

**HYDROLOGIE ORSTOM**

BP 1386  
DAKAR SÉNÉGAL

**ISTOM**

32 Bd du port  
95094 Cergy

Rapport de stage:

**ETUDE DU  
RUISSELLEMENT SOUS  
VEGETATION  
-  
MODELISATION**

Stagiaire : de CHAZEUX Renaud  
2<sup>ème</sup> année ISTOM  
Maître de stage: SEGUIS Luc  
ORSTOM

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier M. Luc Séguis, chercheur en hydrologie, qui m'a permis d'effectuer mon stage dans de bonnes conditions, ainsi que tout le service hydrologie du Département Eaux Continentales du centre ORSTOM de Dakar, et particulièrement deux techniciens de l'ORSTOM, M. Gaspard Diatta et M. Massaer Maïga, qui m'ont soutenu tant dans le travail que moralement durant mes deux mois sur le terrain.

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION:</b> .....	<b>2</b>
<b>A PRÉSENTATION DU MILIEU ET CADRE DU STAGE:</b> .....	<b>3</b>
<b>I INSTITUTION D'ACCUEIL DU STAGIAIRE:</b> .....	<b>3</b>
1) <i>Présentation de l'ORSTOM au Sénégal:</i> .....	<b>3</b>
2) <i>Département des eaux continentales:</i> .....	<b>4</b>
a) Recherche pour le développement en coopération « hydrologie et hydro- pédologie » .....	<b>4</b>
b) Ambitions géographiques du département des eaux continentales: .....	<b>4</b>
c) Les activités de recherche du D.E.C:.....	<b>5</b>
<b>II LE MILIEU:</b> .....	<b>6</b>
1) <i>Le milieu physique:</i> .....	<b>6</b>
a) situation: .....	<b>6</b>
b) climat:.....	<b>6</b>
c) géologie: .....	<b>8</b>
d) Sols et végétation: .....	<b>8</b>
2) <i>Le milieu humain:</i> .....	<b>9</b>
a) la population: .....	<b>9</b>
b) l'agriculture: .....	<b>9</b>
<b>B ÉTUDE DU RUISSELLEMENT:</b> .....	<b>11</b>
<b>I LE RUISSELLEMENT:</b> .....	<b>11</b>
1) <i>Définition:</i> .....	<b>11</b>
2) <i>Origine du ruissellement:</i> .....	<b>11</b>
3) <i>Les phases du ruissellement:</i> .....	<b>11</b>
<b>II DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX:</b> .....	<b>13</b>
1) <i>Les parcelles de ruissellement:</i> .....	<b>13</b>
2) <i>Le micro-bassin versant:</i> .....	<b>14</b>
3) <i>Dispositifs mis en place à Thyssé-Kaymor:</i> .....	<b>15</b>
a) le Papem:.....	<b>15</b>
b) le site de S5: .....	<b>16</b>
<b>III LE TRAVAIL DU STAGIAIRE:</b> .....	<b>17</b>
1) <i>conditions de vie:</i> .....	<b>17</b>
2) <i>Tâches effectuées par le stagiaire:</i> .....	<b>17</b>
a) mise en place des installations:.....	<b>18</b>

---

b) En cas de pluie: .....	18
c) Tâches quotidiennes: .....	18
d) Tâches hebdomadaires: .....	19
e) Tâches exceptionnelles: .....	19
<b>IV LES APPAREILS UTILISES: .....</b>	<b>20</b>
1) <i>Les tensiomètres</i> : .....	20
a) fonction: .....	20
b) fonctionnement: .....	20
c) principe physique: .....	21
d) Exemple de résultat: .....	22
2) <i>Le radiomètre</i> : .....	23
a) Fonction et fonctionnement: .....	23
b) Les mesures: .....	23
3) <i>Le profilomètre</i> : .....	26
a) Fonction: .....	26
b) Description et méthode de mesure: .....	27
<b>C MODELISATION: .....</b>	<b>29</b>
<b>I DEFINITION: .....</b>	<b>29</b>
<b>II METHODE: .....</b>	<b>29</b>
1) <i>Transformation des données brutes</i> : .....	29
a) Le temps: .....	29
b) intensité de pluie: .....	30
c) débits ruisselés: .....	30
2) <i>Exploitation des données transformées (d'après J.C. Bader, 1994)</i> : .....	30
a) description du dispositif: .....	30
b) Equations du fonctionnement hydraulique du système: .....	31
c) Réponse du système à un apport de débit $q_1(t)$ : .....	32
3) <i>Méthode d'extrapolation du modèle</i> : .....	32
4) <i>Résultats obtenus et commentaires</i> : .....	33
a) Au Papem: .....	33
B) sur le bassin de S5: .....	33
c) Commentaires: .....	34
<b>CONCLUSION: .....</b>	<b>37</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXES</b>	

## **INTRODUCTION:**

Classiquement, l'importance et l'intensité du ruissellement sont expliquées par des facteurs relativement constants et intrinsèques (topographie et nature du sol), des facteurs contingents (hyétogramme de la précipitation et stock hydrique) et des facteurs évolutifs (états de surface, couvert végétal). Dans les zones rurales densément peuplées du Sud Sahel, l'évolution saisonnière du couvert végétal apparaît comme l'un des facteurs primordiaux.

Partant de ce constat, une équipe d'hydrologues de l'ORSTOM (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) collabore, depuis 1983, avec l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles) et le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) au programme national « Gestion des ressources naturelles ». Des études sur le terrain sont menées sur les bassins versants de Thyssé Kaymor, représentatifs du sud du bassin arachidier sénégalais.

Mon travail s'inscrit donc dans le thème de l'influence de l'évolution du couvert végétal sur le ruissellement.

## **A PRÉSENTATION DU MILIEU ET CADRE DU STAGE:**

### ***I INSTITUTION D'ACCUEIL DU STAGIAIRE:***

#### **1) Présentation de l'ORSTOM au Sénégal:**

L'institut français de recherche pour le développement en coopération, intervient au Sénégal depuis 1949, à travers les départements suivants:

- ☛ terre, océan, atmosphère;
- ☛ eaux continentales;
- ☛ milieu et activité agricole;
- ☛ santé;
- ☛ société, développement et urbanisation.

Les programmes de recherche sont conduits en étroite collaboration avec les structures sénégalaises. Ils abordent toutes les préoccupations nationales de dégradation et régénération du patrimoine naturel, gestion des ressources en eaux et en sol, gestion du milieu marin, amélioration des cultures en vue de l'autosuffisance alimentaire, santé, croissance démographique, urbanisation.

Plusieurs chercheurs de l'ORSTOM participent aux enseignements de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar et des écoles d'ingénieurs. De nombreux stagiaires sont accueillis chaque année par l'institut. Ainsi, durant l'été 95, plus de quinze étudiants, français mais aussi étrangers, ont effectué un stage.

Le département « eaux continentales », et plus précisément son service hydrologie, m'a accueilli du 29 juin au 25 septembre. Ce service a travaillé sur plusieurs programmes parmi lesquels:

- ☛ le programme « gestion des ouvrages sur le fleuve Sénégal », qui visait à la mise au point d'un outils d'aide à la décision pour la gestion des eaux des barrages de Diama et Namentali;
- ☛ le programme « économie de l'eau, défense et restauration des sols au Siné Saloum », sous programme de « gestion des ressources naturelles »;
- ☛ le programme « optimisation des aménagements hydro-agricoles » de la moyenne vallée du fleuve Sénégal;
- ☛ le programme « bas fonds en Afrique de l'ouest » qui étudie le fonctionnement hydrologiques des bas fonds.

## **2) Département des eaux continentales:**

Dès sa création en 1987, le D.E.C., Département des Eaux Continentales, a focalisé ses compétences scientifiques sur l'étude des écosystèmes aquatiques continentaux. Deux axes thématiques complémentaires structurent les programmes scientifiques du département:

- Structure et mécanisme de fonctionnement des systèmes aquatiques naturels et anthropisés;
- gestion et mise en valeur des systèmes aquatiques.

Dans un premier temps, il s'agit de comprendre, d'expliquer et de modéliser le fonctionnement des milieux aquatiques naturels ou anthropisés. On s'intéresse donc à la dynamique, qualitative et quantitative, des différentes composantes (l'eau, ses supports et ses réservoirs aux différentes échelles spatiales et temporelles, les éléments solubles ou en suspension), à l'étude des chaînes trophiques et à la biologie des organismes vivants. Les objets d'étude sont des cours d'eau, des lacs naturels, les milieux côtiers saumâtres et leurs populations hôtes, mais aussi les sols, les versants et les plaines.

Dans un second temps, la démarche scientifique aborde la gestion de ces écosystèmes aquatiques, compte tenu des enjeux liés aux différentes utilisations qui sont faites de la ressource en eau (agriculture, énergie, alimentation en eau) et de l'impact éventuel sur le devenir des populations hôtes et celui de leur exploitation. Les alternatives d'utilisation de ces ressources comme l'halieutique, l'aquaculture, les cultures irriguées font également partie des préoccupations du D.E.C.

### ***a) Recherche pour le développement en coopération « hydrologie et hydro-pédologie ».***

La première démarche des tutelles (Ministère de la Coopération et Ministère de la Recherche) ou des mandats habituels (Banque Mondiale) est que l'ORSTOM seul, ou en coopération avec d'autres structures, assure la maintenance des grands réseaux d'acquisition des données hydro-climatiques en Afrique de l'ouest et centrale.

L'ORSTOM est également attendu sur sa compétence à proposer et à accompagner des vastes opérations de « gestion durable » des écosystèmes continentaux africains où l'eau joue un rôle déterminant, que ce soit lorsqu'elle demeure la plus grande partie de l'année un facteur limitant (écosystèmes arides fragiles, particulièrement sensibles aux effets érosifs), lorsqu'elle est au contraire durablement en excès.

### ***b) Ambitions géographiques du département des eaux continentales:***

L'Afrique équatoriale, tropicale et sahéenne resteront les domaines géographiques d'excellence des chercheurs du D.E.C.

La zone sahélo-soudanienne restera prédominante avec des implantations lourdes au Sénégal, Mali, Burkina et au Niger.

Le bassin supérieur du Niger en Guinée sera un objet hydrologique fédérateur important.

L'Amérique latine a été pour le D.E.C. une zone d'extension.

☛ l'Amazonie, où le D.E.C. va poursuivre ses travaux sur le plus grand fleuve du monde.

☛ les pays andins (Equateur, Bolivie et Chili) où les paramètres hydrologiques sont particulièrement sensibles à un changements climatique.

☛ le développement des mégalofoles sud américaines pourrait susciter quelques programmes du type « eau dans la ville ».

Jusqu'à présent, les tentatives d'implantation du D.E.C. en Asie n'ont guère été suivies de succès. Il compte bien poursuivre et développer sur la base de missions ses participations à des projets régionaux: bassins de l'Amour Daria et du Syr Daria dans les républiques d'Asie Centrales, bassin du Mékong.

### ***c) Les activités de recherche du D.E.C.:***

☛ « MeccycEau »: Mécanisme du cycle de l'eau en interaction avec le climat et l'environnement (concept et modélisation).

☛ Dynamique, enleu et usages des hydrosystèmes régionaux:

- géodynamique externe,
- variabilité hydrologique spatio temporelle,
- usage intégré des ressources des grands hydrosystèmes,
- observatoires permanents.

☛ Fonctionnement et usage des systèmes biologiques en eau continentale.

- biodiversité et évolution,
- stratégie adaptative et physiologie,
- relations trophiques,
- dynamique des systèmes d'exploitation.

☛ Dynamique et usage des hydrosystèmes locaux.

- versant, écoulement, érosion,
- porosité, hydrodynamique, sels,
- risques urbains liés à l'eau et aux sols.



## **II LE MILIEU:**

### **1) Le milieu physique:**

#### **a) situation:**

La communauté rurale de Thyssé-Kaymor se situe dans la région administrative de Kaolack et plus précisément dans le département de Nioro du Rip, dont elle est distante de 30km. De ce fait, il se localise au sud du bassin arachidien. Le hameau de Keur Dianko, où est installé le campement de l'ORSTOM, est un quartier de Thyssé-kaymor séparé de celui-ci par quelques champs.

#### **b) climat:**

La région bénéficie d'un climat soudano-sahélien, avec tendance sahélienne les années déficitaires (A.MONIMEAU ESAT, déc.92). La pluviométrie moyenne est de 750 mm.

Ce climat est très contrasté du fait de l'importance des deux saisons qui le caractérisent:

- l'hivernage, qui correspond à la saison des pluies. Celles-ci se répartissent irrégulièrement sur quatre mois (de juillet à fin octobre). Elles ont souvent un caractère torrentiel et provoquent ainsi de fortes crues.

Cependant, nous avons déploré cette année une moindre pluviosité que les autres années et ce principalement au mois d'août. En effet, ce mois, réputé pour être le plus pluvieux, n'a donné lieu qu'à quatre pluies importantes!

- la saison sèche, durant les huit autres mois. On constate depuis 1970 une succession d'années très sèches, avec une atténuation ces quatre dernières années, mais la sécheresse semble reprendre cette année (cf. page suivante).

### Les pluies:

Le tableau ci-dessous présente les averses sur les deux sites d'étude mis en place à Thyssé-Kaymor.

DATE	PAPEM (mm)	S5 (mm)
11 JUILLET	45.3	48.6
13 JUILLET	17.3	16.4
20 JUILLET	13	
22 JUILLET	2.5	18.5
	12.5	
23 JUILLET	8	1.5
27 JUILLET	33.4	36.3
	2	1
29 JUILLET		3
30 JUILLET	2.5	
31 JUILLET	30.1	38.4
1 AOÛT	9.8	12
2 AOÛT	16.5	18.4
13 AOÛT	10	11.7
14 AOÛT	10.8	13.3
15 AOÛT	3.8	3.1
16 AOÛT	1.4	2.8
17 AOÛT	1.6	1.3
		3
20 AOÛT	14.9	12.5
	32.4	12.85
23 AOÛT	4.15	5.2
25 AOÛT	10.5	7.4
29 AOÛT	5.5	6.4
31 AOÛT	1.5	
TOTAL	289.45	273.65

Une étude statistique de la pluviométrie a été réalisée avec les données des 25 années de mesure sur le site du Papem de 1968 à 1993. Nous la comparerons à celle effectuée à Nioro du Rip de 1950 à 1992.

Réurrence déficitaire:

	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Papem	601	499	467	450	439	434
Nioro	818	646	564	504	446	414

Réurrence excédentaire:

	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Papem	601	765	875	978	1107	1200
Nioro	818	999	1094	1172	1258	1316

Il est noté qu'à Nioro du Rip, sur la partie 1971-1990, la moyenne pluviométrique annuelle est de 670 mm. Alors qu'elle n'est que de 644 mm au Papem.

Nous pouvons déduire que les données statistiques à appliquer au niveau journalier ou annuel pour la région de Thyssé-Kaymor, sont celles de Nioro du Rip, car la série pluviométrique y est plus longue et comprend en même temps des années sèches et pluvieuses, ce qui n'est pas le cas du Papem.

**c) géologie:**

La zone est constituée d'une formation sédimentaire du continental terminal (mise en place à la fin du tertiaire). Les puits ont entre 20 et 40 mètres de profondeur et atteignent le continental terminal. Il existe plusieurs faciès de grès essentiellement sableux à bancs d'argile kaolinite. Entre 30 et 45 mètres d'altitude, se trouvent des plateaux à faibles pentes (1%). Ils ont connu un défrichement massif pour la production de charbon de bois dans les années 1970. Actuellement, devant la pression foncière, ils sont de plus en plus mis en culture.

Les versants sont constitués de glacis sableux (sols peu évolués sur gravillons et cuirasses ferrugineuses) et de terrasses (sol ferrugineux tropicaux lessivés). Ils sont très cultivés et connaissent un découpage notable.

**d) Sols et végétation:**

Les sols sont généralement ferrugineux tropicaux appauvris peu évolués d'érosion (Bertrand 1970, Ange 1986). Ils sont arides avec un pH compris entre 5 et 7.

La texture de la terre est fine, sableuse en surface et argilo-sableuse en profondeur. A la faible teneur en matière organique du sol (inférieure à 1%) s'ajoute le fait que la dominante argileuse est constituée de kaolinite ce qui entraîne la fragilité de ces sols de structures faiblement granuleuse.

La pratique de la jachère étant presque inexistante, ces sols sont soumis aux différentes cultures à chaque hivernage

Le paysage se compose principalement de champs cultivés, en arachide et en mil, et d'une savane arbustive le plus souvent dégradée. Ceci se remarque tout particulièrement dans les environs de Thyssé-Kaymor où les zones non encore mises en cultures ne représentent plus que 25% des terres alors qu'elles en représentaient 70% au début des années 70.

Ainsi, avec la forte pression démographique et l'agriculture extensive, les zones cuirassées situées en hauteur de la toposéquence ont tendance à être défrichées, ce qui favorise d'avantage le ruissellement et l'érosion hydrique.

## **2) Le milieu humain:**

### **a) la population:**

La communauté rurale de Kaymor comptait lors du recensement de 1983 une population de 11 884 habitants, soit une densité de 61 hab/km<sup>2</sup>. Celle-ci se compose essentiellement de Wolofs (90%), de Toucouleurs (7%), de Peuls (2%) et de Sérères (1%). Chaque ethnie se regroupe dans le même « quartier » ou hameau, où l'on ne trouve que quelques familles, au sens large du terme. Ainsi à Keur Dianko, tout le monde s'appelle Sissé ou Touré. Tous les ménages dépendent du chef de quartier, ce qui est une charge héréditaire, détenue par un patriarche. C'est lui qui distribue les terres et gère les ressources de la commune.

Ce système n'est possible que par le fait que la société wolof est extrêmement structurée et hiérarchisée. Il y a différentes castes (nobles, hommes libres, forgerons, artisans, ...). 80% des actifs sont des agriculteurs, 15% sont éleveurs et les restants sont commerçants et artisans. On peut aussi noter que le terme de population active reste vague car dès leurs plus jeunes âges (5 ans) les enfants travaillent dans les champs.

Les infrastructures sont quand à elles assez sommaires. Les pistes ne sont pas entretenues et constituent des axes de drainage importants; leurs tracés varient donc souvent d'une année sur l'autre. La communauté rurale dispose de trois écoles de langue française, plusieurs écoles de langues arabes et des écoles coraniques, trois grandes mosquées et un dispensaire à Kaymor.

### **b) l'agriculture:**

Bénéficiant d'une pluviosité annuelle moyenne de près de 700 mm, l'agriculture vivrière (mil et un peu de maïs) a pu dans cette région intégrer la culture de rente qu'est l'arachide. Celle-ci a donné son nom à toute la région qui se situe entre la Gambie et Kaolack, que l'on trouve dans la littérature sous le nom de bassin arachidier.

L'agriculture de la zone reste très traditionnelle dans ces méthodes culturales. En effet, on retrouve les structures communes à tous les villages sahéliens. Le finage est découpé en trois anneaux concentriques dont le centre est le village:

- la première auréole est constituée de champs de cases.
- la seconde correspond aux champs de brousse (culture continue de mil et d'arachide).
- la troisième, plus diffuse, regroupe les parcelles de défriche.

Les champs entourant les villages étant les plus soignés ont les plus forts rendements, tandis que ceux plus éloignés ne profitent que très peu des fumures animales et s'en trouvent moins productifs. L'élevage reste quand à lui une activité peu développée. Les seuls animaux élevés sont, pour la traction, les zébus, les chevaux et les ânes, et pour les apports nutritifs (laits, viandes), les chèvres et les moutons. Cependant, cette activité ne se déroule que dans des conditions d'hygiène et vie en général très rudimentaires.

Le système de culture repose sur une rotation mil - arachide, où les apports sont faibles. Le mil est semé en priorité à sec. Les variétés utilisés (souna et sanio) sont de cycle court (90 jours). Les parcelles semées en premier sont celles situées autour des villages car c'est là que, durant la saison sèche, les troupeaux sont gardés. L'arachide n'est semée qu'après la première pluie utile (supérieure à 10 mm). La variété utilisée possède un cycle végétatif intermédiaire de 110 jours. Un sarclage est réalisé directement après le semis. Les champs d'arachide seront sarclés souvent pour garder ainsi une humidité conséquente dans le sol. La récolte du mil, en septembre, est manuelle: les tiges sont couchées, les épis coupés et mis en bottes. Celle de l'arachide, en octobre, s'effectue à l'aide d'une lame souleveuse tractée par des boeufs.

L'agriculture, bien que faisant vivre toute une population, connaît de nombreux problèmes. En effet, face à la poussée foncière, les paysans sont amenés à utiliser des outils mécaniques comme les charrues à traction animale. Ceci leur permet d'augmenter la surface cultivée et la production. Ces deux aspects peuvent paraître très positifs au premier abord, mais ils ont deux conséquences néfastes à long terme. Tout d'abord l'extension de la surface utile se fait au détriment de la brousse qui doit reculer. La déforestation est accentuée par le phénomène d'abattage, qui a principalement lieu tous les ans durant l'hivernage, pour nourrir le bétail quand les réserves de paille de mil et les autres fourrages sont épuisés. La deuxième conséquence est une situation de surexploitation des sols. La jachère se pratique de moins en moins et pourtant elle trouverait un intérêt certain à être utilisée comme technique culturale. Il existe donc un problème d'épuisement des sols lié à celui de l'érosion due aux pluies intenses qui entraîne presque toujours un ruissellement important et modifie l'état de surface des sols (cf. profilographe). C'est donc une des raisons de l'étude menée, dans le cadre du programme SALT, par le département eaux continentales de l'ORSTOM-Dakar.

Une bonne gestion des cheptels et une rotation des cultures mises en place devraient permettre à l'agriculture de cette région de mieux profiter des ressources naturelles dont elle bénéficie.

## **B ÉTUDE DU RUISSELLEMENT:**

### **I LE RUISSELLEMENT:**

#### **1) Définition:**

Le ruissellement est défini comme étant un écoulement instantané et temporaire des eaux sur un versant consécutivement à un événement pluvieux.

#### **2) Origine du ruissellement:**

Lors d'un événement pluvieux, l'eau qui arrive sur le sol peut se comporter de diverses manières:

- une partie peut être interceptée par la végétation et par les dépression plus ou moins imperméables de la surface du sol.
- une partie négligeable de celle-ci s'évapore instantanément.
- une autre partie de l'eau s'infiltré. Elle peut soit être stockée dans le sol et être utilisée par la végétation, soit drainer vers les nappes phréatiques.
- enfin, elle peut couler à la surface du sol.

Le ruissellement est constitué par le solde du bilan en eau proposé ci-dessus. On distinguera alors deux types de ruissellement lors d'une pluie. En premier lieu, l'eau s'écoulera dans un réseau hydrographique mésoscopique complexe formé par les petites ravines et les micro-canaux. Nous parlerons alors de ruissellement diffus. Dans un second temps, lorsque ce réseau est submergé, on observe un ruissellement en nappe.

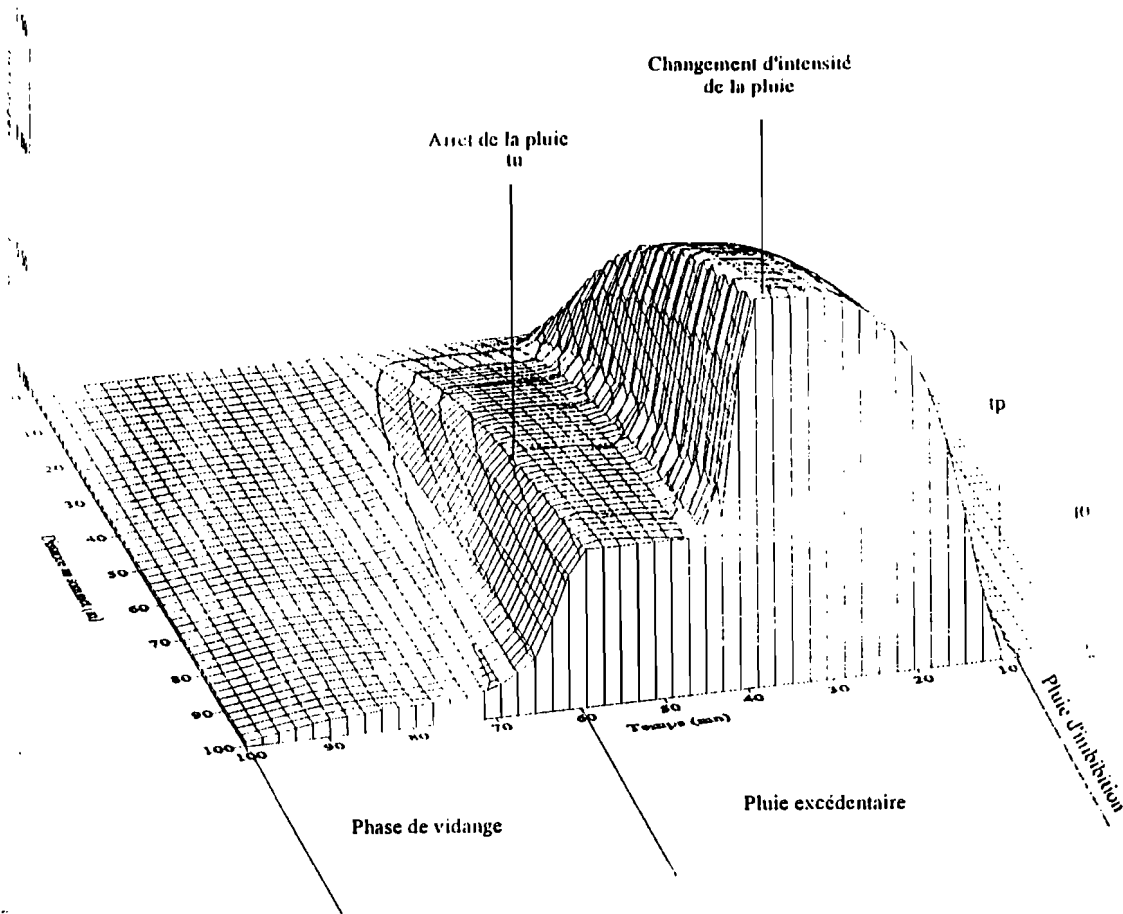
#### **3) Les phases du ruissellement:**

Le ruissellement est un phénomène facilement observable dans la nature. Des études précises sur le terrain ont permis de distinguer différentes phases au cours d'un événement pluvieux.

Entre le début de la pluie et l'apparition des premiers écoulements sur la surface du sol, l'eau s'infiltré ou est interceptée par la végétation. L'instant, où l'on observe l'apparition de flaques, est appelé dans la littérature anglo-saxonne, « *pounding time* ». Cette période correspond à la **phase d'imbibition**.

La deuxième phase commence lors de l'apparition du ruissellement diffus. C'est la **phase de pluie excédentaire**. Si l'intensité de la pluie est suffisamment forte et reste constante, on observe alors un ruissellement en nappe. La lame d'eau, qui en résulte à la surface du sol, est caractérisée notamment par sa hauteur moyenne, qui est fonction de la position de la prise de la mesure, en amont ou en aval de la parcelle, et de l'intensité de la pluie. En effet, l'épaisseur de la lame d'eau suit les variations d'intensité de la pluie; si celle-ci est constante, la hauteur de la lame d'eau tend à le devenir en chaque point de la parcelle.

La troisième est dernière phase du ruissellement est appelée **phase de vidange**. Elle correspond à la période d'après pluie, où le ruissellement décroît lentement et s'annule graduellement de l'amont vers l'aval.



## **II DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX:**

Il existe de nombreuses techniques pour étudier le ruissellement, tels que la simulation de pluie, les mini-pièges à ruissellement, le micro-bassin versant ou encore les parcelles de ruissellement; cependant nous nous bornerons ici à décrire les deux dernières méthodes précédemment citées.

### **1) Les parcelles de ruissellement:**

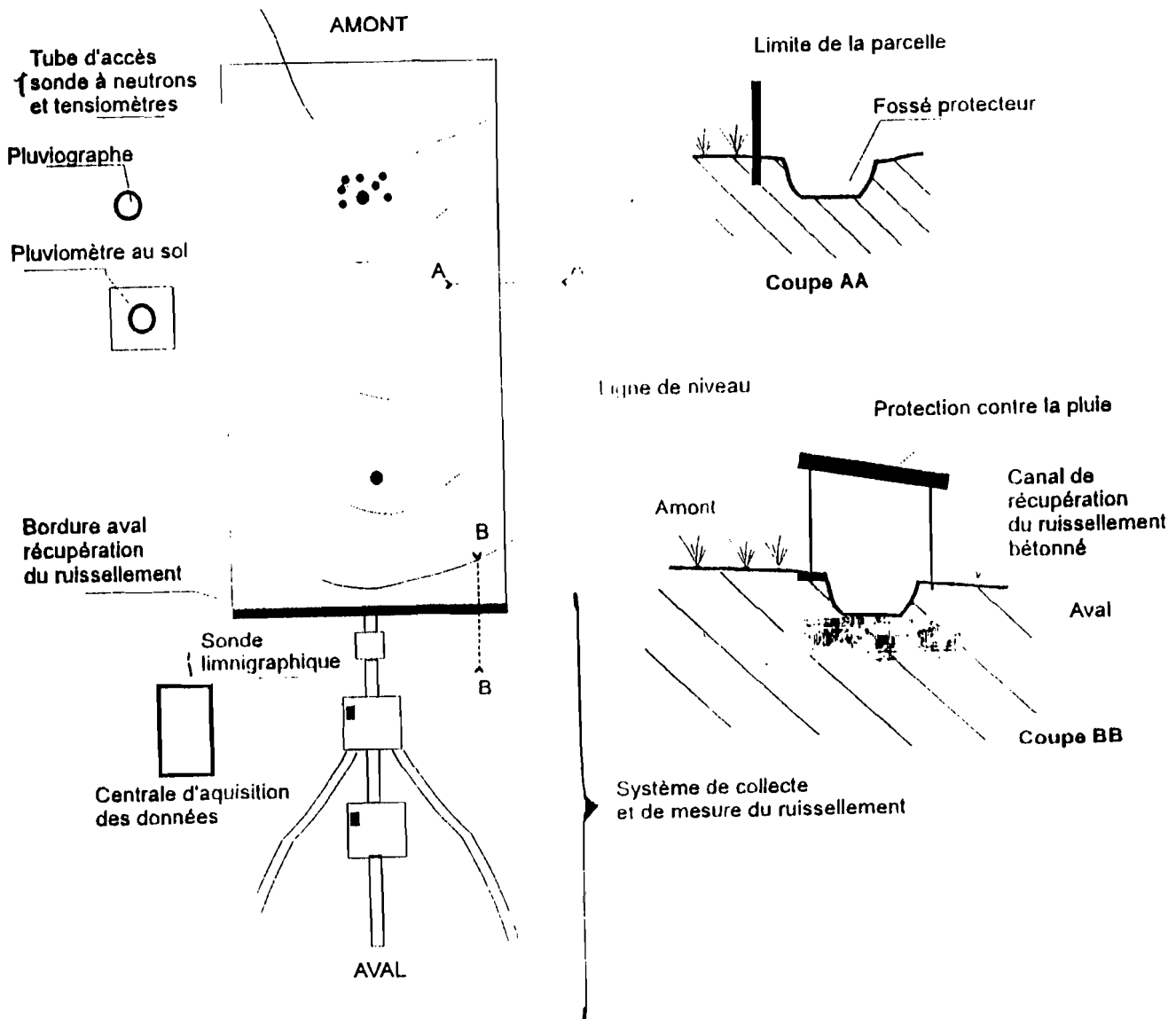
La parcelle est le dispositif le plus simple d'étude du ruissellement. Il s'agit d'une portion de versant isolée de la zone environnante et utilisée sous pluie naturelle pour quantifier le ruissellement des sols, le bilan hydrique ou encore les phénomènes d'érosion. Ce dernier cas ne sera pas développé ici du fait que les parcelles mises en place ont pour but de mesurer des débits et des coefficients de ruissellement et non les transports de sédiments.

Les dimensions de la parcelle peuvent varier de quelque m<sup>2</sup> à un hectare. Cependant, les parcelles sont toutes de formes rectangulaire; leurs longueurs sont dans l'axe principal de la pente et leurs largeurs perpendiculaires à cet axe. Elles sont délimitées en amont et latéralement par des parois en tôle formant la ligne de partage des eaux. Souvent ces parois sont doublées d'un fossé à l'extérieur pour éviter leur submersion. A l'aval, les parcelles sont équipées d'un système collecteur des eaux et de mesure de leur quantité.

Le système de récupération des eaux doit être à l'abri des précipitations et dimensionné pour les volumes ruisselés mesurés. En aval de la parcelle, nous avons donc installé une gouttière en P.V.C. que l'on a ouvert d'une fenêtre légèrement désaxée par rapport à une directrice du cylindre pour créer ainsi une légère pente lors de la mise en place sur la parcelle. Le tuyau est installé dans une tranchée de telle manière que le bord inférieur de la fenêtre épouse la forme de la surface du sol.

Pour de faibles débits, on procède à des mesures volumétriques du ruissellement, en laissant l'eau s'accumuler dans un réservoir. La hauteur d'eau dans la cuve est enregistrée par des sondes de pression piézo-résistives reliées à une centrale d'acquisition de données de type Campbell. Ce système permet de mesurer simultanément des données provenant de plusieurs dispositifs. Les hauteurs dans la cuve sont ensuite transformée en volume puis en débit. La pluie est enregistrée sur la même base de temps que les hauteurs d'eau. Pour une meilleure estimation de la lame précipitée, on utilise un pluviomètre au sol protégé par une grille anti-rebondissement (cf. schéma page suivante).





## 2) Le micro-bassin versant:

Le micro-bassin versant est un dispositif expérimental qui dérive de la grande parcelle de ruissellement. A partir d'une certaine surface, il devient difficile d'isoler une parcelle de son milieu environnant. On recherche alors dans le paysage une ravine élémentaire dont le bassin versant à une superficie allant d'une centaine de m<sup>2</sup> à 1 ou 2 hectare. Cette ravine est équipée pour la mesure de débit. On utilise pour cela un déversoir à lame mince. Un limnigraphe installé dans le déversoir permet de connaître à tout moment la hauteur d'eau.

Les micro-bassins versants sont souvent utilisés pour tester l'impact de modifications importantes du milieu sur le bilan hydrologique: travaux anti-érosifs, déforestation ou reforestation, traitements agronomiques de grandes surfaces, ...

### 3) Dispositifs mis en place à Thyssé-Kaymor:

#### a) le Papem:

Les parcelles, mises en place depuis 1983, permettent d'étudier l'évolution du ruissellement en fonction des modifications de la surface du sol et de la couverture végétale. Nous y trouvons donc une parcelle mise en jachère, une plantée en mil (souma 3), une plantée en arachide et la dernière est traitée par herbicide pour demeurer dénudée durant toute la saison des pluies.

Les parcelles ont toutes la même taille, 10 x 5 m; le système de gouttière et de cuve enterrée, décrit précédemment, permet la récupération des eaux de ruissellement. Les cuves sont munies de capteurs de pression permettant de connaître toutes les variations de hauteurs d'eau supérieures à 5 mm. Ce système est complété par une jauge constituée d'un flotteur, d'une poulie, d'un contre-poids et d'une échelle graduée permettant de lire les hauteurs sans ouvrir les cuves durant les pluies.

En plus ce dispositif, nous avons mis en place sur chaque parcelle (cf. photo):

- quatre tensiomètres (deux mécaniques et deux électroniques)
- un capteur d'humidité volumique (humicap).
- un tuyau pour les mesures de sondes à neutrons.



Tout ceci ne serait pas exploitable sans le pluviographe (complété d'un pluviomètre au sol) et la centrale d'acquisition de données Campbell. Celle-ci permet en effet de récupérer toutes les mesures prises par les quatre capteurs de pression, les humicaps, le pluviographe et les tensiomètres électroniques.

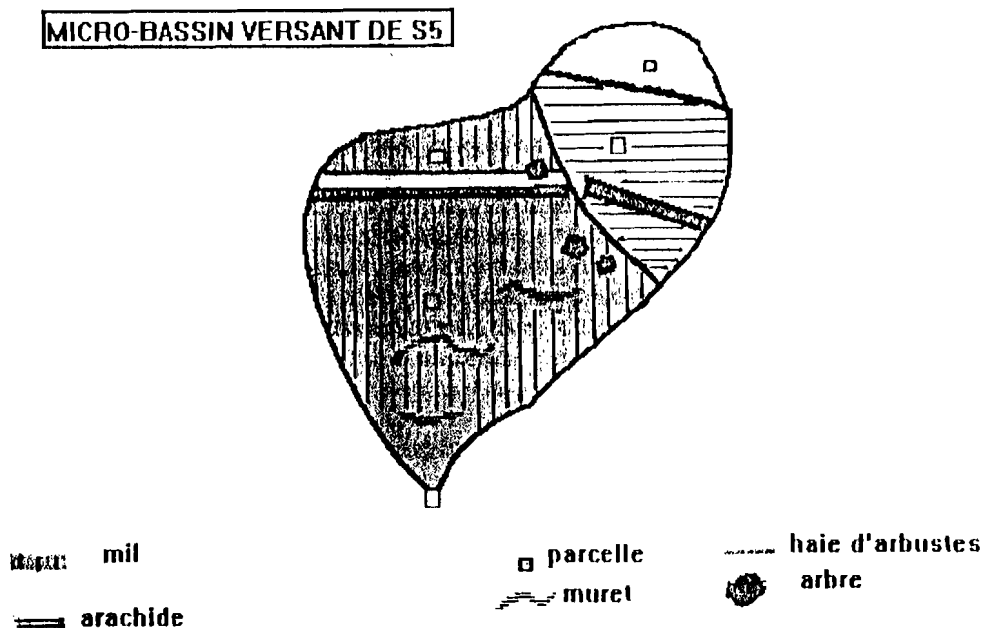
Lorsque l'on suit l'évolution du ruissellement en fonction du cycle végétatif, les mesures de débits ruisselés sont accompagnées de mesures du recouvrement végétal et de sa biomasse. Pour ne pas être destructrices, ces mesures sont réalisées par radiométrie (cf. § radiomètre) pour l'estimation de la biomasse et par le calcul d'indices de recouvrement.

**b) le site de S5:**

Le site de S5 est un micro bassin versant comportant deux champs de mil, deux d'arachide, un petit de maïs et un laissé en jachère (cf. carte ). Nous avons donc installé cette année quatre parcelles de quatre m<sup>2</sup> chacune avec leurs cuves et leurs capteurs de pression. Deux d'entre elles sont dans les champs de mil, une dans celui d'arachide et la dernière dans la jachère. Nous avons également mis en place sur chaque parcelle quatre tensiomètres mécaniques à différentes profondeurs (5, 10, 15 et 25 cm).

De plus, depuis plusieurs années, le bassin est muni d'une station de jaugeage avec un limnigraphe et un capteur de pression. Pour enregistrer les données du pluviographe et des cinq capteurs, nous avons installé une centrale d'acquisition de données Campbell.

Les parcelles de ruissellement permettent de suivre l'impact des modifications des états de surface sur le ruissellement global du bassin versant en général. Pour cela, nous avons procédé sur ces parcelles, comme sur celles du Papem, à des mesures simples des variations de l'états de surface par micro-topographie avec des cadres à aiguilles ( cf. profilographe).



### **III LE TRAVAIL DU STAGIAIRE:**

J'ai effectué mon stage du 31 juin au 25 septembre 1995. Durant cette période, correspondant à la saison des pluies, j'ai pu aller sur le terrain durant les deux premiers mois pour effectuer des mesures et me familiariser avec des appareils dont je ne connaissais que leurs fonctions théoriques.

#### **1) conditions de vie:**

Bien que manquant d'un certain type de confort matériel propre au monde dit moderne, le campement, installé par l'ORSTOM au village de Keur Dianko, présentait un aspect pratique indéniable; situé entre les sites d'études du Papem et de S5, il était à la fois proche des lieux de travail, proche d'un village accueillant et relativement peu éloigné de la seule boutique des environs.

De plus, du fait de l'existence de deux petits camps, éloignés de quelques centaines de mètres et où séjournèrent deux chercheurs de l'ORSTOM, dont mon maître de stage, je bénéficiais à la fois d'une indépendance relative mais aussi de la possibilité d'aller voir un « toubab » (blanc) si l'isolement était pesant, car le courrier n'arrivait que si l'un des deux faisait un aller-retour sur Dakar. De plus, durant tout le mois de juillet, je ne me suis jamais retrouvé tout seul car une autre stagiaire en hydrologie vivait au campement.

Les cases présentaient le confort traditionnel de toute case africaine: un lit avec une moustiquaire et une étagère pour ranger ses affaires. La « salle à manger », une table sur tréteaux, permettait de prendre les repas sous l'ombre appréciée d'un manguier. De plus, un système de pompage de l'eau d'un fût posé au sol à un autre situé à quelque mètres en hauteur permettait d'avoir une vraie douche!

Bien que le travail demande une présence constante sur le terrain, j'ai quand même pu découvrir les environs, faune et flore, mais surtout des gens et une autre culture, ce qui est toujours intéressant et enrichissant.

#### **2) Tâches effectuées par le stagiaire:**

Durant ce stage, j'ai pu suivre et participer aux travaux effectués par M. L. Séguis, sur l'influence de la nature et sur l'importance de la végétation sur le ruissellement en milieu cultivé. J'ai ainsi pu participer à la mise en place d'un site d'étude hydrologique, sur un micro-bassin (S5), comprendre de manière pratique le fonctionnement et intérêt de divers appareils de mesure (tensiomètres, pluviographes, limnigraphes, capteurs de pression, ...) et enfin traiter et modéliser les données recueillies sur le terrain.

### **a) mise en place des installations:**

Le premier travail à effectuer a été la remise en place des quatre parcelles d'étude du Papem, où nous avons réinstallé le pluviographe et les capteurs de pression et mis en place des tensiomètres mécaniques et électriques. La tâche s'est révélée plus complexe car des problèmes imprévus nous ont considérablement gênés: les câbles électriques avaient été rongés par des rats, un capteur de pression s'est révélé d'effectueux (bien que testé au préalable), une fourmilière s'installait dans la guérite de la centrale d'acquisition, ...

Sur le bassin versant de S5, nous avons du entièrement mettre en place les quatre parcelles d'études, le pluviographe et toute l'installation électrique pour relier les divers capteurs à la centrale d'acquisition de données (nouvellement installée aussi).

### **b) En cas de pluie:**

A chaque événements pluvieux d'une certaine importance, supérieur à 10 mm et quelque soit l'heure et le jour, nous devons partir le plus rapidement possible sur les deux sites d'études avec la moto pompe pour vérifier que les cuves ne débordaient pas, prendre des mesures de tensiomètres mécaniques, lire la hauteur des cuves sur les échelles placées à cet effet.

Dès l'arrêt de l'averse, il fallait effectuer une vidange des cuves ayant ruisseler pour éviter tout risque de débordement si une autre pluie venait à tomber, mesurer la hauteur sur l'échelle avant et après vidange des cuves, et relever les valeurs des tensiomètres.

Après chaque événement pluvieux, il était nécessaire de remettre la parcelle en état: vérifier que les gouttières ne soient pas bouchées, de toute façon, les nettoyer. Un état de surface était effectuer sur toutes les parcelles au moyen d'un profilomètre pour connaître l'évolution du profil du sol et l'influence des pluies sur celui-ci. Il était aussi nécessaire de relever les hauteurs d'eau des pluviographes et du pluviomètre au sol, ainsi que de changer leurs feuilles et remonter leurs mouvements. Enfin, pour éviter une perte de données sur la centrale d'acquisition de données Campbell, nous récupérons les mesures recueillies par celle-ci après chaque pluie.

### **c) Tâches quotidiennes:**

Deux fois par jours, nous faisons une lecture des valeurs des tensiomètres électriques (au moyen d'un voltmètre) et des mécaniques. Il fallait de même effectuer des tops horaires sur les pluviographes et sur le limnigraphe, afin de connaître la vitesse de défilement du mouvement et pouvoir ainsi déterminer de façon précise la durée, l'heure de début et celle de fin d'une pluie.

De plus, sur le site de S5, il fallait noter tous les travaux effectués (semis, sarclage, désherbage, etc.) dans les différents champs, et vérifier que les parcelles étaient toujours représentatives de sa zone environnante, i.e. faire effectuer les mêmes travaux agricoles dans le champs et dans la parcelle et au même moment.

**d) Tâches hebdomadaires:**

Toutes les semaines, quand la météo le permettait, nous faisons des mesures radiométriques sur chacune des parcelles, afin de connaître l'évolution de la couverture végétale. Un changement des feuilles du limnigraphe et des pluviographes s'avérait indispensable, même s'il n'avait pas plu, pour éviter toute confusion dans les tops horaires. Nous procédions de même pour les mesures de l'état de surface du sol, afin de toujours avoir une mesure avant et après un événement pluvieux.

**e) Tâches exceptionnelles:**

Nous avons eu à effectuer quelque tâches à caractère exceptionnel:

- passage à l'arrosoir de désherbant sur la parcelle de sol nu du Papem, afin d'obtenir une parcelle totalement vierge de toute végétation. Ce travail a été répété une fois pour assurer une meilleure efficacité du traitement.
- pour trouver l'emplacement des différentes parcelles sur le site de S5, nous avons fait de la topographie de terrain.
- réparation et protection des boîtiers électriques suite au dégâts occasionnés par des singes et des chacals.
- installation d'un limnigraphe sur la parcelle de mil n°1 de S5, suite à la défaillance de son capteur de pression.

## IV LES APPAREILS UTILISES:

### 1 Les tensiomètres:

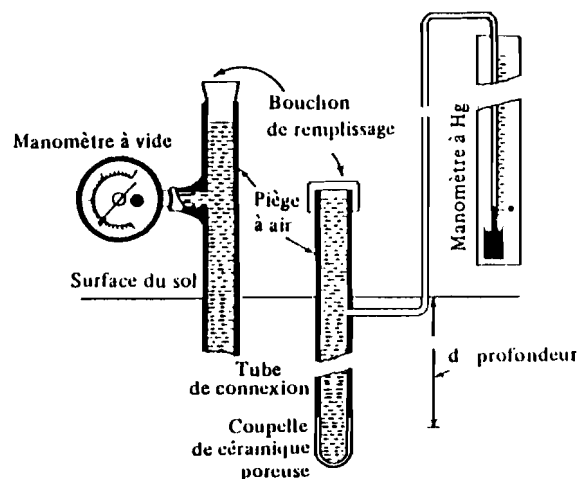
Nous utilisons, sur les deux sites d'étude, deux types de tensiomètres; de même principe, les uns permettent un enregistrement sur la centrale d'acquisition de donnée du fait qu'ils soient électroniques, à l'inverse de ceux mécaniques.

#### a) fonction:

Les tensiomètres permettent de connaître les variations du profil hydrique d'un sol en mesurant la charge de l'eau de celui-ci. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place plusieurs appareils à des profondeurs différentes.

#### b) fonctionnement:

Le tensiomètre est constitué d'une bougie poreuse, généralement en céramique, relié par un tube et un capillaire à un réservoir de mercure pour les tensiomètres mécaniques ou à un capteur de pression installé directement sur le tube de connexion ( cf. figure ci-dessous).

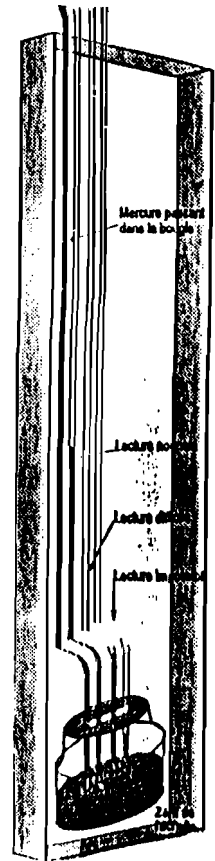


Quand la bougie poreuse est placée dans le sol où doit s'effectuer la mesure de succion, la masse d'eau à l'intérieur de celle-ci tend à s'équilibrer avec l'eau du sol. L'eau contenue dans la canne tensiométrique étant à la pression atmosphérique, elle subit une force de succion exercée par l'eau du sol qui est normalement à une pression inférieure. Une certaine quantité d'eau sort donc par les pores de la bougie poreuse et crée ainsi une dépression dans la canne tensiométrique qui est rigide, étanche et hermétiquement fermée. Cette dépression est mesurée sur une règle graduée, appelée règle Nardeux.

Nous nous sommes confrontés à des problèmes de lecture tant sur les appareils mécaniques qu'électriques; en effet, pour ces derniers, les valeurs étaient relevées au moyen d'un voltmètre âgé de plusieurs années et dont la forte inductance influençait largement les valeurs lues. Pour les tensiomètres mécaniques, le problème de lecture vient du fait que dans le cas de très forte succion (1 atmosphère) ou de très faible succion, la règle Nardeux ne permet pas une lecture correcte des valeurs (cf. figure).

**c) principe physique:**

Les lectures effectuées sur la règle Nardeux ne permettent pas de lire directement les valeurs de la charge au niveau de la bougie. Nous allons donc ici essayer de trouver une relation directe entre la hauteur de mercure lue et la pression à mesurer. Ceci ne concerne évidemment que les tensiomètres à mercure du fait que ceux mécaniques mesurent directement, au moyen d'un capteur de pression, la charge au niveau de la bougie.



A l'interface eau-mercure:  $P_a - \rho_1.g.H_1 = P - \rho\rho_2.g.(H_2+H_0+H_1)$

$$P = P_a + \rho\rho_2.g.(H_0+H_2) + (\rho\rho_2 - \rho\rho_1).g.H_1$$

Nous pouvons donc déduire directement de la hauteur lue sur la règle la pression P car la pression atmosphérique, les hauteurs H<sub>0</sub> et H<sub>2</sub>, ainsi que les masses volumiques sont des constantes.

Les échelles sont graduées en millibars et 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa, on a donc 1 mbar = 10<sup>2</sup> Pa.

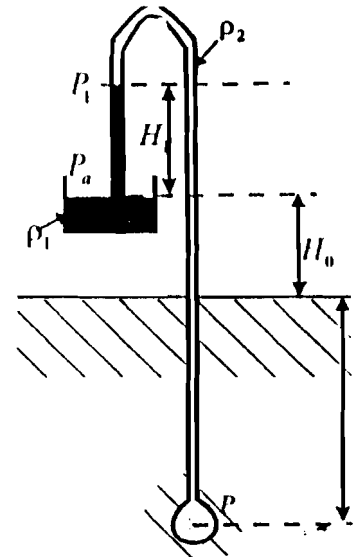
En multipliant l'équation précédente par 10<sup>-2</sup>, nous obtenons directement des pressions en millibars:

$$P \cdot 10^{-2} = P_a \cdot 10^{-2} + \rho_2.g.(H_0+H_2) \cdot 10^{-2} + (\rho_2 - \rho_1).g.H_1 \cdot 10^{-2}$$

[Pa]            [Pa]            [m]            [m]

soit :  $P = P_a + \rho_2.g.(H_0+H_2) \cdot 10^{-2} + (\rho_2 - \rho_1).g.H_1 \cdot 10^{-2}$

[mbar] [mbar]    [m]            [mbar]



Pour avoir une mesure directe de la pression en millibar, il suffit de multiplier les graduations centimétriques lues sur la règle par:  $10^{-2} \cdot [(\rho_2 - \rho_1).g.10^{-2}]$   
soit  $(1000 - 13596) \cdot 9.81 \cdot 10^{-4}$   
soit - 12.3567

Nous lisons donc sur l'échelle la charge en millibar au niveau de la bougie. elle est égale à:

$$(P - P_a) - \rho_2.g.(H_2 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^{-2} = \rho_2.g.(H_0 \cdot 10^{-2}) - 12.3567.H_1$$

La charge au niveau de la bougie est nulle pour:

$$\rho_2.g.H_0 \cdot 10^{-4} - 12.3567.H_1 = 0$$

soit  $H_1 = (\rho_2.g.H_0 \cdot 10^{-4}) / 12.3567$   
soit  $H_1 = 0.07939 H_0$

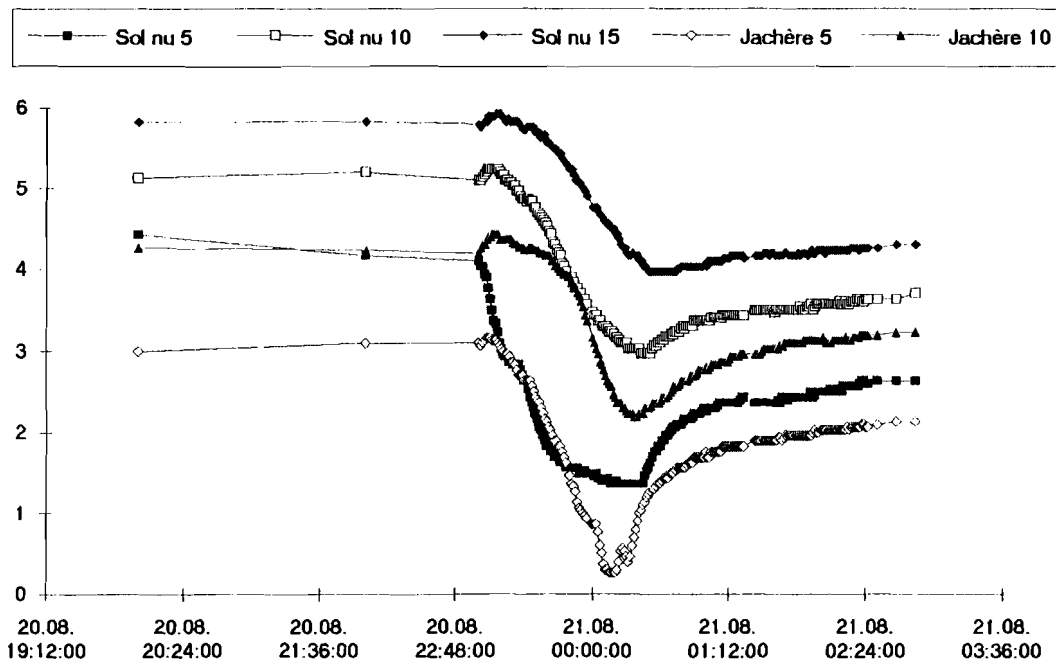


En conclusion, pour une lecture directe de la charge au niveau de la bougie sur la règle de Nardeux au niveau de l'interface mercure-eau, les graduations centimétriques sont à multiplier par 12.3567 et le zéro de la graduation est à placer à 0.07939 H0 de la surface libre du mercure.

**d) Exemple de résultat:**

Nous ne pouvons ici détailler toutes les mesures réalisées, car elles sont très nombreuses. Nous nous contenterons donc d'un exemple pris sur les tensiomètres électriques reliés à la Campbell sur les parcelles de sol nu et de jachère du Papem.

Le graphique suivant, nous montre l'évolution des charges au niveau des cinq tensiomètres durant la pluie du 20.08.95 au Papem.



Nous pouvons constater que:

- dès le début de la pluie, à 23 heure, les tensiomètres placés en surface baissent tout de suite. et fortement, tandis que ceux placés plus en profondeur régissent avec un temps de retard; nous voyons donc l'avancée du front d'humectation dans le sol.
- la jachère demeure la parcelle la plus humide; nous pouvons expliquer ce phénomène par la présence de la végétation qui retient l'eau contenue dans le sol et par le fait que sur la parcelle en jachère, l'infiltration est plus forte que sur celle de la parcelle en sol nu, qui ruisselle beaucoup plus.

Si l'on avait continué le tracé de ces courbes, nous aurions pu constater que les courbes se croisent; en effet, le front d'humectation va se déplacer vers le bas et le sol sera alors plus sec en surface qu'en profondeur.

## **2) Le radiomètre:**

Dans le cadre de l'étude sur le ruissellement nous avons constaté l'importance du rôle du couvert végétal. Nous avons donc suivi l'évolution des différents types de végétation présents sur nos parcelles du Papem et de S5. Ce travail complète ceux qui avaient été faits les deux années précédentes dans les mêmes conditions.

### **a) Fonction et fonctionnement:**

Le radiomètre Cimel CE310 permet de déterminer de nombreux indices de végétation tels que le P.V.I. (Perpendicular Vegetation index), le T.S.A.V.I. (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index), le S.A.V.I. (Soil-Adjusted Vegetation Index) ou encore, et c'est celui-ci qui nous intéressera le plus ici, le N.D.V.I. (Normalized Difference Vegetation Index).

Grâce à ce dernier indice, nous avons pu évaluer le développement de la végétation, avant de déterminer son rôle comme frein au ruissellement.

Le radiomètre Cimel CE310 est composé de deux objectifs: l'un tourné vers le ciel, l'autre dirigé vers le sol. Le premier mesure l'énergie incidente (e.i.), le deuxième l'énergie réfléchie par le sol (e.r.). L'appareil fournit alors le rapport (e.i.)/(e.r.) en pourcentage, appelé réflectance. La tête de lecture est placée à deux mètres soixante-dix en hauteur. La surface ainsi visée est un cercle d'un diamètre d'environ 50 cm.

Le radiomètre calcule ainsi trois réflectances, qui correspondent à celle des canaux du satellite SPOT: C1= 0,50-0,59  $\mu\text{m}$  (jaune-vert); C2= 0,615-0,68  $\mu\text{m}$  (rouge); C3= 0,79-0,89  $\mu\text{m}$  (proche infrarouge).

Il convient de noter les facteurs qui affectent les mesures radiométriques. Le sol, comme les végétaux, renvoie des informations qui troublent l'indice de végétation. La réflectance est d'autant plus faible que le sol est plus humide car il est alors plus sombre. Un sol rugueux piège plus la lumière qu'un sol lisse, car il a une réflectance plus faible. Pour mieux se rendre compte de l'importance de ces facteurs nous prenions en photo les parcelles d'étude (cf. annexe 2).

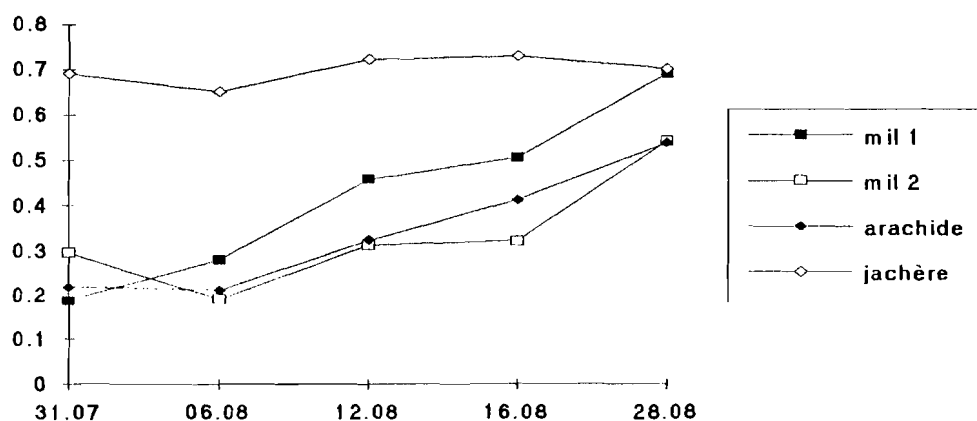
### **b) Les mesures:**

Nous avons effectué des mesures radiométriques sur les deux sites d'étude du Papem et de S5. De par le fait de la différence de tailles des parcelles, nous n'avons fait 26 points de mesure sur les parcelles du Papem (un tous les mètres autour de la parcelle) et seulement 5 points sur celles de S5.

Nous avons débuté les mesures tardivement, seulement à la fin du mois de juillet. Cependant, nous avons par la suite effectué des mesures toutes les semaines quand la météo s'y prêtait, car pour faire de la radiométrie il faut un ciel dégagé et que le soleil soit haut dans le ciel, entre 10h et 15h pour diminuer les effets d'ombre. Cela restreint donc les possibilités de mesures.

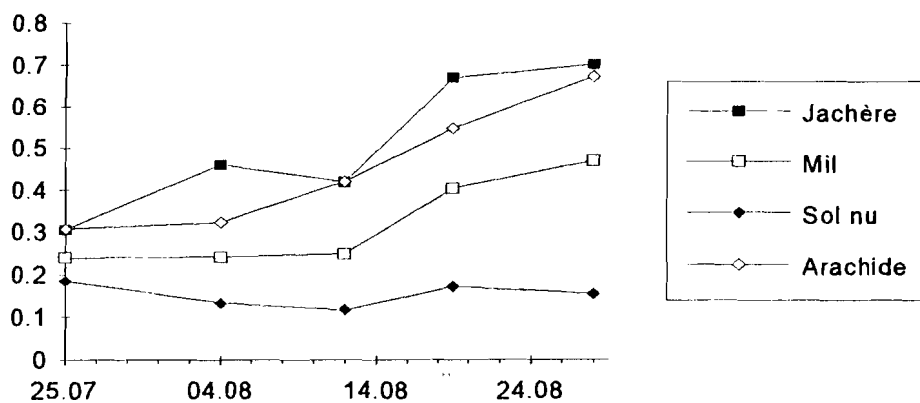
### N.D.V.I. à S5

date	mil 1	mil 2	arachide	jachère
31.07.1995	0.189	0.297	0.22	0.691
06.08.1995	0.28	0.191	0.212	0.651
12.08.1995	0.458	0.314	0.324	0.722
16.08.1995	0.507	0.323	0.414	0.73
28.08.1995	0.693	0.543	0.54	0.702



### N.D.V.I. au Papem:

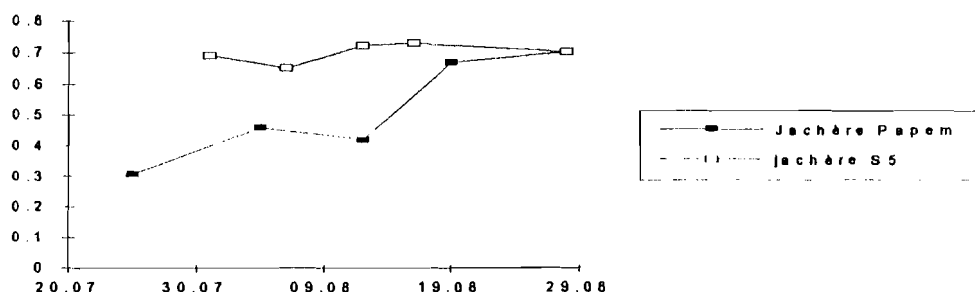
	Jachère	Mil	Sol nu	Arachide
25.07	0.306	0.24	0.186	0.308
04.08	0.46	0.242	0.134	0.323
12.08	0.42	0.25	0.118	0.421
19.08	0.67	0.404	0.172	0.547
28.08	0.702	0.47	0.156	0.673



Les deux tableaux de mesures et leurs graphiques respectifs, de la page précédente, nous montrent les différents aspects de l'évolution de la végétation:

- la jachère a un N.D.V.I. plus fort que toutes autres parcelles du fait que les mesures n'ont débuté que le 25 juillet et que l'herbe recouvrait déjà une bonne partie de la surface du sol. Nous pouvons remarquer de même le très fort indice de végétation sur la parcelle de S5 qui reste constant durant tout l'hivernage. Une explication possible est le fait que l'herbe de cette parcelle est très dense et sa taille n'a pas beaucoup évolué en deux mois. Ce phénomène ne se retrouve pas sur la parcelle du Papem, car ici l'herbe a grandi de plus d'un mètre durant la même période (cf. graph. N.D.V.I. Papem), pour n'atteindre le même indice de végétation qu'à S5 le 19 août seulement.

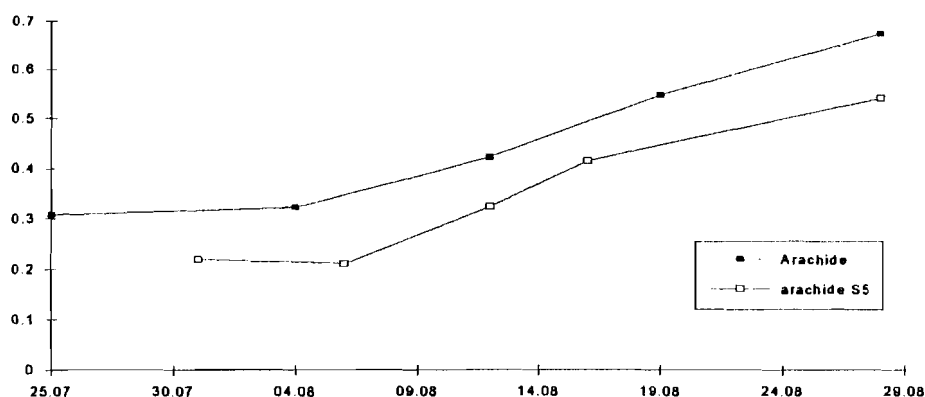
Evolution de l'indice N.D.V.I. des parcelles de jachère



- la parcelle de sol nu présente évidemment les plus faibles indices.

- nous pouvons observer, sur le graphique ci-dessous, l'évolution des deux parcelles d'arachide sur les sites; les deux courbes suivent approximativement les mêmes variations seulement celle du Papem reste toujours plus élevée que celle de S5. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le champ d'arachide de S5 a été beaucoup mieux entretenu et travaillé que la parcelle d'étude. Dans cette dernière, l'indice de végétation s'est révélé plus élevé par la présence de plantes adventices nombreuses.

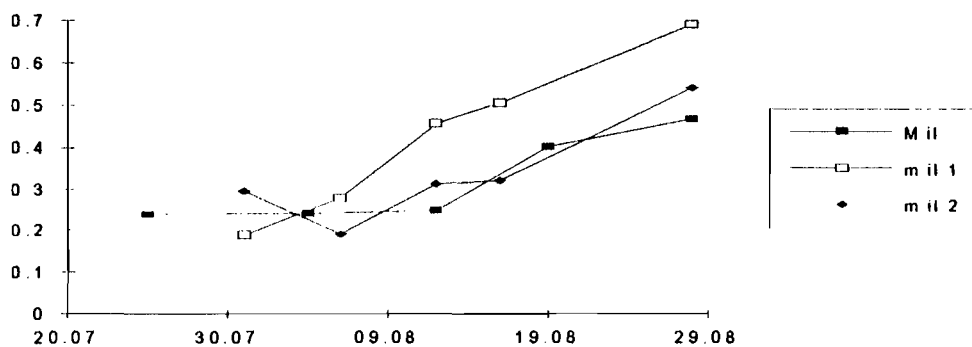
Évolution de l'indice N.D.V.I. des parcelles d'arachide du Papem et de S5:



- en ce qui concerne les parcelles de mil, nous remarquons, sur le graphique ci-dessous, un net retard du cycle de développement du mil du Papem par rapport au mil 1 de S5; nous pouvons comparer ces deux parcelles car elles ont la même variété de mil: souna, qui est qui a une plus forte phase de montaison et donne donc des tiges plus hautes que celles de mil 2 qui est de la variété sanio.

La remarque concernant l'arachide peut être répétée ici, où l'on constate encore que les champs de S5 sont mieux entretenus et plus soignés que celui du Papem. On retrouve donc une différence significative entre les deux courbes;

Évolution de l'indice N.D.V.I. sur les trois parcelles de mil



En conclusion, les résultats obtenus cette année nous montrent un retard du développement sur toutes les parcelles, que l'on peut expliquer par un manque d'eau généralisé sur la région de Thyssé-Kaymor. Cependant, ils permettent de différencier les zones de culture de celles naturelles, en montrant une installation plus précoce de la végétation en milieu naturel que cultivé, et les parcelles de mil de celles d'arachides.

Cet important travail de radiométrie vise à discriminer le couvert végétal naturel du cultivé (mil et arachide). L'étape suivante consiste à transposer ces résultats à l'imagerie satellitaire, ce qu'a entrepris M. L.Séguis, grâce aux prises de vue du satellite SPOT commandées par l'ORSTOM.

### 3) Le profilomètre:

#### a) Fonction:

Le profilomètre à aiguilles permet une description fine de la microtopographie, avant et après chaque pluie, et de déterminer simplement un indice de rugosité des différentes parcelles étudiées.

**b) Description et méthode de mesure:**

Le profilomètre se compose d'un châssis de 1 m de long qui comprend 37 tiges espacées de 24 mm, d'un panneau gradué permettant de lire des écarts en centimètres par rapport à un niveau zéro correspondant à un sol totalement lisse et une barre permettant de bloquer les tiges lors des déplacements de l'appareil (cf. figure ci-dessous).

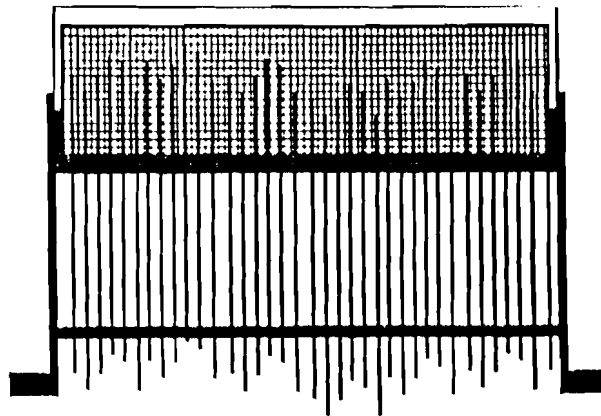


Figure : Châssis à fiches

Pour effectuer les mesures, il suffit de placer le châssis sur deux points à la même hauteur (éviter de prendre appui sur une bosse et un creux) et de laisser tomber les fiches en douceur pour éviter qu'elles ne s'enfoncent dans le sol. On lit donc la hauteur, positive ou négative, sur le panneau gradué, de chaque fiche. L'indice de rugosité, présenté dans les tableaux suivant, est égal à l'écart-type des mesures. Il s'exprime en millimètre et tend vers zéro lorsque la surface est lisse.

Indice de l'état de surface des parcelles du bassin de S5:

Date	MIL 1	MIL 2	ARACHIDE	JACHERE	COMMENTAIRES
19.07.1995	0.665	0.565	1.84	0.42	
21.07.1995	0.85	0.72	1.89	0.47	sarclage de MIL 1 et de MIL 2
23.07.1995	0.565	0.405	1.395	0.465	pluie le 22.07 de 18.5 mm
27.07.1995	0.625	0.51	1.125	0.37	pluie le matin même de 36,3 mm
01.08.1995	0.565	0.76	0.57	0.42	pluie le 31.07 de 38.4 mm
03.08.1995	0.36	0.595	0.515	0.45	pluie le 02.08 de 18.4 mm
13.08.1995	0.47	0.85	0.646	0.405	pluie le matin de 11.7 mm
13.08.1995	1		0.872		sarclage de M 1 et de l'arachide
14.08.1995	0.703	0.652	0.749	0.453	après pluie du matin
16.08.1995	0.985	0.78	0.52	0.42	
16.08.1995		1.01	0.71		après sarclage des deux parcelles

### Indice de l'état de surface des parcelles du Papem:

	Jachère	Mil	Sol nu	Arachide	Commentaires
13.07.1995	0.75	0.87	0.63	0.92	semis mil le 12.07
14.07.1995	0.66	0.62	0.46	0.83	pluie de 17.3 mm le 13.07
21.07.1995		0.76		0.87	sarclage mil et arachide ce jour
24.07.1995		0.85		1.02	pluie de 21.8 mm le 22.07
27.07.1995	0.81	0.96	0.38	0.74	pluie le matin de 33.4 mm
01.08.1995	0.64	0.78	0.48	1.01	pluie de 31.7 mm le 31.07
02.08.1995	0.54	0.85		0.8	pluie le 01.08 de 17.3 mm
14.08.1995	0.65	0.51		0.94	pluie de 10.5 mm le jour même
18.08.1995				1.32	après sarclage de l'arachide
20.08.1995		0.59		1.33	pluie de 14.9 mm le jour même
21.08.1995	0.6	0.69	0.29	1	après pluie du 20.08

Nous pouvons simplement observé que, dans la majorité des observations réalisées et après chaque événement modifiant l'état de surface du sol (pluie, travaux culturaux), l'écart type moyen entre les tiges évoluent. Cependant, la faible précision du système de lecture sur le panneau gradué ne permet pas une grande précision.

On constate donc que l'état de surface des sols n'évoluent pratiquement pas sur les parcelles où la végétation est très présente ou totalement absente. Dans le premier cas, elle empêche un contact direct entre le sol et les pluies et atténue donc l'effet d'érosion en retenant la terre. Dans le second cas, les premiers événements pluvieux rendent le sol lisse et donnent lieu à la formation d'une couche superficielle compacte et dure, de type couche de battance. L'état de surface n'est plus alors modifié.

A l'inverse, sur les parcelles mises en culture, l'évolution de l'état de surface du sol est fonction du cycle végétatif de la culture et des travaux agricoles effectués. Après un sarclage, la rugosité augmente fortement. Cependant, une pluie peut suffir à rendre le sol lisse car en le travaillant le sol devient plus meuble. Il tend donc à subir les phénomènes d'érosion. Les mesures suivantes, que nous sommes en train de réaliser, nous montrerons certainement une stabilisation des états de surface sur les parcelles en culture, du fait que la végétation sera plus dense et protégera le sol. Nous n'avons pas pu observé ce phénomène car la faible pluviométrie de cette année a entraîné un retard dans les cycles de développement des cultures.

## **C MODELISATION:**

L'objectif final de toute étude sur le terrain est de permettre de mieux comprendre les phénomènes naturels observés. Pour cela, une méthode semble s'imposer: la modélisation; en effet, elle donne, en fonction de caractéristiques scientifiques bien définies, une représentation du phénomène étudié qui tend à être la plus proche possible de la réalité.

Dans notre étude sur le ruissellement, nous allons donc essayer de trouver, à partir des données recueillies pendant les deux mois de terrain, un modèle tendant à décrire le mieux possible le phénomène.

De plus, nous pourrons comparer les valeurs des paramètres du modèle pour cette saison avec celles de l'année 1994. Nous vérifierons donc si le modèle proposé ici semble correct ou non.

### ***I DEFINITION:***

On admettra sans difficulté que la modélisation est la démarche permettant l'élaboration d'un modèle. Elle prend en compte

- l'objet et/ou le phénomène à représenter;
- le système formel choisi;
- les objectifs; c'est à dire l'utilisation que l'on souhaite faire du modèle;
- les données (relatives aux variables) et connaissances (relations entre variables) disponibles ou accessibles par l'expérience ou par l'observation.

### ***II METHODE:***

#### **1) Transformation des données brutes:**

##### ***a) Le temps:***

Le premier problème à surmonter est celui du temps. En effet, pour pouvoir modéliser une pluie, il nous faut la décrire par son intensité qui est fonction du temps. Cependant, les mesures sont prises non pas par période régulière mais dès qu'un appareil enregistre une variation.

La première étape de la modélisation consiste donc à mettre un pas de temps fixe, pour que l'on puisse voir les variations sur les différents capteurs au même instant. Les fichiers de données relevés sur la Campbell sont traités par un programme qui donne automatiquement les valeurs au pas de temps fixé.



Le pas de temps a été fixé à trente secondes. Un essai de modélisation au pas de cinq seconde nous a permis de constater que cela ne modifier pas significativement les valeurs des paramètres finaux obtenus au pas de temps de trente secondes.

**b) intensité de pluie:**

Dans un second temps, nous calculons l'intensité de la pluie, QI. Elle est déterminée par la formule:

$$QI = ( N_{(t)} - N_{(t-1)} ) * 0.5 * 120$$

Soit  $N_t$  et  $N_{t-1}$ , les cumulements des basculements d'augets depuis un temps d'origine.  $(N_t - N_{t-1})$  est le nombre de basculements d'augets en 30 s. Ce nombre est à multiplier par 0.5 pour avoir la quantité d'eau tombée en millimètres et par 120 pour obtenir des mm/h.

**c) débits ruisselés:**

Pour pouvoir comparer les ruissellements observés sur les parcelles et l'intensité de pluie, nous calculons par la suite les débits ruisselés,  $Q_r$ , sur chaque parcelle que nous exprimons également en mm/h.

On a : 
$$Q_r = \Delta h * 10 * 120 / 16$$

Avec:  $\Delta h$ , exprimée en centimètre, variation de hauteur dans la cuve de récupération de l'eau ruisselée en 30 secondes.

Pour obtenir des mm/H, on multiplie par 10, ce qui donne  $\Delta h$  en mm, puis par 120, ce qui transforme les pas de trente secondes en heure. Enfin, il faut tenir compte du rapport de taille entre la surface de la parcelle et celle de la cuve, qui est de 1/16 pour les parcelles de S5 (parcelle de 4 m<sup>2</sup>, cuve de 0.25 m<sup>2</sup>).

**2 Exploitation des données transformées (d'après J.C. Bader, 1994):**

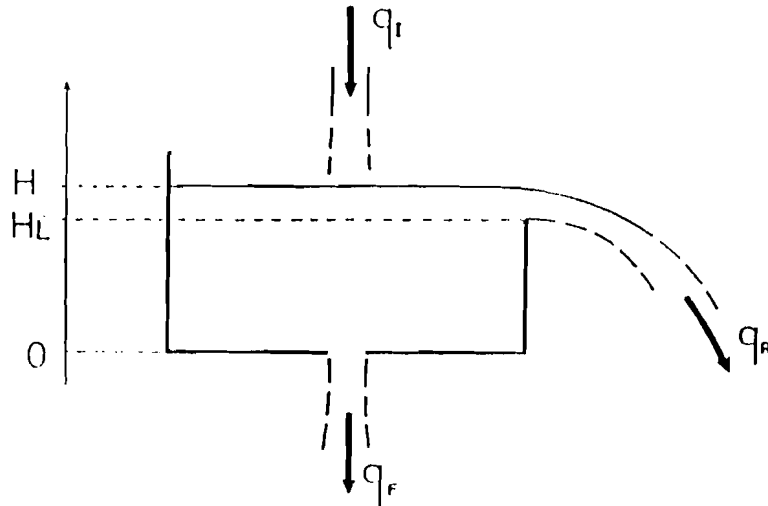
**a) description du dispositif:**

Le modèle retenu représente la production de ruissellement d'une parcelle sous averse, à partir d'une représentation hydraulique simple, constitué d'une cuve en forme de parallélépipède rectangle, dont le fond horizontal est percé d'un orifice et dont le haut d'un des côtés est échancré de façon à former un déversoir( cf figure).

On note:

- g = accélération de la pesanteur, (ms<sup>-2</sup>);
- H = altitude de la surface libre, par rapport au fond de la cuve, (m);
- H<sub>L</sub> = altitude du seuil de déversoir, par rapport au fond de la cuve, (m);
- I = intensité de pluie tombant sur la parcelle modélisée, (m s<sup>-1</sup>);

- $L$  = longueur de la cuve, égale à la longueur de la parcelle modélisée, (m);
- $l_0$  = largeur de la cuve, égale à la largeur de la parcelle modélisée, (m);
- $Q_F$  = débit infiltré dans la parcelle ( $m^3 s^{-1}$ );
- $Q_R$  = débit ruisselé traversant la limite aval de la parcelle ( $m^3 s^{-1}$ );
- $q_F$  = débit sortant de la cuve par l'orifice de fond ( $m^3 s^{-1}$ );
- $q_1$  = débits des apports déversés dans la cuve ( $m^3 s^{-1}$ );
- $q_R$  = débit sortant de la cuve par le déversoir ( $m^3 s^{-1}$ );
- $S$  = rapport de section de l'orifice de fond, sur la section de la cuve;
- $t$  = temps (s).



L'analogie est évidente: le fond de la cuve correspond à la surface topographique de la parcelle, et  $H$  représente la lame d'eau stockée en surface. On peut faire les assimilations suivantes:

$$\begin{aligned} q_R &= Q_R \\ q_F &= Q_F \\ q_1 &= I L l_0 \end{aligned}$$

#### b) Equations du fonctionnement hydraulique du système:

Notre but n'étant que de schématiser le comportement d'une parcelle, on applique les équations de l'hydraulique sur le modèle en faisant un maximum d'hypothèses simplificatrices.

On suppose que le profil d'échancrure du déversoir réalise une loi  $q_R(H)$  du type:

$$\begin{aligned} q_R &= K l_0 (H - H_L)^{N/2} && \text{pour } H > H_L \\ q_R &= 0 && \text{pour } H < H_L \end{aligned} \quad (1)$$

$N$  et  $K$  ( $m^{2-N/2} s^{-1}$ ) sont des constantes.

Afin de diminuer le nombre de paramètres du modèle, on impose arbitrairement une valeur unitaire à  $K$ . On suppose de même que la pression de l'air est la même au dessus de la surface libre et à la sortie de l'orifice de fond. Divers essais de calage du modèle sur des débits ruisselés observés, effectués avec ou sans ces simplifications, montrent que celles-ci n'altèrent pratiquement pas la qualité des ajustements.

L'application du théorème de Bernoulli entre la surface libre et l'orifice de fond nous permet, en négligeant la vitesse à la surface libre, d'évaluer la vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement à travers l'orifice par:

$$V = (2gH)^{1/2}$$

$$\Rightarrow q_F = S l_0 (2gH)^{1/2} \quad (2)$$

La conservation des volumes nous permet d'écrire:

$$q_1 = q_R + q_F + L l_0 (dH/dt) \quad (3)$$

Le modèle représente donc l'aptitude au ruissellement d'une parcelle sous une averse donnée, à partir de trois paramètres:  $N$  et  $H_L$  sont des caractéristiques de la parcelle;  $S$  est à la fois une caractéristique de la parcelle et, comme nous le verrons plus loin, de son état d'humectation au début de l'averse.

### c) Réponse du système à un apport de débit $q_1(t)$ :

Pour des valeurs de  $S$ ,  $N$  et  $H_L$  fixées, et une valeur initiale  $H(t = 0)$  donnée, les équations (1), (2) et (4) permettent de calculer les réponses  $q_R(t)$ ,  $q_F(t)$  et  $H(t)$  correspondant à un rapport  $q_1(t)$ . Ce système d'équations n'admet malheureusement de solution analytique simple que dans le cas où  $q_1$  est constant et  $H$  inférieur à  $H_L$ . Pour le résoudre dans le cas général, on effectue la discrimination suivante, dans laquelle  $Dt$  désigne le pas de temps:

$$\begin{aligned} q_R(t) &= 0 && \text{pour } H(t) < H_L \\ q_R(t) &= K l_0 [H(t) - H_L]^{N/2} && \text{pour } H(t) > H_L \\ q_R(t) &= S L l_0 [2gH(t)]^{1/2} \end{aligned}$$

$$H(t+Dt) = \max\{0, H(t) + [q_1(t) - q_R(t) - q_F(t)] [Dt / (L l_0)]\} \quad (4)$$

### 3) Méthode d'extrapolation du modèle:

En pratique, on considère maintenant une parcelle fictive de largeur  $l_0$  (=1 m) et de longueur indéfinie, implantée dans le sens de la plus grande pente sur un sol homogène. Les paramètres  $N$ ,  $H_L$  et  $S$  du modèle sont calés à partir des mesures relatives à une parcelle de 1 m<sup>2</sup>, de largeur  $l_0$  et longueur  $L$  (=1 m).

L'extrapolation du modèle se fait de façon très simple, en scindant la parcelle en tronçons successifs de longueur  $L$ . Lors d'une averse, chaque tronçon reçoit un apport constitué de la pluie et du ruissellement provenant du tronçon supérieur. On note:  $j$  = rang du tronçon de longueur  $L$ , compté depuis la bordure amont de la parcelle; et  $X$  = abscisse comptée le long de la parcelle (m), depuis sa limite amont ( $X = jL$ ), équivaut à une longueur de pente de versant, comptée depuis le sommet.

A chaque pas de temps  $Dt$ , les calculs sont effectués sur l'ensemble des tronçons, en allant de l'amont vers l'aval. Sur chaque tronçon, le schéma de discrétisation est le suivant, en conservant les notions définies plus haut, affectées de l'indice  $j$  du tronçon:

$$\begin{aligned}
 q_r(t) &= 0 && \text{pour } H_j(t) < H_L \\
 q_{Rj}(t) &= K I_0 [H_j(t) - H_L]^{N/2} && \text{pour } H_j(t) > H_L \\
 q_{Fj}(t) &= S_j L I_0 [2g H_j(t)]^{1/2} \\
 H_j(t + Dt) &= \max \{0, H_j(t) + [q_i(t) + q_{Rj-1}(t) - q_{Rj}(t) - q_{Fj}(t)]Dt / (L I_0)\}
 \end{aligned}$$

Sur les parcelles du Papem, nous avons donc 10 tronçons, tandis qu'il n'y en a que deux sur celles du bassin versant de S5.

Nous calculons donc les valeurs du dernier  $q_{Rj}(t)$  moyen au pas de temps de trente secondes. Ces valeurs ne sont donc plus fonction que de  $H_L$ ,  $N$  et  $S$ ; en effet, nous avons posé à  $K$  égale à un.

Enfin, nous essayons de déterminer les valeurs de ces paramètres. Elles sont optimisées par comparaison des débits modélisés sortant du dernier tronçon aval aux débits observés.

#### 4) Résultats obtenus et commentaires:

##### a) Au Papem:

Du fait des problèmes survenus lors de la mise en place du site d'étude et du peu de temps mis à ma disposition pour modéliser, seules deux pluies ont été modélisées sur le Papem.

##### Pluie du 31.07.1995

##### Pluie du 20.08.1995

	N	HI	S	N	HI	S
Jachère	3.31	3.4	2.23E-05	3.22	8.81	1.66E-05
Mil	3.1	7.53	2.50E-05	3.36	1.86	4.44E-05
Sol nu	2.81	2.65	1.70E-05	2.82	0.54	3.25E-05
Arachide	3.46	5.54	2.09E-05	4.2	1.5	6.31E-05

##### B) sur le bassin de S5:

Sur ce site, nous avons pu modéliser six pluies. Nous donnons les valeurs des paramètres obtenus après modélisation. Les courbes représentant celles-ci sont dans l'annexe 1.

Pluie du 22.07.1995

Pluie du 27.07.1995

	N	HI	S	N	HI	S
MIL 1	3.44	1.59	1.70E-05	2.57	0	4.56E-04
MIL 2	3.79	0.12	4.20E-05	3.223	0	3.03E-04
ARACHIDE	2.8	0	3.80E-05	2.67	0	4.89E-04
JACHERE	2.74	0	3.55E-05	3.14	0	4.83E-04

Pluie du 31.07.1995

Pluie du 01.08.1995

	N	HI	S	N	HI	S
MIL 1				3.7	0	3.32E-05
MIL 2	3.2	2.36	2.71E-05	3.025	0	1.17E-04
ARACHIDE	2.82	2.45	3.20E-05	3.638	0	4.07E-05
JACHERE	3.42	4.62	5.54E-05	4.51	0	1.33E-05

Pluie du 02.08.1995

Pluie du 14.08.1995

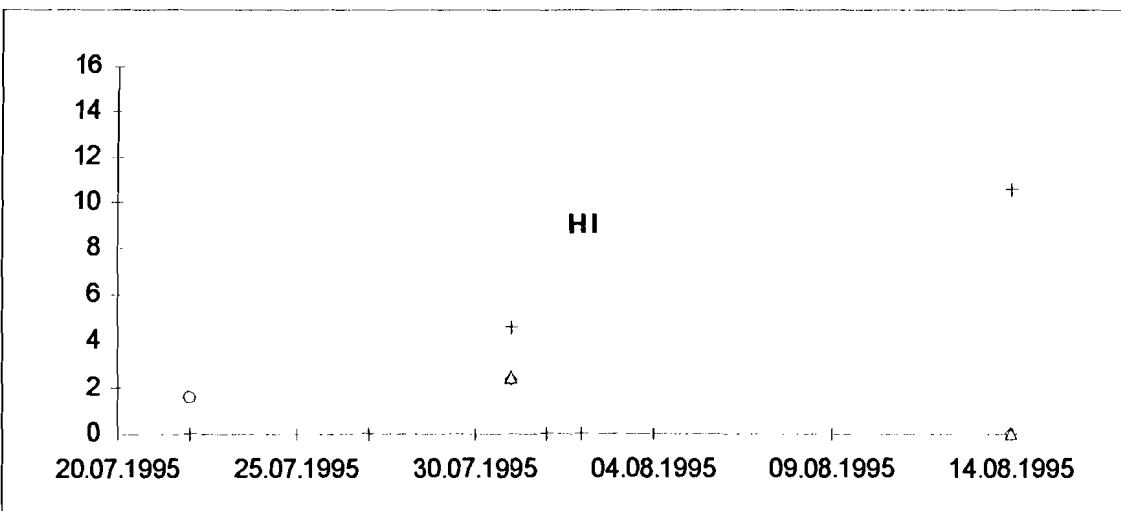
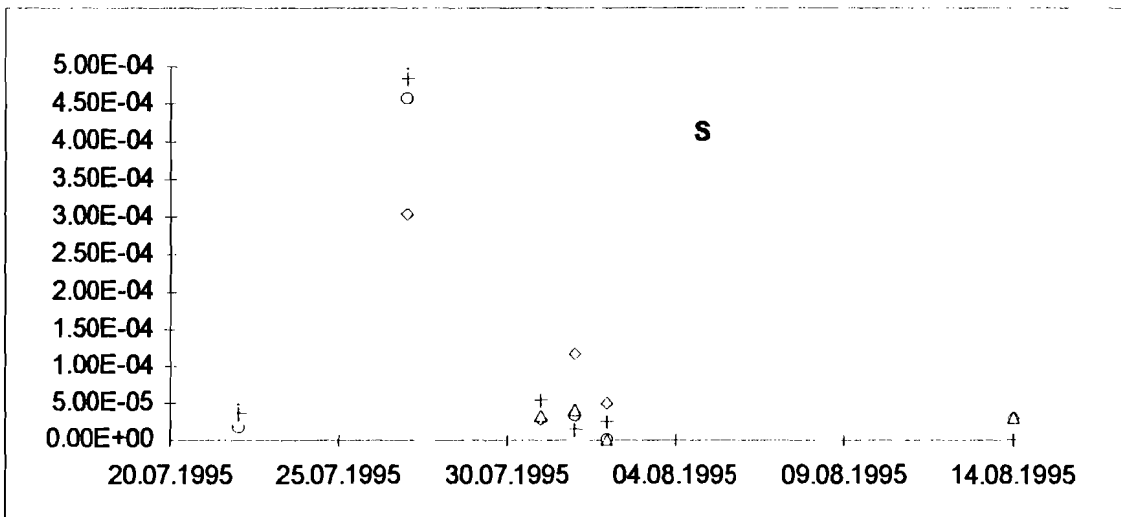
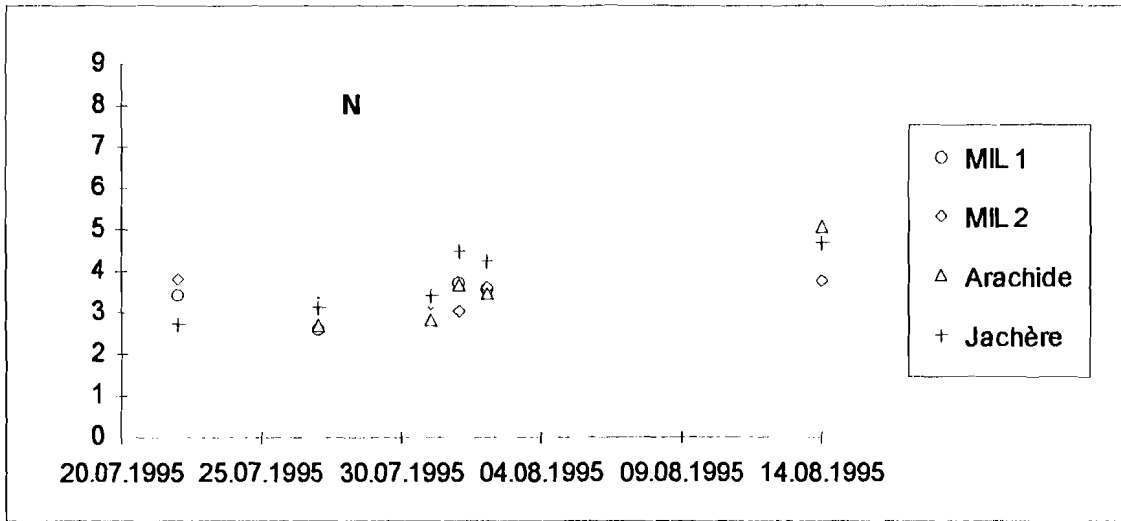
	N	HI	S	N	HI	S
MIL 1	3.57	0	2.60E-07	8.4	15.96	0.00E+00
MIL 2	3.6	0	5.60E-05	3.78	0	3.12E-05
ARACHIDE	3.49	0	0	5.08	0	3.01E-05
JACHERE	4.25	0	2.50E-05	4.67	10.56	0

**c) Commentaires:**

La modélisation, que nous avons réalisée ici, n'est malheureusement pas complète; en effet, il manque la fin de la saison et seules six pluies sont présentées ici. Il nous est donc difficile de suivre l'évolution des paramètres de modélisation. De plus, les oscillations des différents capteurs n'ont pas toutes été corrigées; l'optimisation des paramètres reste donc encore assez peu précise, mais cependant déjà exploitable (cf. page suivante).

Nous pouvons simplement remarquer à ce stade de la modélisation que le modèle proposé semble s'ajuster correctement quelque soient les parcelles (cf tableau ci-dessous). Cependant, la modélisation se fait plus aisément sur le site du Papem que sur celui du bassin versant de S5; ceci provient de la différence de taille des parcelles: plus elles sont longues, plus la modélisation est précise.

**PARAMETRES OPTIMISES SUR S5:**



Ecart moyen (mm/h) entre débit simulé et débit observé

	S5				PAPEM			
	MIL 1	MIL 2	ARA	JACH	P1	P2	P3	P4
22.07.1995	4.16	4.27	0.92	1.94				
27.07.1995	8.47	0.95	7.86	2.53				
31.07.1995		7.97	6.34	2.69	0.99	0.98	0.9	0.99
01.08.1995	4.13	5.66	6.56	3.52				
02.08.1995	10.99	15.05	16.9	2.86				
14.08.1995	0	4.04	0.36	2.89				
20.08.1995					0.82	0.91	1.54	0.18

De plus les paramètres trouvés cette année sur le Papem sont compris dans la même fourchette de valeurs que ceux de la saison dernière.

## **CONCLUSION:**

Le travail présenté ici demeure incomplet, mais donne les bases de la modélisation du phénomène de ruissellement. Nous n'avons pas ici tenu compte de tous les facteurs mis à notre disposition (radiométrie, état de surface et tensiomètre). Cependant, ce rapport nous montre la complexité des facteurs explicatifs du ruissellement et leurs inter-relations.

Ce stage m'a donc permis de me familiariser avec les études de terrain en hydrologie et l'exploitation des données. Mais, il m'a fait aussi découvrir un pays et une culture.



## BIBLIOGRAPHIE

- Albergel, J., Bader, J.C., Braudeau, E., Pépin, Y. et Planchon, O., Dakar, février 1994. Dossier: UR4 D.E.C. AID 93 Thyssé-Kaymor.

- Bader, J.C. (1994). Modèle analogique de ruissellement à stockage de surface: test sur parcelles et extrapolation sur versant homogène. Hydrological sciences- Journal des sciences Hydrologiques, 39, 6, December 1994, p. 569.

- Bernard, A. et Pépin, Y (juin 1995). Bassins versants de Thyssé-Kaymor, Campagne hydrologique, année 1994. Rapport de Campagne. 57p.

- Girard, M.C. et Girard, C.M. (1989). Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Collection sciences agronomiques, Masson. 260 p.

- Hillel, D. (1974). L'eau et le sol; principes et processus physiques. Vander. 287p.

# **ANNEXE 1:**

## **COURBES DE MODELISATION**

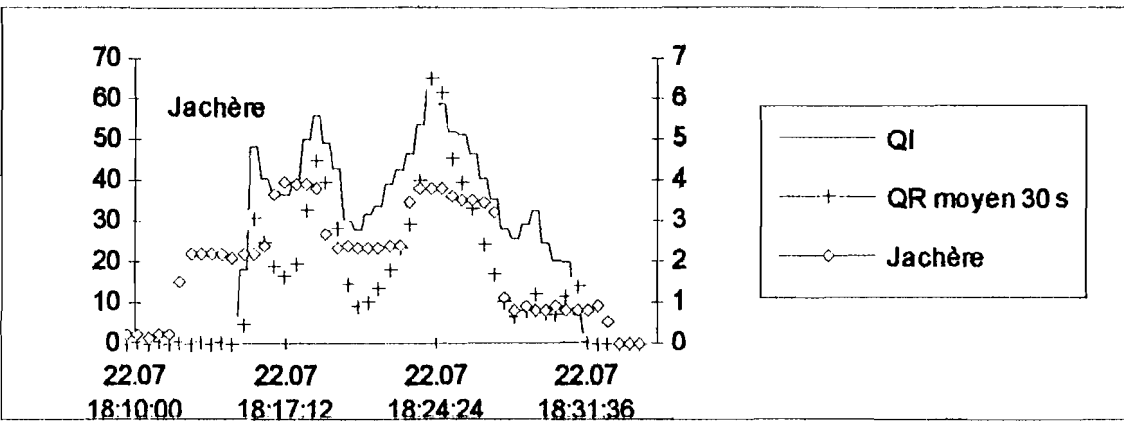
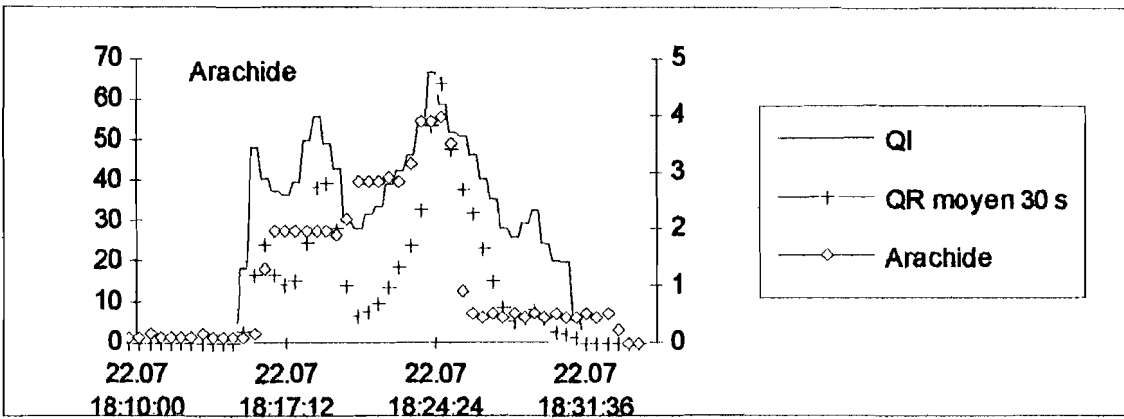
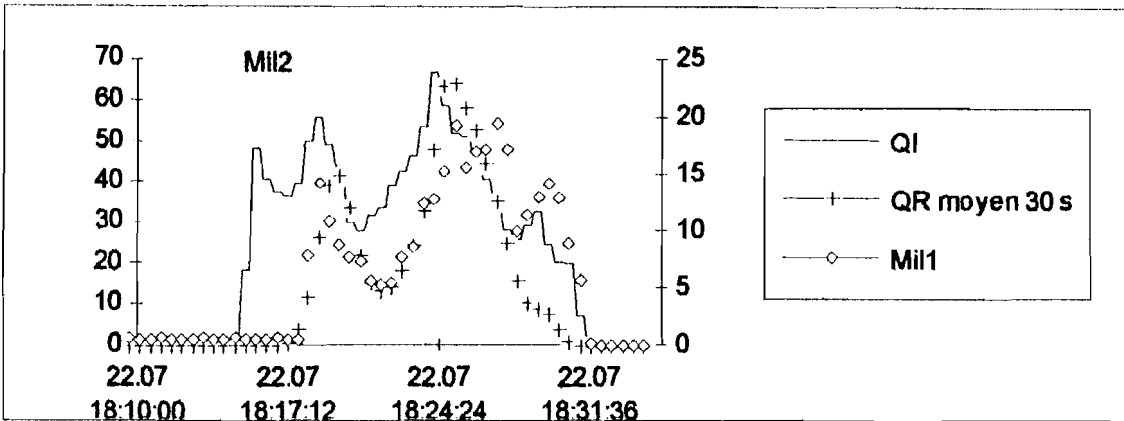
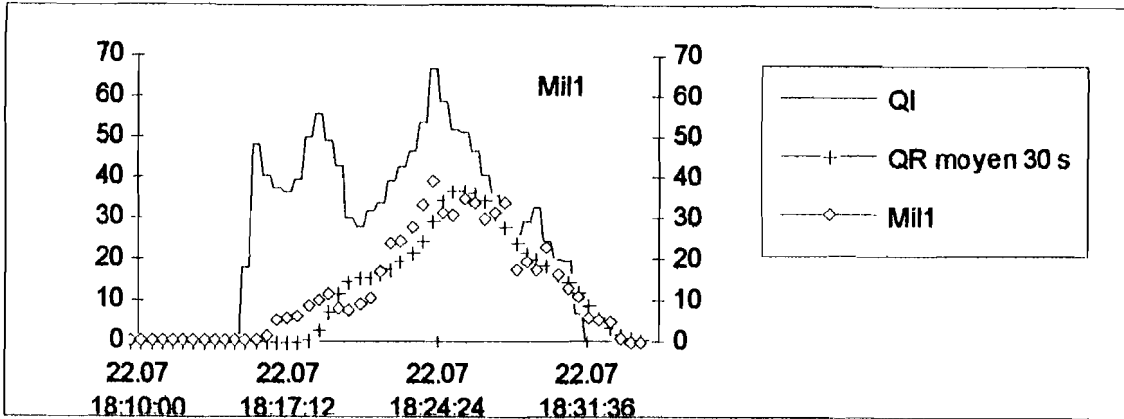
ABSCISSE: TEMPS

ORDONNEE: DEBITS PRECIPITES ET RUISSELES EN MM/H

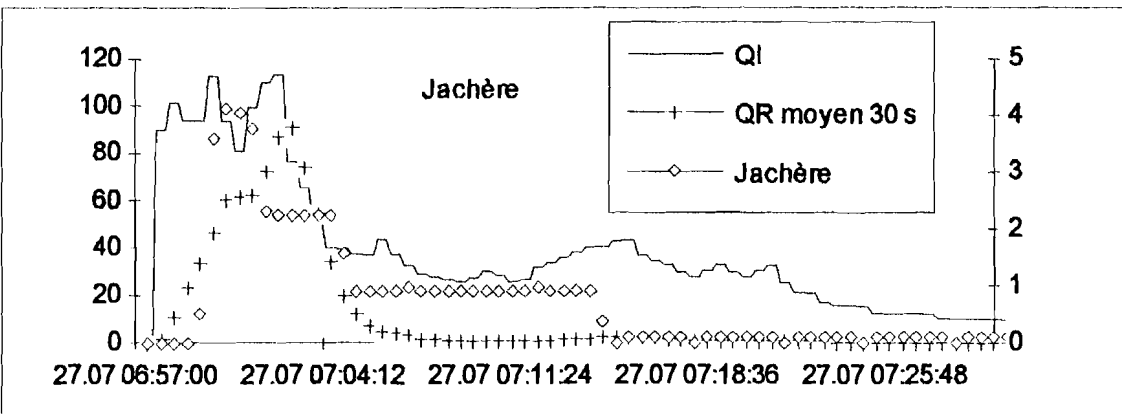
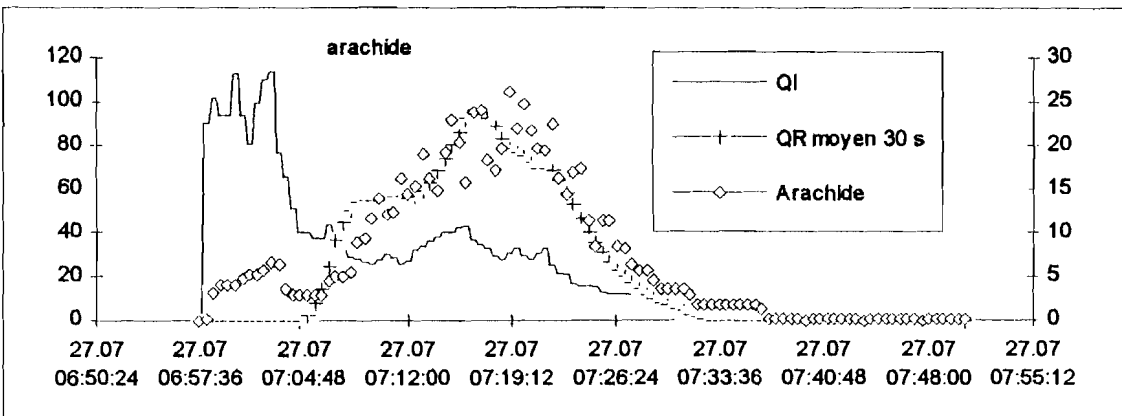
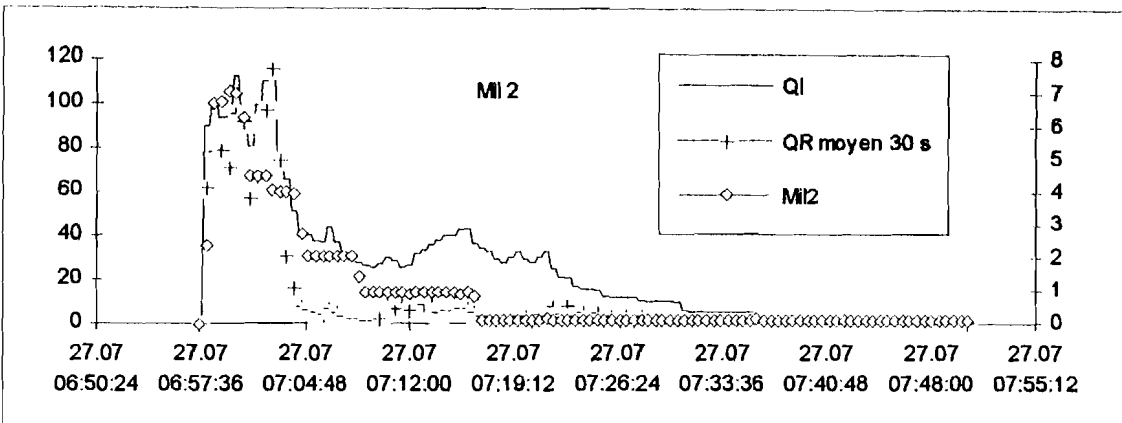
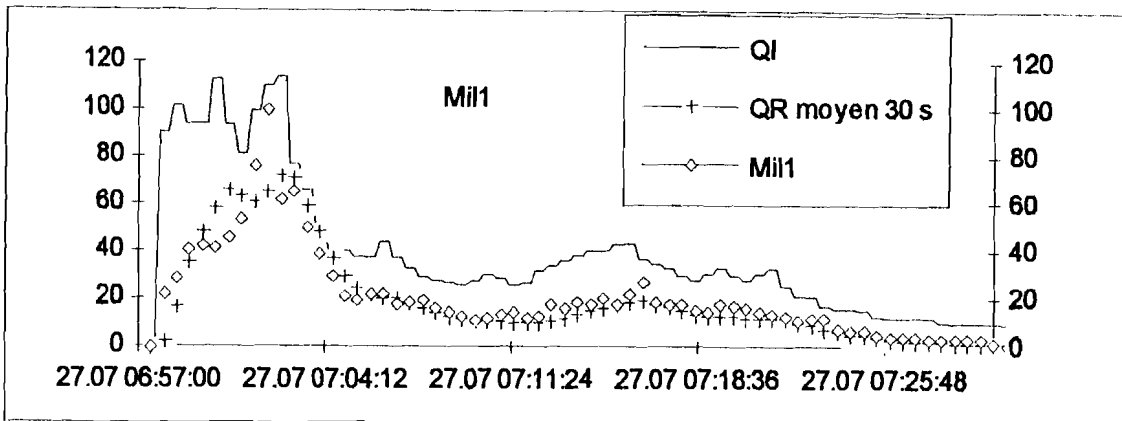
**BASSIN VERSANT**

**S5**

## PLUIE DU 22.07.1995

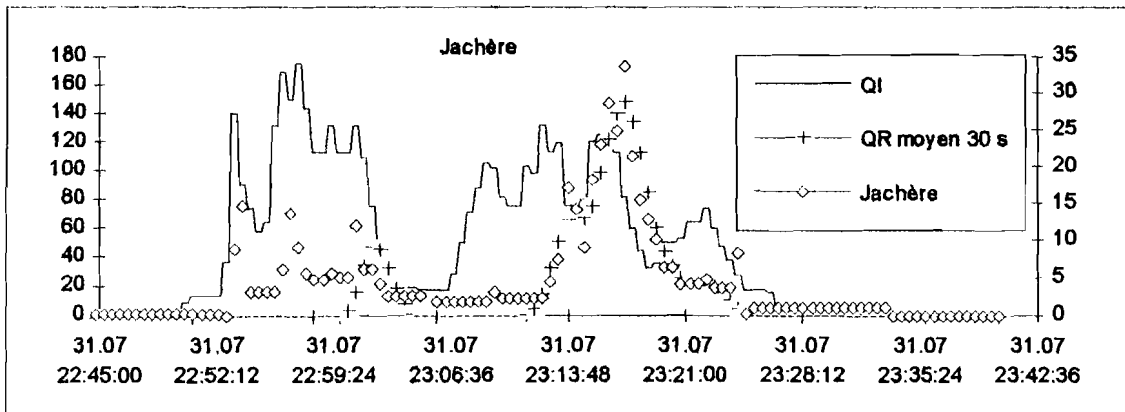
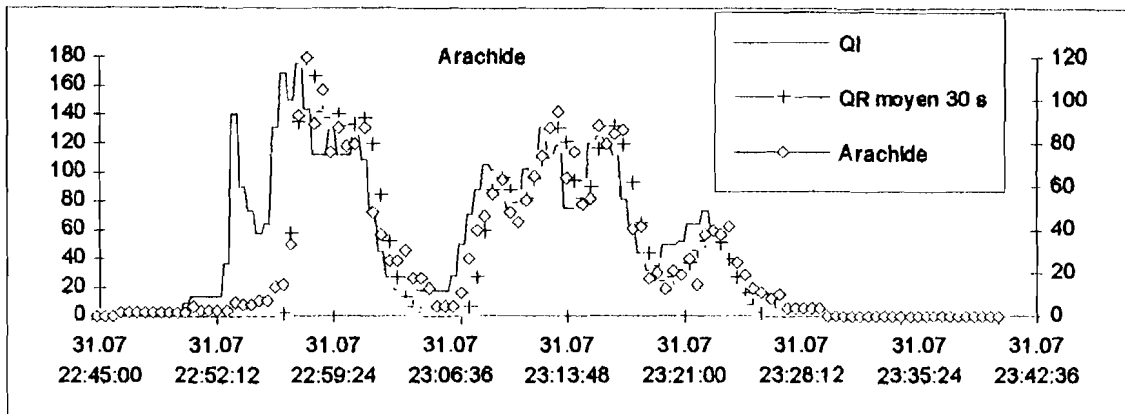
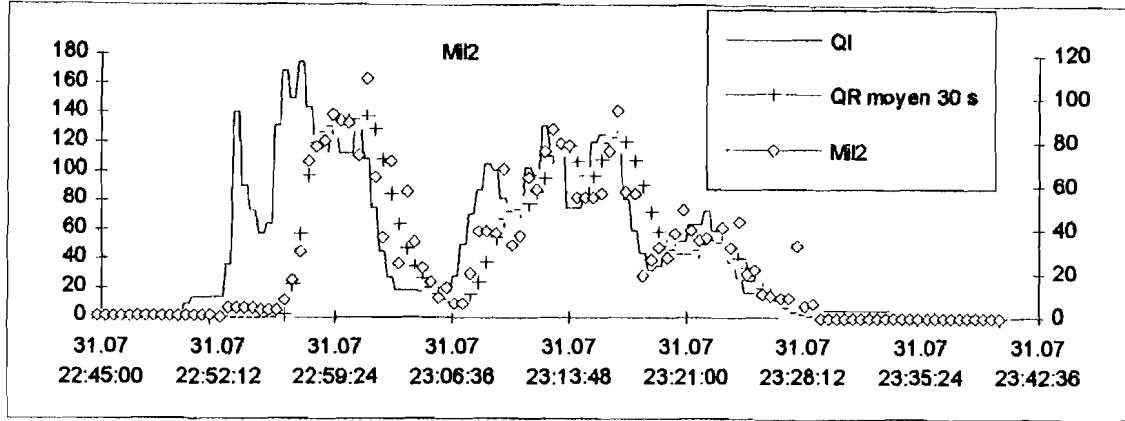


# PLUIE DU 27.07.1995

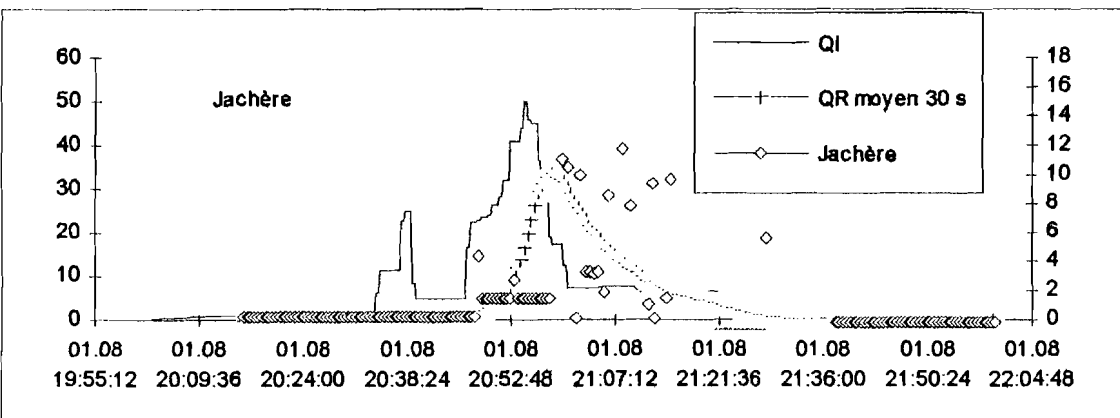
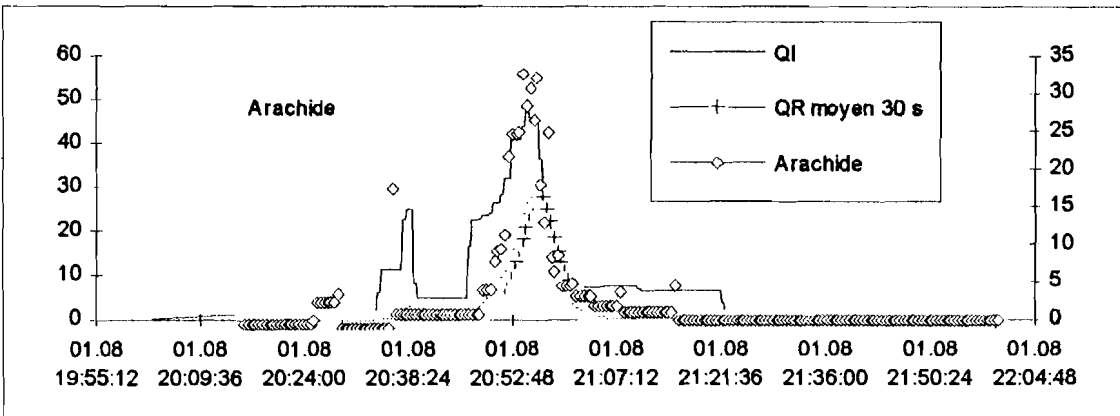
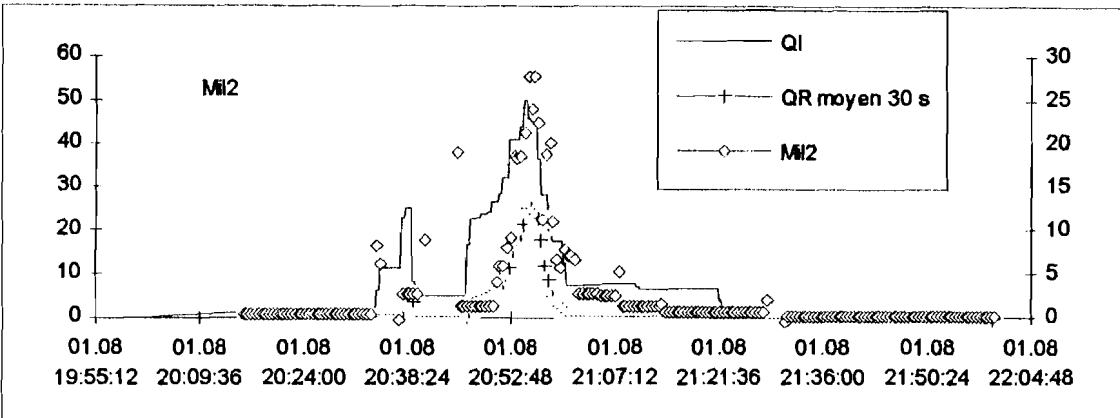
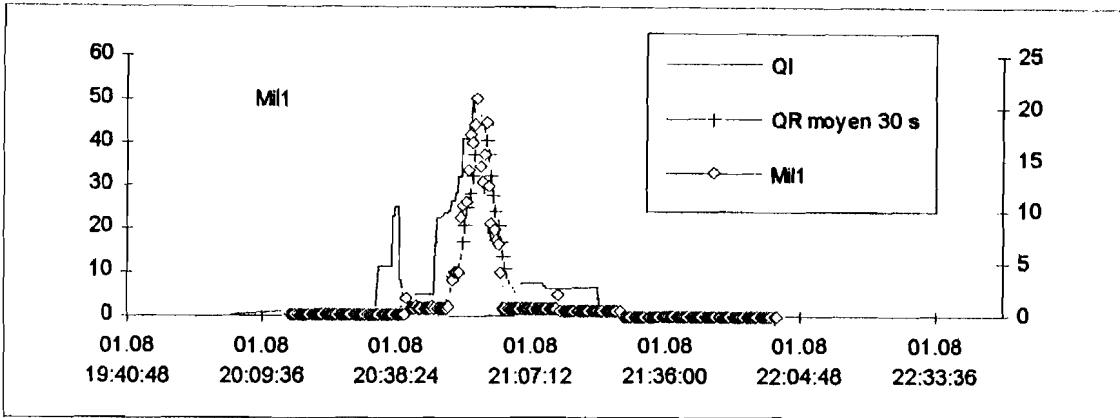


## PLUIE DU 31.07.1995

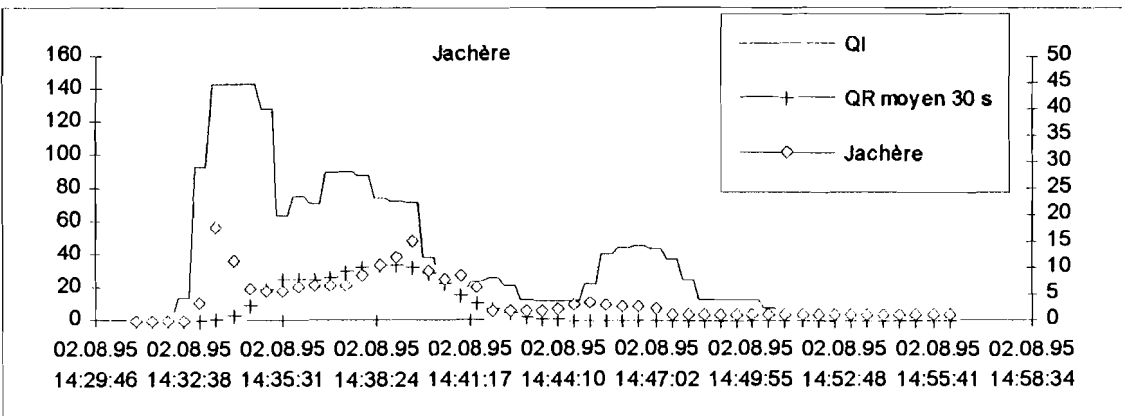
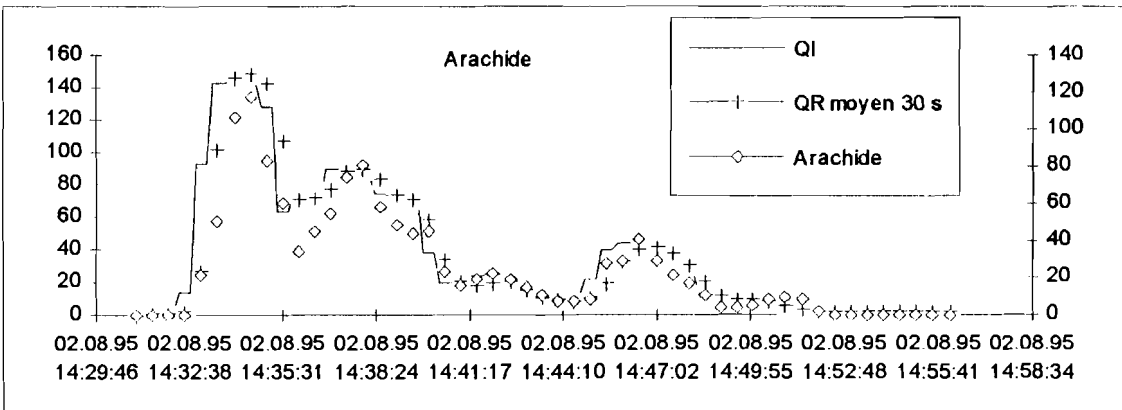
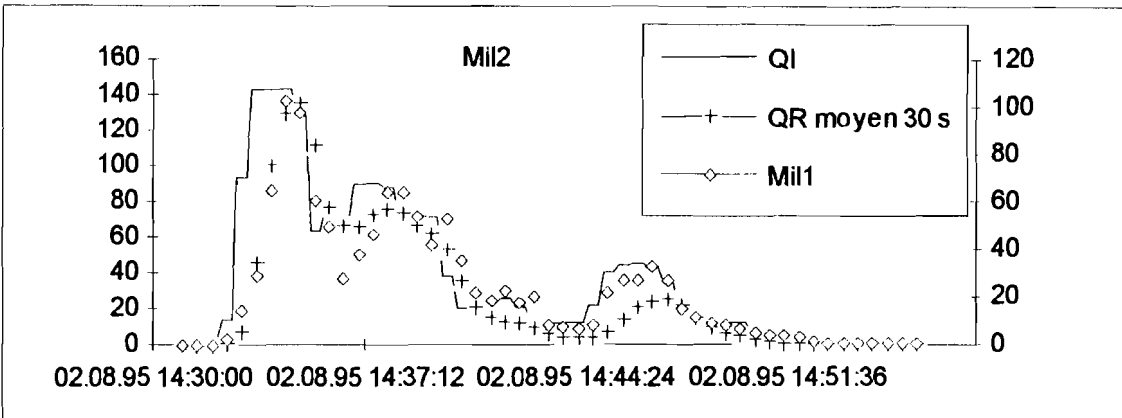
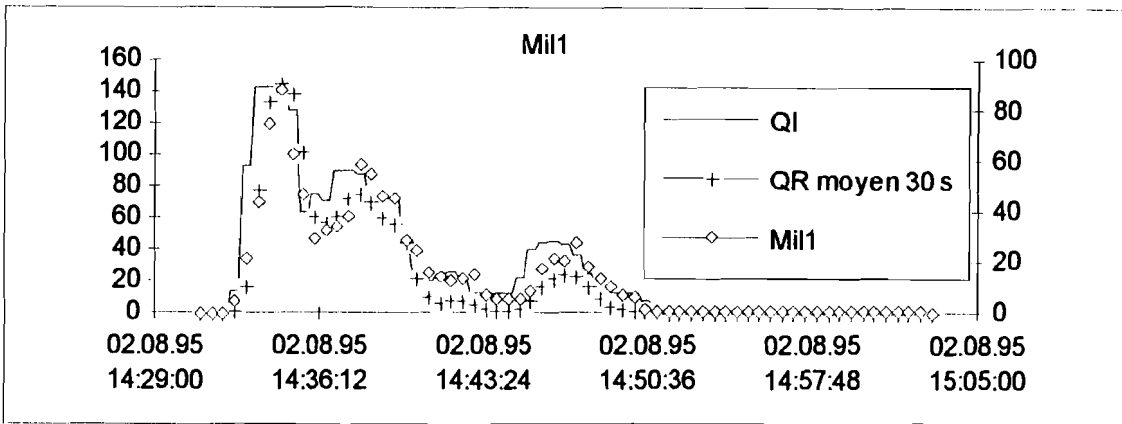
La cuve de la parcelle de mil 1 ayant débordée, nous sommes dans l'incapacité de modéliser cette crue.



# PLUIE DU 01.08.1995

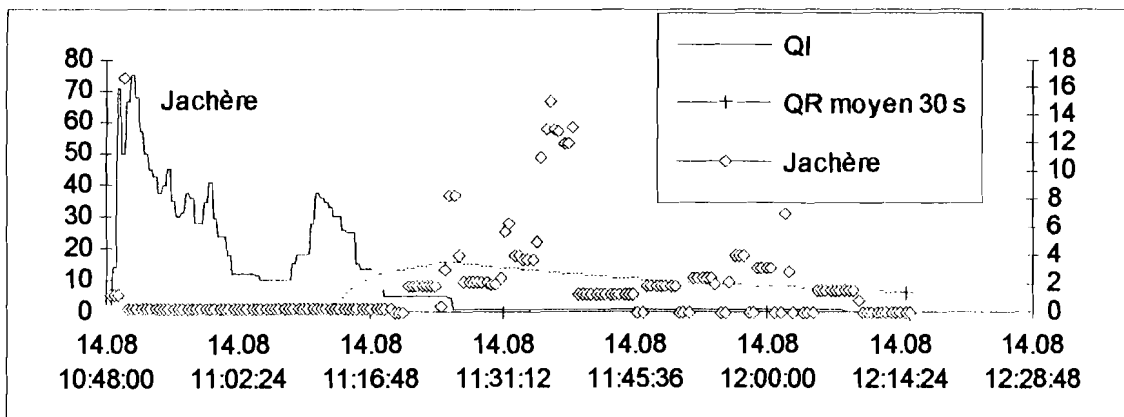
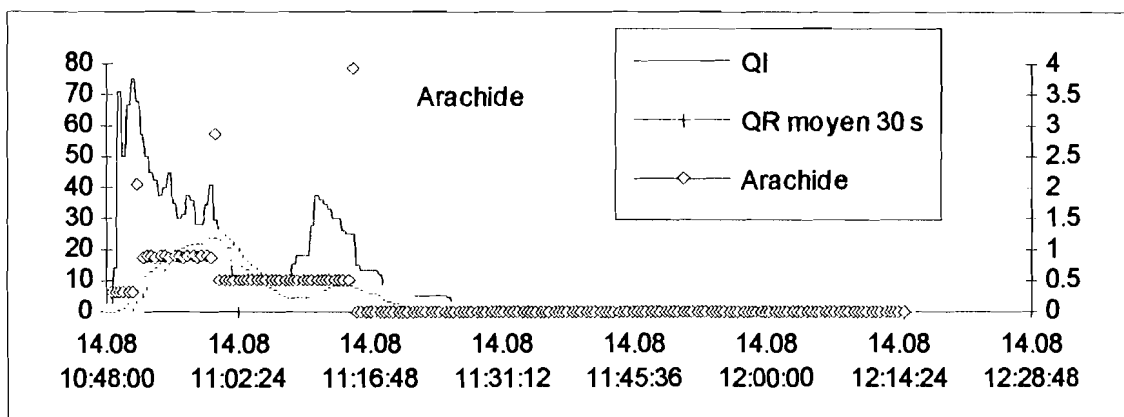
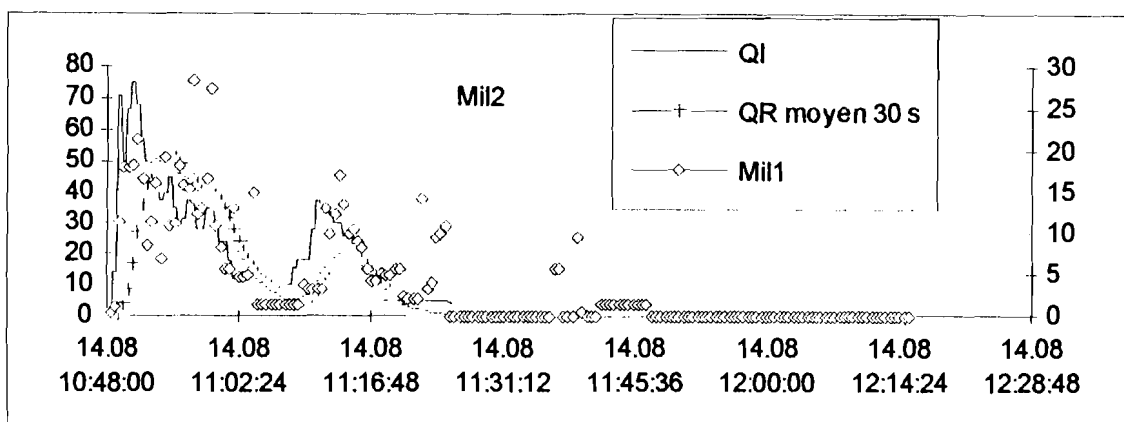
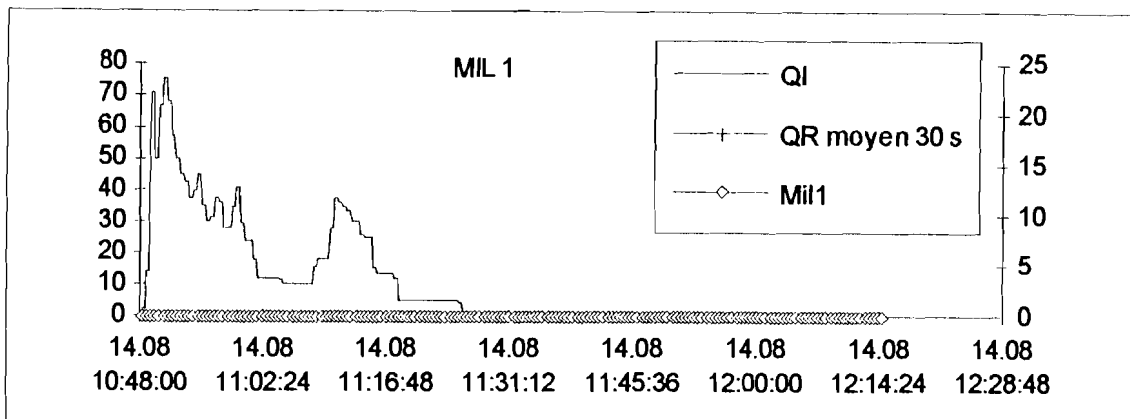


## PLUIE DU 02.08.1995



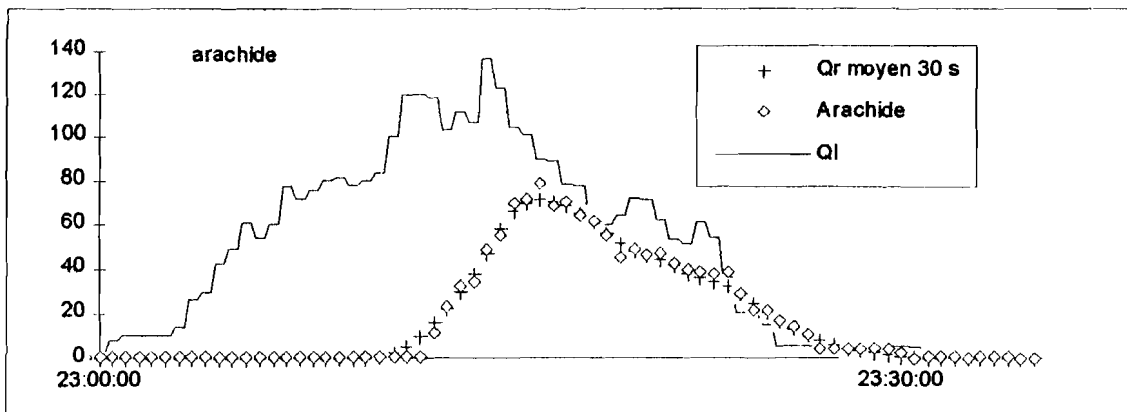
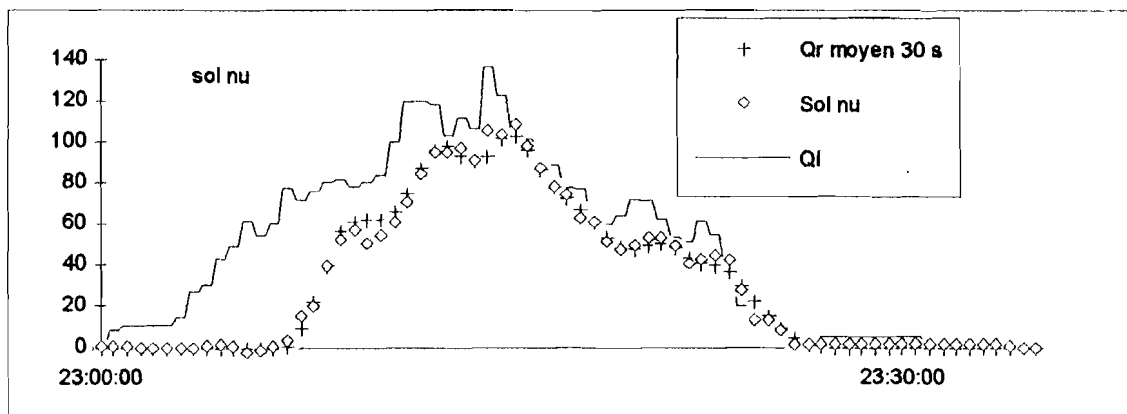
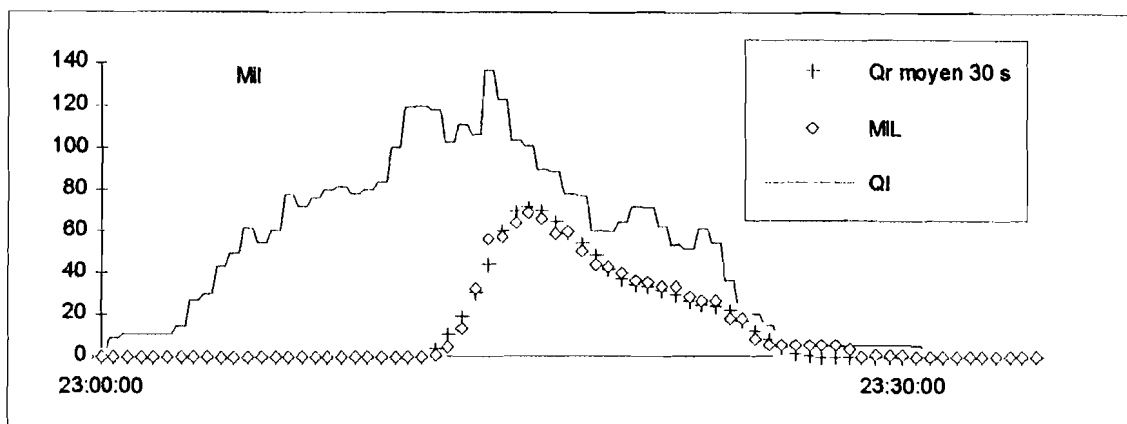
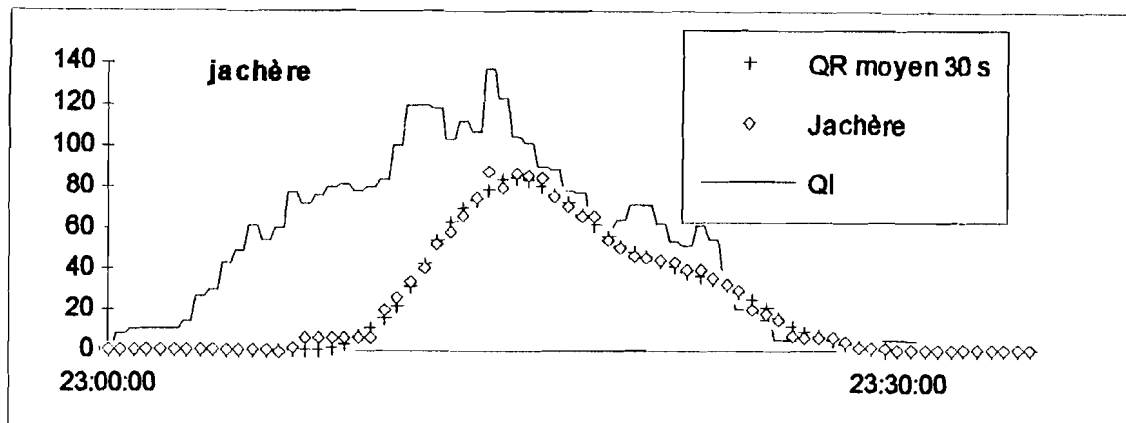


## PLUIE DU 14 .08 1995

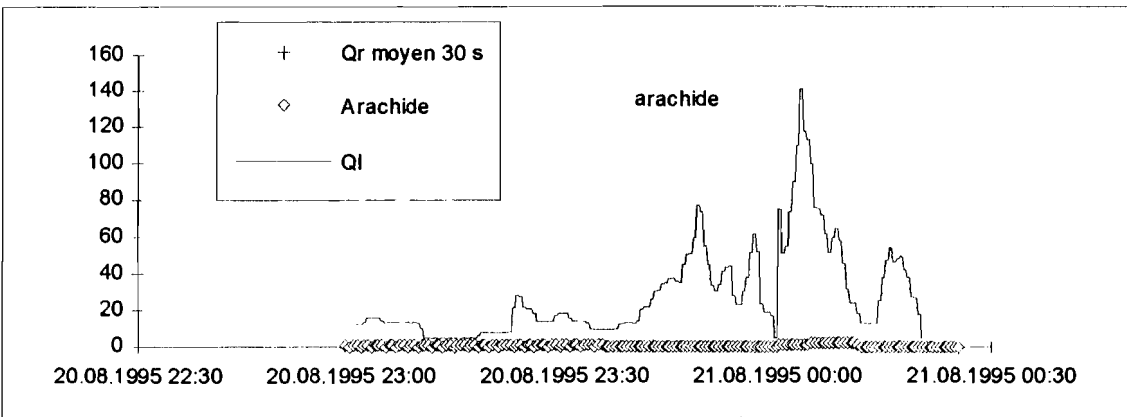
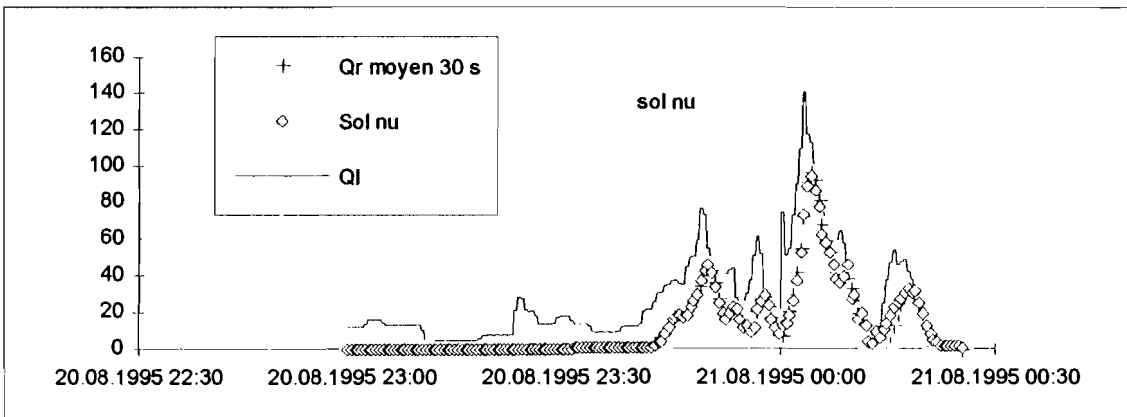
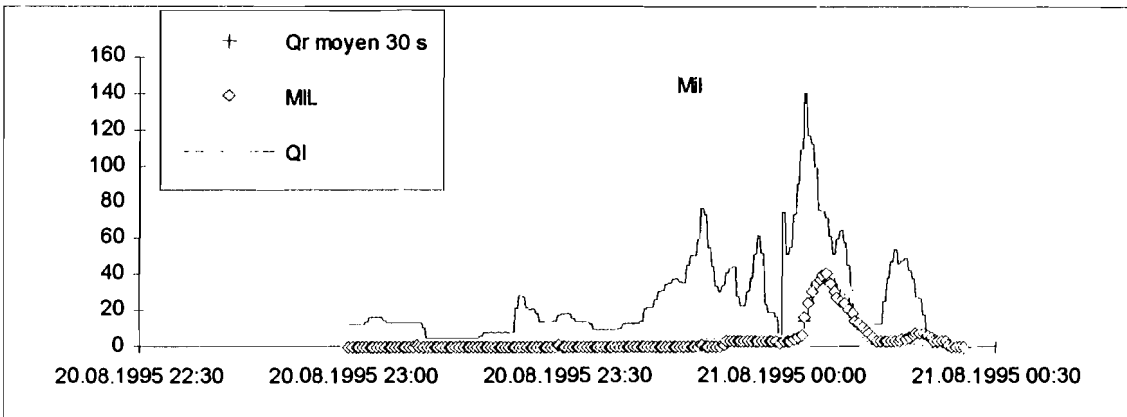
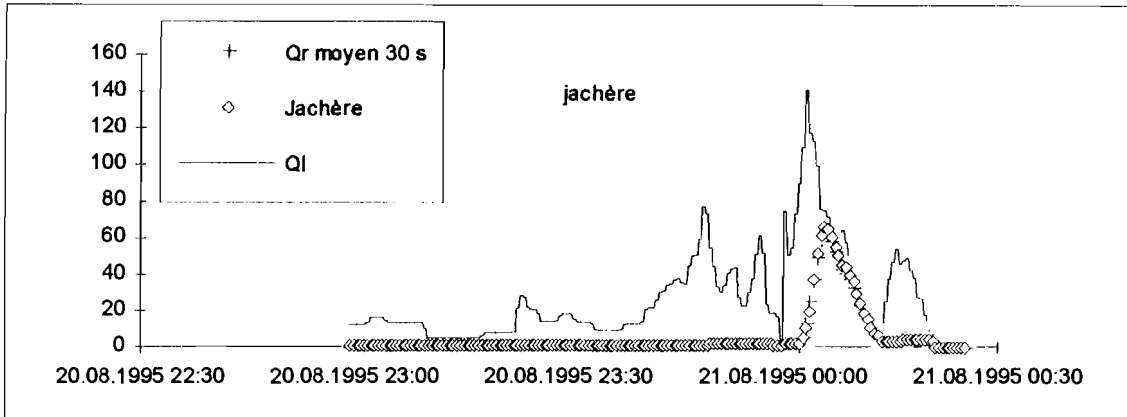


**LE PAPEM**

# PLUIE DU 31.07.1995



# PLUIE DU 20.08.1995



**ANNEXE 2:**

**PHOTOS**

Parcelle de mil du Papem le25 juillet



Parcelle de mil du Papem le 19 août



Parcelle de sol nu du Papem le 25 juillet



Parcelle de sol nu du Papem le 19 août



Parcelle d'arachide du Papem le 25 juillet



Parcelle d'arachide du Papem le 19 août





Parcelle mil 1 de S5 le 31 juillet



Parcelle de mil 1 de S5 le 16 août



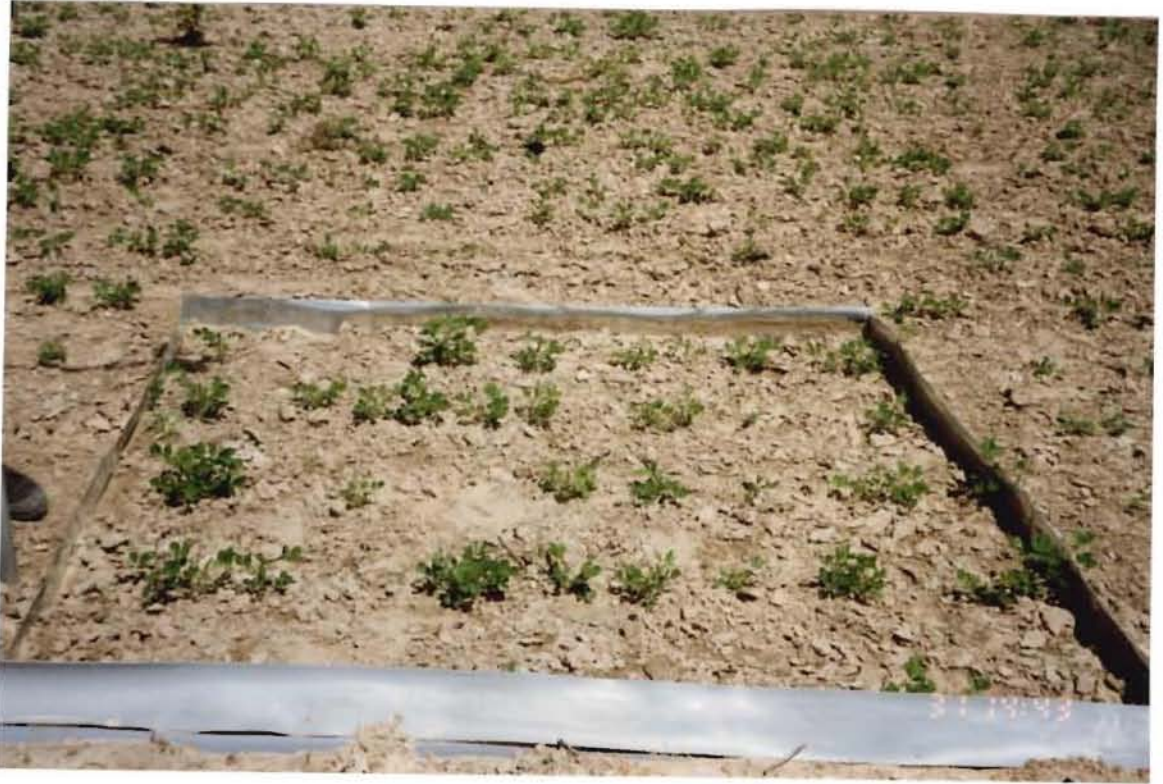
Parcelle de mil 2 de S5 le 31 juillet



Parcelle de mil 2 de S5 le 16 août



Parcelle d'arachide de S5 le 31 juillet



Parcelle d'arachide de S5 le 16 août



Parcelle en jachère de S5 le31 juillet



Parcelle en jachère de S5 le 16 août



Parcelle en jachère du Papem le 25 juillet



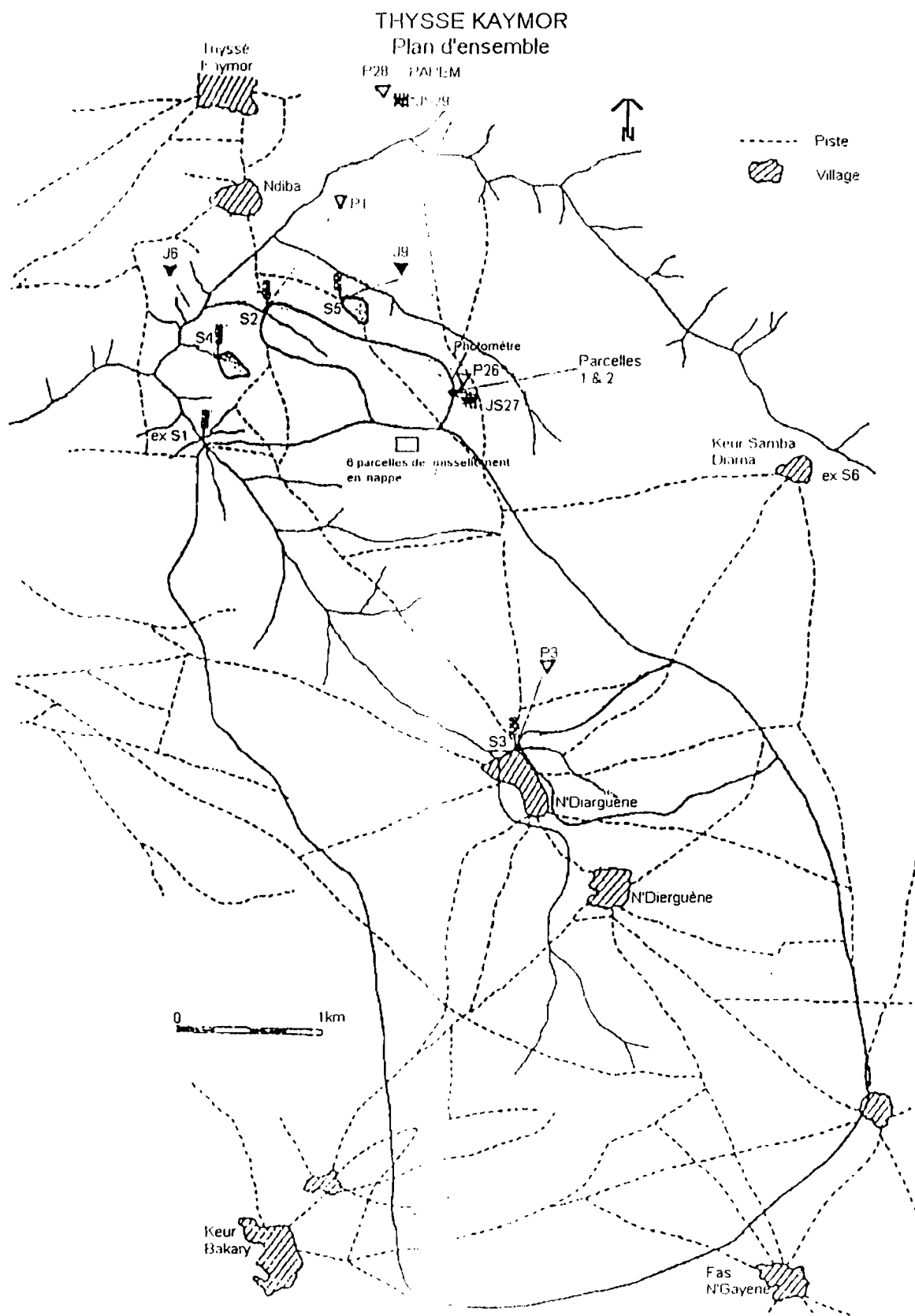
Parcelle en jachère du Papem le 19 août



**ANNEXE 3:**

**CARTES**

Carte 1 : Localisation des appareils  
sur les bassins versants de Thyssé-Kaymor



61 p.

