de sol par les parcelles. Pour déterminer ce pourcentage on a utilisé les travaux de O. Hebrard (2004). Il a utilisé le modèle Riou et al. 1989 pour l'estimer.

La valeur du pourcentage de couverture végétale des rigoles et celle de l'espace inter rigole sont supposées égale au pourcentage de couverture végétale. La largeur des rigoles initiale à chaque événement est estimée nulle. De plus on estime que le sol entre les rangs de vigne est nu.

IV.4.3 Analyse de variation de certains paramètres du modèle WEPP

Vu la durée relativement courte du stage, je n'ai pas pu faire une analyse complète de la sensibilité des différents paramètres du modèle. Néanmoins, j'ai essayé de tester l'influence de certains paramètres caractéristiques du modèle WEPP sur les résultats des simulations. Pour cela on fixe une combinaison de paramètre. A chaque fois on fait varier un seul paramètre et on analyse la variation des résultats du modèle.

IV.4.3.1 Les précipitations

On a choisi de travailler sur l'événement du 06/08/99. Cet événement a les caractéristiques suivantes :

Les pluie totale est de 84 mm, la rugosité de 5 cm, le pourcentage de couverture du sol 20 %, le nombre de jour depuis le dernier labour est égal à 64 jours, le pourcentage de saturation initiale du sol est égale à 35%.

Dans le tableau suivant on observe la variation du ruissellement et les pertes en sol estimé en fonction des valeurs de pluies totales.(l'intensité de la pluie est constante)

Précipitation (mm)	45	70	75	80	84	90	100
Ruissellement (mm)	13,74	28,33	30,81	35,81	38,21	45,88	55
Pertes en sol (t/ha)	0,003	0,122	0,132	0,154	0,175	0,233	3,593

Tab.17 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation des précipitations.

On remarque que l'augmentation de la quantité de pluie à l'échelle de l'événement augmente progressivement le volume d'eau ruisselé et par la suite les pertes en sol. L'intensité et le volume total de la pluie est l'élément principal dans la production du ruissellement et de l'érosion.

IV.4.3.2 La rugosité initiale avant le dernier labour

De la même manière on fixe les valeurs des autres paramètres et on change la valeur de la rugosité initiale. On remarque que plus la valeur de la rugosité diminue plus les estimations de ruissellement et les pertes en sol du modèle WEPP augmentent.

Rugosité (cm)	5	4	3	2	1	0,5
Ruissellement (mm)	38,21	45,47	50,44	55,21	58,12	60
Pertes en sol (t/ha)	0,175	7,63	12	14,55	18,12	19,10

Tab.18 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation de la rugosité.

IV.4.3.3 La conductivité hydraulique effective

Pour ce paramètre on a choisi de travailler sur l'événement du 03/05/99 qui sera utiliser pour les autres tests. Il possède la plus forte valeur de conductivité hydraulique effective(35 mm/h) ce qui me permet de simule avec un nombre plus grand de valeurs. Cet événement est caractérisé par une pluie totale de 118 mm, de rugosité 5 cm, de pourcentage de couverture végétale de 15 % et une conductivité hydraulique égale à 35 mm/h.

On observe dans le tableau suivant la variation du ruissellement et des pertes en terre en fonction de la conductivité hydraulique effective. On remarque que le ruissellement et les pertes en sol augmentent lorsque la valeur de la conductivité diminue.

Conductivité (mm/h)	35	30	25	20	15	10	7
Ruissellement (mm)	14,65	17,16	20,11	22,96	31,97	34,24	35
Pertes en sol (t/ha)	6,341	7,165	7,795	8,296	10,818	10,902	10,953

Tab.19 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation de la conductivité hydraulique effective.

IV.4.3.4 La topographie

Le tableau suivant suit la variation des ruissellements et des pertes en sol simulés par le modèle WEPP en fonction de la variation de la pente. On observe que plus la pente est raide plus la production de ruissellement et des pertes en terre est importante. Le facteur pente est très important. En effet, pour une pente 16-2 les pertes en sol sont estimées à 12,40 (t/ha) alors que pour une pente 10-2 elles sont estimées à 6.34 (t/ha).

Classe de pente	16-2	15-2	14-2	13-2	12-2	11-2	10-2
Ruissellement (mm)	24,72	24,48	16,45	16,11	15,39	15,02	14,65
Pertes en sol (t/ha)	12,40	11,97	7,88	6,9	6,704	6,66	6,341

Tab.20 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la de la pente.

IV.4.3.5 Le pourcentage de couverture du sol par la vigne

Dans le tableau suivant on observe l'influence du pourcentage de couverture du sol par la vigne sur le valeurs de ruissellement et la pertes en sol.

% de couverture	10	15	20	25	30	35
Ruissellement (mm)	15,22	15,03	14,84	14,65	14,47	14,29
Pertes en sol (t/ha)	7,37	7,01	6,774	6,341	5,25	4,35

Tab.21 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation du pourcentage de couverture végétale.

On remarque que la variation du pourcentage de la couverture du sol par la plante de vigne influe peu sur le ruissellement simulé par le modèle WEPP. Par contre la diminution de ce pourcentage augmente les pertes en sédiments prédites.

IV.4.3.5 Le pourcentage de saturation du sol

Dans le tableau suivant on observe la variation des résultats du modèle WEPP en fonction du pourcentage de saturation du sol. On remarque le pourcentage de ruissellement et les pertes en sol restent constants pour trois différents valeurs. Ensuite à partir de la valeur de 40 % le modèle réagit au pourcentage de saturation. Plus la valeur du pourcentage de saturation croît plus les pertes en sol et ruissellements prédits par le modèle sont plus importantes.

Pourcentage de saturation	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Ruissellement (mm)	13,43	13,43	13,43	14,65	16,37	18,49	20,38	22,39	37
Pertes en sol (t/ha)	5,81	5,81	5,81	6,34	7	7,49	7,84	8,19	11

Tab.22 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de la variation du pourcentage de couverture végétale

IV.4.3.6 Les caractéristiques de l'érodibilité du sol

Les variations du paramètre K_r (l'érodibilité en rill (s/m^2)) n'ont aucun effet ni sur les pertes en sol ni sur le ruissellement estimés par le modèle WEPP. Par contre, l'augmentation de l'érodibilité de l'inter rill du sol augmente les pertes en sol.

- **Variation de K_i (érodibilité de l'interrill ajustée)**

K_i ($Kg.s/m^4$)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ruissellement (mm)	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65
Pertes en sol (t/ha)	1,26	2,49	3,63	4,77	5,91	6,95	7,04	7,79	8,12

Tab. 23 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction de l'événement

- **Variation de τ_c**

τ_c (Pa)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ruissellement (mm)	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65
Pertes en sol (t/ha)	6,43	2,64	4,43	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34

Tab.24 Variation du ruissellement et des pertes en sol estimés par le modèle en fonction τ_c .

Dans ce tableau on remarque que le ruissellement estimé par le modèle est insensible aux variations du à la contrainte de cisaillement. L'évolution du pertes en sol ne suit pas une loi fixe.

Cette étude de comportement des paramètres du modèle permet de classer les différents paramètres étudiés suivant leur influence sur les résultats de simulation :

1. les précipitations ;
2. la rugosité initiale après le dernier labour ;
3. la conductivité hydraulique effective ;
4. la topographie ;
5. le pourcentage de couverture du sol par la vigne;
6. le pourcentage de saturation initiale du sol
7. les caractéristiques d'érodibilité du sol K_i , τ_c ;
8. le nombre de jour depuis le dernier labour.

Conclusion

Ce mémoire est consacré à l'étude de l'érosion hydrique des sols en milieu méditerranéen à l'aide du modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project Flanagan et Nearing 1995). Ce modèle a été développé au département Américain de l'agriculture. Pour effectuer cette étude, on a travaillé sur deux parcelles à itinéraires culturels différents. Ce choix a pour but d'évaluer l'influence du travail mécanique du sol sur la production de ruissellement et l'exportation des pertes en sol. La première partie est une étude bibliographique sur l'érosion hydrique plus particulièrement en milieu méditerranéen. Elle définit l'états des connaissances ainsi que les principales caractéristiques du milieu et les paramètres mis en jeu dans ce phénomène naturel.

On s'intéresse dans cette étude au milieu viticole méditerranéen, marqué par une forte pluviométrie et des averses orageuses qui surviennent généralement à l'été ou l'automne. Ce facteur allié à une topographie accidentée déterminent le problème d'érosion dans ce milieu. On a choisi de travailler sur quatre années (1995, 1997, 1998 et 1999) sur un échantillon formé de 22 événements pluvieux. La comparaison entre les mesures du ruissellement et de l'érosion entre les deux parcelles montre que le travail du sol diminue considérablement le ruissellement, le processus de transport et de détachement du sol.

La comparaison entre le ruissellement et les pertes en terre mesurés et ceux estimés par le modèle WEPP indiquent que ce dernier estime bien le ruissellement mais pour la prédiction des pertes en sol les résultats ne sont pas satisfaisants. Les résultats sont dues aux erreurs de paramétrisation du modèle.

Les paramètres les plus influant sur la modélisation dans la conception du modèle WEPP sont classées en fonction de leur influences sur les résultats estimés :

1. les précipitations ;
2. la rugosité initiale après le dernier labour ;
3. la conductivité hydraulique effective ;
4. la topographie ;
5. le pourcentage de couverture de la vigne du sol ;
6. les caractéristiques d'érodibilité du sol K_i , τ_c ;
7. le pourcentage de saturation initiale du sol ;
8. le nombre de jour depuis le dernier labour.

Cette étude sur la prédiction de l'érosion en milieu viticole affirme que le modèle WEPP est capable d'estimer le ruissellement alors qu'il n'arrive pas à prédire les pertes en sol. Elle montre bien que le travail expérimental doit être fait avec une idée précise du type de modélisation que l'on veut mettre en œuvre. Il faut de plus étudier les exigences du modèle WEPP et sa capacité à s'adapter au milieu Méditerranéen.

Résumé

L'érosion hydrique en milieu méditerranéen provoque des énormes dégâts en milieu agricole. Le refus d'infiltration de l'eau dans le sol déclenche le processus de ruissellement (Hortonien ou par saturation). Par la suite les particules solides sont détachés et transportés c'est le phénomène de l'érosion. L'érosion hydrique peut être diffuse (érosion en nappe) ou linéaire (rigoles ou ravines).

L'unité de recherche UMR LISAH a voulu tester un outil de prédiction de l'érosion en milieu Méditerranéen. Le modèle WEPP (Water Erosion Prédiction Project) a été développé en 1984 aux Etats Unies par le département d'agriculture (D.C Flanagan and al.;(1995). Ce modèle est à base physique dynamique et semi distribuée. Il est formé par une combinaison de plusieurs sous modèles (hydrologie, la pédologie, et l'agronomie). Cet outil (version juillet 2004) est facile à utiliser et il est capable de simuler en continue ou à l'échelle de l'événement. Il peut simuler sur des bassins versants ou sur des petites parcelles.

On a choisi un échantillon formé par 22 événements érosifs sur quatre années (1995, 1997, 1998, 1999) observés sur le bassin versant de Roujan situé dans le département de l'Hérault commune de Roujan. Pour évaluer l'impact deux différents itinéraires cultureux sur l'érosion on a choisi deux parcelles du bassin versant. Cette étude sur la prédiction de l'érosion en milieu viticole affirme que le modèle WEPP est capable de bien estimer le ruissellement alors qu'il n'arrive pas à prédire les pertes en sol.

Le modèle simule bien le processus de ruissellement. Pour la prédiction des pertes en sol, le modèle n'arrive pas à fournir des résultats satisfaisants. Les erreurs sont dues aux manques de données et à aux erreurs de paramétrisation de certains caractéristiques du modèle WEPP. Il faut savoir quelle type de modélisation on veut mettre en œuvre, étudier les exigences et la capacité d'adaptation du modèle Américain au milieu Méditerranéen.

Mots-clés :WEPP, modélisation, érosion hydrique, ruissellement, milieu Méditerranéen, outil de prédiction.

Summary

Soil erosion by water is one of the mechanisms by which land is degraded and turn negatively affects agricultural productivity and environment. The document describes water erosion in Mediterranean medium and process involved: runoff (Hortonian flow or saturation) and soil detachment (interrill, rill, gullies).

The research unit UMR LISAH would like to have predicting tool of soil erosion by water. The WEPP was developed in American department of agriculture. It is a continuous simulation physical based erosion model that can estimate spatial and temporal distribution of soil loss. This model is simple to use and formed by a combination of under model (hydrology, soil erosion, plant growth). The main inputs are climate, soil parameters, soil cover and slope. The model can be run in two versions: Hillslope and watershed. It is an easy tool to use, giving details by steps.

It was used to estimate water erosion in Mediterranean catchments. The catchment's of Roujan is in the department of Herault in south of France. We choose 22 events to evaluate to impact of land use in the process of erosion. WEPP failed to estimate water erosion because lack of information and erroneous parameterisation. Other study must evaluate the capacity of adaptation of this tool in Mediterranean catchments.

Key words: model, water erosion, Mediterranean, predicting tool, hillslope, watershed.

Référence bibliographique

Allée P. 1984. la dynamique des versants dans le Haut –Vallespir : processus héritages, action anthropiques. Thèse Université Paris I.

Ambroise B. 1999. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Modélisation systématique et dynamique. *Revue des sciences de l'eau* 12(1) :123-153.

Andrieux P., Hatier, A., Asseline, J., de Nomi, G., & Voltz, M. 2001. Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a Mediterranean wine-growing area. International symposium on the significance of soil surface characteristics in soil erosion, Cost 623 "Soil erosion and globale change" Workgroup, Strasbourg, France.

Asseline 1993. Note sur la conception et l'utilisation d'un simulateur de ruissellement. *Cah. Orstom, ser. Pédol.*, vol. XXVIII, n°2, 1993: 405-411.

Augustinus & P.J. Nieuwenhuyse. Soil erosion in vineyards in the Ardèche region, P.G.E.F., Utrecht. *Catena* 13; 295-304.

Auzet A-V 1987- l'érosion des sols par l'eau dans les régions e grande culture : aspects agronomiques. *Min Env/ Agr. CERG-URA 95, CNRS Strasbourg*, 60 p.

Beven K. 2000. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Science* 4(2): 203-213.

Brunner A. C., S. J. Park, G. R. Ruecker, R. Dikau and P. L. G. Vlek 2004. Catenary soil development influencing erosion susceptibility along a hillslope in Uganda • *CATENA*, Volume 58, Issue 1, 23 September 2004, Pages 1-22

Bou Kheir et al 2001. L'érosion hydrique dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique *Etude de gestion des sols*, Volume 8,4, 2001 pages 231-245.

Chahinian N. 2004. Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisée de crue en milieu agricole. Thèse université Montpellier II 'Science de la terre et de l'eau et la terre'. *INRA/AGRO-Montpellier* 238 p.

Coulouma G. 1998. Erosion hydrique à l'échelle de la parcelle de vigne en milieu méditerranéen : bibliographie et expérimentation. *Maîtrise géographie Université d'Avignon*. *INRA Montpellier*.46p.

De la Rosa D., E. Diaz-Pereira, F. Mayol, E.A. Czyz, A.R. Dexter, E. Dumitru, R. Enache, H. Fleige, R. Horn, K. Rajkay and C. Simota 2005. SIDASS project: Part 2. Soil erosion as a function of soil type and agricultural management in a Sevilla olive area, southern Spain *Soil and Tillage Research*, Volume 82, Issue 1, May 2005, Pages 19-28

De Alba S., M. Lindstrom, T. E. Schumacher and D. D. Malo 2004. Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes *CATENA*, Volume 58, Issue 1, 23 September 2004, Pages 77-100

De Vente J. and Poesen J. 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models • ARTICLE *Earth-Science Reviews*, Volume 71, Issues 1-2, June 2005, Pages 95-125

De Vente J., Jean Poesen and Gert Verstraeten 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain *Journal of Hydrology*, Volume 305, Issues 1-4, 10 April 2005, Pages 63

Demmak A., 1984 – Recherche d'une relation empirique entre les apports solides spécifiques et les paramètres physico-climatiques des bassins: cas Algérien. In *AISH Public* 144 : 403-414.

Duiker, D. C. Flanagan and R. Laflen 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain *CATENA*, Volume 45, Issue 2, 29 August 2001, Pages 103-121.

Duley F., Ackerman F., 1934. Run off and erosion from plots of différent lenghts. *Journal of agricultural research* 48: pages 505-510.

D'Souza V-P-C, 1976. A laboratory study of the effect of slope steepness and curvature on soil erosion. *Journal agric. Engineering Research* 21: 21-30.

Edeso J.M., A Merino, MJ Gonzalez, P Marauri 1999. Soil erosion under different harvesting managements in steep forestlands from northern Spain - *Land Degradation & Development*, 1999 - doi.wiley.com

FAO 1983- Garder la terre en vie : l'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. *Bulletin pédologique* 50-62p.

Gemma Dunjó, Giovanni Pardini and Maria Gispert 2003. Land use change effects on abandoned terraced soils in a Mediterranean catchment, NE Spain CATENA, Volume 52, Issue 1, 6 May 2003, Pages 23-37

Gómez and M.A. Nearing 2005. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment CATENA, Volume 59, Issue 3, 26 January 2005, Pages 253-266

Gómez, J. V. Giráldez, M. Pastor and E. Fereres 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard Soil and Tillage Research, Volume 52, Issues 3-4, October 1999, Pages 167-175

Gomez et al. 2004. Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain as affected by soil management.. soil and use management 426-431 .2004

Grønsten H.A and Lundekvam H. 2005. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope model Soil and Tillage Research, In Press, Corrected Proof, Available online 12 February 2005,

Groove A.T., 1996. Physical, biological and human aspects of environmental change. Medalus II Report, 39-64.

Hebrard O. 2004. 'Stratégie de prévision des humidités de surface sur un bassin versant agricole en milieu méditerranéen. Thèse Université Montpellier 2 'Sciences de l'eau et la terre'. INRA/IRD/AGRO-Montpellier 250p.

Heush B., 1970. L' érosion l' érosion du Pré-Rif, Annales recherche forestières, Maroc 12-1-176.

Hennequin C. Analyse critique du modèle WEPP. Mémoire de fin d'études. Agro Montpellier. 77p.

Takken I. Victor Jetten, Gerard Govers, Jeroen Nachtergaele and An Steegen 2001. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns Geomorphology, Volume 37, Issues 1-2, March 2001, Pages 1-14.

Jetten V., Ad de Roo and David Favis-Mortlock 1999. Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models CATENA, Volume 37, Issues 3-4, October 1999, Pages 521-541

Jetten and al., 2002. Erosion models : quality of spatial predictions. Hydrological process, 17, 887-900 (2003).

John Wainwright 1996. Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France CATENA, Volume 26, Issues 1-2, February 1996, Pages 27-47

Kosmas C., N. G. Danalatos and St. Gerontidis 2000. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions CATENA, Volume 40, Issue 1, June 2000, Pages 3-17

Kosmas C., N. Danalatos, L. H. Cammeraat, M. Chabart, J. Diamantopoulos, R. Farand, L. Gutierrez, A. Jacob, H. Marques, J. Martinez-Fernandez et al 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions

Kyrnine D., Judd W., 1957. principales of engineering geology and geotechnics Mc Graw Hill book compagny Inc. 730p.

Matthew J. Cohen, Keith D. Shepherd and Markus G. Walsh 2005. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed Geoderma, Volume 124, Issues 3-4, February 2005, Pages 235-252

Marco P. and al. 1997. Distributed evaluation of the contribution of soil erosion to the contribution of soil erosion to the sediment yield from a watershed. Earth surface process and landforms, Vol 22, 1239-1251.

Mériaux S., 1961. Action du chaulage sur les composantes de la structure et sur l'état de saturation du sol. Compte rendu à l'académie d'agriculture 322-325.

Mutcher C., Greer J., 1980. Effect of slope length on erosion from low slopes Trans ASAE 23, 866-869.

Leonard, J.& Andérieux, P.,1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in southern France. Catena . 32, 209-223.

Le Bissonnais, Cécile Montier, Marcel Jamagne, Joël Daroussin and Dominique King 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France CATENA, Volume 46, Issues 2-3, 3 January 2002, Pages 207-220

Le Bissonnais, Jacques THORETTE, Cécile BARDET, Joel DAROUSSIN, L'érosion hydrique des sols en France. INRA, IFEN, Novembre 2002.

Lopez- Bermudez F., Remero-Diaz M.A., 1993. Genesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la region mediterranean. In Cuadernous I. Logrono : Geografica, 7-28.

Ludwing B. and al. 1996. Soil surface state, hydrographic structure and rill erosion in cultivated catchements in the north of France. Etude des gestion des sols, 3 , 1, 1996.

Obbed C., Tourasse P., 1994. Unertainty in flood forecasting : a french case study. In Rossi G., Harmancioglu N., Yevjevich V. editors. Coping with floods. Italy , 3-15 November. Dorrecht, Klumer Academic 473-502.

Papy F., Le bissonais Y., Guérif .J. 1995. valorisation et protection de la ressource en eau. Projet : recherches sur les processus physiques et la maîtrise de l'érosion hydrique à l'échelle d'un territoire agricole. Le programme valorisation et protection des ressources en eau 1992-1995. Protection des ressources en eau, INRA éditions, 27 p.

Posen J.W., Torri D. Bunte K., 1994. Effects of rock raggements on soil erosion by water at different spatial scale : areview. Catena 23 : 141-166.
Refsgaard J, 1997 Paramétrisation, calbation and validation of distributed hydrological models. Journal of hydrology 198: 69-97.

Roose et al. 1993. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCE : synthèse des compagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cahiers Orstom, série pédologique 28(2) : 289-308.

Roose E. 1994. Introduction à la GCES.Bulltin pédologique FAO 70, 420 p.

Soto B., R. Basanta, R. Perez and F. Diaz-Fierros 1995. An experimental study of the influence of traditional slash-and-burn practices on soil erosion CATENA, Volume 24, Issue 1, February 1995, Pages 13-23.

Soto B. and Francisco Díaz-Fierros 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP CATENA, Volume 31, Issue 4, January 1998, Pages 257-270

Souchère V., O. Cerdan, N. Dubreuil, Y. Le Bissonnais and C. King 2005. Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France) CATENA, In Press, Corrected Proof, Available online 3 June 2005,

Taraya Z., 1998. Etude hydro-pluviométrique comparative des bassins versants de la région intermédiaire du liban. Publications de l'université libanaise Section des études géographiques.

UNESCO, 1992. International glossary of hydrology; Glossaire international d'hydrologie.UNESCO WMO, Paris, Genève, 413 p.

Wischmeier W-H., Smith D-D., Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning, Washington, USDA 537: 58 p.

Zartl A. S., Klik A. and C. Huang 2001. Soil detachment and transport processes from interrill and rill areas • ARTICLE
Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, Volume 26, Issue 1, 2001, Pages 25-26

Site internet

<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/>

Documentation du modèle WEPP

Ascough J.C., C. Baffaut, B. Barfield, and al., WEPP ,user summary. NSERL Report No. 10.USDA.

Flanagan DC, Livingston J.A.D. Nicks, Nearing M.A. and Laflen J.M. 1995. USDA WEPP: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 11. USDA.July 1995.

Nearing M.A., L Deer-Ascough, laflen J.M. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope erosion model'. ASAE USDA.

ANNEXE I

Glossaire

AGNPS: Annual Agricultural Non –Point Source
AREAS: Association Régionale pour l'étude et l'amélioration du sol
BCDG : Break Point Climate Data Generator
CLIGEN: Climat Generator
CREAMS: Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems
EPIC: Integrated Environment Productivity Indicator Climate
INRA: Institut National de recherche Agronomique
LISAH : Laboratoire d'étude des interactions entre les sols, Agrosystèmes et Hydrosystèmes
KINEROS : Modified Universal Soil Loss Equation
OFE: Overland Flow Element.
USDA: United States département of Agriculture
USLE: Universal Soil loss Equation
WEPP: Water Erosion Prediction Project

Définition

Rill: rigole d'érosion
Interrill : zone entre les griffes d'érosion
Hillslope : versant
Watershed : bassin versant
OFE: entité du versant ayant les memes caractéristiques sol et occupation du sol.

ANNEXE II

Les paramètres d'entrée du modèle WEPP

Climat

Les différents paramètres caractéristiques du climat sont demandées par le modèle WEPP sont les suivants :

la précipitation totale (mm)

l'intensité de pluie maximum sur un pas de temps de 5 à 30 min

la température du point de rosée (°C)

la température maximale (°C)

la température minimale (°C)

la vitesse et la direction du vent (m/s)

les coordonnées de la station de mesure : longitude, latitude, élévation.

Occupation du sol

Les différents paramètres caractéristiques de l'occupation du sol sont les suivants :*

1. Paramètres de croissance de plante et de récolte

Ratio biomasse énergie Kg/Mj

Température journalière nécessaire pour passer du stade de la croissance jusqu'à l'émergence C°/j

Température journalière nécessaire à la croissance de la plante C°/j

Espacement des plantes cm

Diamètre de la tige à maturité cm

Hauteur végétale restant après récolte hauteur de coupe cm

Indice de récolte (rendement/ biomasse aérienne) %

2. Paramètre climatiques : température et radiation

Température journalière de base pour l'air (C°)

Température optimale pour la croissance des plantes (C°)

Température maximale arrêtant la croissance des plantes pérennes (C°)

Température du gel, critique pour les plantes pérennes (C°)

Coefficient d'extinction de radiation

3. Paramètre de la couverture végétale LAI et racine

Coefficient de couverture végétale (herbes ou par exemple les adventice)

Valeur de la constante de l'équation de la hauteur de la couverture végétale

Hauteur maximale de la couverture végétale (cm)

LAI(leaf area index) maximale

Profondeur maximale des racines (cm)
Ratio racine /système foliacé %
Biomasse racinaire maximale (pour les plantes pérennes) Kg/m²

4. Paramètre de sénescence

Pourcentage de croissance à partir duquel le LAI commence à décliner (%)
Période au cours de laquelle la sénescence a lieu (jour)
Pourcentage de canopée restant après la sénescence (%)
Pourcentage de biomasse restant après la sénescence (%)

5. Paramètre liés aux résidus

Paramètre pour la couverture du sol par les résidus à terre (m²/Kg)
Facteur d'ajustement du résidu à terre (influence du vent et du gel...) (%)
Constante de décomposition pour calculer des changements de biomasse aérienne
La constante de décomposition pour calculer les changements de biomasse racinaire
Type de plante : fragile ou non fragile
Résistance spécifique de la plante à la sécheresse (% de la porosité du sol)
Valeur de biomasse vivante critique en dessous de laquelle le pâturage est interdit (Kg/m²)
Maximum du facteur de friction de Darcy pour une plante vivante (Kg/m²)
Unité récolté
Rendement maximum si aucun stress hydrique (kg/m²)

La conduite Culturelle

La culture
La densité apparente après le dernier labour (g/cm³)
La couverture végétale initiale (%)
Le nombre de jour depuis le dernier labour (jour)
Le nombre de jour depuis la dernière récolte (jour)
Profondeur gelée initiale (cm)
Couverture initiale des sillons après dernier labour (cm)
Couverture initiale de l'interrill (%)
Mode de conduite initiale de l'interrill
Précipitations cumulée depuis le dernier labour (mm)
Rugosité initiale après le dernier labour (cm)
Espacement des rangs (cm)
Type des rangs (cm)
Profondeur initiale de la neige (cm)
Profondeur initiale du dégel (cm)
Profondeur de l'horizon labourée secondaire (cm)
Profondeur de l'horizon labourée primaire (cm)
Largeur de rang initiale (cm)
Total de la biomasse racinaire morte initiale (Kg/m²)
Biomasse résiduaire submergée totale (initiale) (Kg/m²)

Travail du sol

Pourcentage de résidus enterré dans l'inter rang pour les plantes fragiles (%)
Pourcentage de résidus enterré dans l'inter rang pour les plantes non fragiles (%)
Nombre de labour
Mode et position du tracteur
Hauteur des sillons après labour (cm)
Intervalle entre les sillons (cm)
Pourcentage de résidus enterré dans le rang pour les plantes fragiles (%)
Pourcentage de résidus enterré dans le rang pour les plants (%)
Rugosité aléatoire depuis le dernier labour (cm)
Pourcentage de la surface perturbée par le labour (%)
Profondeur moyenne de labour (cm)

Pédologie

Texture et propriétés du sol

Texture
Albédo
Pourcentage de saturation initiale du sol (%)
Erodibilité à l'interrill Kg.s/m^4
Erodibilité du rill (s/m)
Seuil de cisaillement critique Pa
Conductivité hydraulique effective (mm/h)
Profondeur des horizons (mm)
Sable %
Argile %
Matière organique %
CEC meq/100g
Pierrosité %

Topographie

Pente
Longueur
Largeur

ANNEXE III

Calcul du pourcentage de saturation initiale du sol

	1 mois			7 jours			Pluie antérieure				
Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	P- ETP (mm)	Pluie (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	Pluie (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	Nombre de jours depuis la pluie antérieure (jour)	Pourcentage de saturation du sol (%)
13/10/1995	108.5	65.9	42.6	1.5	11	-9.5	0.5	3.4	-2.9	2	50
08/12/1995	115	21.9	93.1	33	2	31	24	0.3	23.7	1	80
05/05/1997	17.5	127.8	-110.3	5	36.5	-31.5	5	3.5	1.5	1	20
01/06/1997	108	107.1	0.9	5.5	36.1	-30.6	5.5	4.2	1.3	1	20
05/06/1997	109.5	102.9	6.6	65	36.8	28.2	6.5	1.9	4.6	1	80
11/08/1997	35	104.3	-69.3	35	30.9	4.1	35	4.5	30.5	1	40
01/09/1997	51.5	134.9	34.7	7	27.5	-20.5	2	11.1	-9.1	4	45
07/10/1997	41	142.1	8.5	40.5	21.1	19.4	35.5	1	34.5	1	80
03/11/1997	84.5	48.5	30.2	16.5	6.6	9.9	0.5	3.7	-3.2	5	65
20/11/1997	262.5	15	6.5	15.5	4.6	10.9	3.5	0.4	3.1	1	80
24/11/1997	252.5	23.9	228.6	25.5	4	21.5	3	2.1	0.9	3	75
25/11/1997	260.5	23.9	236.60	34	4.1	29.9	8.5	0.5	8	1	80
26/11/1997	44.5	5.7	38.8	41.5	4	37.5	10.5	0.5	10	1	80
16/12/1997	99	18.5	80.5	7.5	5.3	2.2	6	0.8	5.2	1	80
29/04/1998	32	85	-53	27	26.7	0.3	27	8.3	19.7	3	40
02/05/1998	52	88.2	-36.2	47	23.3	23.7	3	4.7	-1.7	2	30
07/09/1998	15.5	141.7	-126.2	7	27.6	-20.6	0.5	10.2	-9.7	3	10
26/04/1999	29	102.3	-73.3	40.5	23.4	17.1	21	3.2	17.8	1	40
03/05/1999	51	105.3	-54.3	27	23.8	3.2	2	3.2	-1.2	1	30
17/05/1999	171.5	92.1	79.4	6	29.3	-23.3	2	3.4	-1.4	1	50
02/08/1999	4.5	105.3	-100.8	3	40	-37	0.5	5.8	15	3	20
06/08/1999	30	175.1	-145.1	30	37.5	-7.5	5	3.9	7.8	2	20

ANNEXE IV

Résultats détaillés du modèle WEPP.

Single storm

USDA WATER EROSION PREDICTION PROJECT

HILLSLOPE PROFILE AND WATERSHED MODEL

VERSION 2004.600

June 24, 2004

TO REPORT PROBLEMS OR TO BE PUT ON THE MAILING
LIST FOR FUTURE WEPP MODEL RELEASES, PLEASE CONTACT:

WEPP TECHNICAL SUPPORT
USDA-AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE
NATIONAL SOIL EROSION RESEARCH LABORATORY
1196 BUILDING SOIL, PURDUE UNIVERSITY
WEST LAFAYETTE, IN 47907-1196 USA

PHONE: (765) 494-8673
FAX: (765) 494-5948
email: wepp@ecn.purdue.edu
URL: <http://topsoil.nserl.purdue.edu>

HILLSLOPE INPUT DATA FILES - VERSION 2004.600

June 24, 2004

MANAGEMENT: p1.man
MAN. PRACTICE: description 1
description 2
description 3
SLOPE: p1.slp
CLIMATE: p1.cli
Station: Roujan
0.00
SOIL: p1.sol
PLANE 1 AW 6 06 08 99

I. SINGLE STORM HYDROLOGY

infiltration, rainfall excess, and runoff hydrograph for event of 6 8 **
hydrology summary

rainfall amount 84.00 (mm)
rainfall duration 126.00 (min)
INPUT BREAKPOINT PRECIPITATION USED

rainfall	time	intensity
	(min)	(mm/hr)
	0.00	0.00
	3.00	0.00
	6.00	0.00
	9.00	70.00
	12.00	120.00
	15.00	28.89
	42.00	270.00

loss_1.txt

45.00	180.00
48.00	120.00
51.00	120.00
54.00	50.00
57.00	10.00
60.00	20.00
63.00	0.00
66.00	10.00
69.00	0.00
72.00	10.00
75.00	1.11
102.00	10.00
105.00	10.00
108.00	0.00
111.00	0.00
114.00	0.00
117.00	10.00
120.00	0.00
123.00	400.00
126.00	0.00

hillslope 1

overland flow element 1

infiltration input parameters

effective saturated conductivity	1.73 (mm/h)
effective matric potential	134.28 (mm)
effective porosity	0.43 (mm/mm)
saturation	43.25 (%)
canopy cover	15.00 (%)
surface cover	15.00 (%)

input runoff parameters

plane length	60.00 (m)
discharge exponent	1.50
average slope of profile	0.09
chezy coefficient	2.05 (m**0.5/s)

output runoff parameters

equivalent sat. hydr. cond.	1.73 (mm/hr)
equivalent matr. potential	134.28 (mm)
average pore fraction	0.42 (m/m)
average saturation fraction	0.13 (m/m)

runoff output

runoff volume	39.81 (mm)
peak runoff rate	121.90 (mm/hr)
effective runoff duration	19.59 (min)
effective length	60.00 (meters)

loss_1.txt
output runoff hydrograph for hillslope 1

index	time (min)	rate (mm/h)	cumul. depth (mm)
1	0.00	0.00	0.00
2	3.00	0.00	0.00
3	5.00	0.00	0.00
4	6.00	0.00	0.00
5	9.00	0.00	0.00
6	10.00	0.00	0.00
7	12.00	0.00	0.00
8	15.00	0.00	0.00
9	20.00	0.00	0.00
10	20.30	0.00	0.00
11	25.00	0.00	0.00
12	30.00	0.00	0.00
13	35.00	0.00	0.00
14	40.00	0.00	0.00
15	42.00	0.00	0.00
16	45.00	25.01	0.00
17	48.00	74.33	0.63
18	50.00	100.14	3.11
19	51.00	114.01	6.02
20	54.00	121.90	7.80
21	55.00	108.77	13.70
22	57.00	85.27	15.62
23	60.00	51.93	18.86
24	63.00	32.35	22.29
25	65.00	23.32	24.39
26	66.00	19.84	25.32
27	69.00	12.40	25.68
28	70.00	10.64	26.49
29	72.00	7.92	26.68
30	75.00	5.35	26.99
31	80.00	2.99	27.32
32	85.00	1.82	27.67
33	90.00	1.19	27.87
34	95.00	0.80	27.99
35	100.00	0.56	28.07
36	102.00	0.49	28.13
37	105.00	0.41	28.15
38	108.00	0.34	28.17
39	110.00	0.31	28.19
40	111.00	0.29	28.20
41	114.00	0.25	28.21
42	115.00	0.24	28.22
43	117.00	0.21	28.22
44	120.00	0.18	28.23
45	123.00	0.16	28.24
46	125.00	13.91	28.25
47	126.00	46.44	28.48
48	127.00	46.21	28.99
49	128.00	45.99	29.76
50	129.00	45.81	30.53
51	130.00	45.66	31.29
52	131.00	45.54	32.06
53	132.00	45.45	32.82
54	133.00	45.39	33.57
55	134.00	45.36	34.33
56	135.00	40.47	35.09
57	136.00	33.33	35.80
58	137.00	27.42	36.42
59	138.00	22.55	36.92
60	139.00	18.50	37.34
61	140.00	15.14	37.68

62 141.00 12.57 loss_1.txt
37.96

runoff hydrograph summary for hillslope 1

rainfall volume 83.99 (mm)
infiltration volume 44.18 (mm)
runoff volume 39.81 (mm)

peak rainfall intensity 400.00 (mm/h)
effective rainfall intensity 190.00 (mm/h)
effective rainfall duration 18.00 (min)
final infiltration rate 11.29 (mm/h)
peak runoff rate 121.90 (mm/h)

duration of rainfall 126.00 (min)
time to first ponding 12.00 (min)
effective runoff duration 19.59 (min)
effective length 60.00 (meters)

II. ON SITE EFFECTS ON SITE EFFECTS ON SITE EFFECTS

A. AREA OF NET SOIL LOSS

** Soil Loss (Avg. of Net Detachment Areas) = 0.624 kg/m2 **
** Maximum Soil Loss = 1.139 kg/m2 at 59.40 meters **

** Interrill Contribution = 0.000 kg/m2 for OFE # 1

Area of Net Loss (m)	Soil Loss MEAN (kg/m2)	Soil Loss STDEV (kg/m2)	MAX Loss (kg/m2)	MAX Loss Point (m)	MIN Loss (kg/m2)	MIN Loss Point (m)
39.00- 60.00	0.624	0.356	1.139	59.40	0.000	39.60

C. SOIL LOSS/DEPOSITION ALONG SLOPE PROFILE

Profile distances are from top to bottom of hillslope

distance (m)	soil loss (kg/m2)	flow elem	distance (m)	soil loss (kg/m2)	flow elem	distance (m)	soil loss (kg/m2)	flow elem
0.60	0.000	1	21.00	0.000	1	41.40	0.110	1
1.20	0.000	1	21.60	0.000	1	42.00	0.152	1
1.80	0.000	1	22.20	0.000	1	42.60	0.194	1
2.40	0.000	1	22.80	0.000	1	43.20	0.235	1
3.00	0.000	1	23.40	0.000	1	43.80	0.276	1
3.60	0.000	1	24.00	0.000	1	44.40	0.316	1
4.20	0.000	1	24.60	0.000	1	45.00	0.356	1
4.80	0.000	1	25.20	0.000	1	45.60	0.395	1
5.40	0.000	1	25.80	0.000	1	46.20	0.433	1
6.00	0.000	1	26.40	0.000	1	46.80	0.471	1
6.60	0.000	1	27.00	0.000	1	47.40	0.509	1
7.20	0.000	1	27.60	0.000	1	48.00	0.546	1
7.80	0.000	1	28.20	0.000	1	48.60	0.582	1
8.40	0.000	1	28.80	0.000	1	49.20	0.618	1
9.00	0.000	1	29.40	0.000	1	49.80	0.653	1
9.60	0.000	1	30.00	0.000	1	50.40	0.688	1

loss_1.txt								
10.20	0.000	1	30.60	0.000	1	51.00	0.722	1
10.80	0.000	1	31.20	0.000	1	51.60	0.755	1
11.40	0.000	1	31.80	0.000	1	52.20	0.788	1
12.00	0.000	1	32.40	0.000	1	52.80	0.820	1
12.60	0.000	1	33.00	0.000	1	53.40	0.852	1
13.20	0.000	1	33.60	0.000	1	54.00	0.883	1
13.80	0.000	1	34.20	0.000	1	54.60	0.914	1
14.40	0.000	1	34.80	0.000	1	55.20	0.944	1
15.00	0.000	1	35.40	0.000	1	55.80	0.974	1
15.60	0.000	1	36.00	0.000	1	56.40	1.003	1
16.20	0.000	1	36.60	0.000	1	57.00	1.031	1
16.80	0.000	1	37.20	0.000	1	57.60	1.059	1
17.40	0.000	1	37.80	0.000	1	58.20	1.086	1
18.00	0.000	1	38.40	0.000	1	58.80	1.113	1
18.60	0.000	1	39.00	0.000	1	59.40	1.139	1
19.20	0.000	1	39.60	0.000	1	60.00	1.130	1
19.80	0.000	1	40.20	0.024	1			
20.40	0.000	1	40.80	0.067	1			

note: (+) soil loss - detachment (-) soil loss - deposition

III. OFF SITE EFFECTS OFF SITE EFFECTS OFF SITE EFFECTS

A. SEDIMENT LEAVING PROFILE for aug 6 14 13.103 kg/m

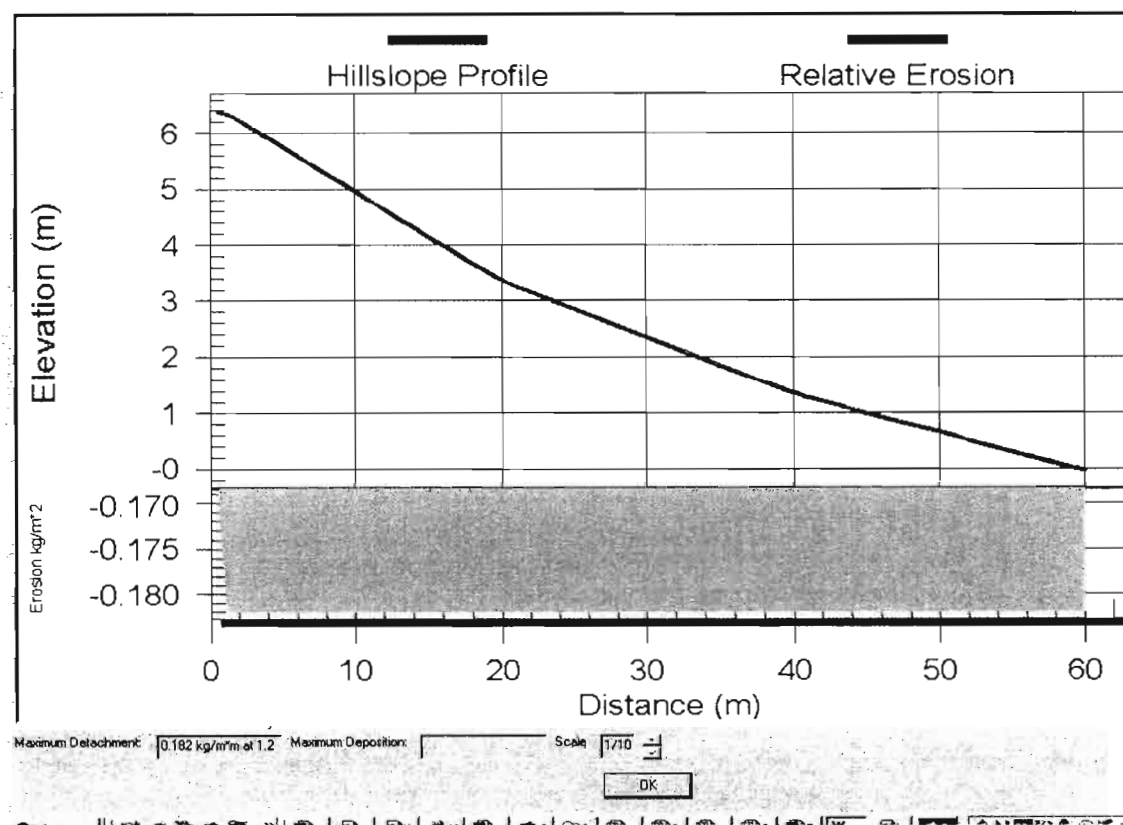
Predicted sediment leaving side of OFE 1 is 0.000 kg/m width

B. SEDIMENT CHARACTERISTICS AND ENRICHMENT

Sediment particle information leaving profile

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Detached Sediment Fraction	Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.		
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	3.5	0.050	0.050
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.330	0.330
3	0.030	1.80	0.0	77.8	22.2	0.8	0.349	0.349
4	0.388	1.60	36.9	34.1	29.0	1.0	0.227	0.227
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.043	0.043

SSA enrichment ratio leaving profile for aug 6 14 = 1.00



Résultas graphique du modèle WEPP