

Les effets des travaux de CES/DRS sur le régime hydrologique du bassin versant de Mehanna

**Bart Hilhorst
1996**

**Projet Intégré Keita
GCP/NER/032/ITA**



**Food and Agriculture
Organization of the United Nations**

Table de Matières

1	Introduction -----	1
2	Description de l'UTE de Mehanna -----	2
2.1	Le concept de l'UTE -----	2
2.2	La situation générale -----	2
2.3	Climatologie -----	2
2.4	Géologie et morphologie -----	5
2.5	Agriculture -----	7
2.6	Erosion -----	8
2.7	Les réalisations CES/DRS par le Projet Intégré Keita -----	9
3	La disposition hydrométrique et la relevé des données hydrométriques disponibles -----	14
4	La méthode de travail -----	16
5	L'analyse du coefficient de ruissellement et du débit de pointe -----	18
5.1	Les données -----	18
5.2	Le contrôle des données hydrométriques disponibles -----	18
5.3	L'analyse d'évaluation du coefficient de ruissellement en fonction des travaux de CES/DRS exécutés par le PIK -----	19
5.4	L'analyse de l'évaluation du débit de pointe en fonction des travaux de CES/DRS exécutés par le PIK -----	23
6	L'analyse de l'hydrogramme unitaire -----	28
6.1	Le principe de l'hydrogramme unitaire -----	28
6.2	Les conditions pour la détermination de l'hydrogramme unitaire -----	29
6.3	La détermination de l'hydrogramme unitaire -----	30
6.4	Le changement de l'hydrogramme unitaire en fonction des travaux de CES/DRS -----	34
6.5	Conclusions -----	37
7	Le changement du lit du kori au niveau de la station hydrométrique -----	38
8	Conclusions et recommandations -----	41
9	Références -----	43

L'annexes

Annexe A:	Résultats des mesures de l'érosion à Kountkouzout -----	44
Annexe B:	Les données hydrologiques de l'UTE de Mehanna -----	45
Annexe C:	Les coefficients de ruissellement mensuels de l'UTE de Mehanna -----	51
Annexe D:	La détermination des coefficients n et k de l'hydrogramme unitaire de Nash -----	52
Annexe E:	Des crues enregistrées et simulées en utilisant la méthode de l'hydrogramme unitaire -----	54
Annexe F:	La fonction Gamma -----	60

Liste des Tableaux

Tableau 1:	Pluviométrie à Keita et Waddey Périmètre de 1990 à 1995
Tableau 2:	La répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie à Keita
Tableau 3:	Les intensités pluviales maximales avec période de retour de 10 ans de Tahoua
Tableau 4:	Données climatologiques moyennes pour la période de 1990 à 1995 de la station météorologique de Keita
Tableau 5:	Les paramètres morphométriques de l'UTE de Mehanna
Tableau 6:	Travaux de CES/DRS réalisés par le PIK dans l'UTE de Mehanna
Tableau 7:	Relevé des dispositions pluviométriques des années 1990 au 1995
Tableau 8:	Les coefficients de Thiessen en fonction du réseau pluviométrique
Tableau 9:	Les événements d'écoulement omis des analyses du coefficient de ruissellement et du débit de pointe
Tableau 10:	Les coefficients de corrélation obtenus dans l'analyse de la relation entre la pluviométrie et le coefficient de ruissellement
Tableau 11:	Les caractéristiques de la relation entre le débit de pointe et la pluviométrie par période
Tableau 12:	Les coefficients n et k de l'hydrogramme unitaire par crue
Tableau 13:	Les hydrogrammes unitaires représentatives par période
Tableau 14:	Résumé des travaux de CES/DRS entre 1992 et 1995, et leur impact sur la superficie réelle de l'UTE de Mehanna
Tableau 15:	La pente longitudinale du kori de Mehanna au niveau de la station limnimétrique pour plusieurs années

Liste des Figures

- Figure 1: La zone d'intervention du PIK
- Figure 2: La localisation de l'UTE de Mehanna
- Figure 3: Les courbes de niveau de l'UTE de Mehanna
- Figure 4: Courbe hypsométrique de l'UTE de Mehanna
- Figure 5: La situation de travaux de CES/DRS en fin 1991
- Figure 6: La situation de travaux de CES/DRS en fin 1992
- Figure 7: La situation des travaux de CES/DRS en fin 1993
- Figure 8: La disposition hydrométrique dans l'UTE de Mehanna
- Figure 9: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour l'année 1990 et 1991
- Figure 10: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour 1992
- Figure 11: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour l'année 1993 et 1995
- Figure 12: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour 1994
- Figure 13: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour 1990 et 1991
- Figure 14: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour la période 1992
- Figure 15: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour 1993 et 1995
- Figure 16: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour la période 1994
- Figure 17: La relation entre la pluviométrie et le débit de pointe pour les quatre périodes représentant des étapes spécifiques de l'aménagement de l'UTE de Mehanna
- Figure 18: Les hydrogrammes unitaires de 1992
- Figure 19: Les hydrogrammes unitaires de 1993
- Figure 20: Les hydrogrammes unitaires de 1994
- Figure 21: Les hydrogrammes unitaires de 1995
- Figure 22: Les hydrogrammes unitaires de 1993 et 1995
- Figure 23: Les hydrogrammes unitaires représentatives de 1992 jusqu'à 1995
- Figure 24: Des levés topographiques du kori de Mehanna au niveau de la station limnimétrique pour plusieurs années

1. Introduction

L'Unité Territoriale Élémentaire (UTE) de Mehanna est située dans la haute vallée de Keita. A cause de la sécheresse et de l'augmentation de la pression démographique, cette UTE a été sujette à une forte dégradation de terre et ainsi qu'à une érosion importante. Afin de renverser ce processus de désertification, le Projet Intégré Keita (PIK) a réalisé des nombreux traitements de CES/DRS dans l'UTE de Mehanna.

La présente étude a pour but d'analyser les effets de ces traitements sur le régime hydrologique et les processus d'érosion. L'UTE de Mehanna a reçu un traitement de CES/DRS très extensif par rapport à la plupart des UTE-s comparables dans la zone d'intervention du PIK. C'est pour cela que cette UTE est très appropriée pour faire l'analyse envisagée. L'analyse doit également donner une indication de l'efficacité des travaux CES/DRS exécutés par le PIK pour changer le régime hydrologique d'un bassin versant.

Le chapitre 2 présente une description climatologique et morphologique de l'UTE en considération. On y trouve également un relevé chronologique des travaux CES/DRS réalisés ici par le PIK.

Le chapitre 3 présente la disposition hydrométrique et un relevé des données hydrométriques disponibles.

La méthode de travail utilisée pour analyser l'impact des travaux CES/DRS sur le régime hydrologique est décrite au chapitre 4.

Le chapitre 5 présente une analyse des coefficients de ruissellement et les débits de pointe pour les événements pluviométriques assez homogènes par année, ainsi qu'une comparaison des résultats des années disponibles.

Dans le chapitre 6, une analyse de l'hydrogramme unitaire a été appliquée aux mêmes événements pluviométriques assez homogènes.

Le paragraphe 7 présente une analyse des profils en travers du kori principal de Mehanna pour les années 1991 à 1995.

Enfin, le chapitre 8 présente les conclusions générales et des recommandations.

2. Description de l'UTE de Mehanna

2.1 Le concept de l'UTE

UTE est l'abréviation d'Unité Territoriale Élémentaire. Il s'agit d'un bassin versant qui peut être considéré plus ou moins comme autonome. C'est-à-dire que les processus d'érosion, de ruissellement et de dégradation de terre de ce bassin versant ne sont pas influencés par les bassins versants voisins ou la situation en aval. Une UTE peut donc être traitée de CES/DRS indépendamment des bassins versants voisins.

2.2 La situation générale

L'UTE de Mehanna est située dans la haute vallée de Keita à environ 550 km à vol d'oiseau de Niamey, capitale du Niger. La région fait partie de l'Ader Doutchi, un massif modeste dont l'altitude est voisine de 400 m, traversée par de profondes vallées.

La figure 1 montre la zone d'intervention du PIK. La figure 2 montre la localisation de l'UTE de Mehanna.

2.3 Climatologie

L'UTE de Mehanna est située entre les isohyètes 300 et 400 mm/an. La station pluviométrique principale la plus proche est celle de Keita, qui reçoit une moyenne d'environ 400 mm/an. Cependant, les mesures effectuées ces dernières années au lieu d'action indiquent que la pluviométrie de l'UTE de Mehanna est légèrement inférieure à celle de Keita. Ceci est indiqué par le tableau 1, qui montre la pluviométrie de Waddey Périmètre et Keita pour la période de 1990 à 1995. Waddey Périmètre est situé à environ 3 km du centre de l'UTE de Mehanna.

Tableau 1: Pluviométrie à Keita et Waddey Périmètre de 1990 à 1995.

Année	Pluviométrie [mm/année]	
	Keita	Waddey Périmètre
1990	321	296
1991	570	505
1992	429	286
1993	274	216
1994	649	541
1995	415	232

La saison des pluies commence en mai ou juin, mais les pluies ne se déclenchent réellement qu'en juillet sous forme d'orages violents. Le maximum se situe en août où la pluie peut durer plusieurs heures. D'octobre à mai il ne pleut pratiquement pas. Ceci est présenté dans le tableau 2 qui présente la répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie à Keita.

Tableau 2: Répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie à Keita.

Pluviométrie mensuelle moyenne à Keita en mm.								
Avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov - mars	total
3	16	49	115	147	60	12	0	403

Les pluies sont typiques des zones arides, caractérisées par des averses violentes avec une forte intensité et une courte durée. Le tableau 3 indique les intensités maximales avec une période de retour de 10 ans observées à Tahoua, située sur la même isohyète inter-annuelle que Mehanna (Tahoua est située à environ 90 km de l'UTE de Mehanna).

Tableau 3: Les intensités pluviales maximales de Tahoua avec période de retour de 10 ans.

Durée de la pluie	Intensité pluviale en mm/h
10 minutes	150
30 minutes	90
1 heure	60
5 heures	10
1 jour	5

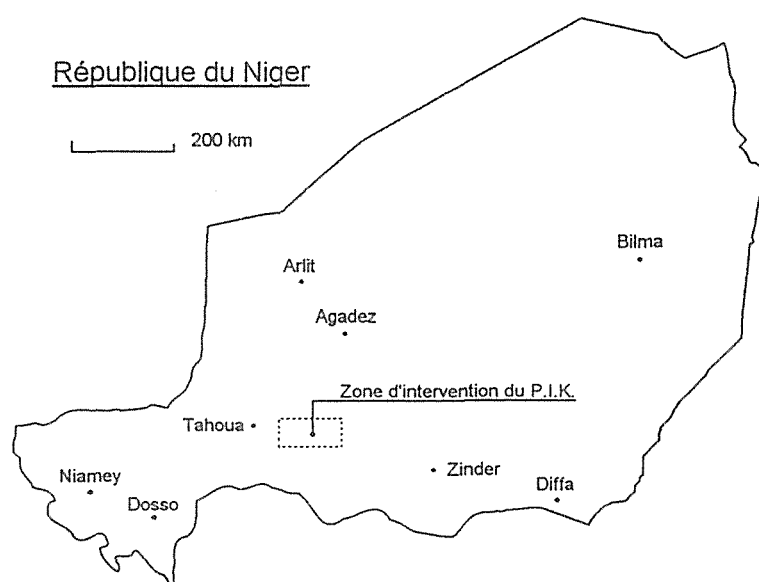


Figure 1: La zone d'intervention du PIK.

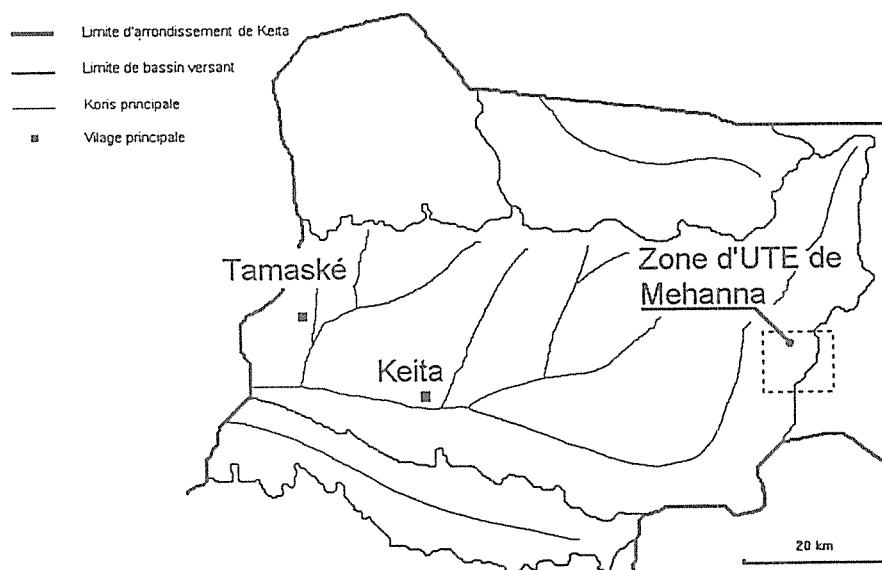


Figure 2: La localisation de l'UTE de Mehanna.

Avec une température moyenne mensuelle toujours très élevée, oscillant entre 30 et 40 °C, l'évaporation est importante en toute saison.

Le tableau 4 présente les données climatiques de la station météorologique de Keita pour la période de 1990 à 1995.

Tableau 4: Données climatologiques moyennes de la station météorologique de Keita pour la période de 1990 à 1995.

Mois	Température		Humidité [%]	Évaporation piche [mm]	Insolation [hr]
	Minimum [°C]	Maximum [°C]			
Janvier	15.2	28.7	23.7	21.7	8.0
Février	17.2	32.5	22.8	21.9	8.7
Mars	21.0	36.8	22.3	23.4	8.2
Avril	24.9	40.7	31.5	23.1	8.8
Mai	26.0	40.4	56.5	16.1	8.9
Juin	25.5	39.6	40.0	13.5	8.8
Juillet	23.0	34.8	54.3	8.3	7.5
Août	21.3	32.9	51.0	6.9	8.3
Septembre	23.9	36.8	46.7	9.1	8.3
Octobre	21.9	38.4	31.8	16.8	9.3
Novembre	19.0	34.6	30.5	20.6	8.8
Décembre	16.5	30.9	27.7	19.0	8.6

Pendant la longue saison sèche, le sol se dénude et se dessèche progressivement. A cause de cela, s'il est suffisamment violent, le vent peut se charger de poussières. Ce phénomène, appelé l'Harmattan, se présente normalement entre décembre et mars.

Le régime hydrologique est caractérisé par des crues de forte intensité et de courte durée, typiques des processus hydrologiques des régions arides. Le débit de base de l'UTE de Mehanna est pratiquement nul, c'est à dire que les aquifères sont disjonctés du réseau hydrographique et n'alimentent donc pas le kori.

2.4 Géologie et morphologie

L'UTE de Mehanna fait partie de l'Ader Doutchi ou, dans l'ordre des formations géologiques, on rencontre trois niveaux superposés, de résistances très différentes à l'érosion:

- 1: crétacé supérieur: grès, argiles et sables fins;
- 2: éocène: séries calcaires avec intercalations marno-argileuses;
- 3: continental terminal: grès ferrugineux à oolithes et niveaux argileux.

Approximativement, de haut en bas, le schéma morphologique de l'Ader Doutchi se présente ainsi:

Le plateau: Il est structural puisque aucun plissement notable n'a affecté la couche (sédimentation continentale antéquaternaire) qui reste subhorizontale. Le plateau est très découpé par les différentes phases du quaternaire. Il est couvert par une carapace ferrugineuse et caractérisé par des affleurements discontinus de divers grès ferrugineux en pavage et quelques dépôts éoliens sableux.

Les pentes: Elles sont constituées d'éboulis de grès ferrugineux du plateau, de terrains marno-calcaires éocènes et, en bas, des grès fins et argiles du Crétacé.

Les glacis: Ils sont occupés par des sols tropicaux brun-rouge sur des alluvions anciennes en tête de vallée, moins évolués à l'aval et constitués par des dépôts de remplissage ancien des vallées.

Les vallées: Elles sont composées de sable et d'argile déposés irrégulièrement dans la largeur et en profondeur.

La figure 3 montre les courbes de niveau de l'UTE de Mehanna. Cette UTE est quelque peu exceptionnelle pour l'Ader Doutchi à cause de l'absence de plateau.

On trouve les restants du plateau érodé dans les zones nord-est et sud est de l'UTE.

Pour avoir une idée sur la morphométrie de l'UTE en considération, des paramètres morphométriques sont présentés dans le tableau 5.

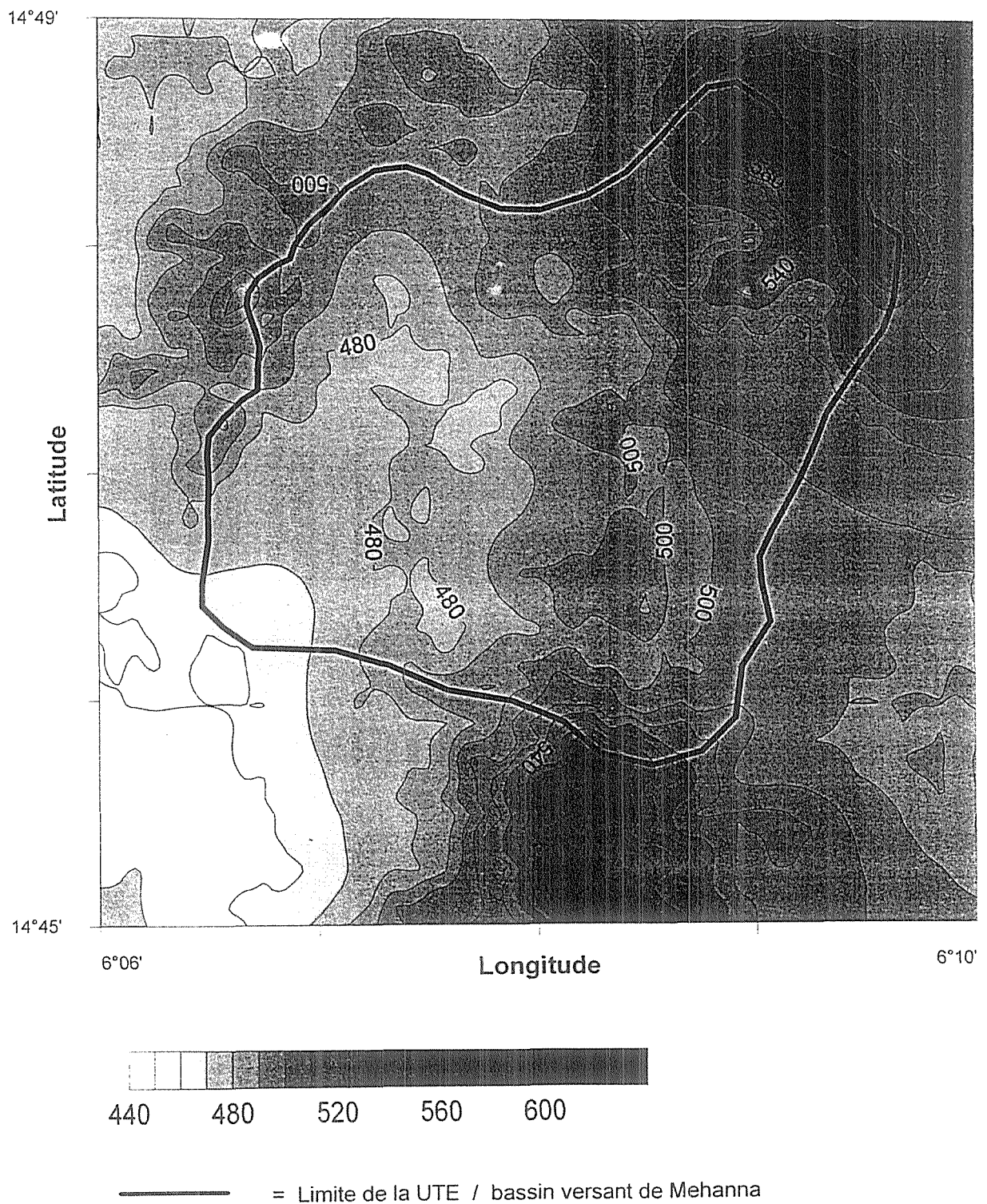


Figure 3: Les courbes de niveau de l'UTE de Mehanna.

Tableau 5: Les paramètres morphométriques de l'UTE de Mehanna.

Surface (A)	20.28	[km ²]
Périmètre (P)	18.90	[km]
Indice de compacité de Gravelius	1.18	[-]
Longueur rectangle équivalente	6.02	[km]
Largeur rectangle équivalente	3.14	[km]
Indice de pente de Roche	0.11	[-]
Indice de pente global	9.18	[-]
Type de relief	R3 (relief assez faible)	[-]
Rapport de confluence	3.50	[-]
Rapport de longueur	2.04	[-]
Densité de drainage	0.411	[km ⁻¹]

La courbe hypsométrique est présentée dans la figure 4.

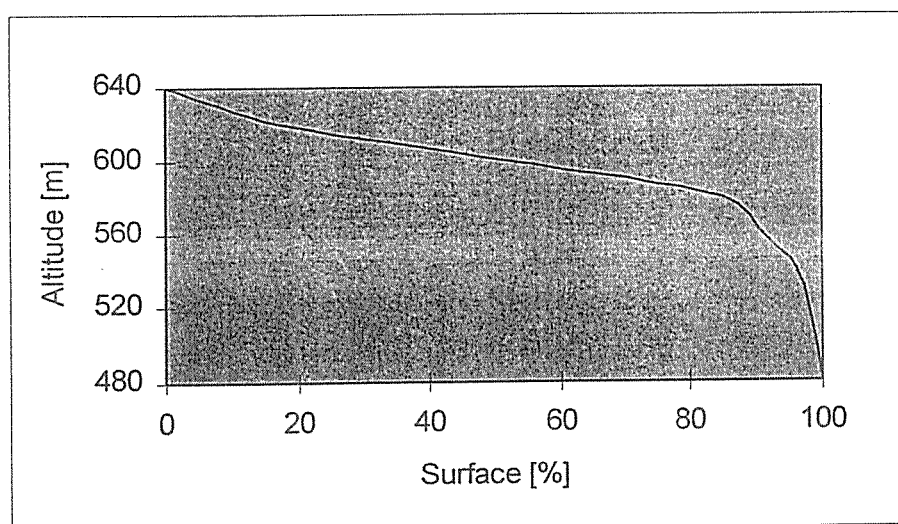


Figure 4: Courbe hypsométrique de l'UTE de Mehanna.

2.5 Agriculture

Pendant la saison d'hivernage, on observe surtout des cultures de sorgho et de mil sur les parties limoneuses et argileuses des glacis. Dans les années déficitaires du point de vue pluviométrique, on y cultive aussi des niébés.

Pendant la contre-saison, les lits de kori et les plaines sédimentées à l'amont des barrages d'écrêtement sont utilisés pour cultiver des cultures maraîchères (niébé, tomate, patate douce, manioc, calebasse).

Toute l'année, un cheptel important, souvent surveillé par des bergers salariés, exploite les parties non-cultivées de l'UTE.

2.6 L'érosion

Le manque d'une couverture herbale pérenne, la violence des précipitations, le caractère des sols et la surexploitation agricole ont provoqué une érosion excessive sur des parties importantes de l'UTE de Mehanna.

Un facteur de peu d'importance dans ce processus est l'érosion éolienne qui est causée par le vent. A vitesse faible, les particules limoneuses sont seules mises en suspension. Lorsque la vitesse du vent dépasse 10m/s, les sables fins sont à leur tour mis en mouvement. Les argiles et les sols humides sont suffisamment cohérents pour ne pas être érodés.

L'érosion hydraulique constitue le facteur le plus important. Cependant, son importance est extrêmement variable d'un point à un autre.

Les versants recouverts de pierrailles et les glacis recouverts d'une cuirasse conglomératique ferrugineuse ne souffrent pratiquement pas d'érosion. Aussi les terrasses limoneuses recouvertes d'un pavage graveleux sont peu érodées.

Cependant, les glacis limoneux ou argileux, qui ne sont pas recouverts par un épandage graveleux, souffrent d'une intense érosion ravinante en nappe.

A cause d'érosion digitale, les koris s'enfoncent et forment des ravines, qui, à la longue, risquent de rendre impossible l'épandage des eaux de crues. Cet enfoncement du lit de kori se traduit par une diminution de la rugosité du lit majeur, une accélération de la vitesse de circulation de l'eau et une augmentation des pointes de crue. Cela, à son tour, peut accélérer le processus d'érosion.

A la sortie de l'UTE de Mehanna, le kori principal s'est enfoncé de plus de 3 mètres dans le glacis, ce qui indique que le débordement de la rivière est pratiquement impossible.

A titre indicatif, nous avons présenté dans l'annexe 1 des mesures de pertes en terre effectuées dans les années soixante à Kountkouzout, 40 km à l'ouest de Keita. Les résultats montrent clairement que les vertisols et les sols argileux souffrent particulièrement de l'érosion.

On estime que l'Ader Doutchi a été sujet d'une érosion géologique moyenne de 2 ton/ha/an (Heuch). Dans la même étude on trouve les chiffres suivants, qui doivent être considérés comme des ordres de grandeur très approximatifs:

glacis argilo-limoneux:	érosion estimée à 10 ton/ha/an;
glacis et versants protégés par une cuirasse ferrugineuse conglomératique:	érosion estimée à 1 ton/ha/an.

2.7 Les réalisations CES/DRS par le Projet Intégré Keita

Depuis son début, le Projet Intégré Keita (PIK) a réalisé des nombreuses activités CES/DRS dans l'UTE de Mehanna. Le PIK a construit 3 barrages d'écrétement et a traité à peu près 125 ha avec banquettes. Les travaux de CES/DRS sont résumés dans le tableau 6 de façon chronologique.

Tableau 6: Travaux de CES/DRS réalisés par le PIK dans l'UTE de Mehanna.

Activité	Année de réalisation	surface traitée / superficie du bassin versant [ha]
Banquettes	1984/1985	9
Construction barrage Mehanna I	1987/1988	469
Rehaussement barrage Mehanna I	1991/1992	469
Construction barrage Mehanna II	1992 #	414
Construction barrage Mehanna III	1993 #	91
Banquettes	1993 #	117

= les travaux ont été finis avant la saison de pluie de l'année en considération.

Les figures 5, 6 et 7 montrent respectivement la situation des travaux de CES/DRS en fin 1991, 1992 et 1993. Comme déjà indiqué dans le tableau 6, aucun travail de CES/DRS n'a été exécuté à Mehanna après 1993.

Dans le texte ci-dessous, nous avons présenté une description concise des différents types de travaux CES/DRS réalisés dans l'UTE de Mehanna.

-1: Les banquettes de rétention: elles ont comme but la conservation des eaux de ruissellement en améliorant l'infiltration. Les banquettes sont constituées de levée de terre de 0.60 m, recouvertes de pierres, situées sur les glacis dont la pente est comprise entre 1 et 3 %. Des mesures effectuées à Allokoto ont montré qu'une parcelle traitée en banquettes voit le ruissellement divisé par 20 et la perte en terre divisée par 15, par rapport à la parcelle voisine non-traitée.

Quant aux événements exceptionnels, les mesures faites à Kountkouzout dans les années soixante ont montré que le volume ruisselé maximum, période de retour 10 ans, est de l'ordre de 60 mm sur argiles et de 30 mm sur des sols limoneux-argileux (voir l'annexe 1). Les mesures effectuées à Allokoto ont montré que l'on peut espérer intercepter environ 40 mm de cette lame ruisselée.

-2: Le barrage d'écrêtage: des petits barrages collinaires situés en tête des bassins versants abrupts et rocheux sur lesquels aucun traitement des versants n'est possible, mais qui représentent la partie la plus active génératrice des crues. Le rôle de ces barrages est d'emmagasiner la pointe des crues et de relâcher progressivement une partie importante du volume stocké. Comme les importants transports solides combleront progressivement ce type de retenue et diminueront ainsi le volume du stockage permanent d'eau, ceci n'est pas considéré comme le but principal de ce barrage.

Contrairement aux barrages Mehanna 1 et 3, Mehanna 2 est équipé d'une sortie de drainage à 1 m au-dessous du niveau du déversoir. Cette sortie ayant la forme d'un demi cercle, l'écoulement augmente exponentiellement avec la montée du niveau d'eau. Elle a le but de vider partiellement la retenue et de faciliter ainsi le stockage de la plupart des crues sans provoquer l'utilisation du déversoir, généralement considéré comme la partie la plus faible du barrage d'écrêtage. De cette façon l'entretien du déversoir peut être minimisé et la durée de la vie du barrage peut être garantie.

Egalement sont construits dans le barrage Mehanna 2 quelques égouts afin de vider très doucement la retenue et ainsi d'alimenter l'eau souterraine.

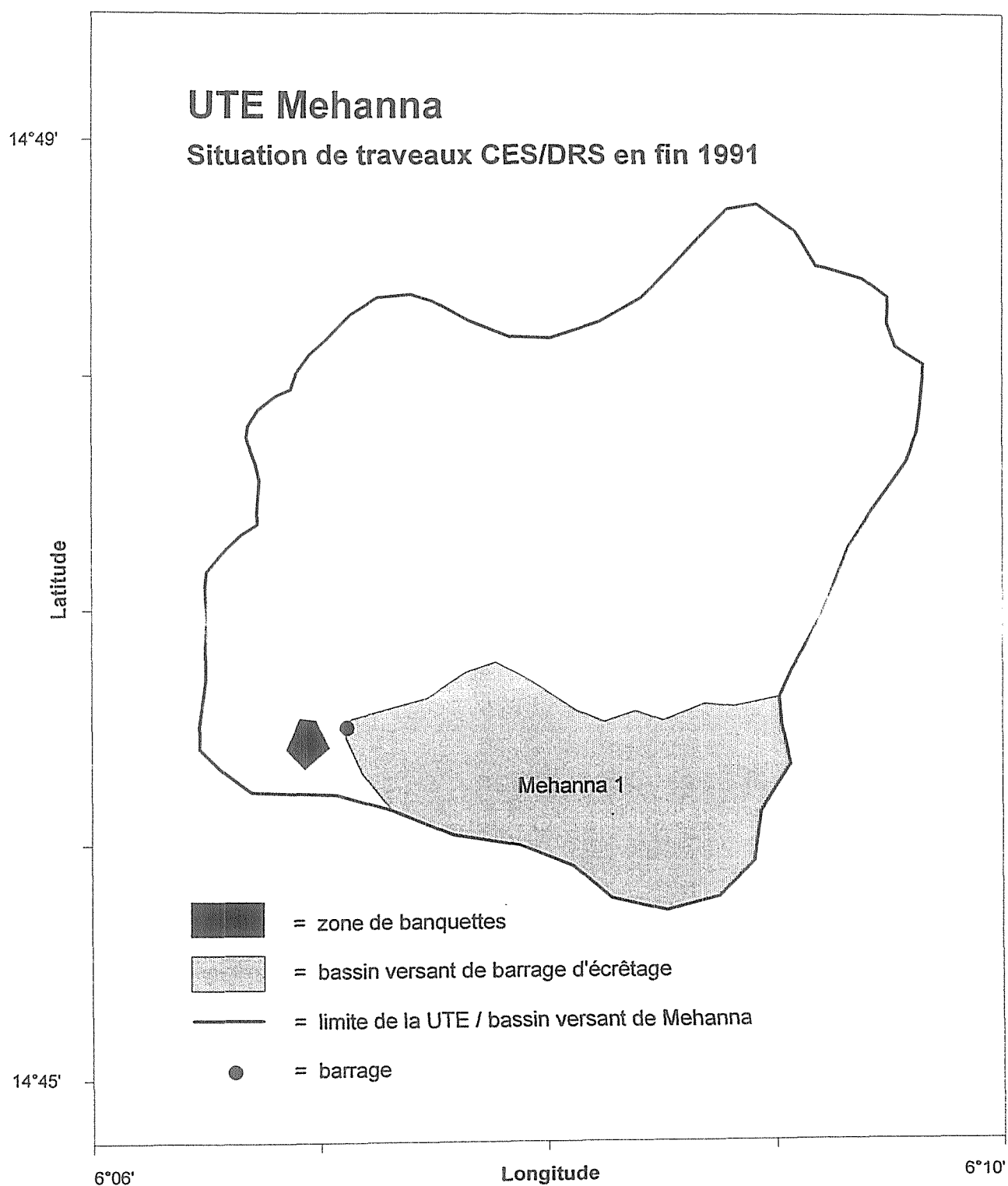


Figure 5: La situation de travaux de CES/DRS en fin 1991.

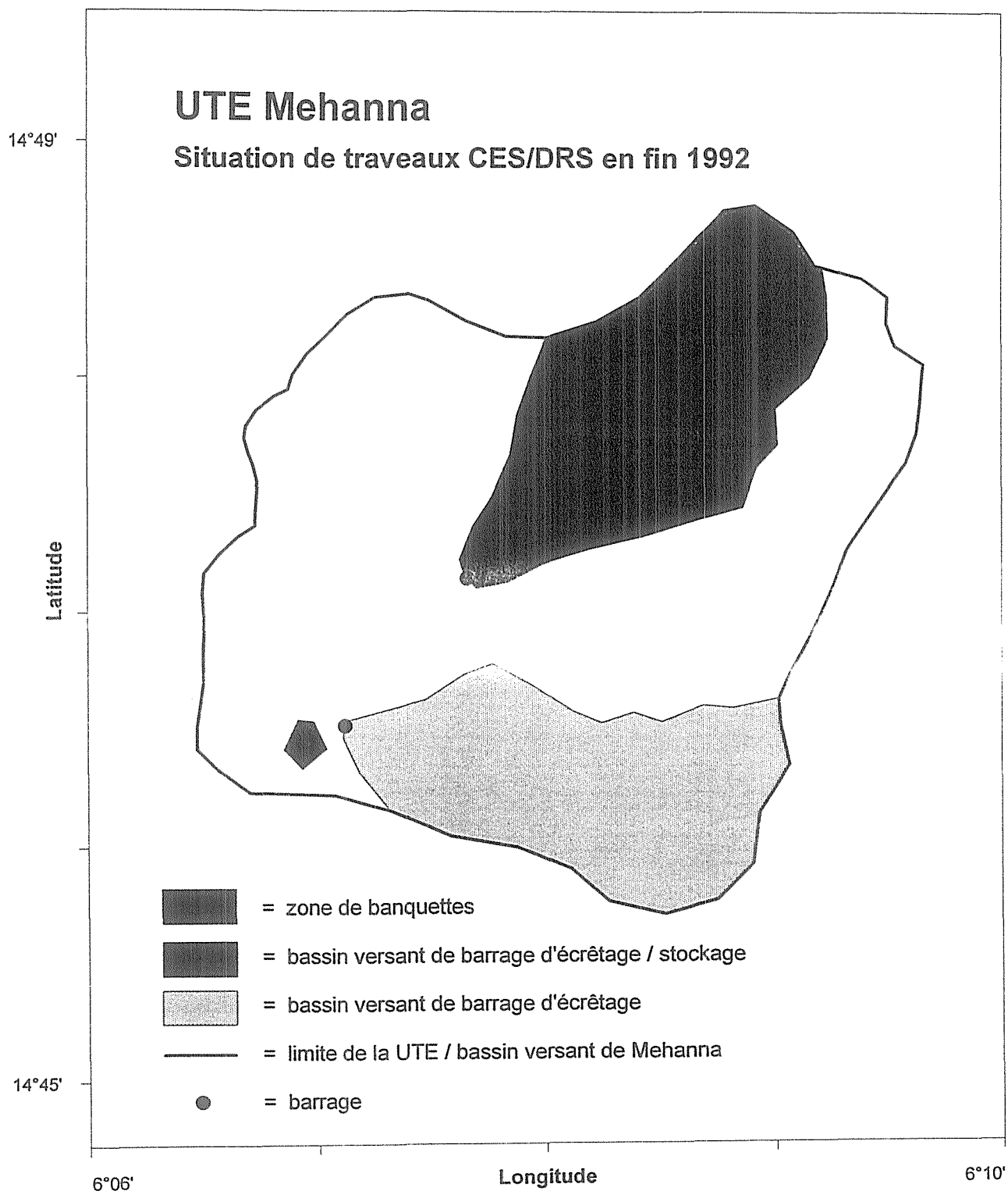


Figure 6: La situation de travaux de CES/DRS en fin 1992.

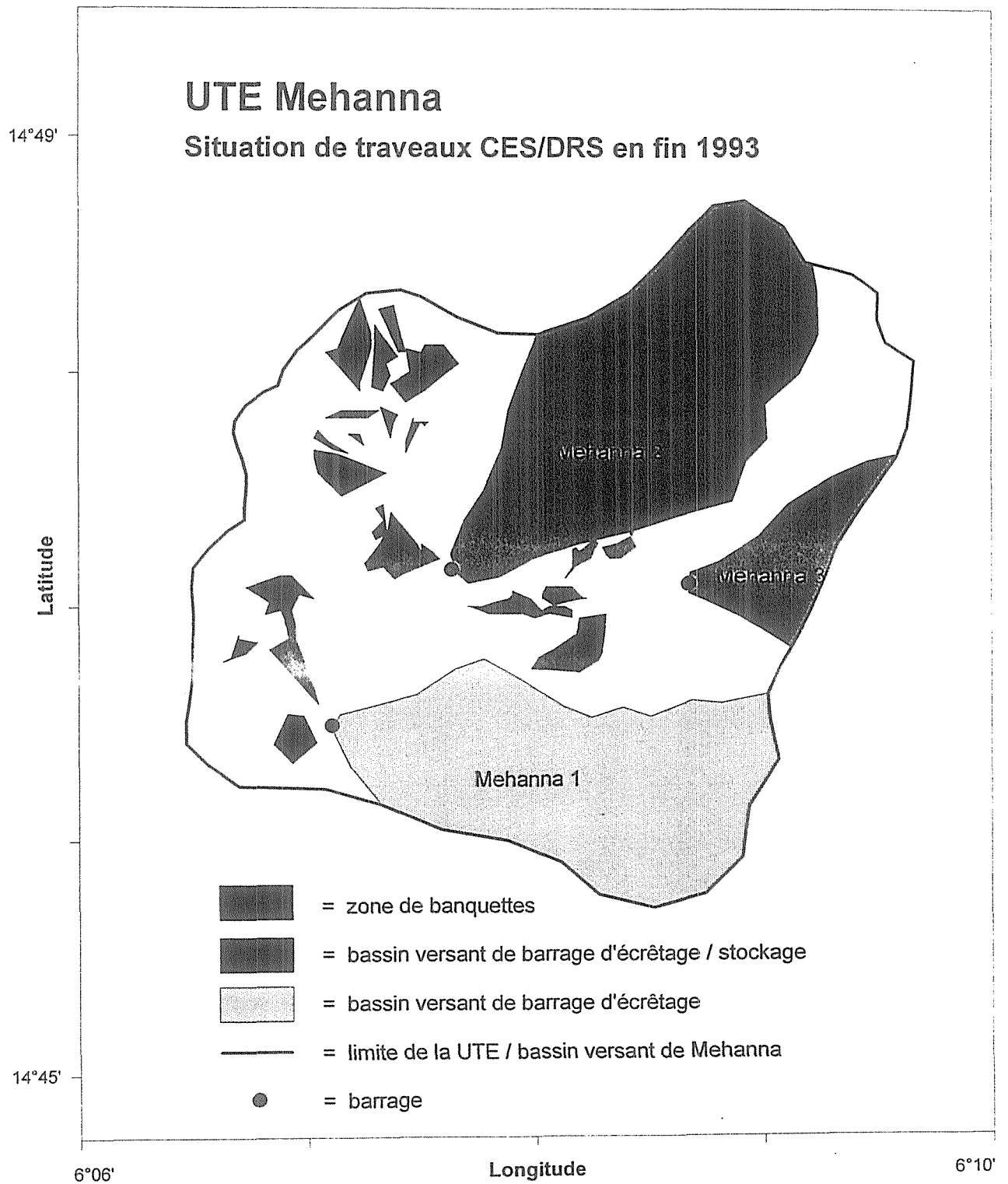


Figure 7: La situation des travaux de CES/DRS en fin 1993.

3. La disposition hydrométrique et le relevé des données hydrométriques disponibles

Depuis 1990, le Projet Intégré Keita a installé un réseau hydrométrique composé de quelques pluviomètres, d'une pluviographe et d'une échelle limnimétrique, dans l'UTE de Mehanna. Cependant, ce réseau n'a pas été constant. Notamment la localisation des pluviomètres a fait l'objet de plusieurs changements depuis la période de mesure. La figure 8 montre le dispositif hydrométrique et le tableau 7 présente un relevé des données pluviométriques disponibles.

Tableau 7: Relevé des dispositions pluviométriques des années 1990 au 1995.

Nom de la station	Longitude	Latitude	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Waddey Périmètre	6.06.17	14.45.47	*	*	*	*	*	*
Waddey Magasin	6.07.14	14.45.16		*				
Mehanna Station	6.06.35	14.46.14				*	*	*
Mehanna Barrage 1	6.07.06	14.46.32			*	*		
Mehanna Barrage 2	6.07.33	14.47.16					*	*
Mehanna 4	6.08.01	14.47.00						*
Mehanna 5	6.08.00	14.47.46						*

La station limnimétrique comprend une échelle limnimétrique dont les mesures ont été effectuées toutes les cinq minutes par un observateur pendant chaque crue.

Le niveau d'eau ainsi obtenu peut être transformé au débit en utilisant la courbe de tarage.

La courbe de tarage du kori principal de Mehanna au niveau de la station hydrométrique est déterminé dans le mémo no. 10 intitulé: La détermination des courbes de tarage de plusieurs stations hydrométriques dans l'Arrondissement de Keita (Hilhorst, PIK, le 5 octobre 1995). Cette courbe est déterminée en utilisant la méthode 'area - slope' qui est basée sur le principe de l'écoulement uniforme et comprend les étapes suivantes:

- 1: faire un levé topographique de la section considérée: on peut ainsi avoir la relation entre la surface d'écoulement et la hauteur d'eau;
- 2: utiliser des formules semi-empiriques (Manning): calculer ainsi la vitesse moyenne d'écoulement en fonction du niveau d'eau, et
- 3: pour l'intervalle 0 - niveau d'eau maximum: calculer le débit en multipliant la surface d'écoulement par la vitesse moyenne.

Le problème épineux de la méthode 'area - slope' concerne la détermination du coefficient de résistance utilisé dans les formules semi-empiriques comme celles de Manning. Comme à Mehanna nous ne disposons pas des mesures de ce coefficient

effectuées au lieu d'action, nous sommes amenés à utiliser des méthodes théoriques pour sa détermination ce qui peut constituer une source possible d'erreurs.

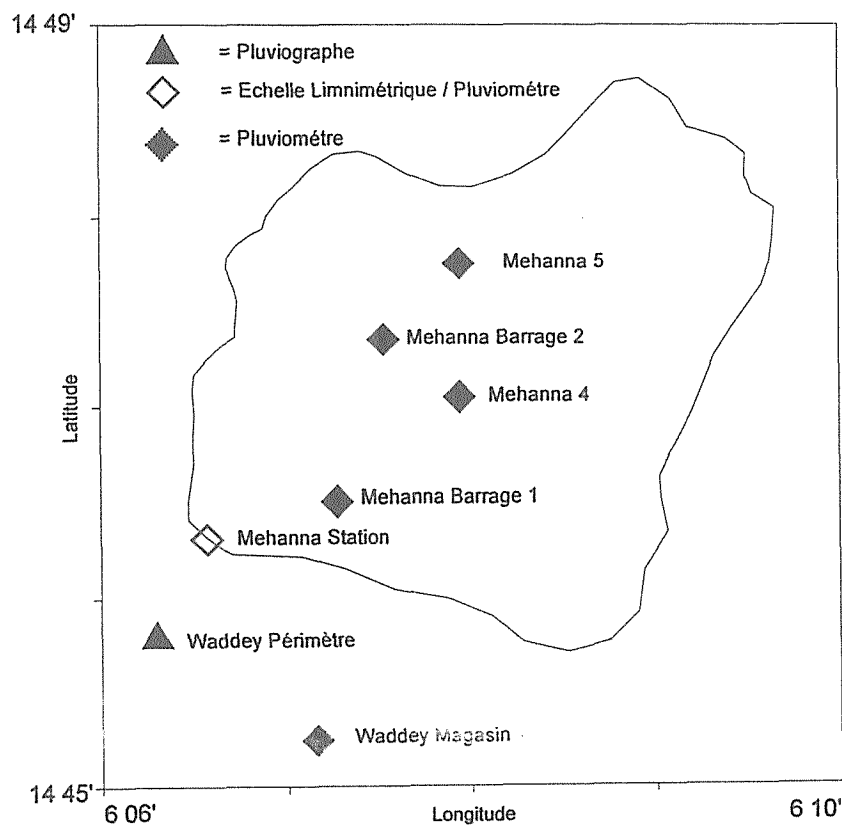


Figure 8: La disposition hydrométrique dans l'UTE de Mehanna.

4. La méthode de travail

Avant de présenter la méthode de travail, nous avons résumé les impacts envisagés des travaux de CES/DRS sur le régime hydrologique:

- 1: Réduction de ruissellement suite à une plus grande infiltration sur les versants;
- 2: Modification de l'hydrogramme unitaire: l'hydrogramme sera plus aplati et plus long;
- 3: Augmentation de la recharge des aquifères alluviaux.

Les objectifs ci-dessus, nous ont amené à la méthode de travail suivante:

- 1: évaluer le coefficient de ruissellement en fonction des traitements de CES/DRS réalisés, en comparant la relation entre la pluviométrie et le coefficient de ruissellement pour des périodes homogènes du point de vue des travaux de CES/DRS;
- 2 analyser l'évaluation du débit de pointe en fonction des traitements de CES/DRS réalisés, en comparant la relation entre la pluviométrie et le débit de pointe pour des périodes homogènes du point de vue des travaux de CES/DRS;
- 3: analyser l'évaluation du changement de l'hydrogramme unitaire en fonction des traitements de CES/DRS réalisés, en comparant les différents hydrogrammes unitaires des périodes homogènes du point de vue des travaux de CES/DRS;
- 4: évaluer le changement du lit du kori principale de l'UTE de Mehanna en fonction des traitements de CES/DRS réalisés, en comparant les levés topographiques du profil en travers du lit du kori au niveau de la station limnimétrique pour des périodes homogènes du point de vue des travaux de CES/DRS.

A cause de la non-existence d'une aquifère alluviale à Mehanna, il n'a pas été possible d'y analyser les impacts des travaux de CES/DRS sur la recharge de la nappe.

Comme les points no 1 et 2 concernent tous les deux le même phénomène, c'est-à-dire, la réduction de ruissellement suite à une plus grande infiltration sur les versants, ces points ont été traité ensemble dans le chapitre 5.

En fonction des travaux de CES/DRS réalisés, nous avons subdivisé la période pour laquelle nous disposons des mesures hydrométriques (1990 à 1995) comme suit:

- 1: avant 1992;
- 2: 1992;
- 3: 1993 - 1995.

Cependant, l'année 1994 a enregistré une pluviométrie exceptionnelle, avec un temps de répétition de 25 années à Keïta et nous avons jugé incorrect de la prendre en compte avec 1993 et 1995. Nous avons donc ajouté une période, pour l'analyse envisagée, en subdivisant l'ensemble des données disponibles comme suit:

- 1: avant 1992;
- 2: 1992;
- 3: 1993 + 1995;
- 4: 1994.

5. L'analyse du coefficient de ruissellement et du débit de pointe

5.1 Les données

Dans l'annexe B nous avons présenté par événement d'écoulement la pluviométrie, les différentes caractéristiques de la crue, le débit de pointe et le coefficient de ruissellement. La pluviométrie moyenne sur l'UTE est calculée en utilisant les coefficients de Thiessen présentés dans le tableau 8. Par année, même par pluie, les valeurs de ces coefficients varient en fonction du réseau pluviométrique. Le tableau 8 présente les coefficients de Thiessen pour toutes les combinaisons possibles.

Tableau 8: Les coefficients de Thiessen en fonction du réseau pluviométrique.

Station	Coefficient de Thiessen pour les différentes combinaisons de pluviomètres							
MSTAT	1,00	0,03	0,12	0,03	0,03	0,12	0,12	0,12
MBAR 1	-	0,97	-	0,19	0,17	-	-	-
MBAR 2	-	-	0,88	0,78	0,17	0,22	0,31	0,49
MEH 4	-	-	-	-	0,27	0,28	-	0,39
MEH 5	-	-	-	-	0,36	0,38	0,57	-
total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

5.2 Le contrôle des données hydrométriques disponibles

Généralement, nous avons assez confiance dans les mesures du niveau d'eau des crues au niveau de la station hydrométrique. La transformation des hauteurs d'eau en débits est une source d'erreurs possibles, car nous ne disposons pas de la valeur exacte du coefficient de résistance. Cependant, cette erreur serait la même pour toutes les mesures de débit disponibles et elle n'influence donc pas les résultats de la comparaison des différents paramètres hydrologiques pour les périodes homogènes du point de vue des travaux de CES/DRS.

Par contre, une erreur dans la mesure de la pluviométrie aura une conséquence directe et individuelle sur le coefficient de ruissellement et la relation entre le débit de pointe et la pluviométrie. La pluviométrie dans la zone (semi) aride est caractérisée par des averses intensives de courte durée avec une distribution spatiale et temporelle énorme. Cela implique que seul un réseau pluviométrique assez dense peut permettre une estimation satisfaisante de la pluie tombée. Pour les années dont nous ne disposons que d'un ou de deux pluviomètres dans l'UTE de Mehanna, on ne peut donc pas avoir assez confiance dans la mesure exacte de la pluviométrie. Spécialement pour les pluies inférieures à 10 mm, une erreur de quelques millimètres pourrait avoir une influence profonde sur les

résultats de l'analyse. C'est pour cette raison que nous avons omis les événements pluvieux inférieur à 10 mm.

Avant de commencer l'analyse, il est nécessaire d'effectuer un contrôle des données hydrométriques disponibles en utilisant des critères basés sur des expériences hydrologiques connues. C'est-à-dire:

- une pluviométrie très haute ne peut pas entraîner un coefficient de ruissellement très bas et vice versa;
- une pluviométrie très haute ne peut pas entraîner un débit de pointe très bas et vice versa.

Le tableau 9 montre les événements d'écoulement omis des analyses en utilisant les critères ci-dessus.

Tableau 9: Les événements d'écoulement omis des analyses du coefficient de ruissellement et du débit de pointe.

Date	Caractéristique	Commentaire
30 jul '90	P = 12,7 [mm] et Q max = 36,7 [m3/s]	Q max très élevé: improbable
4 jul '91	P = 15,2 [mm] et CR = 79,0 [%]	CR très élevé: très improbable
25 jul '91	P = 102,0 [mm] et Q max = 60,0 [m3/s]	Q max trop bas: très improbable
14 aug '91	P = 136,0 [mm] et CR = 27,8 [%]	CR très bas: très improbable
30 jun '92	P = 16,9 [mm] et CR = 52,1 [%]	CR élevé: improbable
27 jul '92	CR > 100 [%]	physiquement impossible
11 sep '92	P = 10,1 [mm] et CR = 49,9 [%]	CR très élevé: très improbable
23 jul '93	P = 11,4 [mm] et CR = 70,9 [%]	CR très élevé: très improbable
27 jul '93	P = 11,1 [mm] et CR = 61,4 [%]	CR très élevé: très improbable
28 jun '94	P = 23,4 [mm] et Q max = 5,0 [m3/s]	Q max très bas: très improbable
26 jul '94	P = 21,0 [mm] et CR = 58,0 [%]	CR élevé: improbable
26 jun '95	P = 11,9 [mm] et CR = 64,5 [%]	CR très élevé: très improbable

5.3 L'analyse d'évaluation du coefficient de ruissellement en fonction des travaux de CES/DRS exécutés par le PIK

Dans la zone (semi) aride on peut généralement présumer que le ruissellement n'est pas influencé par la pluviométrie précédente. Cela est dû à la période généralement assez longue entre deux événements pluvieux ce qui permet au sol de sécher et de regagner sa capacité d'infiltration originelle. Naturellement, en cas de pluies très proches l'une à de l'autre, cette supposition n'est plus valable et l'histoire du régime pluvieux doit être prise en considération. Le moment spécifique de la pluie dans la saison a aussi une certaine influence sur le ruissellement. La première pluie de la saison trouve une terre nue, sans aucune couverture herbale pour casser l'énergie cinétique de la goutte de pluie et pour faciliter une capacité d'emmagasinement supplémentaire.

Cependant, malgré les considérations ci-dessus, nous avons évalué l'impact des travaux de CES/DRS sur le ruissellement en effectuant une analyse de régression linéaire entre la pluviométrie et le coefficient de ruissellement pour les quatre périodes définies dans le chapitre 4.

Les figures 9 à 12 expriment, par période, le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie. Ces figures montrent clairement qu'il n'y a pas de corrélation entre ces deux variables, sauf pour le cas de 1992. Ceci est également indiqué par les coefficients de corrélation présentés dans le tableau 10.

Tableau 10: Coefficients de corrélation obtenus dans l'analyse de la relation entre la pluviométrie et le coefficient de ruissellement.

Période	Coefficient de corrélation	nombre des paires de données
1990 + 1991	0,19	6
1992	0,95	7
1993 + 1995	0,42	8
1994	0,16	10

L'année 1992 constitue un cas spécial. Contrairement aux autres périodes, nous avons trouvé une forte corrélation entre la pluviométrie et le ruissellement. La relation entre ces deux variables est représentée par la formule suivante:

$$CR = -6,90 + 1,31 * P$$

dans laquelle:

CR = coefficient de ruissellement [%];

P = pluviométrie [mm].

Cependant, cette droite a une pente extraordinairement forte, qui implique qu'une pluie de 81,6 mm entraîne déjà un coefficient de ruissellement de 100 %. Cela est très improbable, surtout pour un bassin versant de 20,28 km², et nous avons des doutes sérieux sur la validité de la relation trouvée. Il doit également être noté que l'année 1992 est caractérisée par des événements pluviométriques assez faibles, tous inférieurs à 60 mm. La corrélation trouvée en 1992 est donc considérée comme un hasard. La relation trouvée n'est donc pas valable.

Une analyse analogue de régression multiple, prenant en considération la pluviométrie précédente, ne pas présentée ici, n'a pas donné un résultat amélioré.

Donc, étant donné l'absence d'une corrélation directe trouvée entre la pluviométrie et le coefficient de ruissellement, il n'est pas possible d'analyser ainsi l'évaluation de ruissellement en fonction des travaux de CES/DRS.

A titre indicatif, nous avons présenté dans l'annexe C les coefficients de ruissellement mensuels de l'UTE de Mehanna pour les années 1993 à 1995. Malheureusement, les données de 1990 à 1992 ne sont pas assez complètes pour calculer ledit coefficient. L'évaluation du coefficient de ruissellement mensuel n'a pas été possible à cause de l'absence d'une série de données assez longue.

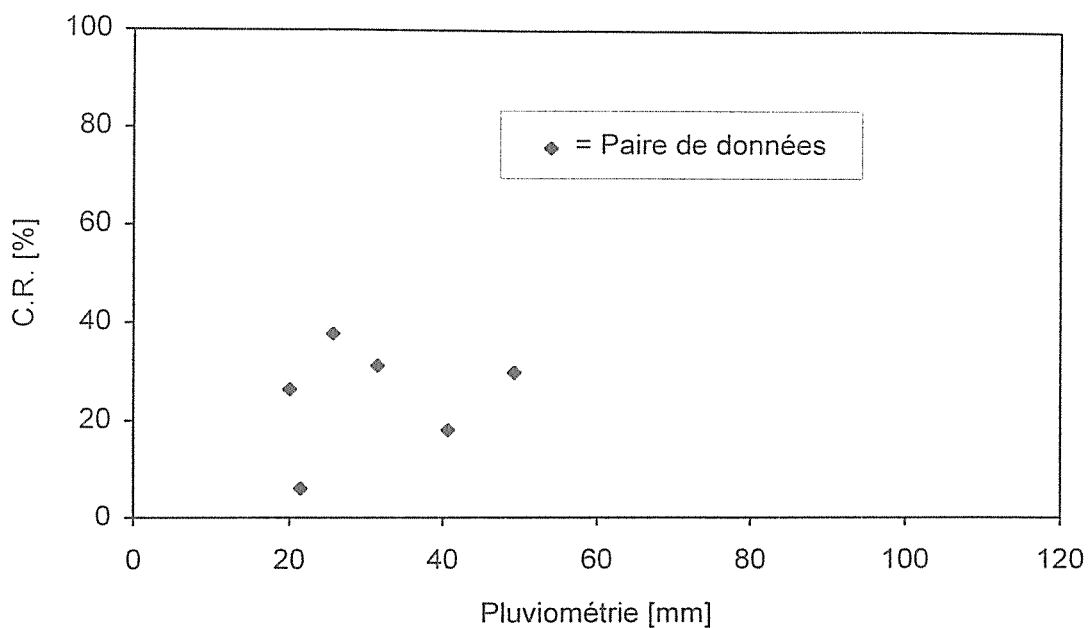


Figure 9: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour l'année 1990 et 1991.

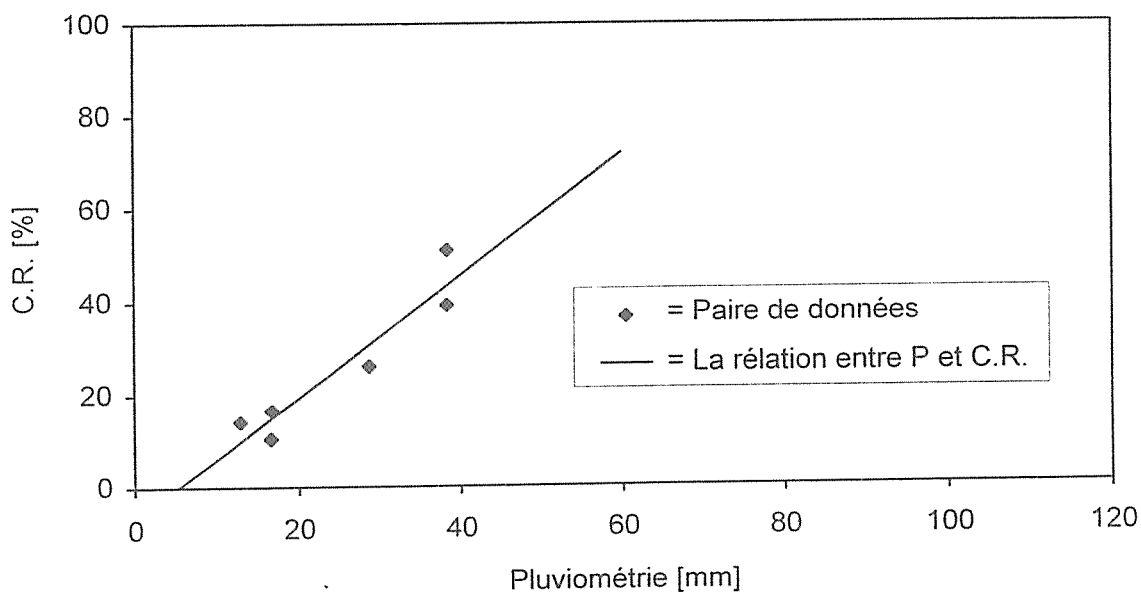


Figure 10: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour 1992.

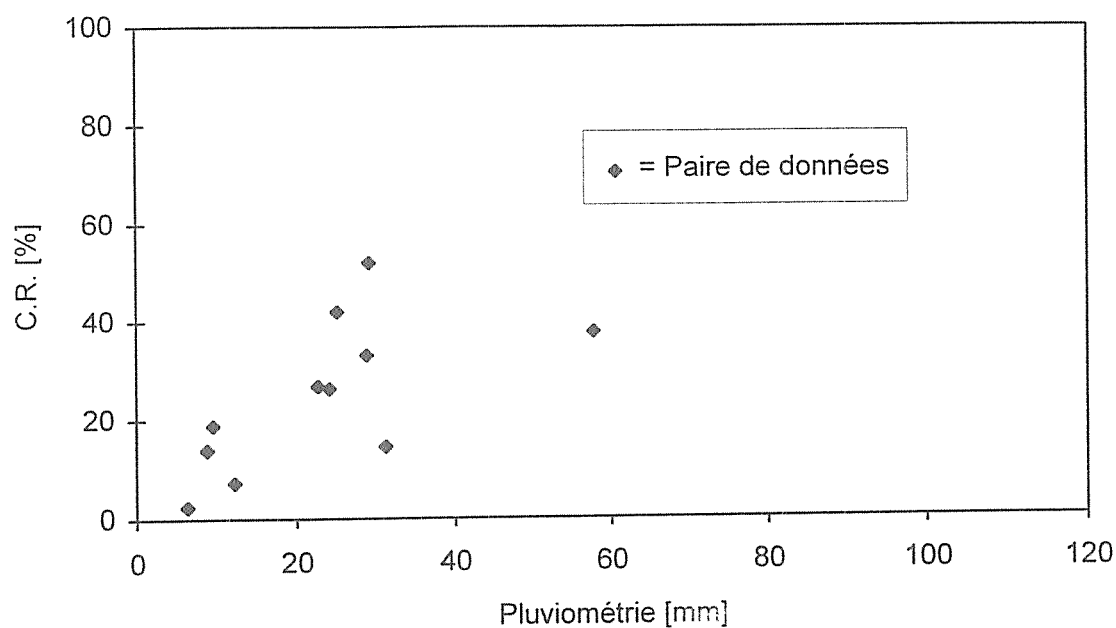


Figure 11: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour l'année 1993 et 1995.

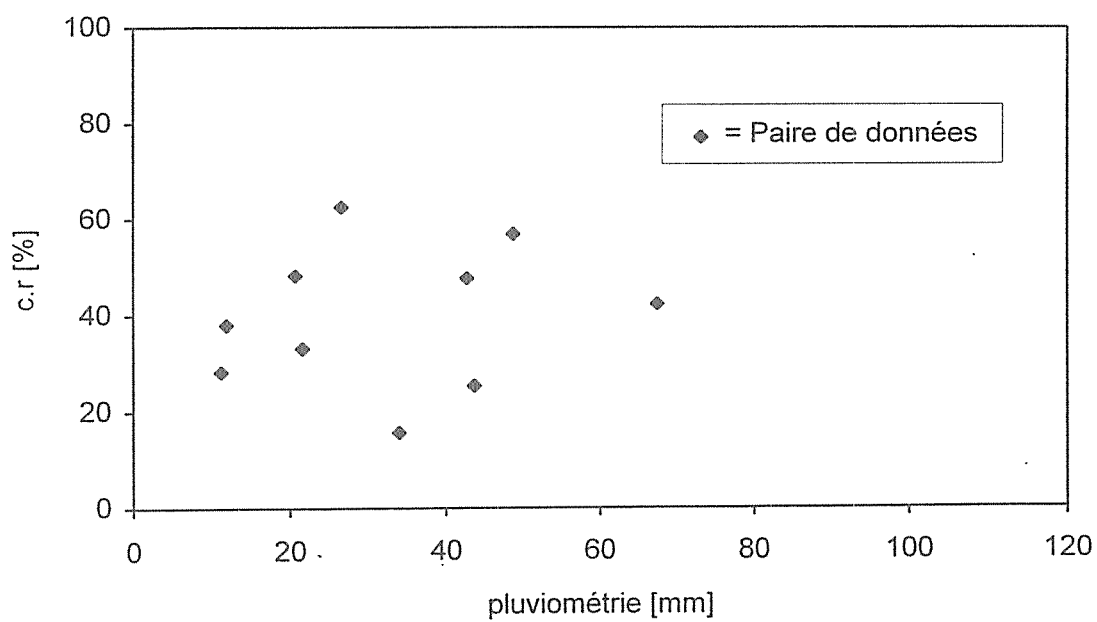


Figure 12: Le coefficient de ruissellement tracé contre la pluviométrie pour 1994.

5.4 L'analyse de l'évaluation du débit de pointe en fonction des travaux de CES/DRS exécutés par le PIK

Egalement comme le coefficient de ruissellement, le débit de pointe est une mesure pour le ruissellement d'un bassin versant et est ainsi influencé par les travaux de CES/DRS. Il est attendu que le débit de pointe diminuera avec l'augmentation de la superficie traitée avec des travaux de CRS/DRS.

Comme dans le paragraphe précédent, nous avons fait l'analyse de régression linéaire, supposant que dans la zone (semi) aride le débit de pointe a surtout une relation directe avec la pluviométrie actuelle et moins avec celle de la période précédente.

Les figures 13 à 16 expriment, par période, le débit de pointe en fonction de la pluviométrie. Ces figures montrent clairement qu'il y a une corrélation entre ces deux variables. Ceci est également indiqué par les coefficients de corrélation présentés dans le tableau 11.

On trouve aussi dans ce tableau les coefficients a et b de l'équation représentant la relation entre le débit de pointe et la pluviométrie, de la forme suivante:

$$Q_{\max} = a + b * P$$

dans laquelle:

$Q_{\max}$ = le débit de pointe [m³/s];

P = la pluviométrie [mm].

Tableau 11: Caractéristiques de la relation entre le débit de pointe et la pluviométrie par période.

Période	Coefficient de corrélation	a (intercept)	b (pente)	nombre des paires de données
1990 + 1991	0,93	-12,2	1,47	6
1992	0,98	-8,64	1,41	7
1993 + 1995	0,90	1,51 -9,20	0,83 1,10	8
1994	0,83	4,10 -12,20	1,22 1,53	10

Les années 1990, 1991 et 1992 montrent une corrélation forte entre le débit de pointe et la pluviométrie. En 1993 et 1995 elle est assez satisfaisante. Par contre, en 1994 la corrélation est modérée. Cela est probablement dû au fait que, vue la pluviosité exceptionnelle de cette année, la pluviométrie précédente a eu une certaine influence sur le ruissellement, contrairement à la situation normalement rencontrée dans la zone (semi) aride.

Pour les périodes 1993 + 1995 et 1994, nous avons présenté deux valeurs des variables a et b. Les premières valeurs sont celles trouvées en faisant l'analyse de régression. Elle représentent le 'best fit'. Cependant, ces lignes impliquent qu'une pluviométrie équivalente à zéro entraîne déjà un ruissellement, ce que n'est physiquement pas possible. Nous avons supposé que, vue l'importance de la partie non-traitée du bassin versant, la hauteur de la pluviométrie nécessaire pour

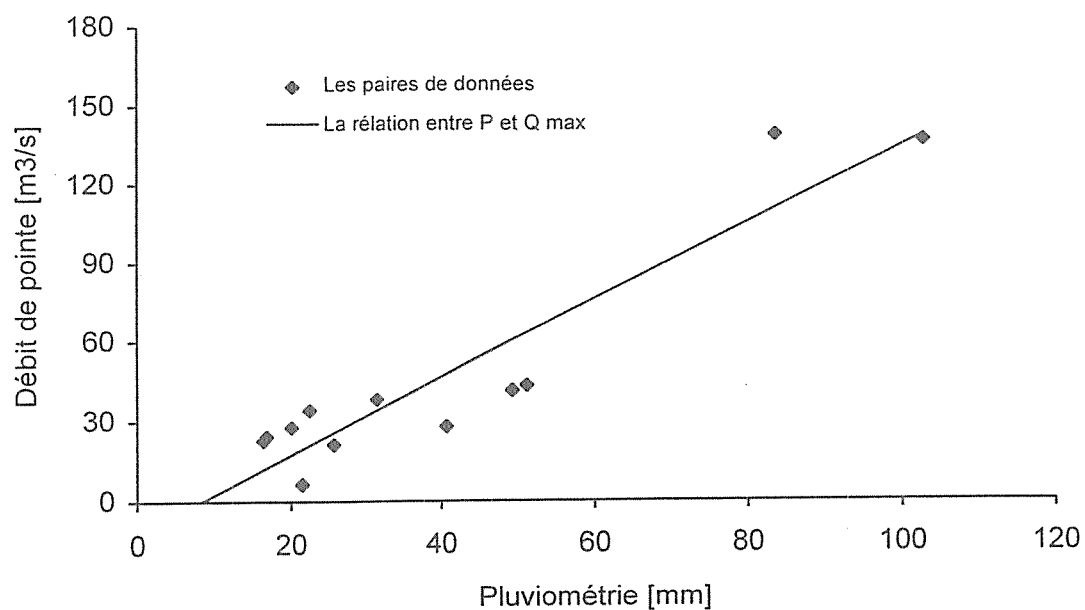


Figure 13: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour 1990 et 1991.

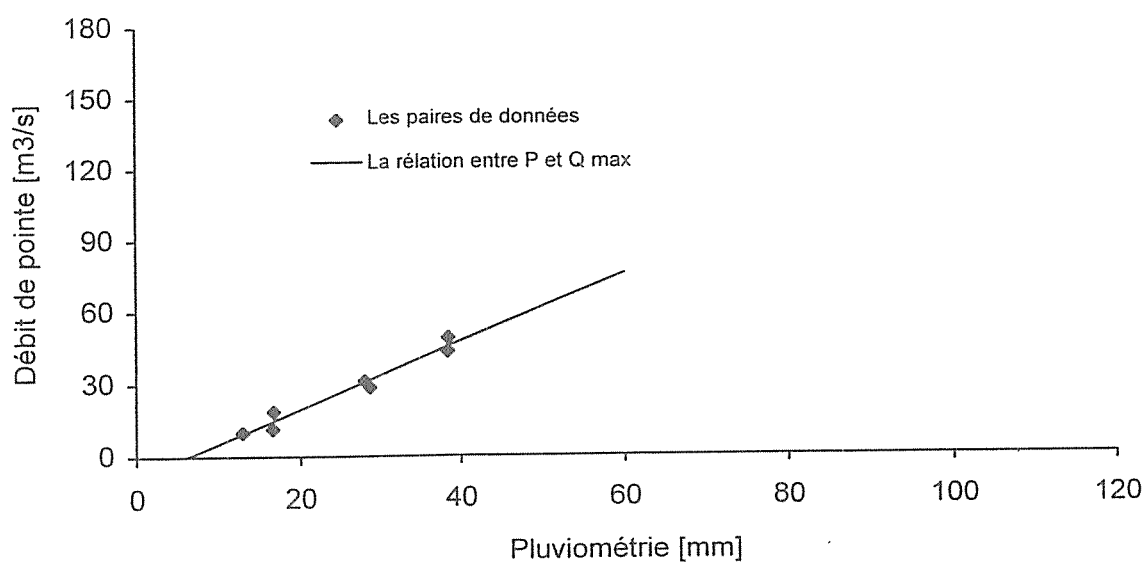


Figure 14: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour la période 1992.

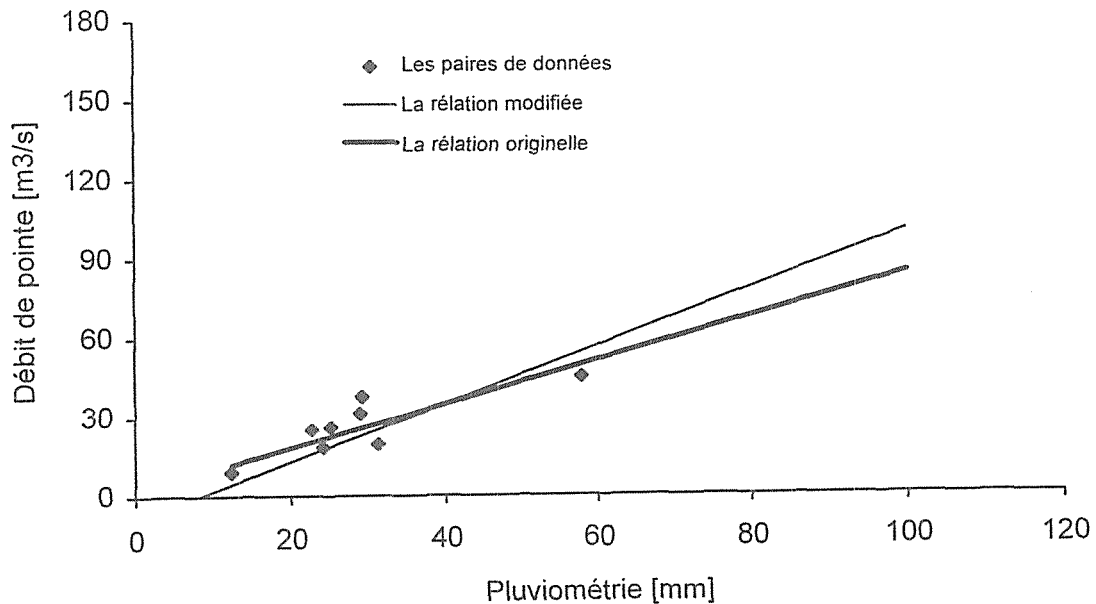


Figure 15: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour 1993 et 1995.

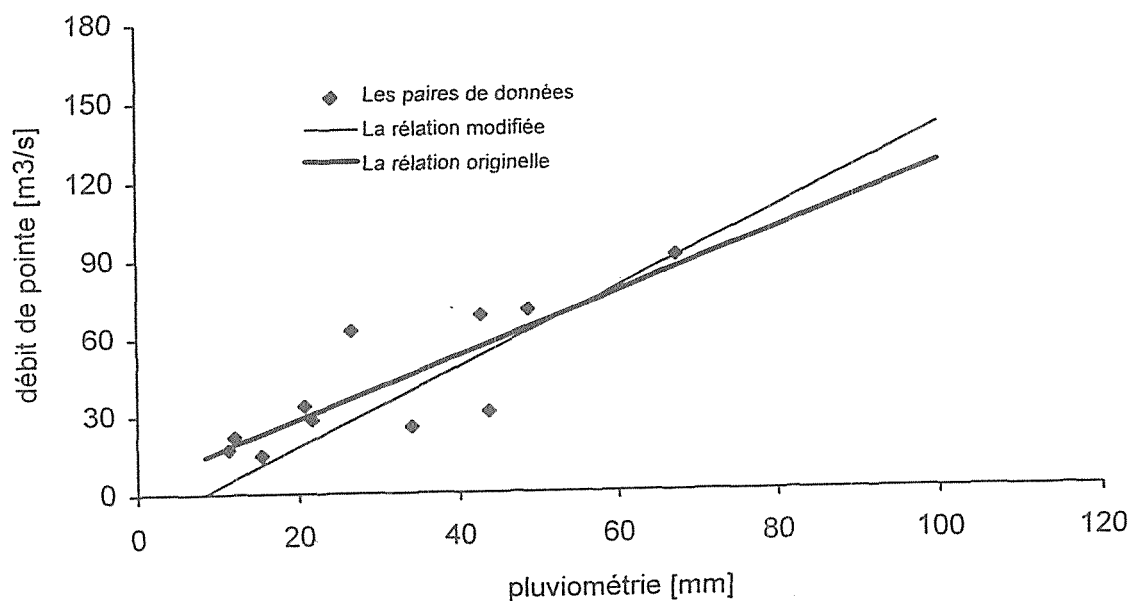


Figure 16: Le débit de pointe tracé contre la pluviométrie pour la période 1994.

provoquer l'écoulement n'a pas changé entre 1990 et 1995. Donc, en présumant que la droite de 1990/1991 représente la situation initiale, les droites exprimant la relation entre la pluviométrie et le débit de point sont obligées de commencer par le point ($P = 8,3$ [mm], $Q_{\max} = 0$ [m³/s]). Cette situation est attendue en utilisant les secondes valeurs de a et b.

Cependant, surtout pour la période 1994, cette modification a une influence profonde sur la droite obtenue. La pente a eu une augmentation de 25 % dans la nouvelle situation et la droite ainsi trouvée ne colle plus avec les paires de données de 1994. Bien ne soit que la droite initialement obtenue par la régression linéaire n'est physiquement pas possible pour les valeurs pluviométriques basses, nous supposons que cette droite, surtout pour les fortes valeurs, représente la relation entre la pluviométrie et le débit de pointe pour la période 1994.

La figure 17 présente les quatre droites pour les quatre périodes représentant une étape spécifique dans le processus d'aménagement de l'UTE de Mehanna.

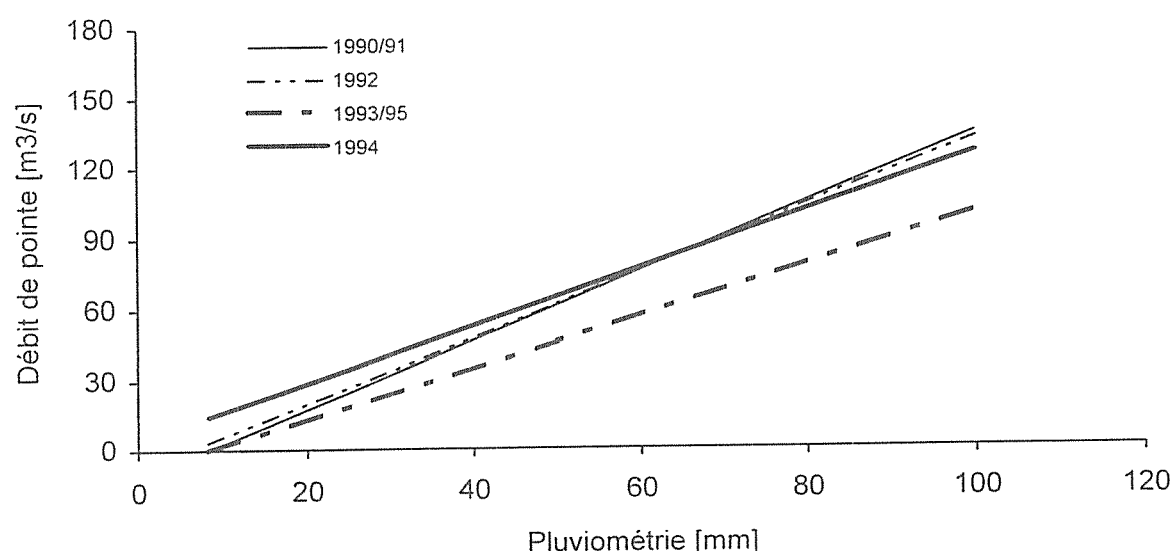


Figure 17: Relation entre la pluviométrie et le débit de pointe pour les quatre périodes représentant les étapes spécifiques de l'aménagement de l'UTE de Mehanna

Cette figure montre que, entre 1990 et 1992, la relation entre la pluviométrie et le débit de pointe n'a pas été sujette à un changement. Ceci est quelque peu étonnant vu les travaux de CES/DRS extensifs réalisés pendant cette période (le barrage Mehanna 2).

Par contre, ne prenant pas en considération l'année exceptionnellement pluvieuse de 1994, la relation en question a changé substantiellement entre 1992 et la période 1993 + 1995. La pente a diminué d'environ 30 %, ce qu'implique une modification assez importante du régime hydrologique.

Reste la nécessité d'incorporer dans cette conclusion l'année 1994. Comme déjà discuté plusieurs fois dans ce chapitre, nous avons l'impression que, à cause de la pluviosité

substantiellement plus haute que la moyenne, l'année 1994 ne satisfait plus aux critères des zones arides et la pluviométrie précédente doit être mise en considération en analysant la relation entre le débit de pointe et la pluviométrie. C'est-à-dire que plus souvent que la normale, la période entre deux événements pluvieux a été assez courte et le sol n'a pas eu l'occasion de sécher complètement et de regagner sa capacité d'infiltration initiale, ce qu'a provoqué un ruissellement systématiquement au-dessus de la normale. Cependant, une analyse de régression multiple, incorporant la pluviométrie précédente, n'a pas donné de résultat.

En résumant, on peut conclure que les travaux de CES/DRS réalisés ont un impact assez substantiel sur le débit de pointe, qui est diminué d'environ 30 % par rapport à la situation initiale.

6. L'analyse de l'hydrogramme unitaire

6.1 Le principe de l'hydrogramme unitaire

La méthode de l'hydrogramme unitaire fait partie du groupe de modèles 'précipitation - ruissellement'. Il s'agit d'une méthode déterministe qui est basée sur le principe d'emménagement. En fait, l'hydrogramme unitaire est une représentation simplifiée de la réponse d'un bassin versant à une précipitation donnée. Cette approche est valable pour des bassins versants qui ne dépassent pas l'ordre de grandeur de 100 km². Sa théorie se base sur l'hypothèse que l'on peut considérer le bassin versant comme un système linéaire, c'est à dire:

- 1: si Q1 est la réponse d'un bassin versant à une précipitation P1 et Q2 est la réponse à une précipitation P2, alors la réponse à une précipitation P1+P2 sera Q1+Q2 (principe de superposition);
- 2: si Q1 est la réponse d'un bassin versant à une précipitation P1, alors la réponse à une précipitation a.P1 sera a.Q1 (principe de proportionnalité).

L'hydrogramme unitaire d'un bassin versant est sa "signature hydrologique", sa manière de répondre à une précipitation. Il englobe l'ensemble des paramètres du bassin comme la topographie et le type de sol. Même le patron pluviométrique prédominant est ainsi incorporé. En dehors de tout changement de l'un ou de plusieurs de ces paramètres, l'hydrogramme unitaire ne change pas d'une précipitation à l'autre. Par contre, si un ou plusieurs des paramètres du bassin versant est modifié, la forme de l'hydrogramme unitaire est en affectée.

La méthode de l'hydrogramme unitaire représente donc un outil idéal pour évaluer les changements du régime hydrologique en fonction des aménagements. En effet, en comparant l'hydrogramme unitaire de l'UTE de Mehanna avant et après des aménagements, on peut qualifier l'impact de ceux-ci sur la forme de l'hydrogramme.

Cependant, l'hydrogramme unitaire ne permet pas de mesurer une variation du bilan hydrologique du bassin puisqu'il ne s'intéresse qu'à la part de la pluie qui s'écoule, sans chercher à expliquer l'évaporation et l'infiltration.

Nous avons utilisé l'hydrogramme unitaire de Nash que l'on définit par la formule suivante:

$$q(0,t) = \frac{d}{k} * \frac{1}{(n-1)!} * \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} * e^{-\frac{t}{k}}$$

dans laquelle:

- q(0,t) = écoulement au moment t suite à une précipitation au moment 0 [m/s];
- d = hauteur de la précipitation efficace au moment 0 [m];
- k = temps de retard (lag time) [s];
- n = nombre (fictif) de réservoirs de Nash [-].

La réponse d'un bassin versant à une pluviométrie d'unité (c'est à dire $d = 1$) est donc déterminée par les coefficients k et n .

Il doit être noté que $q(0,t)$ est l'écoulement d'une unité de superficie, au moment t , suite à une précipitation de la hauteur d au moment 0. Alors, l'écoulement à l'exutoire du bassin versant au moment t est obtenu en utilisant la formule suivante:

$$q(t) = A * \int_0^t q(0, t - \tau) * \frac{d(\tau)}{d_{\text{tot}}} * d\tau$$

dans laquelle:

$q(t)$	= écoulement à l'exutoire du bassin versant [m ³ /s];
A	= superficie du bassin versant [m ²];
$q(0,t-\tau)$	= écoulement d'une unité de superficie, au moment t , suite à une précipitation de la hauteur efficace $d(\tau)$ au moment τ [m/s];
$d(\tau)$	= précipitation efficace au moment τ [m];
d_{tot}	= précipitation efficace totale [m].

La précipitation efficace est la partie de l'averse qui part en ruissellement, donc, qui n'est pas emmagasinée ou évaporée au cours de la route du point de pluie à l'exutoire.

L'hydrogramme unitaire est obtenu à partir de relations pluie-débit enregistrées à l'exutoire du bassin versant. La méthode utilisée pour la détermination des coefficients n et k est présentée dans l'annexe D.

6.2 Les conditions pour la détermination de l'hydrogramme unitaire

Les événements d'écoulement ne sont pas tous appropriés pour être utilisés pour la détermination des coefficients n et k de l'hydrogramme unitaire. Ces événements doivent satisfaire aux conditions suivantes:

- 1: la disponibilité d'un pluviogramme complet et consistant;
- 2: la disponibilité de l'enregistrement d'écoulement complet et consistant;
- 3: l'événement doit être caractérisé par une pluviométrie homogène dans l'espace;
- 4: le coefficient de ruissellement et le débit de pointe obtenus doivent se trouver dans la gamme généralement rencontrée pour ce type d'événement pluvieux;
- 5: la pluviométrie doit supérieure à 20 mm: cette dernière condition est due à la disproportionnalité de l'influence de l'erreur de mesure des petites pluies, presque inévitable suite à la non-homogénéité de la pluviométrie généralement rencontrée dans les zones (semi) arides.

En appliquant les conditions définies ci-dessus, nous avons inventorié les crues appropriées pour la détermination de l'hydrogramme unitaire. Celles-ci sont présentées par année dans le texte ci-dessous. Pour plus amples informations sur les caractéristiques des crues, le lecteur est renvoyé à l'annexe B.

1990 Il n'y a pas une crue appropriée.

1991 Il n'y a pas une crue appropriée à cause du non-fonctionnement de la pluviographe pendant toute la saison pluvieuse.

- 1992 Seul la crue du 17 août satisfait complètement aux conditions. Cependant, afin de pouvoir contrôler les résultats de la détermination, nous avons aussi incorporé la crue du 27 août dans l'analyse.
- 1993 Les crues des 15 août, 17 août et 12 septembre satisfont aux conditions.
- 1994 Les crues des 15 et 23 juillet, 19 et 21 août satisfont aux conditions. Cependant, afin de pouvoir comparer le plus de crues possibles, celle du 26 juillet est aussi incorporée dans l'analyse, malgré le fait que cette crue ait un coefficient de ruissellement très fort.
La crue du 5 août est omise puisque la pluie est tombée dans deux parties, l'un à peu près 30 minutes de l'autre.
Nous avons considéré le coefficient de ruissellement de la crue du 1 septembre trop forte pour l'incorporer dans l'analyse alors que le CR de celle de 16 septembre est trop faible.
Pour l'averse du 11 septembre nous n'avons pas un pluviogramme complet.
- 1995: Les crues des 1 et 16 août satisfont aux conditions.

Les événements d'écoulement considérés appropriés pour la détermination des coefficients n et k de l'hydrogramme unitaire, sont indiqués par “++” dans la dernière colonne des tableaux présentant les caractéristiques des événements d'écoulement dans l'annexe B.

6.3 La détermination de l'hydrogramme unitaire

Par événement d'écoulement approprié, les coefficients n et k peuvent être déterminés en calculant les différents moments de l'hydrogramme et le pluviogramme. Cette méthode est présentée dans l'annexe D. Le pluviogramme comme l'hydrogramme ont été divisés en étapes de 5 minutes pour faciliter le calcul des différents moments.

Nous avons présumé que les 5 premiers mm de la pluie ne ruissellent pas. Cette partie est soit stockée dans différentes dépressions de terrain, soit elle s'infiltre tout de suite ou est interceptée. La partie qui reste est la pluviométrie efficace.

La méthode de détermination des coefficients n et k exige que, par crue, la pluviométrie efficace sur le bassin versant soit égale à l'écoulement total. En réalité cette condition n'est presque jamais satisfaite et on remarque que la pluviométrie efficace totale est supérieure à l'écoulement total. On doit donc ajuster ces deux composants du bilan hydrologique. Nous avons choisi de n'ajuster que la pluviométrie efficace en la diminuant proportionnellement jusqu'au moment où elle satisfait à la condition.

Il y a plusieurs événements d'écoulement pour lesquels la pluviographe de Waddey n'a pas fonctionné. Dans ces cas, lorsque il était disponible, nous avons utilisé l'enregistrement de la pluie de la station hydrométrique, situé au niveau de l'exutoire du bassin versant.

Notons que le pluviographe de Waddey se situe à environ 3 km du centre de l'UTE (voir la figure 8). La direction de vent prédominante pendant la saison pluvieuse est nord-est; c'est pour cette raison que les enregistrements du pluviographe sont quelque peu en retard. C'est pour cela que nous avons avancé la pluviogramme de 10 ou 15 minutes, dépendant de la qualité de la simulation de la crue avec la méthode de l'hydrogramme unitaire ainsi obtenue.

Les données exactes des hydrogrammes et pluviogrammes ne sont pas présentées dans ce rapport. En cas de besoin, le lecteur est renvoyé à la banque de données hydrométrique et climatologique du Projet Intégré Keita.

Les résultats de la détermination des coefficients n et k pour les crues trouvées appropriées sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12: Coefficients n et k de l'hydrogramme unitaire par crue.

Année	Date	n [-]	k [s]	$(n-1)!$ [-]
1992	17 août	10,11	680,3	468411
	27 août	9,90	860,5	289938
1993	15 août	10,00	1177,7	362880
	17 août	9,37	1147,9	89800
	12 septembre	11,27	1194,2	7205391
1994	15 juillet	5,05	777,1	25,92
	23 juillet	2,23	2064,7	1,12
	26 juillet	2,85	911,0	1,75
	19 août	5,4	882,7	44,59
	21 août	3,08	1523,5	2,16
1995	1 août	4,4	1048,2	10,13
	16 août	2,83	1248,1	1,72

Dans l'annexe E nous avons présenté, par événement d'écoulement approprié, les crues enregistrées comme simulées en utilisant les coefficients n et k trouvant dans le tableau 12.

La plupart des simulations des crues sont assez bonnes, à l'exception des crues du 27 août 1992 et du 21 août 1994, qui sont médiocres. Il doit être noté que l'ensemble de données de cette première crue ne satisfaisait pas aux conditions et que la crue du 21 août 1993 a eu une forme quelque peu bizarre.

La forme de l'hydrogramme unitaire étant définie par la combinaison de n et k , les différences trouvées dans ces coefficients pour une seule année n'indiquent pas encore qu'il n'y a pas un seul hydrogramme unitaire représentant l'année en question.

Les figures 18 à 21 présentent les différents hydrogrammes unitaires par année. Il doit être noté que l'on a donné à l'abscisse une échelle arbitraire, ayant pour but de pouvoir comparer la forme des différents hydrogrammes. Les surfaces délimitées par les droites différentes sont égales l'un à l'autre.

Les figures 18 à 21 montrent que, sauf pour 1994, les hydrogrammes unitaires sont assez égaux par année ce qui peut indiquer que la théorie de l'hydrogramme unitaire peut être applicable pour ce type de bassin versant dans ces conditions.

Par contre, 1994 montre un gamme assez différencié. Cependant, la variation se trouve notamment dans la hauteur des hydrogrammes trouvés. Le moment de sommet est assez constant.

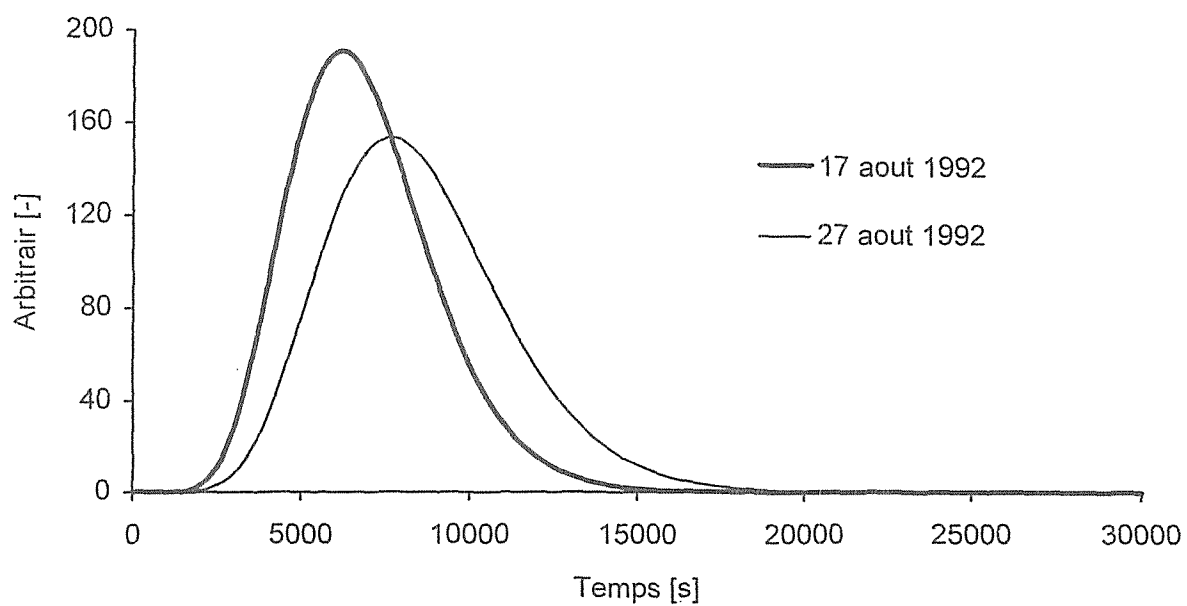


Figure 18: Les hydrogrammes unitaires de 1992.

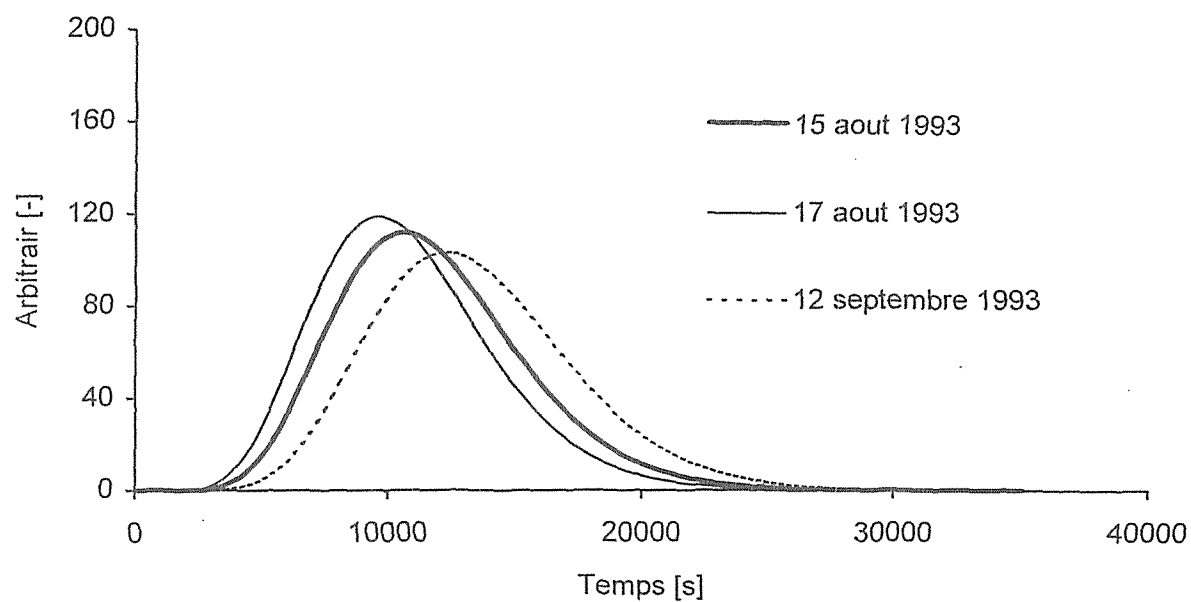


Figure 19: Les hydrogrammes unitaires de 1993.

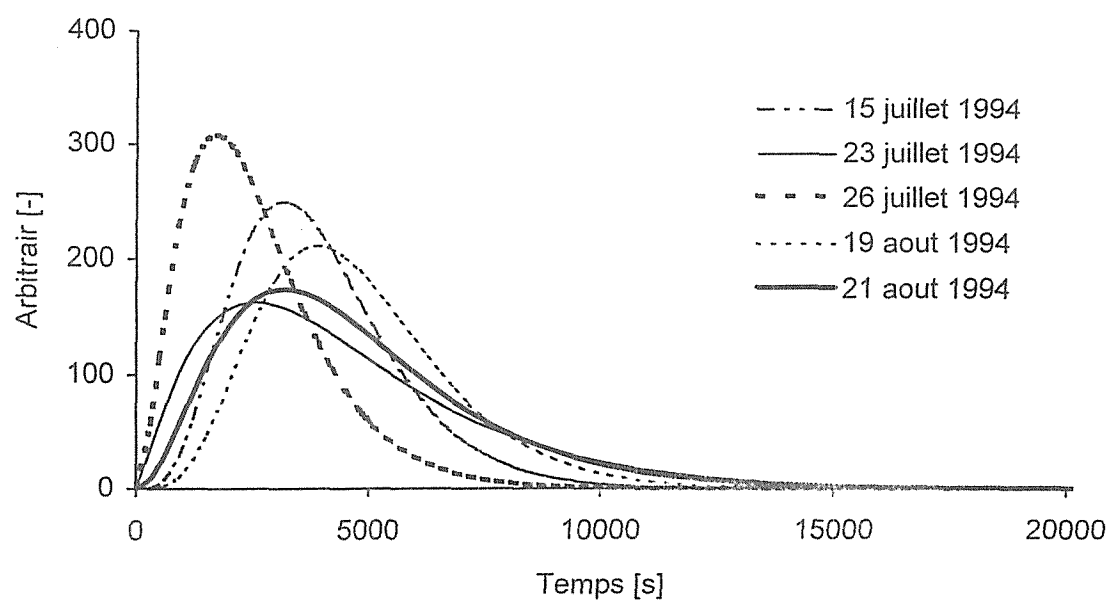


Figure 20: Les hydrogrammes unitaires de 1994.

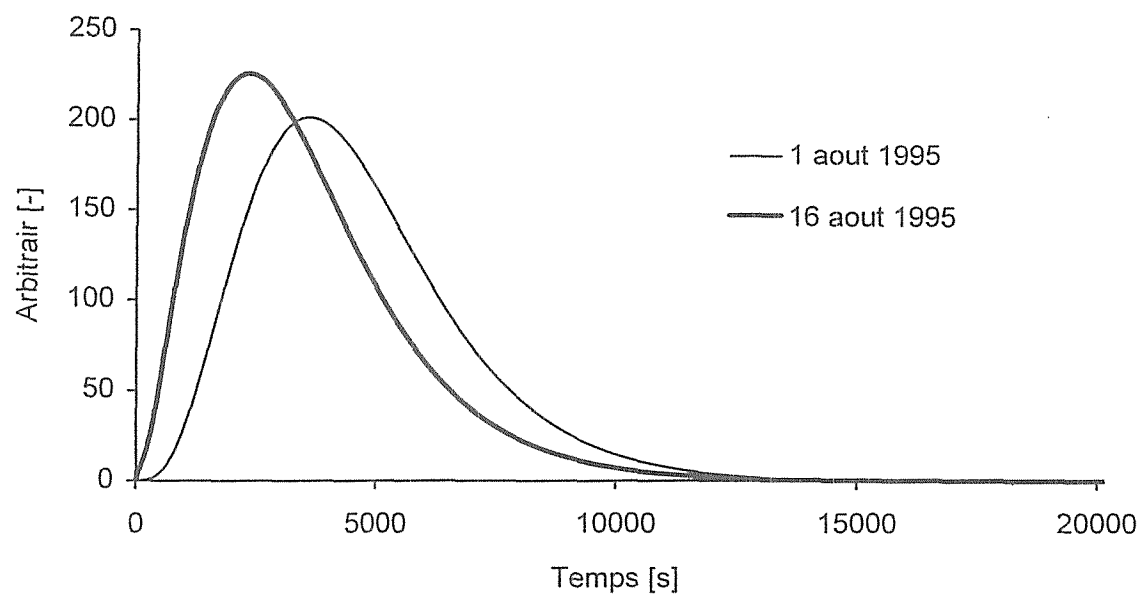


Figure 21: Les hydrogrammes unitaires de 1995.

6.4 Le changement de l'hydrogramme unitaire en fonction des travaux de CES/DRS.

Le but de tout cet exercice de détermination de l'hydrogramme unitaire est d'évaluer les impacts des travaux de CES/DRS sur le régime hydrologique. Alors, nous continuerons avec la comparaison des hydrogrammes unitaires des différentes périodes définies dans le paragraphe 4. Celles-ci sont:

- 1: avant 1992;
- 2: 1992;
- 3: 1993 + 1995;
- 4: 1994.

Nous ne disposons malheureusement pas d'un hydrogramme unitaire pour la période avant 1992. L'année 1992 sert donc de période de référence.

Du point de vue pluviométrique et du stade des travaux de CES/DRS, les années 1993 et 1995 représentent la même situation. Les hydrogrammes unitaires de ces années devraient alors montrer une forte ressemblance et afin de contrôler cette hypothèse nous les avons présenté en figure 22.

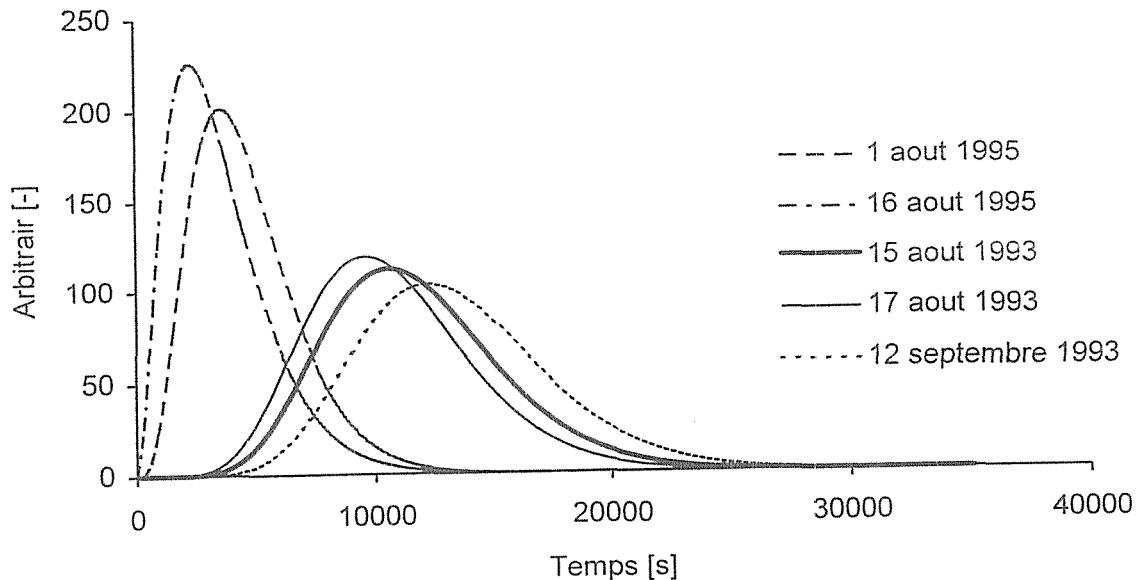


Figure 22: Les hydrogrammes unitaires de 1993 et 1995.

La figure 22 montre clairement que l'hypothèse ci-dessus n'est pas valide. En effet, il y a une forte différence entre ces deux années ceci n'est pas facile à expliquer car la pluviométrie de ces années, étant respectivement 216 mm et 232 mm, est du même ordre de grandeur.

En se référant à l'annexe B, on pourrait dire que les crues du 15 août 1993 et du 12 septembre 1993 ont été précédées d'une période relativement sèche, ce qui pourrait provoquer un ruissellement plus retardé. Cependant, l'hydrogramme unitaire de la crue du 17 août 1993, ne que deux jours après une pluie importante, s'accorde tellement bien dans l'ensemble de 1993 que l'on doit dire que cette explication n'est pas valable.

Il doit être noté que les hydrogrammes unitaires trouvés en 1993 sont physiquement quelque peu bizarres. En effet, le sommet d'écoulement est à environ 3 heures après le début de la pluie, ce qui est très longue pour un bassin versant d'environ 20 km² et ce qui

ne concorde pas avec les expériences de l'auteur aux lieux d'actions comparables. Nous avons donc des doutes sur la validité des hydrogrammes unitaires trouvés en 1993.

On doit donc conclure que du point de vue de l'hydrogramme unitaire, les années 1993 et 1995 ne sont pas comparables et ne peuvent ainsi pas être mises ensembles.

Afin de pouvoir comparer les différentes périodes, nous avons décidé de ne présenter par période qu'un hydrogramme unitaire représentatif. Ceux-ci sont présentés dans le tableau 13, avec une justification concise de leur choix.

Tableau 13: Les hydrogrammes unitaires représentatifs par période.

Période	HU représentatif	P [mm]	CR [%]	Justification
1992	17 août	28,7	26,3	meilleure simulation
1993	15 août	29,2	52,0	malgré le fait que la meilleure simulation soit obtenue pour la crue du 12 septembre 1993, cette crue a un coefficient de ruissellement assez bas ($P=57,8$ mm et $CR=37,7$ %); pour cette raison nous avons choisi celle de 15 août 1993
1994	15 juillet	20,4	48,3	meilleure simulation
1995	1 août	28,9	32,9	meilleure simulation

Il doit être noté que la situation pluviométrique de ces quatre crues est très comparable. Par contre, il y a une certaine différence dans les valeurs des coefficients de ruissellement.

Dans la figure 23 nous avons présenté les hydrogrammes unitaires représentatifs du tableau 13.

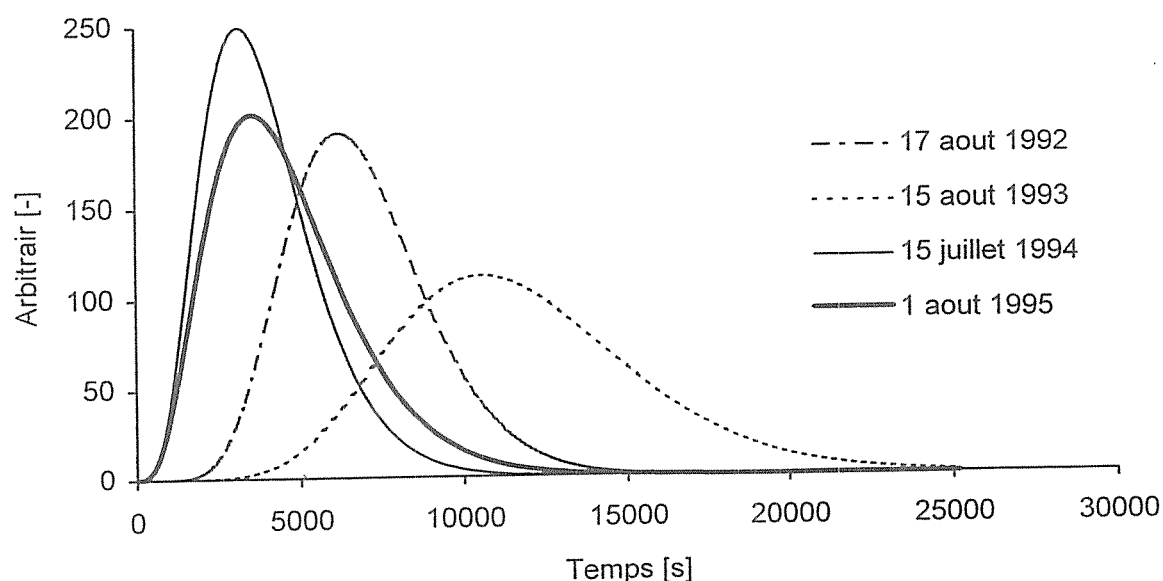


Figure 23: Les hydrogrammes unitaires représentatifs de 1992 à 1995.

Cette figure montre que l'hydrogramme unitaire de 1993 ne s'accorde pas avec ceux de 1994 et 1995, malgré le fait qu'il fasse partie du même groupe du point de vue des travaux de CES/DRS. Comme nous doutons de la validité de cet hydrogramme, il a été omis de la comparaison.

La figure 23 montre que le sommet des HU de 1994 et 1995, c'est à dire après les derniers travaux de CES/DRS, sont décalé en avance par rapport à l'hydrogramme unitaire de 1992.

Le sommet trouvé en 1995 est de la même taille que celui de 1992. Par contre, le sommet trouvé en 1994 est supérieur à ceux de 1993 et 1995, ce qui pourrait être provoqué par la pluviosité exceptionnelle de cette année.

Les changements indiqués ci-dessus sont opposés à ceux prévus. En effet, nous avions prévu l'aplatissement de l'hydrogramme unitaire. Cependant, ce phénomène peut être expliqué en tenant compte du changement réel du bassin versant. En construisant des barrages d'écretage, qui emmagasinent pour la plupart tout le ruissellement du bassin à l'amont, la superficie de l'UTE est diminuée, ceci entraîne une hydrogramme unitaire plus courte et plus élevée. Uniquement pour les cas où la retenue est complètement remplie et provoque ainsi l'écoulement au niveau du déversoir, l'UTE "regagne" sa forme originelle. Alors, comme les déversoirs des barrages Mehanna II et III n'ont coulé qu'une fois (en 1994) on pourrait dire que la superficie réelle de l'UTE est diminuée.

Il doit être noté qu'un hydrogramme unitaire plus court et plus élevé n'implique pas automatiquement un débit de pointe plus élevé, car une baisse substantielle de la superficie réelle pourrait fournir une compensation suffisante pour l'augmentation du sommet de l'hydrogramme unitaire.

Avant de pouvoir tenir des conclusions sur l'impact des travaux de CES/DRS sur la forme de l'hydrogramme unitaire, il est nécessaire de résumer les travaux de CES/DRS entre 1992 et 1995, avec leur impact sur la superficie réelle de l'UTE de Mehanna. Ce résumé est présenté dans le tableau 14.

Tableau 14: Résumé des travaux de CES/DRS entre 1992 et 1995, et leur impact sur la superficie réelle de l'UTE de Mehanna.

Année	Travaux de CES/DRS	Superficie réelle [km ²]	Remarques
avant 1992	barrage Mehanna I banquettes: 9 ha	20,28	Comme le barrage Mehanna I est presque complètement ensablé, il n'entraîne pas une réduction de la superficie réelle de l'UTE. Vue la superficie très réduite, l'impact des banquettes est négligeable.
1992 #	barrage Mehanna II	16,14	Superficie du bassin versant du Mehanna II = 4,14 km ²
1993 #	barrage Mehanna III	15,19	Superficie du bassin versant du Mehanna III = 0,91 km ²
1993 #	banquettes: 117 ha	15,19 - ?	L'impact précis des banquettes sur la superficie réelle n'est pas connu.

= avant la saison de pluie.

Les changements observés entre les hydrogrammes unitaires de 1992 et la période après, sont provoqués par la construction du barrage Mehanna III et l'aménagement de 117 ha avec banquettes.

Comme l'impact précis des banquettes sur la superficie réelle n'est pas connu, et la superficie des banquettes est du même ordre que celle du barrage Mehanna III, il n'est pas possible d'évaluer le changement du régime hydrologique en utilisant l'hydrogramme unitaire.

6.5 Conclusions

Vue la qualité des simulations des hydrogrammes enregistrés et le fait que par année les hydrogrammes unitaires obtenus sont assez égaux, on peut conclure que la théorie de l'hydrogramme unitaire est applicable pour ce type de bassin versant et les conditions climatologiques et morphologiques rencontrées.

Cependant, nous n'avons pas trouvé un ordre logique dans les changements de l'HU en fonction des aménagements. Cela est dû à l'hydrogramme unitaire de 1993 qui ne concorde pas avec ceux de 1992, 1994 et 1995 et se trouve en dehors de la gamma logique. Nous n'avons pas trouvé d'explication satisfaisante pour ce fait.

En excluant 1993, les changements des HU-s montrent une série quelque peu surprenante mais explicable. Contrairement aux attentes, l'HU est devenu plus court et plus élevé. Cela peut être expliqué par le fait que les aménagements ont changé la forme du bassin versant. Plus explicite, la superficie réelle du bassin versant est diminuée par la construction des barrages d'écretage.

Cependant, comme l'impact des aménagements avec banquettes sur la superficie réelle n'est pas connu, il n'est pas possible d'évaluer les changements du régime hydrologique en comparant des hydrogrammes obtenus en utilisant les HU-s des différentes périodes et une averse unitaire imaginée.

Alors, on peut conclure que, pour le cas spécifique de l'UTE de Mehanna, la méthode de l'hydrogramme unitaire n'est pas appropriée pour évaluer les impacts des travaux de CES/DRS sur le régime hydrologique.

7. Le changement du lit du kori au niveau de la station hydrométrique

Le kori de Mehanna a fait l'objet d'une érosion digitale profonde ce qu'indique l'enfoncement d'à peu près 3 m à la sortie de l'UTE. Le but principal des travaux de CES/DRS exécutés par le PIK a été d'arrêter ce processus d'érosion.

Il est possible d'évaluer l'impact des travaux de CES/DRS sur le processus d'érosion du kori principal de l'UTE de Mehanna en comparant des levés topographiques faits aux différents moments.

Pour le lit du kori au niveau de la station limnimétrique nous disposons des levés topographiques de:

- 1: août 1991;
- 2: juin 1994;
- 3: juin 1995;
- 4: décembre 1995.

En référant au paragraphe 2.7 on peut voir qu'entre août 1991 et juin 1994 les travaux de CES/DRS consistaient à:

- 1: rehausser le barrage Mehanna I;
- 2: construire les barrages Mehanna II et III;
- 3: aménager 117 ha avec des banquettes.

Les quatre levés topographiques disponibles sont présentés dans la figure 24. Lors d'un levé topographique, nous avons également mesuré la pente longitudinale du kori. Celles-ci sont présentées dans le tableau 15.

Tableau 15: Pente longitudinale du kori de Mehanna au niveau de la station limnimétrique.

Date	pente [-]
août 1991	0,0040
juin 1994	0,0039
juin 1995	0,0037
décembre 1995	0,0034

La figure 24 montre qu'il y a eu un changement important du lit du kori entre août 1991 et juin 1994 (c'est à dire la période avant et après les travaux de CES/DRS). En 1991 le kori était profond et étroit par rapport à la situation en juin 1994. On peut également voir que le kori n'a pas encore trouvé son équilibre. En effet, entre juin 1994 et juin 1995, la forme du lit du kori a changé substantiellement. Cependant, la figure 24 montre clairement que le processus d'érosion est arrêté et même renversé. Le niveau le plus bas de la section

transversale au niveau de la station limnimétrique en décembre 1995 est à peu près 20 cm au-dessus du point le plus bas en 1991.

L'évaluation des pentes longitudinales montre également clairement que le processus d'érosion est renversé. La pente longitudinale a diminué continuellement entre août 1991 et décembre 1995 et elle n'est à l'heure actuelle que 85 % de celle en 1991.

Il serait possible que la diminution de la pente et la stabilisation du lit du kori soit dû à des facteurs différents de l'exécution des travaux de CES/DRS (pression de population, couverture herbale, etc.). Cependant, comme le climat est resté plus au moins constant entre 1991 et 1995 (l'année 1994 a même été exceptionnellement pluvieuse) et que les autres facteurs influant le lit du kori n'ont pas changé substantiellement, cela est très improbable.

En conclusion on peut dire que l'analyse de l'évaluation du lit du kori au niveau de la station limnimétrique a montré clairement que le processus d'érosion est renversé entre juin 1991 et décembre 1995. Cela peut être dû uniquement aux travaux de CES/DRS exécutés par le PIK.

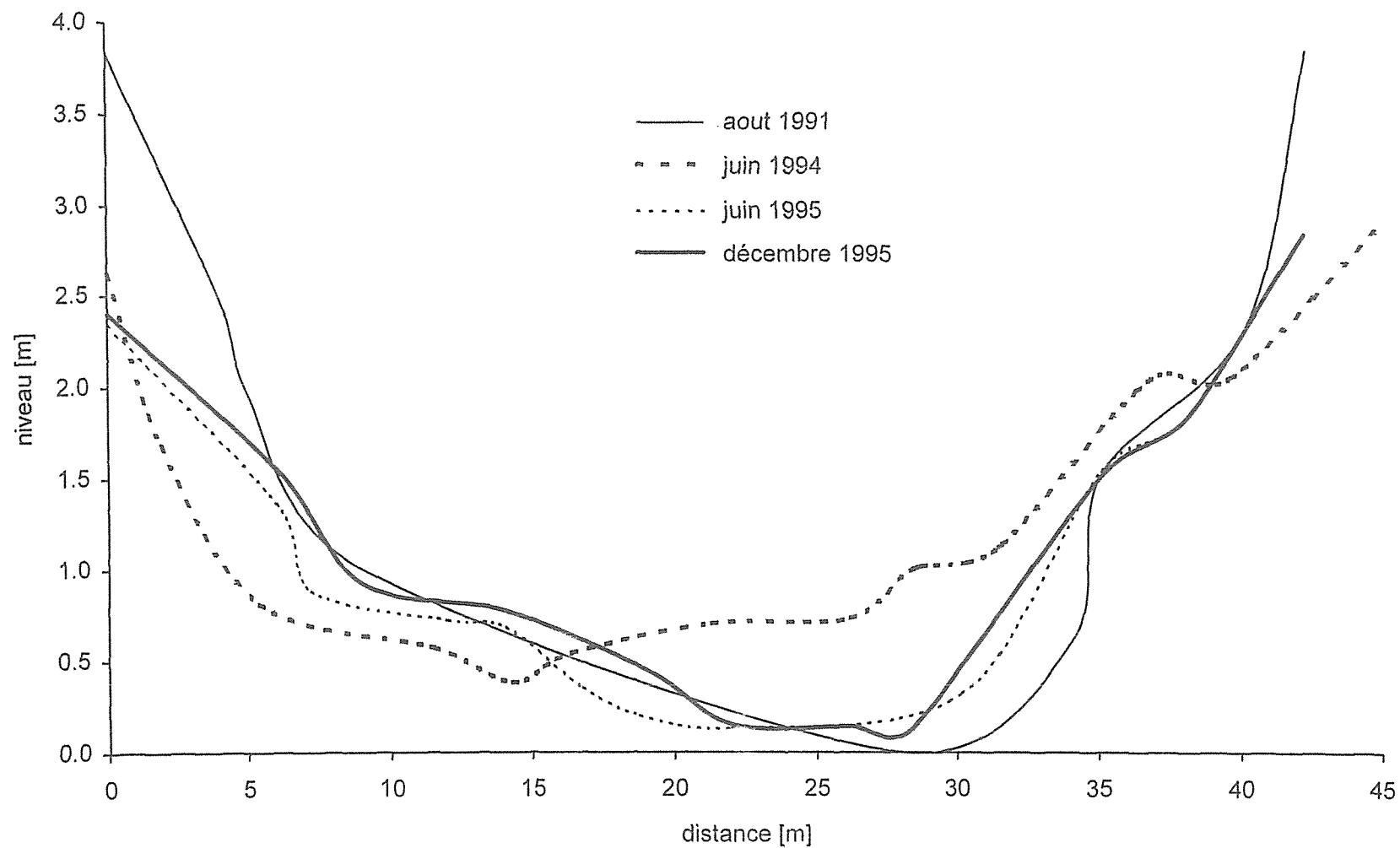


Figure 24: Les l v s topographiques du koris de Mehanna au niveau de la station limnimétrique pour plusieurs années.

8. Conclusions et recommandations

Avant de présenter les conclusions générales de l'étude ci-dessus, nous résumons les impacts envisagés des travaux de CES/DRS sur le régime hydrologique:

- 1: une réduction de ruissellement suite à une plus grande infiltration sur les versants;
- 2: une modification de l'hydrogramme unitaire;
- 3: une augmentation de la recharge des aquifers alluviales.

Il est important de noter que, pendant la période de mesure, la situation externe (pression de population, climat, techniques de culture) n'a pas changé fondamentalement. Les changements du régime hydrologique peuvent être attribués uniquement aux travaux de CES/DRS.

En effectuant l'analyse des coefficients de ruissellement, le débit de pointe, l'hydrogramme unitaire et le lit du kori, nous avons constaté que:

- 1: vue la distribution spatiale et temporelle énorme des pluies, la densité du réseau pluviométrique n'a pas été suffisante pour bien estimer la pluviométrie par événement d'écoulement;
- 2: il n'y a pas une relation univoque entre le coefficient de ruissellement et la pluviométrie;
- 3: il y a une relation univoque entre le débit de pointe et la pluviométrie; l'analyse de l'évaluation de cette relation montre que le débit de pointe a diminué d'à peu près 30 % pendant la période de mesure;
- 4: l'application de la théorie de l'hydrogramme unitaire pour l'UTE de Mehanna est légitime; cependant, suite à l'inhomogénéité de fonctionnement des différents types de CES/DRS rencontrés, l'évaluation de l'hydrogramme unitaire ne permet pas tenir de conclusions univoques sur les effets des travaux de CES/DRS sur le régime hydrologique; l'hydrogramme unitaire n'est donc pas utile pour l'analyse envisagée.
- 5: contrairement aux espoirs, l'hydrogramme unitaire est devenu plus court et plus haut, ce qui peut être expliqué par la diminution de fait de la superficie du bassin versant suite à la construction des barrages;
- 6: l'analyse de l'évaluation du lit de kori a montré que le processus d'érosion est arrêté, même renversé, malgré le fait que le lit du kori n'est pas encore stable; la pente longitudinale a diminué avec 15% pendant la période de mesure.

On peut alors conclure que les travaux de CES/DRS ont une influence substantielle sur le régime hydrologique, notamment exprimée dans la diminution du débit de pointe d'à peu près 30 % et le renversement du processus d'érosion du lit du kori.

Une analyse plus spécifique n'a pas été possible à cause du manque de mesures continues pendant toute la période d'intervention, du réseau pluviométrique insuffisant, et de la diversité des travaux de CES/DRS dans le bassin versant en considération.

Suite du manque d'une aquiver alluviale à Mehanna, il n'a pas été possible de tenir des conclusions sur l'influence des travaux de CES/DRS sur la recharge de la nappe.

Ces conclusions entraînent les recommandations suivantes:

- 1: on doit installer un réseau pluviométrique extensif sur le bassin versant à rechercher, préférablement avec une densité d'un pluviomètre par kilomètre carré; ce réseau doit incorporer plusieurs pluviographes;
- 2: afin de mesurer exactement l'écoulement au niveau de l'exécutoire, on y doit construire une "flume";
- 3: afin de faciliter l'analyse de l'hydrogramme unitaire, le bassin versant en considération ne peut contenir qu'un seul type de travaux de CES/DRS.

Etant au courant des implications financières énormes des recommandations ci-dessus, l'auteur voudrait néanmoins noter que, vue l'intensité énorme des averses dans la zone (semi) aride ainsi que leur distribution spatiale et temporelle exceptionnelle, et les imprécisions de mesure consécutives, toute recherche à peu de chance sans la réalisation du réseau de mesure recommandé.

Chaque conclusion, obtenue différemment, pourra être infirmé simplement en posant la question: "est-ce qu'il ne s'agit pas d'une erreur de mesure?".

9. Références

Bos et al, *Discharge Measurement Structures*, Publication No. 16, Delft Hydraulics Laboratory, Delft 1976.

Critchley W., Siegert K., *Water Harvesting*, FAO AGL/MISC/17/91, Rome 1991.

French R. H., *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.

Hilhorst B., *Mémo no. 8: Détermination du coefficient de résistance du kori d'Inkimia au niveau de la station limnimétrique*, Projet Intégré Keita, Keita 1995.

Hilhorst B., *Mémo no. 10: La détermination des courbes de tarage de plusieurs stations hydrométrues dans l'Arrondissement de Keita*, Projet Intégré Keita, Keita 1995.

Hilhorst B., *Mémo no. 11: Présentation de la banque de données hydrométrique du Projet Intégré Keita*, Projet Intégré Keita, Keita 1995.

Heuch B., *La conservation des eaux et des sols dans la haute vallée de Keita*, SOGREAH, Grenoble 1975.

Mutreja K. N., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, New Delhi, 1982.

Nouvelot J. F., *Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale*, ORSTOM/CIEH, Ouagadougou 1993.

Peuch C., Chabi-Gonni D., *Méthode de calcul des débits de crue décennale*, Comité Interafricain d'études hydrauliques (CIEH), Ouagadougou 1984.

Vuillaume G., *Etude analytique du ruissellement et de l'érosion, Bassins versants représentatifs de Kountkouzout*, ORSTOM, Paris 1969.

Annexe A: Résultats des mesures de l'érosion à Kountkouzout.

Parcelle	P2	F2	F1	F5	F3	F6
Surface [ha]	0.3	4.7	3.5	10.6	2.6	9.1
Pente moyenne [%]	3	11	4	5	3	1
surface en culture [%]	100	25	70	5	0	100
Sol dominant	vertisol argileux	brun vertique	rendzine argileux	brun argilo-limoneux	brun hydro-morphe	brun-rouge sableux
Géologie	crétacé	crétacé	éocène	éocène	éocène	quaternaire dunaire
Lame ruisselée maximale [mm/pluie]	55	53	56	25	52	24
Perte terre en 1967 [ton/ha]	18.5	14.5	13.2	7.5	5.7	0.6

Source: G. Vuillaume, ORSTOM (1969), Bassins versants représentatifs de Kountkouzout, Etude analytique du ruissellement et de l'érosion.

Annexe B: Les données hydrologiques de l'UTE de Mehanna.

Dans l'annexe B nous avons présenté par année les données hydrologiques de l'UTE de Mehanna de la période de 1990 jusqu'à 1995.

Dans les tableaux ci-dessous, par événement d'écoulement, les variables suivantes ont été présentées:

- 1: la temps de montée (t montée): la temps entre le début de l'écoulement et le moment du débit maximum;
- 2: la temps de base (t base): la durée de l'événement de l'écoulement;
- 3: le débit maximum en mètre cube par seconde (Q max);
- 4: le débit total en mille mètres cubes par seconde (Q total);
- 5: le débit total en mm (Q total);
- 6: la pluviométrie au niveau de la station limnimétrique de Mehanna (MEHS);
- 7: la pluviométrie au niveau du barrage Mehanna 1 (MBAR 1);
- 8: la pluviométrie au niveau du barrage Mehanna 2 (MBAR 2);
- 9: la pluviométrie du pluviomètre Mehanna 4 (MEH 4);
- 10: la pluviométrie du pluviomètre Mehanna 5 (MEH 5);
- 11: la pluviométrie au niveau de la station climatologique de Waddey Périmètre (WADP);
- 12: la pluviométrie totale en mm obtenue en utilisant les coefficients de Thiessen (P totale);
- 13: le coefficient de ruissellement (C.R.);
- 14: un symbole pour indiquer si les données satisfont aux critères de la détermination de l'hydrogramme unitaire (approprié pour HU), comme suite:
 - ++ = très approprié;
 - + = assez approprié.

Le colorant de la ligne représentant un événement d'écoulement indique que les données de cette crue ne sont pas assez consistant, et cette crue ne peut pas être incorporée dans les analyses du coefficient de ruissellement et du débit de pointe.

Les données hydrologiques de 1990 de l'UTE de Mehanna.

Date	Caractéristiques de l'écoulement					Pluviométrie							C.R. [%]	Approprié pour HU
	t montée [min]	t base [min]	Q max [m3/s]	Q total [10 ³ m3/s]	Q total [mm]	MEHS [mm]	MBAR 1 [mm]	MBAR 2 [mm]	MEH 4 [mm]	MEH 5 [mm]	WADP [mm]	P totale [mm]		
30 juil	90	-	36,7	-	-	12,7	-	-	-	-	15,0	12,7	-	-
8 aug	115	-	137,1	-	-	102,8	-	-	-	-	60,0	102,8	-	-
29 aug	40	-	22,6	-	-	16,4	-	-	-	-	6,0	16,4	-	-
30 sep	95	-	24,2	-	-	16,8	-	-	-	-	0,0	16,8	-	-

Les données hydrologiques de 1991 de l'UTE de Mehanna.

Date	Caractéristiques de l'écoulement					Pluviométrie							C.R. [%]	Approprié pour HU
	t montée [min]	t base [min]	Q max [m3/s]	Q total [10 ³ m3/s]	Q total [mm]	MEHS [mm]	MBAR 1 [mm]	MBAR 2 [mm]	MEH 4 [mm]	MEH 5 [mm]	WADP [mm]	P total [mm]		
30 jun	95	275	21,1	199,26	9,7	25,7	-	-	-	-	20,0	25,7	37,6	
4 juil	175	300	24,8	247,39	12,0	15,2	-	-	-	-	12,1	15,2	79,0	
9 jul	65	135	6,3	26,78	1,3	21,5	-	-	-	-	25,1	21,5	6,0	
25 jul	185	-	60,0	-	-	102,0	-	-	-	-	27,0	102,0	-	
28 jul	445	-	139,0	-	-	83,6	-	-	-	-	-	83,6	-	
3 aug	75	210	27,9	151,37	7,3	40,7	-	-	-	-	80,3	40,7	18,1	
5 aug	90	-	34,2	-	-	22,5	-	-	-	-	20,4	22,5	-	
7 aug	110	225	41,5	300,93	14,6	49,3	-	-	-	-	11,6	49,3	29,6	
10 aug	80	205	38,3	201,44	9,8	31,5	-	-	-	-	30,0	31,5	31,0	
14 aug	170	390	73,6	779,33	37,8	136,0	-	-	-	-	30,7	136,0	27,8	
16 aug	55	130	27,6	198,70	5,3	20,1	-	-	-	-	38,4	20,1	26,3	
20 aug	95	-	43,5	-	-	51,2	-	-	-	-	29,0	51,2	-	

Les données hydrologiques de 1992 de l'UTE de Mehanna.

Date	Caractéristiques de l'écoulement					Pluviométrie							C.R. [%]	Approprié pour HU
	t montée [min]	t base [min]	Q max [m3/s]	Q total [10 ³ m3/s]	Q total [mm]	MEHS [mm]	MBAR 1 [mm]	MBAR 2 [mm]	MEH 4 [mm]	MEH 5 [mm]	WADP [mm]	P total [mm]		
30 jun	90	215	29,8	181,21	8,8	16,9	-	-	-	-	16,6	16,9	52,1	
11 jul	140	-	31,4	-	-	28,0	-	-	-	-	18,7	28,0	-	
20 jul	90	-	44,1	-	-	37,3	5,0	-	-	-	29,9	5,9	-	
22 jul	155	275	43,5	310,70	15,1	16,9	39,0	-	-	-	16,4	38,4	39,3	
27 jul	120	240	48,0	371,73	18,0	18,9	9,0	-	-	-	10,2	9,3	194,5	
15 aug	35	155	18,8	57,00	2,8	5,9	17,0	-	-	-	5,1	16,7	16,6	++ +
17 aug	90	165	28,5	155,33	7,5	18,5	29,0	-	-	-	21,1	28,7	26,3	
27 aug	130	235	49,0	404,14	19,6	18,9	39,0	-	-	-	32,5	38,4	51,0	
28 aug	55	115	10,0	37,41	1,8	8,2	13,0	-	-	-	8,2	12,9	14,1	
29 aug	50	115	11,5	36,05	1,8	11,6	32,0	-	-	-	11,6	16,6	10,6	
11 sep	75	145	22,3	104,16	5,1	15,1	10,0	-	-	-	14,5	10,1	49,9	

les données hydrologiques de 1993 de l'UTE de Mehanna.

Date	Caractéristiques de l'écoulement					Pluviométrie							C.R. [%]	Approprié pour HU
	t montée [min]	t base [min]	Q max [m3/s]	Q total [10 ³ m3/s]	Q total [mm]	MEHS [mm]	MBAR 1 [mm]	MBAR 2 [mm]	MEH 4 [mm]	MEH 5 [mm]	WADP [mm]	P total [mm]		
2 jul	100	215	18,4	130,78	6,3	12,5	13,4	27,2	-	-	10,7	24,2	26,3	
14 jul	100	175	6,7	37,31	1,8	7,6	9,7	-	-	-	6,2	9,6	18,8	
16 jul	35	70	3,6	8,52	0,4	1,9	1,4	-	-	-	2,3	1,4	29,2	
23 jul	110	265	21,1	166,38	8,1	8,8	11,5	-	-	-	8,8	11,4	70,7	
24 jul	55	110	11,2	43,22	2,1	9,0	7,5	-	-	-	9,0	7,5	27,8	
27 jul	100	215	22,3	139,88	6,8	13,0	11,0	-	-	-	10,0	11,1	61,4	
15 aug	140	240	37,5	313,20	15,2	29,6	29,2	-	-	-	29,4	29,2	52,0	++
17 aug	130	250	26,1	217,43	10,6	24,2	25,2	-	-	-	24,8	25,2	41,9	++
12 sep	155	335	45,0	449,26	21,8	54,7	57,2	58,1	-	-	47,2	57,8	37,7	++

es données hydrologiques de 1994 de l'UTE de Mehanna.

Date	Caractéristiques de l'écoulement					Pluviométrie							C.R. [%]	Approprié pour HU
	t montée [min]	t base [min]	Q max [m3/s]	Q total [10^3 m3/s]	Q total [mm]	MEHS [mm]	MBAR 1 [mm]	MBAR 2 [mm]	MEH 4 [mm]	MEH 5 [mm]	WADP [mm]	P total [mm]		
28 jun	30	80	5,0	11,08	0,5	25,0	-	23,2	-	-	23,2	23,4	2,3	
10 jul	35	-	14,6	-	-	10,1	-	16,1	-	-	-	15,4	-	
11 jul	70	-	33,3	-	-	9,5	-	7,8	-	-	-	8,0	-	
12 jul	15	45	3,9	7,43	0,4	0,0	-	3,0	-	-	-	3,0	12,0	
15 jul	40	160	33,7	206,55	10,0	20,4	-	20,8	-	-	-	20,8	48,3	++
23 jul	50	260	91,0	587,79	28,5	63,2	-	68,1	-	-	42,3	67,5	42,3	++
26 jul	20	145	58,0	248,44	12,1	29,4	-	19,6	-	-	15,5	20,8	58,0	
29 jul	75	120	10,4	29,60	1,4	6,3	-	6,1	-	-	7,1	6,1	23,5	
1 aug	15	45	2,3	2,91	0,1	4,3	-	4,3	-	-	4,6	4,3	3,3	
5 aug	45	365	70,5	570,94	27,7	26,8	-	51,7	-	-	51,5	48,7	56,9	
7 aug	25	170	21,9	93,88	4,6	12,0	-	0,0	-	-	0,0	12,0	38,0	
8 aug	60	250	25,3	195,38	9,5	15,5	-	0,8	-	-	8,7	2,6	369,9	
10 aug	35	100	4,4	9,66	0,5	2,5	-	2,6	-	-	2,6	2,6	18,1	
19 aug	60	240	31,0	228,46	11,1	24,5	-	46,3	-	-	49,0	43,7	25,4	++
21 aug	55	270	68,6	420,63	20,4	33,7	-	44,0	-	-	51,3	42,8	47,7	++
31 aug	25	125	16,9	65,86	3,2	11,3	-	0,0	-	-	2,2	11,3	28,3	
1 sep	55	240	62,7	342,76	16,6	16,4	-	28,0	-	-	27,9	26,6	62,5	
4 sep	35	125	15,7	48,59	2,4	9,4	-	5,2	-	-	4,3	5,7	41,4	
11 sep	30	185	28,4	147,89	7,2	20,6	-	21,8	-	-	17,6	21,7	33,2	
16 sep	35	180	25,3	110,07	5,3	35,8	-	33,7	-	-	22,4	34,0	15,7	
4 oct	30	80	8,5	20,36	1,0	8,2	-	5,8	-	-	13,3	6,1	16,2	
8 oct	20	50	8,5	15,43	0,7	6,2	-	8,8	-	-	3,5	8,5	8,8	

Les données hydrologiques de 1995 de l'UTE de Mehanna.

Date	Caractéristiques de l'écoulement					Pluviométrie							C.R. [%]	Approprié pour HU
	t montée [min]	t base [min]	Q max [m3/s]	Q total [10 ³ m3/s]	Q total [mm]	MEHS [mm]	MBAR 1 [mm]	MBAR 2 [mm]	MEH 4 [mm]	MEH 5 [mm]	WADP [mm]	P total [mm]		
13 jun	20	50	2,0	3,16	0,2	6,7	-	6,4	-	-	-	6,4	2,4	
26 jun	35	145	26,1	157,76	7,7	33,7	-	8,9	-	-	-	11,9	11,9	
27 jun	45	150	19,4	93,03	4,5	13,2	-	33,7	-	-	-	31,2	31,2	
29 jul	25	85	13,4	35,19	1,7	0,1	0,2	6,0	0,9	16,5	0,0	7,3	7,3	
1 aug	45	185	31,2	196,44	9,5	30,4	-	28,5	24,9	31,5	30,4	28,9	28,9	++
16 aug	40	165	25,1	125,52	6,1	20,1	23,6	23,3	19,0	25,1	23,0	22,8	22,8	++
29 aug	20	75	9,1	18,23	0,9	15,1	14,5	12,8	11,5	11,5	19,3	12,3	12,3	
3 sep	80	175	14,5	78,85	3,8	14,4	11,9	4,1	5,5	3,9	14,8	6,0	6,0	
18 sep	30	90	10,4	25,43	1,2	10,8	11,3	4,4	7,7	10,6	11,2	8,9	8,9	

Annexe C: Les coefficients de ruissellement mensuels de l'UTE de Mehanna.

Année	Mois												Total		
	Juin			Juillet			Août			Sept					
	P [mm]	Q [mm]	CR [%]	P [mm]	Q [mm]	CR [%]	P [mm]	Q [mm]	CR [%]	P [mm]	Q [mm]	CR [%]	P [mm]	Q [mm]	CR [%]
1990		-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
1991		-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
1992		-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
1993	31,4	-	-	73,0	32,0	43,8	80,7	28,5	35,3	68,5	22,8	33,3	253,6	83,3	32,8
1994	24,2	2,9	12,0	161,9	76,1	47,0	171,3	77,7	45,3	105,7	33,5	31,6	484,9	191,9	39,6
1995	60,3	12,3	20,4	14,1	2,1	14,9	70,9	17,1	24,1	19,0	5,1	26,8	167,8	36,6	21,8

Il doit être noté que le total présenté dans ce tableau n'est pas le total annuel, mais le cumulatif des mois de juin jusqu'à septembre. La pluviométrie éventuelle des mois d'avril, mai et octobre n'est pas incorporée.

Annexe D: La détermination des coefficients n et k de l'hydrogramme unitaire de Nash.

L'hydrogramme unitaire de Nash est définie par la formule suivante:

$$q(0,t) = \frac{d}{k} * \frac{1}{(n-1)!} * \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} * e^{-\frac{t}{k}}$$

dans laquelle:

$q(0,t)$ = l'écoulement au moment t suite à une précipitation au moment 0 [m/s];

d = la hauteur de la précipitation efficace au moment 0 [m];

k = le temp de retard (la time) [s];

n = le nombre (fictive) de réservoirs de Nash [-].

La surface totale est egale à:

$$\int_0^{\infty} u_n(0,t) dt = d * \int_0^{\infty} \frac{1}{k} * \frac{1}{(n-1)!} * \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} * e^{-t/k} dt = d$$

La moment premiere par rapport à l'origine (M1) est egale à:

$$M_1 = \int_0^{\infty} u_0(0,t) * t dt = \int_0^{\infty} \frac{d}{k} * \frac{1}{(n-1)!} * \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} * e^{-t/k} * t * dt \quad \Rightarrow$$

$$M_1 = \frac{d}{k^n} * \frac{1}{(n-1)!} * \int_0^{\infty} t^n * e^{-t/k} dt \quad \Rightarrow$$

$$M_1 = \frac{d}{k^n} * \frac{1}{(n-1)!} * n! * k^{n+1} \quad \Rightarrow$$

$$M_1 = d * n * k$$

Alors, le centre de gravité de l'hydrogramme unitaire est situé à une distance de l'origine egale à:

$$\frac{d * n * k}{d} = n * k$$

La moment secondaire par rapport à l'origine (M₂) est égale à:

$$M_2 = \int_0^{\infty} u_n(0, t) * t^2 dt = \int_0^{\infty} \frac{d}{k} * \frac{1}{(n-1)!} * \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} * e^{-t/k} * t^2 dt \quad \Rightarrow$$

$$M_2 = \frac{d}{k^n} * \frac{1}{(n-1)!} * \int_0^{\infty} t^{(n+1)} * e^{-t/k} dt \quad \Rightarrow$$

$$M_2 = \frac{d}{k^n} * \frac{1}{(n-1)!} * (n+1)! * k^{(n+2)} \quad \Rightarrow$$

$$M_2 = d * n * (n+1) * k^2$$

La moment secondaire par rapport au centre de gravité (M₂') est égale à:

$$M_2' = d * n * (n+1) * k^2 - d * (n * k)^2 = d * n * k^2$$

En résumant:

$$M_1 = d * n * k$$

et

$$M_2' = d * n * k^2$$

Alors:

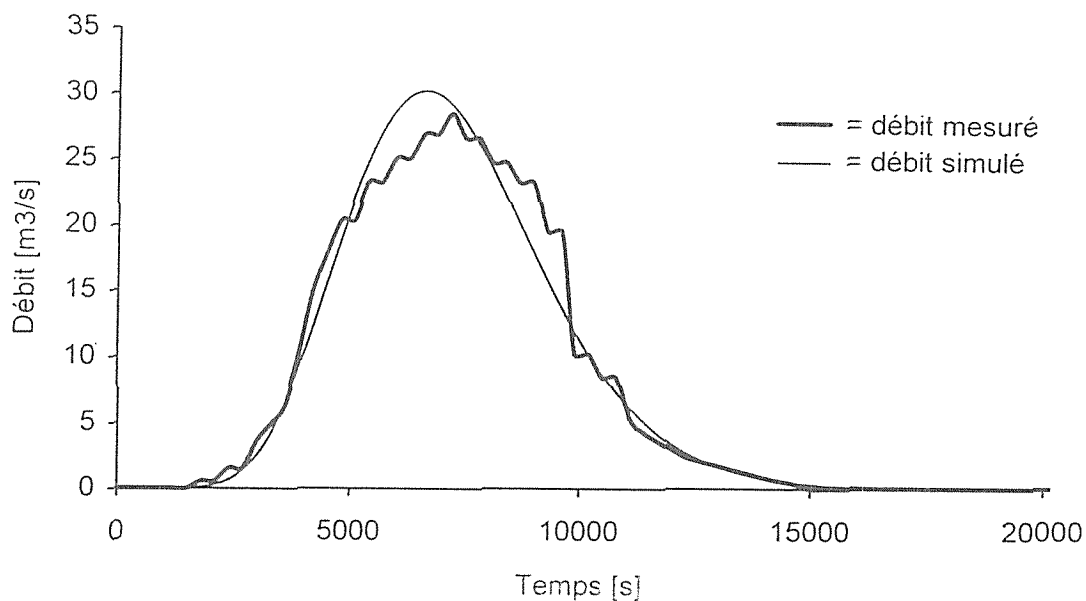
$$k = \frac{M_2'}{M_1}$$

et

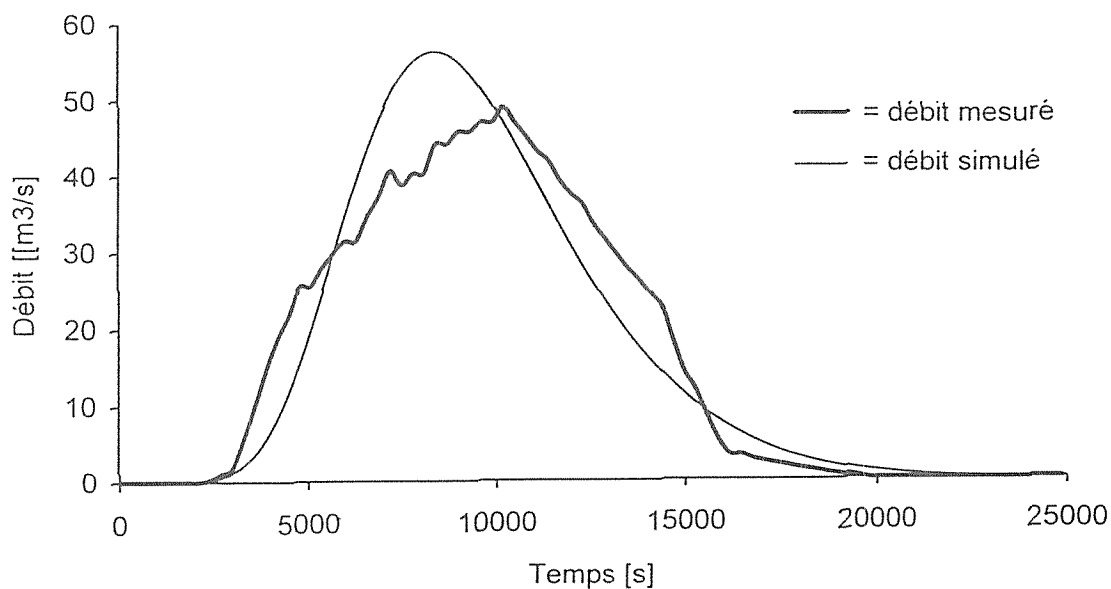
$$n = \frac{(M_1)^2}{d * M_2'}$$

Il doit être noté que les valeurs de n et k ainsi calculées ne sont pas uniquement des chiffres entières, ce qui créera des difficultés en calculant les valeurs de (n-1)!. C'est pour cela que nous avons présenté dans l'annexe F l'utilisation de la fonction Gamma pour calculer (n-1)!.

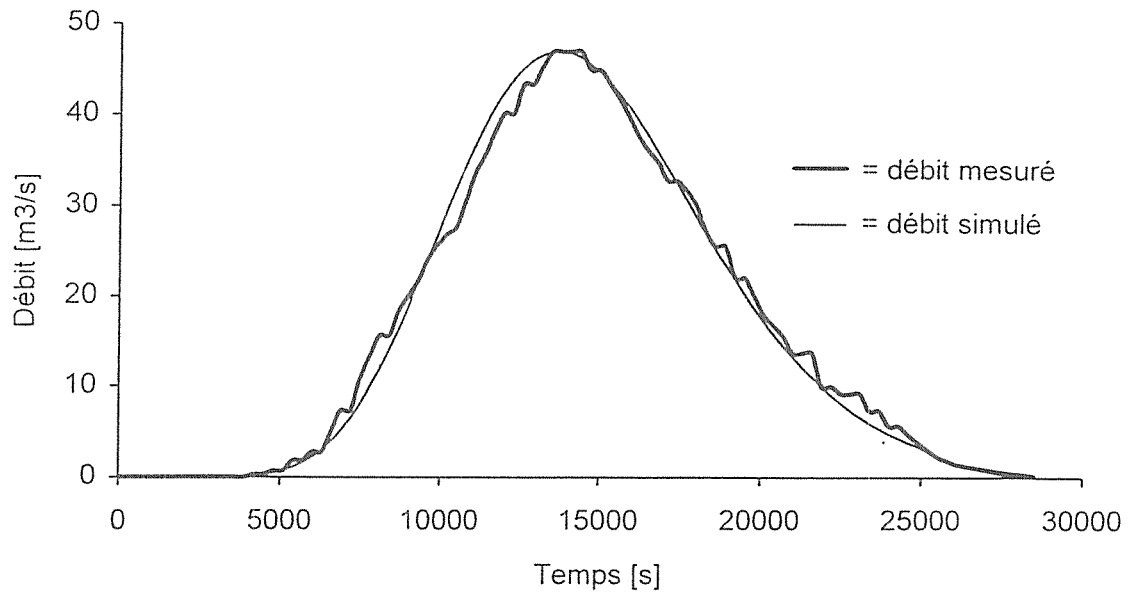
Annexe E: Des crues enregistrées et simulées en utilisant la méthode de l'hydrogramme unitaire.



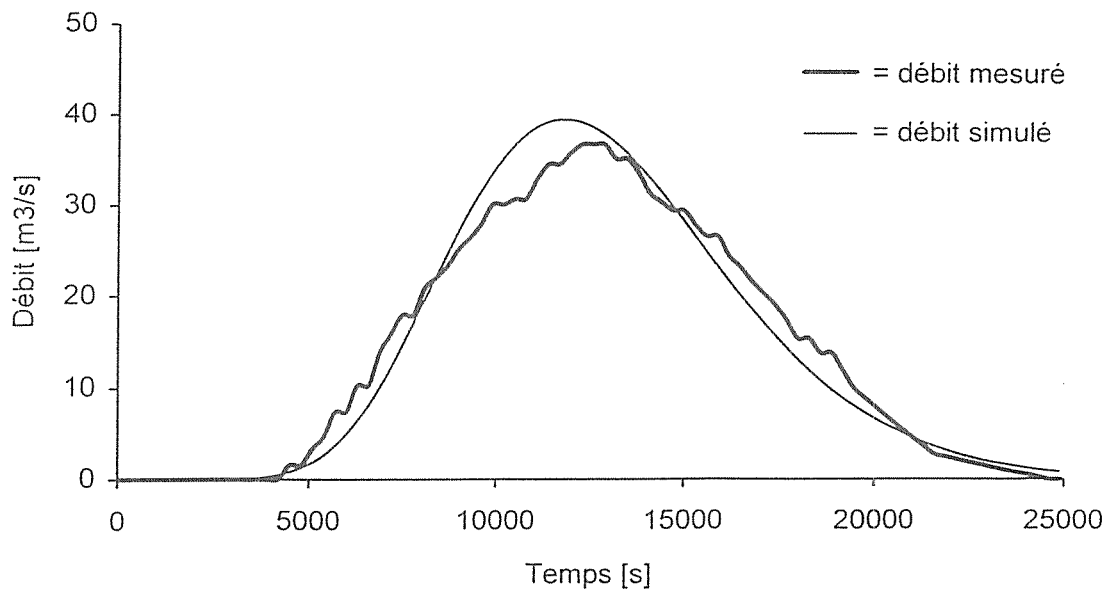
La crue du 17-08-1992, enregistrée et simulée.



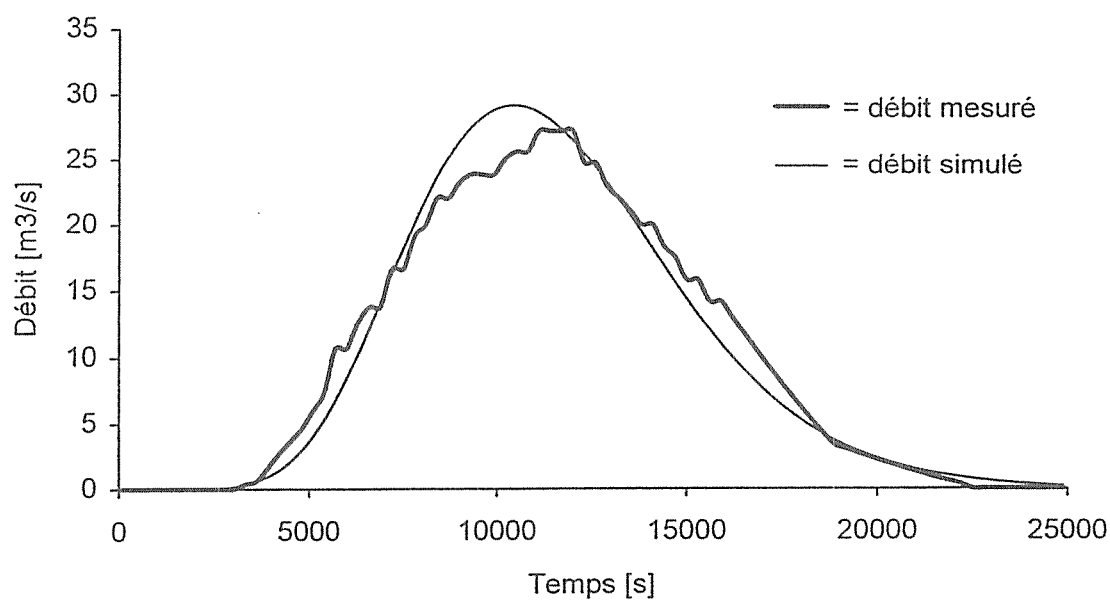
La crue du 27-08-1992, enregistrée et simulée.



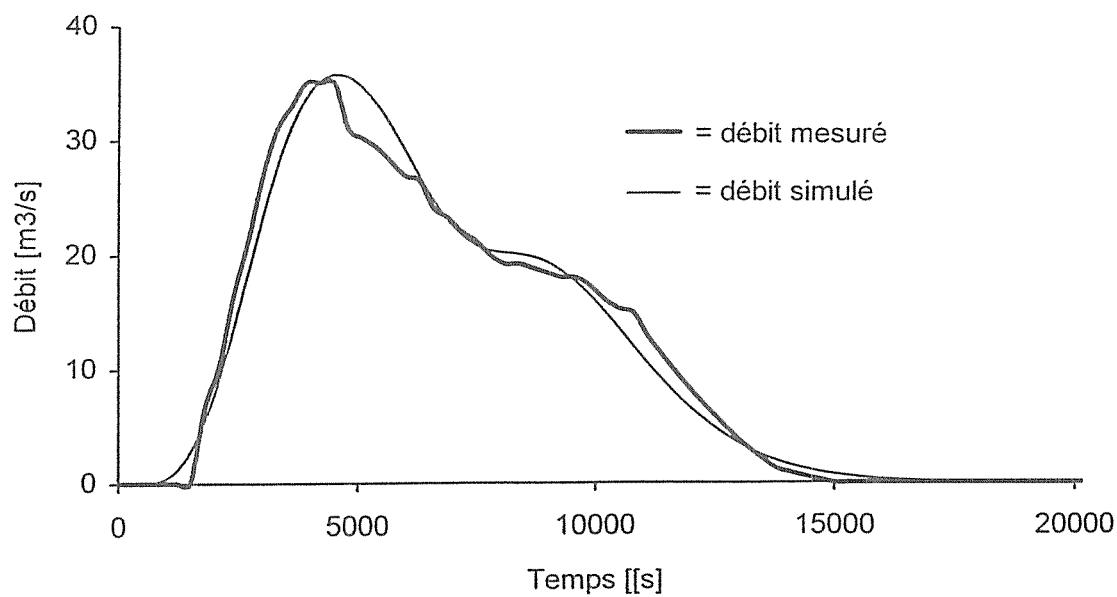
La crue du 12-09-1993, enregistrée et simulée.



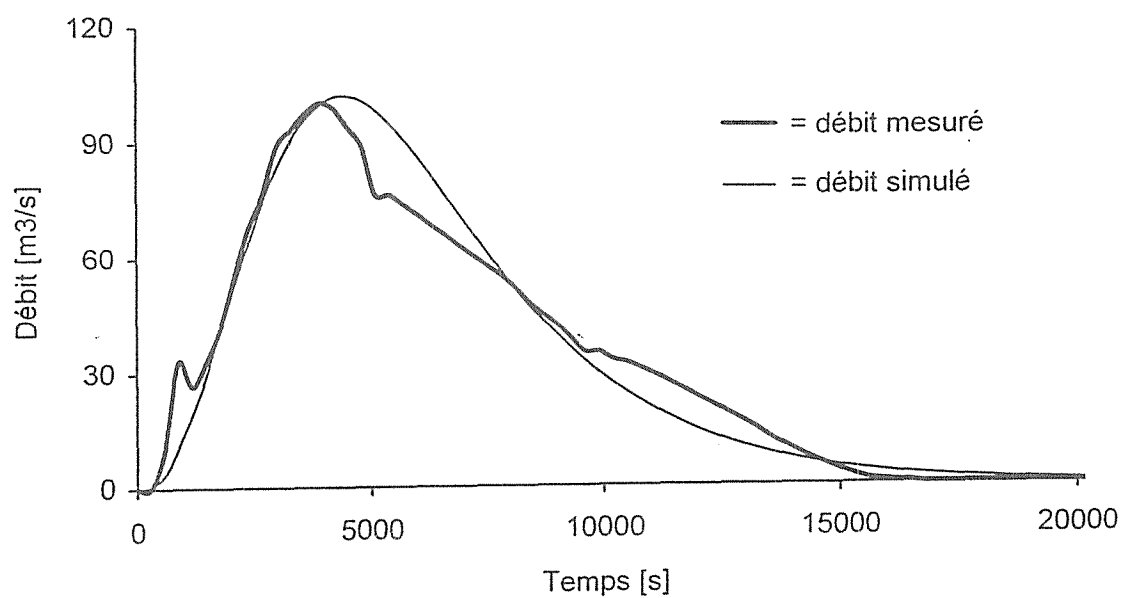
La crue du 15-08-1993, enregistrée et simulée.



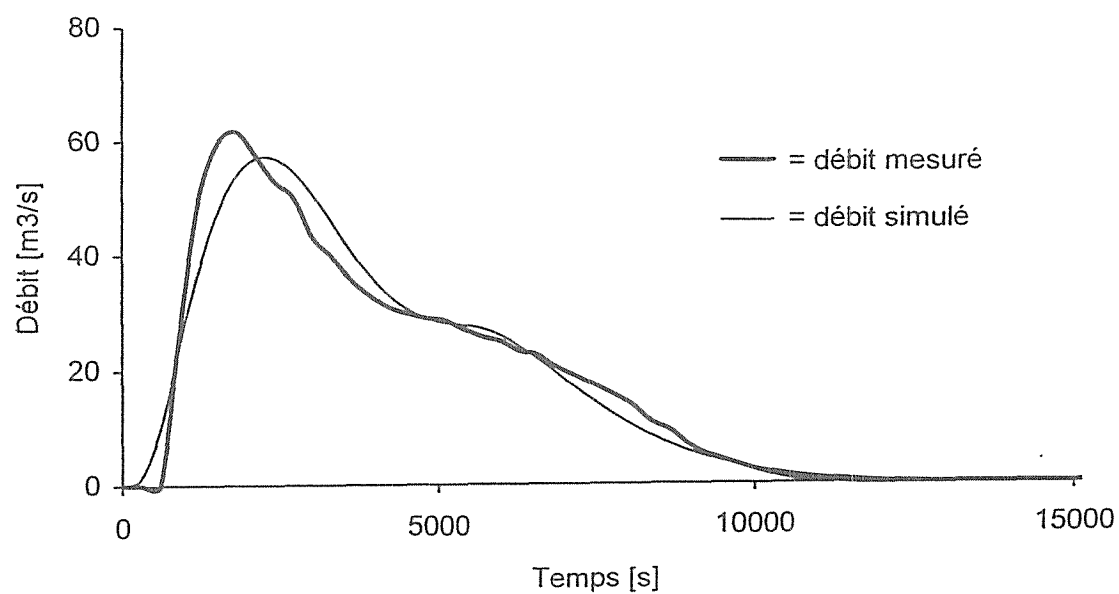
La crue du 17-08-1993, enregistrée et simulée.



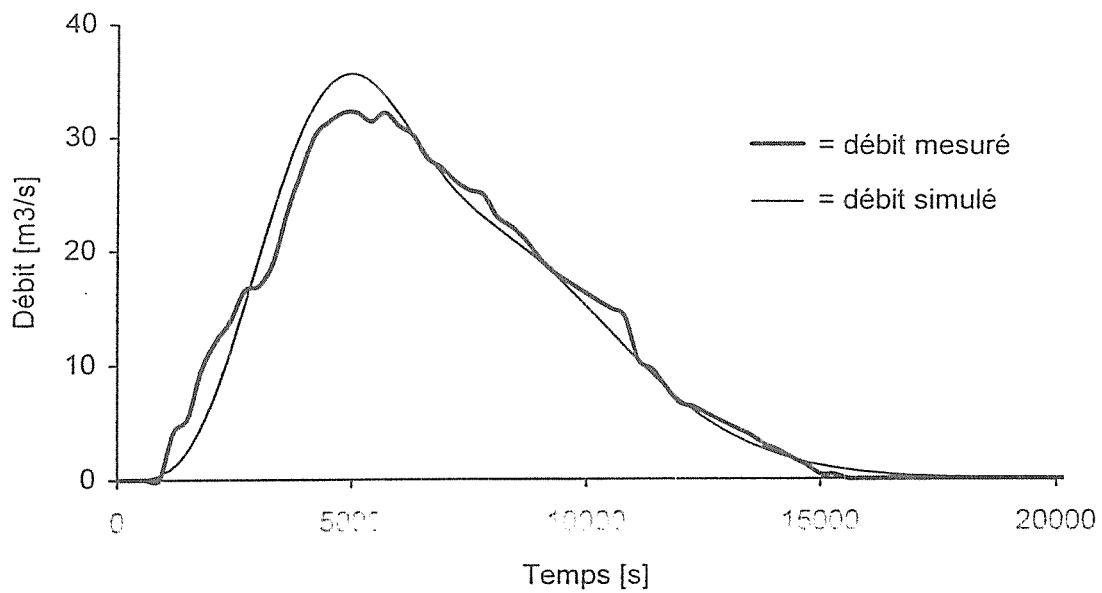
La crue du 15-07-1994, enregistrée et simulée.



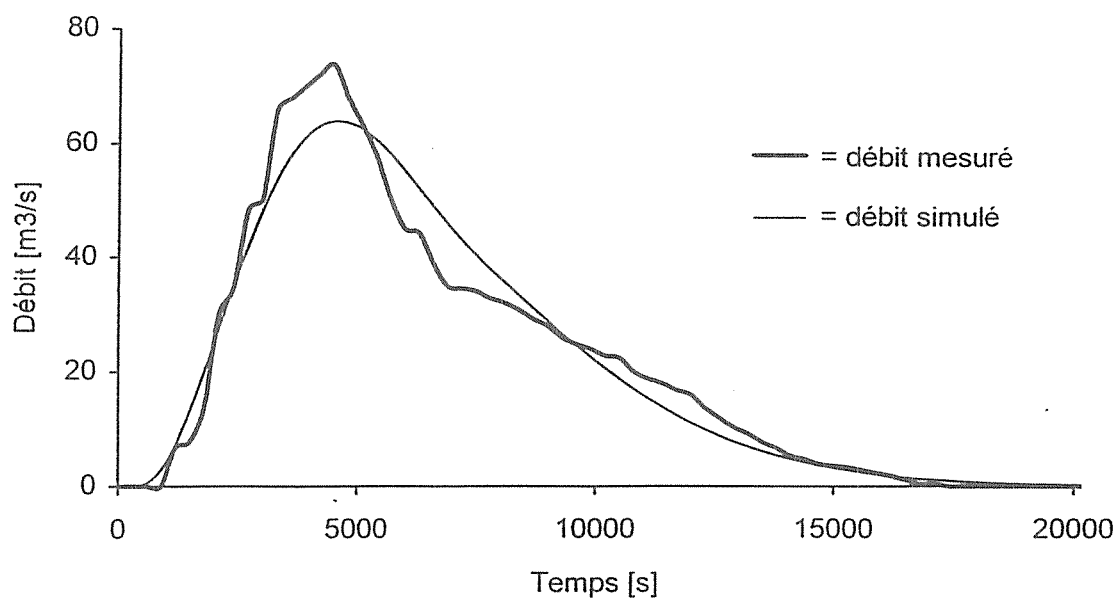
La crue du 23-07-1994, enregistrée et simulée.



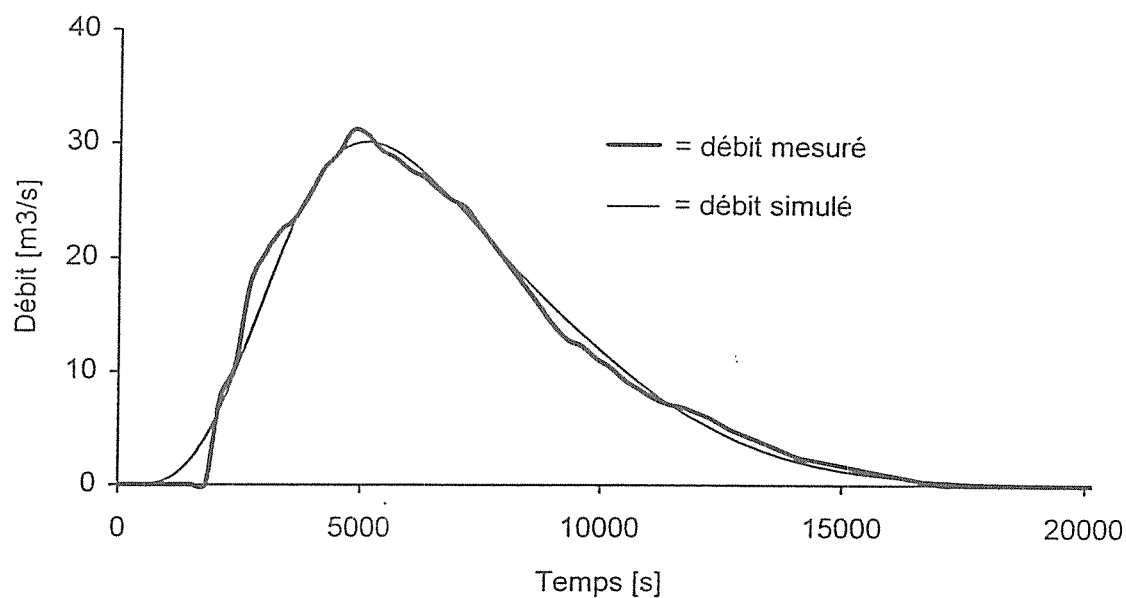
La crue du 26-07-1992, enregistrée et simulée..



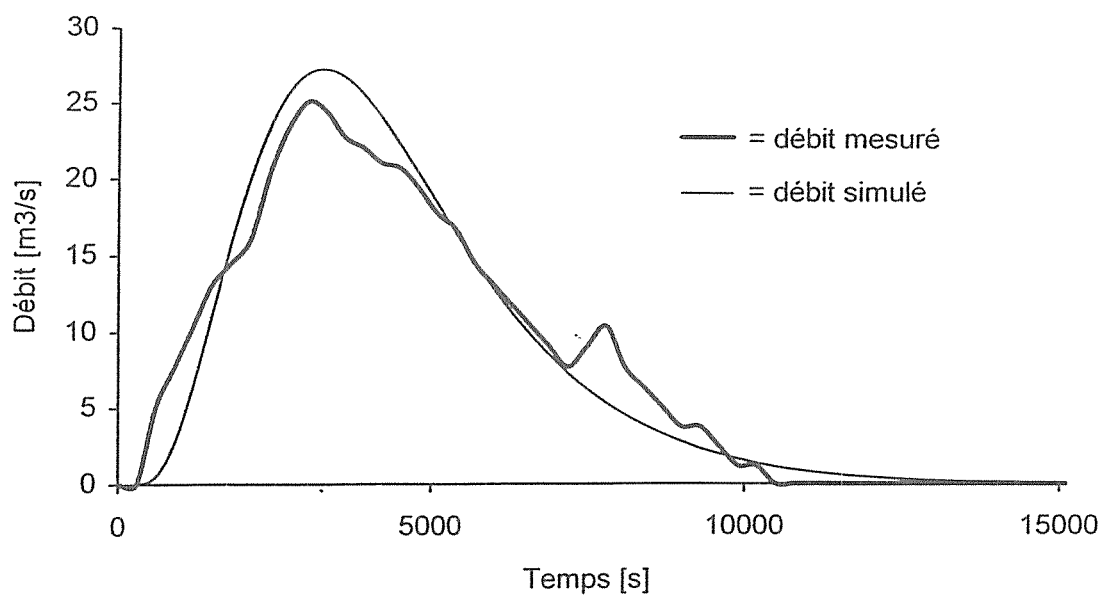
La crue du 19-08-1994, enregistrée et simulée.



La crue du 21-08-1994, enregistrée et simulée.



La crue du 01-08-1995, enregistrée et simulée.



La crue du 16-08-1995, enregistrée et simulée.

L'annexe F: la fonction Gamma.

Pour calculer $(n-1)!$ pour des valeurs de n inégales aux chiffres entières, on utilise la fonction Gamma, comme suite:

$$(n-1)! = \langle n = \langle (N+z) = (N-1+z) * (N-2+z) * \dots * (1+z) * \langle (1+z)$$

dans laquelle:

N = chiffre entiere;
 z = $0 \leq z \leq 1$;
 $\langle(n)$ = la fonction Gamma.

La fonction Gamma est tabulée. Ci-dessous nous avons présenté un résumé.

$$\langle(1,0) = 1,000$$

$$\langle(1,1) = 0,951$$

$$\langle(1,2) = 0,918$$

$$\langle(1,3) = 0,897$$

$$\langle(1,4) = 0,887$$

$$\langle(1,5) = 0,886$$

$$\langle(1,6) = 0,894$$

$$\langle(1,7) = 0,909$$

$$\langle(1,8) = 0,931$$

$$\langle(1,9) = 0,962$$

$$\langle(2,0) = 1,000$$

Alors, par exemple:

$$(1,5)! = \langle(2,5) = \langle(2,0 + 0,5) = (1,5) * \langle(1,5) = 1,5 * 0,886 = 1,33$$