

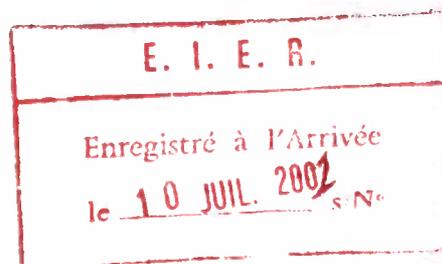


## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES 2001

Présenté par :

KALIDOU Moustapha

**Ruissellement et érosion des sols  
d'un petit bassin versant sahélien  
au BURKINA FASO. Etude  
à l'aide d'un simulateur de pluie  
type ORSTOM**



433.01

MENTION :

Encadrement  
Ph. GINESTE  
O. RIBOLZI



Ecole inter-états d'Ingénieurs  
d'Équipement Rural



Institut de recherche  
pour le développement



## **Mémoire de fin d'étude 2001**

Pour l'obtention du grade d'Ingénieur de l'Équipement Rural

Intitulé :

Ruissellement et érosion des sols d'un petit bassin  
versant sahélien au BURKINA FASO.

**Etude à l'aide d'un simulateur de pluie type ORSTOM**

Présenté par :

KALIDOU Moustapha

Soutenu le 18 Juin 2001

sous le jury composé de :

Mr. YACOUBA Hamma (Professeur à l'EIER)

Mr. GINESTE Philippe (Professeur à l'EIER)

Mr. RIBOLZI Olivier (Chercheur à l'IRD, centre de Ouagadougou)

Mr. MAHE Gil (Chercheur à l'IRD, centre de Ouagadougou)

**Juin 2001**

## **DEDICACES**

Ce travail est dédié

A la mémoire de ma mère et de mon père,

Que la terre leur soit légère

A mes frères et sœurs,

A ma grande famille,

A tous mes parents,

A ma chère copine

A tous mes amis, qui de loin ou de près,

Ont contribué à l'élaboration de ce travail

A tous ceux qui me sont chers.

## Avant Propos

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de pédologie et d'hydrologie du centre IRD (ex-ORSTOM), dans lequel j'ai effectué mon stage dans le cadre de la lutte contre la désertification au Sahel.

La réussite de ce travail a été rendue possible grâce à l'environnement scientifique dans lequel je me suis retrouvé. Cet environnement m'a permis d'accumuler les connaissances nécessaires pour traiter ce sujet.

Je tiens donc à exprimer ma gratitude envers ceux là qui n'ont ménagé aucun effort pour m'accorder leur collaboration.

Je remercie Messieurs Alain CASENAVE, Jean Pierre DELHOUME, Robert GATHELIER Jean Pierre THIEBAUX, Marc DESCLOITRES tous chercheurs à l'IRD travaillant sur le site expérimental de Katchari et qui m'ont fait bénéficier de leur connaissance et de leur collaboration durant mon stage.

Mes gratitude vont également à l'endroit de Moussa BARRY, Maxime WUBDA, Yves Thierry DZOUALY, Aliko MAMAN, Yaya YEDAN et Harouna KARAMBIRI tous au laboratoire qui m'ont apporté un soutien durant mon stage.

Je remercie également mon encadreur de l'EIER Philippe GINESTE, pour les conseils qu'il m'a prodigués.

Je ne saurais trop remercier mon maître de stage Monsieur Olivier RIBOLZI pour les connaissances qu'il m'a inculquées, pour les précieux conseils, pour la confiance qu'il a placé en moi et pour les précieux coup de main qu'il m'a prêtés. Je lui en serais toujours reconnaissant.

Mes gratitude vont également à l'endroit de tous les enseignants de l'EIER qui ont contribué à la formation que j'ai reçue dans cette école.

Je suis redevable et reconnaissant à mon grand frère SALL Ibrahima Moustapha qui n'a ménagé ni ses conseils, ni ses contributions pour la réussite de ma formation.

J'adresse un vibrant hommage à ma chère copine SIMPORE Assita pour son amour, sa tendresse et son soutien tant moral que physique.

Que mes amis du pays des hommes intègres trouvent ici l'expression de mes gratitudes. Je suis reconnaissant à mes tous mes compatriotes, de l'EIER et résidants au Burkina, pour leur soutien tant moral que matériels.

Je remercie toute ma famille, mes amis de l'intérêt qu'ils ont bien voulu m'accorder malgré la distance qui nous sépare.

Je ne saurais terminer sans adresser mes remerciements à toute la 30<sup>ième</sup> promotion avec qui nous avons passé trois années.

## RESUME

L'érosion hydrique liée à la pluie et au ruissellement est en partie responsable de la dégradation des terres sahéliennes. Les exportations des matières solides en suspension et par charriage de fond et la diminution de leur fertilité posent de véritables problèmes de gestion des ressources naturelles dans ce milieu. Il est donc indispensable d'étudier les mécanismes de genèses de ruissellement et les processus d'érosion hydrique en milieu sahélien afin de les préserver des phénomènes de dégradation. L'étude est menée sur la station expérimentale de Katchari de l'INERA située à 20 km au Sud ouest de Dori, province de Seno (Burkina Faso).

Une campagne de 40 averses simulées à l'aide d'un simulateur de pluie type ORSTOM a permis d'aborder, dans 10 parcelles de 1 m<sup>2</sup>, l'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion. Après avoir rappelé les objectifs et les intérêts de la simulation de pluie, et les conclusions sur des études antérieures sur le ruissellement et l'érosion, la présente étude tente d'étudier l'influence des états de surfaces sur l'infiltrabilité et l'érodibilité des sols au sahel. Les trois principaux états de surfaces étudiés sont: surface de dessiccation (DES), surface d'érosion (ERO) et surface grossière (G). Les surfaces DES sont perméables et enherbées. Elles se présentent sous forme de buttes sableuses discontinues et de faible extension. Quant aux surfaces ERO, elles sont peu perméables et plus ou moins planes. Ces surfaces sont réparties en croûtes d'érosion sur matériaux sableux (ERO\_sb), sur matériaux limono-sableux (ERO\_ls) et sur matériaux carbonatés (ERO\_ca). Les surfaces grossières sont couvertes d'un épandage de graviers ferrugineux.

L'influence des états de surface sur l'infiltrabilité et érodibilité des sols a été mise en évidence. La variabilité de comportement de ces états de surfaces a permis de dégager deux grandes tendances :

- L'érodibilité forte des sols sur les surfaces ERO et faible sur la surface G, accompagnée d'une infiltrabilité faible et peu variables, est fortement influencée par les facteurs intrinsèques. Ces facteurs sont d'ordre physico-chimique, topographiques et granulométrique.
- L'infiltrabilité élevée des surfaces DES est sensible à la présence de couvert végétal, l'importance des activités biologiques et de la topographique (pente et micro-relief). Sur ces surfaces l'infiltrabilité a une incidence sur l'humidité initiale.

**Mots clefs:** simulation des pluies, érosion hydrique, ruissellement, terres sahéliennes, états de surfaces, érodibilité des sols, infiltrabilité des sols, surfaces de dessiccation, surfaces d'érosion, surfaces grossières.

# Sommaire

1.	INTRODUCTION.....	2
2.	PROCESSUS DE RUISSELLEMENT ET D'EROSION – ETUDE SOUS PLUIES SIMULEES.....	3
2.1.	SIMULATION DES PLUIES.....	3
2.2.	RUISSELLEMENT DE SURFACE ET INFILTRATION.....	4
2.3.	EROSION HYDRIQUE.....	8
3.	MATERIELS ET METHODES.....	14
3.1.	SITE D'ETUDE.....	14
3.2.	MATERIELS ET METHODES.....	18
4.	RESULTATS ET DISCUSSION.....	24
4.1.	RESULTATS.....	24
4.2.	DISCUSSION.....	48
5.	CONCLUSION ET PERPECTIVES.....	53
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	54
7.	ANNEXES.....	56
8.	Liste des tableaux.....	67
9.	Liste des figures.....	69

# **INTRODUCTION**

# 1. INTRODUCTION

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche de lutte contre la désertification au Sahel que l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et l'INERA (Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole) ont décidé de développer conjointement.

Le Sahel Burkinabé connaît de graves problèmes de dégradation des ressources naturelles (diminution des réserves en eau et de la biodiversité, érosion hydrique et éolienne, réduction de la fertilité des sols) engendrés par la pression exercée sur les terres (accroissement démographique). Cette dégradation, accélérée en raison d'une diminution de la pluviométrie lors des dernières décennies, provoque une modification des processus et mécanismes qui régissent les systèmes écologiques, ce qui, à terme, aboutit à une modification de l'état et l'aspect des ces écosystèmes (Casenave, 1998).

L'érosion hydrique liée à la pluie et au ruissellement est en partie responsable de la dégradation des terres sahéliennes. Les exportations des matières (solides et dissoutes) et la diminution de leur fertilité posent de véritables problèmes de gestion des ressources naturelles dans ce milieu.

Ce travail s'inscrit au sein des recherches effectuées sur un petit bassin versant à Katchari, dans la province de Seno au Burkina Faso. Il traite de l'infiltration et de l'érosion des sols sahéliens sous pluies simulées. Ces simulations ont été effectuées sur des petites formations éoliennes et des zones de glacis dégradés.

Biaou et *al* (1999) ont montré l'importance des événements de forte intensité dans le bilan annuel de l'érosion hydrique. L'objectif de ce travail est d'étudier quels sont les mécanismes mis en jeu lors de ces événements rares et le rôle des différents états de surfaces d'un bassin versant.

Les travaux se sont déroulés en deux phases. Une première phase est consacrée aux mesures et aux prélèvements des échantillons sous pluies simulées sur le site expérimental de Katchari et une deuxième phase au traitement et à l'interprétation des données. Le présent document est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation générale des principales théories relatives à la simulation des pluies, de l'état des connaissances actuelles sur les phénomènes de ruissellement, de l'infiltration et d'érosion dans les pays semi-arides en général et le Sahel en particulier.
- Le second chapitre porte sur les matériels et méthodes de l'étude.
- Le troisième chapitre présente les résultats et une discussion. Ce chapitre permet de montrer l'influence des états de surfaces sur les phénomènes de ruissellement et d'infiltration. Il aboutira également à la quantification des exportations des matières solides en suspension et par charriage de fond.

**PROCESSUS DE RUISSELLEMENT  
ET D'EROSION – ETUDE SOUS  
PLUIES SIMULEES**

## 2. PROCESSUS DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION – ÉTUDE SOUS PLUIES SIMULÉES

### 2.1. Simulation des pluies

#### 2.1.1. Historique

Selon Casenave et Valentin, les hydrologues se heurtaient lors de l'interprétation de leurs mesures, particulièrement à celles des bassins versants représentatifs et expérimentaux, à l'impossibilité de quantifier l'aptitude au ruissellement des différents types de sols.

Après avoir essayé avec un infiltromètre à double anneau (Muntz), il est donc apparu qu'un progrès pouvait être réalisé en s'affranchissant des aléas des précipitations naturelles par la technique de simulation de pluies. L'emploi des méthodes de simulation de pluies a débuté à l'ORSTOM en 1974 à Abidjan. Cette technique a été utilisée depuis longtemps aux Etats Unis (Mutchler et Hermsmeir 1965, HALL 1970, Swanson 1965). Un premier appareil, dérivé du simulateur de type SWANSON, a été utilisé, de 1975 à 1980 par une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM sur des sites échelonnés de la zone tropicale humide à la zone sahélienne (Cote d'Ivoire, Burkina Faso et Niger).

Dans le cadre de la présente étude, le mini-simulateur de pluie mis au point par l'ORSTOM (Asseline et Valentin, 1978) a été utilisé. Il est équipé d'un appareil électronique programmable permettant de calibrer les intensités de pluies en fixant l'angle de rotation de l'asperseur et du pas de temps. Le système d'aspersion est fixé au sommet d'une tour pyramidale de 4 m de haut. Il est relié à un manomètre de contrôle la pression d'admission dans ce système. L'ensemble est centré sur l'axe de la parcelle.

#### 2.1.2. Intérêt des études sous pluies simulées

Pour palier à de nombreuses contraintes que connaissent des études réalisées dans le domaine des relations eau – sol (bassins versant, parcelles d'érosion ou de ruissellement, bilan hydrique des sols etc..) telle que l'analyse des paramètres exerçant une influence sur l'infiltration et le ruissellement, la durée des études, l'extension spatiale et l'expérimentation, le simulateur des pluies présente un certain nombre d'intérêts.

Il permet entre autres de :

- fixer à volonté les caractéristiques des averses,
- fixer l'état d'humectation des sols par des arrosages successifs,
- tester différents types de sols, d'états de surfaces, de couverture végétale, ou de pentes;
- autoriser une analyse beaucoup plus fine des phénomènes (Casenave et Valentin, 1989).

### 2.1.3. Objectifs des études sous pluies simulées

La technique de la simulation de pluies présente de multiples applications. Les principaux objectifs sont : l'analyse du rôle des différents facteurs influençant le ruissellement, l'infiltration et l'érosion tels que la pluie, le sol ou l'état de surface, l'état d'humectation du sol, la couverture végétale, les pratiques culturales etc.; la détermination des crues rares; l'étude de la genèse des crues; l'étude des lois théoriques de l'infiltration; l'étude des réorganisations superficielles des sols; l'étude des stocks hydriques; la détermination des intensités limites de ruissellement; l'étude de l'érodibilité des sols etc.

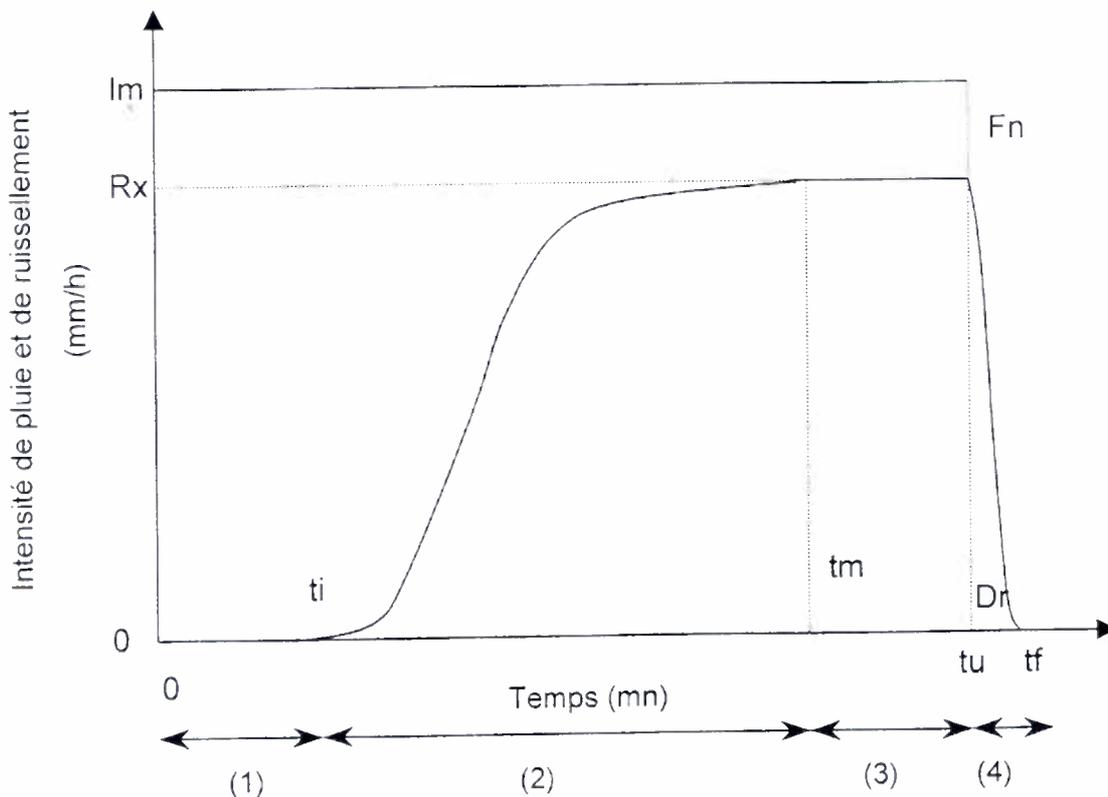
## 2.2. Ruissellement de surface et infiltration

### 2.2.1. Les quatre phases observées sous pluies simulées

Les premières analyses sous pluie simulée ont permis de distinguer quatre phases, qui surviennent lors des processus de ruissellement (Lafforgue, 1977; Lafforgue et Casenave, 1980; Casenave et Valentin, 1989):

- Phase d'imbibition (1)
- Régime transitoire (2)
- Régime permanent (3)
- Phase de vidange (4).

Ces quatre phases peuvent être observées sur l'hydrogramme de figure 2.1



**Figure 2.1** – Hydrogramme de ruissellement théorique sous averse d'intensité constante (Casenave et Valentin, 1989).

### Phase d'imbibition

Au cours de la phase d'imbibition (du début de la pluie jusqu'à un temps  $t_i$ ) aucun ruissellement ne se manifeste. Cette phase est caractérisée par une hauteur de pluie, infiltrée ou stockée en surface, dite pluie d'imbibition,  $P_i$ . L'infiltration est d'abord totale, l'intensité potentielle d'infiltration  $F(t)$  étant, en chaque point de la parcelle, supérieure à l'intensité de la pluie. Le sol s'humecte progressivement, la capacité d'infiltration diminue et devient en certains points inférieure à l'intensité de la pluie. L'eau commence alors à ruisseler et à remplir les dépressions de la parcelle. Au temps  $t_i$ , les flaques débordent et l'eau qui se met en mouvement parvient à l'exutoire. Pendant cette phase on a :

$$L_r(t)=0 \quad (1)$$

$$D_m(t)=0 \quad (2)$$

$$P_u(t)-L_i(t)-S(t)=0 \quad (3)$$

Avec

$I_r(t)$  lame ruisselée à l'instant  $t$

$D_m(t)$  détention superficielle mobilisable à l'instant  $t$

$P_u(t)$  Hauteur de pluie à l'instant  $t$

$L_i(t)$  lame infiltrée à l'instant  $t$

$S(t)$  lame stockée en surface à l'instant  $t$

### Régime transitoire

Lorsque l'infiltration diminue, les flaques formées se débordent et donnent naissance au ruissellement. La totalité de la superficie participe au ruissellement si toutes les flaques débordent. La hauteur moyenne de la lame d'eau en mouvement à la surface ( $D_m$ ) augmente. Cette phase correspond à un régime transitoire pendant lequel on a :

$$I_p(t) - I_r(t) - I_i(t) - \frac{dD_m}{dt} - \frac{dS}{dt} = 0 \quad (4)$$

Avec

$I_p(t)$  l'intensité de la pluie à l'instant  $t$

$I_r(t)$  l'intensité de ruissellement à l'instant  $t$

$I_i(t)$  l'intensité d'infiltration à l'instant  $t$

### Régime d'écoulement permanent

A partir d'un temps  $t_m$  il apparaît un palier de ruissellement qui se poursuivra jusqu'à la fin de l'averse dont l'intensité a atteint un maximum. L'intensité d'infiltration est alors minimale. Un régime d'écoulement permanent s'est établi. Ce régime, avec l'intensité de la

pluie, cesse durant un intervalle de temps assez bref au cours duquel les intensités de ruissellement et d'infiltration changent jusqu'à un nouvel équilibre. On retrouve alors un palier qui correspond à un nouveau régime permanent qui se caractérise par :

$$R(t) = R_x \quad (5)$$

$$F(t) = F_n \quad (6)$$

$$\frac{dD_m}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (8)$$

Avec

$$I - R_x - F_n = 0 \quad (9)$$

$R_x$  = intensité maximale de ruissellement et  $F_n$  l'intensité minimale d'infiltration.

### *Vidange*

Après la fin de la pluie, le ruissellement décroît jusqu'à un temps  $t_f$  pour s'annuler par la suite. La quantité d'eau qui s'écoule représente la fraction non infiltrée de la détention superficielle mobilisable. elle répond à l'équation :

$$L_r(t_f) - L_r(t_u) = D_m(t_u) + S(t_u) - S(t_f) + Li(t_u) - Li(t_f) \quad (10)$$

### 2.2.2. Variables caractéristiques de l'infiltration

Il s'agit dans cette partie d'étudier les principales variables qui caractérisent l'infiltration et le ruissellement au cours d'une averse.

#### *Pluie d'imbibition*

Cette pluie correspond à la quantité d'eau infiltrée ou stockée (accumulée) en surface avant le déclenchement du ruissellement. La pluie d'imbibition ( $P_i$ ) exprimée en mm varie en fonction de l'état d'humectation initial de la parcelle. Pour un ruissellement débutant au cours de la première intensité de la pluie, les valeurs de  $P_i$  correspondent à cette intensité pour la plupart des sols testés (Casenave et Valentin, 1989). Il faudrait augmenter les valeurs de  $P_i$  pour une intensité plus faible et les diminuer pour une intensité plus forte.

#### *Coefficient d'infiltration*

Noté  $K_i$ , le coefficient d'infiltration traduit la capacité d'infiltration d'un état de surface. A chaque pluie correspond une lame infiltrée qui est définie par :

$$Li = Pu - (Lr + Dr) \quad (11)$$

A cette lame correspond un coefficient d'infiltration exprimé en % et qui est défini par :

$$Ki(\%) = 100 \times \frac{Li}{Pu} \quad (12)$$

Pour une parcelle donnée on peut définir un coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole. Il est donné par :

$$Ki(\%) = 100 \times \frac{\sum Li}{\sum Pu} \quad (13)$$

#### *Intensité limite de ruissellement*

Une averse simulée comportant plusieurs intensités permet de tracer les droites  $Rx(I)$  ou  $Fn(I)$ , de même que pour une pluie donnée on peut tracer une relation  $Lr(Pu)$  (Casenave, 1982).

Pour chaque parcelle, le report des relations  $Rx(I)$  correspondant à chacun des pluies donne un faisceau de droites plus ou moins parallèles dont l'abscisse à l'origine est fonction de IK et représente l'intensité limite de la pluie,  $I_l$  au-dessous de la quelle il est possible d'obtenir un ruissellement. Chaque droite a une équation de la forme

$$Rx = K(I - I_l) \quad (14)$$

Pour toutes les droites d'une même parcelle,  $I_l$  peut s'exprimer sous forme :

$$Rx = aI + bIK + c \quad (15)$$

Avec  $Rx$ ,  $I$  et  $IK$  respectivement l'intensité de ruissellement, l'intensité de pluie et l'indice d'humidité de Kohler ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sont des constants de l'équation. Cette équation caractérise la parcelle et donc un état de surface donné.

#### *Détention superficielle récupérable*

Notée  $Dr$ , la détention superficielle récupérable traduit la valeur de la lame ruisselée après l'arrêt de la simulation. Pour toutes les averses ayant donné lieu à du ruissellement, les valeurs de la détention superficielle récupérable en fonction de l'intensité de ruissellement correspondent à l'arrêt de la pluie. Ces valeurs peuvent être déterminées soit par le limnigraphe mécanique ou alors à partir des données du capteur de pression. Il est défini à partir du diagramme  $Dr(Rx)$  un rapport noté  $Td$  qui s'exprime par

$$Td = Dr/Rx. \quad (16)$$

Ce rapport traduit en quelque sorte la résistance offerte au ruissellement par la surface du sol de la parcelle (rugosité et pente).

Des études ont montré pour une même pente topographique et une même intensité de ruissellement, ce sont les parcelles cultivées qui présentent des valeurs de détention superficielles les plus élevées. Une augmentation de pente a pour effet de diminuer la détention superficielle. Cet effet est d'autant plus sensible que la pente est faible: il semble que sur sol nu les variations de pente entre 7% et 20% n'aient aucune influence sur la détention superficielle(Lafforgue et al,1976).

#### *Lame ruisselée*

Des études sur  $L_r(P_u)$  ont montré que la hauteur de la lame ruisselée croît linéairement avec la pluie au-delà d'une valeur  $P$  qui correspond au début du régime permanent et en deçà on obtient une bonne approximation. Elle croît également avec l'intensité de la pluie lorsque celle-ci est supérieure à une intensité limite de ruissellement  $I_l$  (Lafforgue et al, 1976).

### **2.3. Erosion hydrique**

Le ruissellement de surface est en partie responsable de la dégradation des terres sahéniennes et donc de son érosion. La pluie est à l'origine des réorganisations superficielles des sols. Elle est responsable de la formation des croûtes de surface et autres facteurs à l'origine des érosions de ces sols. Ainsi, pour mieux comprendre le principe de la genèse des érosions, nous devons comprendre les processus et les facteurs mis en jeu lors des réorganisations superficielles.

Dans la formation d'une croûte plusieurs mécanismes peuvent intervenir simultanément ou se succéder dans le temps et dans l'espace (Casenave et Valentin, 1989).

Au cours d'une pluie on peut distinguer plusieurs phases qui sont la mobilisation des particules, leur arrachement, le transport et le dépôt. Après dessèchement de la surface le vent peut à son tour provoquer l'arrachement, le transport et le dépôt de certaines fractions.

Il faut rappeler que le vent, au même titre, que l'eau est à l'origine des réorganisations superficielles. Dans cette partie, nous aborderons brièvement les principaux mécanismes de l'érosion hydrique. Nous nous consacrons en suite au calcul des exportations des matières solides.

#### *2.3.1. Mobilisation des particules par humectation*

Avant d'être arrachées sous l'effet des gouttes de pluies ou du ruissellement, les particules terreuses telles que les grains de sable ou les petits fragments d'agrégat doivent être entraînés.

Casenave et Valentin ont distingué trois processus qui expliquent cette phase initiale de la désagrégation. Il s'agit de l'éclatement (sous l'action de la succion capillaire qui attire la phase liquide vers le centre de l'agrégat), la dispersion (les forces de liaisons étant vaincues) et la fissuration (dans le cas des matériaux qui présentent plus de 50% d'argile gonflante).

#### *2.3.2. Impact des gouttes de pluies*

Les gouttes de pluies jouent un rôle très important dans les phénomènes d'érosion. En effet le choc des gouttes de pluie sur le sol détruit les agrégats, libère les particules de sols

pour le transport et les projette à faible distance. Cet effet de rejaillissement appelé «Splash» est fonction tant des caractères du sol, texture, stabilité structurale, taux de matières organiques que de l'énergie cinétique et de l'angle de la pluie au sol. Pour la genèse de ruissellement et donc de l'érosion, l'effet Splash peut être déterminant. Ceci est dû à l'imperméabilisation par battance que cet effet a provoqué sur les surfaces nues comme la plupart des zones sahéniennes.

Selon les auteurs Farres 1987 et Boiffin 1984, les particules déplacées par effet Splash retombent au sol et participent plus ou moins rapidement selon leur quantité et leur taille au comblement de la porosité inter agrégat et de ce fait à l'épaississement et à l'extension de la croûte.

### 2.3.3. Le ruissellement

Le ruissellement joue aussi un rôle non négligeable dans les transports des particules. Suivant l'effort de cisaillement, la vitesse du ruissellement, la vitesse de frottement, le débit liquide ou l'impulsion cinétique, une particule est arrachée, transportée ou déposée. Toutes fois, l'arrachement dû au ruissellement est largement inférieur à celui provoqué par l'impact des gouttes de pluies selon Hudson (1973). Ces particules sont transportées en suspension (cas des particules petites), par le charriage de fond pour les plus grossières. Elles peuvent se déposer sous différents types de flux: turbulents, laminaires qui donne naissance à un tri granulométrique (Mücher et De Ploey, 1977) ou nuls suivant la loi de Stockes.

### 2.3.4. La dessiccation

Dans la zone sahénienne, les croûtes de dessiccation sont déterminantes dans les processus de transport des particules. Deux facteurs essentiels contrôlent leur formation: le retrait et l'induration.

Le retrait : Casenave et Valentin (1989) ont montré que l'eau, en s'évaporant sous l'effet du soleil ou du vent quelque temps après une pluie, laisse en surface une croûte grise ou noirâtre qui peu à peu se craquelle.

Ces fissures favorisent au moins temporairement l'infiltration de l'eau. Elles s'opèrent préférentiellement dans les zones de contact de l'argile et des particules plus grossières, sable et limons; les zones de contact des argiles rigides et des argiles gonflantes et dans les zones restées plus humides du fait de la présence des résidus organiques.

L'induration : La présence d'une croûte à la surface du sol est souvent signalée par sa dureté particulière, supérieure à celle du sol sous-jacent. Au fur et à mesure qu'une croûte se dessèche, ses constituants se rapprochent, augmentant ainsi les forces de liaisons de Van de Waals et donc de la cohésion générale du matériau. Ainsi la dureté des croûtes s'accroît exponentiellement avec la diminution de leur humidité selon Valentin (1986).

### 2.3.5. Typologie des états de surfaces

Selon le mode de formation on peut distinguer plusieurs types de croûtes. Ces croûtes correspondent aux différentes phases présentées précédemment (érosion hydrique et action du vent). Dans ce paragraphe il est question de dresser la typologie simplifiée des croûtes proposées par Casenave et Valentin (1989). Il s'agit de:

### *croûte structurale (ST)*

Suivant la taille des constituants on distingue deux grands types :

#### Matériaux argileux

C'est le cas des croûtes formées par comblement des espaces entre agrégats par les grains de sables ou par le mélange fluide formé par l'argile qui s'écoule entre les espèces inter agrégats. Ce type favorise fortement le ruissellement.

#### Matériaux sableux

C'est le cas des croûtes formées suite au tri granulométrique des grains de sable sous l'action des gouttes de pluies ;

### *croûte de ruissellement (RUI)*

Il s'agit des différents sédiments déposés dans la lame de ruissellement plus ou moins consolidés lors de la dessiccation. Très fréquemment ils recouvrent une croûte d'érosion ;

### *croûte d'érosion (ERO)*

L'arrachement par l'eau et par le vent constitue les processus dominant. Une croûte d'érosion peut se former aux dépend d'une croûte structurale argileuse, d'une croûte structurale sableuse et d'une croûte de ruissellement ;

### *croûte de dépôt éolien (EOL)*

Elle résulte du dépôt de sable fin ayant subi la déflation éolienne aux alentours des petites dunes et les barrières végétales. Selon le type de dépôt (lit sableux bien trié ou apport de particules fines) ces croûtes généralement évoluent en croûtes de dessiccation ou en croûtes structurales ;

### *croûte de décantation (DEC)*

C'est la croûte qui se forme après sédimentation de particules dans un liquide au repos : le tri granulométrique très marqué entre les différents lits qui la constituent, d'éléments grossiers à la base, fins en surface, favorise la formation des fissures et des fentes au cours de la dessiccation ;

### *croûte de dessiccation (DES)*

Elle se forme à la suite des cycles humectation-dessiccation. Ce phénomène serait particulièrement sensible à la surface du sol où la saturation et la dessiccation sont les plus marquées. Toute fois la cohésion de ce type de croûte reste faible : elle se brise aisément sous la pression des doigts.

### *Croûte à charge grossière (G)*

Une croûte est considérée grossière des lors que les éléments grossiers excèdent 40 % de la surface. Une forte charge grossière en surface s'accompagne le plus souvent d'un degré de réorganisation maximal. Les éléments grossiers se trouvent enchâssés dans les microhorizons.

#### 2.3.6. Les facteurs de réorganisation superficielle

Selon Casenave et al 1989 deux grandes classes peuvent se distinguer: les facteurs intrinsèques et les facteurs externes.

##### *Facteurs intrinsèques*

Ce sont des facteurs très peu soumis à des variations saisonnières ou à l'intervention de l'homme. Ces facteurs sont les plus courants de l'environnement et les moins facilement contrôlables.

Le sol, par l'intermédiaire de ses propriétés que sont l'organisation pédologique et les propriétés physico-chimiques, agit sur les réorganisations superficielles. Certains types de sols correspondent à des états de surface et à des comportements caractéristiques c'est le cas par exemple des vertisols, des sols bruns eutrophes, des sols halomorphes.

Les facteurs topographiques qui influencent ces réorganisations superficielles sont : l'inclinaison des pentes, la longueur des pentes et la forme des pentes. Plusieurs explications ont été avancées (Poesen, 1986).

A titre d'exemple, l'érosion en nappe est suffisamment marquée pour déblayer les matériaux au fur et à mesure de leur détachement par la pluie ; la densité et la profondeur des griffes d'érosion croissent avec la pente. Sur des petits bassins versants il a été montré que le coefficient de ruissellement diminue avec la pente jusqu'aux environs de 2,5% et reste stable au-delà de cette limite.

##### *facteurs externes*

Il s'agit de l'eau, le vent, la couverture du sol, l'activité faunique, les systèmes de cultures.

##### *L'eau*

Le type et le degré de réorganisation superficielle dépendent en premier lieu des modalités d'apport de l'eau :

- Sous forme de pluie : naturelle ou artificielle
- Sous forme de lame d'eau : inondation, remontée de la nappe, irrigation gravitaire
- L'énergie cinétique: des pluies
- L'état hydrique du sol est aussi déterminant dans les processus de formation de croûtes d'érosion.

## Le vent

Le vent est un des facteurs conditionnels important des états de surface par son rôle sur l'érosion, le transport et la sédimentation des particules sableuses qui, en se déposant, peuvent totalement modifier un état de surface (dune, placage sableux). Les vitesses moyennes mensuelles et annuelles sont généralement assez faibles (2 à 4 m/s).

## La couverture du sol

En zone sahélienne la couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, doit être considérée comme l'un des facteurs conditionnels essentiels des états de surfaces. Elle contribue à assurer la protection la plus efficace de la surface du sol contre l'érosion.

## L'activité faunique

Les vers de terre et les termites contribuent aux phénomènes de réorganisations superficielles des croûtes. Leurs activités modifient très sensiblement le fonctionnement du sol, destruction des pellicules et ouverture d'une porosité fonctionnelle assurant une infiltration effective par exemple.

## Le travail du sol

Des études sur la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest ont montré que la succession ininterrompue d'arachide entraîne de sérieux problèmes de dégradation structurale des sols sableux (Carreau et Tourte, 1967). Cependant l'introduction d'une jachère de longue durée tend à limiter les risques (Quantin et Combeau, 1962).

Le travail du sol et les techniques culturales participent à la modification de la structure du sol.

### 2.3.7. Approche méthodologique de quantification de l'érosion

Plusieurs méthodes de mesure de flux des matières à l'échelle du bassin versant en général et à l'échelle des parcelles de 1 m<sup>2</sup> en particulier peuvent être utilisées. Il s'agit de la méthode empirique de Wischmeier et Smith 1960 et la méthode déterministe.

Ce flux s'exprime par :

$$F_i = C_i Q_i \quad (17)$$

Avec  $F_i$ ,  $Q_i$  et  $C_i$  des valeurs instantanées respectives du flux, du débit et de la concentration au moment du prélèvement. De nombreuses méthodes ont fait l'objet d'un certain nombre de travaux (Bolland, 1984).

Forceri, 1994 a montré qu'il n'est pas facile de donner une estimation correcte des flux de matières sur une période plus longue ; l'année par exemple. Le choix de la méthode de calcul des flux est alors important quant à la fréquence d'échantillonnage est faible.

### *Méthode empirique de Weischmeier et Smith*

Cette méthode s'appuie sur l'application de l'équation universelle de pertes en sols (Wischmeier et Smith, 1960). Cette équation ou l'érosion est une fonction du produit de 5 facteurs, la plus adoptée par les spécialistes en conservation des sols, prend la forme suivante :

$$E = R.K.L.S.C.P$$

(18)

Où E est l'érosion mesurée ou prévisible en t/ha; R est un indice d'agressivité climatique tenant compte à la fois de l'énergie cinétique des pluies et de leurs intensités maximales; K l'indice d'érodibilité des sols (sensibilité à l'action de la pluie); LS est le facteur topographique fonction de l'inclinaison et de la longueur et de la pente, C est le facteur de couverture végétale (effet favorable ou défavorable des pratiques culturales) et P le facteur qui caractérise les pratique de lutte anti-érosive.

Il faut noter qu'il s'agit d'un modèle empirique établi à partir du dépouillement statistique de 10 000 résultats annuels de mesures de l'érosion sur parcelles expérimentales et sur petits bassins versants.

### *Méthodes déterministes*

Cette méthode consiste à rechercher des relations entre les concentrations et les débits ou encore entre les flux et les débits.

Le principe de calcul se repose sur :

$$\int_{t_1}^{t_2} CQ.dt \quad (19)$$

$$\text{Avec } C = f(Q) \quad (20)$$

Les relations entre C et Q sont déterminées à partir de relations simples.

Les critiques souvent sont faites sur ces méthodes portent sur la charge transportée pendant un intervalle de temps donné s'exprimant uniquement en fonction du débit.

## **MATERIELS ET METHODES**

### 3. MATERIELS ET METHODES

#### 3.1. Site d'étude

Cette étude a été menée sur la station expérimentale de Katchari de l'INERA. Celle-ci est localisée dans le Nord-Ouest du Burkina Faso, à 20 km de Dori, province de Seno (14°00'20"N, 0°2'50"W) en zone sahélienne et couvre une superficie de l'ordre de 1260 ha.

##### 3.1.1. *Données climatiques*

La zone sahélienne représente 25% de la superficie totale du Burkina Faso. Elle est délimitée au sud par l'isohyète 600mm, et présente une seule saison de pluies allant de juin à septembre. La pluviométrie annuelle moyenne enregistrée à Dori (**tableau 3.1**) sur la période de 1925 à 1998 (coefficient de variation = 24%) est estimée à 512 mm avec un maximum de 181 mm en août (Casenave 1998). On note une extrême variabilité de la pluviométrie caractéristique des milieux sahéliens.

**Tableau 3.1-** Pluviométrie mensuelle moyenne (Moy), minimale (Min.) et maximale (Max.) de Dori pour la période de 1925 à 1998

	Janv.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct.	Nov.	Dec
Max.	19,0	25,0	32,8	41,5	82,5	213,2	308,5	317,1	244,0	97,9	18,0	11,6
Moy	0,4	0,5	1,9	4,4	25,5	62,7	133,4	181,1	85,4	15,5	0,6	0,2
Min.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9	45,8	29,5	8,6	0,0	0,0	0,0

Les températures moyennes annuelles enregistrées dans cette zone oscillent entre 23,4 et 33,8 °C pour la période de 1926 à 1984. Les valeurs moyennes de températures minimales mensuelles varient entre 13,9 °C et 26,7°C tandis que les valeurs moyennes des températures maximales mensuelles entre 32,8°C et 41,5°C (**tableau 3.2**).

**Tableau 3.2-** Températures mensuelles moyennes (Moy.), minimale (Min.) et maximale (Max.) à Dori sur la période de 1926 à 1984 en °C

	Janv.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct.	Nov.	Dec
Max.	9,7	11,4	14,9	18,7	21,6	20,2	19,9	19,7	19,8	18,7	14,1	10,2
Moy	23,4	26,1	29,7	32,8	33,8	31,8	29,2	27,8	29,0	30,5	27,5	24,2
Min.	36,9	40,3	42,6	44,2	44,4	42,6	39,1	36,7	39,0	40,8	39,8	37,4

##### 3.1.2. *La végétation, les sols et la morphologie du paysage*

La végétation est de type savanes sèches. Elle se caractérise par une couverture végétale peu dense, du type herbeuse ou arbustive (Hotin et Ouedraogo, 1975).

Les sols quant à eux, s'inscrivent dans le domaine de la pédogenèse fersiallitique en milieu sahélien typique (Boulet, 1968 ; Pédro, 1987). Ils sont développés pour la plus grande partie au dépend d'un substrat granitique. Le paysage se présente sous forme d'une pénéplaine faiblement ondulée dans laquelle on peut distinguer quatre compartiments principaux

- ♣ Quelques reliefs isolés de faible extension correspondant à des buttes armées par accumulations ferrugineuses indurées très anciennes ou à des formations précambriennes dénudées (granites, migmatites, parfois roches volcano-sédimentaires birimiennes).

- ♣ Des ergs (ou cordons dunaires) de différentes époques du quaternaire, forment des bandes orientées est-ouest, de plusieurs dizaines de longueurs et de quelques kilomètres de largeur.

- ♣ Des bas fonds correspondant aux axes d'écoulements principaux et aux mares. Ils sont caractérisés par des sols noirs vertiques et une végétation relativement dense de type forêt galerie.

- ♣ Des longs versants de type glacis qui sont caractérisés par une pente très faible qui occupe la majeure partie du paysage et présentent des sols rouges plus ou moins remaniés. Ils relient les deux premières unités aux bas fonds

### 3.1.3. Le relief et les états de surface

Sur l'ensemble du bassin versant le relief est peu marqué, les pentes sont de l'ordre de 1% de l'amont en aval. Les reconnaissances sur le terrain ont permis d'identifier quatre principales surfaces élémentaires ou états de surface répondant à la classification de Casenave et al, (1998). On y distingue :

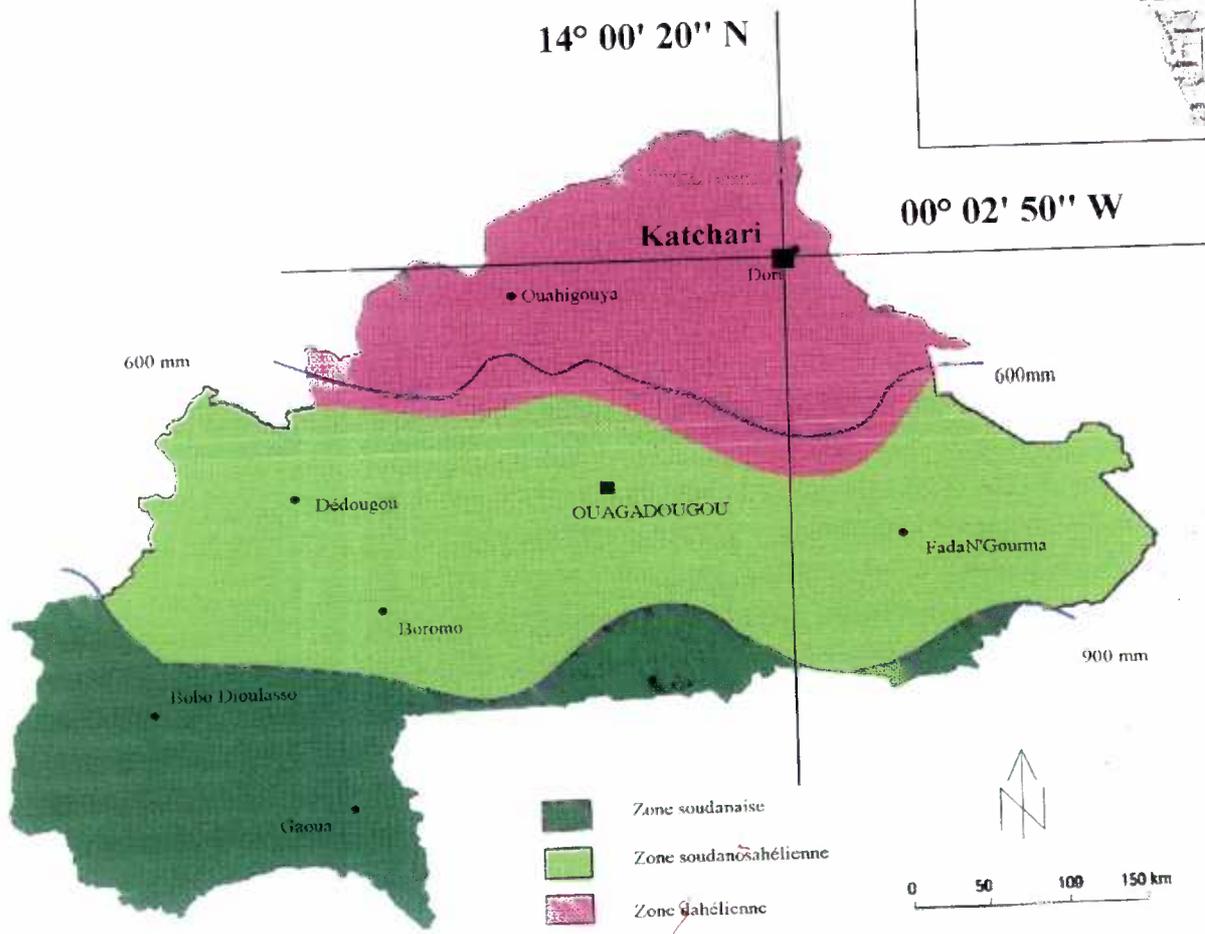
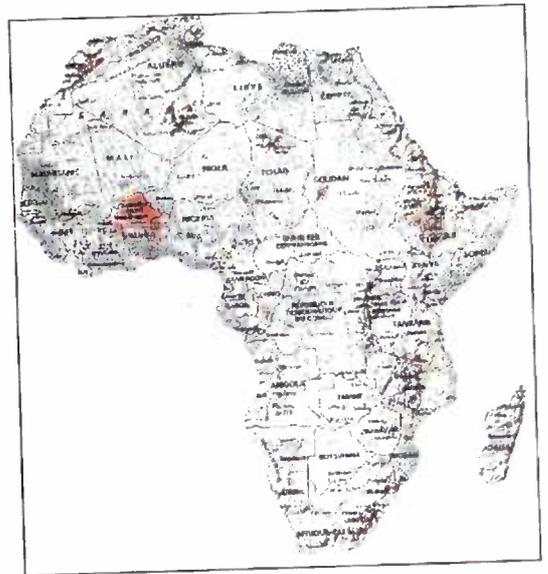
Les surfaces à croûte d'érosions, planes, peu perméables (capacité d'infiltration de 2 mm/h) sans rugosité et sans végétation, représentent 24,5% de la surface total soit 0,336 ha. Il s'agit d'un milieu très favorable au ruissellement en nappe qui se marque par des traces d'érosion hydrique de type régressif.

Les placages sableux d'origine éolienne, plus perméables (capacité d'infiltration de 28 mm/h) où se concentre la quasi-totalité de la végétation herbeuse. Ils représentent 72,25% de la surface totale soit 0,99 ha. Ces placages se présentent sous formes de butes sableuses discontinues et de faible extension spatiale. Leur modelé présente une rugosité notable.

Des surfaces dénudées couvertes d'un épandage de graviers ferrugineux et quartzeux, pratiquement sans végétation (2 arbustes/ha). Elles couvrent 2,14% de la surface totale, soit 0,029 ha.

Des petites zones endoréiques, peu étendues qui couvrent 1,11% de la superficie totale, soit 0,015 ha. Elles sont caractérisées par des croûtes de décantation et occupées par des formations herbeuses peu denses.

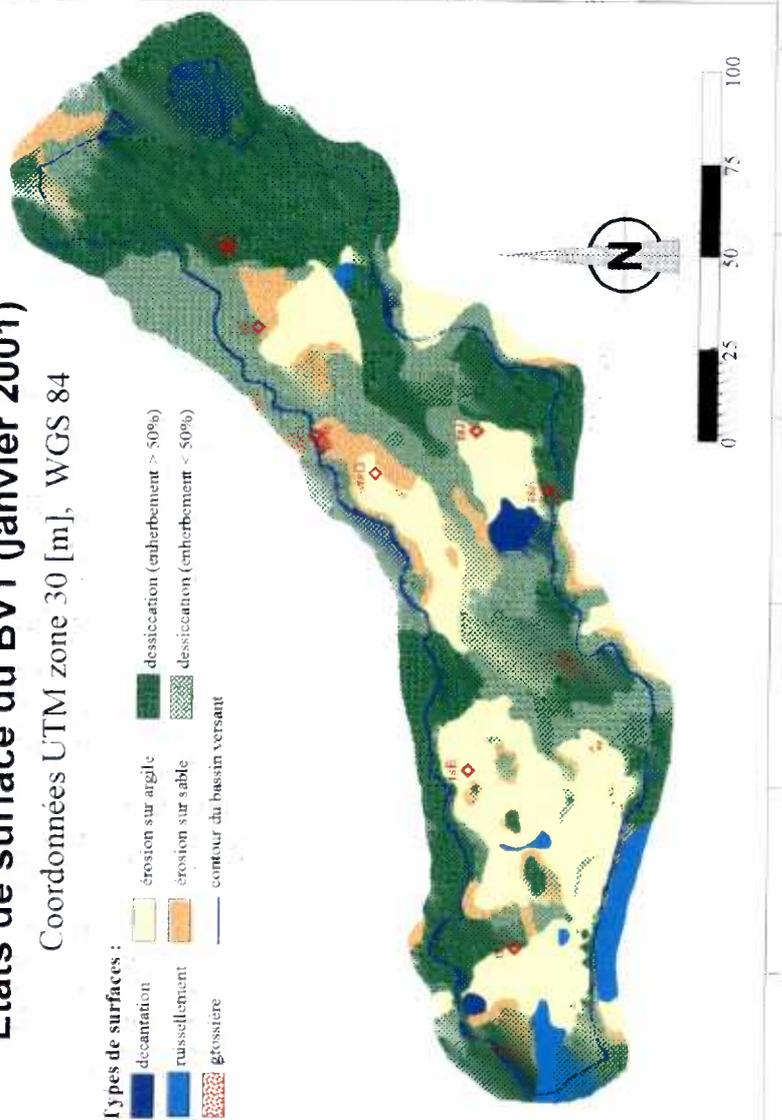
# SITUATION DE LA ZONE D'ETUDE



# Etats de surface du BV1 (janvier 2001)

Coordonnées UTM zone 30 [m], WGS 84

- Types de surfaces :
- decantation
  - ruissellement
  - grossière
  - érosion sur argile
  - érosion sur sable
  - contour du bassin versant
  - dessiccation (enherbement > 50%)
  - dessiccation (enherbement < 50%)



1551100

1551050

1551000

1550950

1550900

809800

809850

809900

809950

810000

810050

810100

### 3.2. Matériels et Méthodes

Afin d'étudier les mécanismes de genèse du ruissellement et les processus d'érosion hydrique en milieu sahélien, des essais de pluies ont été effectués sur les différents états de surfaces d'un bassin versant.

Dans le cadre de la présente étude, l'effort est concentré sur l'étude de l'influence des états de surfaces sur l'infiltration et le ruissellement d'une part et d'autre part la quantification des pertes en terre sur des parcelles. Il s'agira aussi d'effectuer une comparaison des niveaux de mesure des paramètres hydrologiques que sont la lame ruisselée, l'intensité de ruissellement etc.. Les trois méthodes utilisées sur le terrain lors de la simulation de pluie consistent en les estimations des différents paramètres par le limnigraphe mécanique à flotteur, le capteur de pression automatique ISCO 4220 et par capacité (Cf. photos n°2).

Dans ce qui suit, nous décrivons le dispositif mise en place pour effectuer ces mesures, les méthodes de prélèvements, les techniques d'analyse des échantillons et les méthodes d'observation et d'interprétation des données brutes.

#### 3.2.1. Protocoles de pluies simulées

Les mesures présentées dans ce travail études ont été effectuées sur un ensemble de 10 parcelles de 1 m<sup>2</sup> situées sur un bassin versant BV1 de 1,37 ha. Ces parcelles ont été positionnées sur des surfaces de type DES, des surfaces de type ERO et des surfaces de type G (Cf. photos n°3 et 4). Ces parcelles ont été soumises à quatre simulations de pluie chacune (tableau 3.3) : deux averses décennales et deux averses annuelles. De nombreux facteurs influencent le ruissellement et l'infiltration. Il s'agit de la nature de l'averse qu'on peut caractériser par son intensité et sa durée, le type de sol ou les états de surfaces en zones sahéliennes définies ci-dessus, l'état d'humectation du sol, la pente, la couverture végétale (englobée dans l'état de surface) et l'activité faunique. Des mesures effectuées sous pluies simulées ont montré que sur des parcelles, la pente n'avait pas d'influence sensible (Casenave *et al*, 1978).

Dans la définition des protocoles de pluies simulées quelques contraintes se sont imposées quant à la forme et au nombre de pluie. Les protocoles ont été établis en respectant le plus possible les données climatiques de la région. C'est ainsi que la forme de la pluie a été déterminée en tenant compte de la hauteur de la pluie journalière de fréquence annuelle (50 mm) ou décennale (85 mm) ainsi que des relations intensités–durées–fréquence du poste pluviographique de la station météorologique de Dori. Le total des pluies ne doit pas excéder la valeur moyenne de la pluviométrie annuelle sur une parcelle donnée. Le protocole adopté peut être schématisé comme l'indique les *tableaux 3.3 et 3.4*

**Tableau 3.3** - Protocole simplifié des pluies simulées de 20/03/01 au 03/04/01

Forme de la pluie	P (mm)	ta (heures)	IKn
Décennale	82.5		0
Annuelle	50	1	80.8
Annuelle	50	144	7
Décennale	82.5	1	56

Avec

P : hauteur totale de la pluie; ta: temps de ressuyage entre deux pluies; IK: indice d'humectation des sols.

**Tableau 3.3** - Protocole de mesure sous pluies simulées de 20/03/01 au 03/04/01

Date	Parcelles															
	ta	E	D	ta	J	ta	G	H	ta	B	I	ta	A	C	ta	F
23/03/01		PD1	PD1													
23/03/01	1h	PA1	PA1													
24/03/01					PD1											
24/03/01				1h	PA1											
25/03/01						PD1	PD1									
25/03/01						1h	PA1	PA1								
26/03/01									PD1	PD1						
26/03/01									1h	PA1	PA1					
27/03/01												PD1	PD1			
27/03/01												1h	PA1	PA1		
28/03/01																PD1
28/03/01															1h	PA1
29/03/01		PA2	PA2													
29/03/01	6j	PD2	PD2													
30/03/01					PA2											
30/03/01				6j	PD2											
31/03/01						PA2	PA2									
31/03/01						6j	PD2	PD2								
01/04/01									PA2	PA2						
01/04/01									6j	PD2	PD2					
02/04/01												PA2	PA2			
02/04/01												6j	PD2	PD2		
03/04/01																PA2
03/04/01															6j	PD2

Avec

ta, le temps de ressuyage (temps séparant les averses au sein d'une parcelle); E, D, J etc. les références des parcelles étudiées.

En utilisant les relations Intensités – durée - fréquence et l'étude statistique des séries pluviométriques du poste de Dori, on a déterminé pour les pluies simulées les formes de celles-ci. La succession de la pluie telle qu'elle a été faite sur chacune des parcelles, est indiquée dans le *tableau 3.5* ci-après:

**Tableau 3.5** - Succession d'intensités pour les deux formes de pluies simulées

Pluie décennale (PD)	Pluie annuelle (PA)
10 minutes à 30 mm/h	10 minutes à 36 mm/h
10 minutes à 135 mm/h	10 minutes à 120 mm/h
10 minutes à 120 mm/h	10 minutes à 90 mm/h
10 minutes à 90 mm/h	10 minutes à 54 mm/h
10 minutes à 70 mm/h	
10 minutes à 50 mm/h	

### 3.2.2. Instrumentation et prélèvements

#### *Instrumentation*

L'eau de ruissellement de surface est prélevée grâce à dix pièges à ruissellement A, B, C, D, E, F, G, H, I, J dont quatre (E, G, I, J) sont installés sur les croûtes de la surface type ERO, un piège (H) sur la croûte de la surface type G et le reste (A, B, C, D, F) sur les croûtes de la surface DES (Cf. photos n°1, 3 et 4).

Un mouvement de balancement est imprimé par un *simulateur automatique* qui permet de calibrer l'intensité de pluie en fonction de l'angle de balancement de l'aspersion. Le simulateur est relié par le biais d'une conduite de petit diamètre à l'aspersion. Cet aspersion muni d'un gicleur est monté sur une tour pyramidale de quatre mètres de hauteur permettant le centrage du système d'aspersion sur l'axe de la parcelle. Deux manomètres sont installés pour le contrôle de la pression d'admission de l'eau au gicleur (Cf.; photo n°2) donc la constance du débit et de pression au refoulement de la pompe.

L'angle de balancement est inversement proportionnel à l'intensité de pluie. Cet appareil est relié directement, par le biais d'une conduite de faible diamètre, à l'aspersion muni d'un gicleur pour la dispersion de la pluie autour d'une parcelle.

Un *limnigraphe mécanique à flotteur* (cf.; photo n°2) est installé sur le collecteur pour l'échantillonnage de pluie. Il permet de faire les enregistrements des hauteurs de pluies dans le temps sur la parcelle.

Un *capteur de pression automatique* de type ISCO (Cf. photo n°2) est installé pour également le suivi de la hauteur de pluie.

Des flacons fasoplast de 250 ml ont été utilisés par la méthode capacité au pas de cinq minutes pour le prélèvement des échantillons.

Des *tarières* ont été utilisées pour prélever des échantillons de sols afin de suivre l'évolution de l'humidité du sol par la méthode gravimétrique d'une part et d'autre Pour déterminer la profondeur du front d'humectation, avant et après la pluie simulée, nous avons utilisé des *pénétrromètres* (Cf. photo n°2).

#### *Prélèvement*

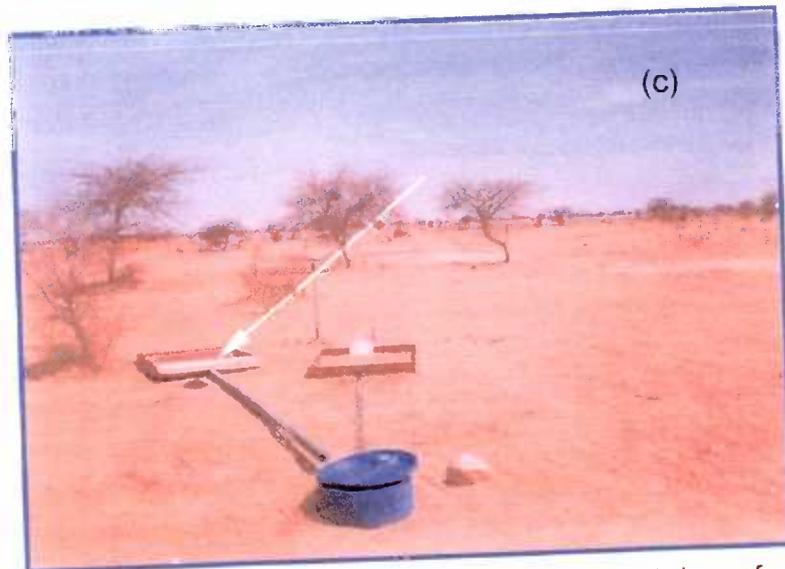
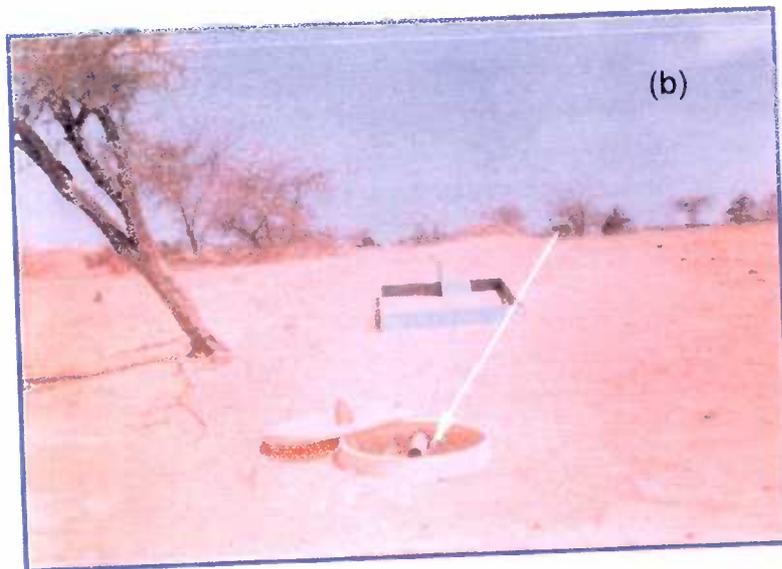
Les prélèvements ont été effectués au niveau de toutes les surfaces élémentaires (croûte d'érosion, croûte grossière, croûte carbonatée et croûte de dessiccation) à l'aide des dispositifs décrits ci-dessus. Des échantillons ont été prélevés toutes les 5 minutes avec une augmentation de la fréquence au moment des forts débits (cf. photos n°2).

Un prélèvement d'échantillons du sol est effectué aux états initial et final de chaque averse à 15 cm de profondeur à l'aide d'une tarière. Ces échantillons sont mis dans des tares et pesés par la suite. Ce prélèvement permet de déterminer l'humidité de sol.

### 3.2.3. Analyses des échantillons

L'analyse a consisté à déterminer par pesé des quantités de MES, CDF et les sols récoltées dans chacune des parcelles lors de deux averses décennales et de deux averses annuelles. Les échantillons de matières en suspensions recueillis au pas de 5 minutes ont été évaporés.

Les matières grossières transportées par charriage de fond (CDF) récupérées dans la cuve de ruissellement et recueillis dans les sachets fasoplast ont été séchées à 105° à



**Photos n°1 – (a) Parcelle d'expérimentation ruissellement de surface limitée par un cadre métallique (b) cuve de récupération des eaux de ruissellement et (c) double parcelle utilisée pour le calibrage.**

l'étuve de même que les échantillons de sols prélevés à 15 cm de profondeur. Après avoir été pesé les matières solides en suspension et par charriage de fond et les sols ont subi une analyse granulométrie. Pour cette dernière, afin de déterminer les teneurs centésimales en argiles, limons et sables, une fraction de 7 g a été utilisée. Le taux de refus, dont les particules sont > 2 mm, a été déduit du poids total recueilli par CDF.

Toutes ces analyses ont été effectuées au laboratoire hydro-pédologie de l'IRD de Ouagadougou (anciennement ORSTOM).

#### 3.2.4. Méthode expérimentale

La méthode expérimentale consiste à utiliser un simulateur de pluie de type ORSTOM sur une parcelle expérimentale, délimitée par un cadre métallique à un seul niveau de mesure. Ce niveau permet de collecter le ruissellement de surface dont l'intensité est suivie par une cuve calibrée (Cf. photos n°1). Les parcelles sont équipées à tour de rôle d'un limnigraphe, d'un capteur de pression automatique pour le suivi de la pluie et du ruissellement.

La méthodologie de l'étude est détaillée dans les paragraphes suivants:

##### *Ruissellement*

Le ruissellement est déterminé en estimant le volume d'eau recueilli au niveau de la cuve de ruissellement. Le ruissellement total tel qu'il est décrit dans le premier chapitre est composé d'une lame ruisselée ( $L_r$ ) et de la rétention superficielle récupérable ( $D_r$ ). La lame ruisselée est déterminée en intégrant le débit de ruissellement dans le temps.

La pluie d'imbibition ( $P_i$ ) est calculée en fonction du temps d'imbibition et de l'intensité de pluie. La différence de la pluie totale ( $P$ ) et de la pluie d'imbibition donne la pluie utile ( $P_u$ ). Quant aux coefficients de ruissellement ( $K_r$ ) et d'infiltration ( $K_i$ ) ils sont donnés par le rapport de lame ruisselée ( $L_r$ ) à la pluie utile et la lame infiltrée ( $L_i$ ) à la pluie utile.

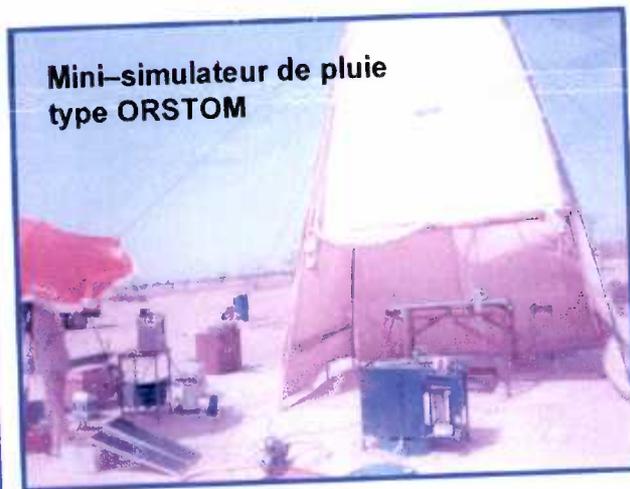
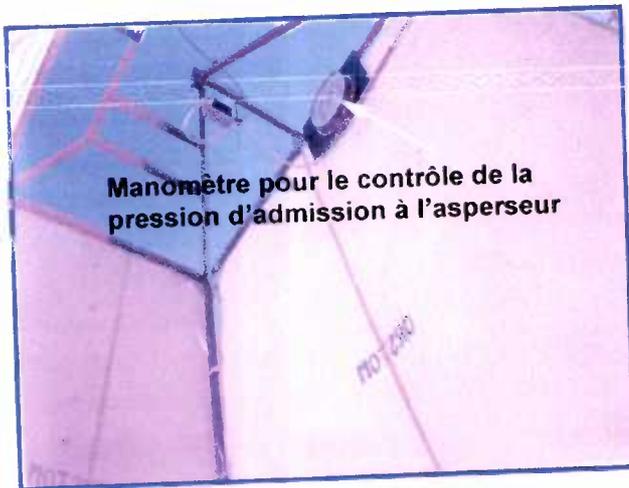
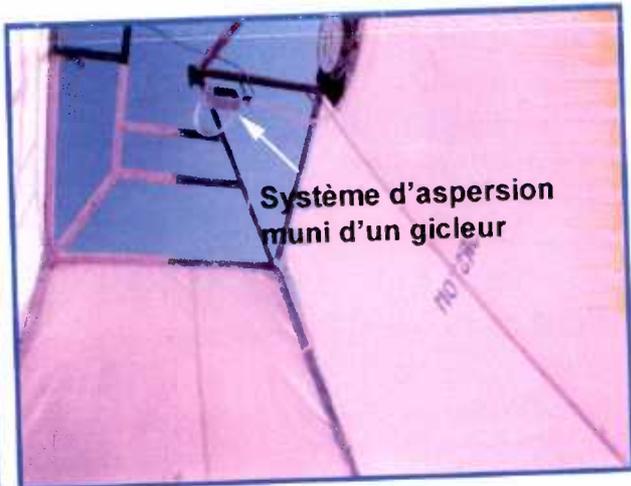
Le volume écoulé ou ruisselé totale est le produit de la section unité à la somme de la lame ruisselée et de la rétention superficielle récupérable et l'intensité le rapport du débit de ruissellement à la section arrosée qui est de  $1 \text{ m}^2$ .

Le suivi du ruissellement a été effectué par trois méthodes différentes qui sont : le limnigraphe mécanique, le capteur de pression automatique et la méthode par capacité. La comparaison des ses trois méthodes de mesures a permis de choisir le limnigraphe mécanique (figures 2.1 et 2.2). Deux facteurs ont été utilisés pour le choix d'une méthode de mesure la plus fiable. Il s'agit de l'intensité de ruissellement  $R(t)$  et de la lame ruisselée  $L_r(t)$ . La méthode de référence était celle par capacité. La qualité de mesure a été rapportée à la pente de la droite de régression et au coefficient de corrélation  $R^2$ . Le capteur de pression a tendance à sous estimer les lames ruisselées ( $p < 1$ ). Aux faibles valeurs d'intensités il surestime celles-ci ( $r^2 = 0.45$ ).

Lors d'une pluie simulée on a enregistré, à l'aide d'un limnigraphe mécanique, la courbe des volumes ruisselés. Le dépouillement de ces enregistrements a abouti à une variation du volume ruisselé cumulé dans le temps. Les variations de pentes de cette variation ont permis de calculer les débits de ruissellement. Ces débits assimilés aux intensités de pluies ont été rapportés en fonction du temps pour dessiner les hydrogrammes de ruissellements (figures 4.5 et 4.6).

Pour les premières minutes d'écoulement, les enregistrements au limnigraphe ont été complétés par les données de la méthode par capacités.

On a constaté que les intensités de ruissellement dépassent les intensités de pluies. On a fait donc des ajustements sur ces intensités de pluies. Les intensités maximales sont



**Photos n°2** – Dispositif utilisé lors de la campagne de simulation à Katchari,  
Burkina Faso (mars 2001)

passées de 135 à 150 mm/h pour l'averse décennale et de 120 à 140 mm/h pour l'averse annuelle.

Afin de mettre en œuvre l'influence du micro-relief sur les phénomènes de ruissellement infiltration, des données topographiques ont été relevées. Ces dernières sont traitées par le logiciel surfer 7.0.

Pour caractériser les différents types d'état de surface on a établi des relations Kr, Ki, W, Pi, Dr, Lr et Pu.

### Mesure d'humidité

La détermination de l'humidité pondérale a permis de suivre l'infiltration au sein des différents états de surface.

A l'état initial et final de chaque averse, la teneur en eau du sol a été déterminée par la méthode gravimétrique. Cette teneur qui n'est rien d'autre que l'humidité pondérale s'obtient par la relation :

$$W (kg/kg) = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (20)$$

Cette humidité peut être exprimée aussi en %.

L'indice de l'état d'humectation de Kohler (ou indice des précipitations antérieures) a été aussi déterminé par la relation suivante :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha} \quad (21)$$

### Erosion : Calcul des exportations

Les échantillons prélevés ont été évaporés à l'étuve à 105°C pesés par la suite. Connaissant le poids net des matières solides MES et le volume d'eau prélevé, on peut déterminer aisément la concentration C (g/l), alors que le débit de ruissellement instantané Q (l/s) est obtenu en divisant le volume d'eau prélevé (250 ml) par le temps de remplissage du même flacon de 250 ml.

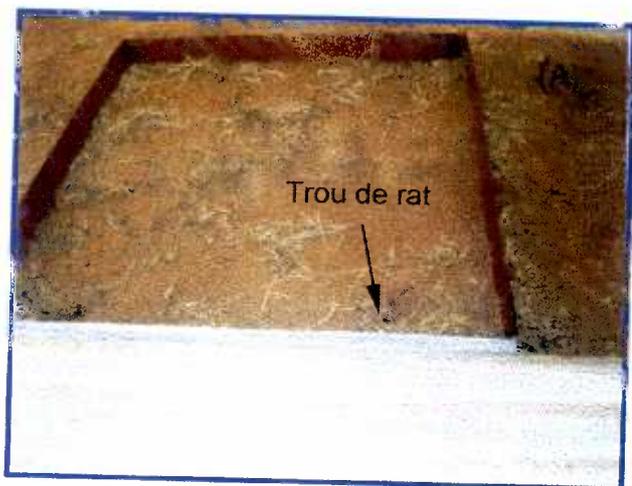
La méthode déterministe a été utilisée pour calculer les quantités de pertes en terres (matières érodées ou exportées). Cette méthode consiste à procéder à une intégration par la méthode des trapèzes à partir du diagramme flux des MES, en fonction du temps, étant donné que l'aire totale de cette courbe donne la quantité des MES exportée pour une averse simulée donnée. Cette intégration s'applique à la relation donnée par :

$$F (kg/s) = C (g/l) \times Q (l/s) \times 10^{-3} \quad (22)$$

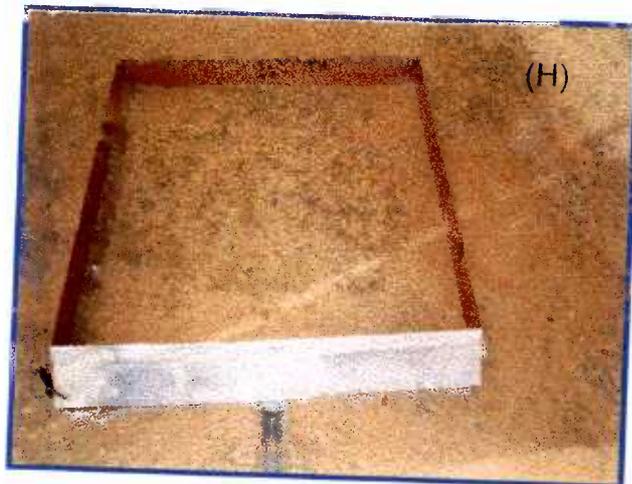
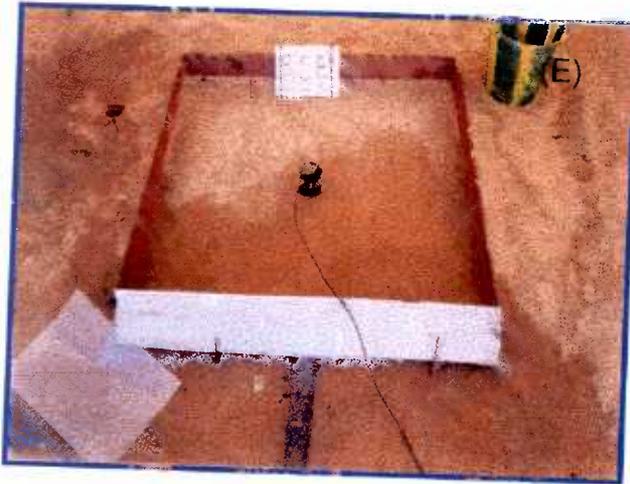
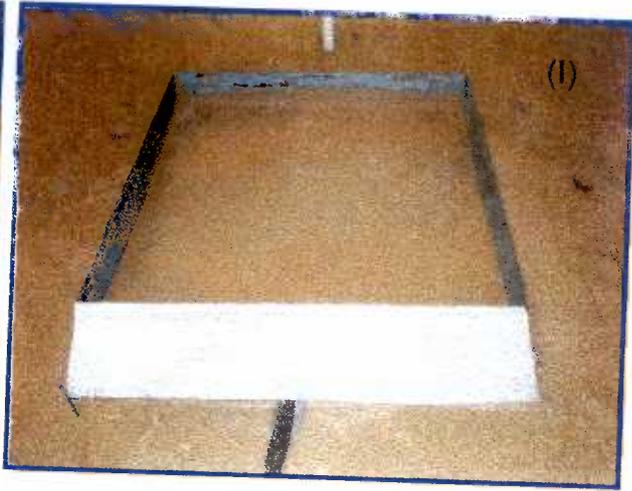
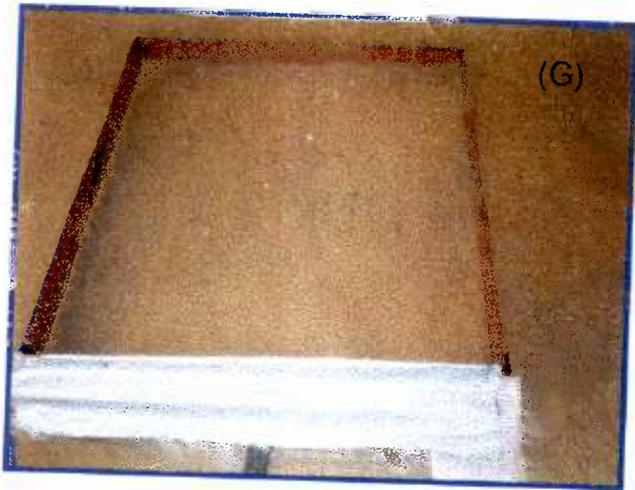
Pour obtenir la quantité totale de matières solides exportées pour une averse simulée donnée, il faudrait ajouter à la quantité obtenue des MES celle piégée dans la cuve de récupération des eaux de ruissellement (Charriage de fond).

$$CTD(t/ha) = Qté_{MES} + Qté_{CDF} \quad (23)$$

La relation Erosion - ruissellement a été établit. Elle a permis d'étudier l'influence des phénomènes de ruissellement – infiltration sur l'érosion.



Photos n°3 – Les croûtes de type DES (parcelles A, B, C, D et F)



Photos n°4 – Les croûtes de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H)

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## 4. RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Résultats

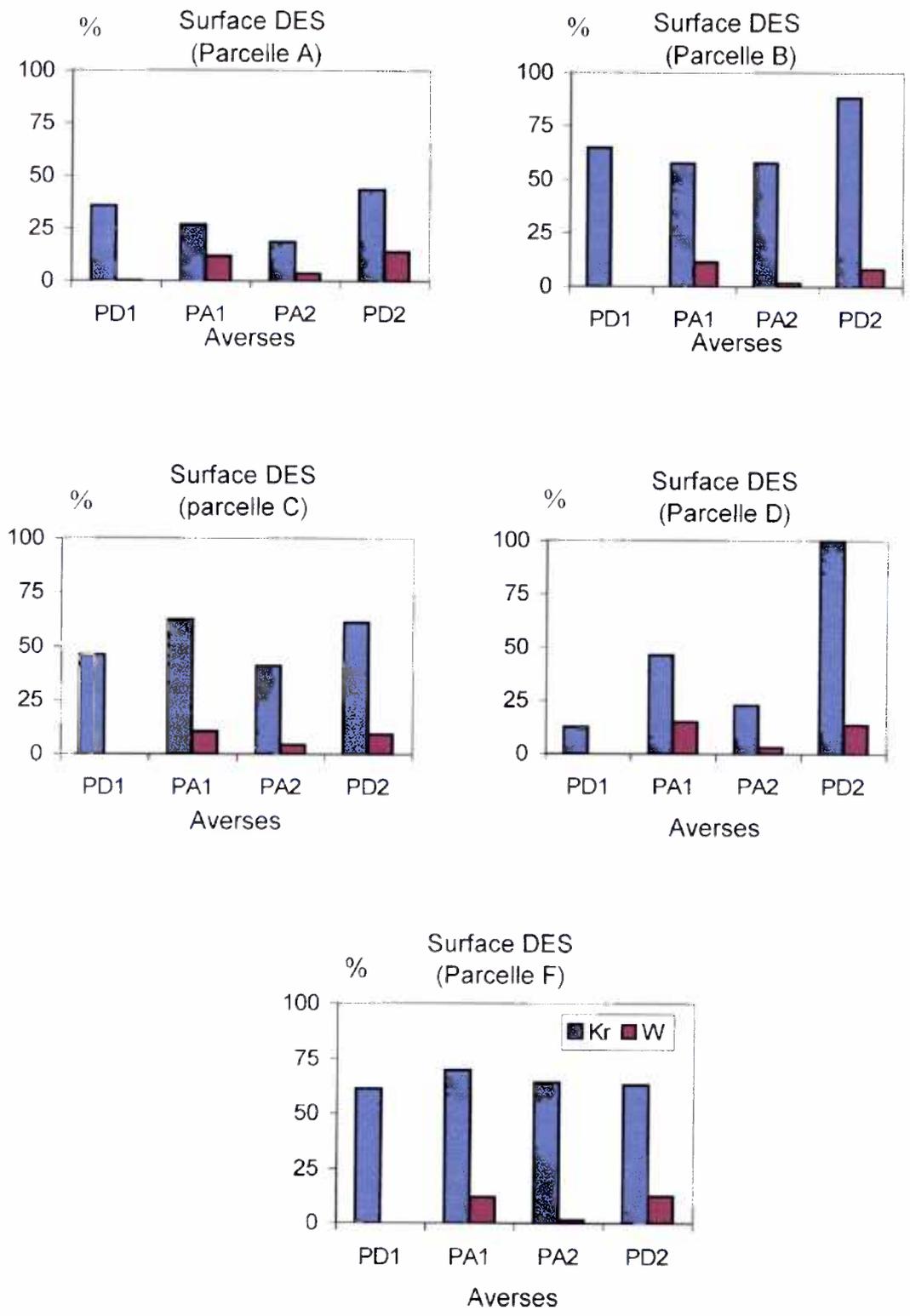
#### 4.1.1. Ruissellement et infiltration

*Coefficient de ruissellement (Kr), coefficient d'infiltration (Ki) et humidité initiale (W).*

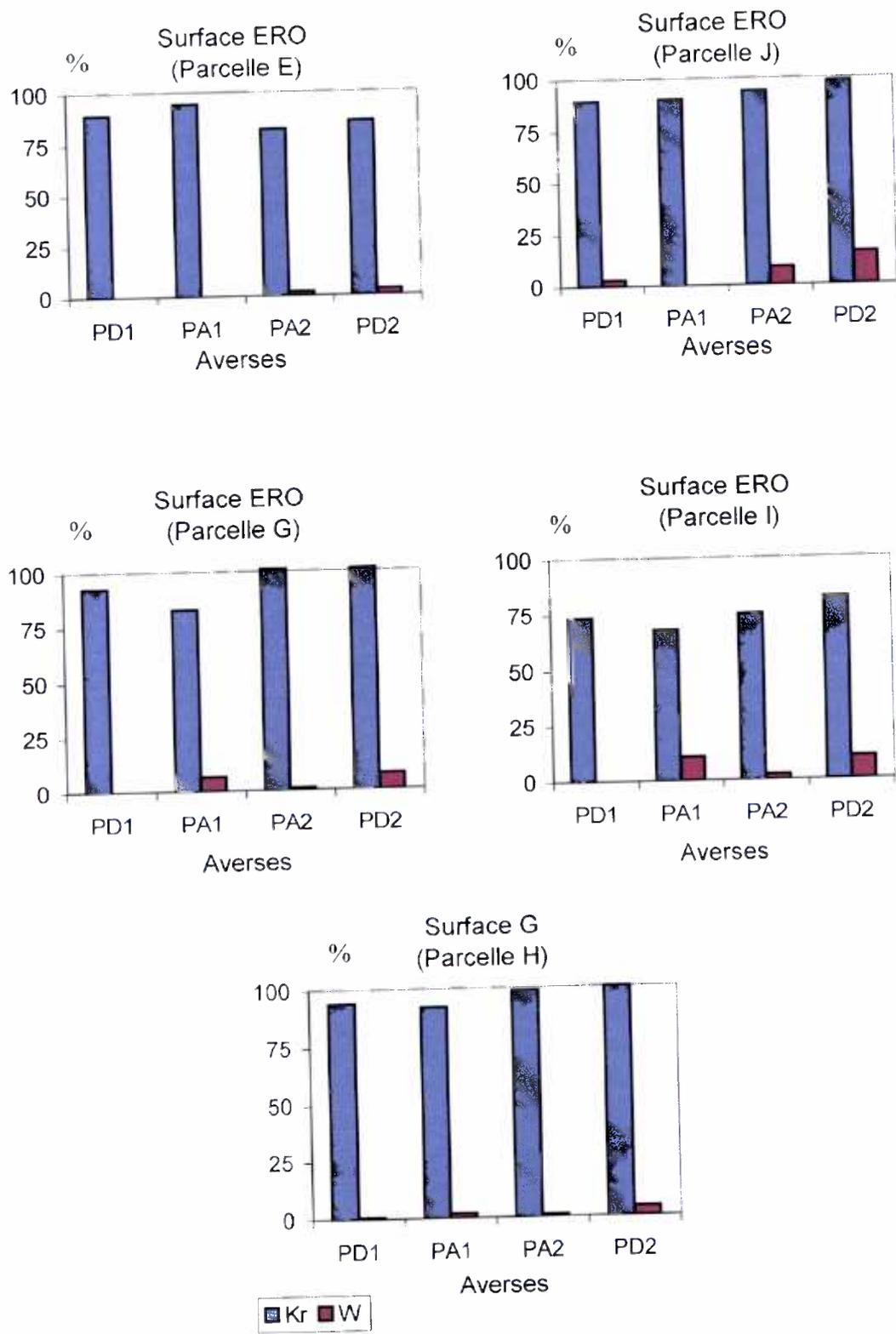
Les figures 4.1 à 4.3 montrent que les valeurs de  $K_r$  varient dans le temps et dans l'espace. On constate globalement que le ruissellement est plus important sur les croûtes ERO et G que sur les croûtes DES. On retrouve le même comportement avec les valeurs de  $K_i$  (tableau 4.1). En effet, la plus grande valeur de  $K_i$  (68%) a été observée sur la surface DES (parcelle A) et la plus faible (7%) sur la surface G (parcelle H). Le coefficient de ruissellement déterminé sur ces croûtes dépasse 75% (figure 4.2), donc 25% environs de la pluie est infiltrée. La figure 4.3 montre que les valeurs de  $K_r$  sont voisines de 100% sur toutes les parcelles de type ERO et de type G. La variation de  $K_r$  dans le temps n'est pas nette. Tantôt  $K_r$  est élevé lors d'une averse décennale tantôt lors d'une averse annuelle.

Les valeurs d'humidité restent inférieures à 20% et varient fortement dans le temps (figure 4.3). Les plus faibles valeurs d'humidités ont été constatées sur les croûtes ERO\_Is (parcelle E) et G (parcelle H) et la plus élevée sur la croûte ERO\_ca (parcelle J). Lors de l'averse PD1, l'humidité observée est faible voir nulle pour l'ensemble des parcelles. Elle demeure importante lors de l'averse PD2 et atteint 16 % au niveau de la parcelle J. D'une averse à une autre on constate que l'humidité est 5 à 10 fois plus importante exceptions faites pour les parcelles J et H lors des averses PD1 et PA1 (tableau 1.3 de l'annexe I).

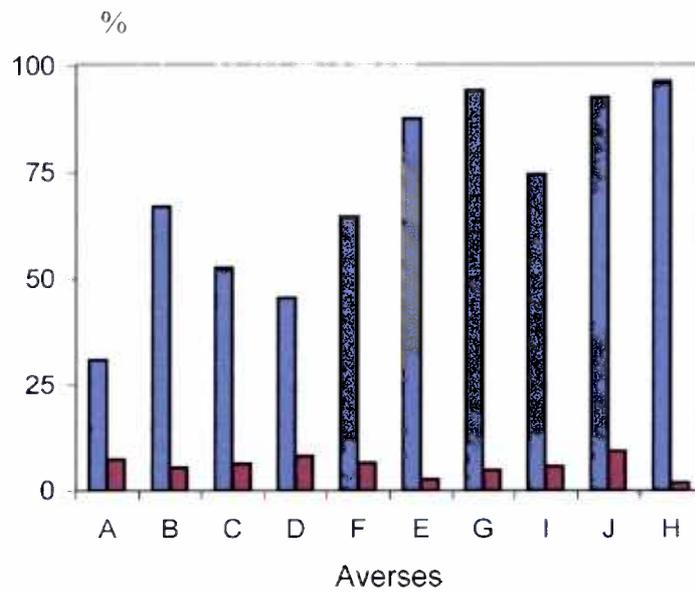
Le tableau 1.4 de l'annexe I montre que la profondeur du front d'humectation varie dans le temps et dans l'espace. Elle est très importante dans les surfaces de type DES et atteint 54.5 cm (parcelle D). Il est de même pour la croûte ERO\_sb lors des averses PA2 et PD2 ou elle varie de 39 à 51 cm. Au niveau des surfaces DES, la profondeur d'humectation augmente de la première averse simulée (PA1) à la dernière (PD2). On constate que les valeurs de PFH sont faibles, au niveau des croûtes G, ERO\_Is et ERO\_ca, ce qui n'est pas le cas pour les croûtes ERO\_sb où elles sont assez élevées.



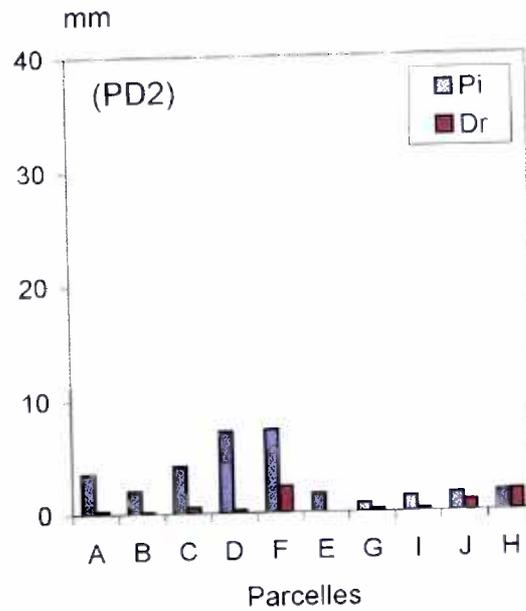
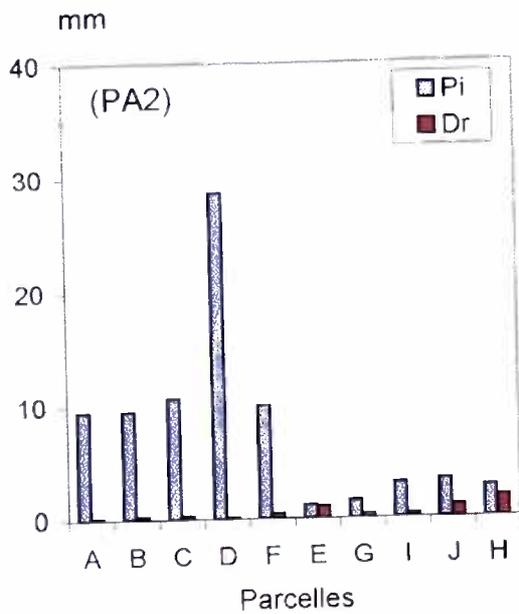
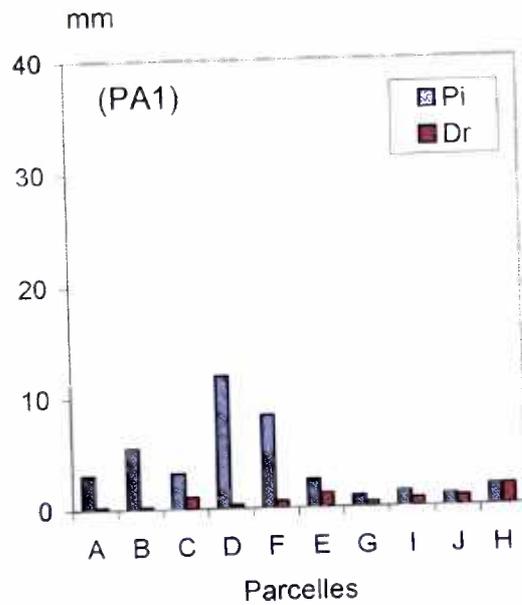
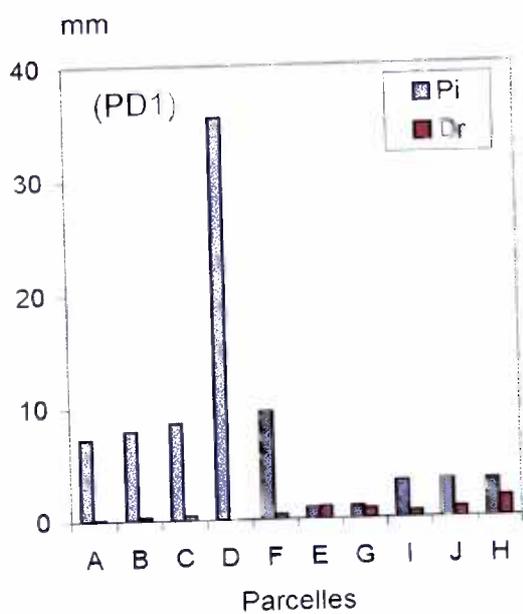
**Figure 4.1** - Variation du coefficient de ruissellement (Kr) et de l'humidité pondérale initiale (W) pour les différentes surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F).



**Figure 4.2** - Variation du coefficient de ruissellement (Kr) et de l'humidité pondérale initiale (W) pour les différentes surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).



**Figure 4.3** - Variation du coefficient de ruissellement moyen ( $K_r$  moy) et de l'humidité pondérale initiale moyenne ( $W_{moy}$ ) pour les différentes parcelles.



**Figure 4.4** - Evolution de la pluie d'imbibition (Pi) et de la détention superficielle récupérable (Dr) au sein des différentes surfaces de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (E, G, I et J) et de type G (H) lors de deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2)

### *Pluie d'imbibition ( $P_i$ ) et détention superficielle récupérable ( $D_r$ ).*

La figure 4.4 présente, dans le temps et dans l'espace, la variation de  $P_i$  et de  $D_r$ . Cette figure montre qu'il y a une nette opposition entre la détention superficielle et l'imbibition. La valeur de  $D_r$  est insignifiante au niveau des surfaces DES exceptée la parcelle F. Dans les surfaces ERO et G,  $D_r$  atteint 3 mm. Dans le temps, les valeurs de  $D_r$  observées restent dans les mêmes proportions. Contrairement à la variabilité de  $D_r$  les valeurs de  $P_i$  observées sont plus élevées dans les surfaces DES. Elles varient aussi bien dans le temps que dans l'espace. Les plus grandes valeurs ont été relevées lors des pluies PD1 et PA2. De même, d'une parcelle à une autre, on constate que l'imbibition est la plus élevée au niveau de la parcelle D et plus faible sur les parcelles E et G. Sur les croûtes DES, cette imbibition est comprise entre 5 et 10 mm, exceptée de la parcelle D où elle est 2 à 3 fois plus importante lors des averses décennales et annuelles. Dans cette parcelle, la valeur de l'imbibition relevée est d'environ 35 mm.

### *Variations de la lame ruisselée $L_r(t)$ et de l'intensité de ruissellement $R(t)$ .*

Les variations de la lame ruisselée sont illustrées par les figures 4.5 à 4.7. On constate que  $L_r$  varie linéairement avec la pluie. Le coefficient de détermination ( $r^2$ ) obtenu est de 0,69 (figure 4.7).

Les lames ruisselées  $L_r(t)$  observées sont proportionnelles aux intensités de ruissellement  $R(t)$ . Au sein des surfaces ERO et G, la variation des lames ruisselées et donc des intensités de ruissellement est homogène (figures 4.5 et 4.6) ce qui n'est pas le cas pour les surfaces DES. On constate que les intensités de ruissellement sont très proches des intensités de pluie. Ces observations ont permis de montrer que la lame ruisselée suit la pluie. En effet, dans le temps, les surfaces DES réagissent différemment vis-à-vis des intensités de ruissellement.

#### 4.1.2. Analyse granulométrique

La figure 4.8 et les tableaux 2.1 et 2.2 de l'annexe II montrent la composition granulométrique des sols, des MES et CDF pour les différentes parcelles. On constate globalement que les particules solides transportées par charriage sont largement composées du sable avec peu de limons. Le taux de limons grossiers dans les CDF n'excède pas 10%. Les MES sont dominées par des limons et argiles avec des taux allant de 5 à 45 %. On y trouve aussi du sable fin à une proportion relativement importante (20%). Dans les sols toutes les particules sont représentées. Le taux moyen d'argiles, de limons et du sable varie de 10 à 30%. Les parcelles de type DES sont dominées par du sable. Le taux moyen varie de 30 à 40%. Les limons et les argiles sont faiblement représentés avec un taux qui ne dépasse pas 15%.

Dans les croûtes d'érosion type ERO\_sb, le taux moyen de sable varie de 25% à 40%. Les limons et les argiles sont présents dans ces croûtes à un peu plus de 10% pour les limons et moins de 10% pour les argiles selon les résultats du CDF. Ce taux varie de 25% pour les sols et de 50% pour les MES. Les sables et les limons sont présents à moins de 25%. En plus de sa nature carbonatée, la croûte de type ERO\_ca atteint environ un taux en argiles de 50% contre de 10 à 30% de limons et de sables. Pour celle-ci on constate qu'il y a moins d'argiles dans les sols que dans les MES. En effet la croûte grossière de par sa nature gravillonnaire est dominée jusqu'à 30% de sable contre 5 à 15% de limons et de l'argile.

Dans les croûtes ERO\_ca et ERO\_ls, les MES sont beaucoup plus importantes que les CDF. La croûte ERO\_ca a un taux de calcium élevé.

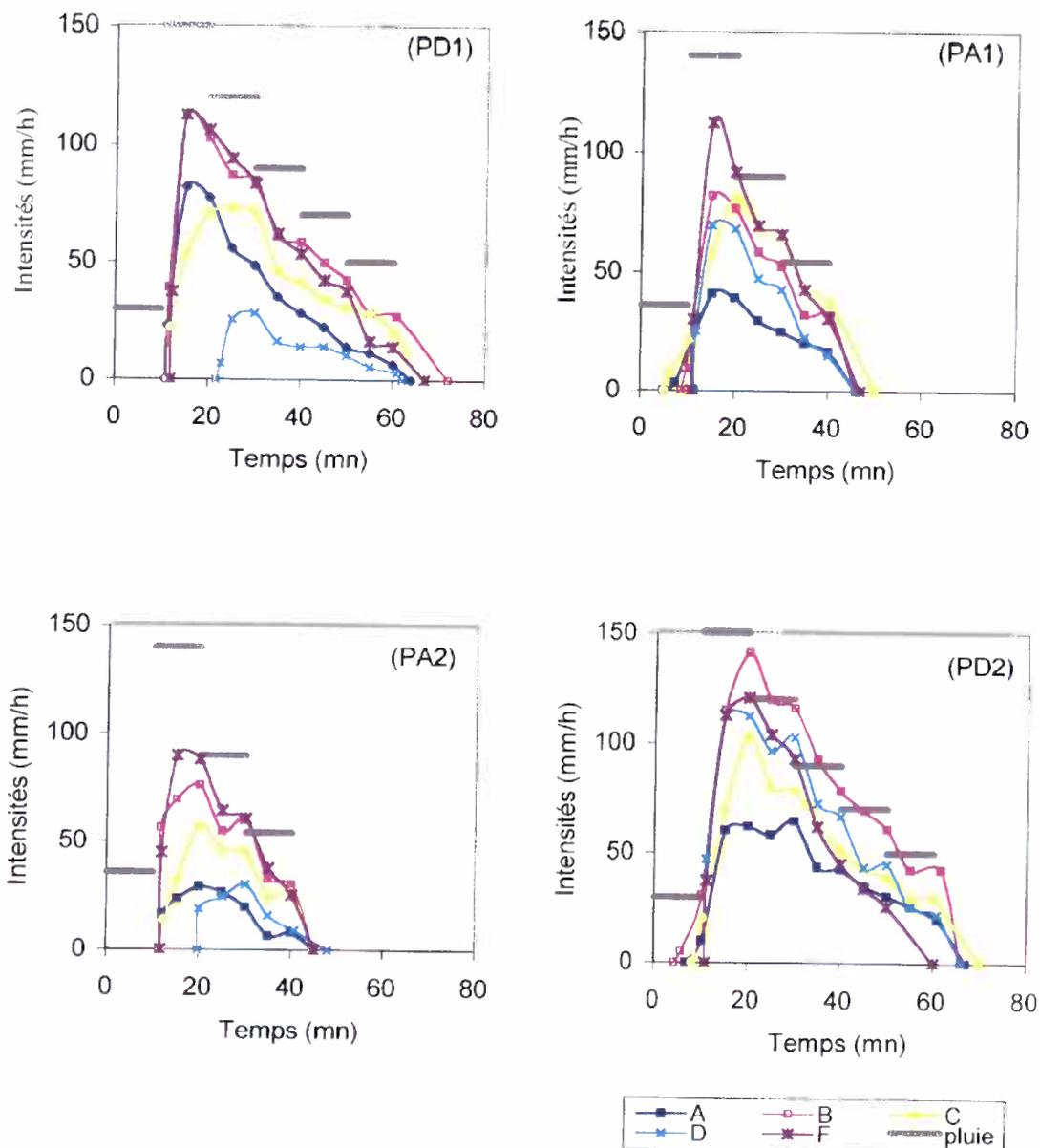
L'analyse complémentaire des CDF (*tableau 2.1 et 2.2 de l'annexe II*) ont suggéré la présence des particules dont la fraction granulométrique est supérieure à 2 mm (refus).

#### 4.1.3. Variation de la pente et du micro-relief

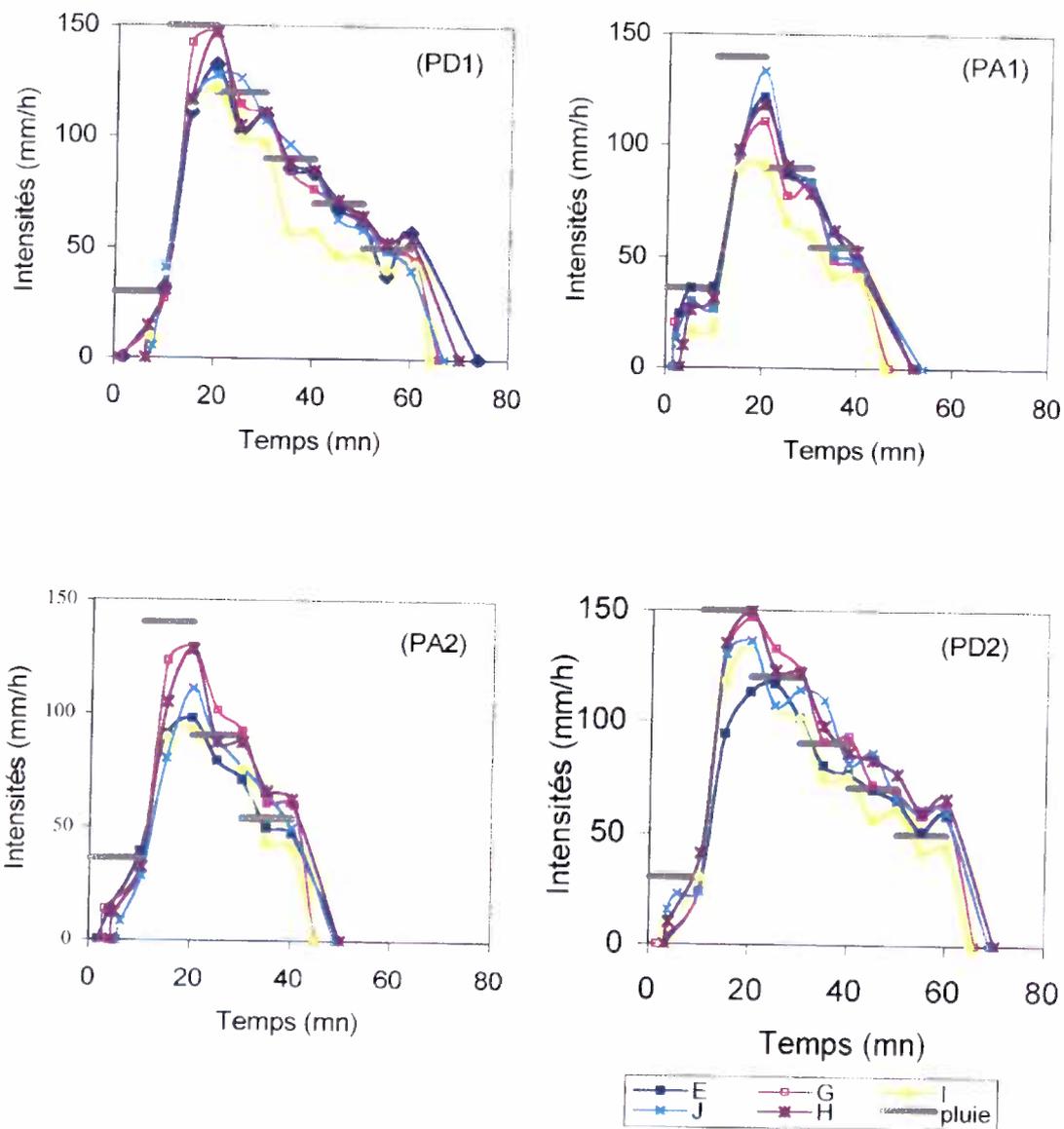
Les *figures 4.9 et 4.10* représentent la topographie de chaque parcelle. On constate que la pente varie de 0 à 20° et que le micro-relief, relatif à la présence des zones endoréiques, est bien marqué sur les surfaces DES. Les plus grandes pentes ont été observées au niveau des celles ci (parcelles A, B, D exceptée la parcelle F) et les plus faibles au niveau des croûtes G et ERO\_Is.

Les parcelles sur croûtes d'érosions ERO\_sb (parcelles G et I) et sur croûte DES (parcelle B et F) ont un micro-relief peu marqué avec un gradient de pente qui ne dépasse 13°. En effet, les autres parcelles de surface DES (parcelles A, C et D) présentent un micro-relief relativement marqué. On retrouve un comportement semblable sur les croûtes ERO\_Is et ERO\_ca et sur croûte G. La pente dans ces parcelles atteint la barre des 18°.

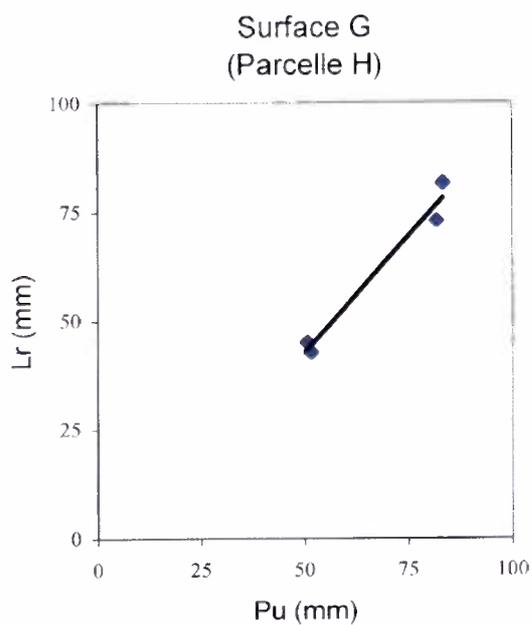
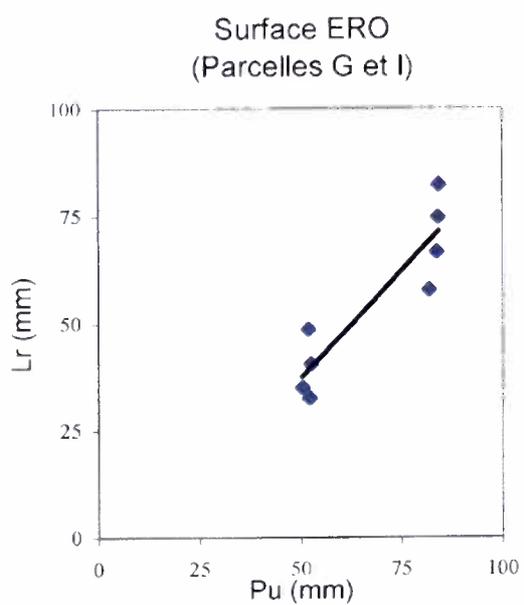
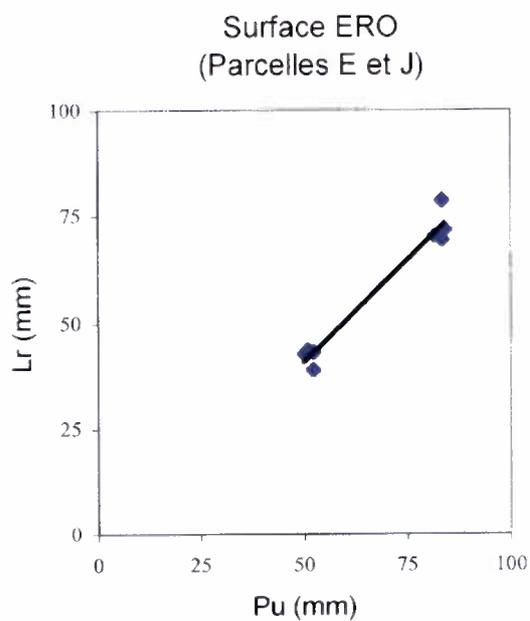
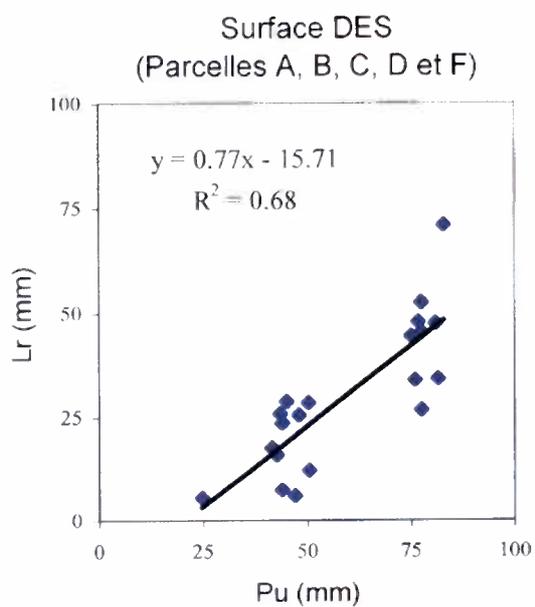
Le *tableau 4.2* présente les valeurs de la pente moyenne déterminée au niveau des différentes surfaces. Les pentes moyennes les plus élevées sont observées sur les croûtes de type ERO (parcelles G et I) ou elles atteignent 17% environs. Au niveau de ces surfaces la pente est très variable et que le ruissellement observé peu variable est voisin de 100%. Sur les surfaces DES ces pentes sont voisines. Elle est de 2.5% pour les parcelles A et F et environs 8% pour les parcelles B, C et D. Dans ces dernières l'infiltration est très importante.



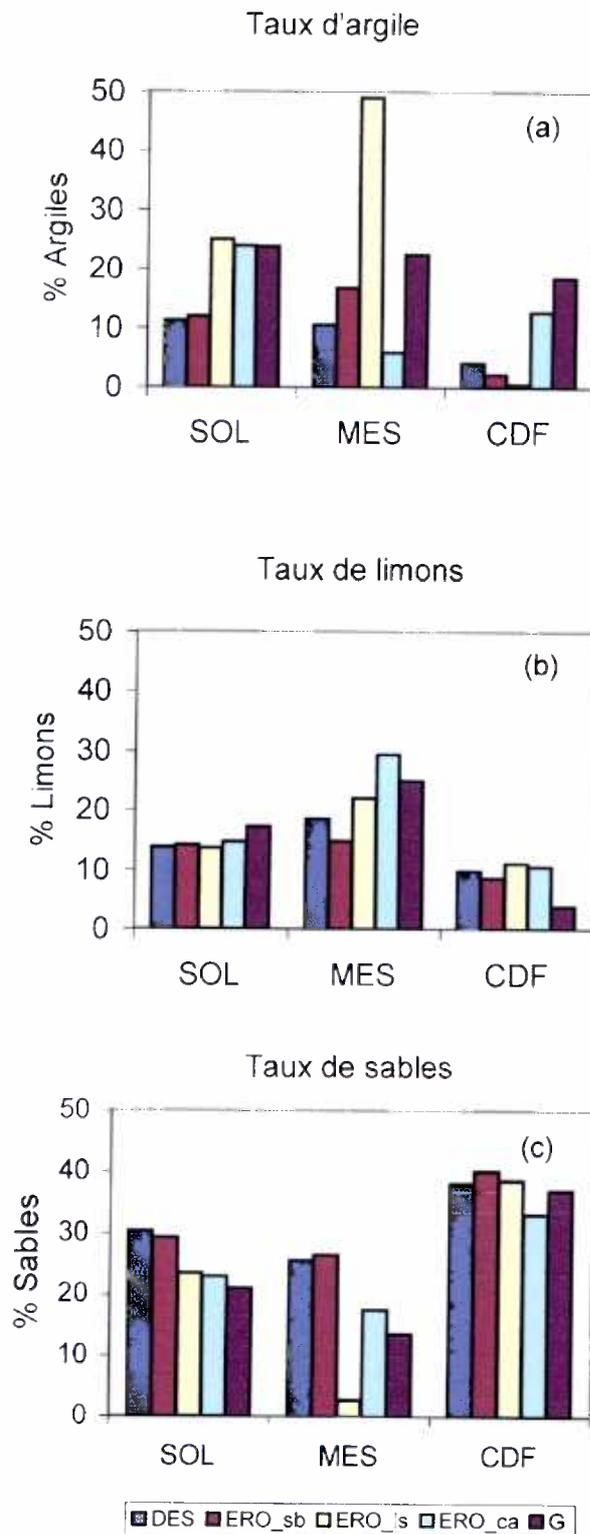
**Figure 4.5** - Evolution de l'intensité théorique de la pluie et du ruissellement sur les cinq parcelles de type DES (A, B, C, D et F) lors des deux averses de fréquence décennale (PD1 et PD2) et des deux averses de fréquence annuelle (PA1 et PA2).



**Figure 4.6** - Evolution de l'intensité théorique de la pluie et du ruissellement sur les quatre parcelles de type ERO (E, G, I, J) et sur la parcelle de type G (H) lors des deux averses de fréquence décennale (PD1 et PD2) et des deux averses de fréquences annuelle (PA1 et PA2).



**Figure 4.7** -Relation entre la pluie utile (Pu) et la lame ruisselée (Lr) au sein des surfaces DES (Parcelles A, B, C, D et F), des surfaces ERO (Parcelles G, I, E et J) et de la surface grossière G (Parcelle H).



**Figure 4.8-** Teneurs en (a) argiles (A), (b) limons (L) et (c) sables (S) pour la fraction < 2 mm dans les surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO\_sb (parcelle G et I), de type ERO\_ls (parcelle E), de type ERO\_ca (parcelle J) et de type G (parcelle H).

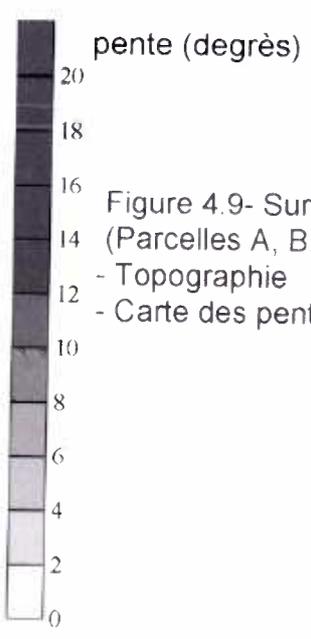
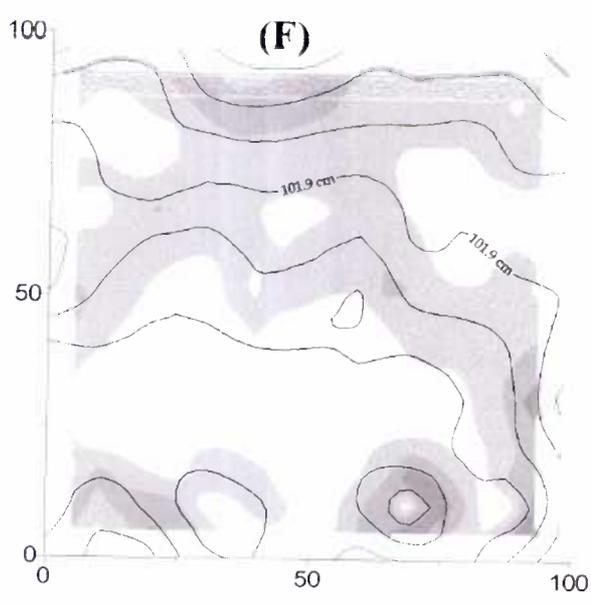
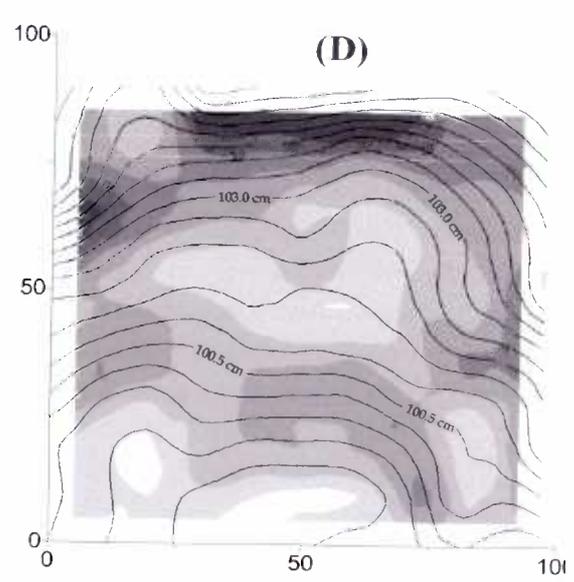
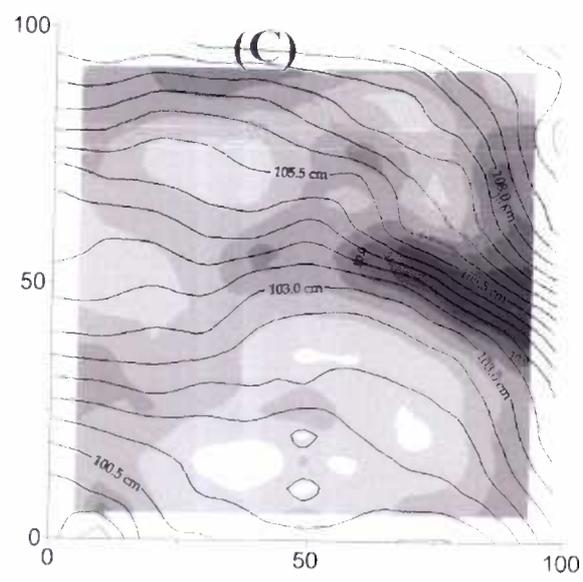
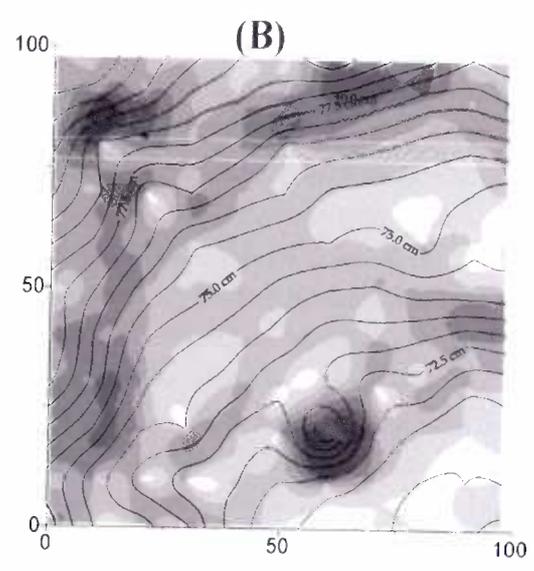
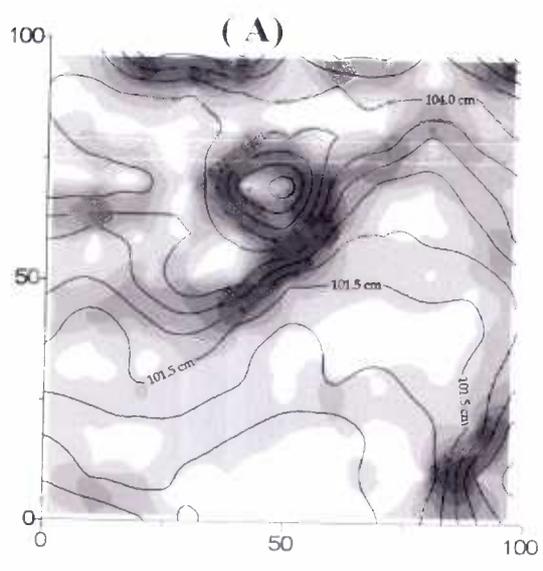
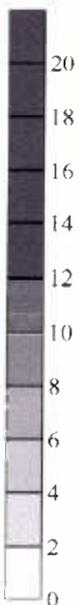
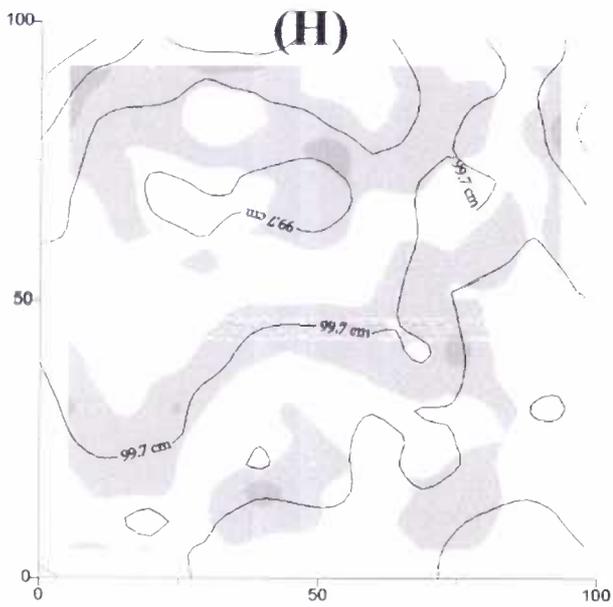
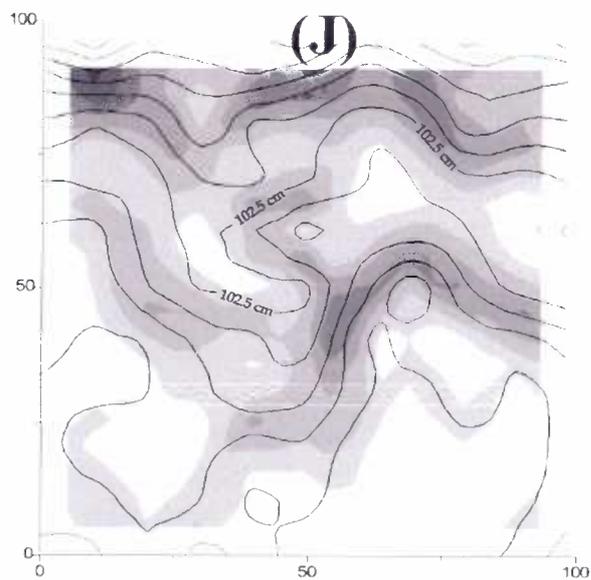
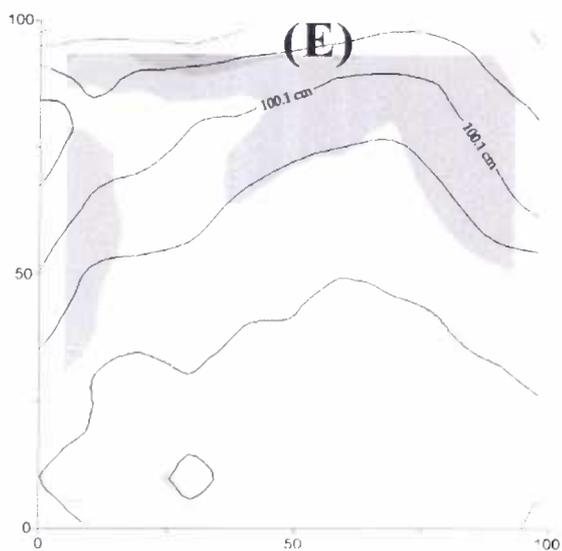
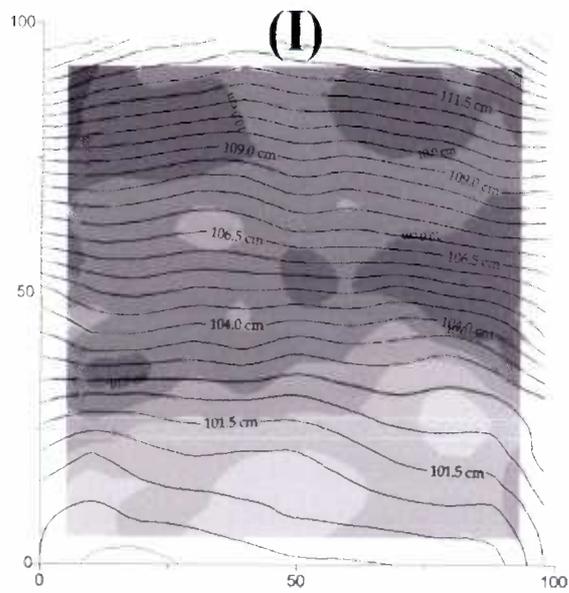
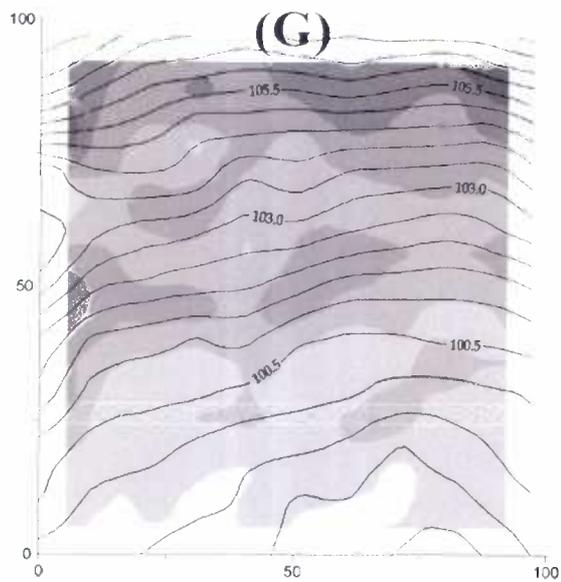


Figure 4.9- Surface de type DES  
(Parcelles A, B, C, D et F)  
- Topographie  
- Carte des pentes



Pente (degrès)

20  
18  
16  
14  
12  
10  
8  
6  
4  
2  
0

Figure 4.10- Surfaces de type ERO (parcelles E, J, G et I) et de type G (parcelle H)  
- Topographie  
- carte des pentes

**Tableau 4.1** - Récapitulatif des valeurs de coefficients d'infiltration (Ki) observés au sein des différentes parcelles de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

Parcelles	Ki (%)									
	A	B	C	D	F	G	I	E	J	H
PD1	65.4	37.2	55.1	87.0	40.3	10.0	28.7	13.5	13.3	8.8
PA1	75.2	46.6	41.7	56.6	34.9	22.4	36.4	11.8	15.7	13.9
PA2	82.9	45.9	61.8	77.3	39.8	5.6	30.3	23.4	12.7	7.8
PD2	57.9	14.6	40.7	32.2	38.6	2.0	20.4	17.0	4.8	0.0
Ki *	<b>68.0</b>	33.0	48.9	56.9	38.6	16.2	9.1	27.9	11.0	<b>6.9</b>
Ki moyen	87.3	44.3	62.0	77.5	48.0	14.0	31.2	23.4	14.4	9.3
Ki catalogue	60 à 75			10 à 20				5 à 15		

\* Coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole de pluies simulées.

**Tableau 4.2** - Récapitulatif des valeurs de pente moyenne déterminées au sein des différentes parcelles de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H).

Parcelles DES		Parcelles ERO et G	
pente moyenne (%)			
A	2.5	G	9.2
B	8.3	I	16.7
C	7.5	E	nd
D	8.67	J	5
F	2.5	H	2.5

Avec nd: non déterminé

#### 4.1.4. Erosion

##### *Variabilité de l'érosion*

Les figures 4.11 à 4.14 donnent les résultats sur l'érosion. Elles montrent qu'il y a une grande variabilité de comportement, entre les parcelles, tant dans l'espace que dans le temps. Les variations de MES et CDF sont différentes.

D'une averse à une autre, au sein des surfaces DES, la quantité érodée en MES varie de 0,04 t/ha (parcelle A) à 3,08 t/ha (parcelle B) alors que la quantité exportée par CDF de 0.04 à 7 t/ha. Dans les surfaces de type ERO et de type G ces exportations sont également variables et atteignent 14 t/ha (parcelle I). La plus forte valeur érodée en MES est observée au niveau des croûtes ERO\_sb (parcelles G et I), sur matériaux sableux. Ces valeurs sont 5 fois plus importantes qu'en E (croûte ERO sur matériaux argileux) et 10 fois plus importante qu'en J et H qui respectivement croûte ERO\_ca et croûte G sur matériaux gravillonnaires. La plus faible valeur en MES est observée sur A, une croûte DES sur placage sableux. Dans ces deux dernières l'exportation qu'elle soit en suspension ou par charriage de fond reste dans les mêmes proportions. Quant aux surfaces DES (parcelles C, D et F) leurs exportations en MES sont dans le même rapport et restent inférieures à celles des croûtes ERO ce qui n'est pas le cas pour le CDF.

La CTS exportée dans les parcelles G et I atteint 20 t/ha. Lors de l'averse PA2, sur les surfaces DES (parcelles A, C, D et F) et ERO\_ls (parcelle E), les exportations sont dans les mêmes proportions tant en MES que par CDF. Les exportations en MES et par CDF déterminées dans les parcelles J et H sont voisines. Lors des averses PA1, PA2 et PD2, elles ne dépassent pas 0.7 t/ha alors que lors de l'averse PA1, elles atteignent 1.5 t/ha. La CTS observée varie de 35 t/ha à 62 t/ha lors des deux averses décennales. Pour les averses annuelles elle n'atteint pas 30 t/ha (*tableaux 3.4 et 3.5 de l'Annexe III*).

La variation de la concentration des matières en suspension est illustrée par les figures 4.15 et 4.16. Les fortes teneurs en MES ont été observées aux fortes intensités de pluie. On constate que les croûtes d'érosions G et I suivent la pluie ce qui n'est pas le cas dans les autres croûtes.

##### *Variation du micro-relief, de la pente et de la nature du sol.*

Les valeurs de la pente sont variables dans l'espace (*tableau 4.2*). Les pentes moyennes les plus élevées sont observées sur les croûtes de type ERO (parcelles G et I). Sur ces surfaces l'érodibilité des sols est très importante. Au niveau de ces surfaces la pente est très variable de même que l'érosion observée.

La figure 4.8 montre qu'il y a moins d'argiles dans les sols que de MES. Sur la croûte ERO\_ca, dominée par du calcium, on constate qu'il y a peu d'argile mis en suspension dans les eaux de ruissellement. Elle contient du sable à un taux variant de 15 à 30% et du gravier. L'érosion observée sur cette croûte est faible de même que la pente.

##### *Relation érosion-intensité de ruissellement maximum*

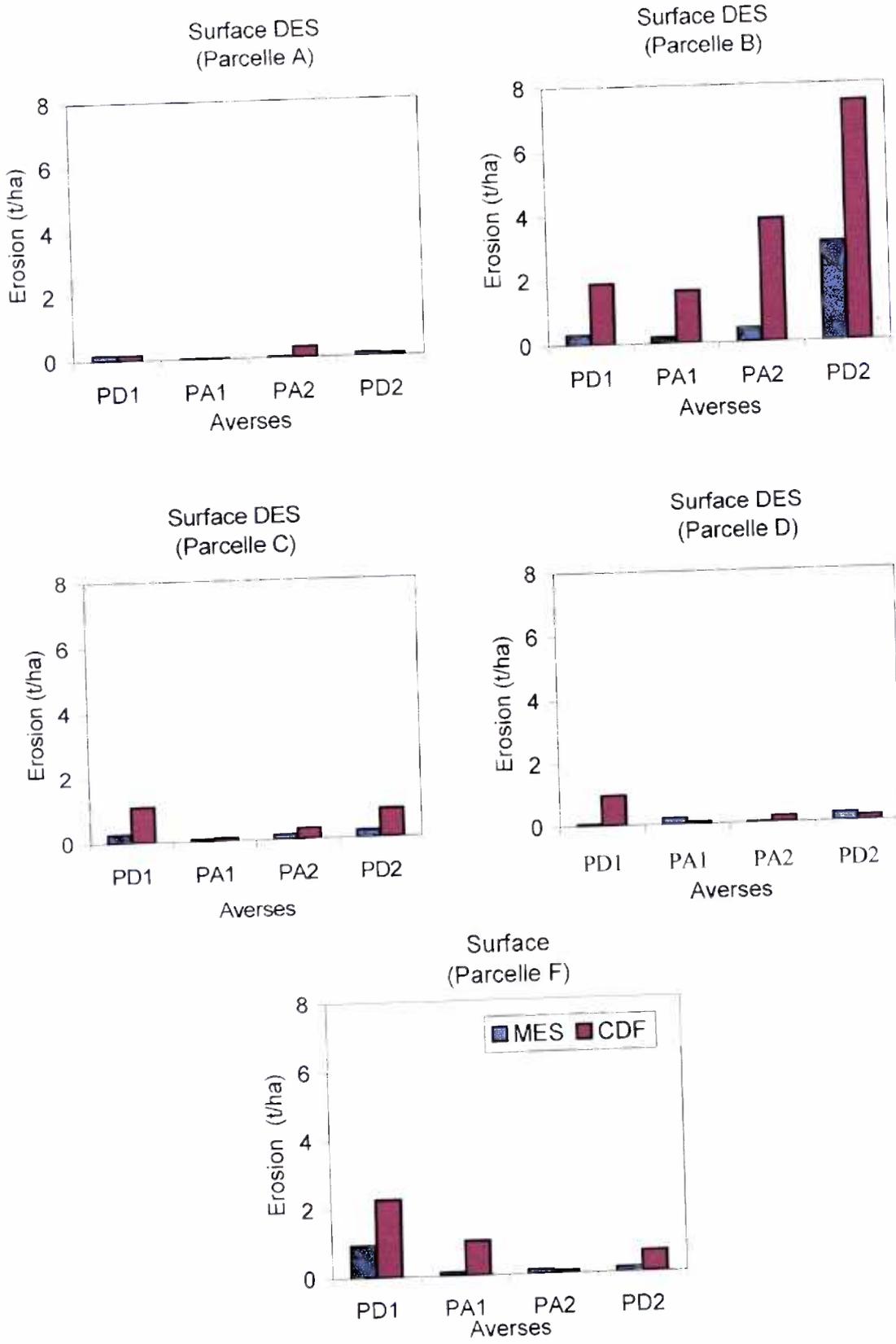
Les figures 4.17 et 4.18 montrent qu'il y a une relation entre MES, CDF et CTS et l'intensité de ruissellement maximum. Cette intensité est assimilée au débit de ruissellement maximum étant données que les parcelles étudiées sont de 1 m<sup>2</sup> de superficie.

### *Relation érosion-intensité de ruissellement maximum*

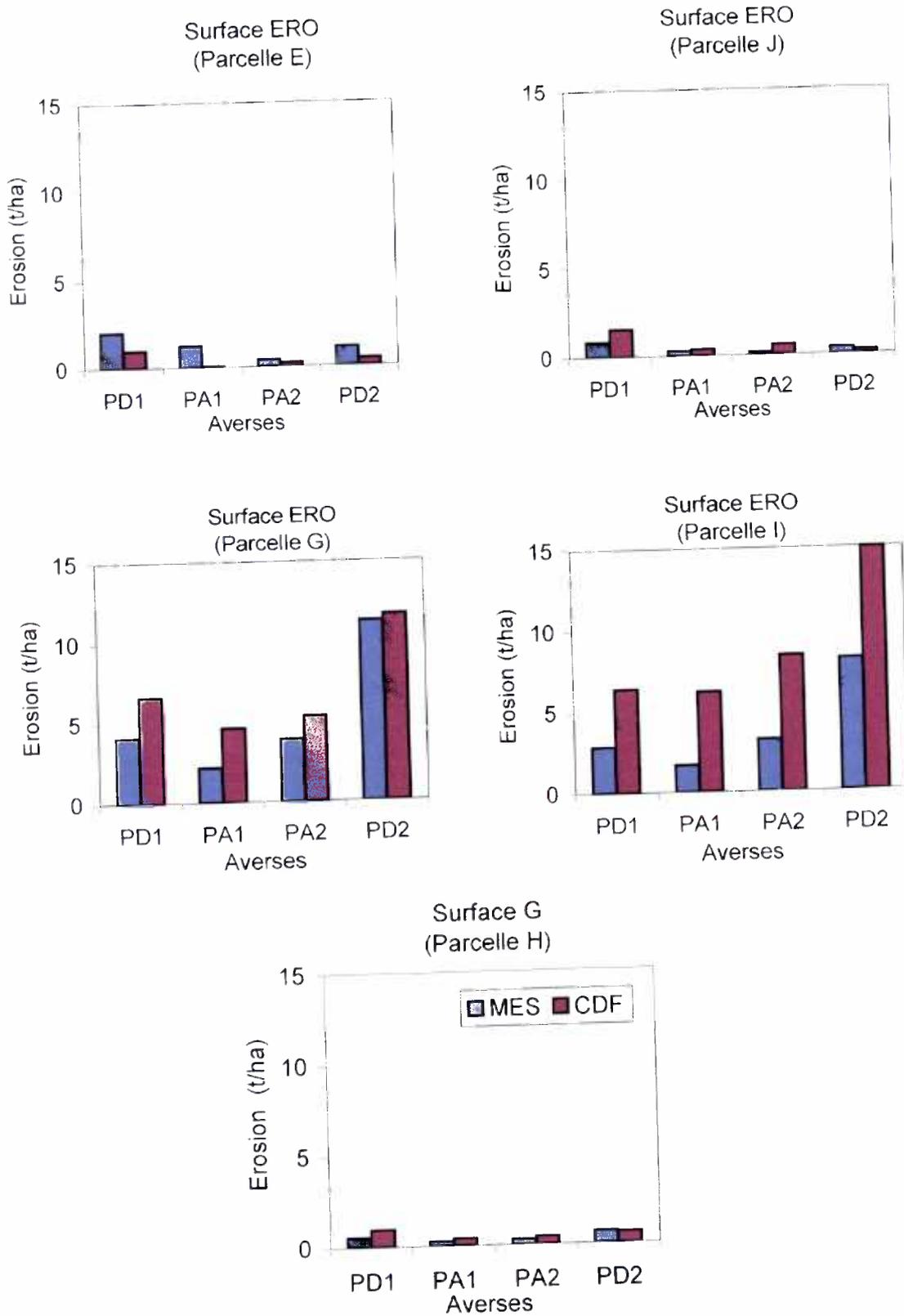
Les figures 4.17 et 4.18 montrent qu'il y a une relation entre MES, CDF et CTS et l'intensité de ruissellement maximum. Cette intensité est assimilée au débit de ruissellement maximum étant données que les parcelles étudiées sont de 1 m<sup>2</sup> de superficie.

Globalement pour les parcelles sur croûtes d'érosion la corrélation est assez bonne. Elle varie de 0.57 à 0.70 (figure 4.17).

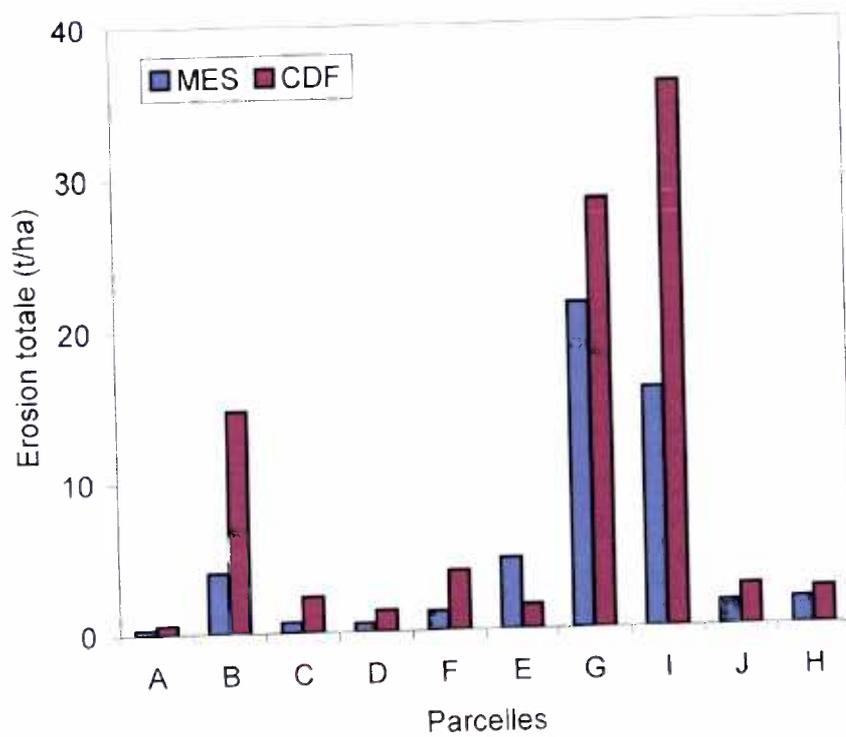
Pour les parcelles sur croûtes de dessiccation et grossière il n'y a pas de relation entre l'érosion sous toutes ses formes et le ruissellement. On constate que, sur ces croûtes, l'érosion varie peu (figure 4.18) et reste inférieur à 10 t/ha.



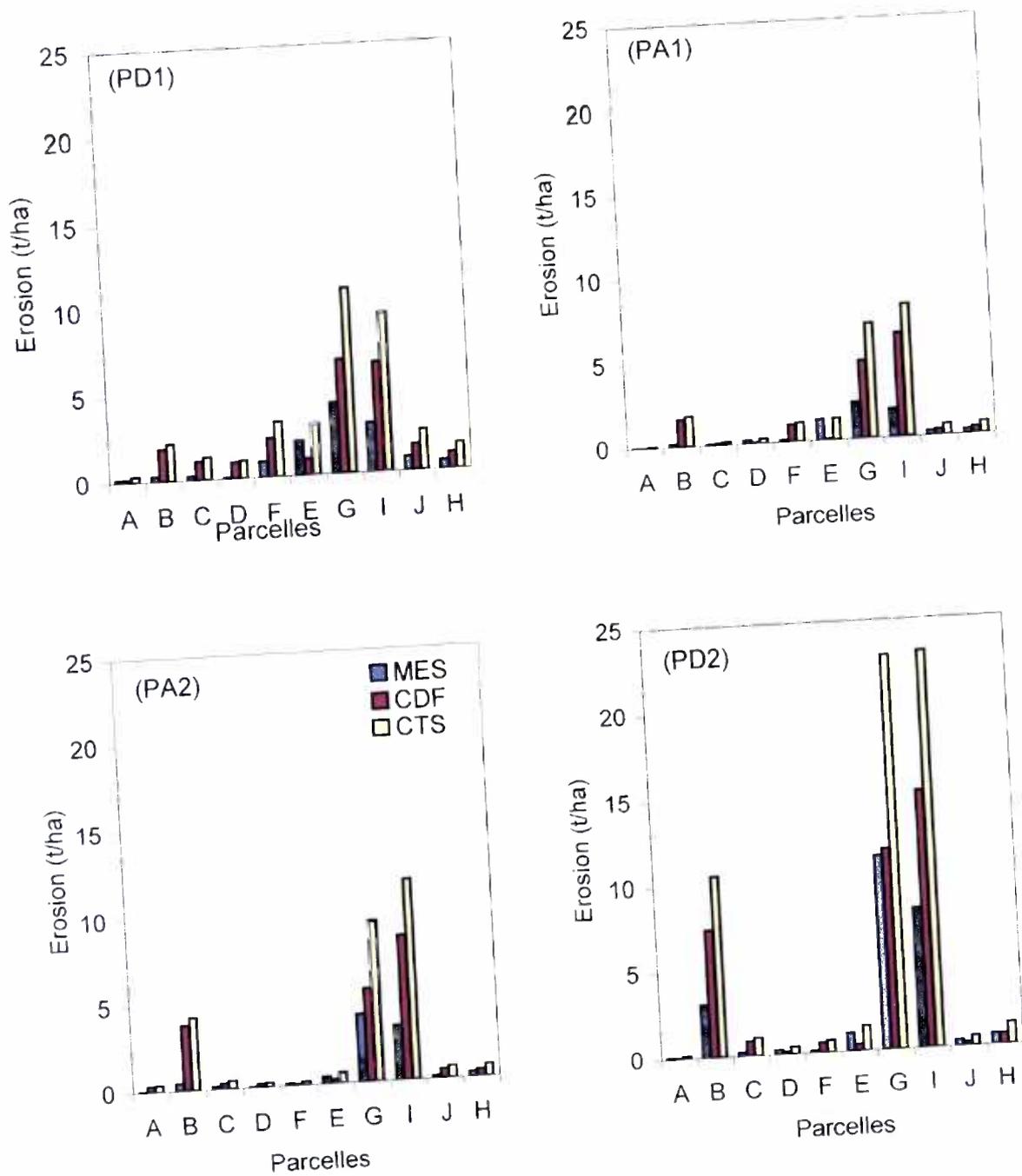
**Figure 4.11** - Evolution des flux de matières en suspension (MES) et du charriage de fond (CDF) au sein des différentes surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) lors de deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors de deux averses annuelles (PA1 et PA2).



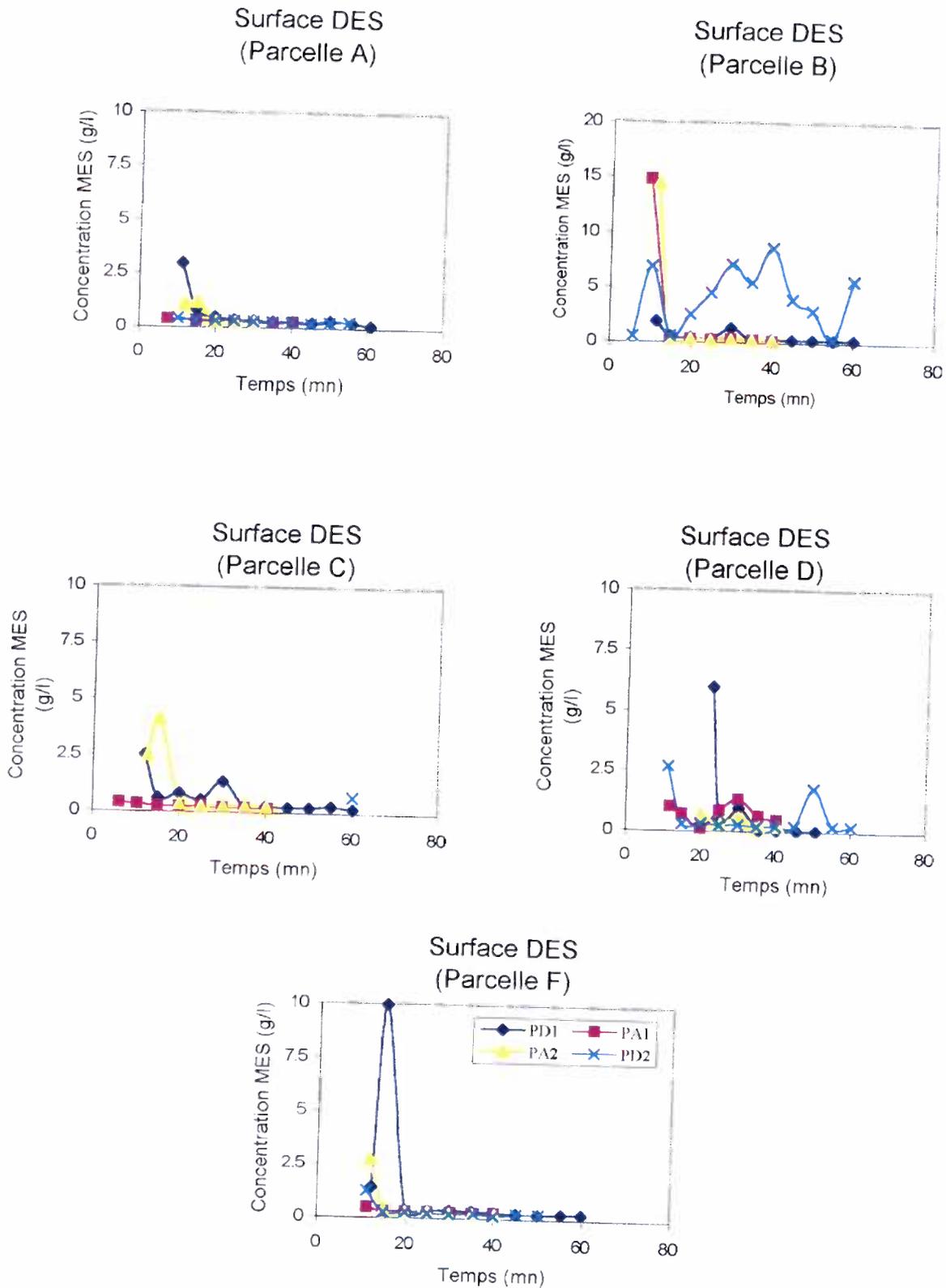
**Figure 4.12** - Evolution des flux de matières en suspension (MES) et du charriage de fond (CDF) au sein des différentes surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors de deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors de deux averses annuelles (PA1 et PA2).



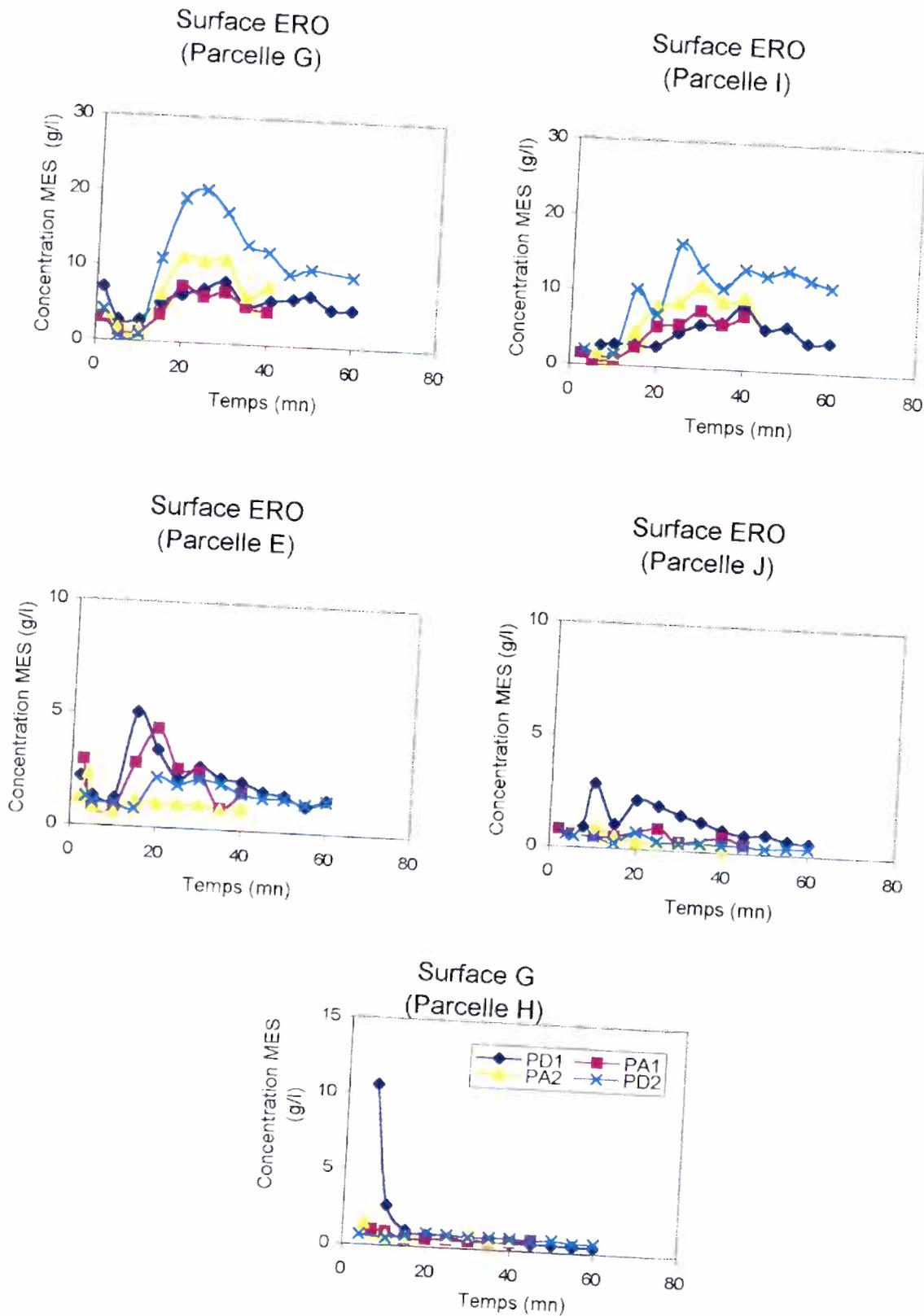
**Figure 4.13** - Quantification de l'érosion à l'échelle des différentes parcelles sur surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelle G, I, E et J) et de type G (parcelle H).



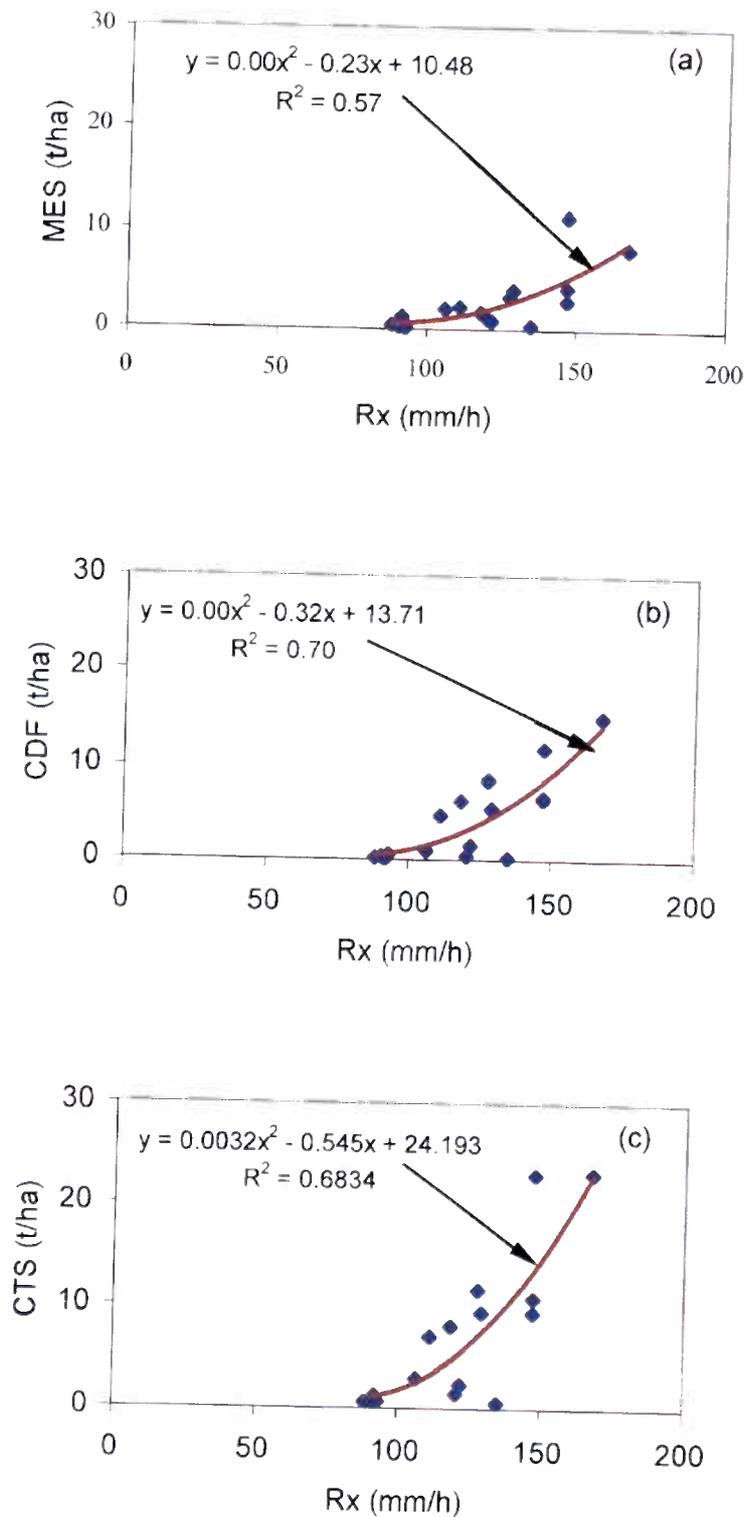
**Figure 4.14** - Evolution des flux de matières en suspension (MES), du charriage de fond (CDF) et de la charge totale solide (CTS) au sein des différentes surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) par événement décennal (PD1 et PD2) ou annuel (PA1 et PA2).



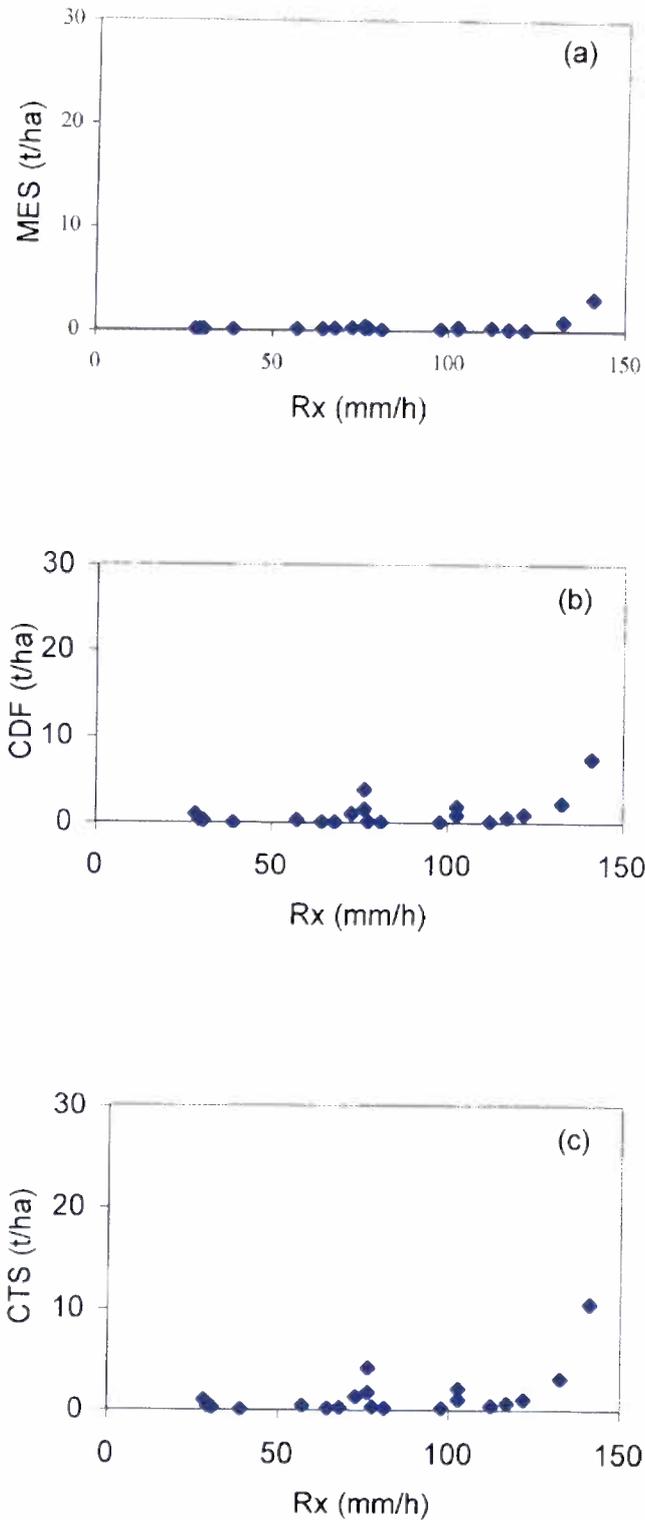
**Figure 4.15** - Evolution de la teneur en MES au sein des surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) lors des deux pluies décennales (PD1 et PD2) et lors de deux pluies annuelles (PA1 et PA2).



**Figure 4.16** - Evolution de la teneur en MES au sein des surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors des deux pluies décennales (PD1 et PD2) et lors de deux pluies annuelles (PA1 et PA2).



**Figure 4.17** - Relation entre l'intensité de ruissellement maximum (Rx) et les exportations (a) en suspension (MES), (b) par charriage de fond (CDF) et (c) de solide total (CTS) au sein des surfaces ERO (parcelles G, I, E et J).



**Figure 4.18** - Relation entre l'intensité de ruissellement maximum (Rx) et les exportations (a) en suspension (MES), (b) par charriage de fond (CDF) et (c) de solide total (CTS) au sein des surfaces DES (parcelles A, B, C, D et F).

## 4.2. Discussion

### 4.2.1. Ruissellement et infiltration

#### *Influence des états de surface*

Les parcelles étudiées sont réparties en trois grands états de surfaces. Il s'agit des surfaces de type DES, des surfaces de type ERO et une surface de type G. Dans les surfaces ERO on a une croûte sur matériaux limono-sableux, deux sur matériaux sableux et un sur matériaux carbonatés

L'état de surface est considéré comme un ensemble homogène constitué des éléments qui sont le couvert végétal, la surface du sol, et organisations superficielles (Casenave et al, 1989). Ces dernières ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques. Il y a alors une relation liant cet état de surface et l'infiltration et le ruissellement. L'importance de l'infiltration sur les surfaces DES, s'explique, en plus de leur nature DES, par le fait qu'elles sont enherbées. Sur l'ensemble de la pluie (276 mm) 68% est infiltrée (parcelle A). L'infiltrabilité des sols sur surfaces DES est élevée et elle varie dans l'espace. Cette infiltrabilité peut avoir une incidence sur l'humidité. Les surfaces DES sont sensibles à l'humidité initiale, aux activités biologiques.

Sur les croûtes ERO et G, le ruissellement est voisin de 100% et reste dans les mêmes proportions. Ce dernier confère une infiltrabilité très faible qui peut s'expliquer par la composition granulométrique observée au sein de ces croûtes. Elle est invariable avec l'humidité initiale. Au sein des surfaces DES couvertes d'un tapis herbacé, l'infiltration est plus importante et se traduit par un retard de ruissellement sur celles ci. Sur l'ensemble de la pluie (276 mm) 68% serait infiltré (parcelle A).

#### *Influence de la pente et de micro-relief*

Les pentes les plus raides sont observées sur les croûtes ERO (parcelles G et I). Pour ces dernières l'infiltrabilité est faible mais le front d'humectation profond. L'infiltrabilité faible observée sur les croûtes de type ERO ne dépend pas de la pente. Sur des petites surfaces, le  $K_r$  décroît avec la pente jusqu'à 2.5% et reste stable. L'effet de la pente est moins sensible dans les phénomènes de ruissellement et infiltration sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup> (Casenave et al, 1989).

La différence de comportement observé vis-à-vis de l'infiltration, sur les surfaces DES, est due tout simplement à une variation de la topographie. Le micro-relief confère donc à une surface donnée la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et augmenter le stockage superficiel de l'eau favorable à l'infiltration selon le type de sol.

#### *Influence du couvert végétal et des activités fauniques*

Le couvert végétal et particulièrement la strate herbacée et les activités fauniques jouent un rôle important sur les phénomènes de ruissellement et d'infiltration. Le couvert végétal s'oppose à l'imperméabilisation du sol et dissipe l'énergie cinétique des pluies (Casenave et al, 1989). Les coefficients d'infiltration les plus élevés ont été observés au niveau des surfaces de type DES. Ceci s'explique par le fait que ces dernières sont enherbées alors que les autres surfaces, ERO et G ne le sont pas. L'importance du couvert

végétal sur les phénomènes de ruissellement et d'infiltration a également été décrite par les mesures sous pluies simulées (Albergel et al 1986).

Comme le couvert végétal, l'activité biologique agit aussi directement sur l'infiltration par la porosité qu'elle génère au sein d'une parcelle. L'importance de l'infiltrabilité observée (Ki moyen de 68% et de 57%) sur les surfaces DES (parcelle A et D) est due aux effets biologiques.

#### *Influence de la granulométrie*

La granulométrie du sol joue un rôle important dans les phénomènes de ruissellement et d'infiltration. L'influence de la composition granulométrique des sols a été mise en évidence sur leur stabilité structurale. Sous l'impact des gouttes de pluies les sables, considérées comme très stables à partir du test d'instabilité structurale, présentent une forte instabilité (Casenave et al, 1989) Toutes fois, les chocs dus aux gouttes de pluie favorisent la dispersion de la phase argileuse et donc sa mise en suspension dans les eaux de ruissellement ou d'infiltration. En effet, pour la zone sahélienne, ce sont des mélanges comportant 90% de sable et 10% de limons qui présentent la plus forte baisse d'infiltrabilité mesurée sous pluie simulée (Poesen, 1986). Le taux, des particules en suspension (MES) et les sols, montre que la texture des croûtes d'érosion type ERO\_Is est argileuse. La surface de type G est constituée des graviers (fraction variant de 2 mm à 20 mm). Cette dernière présente le coefficient d'infiltration le plus faible (7%). Celle ci, même si les textures sableuse et argileuse ne requièrent des taux respectifs de 90 et de 10 % reste le cas explicite de cette hypothèse.

Kemper et Noonan (1970) ont observé les ruissellements les plus forts pour des sols encroûtés contenant entre 50 et 80% de sable. Les croûtes d'érosion G et ERO\_sb présentent des coefficients de ruissellement jusqu'à 99% lors de la pluie PD2. Dans ces croûtes l'abondance de la fraction sableuse, augmente le ruissellement. Par ailleurs, ce sont des croûtes formées sur les sols argileux qui offrent le nombre de contact entre particules le plus élevé et sont donc les plus dures (Sharma et Agrawal, 1980). Comme le soulignent De Ploey et Bryan (1986), la présence d'éléments grossiers en surface joue un rôle ambivalent sur le ruissellement. Ils protègent cette surface de l'impact des gouttes d'eau, diminuant ainsi les risques de réorganisation. De même ils imperméabilisent localement le sol et favorisent d'autant la concentration de l'eau et augmentent le ruissellement. Le ruissellement observé sur les croûtes de type ERO et de type G est peu variable dans l'espace, il est proche de 100%.

#### *Influence de la pluie sur la lame ruisselée*

L'étude des phases d'écoulements transitoires et permanents a permis d'apporter des informations sur la lame ruisselée. Cette dernière varie proportionnellement avec la pluie. Sur l'ensemble de types de surfaces DES, ERO et G la lame ruisselée augmente avec la pluie; la corrélation obtenue entre la pluie et la lame ruisselée est assez bonne (coefficient de détermination  $r^2=0.69$ ). La topographie joue un grand rôle dans les phénomènes de ruissellement infiltration. L'existence des zones en dépression entraîne un stockage superficiel selon la nature du sol. Elle défavorise le ruissellement et diminue donc la lame ruisselée. Plus l'intensité de pluie est importante et plus les eaux se concentrent dans ces zones. Par leur nature granulométrique, Les surfaces de type DES, ERO\_Is ERO\_ca et G ayant un micro-relief relativement marqué, expliquent ce principe.

### *Influence de l'état d'humectation et de la topographie sur la détention superficielle et sur la pluie d'imbibition*

Avant l'apparition du ruissellement, l'infiltration est totale. L'étude des phases d'imbibition et de vidange permettent d'apporter des informations sur  $P_i$  et  $D_r$ .

La topographie, l'état d'humectation et le type d'états de surfaces ont une influence sur la détention superficielle et l'imbibition. Plus le micro-relief est marqué et plus la tendance des eaux de pluie à se stocker est grande et moins la détention superficielle est importante. Les parcelles sur surfaces de type DES confirment le rôle limité de la topographie sur l'infiltration et ruissellement. Sur un sol sec, avant l'apparition du ruissellement, l'imbibition occasionnant une infiltration est totale alors qu'ensuite elle peut se retrouver considérablement réduite. Lors des averses PD1 et PA2 les parcelles sur crêtes d'érosion et grossière illustrent bien ce principe.

### *Influence de l'humidité sur le coefficient de ruissellement*

L'infiltrabilité des sols, selon le type d'états de surface à une incidence sur l'humidité initiale. Sur les surfaces de type G (parcelles H) et de type ERO sur matériaux limono-sableux (parcelle E), l'humidité initiale est insignifiante. L'infiltrabilité faible des sols observée sur ces états de surfaces n'a pas d'incidence sur l'humidité initiale.

Cependant, sur les surfaces de type DES, l'humidité est assez importante et variable dans l'espace et dans le temps. Ce comportement s'explique par le fait que l'infiltrabilité forte peut influencer l'humidité initiale. Les profondeurs de front d'humectation élevées confirment le rôle limité de l'infiltrabilité sur l'humidité initiale. Cette dernière dépend aussi en grande partie de la texture du sol, du couvert végétal, des activités biologiques et donc du type d'état de surface. L'intensité de la pluie agit partiellement sur l'humidité initiale du sol en place. Cependant, le micro-relief et l'état d'humectation offrent aux différents états de surface une variabilité vis-à-vis du ruissellement et de l'infiltration. Les valeurs de l'infiltration observées concordent avec celles d'humidités selon la nature du sol. La variation du ruissellement, sur les crêtes de type ERO<sub>ls</sub>, ERO<sub>ca</sub> et type G, est conditionnée en plus de l'humidité par la nature sol. Celle-ci agit considérablement sur l'humidité.

L'indice de précipitations antérieures ( $IK_n$ ) est un indicateur d'humidité initiale du sol. Le coefficient de détermination obtenue est  $r^2 = 0.87$ .

#### *4.2.2. Erosion hydrique*

##### *Influence de l'état de surface*

On rappelle que les états de surfaces du BV1 sont constitués de surfaces DES, de surface ERO et de surface de type G. Les surfaces ERO sont réparties en crêtes d'érosions ERO<sub>sb</sub> sur matériaux sableux, ERO<sub>ls</sub> sur matériaux argileux et ERO<sub>ca</sub> sur matériaux carbonatés.

Les effets de ces différentes crêtes sur l'érosion sont ressentis sur les crêtes de type ERO<sub>sb</sub> (parcelles G et I). Dans ces dernières le transport solide, en suspension (MES) et par charriage de fond (CDF), est le plus important. L'érodibilité des sols dépend du type d'état de surfaces. Elle est variable sur les surfaces ERO et G et peu variable et faible sur les surfaces DES. Cette érodibilité est fortement influencée par les facteurs intrinsèques sur les surfaces ERO et G. Ces facteurs sont d'ordre physico-chimique (présence de calcium), topographique (pente) et granulométrique.

Sur les surfaces de type ERO\_sb, l'érodibilité élevée est due au fait que celles-ci présentent les pentes moyennes les plus raides (9 à 17%). L'érodibilité faible sur la croûte ERO\_ca s'explique par la présence du calcium de par ses propriétés physico-chimiques. Le taux de calcium sur cette croûte est très élevé et donc moins de particules fines (argiles et limons) exportées. Le calcium joue alors un rôle stabilisateur dans l'interaction argilo-calcaire au sein des états de surfaces.

#### *Influence de la pente et de micro-relief*

Sous l'effet des gouttes d'eau, la nature de la pente (raide ou douce) est déterminante dans les phénomènes d'érosions. Une pente raide confère à un sol sur place une érosion importante selon le type d'état de surface. Sur les croûtes ERO, l'érodibilité varie avec la pente moyenne alors que sur les surfaces DES, cette pente n'a pas d'incidence. C'est ainsi que, l'érodibilité des sols sur les croûtes ERO\_sb (parcelles G et I) est plus élevée due à la pente moyenne forte que celles-ci présentent. Cette influence de la pente sur l'érosion à l'échelle des parcelles de 1 m<sup>2</sup> est moins sensible (Casenave et al, 1989). Cette hypothèse est valable pour les surfaces DES. Cependant, sous l'impact de la pluie, comme dans les phénomènes de ruissellement et infiltration, le micro-relief joue aussi un rôle remarquable dans la réorganisation superficielle. Les surfaces ERO (parcelles G et I) et DES (parcelle B) ont donné lieu à des exportations importantes dues au micro-relief marqué qu'elles présentent. En outre, dans les surfaces ERO, les eaux de ruissellement n'ont aucune contrainte pour exporter les particules grossières (CDF) et fines (MES). L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente du fait de l'augmentation du ruissellement.

#### *Influence du couvert végétal*

Le risque d'érosion décroît avec l'augmentation du couvert végétal. Ce couvert végétal protège le sol de l'effet des gouttes de pluies. Il tend à ralentir la vitesse de ruissellement et donc de l'érosion et favorise l'infiltration. L'efficacité du couvert végétal à réduire l'érosion dépend du type, de l'étendue et de la densité du couvert végétal. Il est quasiment absent dans les surfaces ERO (parcelles G, I, E et J) et G (parcelle H). Les parcelles sur les croûtes de type DES sont couvertes d'un tapis herbacé. Elles subissent moins d'érosions que les autres.

#### *Influence de l'intensité de ruissellement maximum*

Le ruissellement le plus élevé a entraîné une réorganisation superficielle et donc une dégradation des terres (MES et CDF) la plus importante. C'est qui n'est pas toujours le cas (exception faite par la parcelle H de la surface de type G). Par ailleurs cette supposition reste valable pour les croûtes de type ERO et de type G.

Les phénomènes arrachement mécaniques, transport et dépôt des particules sont très sensibles à l'intensité de la pluie. L'arrachement des particules dépend non seulement de la vitesse de ruissellement mais aussi de sa turbulence contrôlée par l'épaisseur de la lame d'eau, l'impact des gouttes d'eau et les irrégularités de la surface (micro-relief). Il est admis que l'arrachement dû au ruissellement reste bien inférieur à celui provoqué par l'impact des gouttes de pluies (Hudson 1971). Plus l'intensité de pluie est grande et donc et plus ces particules sableuses sont transportées par charriage de fond.

Les résultats présentés ci-dessus réaffirment le rôle limité du ruissellement dans le détachement des particules. Même pour des vitesses de ruissellement faibles et donc des intensités de ruissellement faibles, les particules les plus fines peuvent migrer en suspension

alors que les particules grossières (sables ou agrégats d'argiles de même dimension) se déplacent par charriage de fond pour se déposer après.

L'influence de l'intensité de ruissellement sur l'érosion a été justifiée par les croûtes ERO et G. Ces dernières concèdent la plus grande résistance à l'érosion sous l'effet de la pluie. Les intensités de ruissellement très fortes ont été mesurées sur ces croûtes.

#### *Influence de la texture du sol*

La texture confère à une surface donnée une résistance ou non à l'érosion. Une texture graveleuse par exemple protège la surface d'une croûte donnée de l'impact des gouttes de pluies. C'est qui n'est pas le cas dans les croûtes d'érosions ou nous assistons à une texture argileuse ou sableuse. Sous l'effet de la pluie les phénomènes d'humectation entraînent une mobilité des particules et favorisent alors le transport solide tant en suspension que par charriage de fond. Les chocs dus aux gouttes de pluie favorisent la dispersion de la phase argileuse et donc son exportation sous forme de MES.

#### *Evolution de la Teneur des MES*

Lors de la simulation les fortes teneurs en MES s'observent aux fortes intensités de pluie. On note dans l'ensemble des surfaces exceptées les surfaces ERO\_Is (parcelle E) et ERO\_ca (parcelle J) une diminution des valeurs lors des 15 premières minutes quelle que soit la fréquence de l'averse puis une stabilisation autour de 1 g/l. cette période concerne la phase des fortes intensités de ruissellement. Cette différence s'explique la présence du calcium, par ses propriétés physico-chimiques, joue un rôle stabilisateur dans les interactions argilo-calcaires et/ou limono-calcaires. La quantité des matières solides exportées à chaque averse dépend du volume écoulé et donc du débit de pointe assimilé à l'intensité de ruissellement maximale et aussi des facteurs intrinsèques (propriétés physico-chimiques du calcium par exemple).

#### *Quantification des transports solides*

L'érosion des parcelles sur croûte ERO est comparable aux exportations solides totales observées sur l'ensemble des différentes surfaces élémentaires. Les transports par charriage de fond (sables + gravillons) sont largement majoritaires. Ils représentent sur l'ensemble de l'érosion 93.986 t/ha soit 64.33% contre 52.112 t/ha soit 35.67% pour les exportations en suspension (argiles + limons) On notera que les 70 % des transports solides ont lieu sur les deux croûtes d'érosions sur matériaux sableux (parcelle G et I). Les croûtes d'érosion représentent 76.81%, les croûtes de dessiccation 20.35% et croûte grossière 2.84% de la charge totale solide. Les croûtes d'érosion sont représentées à 25%, croûtes de dessiccation sur placage sableux à 70% et les croûtes gravillonnaires à 5% de la surface totale du bassin étudié. Le bilan de l'érosion dépend donc en grande partie de type d'état de surface. On passe d'une érodibilité faible (Surfaces DES et G) à une érodibilité plus importante (surfaces ERO). Les surfaces d'érosion sur matériaux sableux sont propices à l'érosion hydrique.

L'érosion hydrique liée au ruissellement reste variable. La quantité des matières solides exportées à chaque averse dépend également de l'intensité maximale de ruissellement  $R_x$  et donc de l'événement pluvieux. La corrélation, établie entre l'érosion et l'intensité de ruissellement, à un coefficient de détermination ( $r^2$ ) qui ne dépasse pas 0.70. Par ailleurs il n'y a pas de relation notable lorsqu'il s'agit des surfaces de dessiccation de type DES ou grossière de type G.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le simulateur de pluie s'est avéré efficace pour étudier les facteurs qui contrôlent les phénomènes de ruissellement, d'infiltration et d'érosion hydrique. Les essais au simulateur ont montré la résistance des parcelles de surfaces de type DES à l'érosion lorsqu'elles sont soumises à des séries d'averses décennales ou annuelles. L'influence dominante de l'état de surface a été mise en évidence ainsi que l'importance du couvert végétal, des activités biologiques, de l'intensité et de la hauteur des précipitations sur l'infiltrabilité et de l'érodibilité des sols. L'importance des facteurs intrinsèques, le micro-relief et l'état préalable de surface du sol (humidité initiale) est aussi démontrée.

Les différents états de surface (ERO, G et DES) présentent une variabilité de comportement tant qualitativement que quantitativement. Cette variabilité vis-à-vis du ruissellement, de l'infiltrabilité et de l'érodibilité des sols est liée à plusieurs facteurs. Le ruissellement observé est voisin de 100% et peu variable sur les croûtes ERO et G. L'infiltrabilité faible obtenue sur ces surfaces n'a pas d'incidence sur l'humidité initiale. En effet, elle peut être liée à la variation de la pente et de la nature du sol. Cependant, ces états de surface, par l'intermédiaire des facteurs intrinsèques, ont donné lieu à une érodibilité importante et variable. Ces facteurs sont d'ordre physico-chimique (présence de calcium), topographique (pente et micro-relief) et granulométrique. Le taux de calcium élevé sur la croûte ERO<sub>ca</sub> lui confère une stabilité du transport hydrique des particules fines. Toutes fois, l'intensité de l'érosion hydrique sur les croûtes de type ERO est aussi liée à l'importance de l'intensité de ruissellement.

Les surfaces DES enherbées et ayant un micro-relief plus ou moins marqué, semblent hydriquement variable. L'infiltrabilité élevée et variable des sols sur surfaces DES peut avoir une incidence sur l'état l'humidité. Les surfaces DES sont sensibles à l'humidité initiale, aux activités biologiques et au micro-relief.

Les croûtes d'érosion sont représentées à 25%, surfaces de dessiccation sur placage sableux à 70% et les croûtes gravillonnaires à 5% de la surface totale du bassin étudié. Sur l'ensemble de la charge totale solide, les croûtes d'érosion représentent 77%, surfaces dessiccation 23% et croûte gravillonnaires 3%. La superficie importante occupée par ces différentes croûtes ne reflète pas la quantité des sols exportés. A l'échelle du bassin versant, l'intensité de l'érosion hydrique est fortement liée à l'importance de l'évènement, annuel ou décennal. Sur une parcelle de 1 m<sup>2</sup>, cette influence n'est pas perceptible.

S'agissant de la lutte contre la désertification au Sahel, il serait intéressant de planter sur des zones fertiles et pâturées des arbustes fourragers pour freiner les eaux de ruissellement et permettre une infiltrabilité élevée. Ces fourragères interviendront dans la satisfaction de la demande pastorale en zone sahélienne.

Etant donné que les états de surfaces ont une influence sur l'infiltrabilité et l'érodibilité, un suivi de modification de ces états de surfaces permettra aussi de lutter contre la dégradation du milieu soumis à l'érosion hydrique et au pâturage. Il serait intéressant de multiplier des études sous pluies sur le bassin versant afin de quantifier les exportations solides en suspension et par charriage de fond. Ceci permettra d'obtenir des résultats fiables et concluants sur un bassin versant. Pour mieux maîtriser des phénomènes d'infiltrabilité et d'érodibilité des sols sur les différents états de surfaces, il serait souhaitable qu'une modélisation de ces phénomènes soit faite. Une simulation de pluie sur des états de surfaces différents et dans d'autres conditions climatiques permettra de généraliser des résultats obtenus sous pluies simulées.

## **REFERTENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

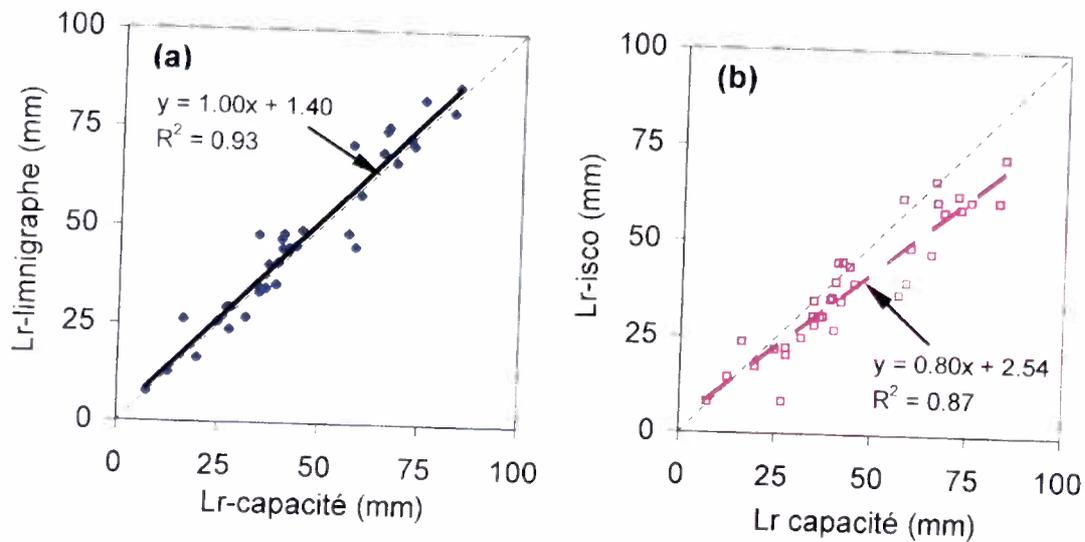
## 6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albergel J., Ribstein P., Valentin C.**, l'infiltration : Quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis des 48 parcelles soumises à des simulations des pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires (1986) 25-48.
- Asseline J., Valentin C.**, Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XV, n°4 (1978) 3321-349.
- Biaou A.C., Casenave A., Delhoume J.P., Gathelier R., Thiombiano L., Gineste Ph; Ribolzi O.**, Erosion hydrique et transfert des solutés en milieu sahélien : Etudes des processus à l'échelle d'un petit bassin au Nord du Burkina Faso. Sud Sciences et Technologies n°4 (nov. 1999) 18-28.
- Boinfin J.**, La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, (1984) 320 p
- Casenave A.**, Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisations et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX n°4 (1982) 207-227.
- Casenave A.**, Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris (1991) 77-86.
- Casenave A.**, Dynamique des milieux de savane sèche au Burkina Faso: dégradation des systèmes écologiques et conséquence sur le cycle de l'eau (1998) 30 p.
- Casenave A., Valentin C.**, Les états de surface de la zone sahélienne : Influence sur l'infiltration. Ed ORSTOM, Coll. Didactique (1989) 229 p.
- Chevalier P.**, Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi-Haute Volta), Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. XIX, n°4 (1982) 253-297.
- Collinet J.**, Etude expérimentale de l'érosion hydrique de sols représentatifs de l'Afrique de l'Ouest: Présentation des sites expérimentaux. Méthode et identification des processus élémentaires. Analyse et comparaison des régimes de ruissellement, Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XXIV, n° 3 (1988) 235-254.
- Collinet J., Valentin C.**, Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle : Nouvelles perspectives-Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XVII, n° 4 (1979) 283-328.
- Collinet J., Valentin C., Asseline J., Chevalier P., SICOT M.**, Etude Lat/03: Ruissellement, Infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Rapport de terrain sur la première opération «Mare d'Oursi», Ed DGRST et ORSTOM (1980) 14 p.
- De ploey J., Bryan R.M.**, Time to runoff as a function of slop angle – in: Assessment of soil surface sealing and crusting. Callebaut F., Gabriels D., De Boodt M., edit. Flanders Research centre for soil erosion and soil conservation (1986) 106-119.
- Dupriez H., Leener P.**, les chemins de l'eau (1990) 380 p
- Farres P.J.**, The dynamic of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. CATENA, 14 (1987) 119-130
- Hudson N. W.**, Soils conservation. BATSFORD Edit., London (1973) 173p

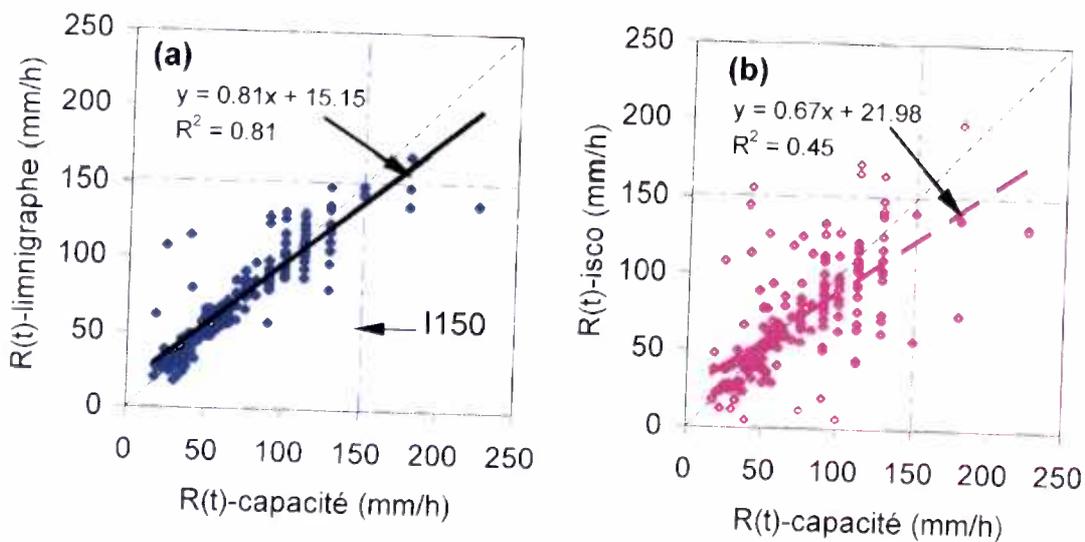
- Karimou Ambouta J.M., Valentin C., Laverdière Marc R.,** Jachères et Croûtes d'érosions au Sahel, Sécheresse n° 4, Vol 7 (1996) 269-275.
- Kemper W.D., Noonan L.,** Runoff as affected by salt treatments and texture Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 34 (1970) 126-130.
- Lafforgue A.,** Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelle : Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. XIV, n° 4 (1977) 299-344.
- Lafforgue A., Casenave A.,** Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. La Houille Blanche, n°4-5, (1980) 243-249.
- Lafforgue A., Naah E.,** Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées, Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. XIII, n°3 (1976) 195-237.
- Mbaye B.,** Variabilité du bilan hydrique d'un placage sableux sahélien. Mémoire de fin d'étude. Ecole inter-états d'Ingénieur de l'Équipement Rural (2000). 42 p
- Mücher et De Ploey 1977**
- Poesen J.,** Surface sealing on loose sediments: the role of texture, slope and position of stones in the top layer – in: Assessment of soil surface sealing and crusting. Callebaut F., Gabriels D., De Boodt M., edit. Flanders Research centre for soil erosion and soil conservation (1986) 354-362.
- Quantin P., Combeau A.,** Relation entre érosion et stabilité structurale. C.R. Acad. Sci., 254 (1962) 1855-1857.
- Ribolzi O., Delhoume J.P., Casenave A., Gathelier R.,** Programme DMP, Rapport de campagne, Ed IRD (1999) 2-28.
- Ribolzi O., Auque L., Bariac T., Casenave A., Delhoume J.P., Gathelier R., Pot V.,** Ecoulements hypodermiques et transferts de solutés dans les placages éoliens du Sahel : étude par traçage isotopique et chimique sous pluies simulées, Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris (1999) 53-60
- Sharma D.P., Agrawal R.P.,** Physico-chemical properties of soils crust and their relationships with the modulus of rupture in alluvial soils. J. Indian Soc. Soil Sci., 28(1) (1980) 119-121
- Müchler H.J., De ploey J.,** experimental and micromorphological investigation of erosion and redeposition of loess by water. Earth surface Processes, 2 (1977) 117-124.
- Wischmeier W. H., Smith D. D.,** An universal loss estimating equation to guide conservation farm planning 7<sup>th</sup>, Intern. Congr. Of Soil (1960)

## **7. ANNEXES**

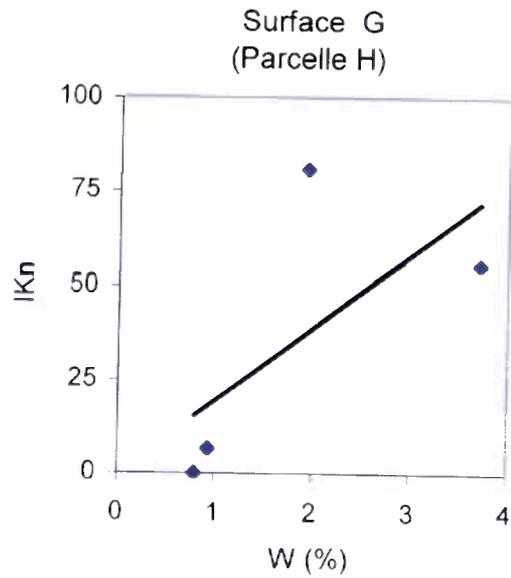
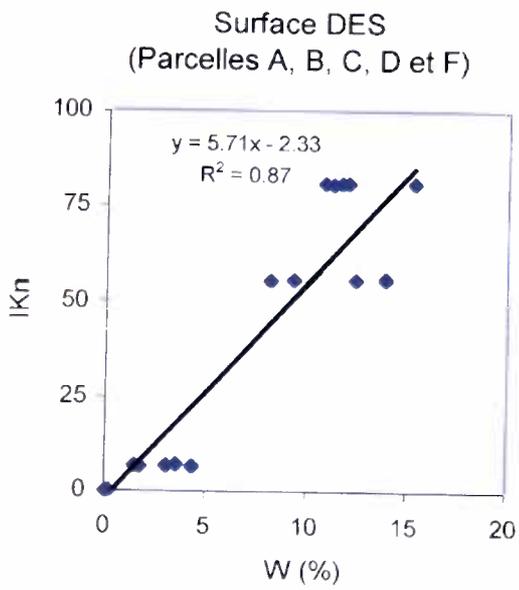
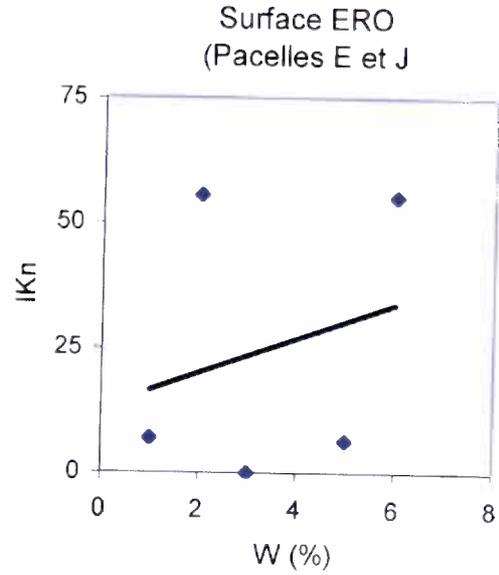
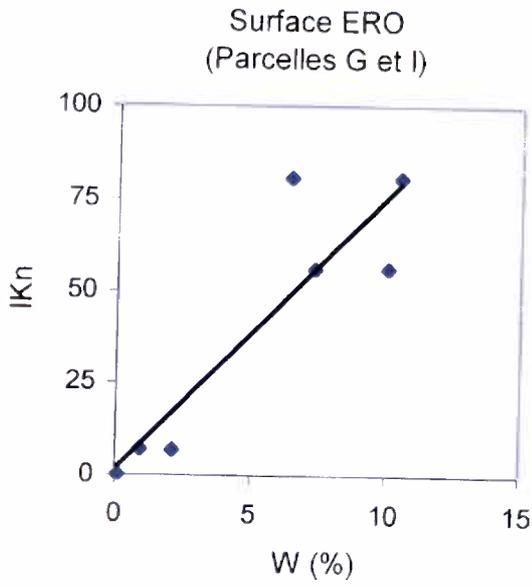
# **ANNEXE I**



**Figure 1.1** - Comparaison des lames ruisselées estimées par capacité (Lr-capacité), **(a)** à l'aide d'un limnigraphe mécanique (Lr-limnigraphe) et **(b)** à l'aide du capteur de pression automatique isco 4220 (Lr-isco).



**Figure 1.2** - Comparaison des intensités de ruissellement mesurées par capacité (R(t)-capacité) **(a)** à l'aide d'un limnigraphe mécanique (R(t)-limnigraphe) et **(b)** à l'aide du capteur de pression automatique isco 4220 (R(t)-isco). I150 est la droite correspondant à la valeur de l'intensité de pluie maximale.



**Figure 1.3** - Relation entre l'indice d'humidité de Kohler (IKn) et l'humidité initiale (W) déterminée par la méthode gravimétrique au sein des différents états de surface.

**Tableau 1.1 - Caractéristiques des averses sur les surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F)**

Type d'averse	Début pluie	Fin pluie	P (mm)	Pi (mm)	Pu (mm)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Vr (l)	Dr (mm)	Lr (mm)	Li (mm)	Qmax (l/s)	Kr (%)	Ki (%)	teta mn	IKn
<b>Parcelle A</b>																
PD1	08h05min	60min50s	85.0	7.5	77.5	150	77.4	26.8	0.1	26.7	50.7	0.02	34.5	65.4	20.8	0
PA1	10h05min	40min35s	53.3	3.0	50.3	140	39.0	12.5	0.2	12.3	37.8	0.01	24.4	75.2	19.2	80.8
PA1	07h27min	40min35s	53.3	9.5	43.8	140	29.4	7.5	0.1	7.4	36.3	0.01	16.9	82.9	15.3	7.0
PD2	09h07min	60min52s	85.0	3.5	81.5	150	64.2	34.3	0.2	34.1	47.2	0.02	41.8	57.9	32.1	55.8
<b>Parcelle B</b>																
PD1	07h01min		85.0	8.3	76.8	150	102.6	48.2	0.3	47.9	28.6	0.03	62.4	37.2	28.2	0.0
PA1	09h10min	40min30s	53.3	5.4	47.9	140	76.2	25.6	0.2	25.4	22.3	0.02	53.0	46.6	20.2	80.5
PA1	07h43min	40min30s	53.3	9.5	43.8	140	76.2	23.7	0.2	23.5	20.1	0.02	53.6	45.9	18.7	6.5
PD2	09h28min	61min40s	85.0	2.0	83.0	150	141.0	70.9	0.1	70.8	12.1	0.04	85.3	14.6	30.2	55.3
<b>Parcelle C</b>																
PD1	14h36min	60min28s	85.0	9.0	76.0	150	72.6	34.1	0.4	33.7	41.9	0.02	44.3	55.1	28.2	0.0
PA1	16h37min	40min32s	53.3	3.1	50.2	140	81.0	29.3	1.0	28.3	20.9	0.02	56.3	41.7	21.7	80.8
PA1	14h30min	40min32s	53.3	10.7	42.7	140	57.0	16.3	0.3	16.0	26.4	0.02	37.5	61.8	17.2	6.5
PD2	16h10min	60min44s	85.0	4.1	80.9	150	102.6	48.0	0.5	47.5	32.9	0.03	58.7	40.7	28.1	55.3
<b>Parcelle D</b>																
PD1	15h42min	60min54	85.0	38.0	47.0	150	28.2	6.1	0.0	6.1	40.9	0.01	13.0	87.0	13.0	0.0
PA1	?	46	53.3	11.8	41.5	140	67.8	18.0	0.3	17.7	23.5	0.02	42.7	56.6	15.9	80.8
PA1	14h38min	40min40s	53.3	28.6	24.7	140	30.6	5.6	0.1	5.5	19.1	0.01	22.3	77.3	11.0	6.6
PD2	16h18min	60min44s	85.0	7.4	77.6	150	112.2	52.6	0.2	52.4	25.0	0.03	67.5	32.2	28.1	55.5
<b>Parcelle F</b>																
PD1	07h06	60min48	85.0	10.0	75.0	150.0	106.2	44.8	0.4	44.4	30.2	0.03	59.2	40.3	25.3	0.0
PA1	09h06	40min32	53.3	8.3	45.0	140.0	91.8	29.3	0.6	28.7	15.7	0.03	63.8	34.9	19.2	80.8
PA1	06h42	40min30	53.3	10.0	43.4	140.0	88.2	26.1	0.4	25.7	17.3	0.02	59.3	39.8	17.8	6.6
PD2	08h20	50	85.0	7.5	77.5	150.0	120.6	47.6	2.2	45.4	29.9	0.03	58.6	38.6	23.7	55.4

Avec P: hauteur de la pluie; Pi: pluie d'imbibition; Pu: pluie utile; I: intensité de la pluie; Rx: intensité maximale de ruissellement; Vr: volume ruisselé; Dr: détention superficielle récupérable; Lr: lame ruisselée avant l'arrêt de la pluie; Li: lame infiltrée; Qmax: débit maximal de ruissellement; Kr: coefficient de ruissellement; Ki: coefficient d'infiltration; teta: coefficient de forme.

**Tableau 1.2 - Caractéristiques des averses sur les surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).**

Type d'averse	Début pluie	Fin pluie	P (mm)	Pi (mm)	Pu (mm)	Rx mm/h	Rx mm/h	Vr (l)	Dr (mm)	Lr (mm)	Li (mm)	Qmax (l/s)	Kr (%)	Ki (%)	teta mn	IKn
<b>Parcelle G</b>																
PD1	07h02		85.0	1.0	84.0	150.0	147.0	75.6	0.8	74.8	8.4	0.04	89.0	10.0	30.9	0.0
PA1	09h00		53.3	0.9	52.4	140.0	111.0	40.7	0.4	40.3	11.7	0.03	76.9	22.4	22.0	80.8
PA1	07h38min	40min35s	53.3	1.5	51.8	140.0	<b>129</b>	48.9	0.3	48.6	2.9	0.04	93.9	5.6	22.7	7.0
PD2	09h23min	60min40s	85.0	0.8	84.3	150.0	147	82.6	0.2	82.4	1.7	0.04	97.8	2.0	33.7	55.8
<b>Parcelle I</b>																
PD1	14h38	60min50s	85.0	3.2	81.8	150.0	121.8	58.3	0.8	57.5	23.5	0.03	70.3	28.7	28.7	0.0
PA1	16h42min	17h23min	53.3	1.2	52.1	140.0	90.6	33.1	0.8	32.1	19.0	0.03	61.6	36.4	21.9	80.8
PA1	14h30min	40min34s	53.3	3.0	50.3	140.0	93.0	35.1	1	34.2	15.2	0.03	68.0	30.3	22.6	6.8
PD2	16h10min	60min50s	85.0	1.3	83.7	150.0	135.0	66.6	0.9	66.6	17.1	0.04	79.6	20.4	29.6	56.0
<b>Parcelle E</b>																
PD1	09h04min	10h04min	85.0	0.9	84.1	150.0	132.6	72.7	1	71.7	11.4	0.04	85.3	13.5	32.9	0.0
PA1	11h36min		53.3	2.4	50.9	140.0	121.8	44.9	1.2	43.7	6.0	0.03	85.8	11.8	22.1	80.0
PA1	07h41min	40min33s	53.3	1.1	52.2	140.0	97.8	40	1	39.0	12.2	0.03	74.7	23.4	24.5	6.9
PD2	09h31min	60min50s	85.0	1.6	83.4	150.0	117	69.2	0	69.2	14.2	0.03	83.0	17.0	35.5	55.8
<b>Parcelle J</b>																
PD1	13h15min	60min50s	85.0	3.3	81.8	150.0	127.8	70.9	1.7	69.1	10.9	0.04	84.5	13.3	33.3	0.0
PA1	15h04min		53.3	1.0	52.3	140.0	133.8	44.1	1.8	42.4	8.2	0.04	80.9	15.7	19.8	80.8
PA1	14h56min	40min31s	53.3	3.3	50.0	140.0	127.8	43.7	1.75	42.0	6.3	0.04	83.9	12.7	20.5	6.5
PD2	16h43min		85.0	1.5	83.5	150.0	136.2	79.5	1.7	79.5	4.0	0.04	95.2	4.8	35.0	55.3
<b>Parcelle H</b>																
PD1	13h07min		85.0	3.2	81.8	150.0	147.0	74.6	0.5	74.1	7.2	0.04	90.6	8.8	30.4	0.0
PA1	15h07min		53.3	1.8	51.6	140.0	118.2	44.4	0.7	43.7	7.2	0.03	84.7	13.9	22.5	80.8
PA1	14h23min	15h03min	53.3	2.7	50.7	140.0	127.8	46.7	0.3	46.4	4.0	0.04	91.6	7.8	21.9	6.6
PD2	16h05min	60min48s	85.0	1.6	83.4	150.0	<b>83.385</b>	0.2	83.2	0.0	0.04	99.8	0.0	33.4	55.4	

Avec P: hauteur de la pluie; Pi: pluie utile; I: intensité de la pluie; Rx: intensité maximale de ruissellement; Vr: volume ruisselé; Dr: détention superficielle récupérable; Lr: lame ruisselée avant l'arrêt de la pluie; Li: lame infiltrée; Qmax: débit maximal de ruissellement; Kr: coefficient de ruissellement; Ki: coefficient d'infiltration; teta: coefficient de forme.

**Tableau 1.3** - Recapitulatif des humidités initiales pondérales sur les différents états de surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

Parcelles	Humidité Initiale (%)			
	PD1	PA1	PA2	PD2
A	0.2	11.7	3.5	13.9
B	0.1	11.2	1.7	8.1
C	0.1	10.8	4.3	9.3
D	0.1	15.3	3.1	13.9
F	0.1	12.0	1.5	12.4
G	?	6.4	0.9	7.3
I	0.1	10.5	2.1	10.1
E	?	?	2.0	3.0
J	<b>3.0</b>	2.5	8.8	<b>15.8</b>
H	0.8	1.9	0.9	3.7

**Tableau 1.4** - Les profondeurs du front d'humectation (PFH) relevées sur les différents états de surfaces de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2) aux états initial et final.

	PD1		PA1		PA2		PD2	
	PFH (cm)							
	Etat Init.	Etat Final	Etat Init.	Etat Final	Etat Init.	Etat Final	Etat Init.	Etat Init.
A	0	34	39	44	?	50	52	54
B	0	29	31	36.5	0	42	43	48
C	0	12	12	14	0	29	30.5	36.4
D	0	22.5	22.5	22.7	?	44	46.5	54.5
F	0	26	27	31	30	32	34	38
G	0	4	10	16	0	7.5	14	16
I	0	11	11	21	0	39	49	51
E	0	?	?	2	0	1.5	1.5	3
J	0	1.5	2	6	0	7.5	7.5	7.5
H	0	1	1	2.5	0	1.5	1.5	2

Avec ? : Valeurs non déterminées.

## **ANNEXE II**

**Tableau 2.1 - Composition granulométrique des surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) dans la fraction < 2 mm et > 2 mm (refus).**

Parcelles	A			B			C			D			F		
	SOL	MES	CDF												
A	10.9	15.8	0.9	9.4	3.5	2.9	11.9	11.9	4.3	12.4	7.7	5.4	11.4	14.3	7.6
LF	0.2	35.5	3.9	0.9	1.2	3.4	0.8	15.8	4.2	0.6	6.6	1.4	0.9	4.6	5.0
LG	4.4	9.4	18.4	32.1	20.5	3.2	15.5	16.9	54.3	40.2	52.7	3.6	42.9	22.1	1.5
SF	39.4	22.8	36.0	0.5	10.8	31.9	28.9	10.8	3.3	8.6	7.4	23.3	4.8	14.8	17.7
SG	45.2	15.2	40.8	56.1	62.6	58.7	41.8	44.3	33.8	39.1	24.0	66.3	40.0	43.8	68.2
Refus (%)			0.94			0.44			0.92			1.55			0.65
% moyen argille				11.2	10.6	4.2									
% moyen limon				13.9	18.5	9.9									
% moyen sable				30.4	25.7	38.0									

**Tableau 2.2 - Composition granulométrique des surfaces de type ERO\_sb (parcelles G et I), de type ERO\_sl (parcelle E) et de type ERO\_ca (parcelle J) et de type G (parcelle H) dans la fraction < 2 mm et > 2 mm (refus).**

Parcelles	G			I			E			J			H		
	SOL	MES	CDF	SOL	MES	CDF	SOL	MES	CDF	SOL	MES	CDF	SOL	MES	CDF
A	12.8	10.6	2.6	11.2	23.0	1.9	25.1	49.0	0.6	24.0	6.0	12.8	23.9	22.5	18.6
LF	4.8	7.5	3.9	0.4	22.3	5.5	12.3	37.1	5.3	18.3	14.7	2.9	8.0	27.4	3.3
LG	43.6	14.2	8.1	8.4	16.0	17.2	15.2	7.0	17.1	11.5	44.3	18.4	26.5	22.4	4.4
SF	2.2	27.9	37.2	42.9	23.8	33.4	9.4	0.8	29.6	23.4	0.3	26.9	8.8	0.9	22.2
SG	36.4	39.6	47.9	36.1	14.8	41.8	37.9	4.7	47.4	22.7	34.6	39.3	33.4	26.0	51.4
Refus (%)			0.06			0.03			1.78			4.48			1.15
Total % Argille	12.0	16.8	2.2	25.1	49.0	0.6	24.0	6.0	12.8	23.9	22.5	18.6	23.9	22.5	18.6
Total % Limon	14.3	15.0	8.7	13.8	22.1	11.2	14.9	29.5	10.7	17.3	24.9	3.9	17.3	24.9	3.9
total % sable	29.4	26.5	40.1	23.6	2.8	38.5	23.1	17.5	33.1	21.1	13.4	36.8	21.1	13.4	36.8
	Somme ERO_sb			Somme ERO_Is			Somme ERO_ca			Somme G			Somme H		

Avec SOL : sols prélevés à quelques cm en dehors de la parcelle; MES : matières en suspension; CDF : charriage de fond; A: Argiles; LF: limons fins; LG: limons grossiers; SF: sables fins; SG: sables grossiers; % : pourcentage par rapport à une fraction de 7 g; % refus : pourcentage par rapport au poids total CDF recueilli pour chaque parcelle.

## **ANNEXE III**

**Tableau 3.1 -** Variation de matières en suspension (MES) et de charriages de fond (CDF) au sein des surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) lors de deux averses décennales (PD1 et PD2) et des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

Parcelles	A			B			C			D			F							
	MES	%	CDF	MES	%	CDF	MES	%	CDF	MES	%	CDF	MES	%	CDF					
PD1	0.2	48.7	0.2	28.3	0.3	7.5	1.9	12.7	0.2	36.3	1.1	45.7	0.1	9.7	1.0	69.3	0.9	72.7	2.3	57.6
PA1	0.0	10.8	0.0	6.0	0.2	4.5	1.6	10.9	0.1	9.4	0.1	4.3	0.2	35.3	0.1	4.6	0.1	7.5	1.0	25.3
PA2	0.0	11.2	0.3	54.0	0.4	10.3	3.8	25.9	0.1	22.3	0.3	13.3	0.0	7.0	0.2	14.2	0.1	10.0	0.1	2.0
PD2	0.1	29.3	0.1	11.7	3.1	77.7	7.4	50.5	0.2	32.0	0.9	36.7	0.3	47.9	0.2	12.0	0.1	9.8	0.6	15.1
Total1	0.3	100	0.6	100	4.0	100	14.7	100	0.7	100	2.4	100	0.6	100	1.4	100	1.3	100	3.9	100
Total2			0.9			18.7				3.0				1.9					5.2	
%tage		36.7		63.3		21.2		78.8		21.9		78.1		28.6		71.4		24.2		75.8

**Tableau 3.2 -** Variation de matières en suspension (MES) et de charriages de fond (CDF) au sein des surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors de deux averses décennales (PD1 et PD2) et des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

Parcelles	G			I			E			J			H							
	MES	%	CDF	MES	%	CDF	MES	%	CDF	MES	%	CDF	MES	%	CDF					
PD1	4.1	19.1	6.7	23.5	2.8	17.9	6.4	17.9	2.0	42.7	0.9	58.3	0.8	51.2	1.5	57.6	0.5	30.5	1.0	39.9
PA1	2.2	10.1	4.7	16.5	1.7	10.5	6.2	17.2	1.2	26.3	0.1	3.4	0.3	17.3	0.3	13.0	0.3	15.8	0.4	17.1
PA2	3.9	18.3	5.4	19.0	3.2	20.2	8.4	23.3	0.4	8.2	0.2	13.8	0.2	9.5	0.6	21.2	0.3	16.0	0.4	17.4
PD2	11.3	52.5	11.7	41.1	8.1	51.4	15.0	41.6	1.1	22.8	0.4	24.5	0.4	22.0	0.2	8.2	0.7	37.7	0.6	25.6
Total1	21.5	100	28.4	100	15.8	100	36.0	100	4.7	100	1.6	100	1.6	100	2.7	100	1.7	100	2.4	100
Total2			49.8			51.8				6.3				4.3					4.1	
%tage		43.1		56.9		30.6		69.4		74.1		25.9		37.9		62.1		41.8		58.2

**Tableau 3.3** - Récapitulatif des teneurs en MES et par CDF pour l'ensemble des parcelles sur surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).

Parcelles	MES		CDF		CTS	
	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
<b>A</b>	0.3	<b>0.7</b>	0.6	<b>0.6</b>	0.9	<b>0.6</b>
B	4.0	7.6	14.7	15.6	18.7	12.8
C	0.7	1.3	2.4	2.5	3.0	2.1
D	0.6	1.1	1.4	1.5	1.9	1.3
F	1.3	2.4	3.9	4.2	5.2	3.5
E	4.7	8.9	1.6	1.7	6.3	4.3
<b>G</b>	21.5	<b>41.2</b>	28.4	<b>30.2</b>	49.8	<b>34.1</b>
<b>I</b>	15.8	<b>30.4</b>	36.0	<b>38.3</b>	51.8	<b>35.5</b>
J	1.6	3.1	2.7	2.8	4.3	2.9
H	1.7	3.3	2.4	2.6	4.1	2.8
Total	52.1	100	94.0	100	146.1	100
%	35.7		64.3		100	

Avec MES=matières en suspension

CDF=charriage de fond

CTS=charge totale solide ou érosion totale

**Tableau 3.4** - Bilan des exportations en matières en suspension (MES), par charriage de fond (CDF) et totales solides (CTS) lors des averses décennale (PD1) et annuelle (PA1).

Pluie decennale1

Parcelles	MES		CDF		CTS	
	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
A	0.2	1.4	0.2	0.7	0.3	1.0
B	0.3	2.5	1.9	8.2	2.2	6.2
C	0.2	2.0	1.1	4.7	1.3	3.8
D	0.1	0.5	1.0	4.2	1.0	2.9
F	0.9	7.6	2.3	9.9	3.2	9.1
E	2.0	16.6	0.9	4.2	2.9	8.4
G	4.1	34.4	6.7	29.1	10.8	30.9
I	2.8	23.7	6.4	28.1	9.3	26.6
J	0.8	6.9	1.5	6.7	2.4	6.8
H	0.5	4.4	1.0	4.2	1.5	4.3
Total	12.0	100.0	22.9	100.0	34.8	100.0

Pluie annuelle1

Parcelles	MES		CDF		CTS	
	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
A	0.0	0.6	0.0	0.2	0.1	0.4
B	0.2	2.9	1.6	11.1	1.8	8.6
C	0.1	1.0	0.1	0.7	0.2	0.8
D	0.2	3.2	0.1	0.4	0.3	1.3
F	0.1	1.5	1.0	6.9	1.1	5.3
E	1.2	19.9	0.1	0.4	1.3	6.2
G	2.2	35.1	4.7	32.2	6.8	33.1
I	1.7	26.9	6.2	42.8	7.9	38.1
J	0.3	4.5	0.3	2.4	0.6	3.0
H	0.3	4.4	0.4	2.8	0.7	3.3
Total	6.2	100.0	14.5	100.0	20.7	100.0

**Tableau 3.5** - Bilan des exportations en matières en suspension (MES), par charriage de fond (CDF) et totales solides (CTS) lors des averses décennale (PD2) et annuelle (PA2).

Pluie annuelle2

Parcelles	MES		CDF		CTS	
	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
A	0.0	0.4	0.3	1.6	0.4	1.3
B	0.4	4.7	3.8	19.3	4.2	14.9
C	0.1	1.7	0.3	1.6	0.5	1.6
D	0.0	0.4	0.2	1.0	0.2	0.8
F	0.1	1.4	0.1	0.4	0.2	0.7
E	0.4	4.4	0.2	1.1	0.6	2.1
G	3.9	45.1	5.4	27.3	9.3	32.8
I	3.2	36.8	8.4	42.6	11.6	40.8
J	0.2	1.8	0.6	2.9	0.7	2.5
H	0.3	3.2	0.4	2.1	0.7	2.5
Total	8.7	100.0	19.7	100.0	28.4	100.0

Pluie decennale2

Parcelles	MES		CDF		CTS	
	t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
A	0.1	0.4	0.1	0.2	0.2	0.3
B	3.1	12.2	7.4	20.1	10.5	16.9
C	0.2	0.8	0.9	2.3	1.1	1.7
D	0.3	1.1	0.2	0.4	0.4	0.7
F	0.1	0.5	0.6	1.6	0.7	1.1
E	1.1	4.2	0.4	1.1	1.5	2.3
G	11.3	44.6	11.7	31.5	22.9	36.8
I	8.1	32.2	15.0	40.5	23.1	37.1
J	0.4	1.4	0.2	0.6	0.6	0.9
H	0.7	2.6	0.6	1.7	1.3	2.0
Total	25.3	100.0	37.0	100.0	62.2	100.0

## 8. LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 3.1:** Pluviométrie mensuelle moyenne (Moy.), minimale (Min.) et maximale (Max.) de Dori pour la période de 1925 à 1998.

**Tableau 3.2:** Températures mensuelles moyennes (Moy.), minimales (Min.) et maximale (Max.) à Dori sur la période de 1926 à 1984 en °C.

**Tableau 3.3:** Protocole simplifié des pluies simulées de 20/03/01 au 03/04/01

**Tableau 3.4:** Protocole de mesure sous pluies simulées de 20/03/01 à 03/04/01.

**Tableau 3.5:** Succession d'intensité pour les deux formes de pluies simulées

**Tableau 4.1:** Récapitulatifs des valeurs de coefficients d'infiltration ( $K_i$ ) observés au sein des différentes parcelles de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Tableau 4.2 -** Récapitulatifs des valeurs de pente moyenne déterminées au sein des différentes parcelles de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H)

**Tableau 1.1:** Caractéristiques des averses sur les surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F).

**Tableau 1.2:** Caractéristiques des averses sur les surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).

**Tableau 1.3:** Récapitulatif des humidités initiales pondérales sur les différents états de surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Tableau 1.4:** Les profondeurs du front d'humectation (PFH) relevées sur les différents états de surfaces de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2) aux états initial et final.

**Tableau 2.1:** Composition granulométrique des surfaces type DES (parcelles A, B, C, D et F) dans la fraction  $< 2$  mm et  $> 2$  mm.

**Tableau 2.2:** Composition granulométrique des surfaces type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) dans la fraction < 2 mm et > 2 mm.

**Tableau 3.1:** Variation des matières en suspension (MES) et de charriage de fond (CDF) au sein des surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Tableau 3.2:** Variation des matières en suspension (MES) et de charriage de fond (CDF) au sein des surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Tableau 3.3:** Récapitulatifs des teneurs en MES et par CDF pour l'ensemble des parcelles sur surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).

**Tableau 3.4:** Bilan des exportations en matières en suspension (MES), par charriage de fond (CDF) et totales solides (CTS) lors des averses décennales (PD1) et annuelle (PA1).

**Tableau 3.5:** Bilan des exportations en matières en suspension (MES), par charriage de fond (CDF) et totales solides (CTS) lors des averses décennales (PD2) et annuelle (PA2).

## 9. LISTE DES FIGURES

**Figure 2.1:** Diagramme théorique de ruissellement sous averse d'intensité constante (Casenave et Valentin, 1989).

**Figure 4.1:** Variation du coefficient de ruissellement ( $K_r$ ) et de l'humidité pondérale initiale ( $W$ ) pour les des différentes surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F).

**Figure 4.2:** Variation du coefficient de ruissellement ( $K_r$ ) et de l'humidité pondérale initiale ( $W$ ) pour les des différentes surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).

**Figure 4.3:** Variation du coefficient de ruissellement moyen ( $K_r$  moy) et de l'humidité pondérale initiale moyenne ( $W$  moy) pour les différentes parcelles avec la pluie.

**Figure 4.4:** Evolution de la pluie d'imbibition ( $P_i$ ) et de la détention superficielle récupérable ( $D_r$ ) au sein des différentes surfaces de type DES (A, B, C, D et F), de type ERO (G, I, E et J) et de type G (H) lors de deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.5:** Evolution de l'intensité théorique de la pluie et du ruissellement sur les cinq parcelles de type DES (A, B, C, D et F) lors de deux averses de fréquences décennales (PD1 et PD2) et des deux averses de fréquences annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.6:** Evolution de l'intensité théorique de la pluie et du ruissellement sur les quatre parcelles de type ERO (G, I, E et J) et sur la parcelle de type G (H) lors de deux averses de fréquences décennales (PD1 et PD2) et des deux averses de fréquences annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.7:** Relation entre la pluie utile ( $P_u$ ) et la lame ruisselée ( $L_r$ ) au sein des surfaces DES (parcelles A, B, C, D et F), des surfaces ERO (parcelles G, I, E et J) et de la surface grossière G (parcelle H).

**Figure 4.8:** Teneurs en (a) argiles (A), (b) limons (L) et (c) sables (S) pour la fraction < 2 mm dans les surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO\_sb (parcelles G et I), de type ERO\_ls (parcelle E), de type ERO\_ca (parcelle J) et de type G (parcelle H).

**Figure 4.9:** Surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F); topographie et carte de pentes.

**Figure 4.10:** Surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) ; topographie et carte de pentes.

**Figure 4.11:** Evolution des flux de matières en suspension (MES) et du charriage de fond (CDF) au sein des différentes surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.12:** Evolution des flux de matières en suspension (MES) et du charriage de fond (CDF) au sein des différentes surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.13:** Quantification de l'érosion à l'échelle des différentes parcelles sur surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H).

**Figure 4.14:** Evolution des flux de matières en suspension (MES), du charriage de fond (CDF) et de la charge totale solide (CTS) au sein des différentes surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F), de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) par événement décennal (PD1 et PD2) ou annuel (PA1 et PA2).

**Figure 4.15:** Evolution de la teneur en MES au sein des surfaces de type DES (parcelles A, B, C, D et F) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.16:** Evolution de la teneur en MES au sein des surfaces de type ERO (parcelles G, I, E et J) et de type G (parcelle H) lors des deux averses décennales (PD1 et PD2) et lors des deux averses annuelles (PA1 et PA2).

**Figure 4.17:** Relation entre l'intensité de ruissellement maximale ( $R_x$ ) et les exportations (a) en suspension (MES), (b) par charriage de fond (CDF) et (c) de solide total (CTS) au sein des surfaces ERO (parcelles G, I, E et J).

**Figure 4.18:** Relation entre l'intensité de ruissellement maximale ( $R_x$ ) et les exportations (a) en suspension (MES), (b) par charriage de fond (CDF) et (c) de solide total (CTS) au sein des surfaces DES (parcelles A, B, C, D et F).

**Figure 1.1:** Comparaison des lames ruisselées estimées par capacité ( $L_r$ -capacité), (a) à l'aide d'un limnigraphe mécanique ( $L_r$ -limnigraphe) et (b) à l'aide du capteur de pression automatique isco 4220 ( $L_r$ \_isco).

**Figure 1.2:** Comparaison des intensités de ruissellement mesurées par capacité ( $R(t)$ -capacité), (a) à l'aide d'un limnigraphe mécanique ( $R(t)$ -limnigraphe) et (b) à l'aide du capteur de pression automatique isco 4220 ( $R(t)$ \_isco). I150 est la droite correspondant à la valeur de l'intensité de pluie maximale.

**Figure 1.3:** Relation entre l'indice d'humidité de Kohler (IKn) et l'humidité initiale (W) déterminée par la méthode gravimétrique au sein des différents états de surface.

# Tables des matières

Dédicaces

Avant-propos

Résumé

Sommaire ..... 1

1. INTRODUCTION..... 2

2. PROCESSUS DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION – ÉTUDE SOUS PLUIES  
SIMULÉES..... 3

2.1. SIMULATION DES PLUIES ..... 3

2.1.1. *Historique*..... 3

2.1.2. *Intérêt des études sous pluies simulées* ..... 3

2.1.3. *Objectifs des études sous pluies simulées* ..... 4

2.2. RUISSELLEMENT DE SURFACE ET INFILTRATION..... 4

2.2.1. *Les quatre phases observées sous pluies simulées*..... 4

Phase d'imbibition ..... 5

Régime transitoire..... 5

Régime d'écoulement permanent ..... 5

Vidange..... 6

2.2.2. *Variables caractéristiques de l'infiltration*..... 6

Pluie d'imbibition ..... 6

Coefficient d'infiltration ..... 6

Intensité limite de ruissellement ..... 7

Détention superficielle récupérable ..... 7

Lame ruisselée ..... 8

2.3. ÉROSION HYDRIQUE ..... 8

2.3.1. *Mobilisation des particules par humectation*..... 8

2.3.2. *Impact des gouttes de pluies* ..... 8

2.3.3. *Le ruissellement* ..... 9

2.3.4. *La dessiccation*..... 9

2.3.5. *Typologie des états de surfaces*..... 9

croûte structurale (ST) ..... 10

croûte de ruissellement (RUI)..... 10

croûte d'érosion (ERO)..... 10

croûte de dépôt éolien (EOL)..... 10

croûte de décantation (DEC)..... 10

croûte de dessiccation (DES)..... 10

Croûte à charge grossière (G) ..... 11

2.3.6. *Les facteurs de réorganisation superficielle*..... 11

Facteurs intrinsèques..... 11

facteurs externes ..... 11

L'eau ..... 11

Le vent ..... 12

La couverture du sol ..... 12

L'activité faunique..... 12

Le travail du sol ..... 12

2.3.7. *Approche méthodologique de quantification de l'érosion* ..... 12

Méthode empirique de Weischmeier et Smith.....	12
Méthodes déterministes .....	13
<b>3. MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>14</b>
3.1. SITE D'ETUDE .....	14
3.1.1. <i>Données climatiques</i> .....	14
3.1.2. <i>La végétation, les sols et la morphologie du paysage</i> .....	14
3.1.3. <i>Le relief et les états de surface</i> .....	15
3.2. MATERIELS ET METHODES.....	18
3.2.1. <i>Protocoles de pluies simulées</i> .....	18
3.2.2. <i>Instrumentation et prélèvements</i> .....	20
Instrumentation .....	20
Prélèvement .....	20
3.2.3. <i>Analyses des échantillons</i> .....	20
3.2.4. <i>Méthode expérimentale</i> .....	21
Ruissellement.....	21
Mesure d'humidité.....	22
Erosion : Calcul des exportations .....	22
<b>4. RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>24</b>
4.1. RESULTATS.....	24
4.1.1. <i>Ruissellement et infiltration</i> .....	24
Coefficient de ruissellement (Kr), coefficient d'infiltration (Ki) et humidité initiale (W) .....	24
Pluie d'imbibition (Pi) et détention superficielle récupérable (Dr).....	28
Variations de la lame ruisselée Lr(t) et de l'intensité de ruissellement R(t).....	28
4.1.2. <i>Analyse granulométrique</i> .....	28
4.1.3. <i>Variation de la pente et du micro-relief</i> .....	29
4.1.4. <i>Erosion</i> .....	38
Variabilité de l'érosion .....	38
Variation du micro-relief, de la pente et de la nature du sol.....	38
Relation érosion-intensité de ruissellement maximum .....	39
4.2. DISCUSSION.....	48
4.2.1. <i>Ruissellement et infiltration</i> .....	48
Influence des états de surface .....	48
Influence de la pente et de micro-relief .....	48
Influence du couvert végétal et des activités fauniques.....	48
Influence de la granulométrie .....	49
Influence de la pluie sur la lame ruisselée .....	49
Influence de l'état d'humectation et de la topographie sur la détention superficielle et sur la pluie d'imbibition.....	50
Influence de l'humidité sur le coefficient de ruissellement .....	50
4.2.2. <i>Erosion hydrique</i> .....	50
Influence de l'état de surface .....	50
Influence de la pente et de micro-relief .....	51
Influence du couvert végétal.....	51
Influence de l'intensité de ruissellement maximum .....	51
Influence de la texture du sol.....	52
Evolution de la Teneur des MES .....	52
Quantification des transports solides .....	52
<b>5. CONCLUSION ET PERPECTIVES .....</b>	<b>53</b>
<b>6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>54</b>
<b>7. ANNEXES.....</b>	<b>56</b>

8.	LISTE DES TABLEAUX.....	67
9.	LISTE DES FIGURES .....	69