



ZiE
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

**APPLICATION DU MODELE KINEROS2 POUR L'ETUDE DU
RUISSELLEMENT ET LA DEGRADATION DES TERRES AU
SAHEL. CAS DU BASSIN VERSANT DE TOUGOU AU BURKINA
FASO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT
OPTION : EAU**

Présenté et soutenu publiquement le 17 juin 2010 par

Hamza TIDJANI OUSMANE

Travaux dirigés par : Dr Harouna KARAMBIRI
Enseignant, Chercheur
UTER GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Harouna Karambiri

Membres et correcteurs : Dr Hadiza MOUSSA SALEY
Mr Lawani MOUNIROU

Promotion 2009/2010

REMERCIEMENT

Mes sincères remerciements vont particulièrement à Dr Harouna KARAMBIRI qui a bien voulu porter sa confiance en moi pour la conduite de ces travaux et qui, malgré ses multiples occupations, m'a accordé l'encadrement nécessaire à leur réussite. Je vous en suis reconnaissant.

Le laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH) et l'UTER GVEA, ont servi d'accueil et d'appui dans mes travaux, vous en êtes remerciés

La promotion 2007-2010 STE Polytech'Montpellier (France) et la promotion 2010 master II 2iE Ouagadougou (Burkina Faso), j'ai respectivement passé une année scolaire avec chacune de vous pendant mes deux années de master. Vos souvenirs me resteront en mémoire sur tout mon parcours professionnel. Mes remerciements vont aussi aux enseignants de ces deux prestigieuses écoles.

Mes parents, ma famille, je ne pourrai jamais vous remercier assez pour tous les soutiens de toute nature et tout genre que vous ne cessez de m'apporter. Merci encore.

Ma femme, tes soutiens me sont inestimables depuis qu'on est ensemble et je suis sûr que tu es prête à m'accompagner partout et dans toutes les circonstances. Je te suis vraiment reconnaissant. Mes remerciements vont aussi à mes beaux parents qui nous ont toujours soutenus.

Mes amis et frères, je ne peux pas vous oublier ici. Merci encore pour les soutiens de tous les jours.

Grace à la coopération franco-nigérienne, le gouvernement français m'a accordé la bourse d'étude de trois ans, 2ans au 2ie Ouagadougou et un an au Polytech'Montpellier. L'EGIDE qui gère ces bourses a su bien nous accompagner. Je rends un grand hommage à cette coopération et remercie l'EGIDE pour toute sa disponibilité.

RESUME

Au Sahel, la variabilité spatio-temporelle du climat et la démographie galopante se révèlent comme principales causes de modification des écoulements de surface et de dégradation des terres. Nos travaux se veulent contributifs à l'étude de ce phénomène, dans le cadre du programme AMMA. Ils se récapitulent à l'utilisation du modèle KINEROS2, un modèle distribué à base physique, pour simuler les crues et le flux de matières solides sur le bassin versant de Tougou au Nord du Burkina Faso.

Le modèle a d'abord été calé sur un sous bassin dégradé (essentiellement composé de sols nus), d'une superficie d'environ 33 ha. Pour ce faire, le bassin a été schématisé en une cascade de 13 plans et 5 chenaux. Après la détermination des paramètres d'entrée et la mise en œuvre du modèle, les procédures de calage et validation sur 9 événements averses-crues ont été effectuées. Les simulations ont donné des résultats satisfaisants avec un critère de Nash de 83% en calage et 73% en validation pour les paramètres hydrologiques. En ce qui concerne les paramètres d'érosion, les valeurs du critère de Nash sont de 64% au calage et 79% à la validation.

Les paramètres obtenus sur le sous-bassin dégradé ont été par la suite utilisées pour la mise en œuvre du modèle sur le bassin entier de Tougou d'une superficie de 24 Km². Les résultats obtenus restent encourageants, malgré les insuffisances du modèle à reproduire la réponse hydrologique bimodale du bassin.

Mots Clés :

-
- 1 - Modélisation hydrologique**
 - 2 - Ruissellement**
 - 3 - Erosion**
 - 4 - KINEROS2**
 - 5 - Sahel**
 - 6 - AMMA**
 - 7 - Variabilité climatique**

ABSTRACT

In the Sahel, climate variability and demographic growth are the main causes of hortonian runoff change and land clearing. This work has to contribute to the researches on surface water and soil degradation in partnership with the AMMA program. It resumes on using KINERO2, a physically based and distributed model, to simulate water flow and soil erosion at Tougou catchment in northern Burkina Faso.

The first step was to apply the model on degraded sub-catchment where the soil is free. We then subdivided this 33 ha sub-catchment in 13 planes and 5 channels network as well as we determined their input parameters. When the model was completed, 9 rainfall-rainoff events were used and the simulation produced a pleased result. At the hydrologic parameters setting stage, the Nash values were 83% for the setting and 73% for the validation. At the next period of erosion setting parameters, the Nash values were 64% for the setting and 79% for the validation.

Afterward, the global catchment was used. On the degraded part of this 24 Km² catchment, the parameters got from the eroded sub-catchment were kept and the simulation was done on the cultivated soil part with 10 rainfall-rainoff events. The results were satisfied in spite of the deficiency of KINEROS2 to generate a two peak's flood.

Key words:

- 1 - Hydrological modeling**
- 2 - Runoff**
- 3 - Erosion**
- 4 - KINEROS2**
- 5 - Sahel**
- 6 - AMMA**
- 7 - Climate variability**

LISTE DES ABREVIATIONS

- AMMA** : Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
- BV** : Bassin Versant
- CILSS** : Comité inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
- DES** : Dessiccation
- ERO** : Erosion
- FM** : Facteur multiplicateur
- G** : Gravillonnaire
- ha**: hectare
- KINEROS**: KINematic runoff and EROsion model
- LEAH** : Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau
- MES** : Matières en Suspension
- MNT** : Modèle Numérique de Terrain
- NTK** : Azote Total Kjeldahl
- P** : Pluviomètre
- PG** : Pluviographe
- Ph** : Potentiel hydrogène
- PIFE** : Projet Industriel de Fin d'étude
- SIG** : Système d'Information Géographique
- STE** : Sciences et Technologies de l'Eau
- t** : tonne
- USLE**: Universal Soil Loss Equation
- 2iE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

LISTE DES VARIABLES

Symbole	Signification	Unité
A	Section	m ²
C	Concentration de sédiments	m ³ /m ³
C_f	Coefficient d'érodibilité Splash	-
C_g	Coefficient de cohésion	s ⁻¹
da	Densité apparente	-
dr	Densité réelle	-
e(x,t)	Taux d'érosion	m ² /s
EQM	Ecart Quadratique Moyen	-
f_c	Infiltrabilité du sol	m/s
G	Poussée capillaire effective	mm
h	hauteur d'eau	m
I	Infiltration	mm/h
Ks	Conductivité hydraulique à saturation	mm/h
K_{USLE}	Facteur d'érodibilité du sol de USLE	-
n	Coefficient de rugosité de Manning	-
Nash	Fonction critère	-
q(x,t)	Flux d'eau à l'abscisse x et au temps t	m ³ /s/m
Q	Débit	m ³
Q_{max}	Débit maximal	m ³
SAT	Saturation	-
t	Temps	s
T_{Qmax}	Temps de débit maximal	mn
Vr	Volume ruisselé	m ³
λ	Indice de distribution des pores	-
φ	Porosité totale	m ³ /m ³
θ	Teneur en eau	m ³ /m ³

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	i
RESUME.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES VARIABLES	v
SOMMAIRE	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
I. INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 Contexte général	1
1.2 Objectif	2
II. BREVE REVUE SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	3
III. MATERIELS ET METHODES	5
3.1 Description du bassin versant de Tougou.....	5
3.1.1 Equipements de mesure	6
3.1.2 Mesures et prélèvements	7
3.2 Modélisation	7
3.2.1 Présentation du modèle KINEROS 2	7
3.2.2 Procédure de mise en œuvre du modèle.....	10
3.2.3 Mise en œuvre du modèle sur le sous bassin BV2.....	10
3.2.4 Mise en œuvre du modèle sur le bassin BV0.....	18
IV. RESULTATS	20
4.1 Modélisation du sous bassin BV2	20
4.1.1 Simulation sans calage.....	20
4.1.2 Résultats du calage des paramètres hydrologiques	21
4.1.3 Validation des paramètres hydrologiques.....	24
4.1.4 Simulation sans calage des paramètres d'érosion.....	26
4.1.5 Calage et validation des paramètres d'érosions sur BV2.....	26
4.2 Modélisation du bassin BV0.....	27
4.2.1 Calage des paramètres hydrologiques	27
V. DISCUSSION ET ANALYSES	30
5.1 Sous bassin BV2.....	30

5.1.1	<i>Paramètres hydrologiques</i>	30
5.1.2	<i>Paramètres d'érosion</i>	31
5.2	Bassin BV0	32
5.2.1	<i>Paramètres hydrologiques</i>	32
5.2.2	<i>Analyse de la forme bimodale des crues</i>	33
VI.	CONCLUSION	35
VII.	RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	36
	BIBLIOGRAPHIE	37
	ANNEXES	I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Choix des averse-crue pour la modélisation sur le BV2	11
Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres initiaux du bassin BV2	14
Tableau 3 : Paramètres initiaux des sols cultivés (Somda, 2008)	18
Tableau 4 : Evénement averse-crue du bassin BV0.....	19
Tableau 5 : Paramètres hydrologiques optimaux du modèle	21
Tableau 6 : paramètres optimaux d'érosion.....	27
Tableau 7 : Paramètres hydrologiques des sols cultivés sur BV0.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Bassin versant de Tougou (carte réalisée à partir des données de SIG Burkina)...	6
Figure 2 : Equipements du bassin de Tougou EXU : Exutoire ; P : pluviomètre ; PG : pluviographe ; PZC, PZN : parcelle expérimentale;	7
Figure 3 : Découpage d'un bassin versant : a) bassin versant initial avec le réseau hydrographique et les courbes de niveau, b) découpage en sous-bassins hydrologiques et c) représentation en un réseau de plans et de chenaux dans KINEROS2 (d'après Smith et al., 1999).	8
Figure 4 : Découpage du bassin BV2 : a) bassin initial, b) bassin découpé.....	12
Figure 5 : Principe de la procédure d'optimisation automatique pour le modèle KINEROS2 (Karambiri, 2003)	16
Figure 6 : Simulation sans calage : 1) Volume ruisselé (V_r), 2) Débit maxi (Q_{max}), 3) temps de débit maxi ($T_{Q_{max}}$).....	20
Figure 7 : Hydrogrammes de crues observés-simulés en calage avec les 5 événements crues-averses sur le BV2	22
Figure 8 : Valeurs observées et simulées au calage hydrologique avec V_r : Volumes ruisselés, Q_{max} : débits maximaux et $T_{Q_{max}}$: instants des débits observés	23
Figure 9 : Hydrogrammes de crue observée-simulée à la validation avec les quatre événements crues-averses sur le BV2.....	24
Figure 10 : Valeurs observées et simulées à la validation hydrologique avec V_r : Volumes ruisselés, Q_{max} : débits maximaux et $T_{Q_{max}}$: instants des débits observés	26
Figure 11 : Simulation sans calage des paramètres initiaux d'érosion sur BV2	26
Figure 12 : Calage et validation des paramètres d'érosion sur BV2.....	27
Figure 13: Hydrogrammes des 5 crues de calage des sols cultivés sur BV0	29
Figure 14: BV0 : Aspect bimodal des crues	33

I. INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte général

Le Sahel désigne la bande semi aride subsaharienne d'Afrique située entre la zone saharienne au nord et la zone soudanienne au sud. Il marque la transition à la fois floristique et climatique des deux zones. C'est un espace allant du Tchad au Cap-Vert et couvrant une superficie de 5,4 millions de km² pour une population supérieure à 50 000 000 d'habitants (Agora Encyclopédie, 1998). Cette population se caractérise par l'un des plus forts taux d'accroissement démographique au monde. Il a passé de 1,5% en 1950 à 3% en 1990, ce qui a multiplié la population de la zone par 2 à 3 fois sur cette période (Raynaut, 2001)

Communément appelé sud du Sahara, le Sahel est marqué par une forte variabilité spatio-temporelle du climat. C'est une zone en proie à la sécheresse et à une désertification qui connaît une progression inexorable. Plusieurs études se concordent sur les impacts de la variabilité climatique sur la pluviométrie et les ruissellements dans cette partie d'Afrique. Ainsi, depuis les années 1970, les changements climatiques ont conduit entre autres à une baisse générale de la pluviométrie moyenne d'environ 15% à 30% selon la zone, et une diminution des ressources en eau de surface au niveau des principaux bassins de 40 à 60 % (CILSS, 2010). Le déficit pluviométrique annuel dans la zone de Burkina Faso, Côte d'Ivoire et Mali varie entre 10% et 40%, alors que les débits moyens annuels présentent un déficit supérieur à 20% et dépasse quelque fois 60% (Ouedraogo, 2001).

Malgré cette baisse de la pluviométrie, on observe une forte dégradation des terres dans la zone sahélienne et une augmentation significative de ruissellement sur les petits bassins. Dans la partie Sud-ouest du Niger, un model distribué à base physique a montré que la dégradation des terres a multiplié les ruissellements par trois fois sur un petit bassin de 2 km² alors que la pluviométrie a diminué d'un facteur 2 entre 1952 et 1992 (Favreau, et al., 2009). Tous les cours d'eau sahéliens ont vu leurs débits augmenter, depuis le début de la sécheresse au Sahel en 1968 [...] ; ceci est observé dans les bassins de la volta et du Niger, mais aussi du Sénégal (Descroix, et al., 2009). L'un des grands facteurs induisant ce phénomène est la croissance rapide de la population dont la conséquence est la forte pression anthropique sur le sol. En effet l'accroissement démographique est principalement supporté par une augmentation des surfaces cultivées au détriment des savanes naturelles (Reenberg, Louring-Nielsen, & Rasmussen, 1998). Justement, Favreau et al (2009) lient ce paradoxe à la transformation des savanes naturelles en champs de culture dont la surface a été multipliée par

6 depuis 1950. Ce qui dépouille les versants qui, à leurs tours, augmentent le ruissellement hotonien. C'est cette augmentation des écoulements en dépit de la baisse des précipitations qu'on appelle « le paradoxe du Sahel » (AMMA-CATCH, 1982).

Face à ces défis, nombreuses études sont menées, d'une manière ou d'une autre, par des organismes internationaux, des institutions de recherche-développement et des établissements d'enseignements et de recherche pour mieux comprendre les phénomènes et surtout apporter des solutions adéquates.

C'est le cas notamment la présente étude qui se situe dans le cadre du programme Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine (AMMA). Il s'agit de modéliser les ruissellements et les flux de matières solides sur le Bassin versant de Tougou au Nord du Burkina Faso. Là aussi, les problèmes d'érosion et de fertilité sont prépondérants du fait d'une densité de population rurale élevée et de la très forte pression agricole sur les terres, et d'un état de dégradation avancé de la surface du sol dans un environnement sahélien fragile (Mahé, 2006) (Mahé, 2006). Le modèle KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion model) est utilisé à cet effet. Il s'agit d'un modèle mathématique distribué à base physique, orienté pour les épisodes pluvieux, décrivant les processus d'interception, d'infiltration, de ruissellement et d'érosion à partir de petits bassins versants agricoles et urbains durant un événement pluvieux (Jaoued, Gueddari, & Saadaoui, 2005).

1.2 Objectif

L'objectif principal de cette étude est la modélisation des flux d'eau et de matières sur le bassin versant de Tougou avec le modèle KINEROS2. Il s'agit, dans les mesures de possible, de calibrer ce modèle à la réponse hydrologique et d'érosion de ce bassin à travers les observations expérimentales réalisées depuis 2004.

Le calage et la validation du modèle sur le bassin de Tougou permettra à court terme de simuler des crues et estimer les quantités de terre susceptibles d'être dégradées à l'issue des événements pluvieux définis. Ceci servira, à long terme, d'outils d'aide à la gestion terres et des sols sur le bassin de Tougou voire sur d'autres bassins similaires non jaugés de la zone sahélienne.

II. BREVE REVUE SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Le bassin versant est considéré depuis longtemps, comme l'unité spatiale la plus cohérente pour la compréhension des flux d'eau et de sédiments sur la surface continentale (Nord, 2006). Ainsi, un modèle hydrologique est une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un bassin versant en vue de décrire, expliquer et/ou prévoir son comportement hydrologique. Cette représentation regroupe un ensemble d'équations mathématiques appelées à reproduire la réponse du bassin versant.

La modélisation s'est beaucoup développée ces dernières années avec l'émergence de plusieurs modèles hydrologiques. Il y a presque autant de modèles que d'hydrologues (Ambroise, 1998). Toutefois, tous les modèles n'ont pas les mêmes formes et fonctions. Ils sont développés en fonction des besoins et des données disponibles. De ce fait, nombreux sont les chercheurs qui ont tenté de dresser une typologie des modèles hydrologiques en fonction de l'espace (global/distribué), le temps (continu/événementiel), le processus (empirique/conceptuel) etc. Par exemple Refsgaard (2007) a classé les modèles selon la description des processus physiques en tant que conceptuels ou physiques et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant, en tant que globaux ou distribués. En effet un modèle à bases physiques est un modèle dont les équations décrivent les phénomènes physiques (conservation de masse, énergie...) et utilise des paramètres de sens physiques, tandis que le modèle conceptuel traduit le bassin en une cascade de réservoirs d'humidité. Le modèle distribué, quant à lui, modélise le bassin en de petits éléments, dans le but de tenir compte de l'hétérogénéité spéciale du bassin versant, au moyen de mailles ou entités, régulières ou non (Boudhra, 2007); alors que le modèle global s'applique globalement sur l'ensemble du bassin avec des variables indépendantes de l'espace.

D'ailleurs, la modélisation hydrologique ne se limite pas aux écoulements. Souvent, les modèles hydrologiques intègrent certains phénomènes naturels sur le bassin versant comme le flux des matières solides, des solutés, des polluants etc. Ambroise (1998) indique que de nombreux problèmes environnementaux nécessitent l'élaboration de modèle couplant les flux hydriques aux flux d'énergie ou de matière (sédiments, solutés, biomasse).

Pour ce qui est des transports solides, plusieurs modèles ont été développés. Parmi ces modèles on peut citer entre autres WEPP (Foster, 1982 ; Foster et al., 1995), EROSION 3D (Schmidt, 1991), LISEM (De Roo et al., 1996), EUROSEM (Morgan et al., 1998), KINEROS (Smith et al., 1995), AGWA (Scott et al., 2006).

Le modèle KINEROS est adapté à l'étude des processus de ruissellement et d'érosion dans les zones arides. Il a en effet servi d'outils de modélisation des écoulements et flux de matières solides dans plusieurs études. On peut citer entre autres :

- ✓ Modélisation numérique des écoulements de surface et d'érosion couplée au Système d'Information Général (SIG) sur le bassin de la rivière Pirapama au Brésil par Augusto et al. (2002) ;
- ✓ L'application du modèle KINEROS sur les bassins arides et semi- arides d'Oman par Al-Qurashi et al. (2008) ;
- ✓ Utilisation du modèle KINEROS pour la détermination des écoulements sur le bassin de Sumpil en Indonésie par Bisri et al. (2004)
- ✓ Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued M'Khachbia, Nord-Ouest de la Tunisie par Jaoued et al. (2005) ;
- ✓ Etude et Modélisation des flux d'eau et de matières sur le Bassin de Katchari au Burkina Faso par Karambiri (2003).

III.MATERIELS ET METHODES

3.1 Description du bassin versant de Tougou

D'une superficie totale 37 km², le bassin versant de Tougou est un sous bassin de la rivière Nakambé. Il se situe dans le département de Namissiguima, province de Yatenga dans la partie sahélienne du Burkina Faso (*Figure 1*). Le village de Tougou dont le bassin porte le nom, est à environ 23 km de Ouahigouya, 3^{ème} ville administrative du Burkina Faso, sur l'axe Ouahigouya - Titao. Deux autres villages sont englobés par le bassin, notamment Basneré dans la partie amont et Faogodo au centre. Tout comme les autres zones sahéliennes, la pluviométrie se caractérise par une forte variabilité spatio-temporelle avec une moyenne interannuelle de 522,5 mm sur la période 1960-2006. C'est aussi l'un des principaux bassins versants qui alimentent le barrage de Tougou. Son réseau hydrographique est constitué principalement de rigoles et ravines organisées autour d'une rivière principale dénommée Bilampouanga dont le drainage n'excède pas le mois d'octobre. La végétation, quant à elle, se range dans trois catégories de formation végétale qui sont : la savane, la steppe arbustive et la steppe arborée (Somda, 2008).

Les états de surface du bassin de Tougou révèlent deux types de sol. Les sols cultivés et les sols nus. Les sols cultivés occupent la plus grande partie (78%). Les cultures pluviales y sont pratiquées par la population de la zone. Les sols nus quant à eux occupent le reste du bassin (22%). Ces types de sols présentent trois types de croûtes selon la typologie de Casenave et Valentin (1989) : les croûtes gravillonnaires (G), les croûtes de dessiccations (DES) et les croûtes d'érosion (ERO).

Le bassin versant de Tougou comprend deux sous-bassins BV1 (Baogo-Pooré) et BV2 (Faogodo). Le sous-bassin BV1, d'une superficie d'environ 6 ha est constitué de sols cultivés et le sous-bassin BV2 d'environ 33 ha est composé de sols nus. Le bassin BV0 et les deux sous bassins BV1 et BV2 sont équipés, depuis 2004 pour le suivi des paramètres hydrométéorologiques, hydrodynamiques, physico-chimiques et d'érosion.

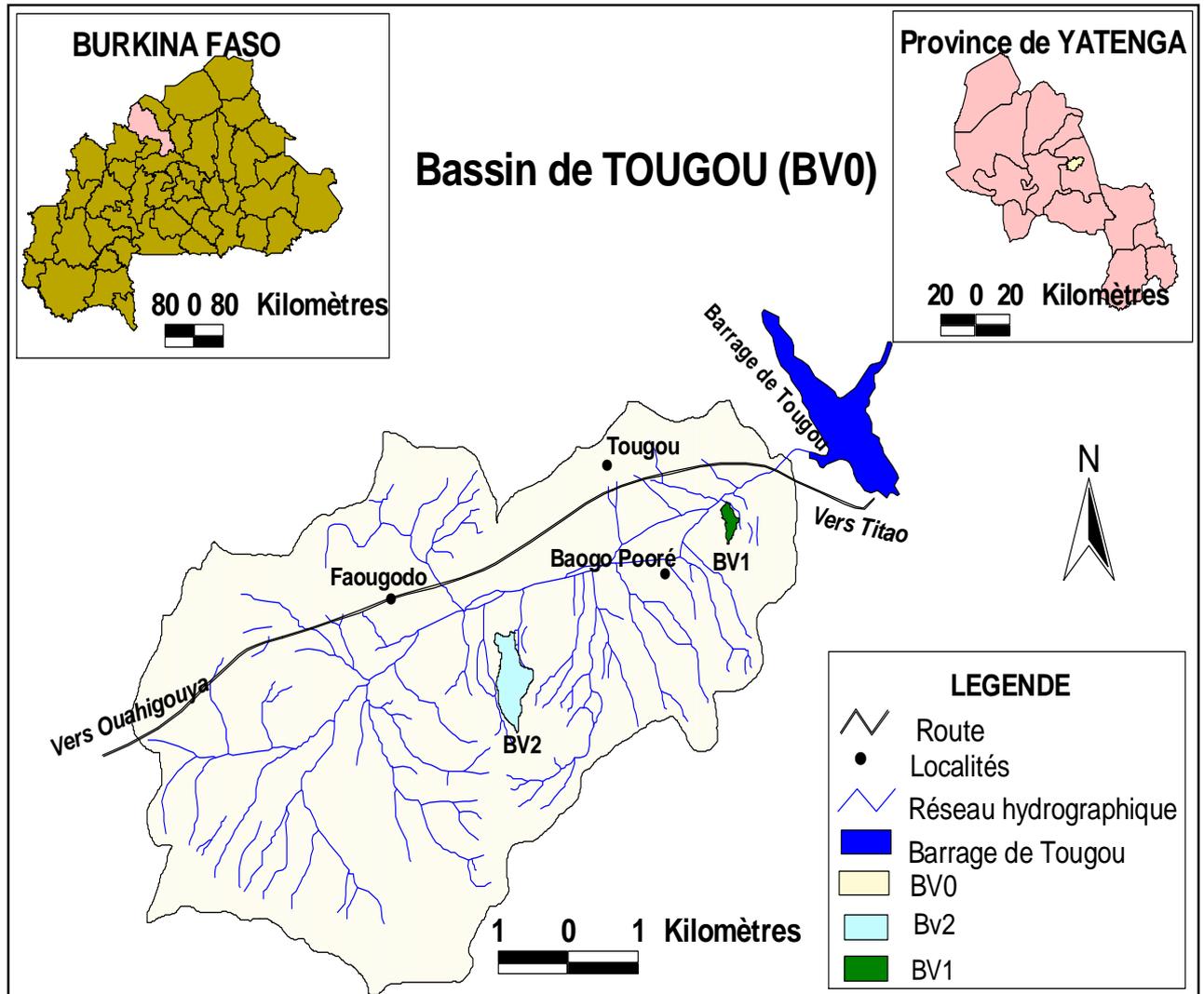


Figure 1 : Bassin versant de Tougou (carte réalisée à partir des données de SIG Burkina)

3.1.1 Equipements de mesure

Chacun des trois (3) bassins est équipé d'appareillages de mesure de pluie (pluviomètres et pluviographes) et de débit (thalimèdes et limnimètres). Une station météorologique de type Campbell est aussi installée à l'exutoire du BV0 pour les mesures de température, humidité relative et direction du vent et un bac de classe A pour la mesure de l'évapotranspiration. L'emplacement des équipements est illustrée à la *Figure 2* et la description à l' *Annexe 1* : .

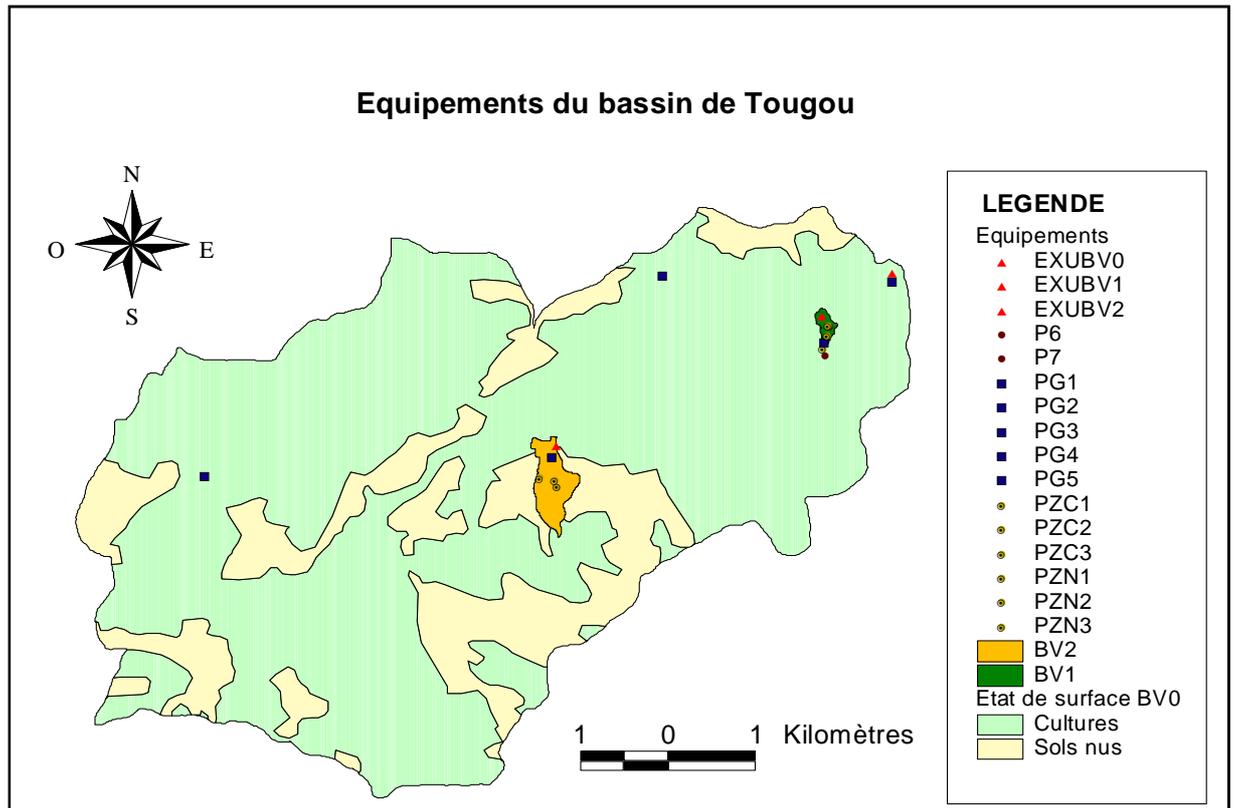


Figure 2 : Equipements du bassin de Tougou EXU : Exutoire ; P : pluviomètre ; PG : pluviographe ; PZC, PZN : parcelle expérimentale;

3.1.2 Mesures et prélèvements

Depuis 2004, une campagne de mesures est réalisée chaque année, en saison pluvieuse et les données recueillies servent à alimenter la base de données du bassin de Tougou. Il s'agit entre autres de la pluie journalière et pluie instantanée, les débits instantanés, les jaugeages, les hauteurs limnimétriques, les infiltrations, l'évaporation, les stocks d'eau dans le sol. Des prélèvements sont aussi effectués pour ensuite déterminer les matières en suspension (MES) et les paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité, éléments majeurs). Les données d'entrée du modèle sont tirées de cette base de données. Celles qui manquent ont été adaptées d'études similaires et de la littérature.

3.2 Modélisation

3.2.1 Présentation du modèle KINEROS 2

Cette partie est un résumé de la description détaillée tirée de Smith et al. (1995) et du site internet <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>.

Le modèle KINEROS (Kinematic runoff and erosion model) a été conçu en 1990, dans sa version initiale, par Woolhiser et al.. En 1995 Smith et al., développent la 2^{ème} version sous l'appellation KINEROS2. C'est un modèle mathématique distribué à base physique, capable de simuler, par événement, les processus d'interception, d'infiltration, de ruissellement de surface et d'érosion sur des petits bassins versants ruraux et urbains. Il considère le bassin versant comme une cascade de plans rectangulaires et chenaux trapézoïdaux de l'amont à l'aval. Le passage du bassin réel au bassin schématisé conserve le plus possible toutes les caractéristiques géométriques de terrain (pentes, sens d'écoulement, superficies, dispositions spatiales, etc.). Ceci se fait dans un premier temps en fonction du réseau hydrographique du bassin et chaque tronçon du réseau se retrouve avec des plans amont et latéraux. Ensuite, ces plans sont découpés en fonctions des états de surface pour conservés des plans homogènes (Figure 3). Ainsi les paramètres physiques de chacun des éléments du réseau constitué doivent être entrés dans le modèle.

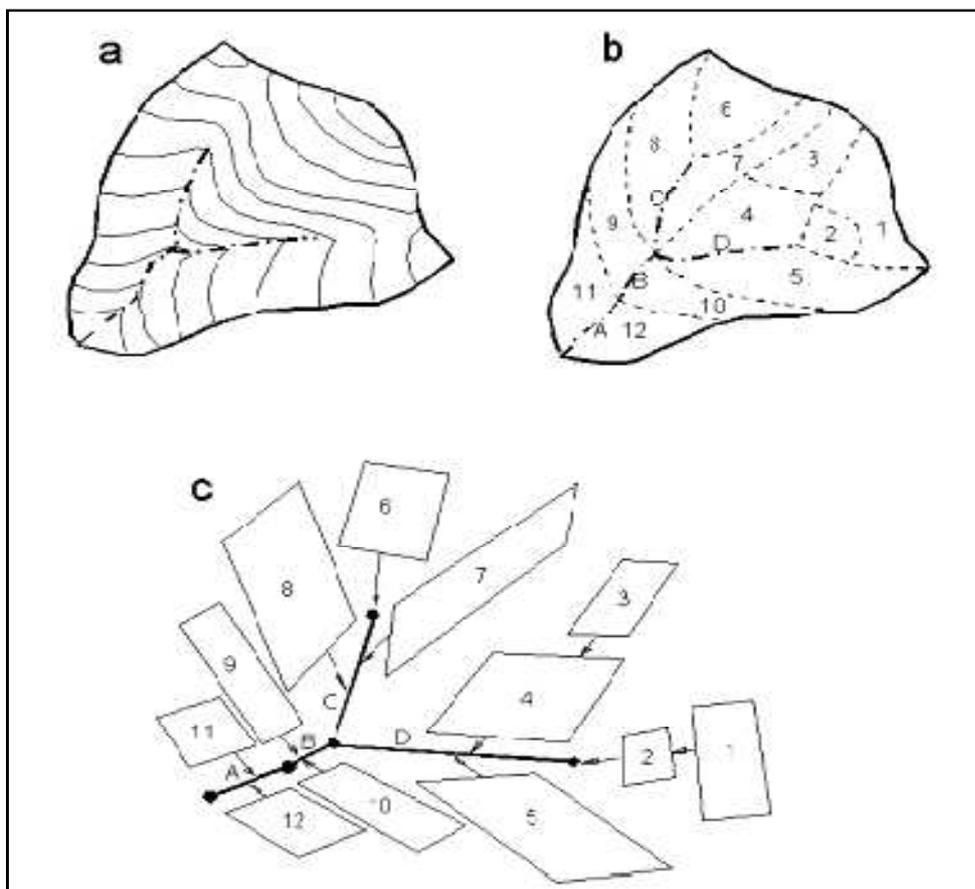


Figure 3 : Découpage d'un bassin versant : a) bassin versant initial avec le réseau hydrographique et les courbes de niveau, b) découpage en sous-bassins hydrologiques et c) représentation en un réseau de plans et de chenaux dans KINEROS2 (d'après Smith et al., 1999).

Sur chaque élément (plan ou chenal), KINEROS2 détermine les caractéristiques physiques notamment l'écoulement, la détention de surface, l'infiltration et l'érosion en fonction des données et paramètres d'entrés. Pour cela des équations mathématiques à base physiques sont utilisées comme suit :

- L'équation de continuité pour le ruissellement hortonien sur les plans et le transfert d'eau dans les chenaux :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (2.2)$$

Où h est la hauteur d'eau par unité de largeur, Q le débit unitaire, A la section mouillée, t le temps, x la distance, $q(x, t)$ le flux net d'eau entrant.

- L'équation de l'infiltrabilité (fc) d'un sol mono-couche en fonction de la conductivité hydraulique à saturation (K_s), la poussée capillaire effective (G), la porosité (ϕ), l'index de distribution de la dimension des pores (λ) et la lame d'eau infiltrée cumulée (I)

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\alpha}{e^{(\alpha I/\beta)} - 1} \right] \quad (2.3)$$

Où α est un paramètre dépendant du sol, pris généralement égal à 0,85 et B un paramètre défini par :

$$B = (G + h_w)(\theta_s - \theta_i) \quad (2.4)$$

Avec h_w hauteur d'eau en surface, θ_i et θ_s teneur en eau initial et à saturation respectivement.

B combinant les effets de la poussée capillaire effective (G), de la hauteur d'eau en surface h_w , et de la capacité de stockage unitaire ($\Delta\theta$) avec $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i)$ tandis que le paramètre α représente le type de sol.

- L'équation de bilan de masse dynamique pour la détermination de l'érosion

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q(x, t)c(x, t) \quad (2.5)$$

Avec A la section mouillée, C_s la concentration locale de sédiment correspondant au débit Q , $e(x, t)$ le taux d'érosion ou de dépôt en surface et $q(x, t)$ le débit d'eau contributif latéral avec la concentration en sédiment $c(x, t)$.

Le taux d'érosion e est constitué de l'érosion par effet splash et l'érosion par le ruissellement de surface qui met en jeu les forces de cisaillement de l'écoulement (entraînement des particules de sol) et la tendance des particules à se déposer sous l'action de la force de gravité.

3.2.2 Procédure de mise en œuvre du modèle

Pour caler et valider convenablement le modèle KINEROS2 en termes de flux d'eau et de matières solides, on a besoin de données "propres" et simultanées de pluie, débit, matières solides et caractéristiques physiques du sol sur les bassins concernés, en fonction des objectifs et données disponibles. C'est ainsi qu'après la prise en main du programme KINEROS2 et un parcours des études similaires, nous procéderons à la détermination des paramètres physiques d'entrée du modèle. Nous passerons ensuite à la mise en œuvre du modèle sur le sous bassin BV2 en vue de déterminer les paramètres physiques du sol nu et simuler les crues et matières solides. Puis, nous poursuivrons avec la détermination des paramètres physique du sol cultivé sur le bassin BV0 tout en conservant les paramètres du sol nu obtenus sur BV2. Nous passerons enfin à l'analyse de la bimodalité de la réponse hydrologique du bassin BV0. Une conclusion suivra et des recommandations clôtureront l'étude.

3.2.3 Mise en œuvre du modèle sur le sous bassin BV2

La modélisation s'effectuera en trois (étape) : calage des paramètres, optimisation des résultats et validation du modèle avec les paramètres calés.

a) Choix des évènements averses-crues

Compte tenu des données disponibles sur le sous bassin BV2, nous avons choisi neuf (9) événements averse-crue à répartir entre le calage et la validation.

Comme, le transport des matières solides est important lorsque la crue est grande, le calage des paramètres hydrologiques se fera sur la première moitié des événements aux plus fortes crues et la validation sur l'autre moitié. Ainsi sur les 9 événements, les cinq (5) premiers serviront au calage et les quatre (4) autres à la validation. Pour ce qui est du calage des paramètres d'érosion, une configuration homogène des événements sera adoptée pour éviter une double surestimation de ceux-ci qui dépendent essentiellement des paramètres hydrologiques. (*Tableau 1*)

Tableau 1 : Choix des averse-crue pour la modélisation sur le BV2

	Hydrologie			Erosion		
	Date	Pluie moyenne (mm)	Q _{max} (m ³ /s)	Date	Q _{max} (m ³ /s)	MES (Kg)
CALAGE	06/10/2006	37	6,52	19/07/2006	2,35	46007.210
	04/08/2006	59	4,134	15/09/2006	1,962	46071.546
	22/08/2006	53,5	4,134	18/09/2006	0,550	31596.642
	19/07/2006	31,5	2,35	06/10/2006	6,52	17493.705
	15/09/2006	13	1,962	27/10/2006	0,960	5695.695
VALIDATION	12/09/2006	14	1,087	11/08/2006	0,478	7620.660
	27/10/2006	12,5	0,960	12/09/2006	1,087	1150.327
	18/09/2006	8,5	0,550	22/08/2006	4,134	1794.318
	11/08/2006	8,5	0,478	04/08/2006	4,134	2060.574

b) Schématisation du BV2

Le sous bassin BV2 est constitué majoritairement de sols nus qui se regroupent en trois (3) états de surfaces superficielles : croûte gravillonnaire (G), croûte d'érosion (ERO) et croûte de dessiccation (DES). Des parcelles expérimentales de 1 m² sont placées sur chacune de ces croûtes pour déterminer leurs caractéristiques physiques. Toutefois une cartographie de ces états de surfaces n'est pas disponible (étude en cours). Pour cela, nous adoptons, sur l'ensemble du bassin BV2, un état de surface homogène, « sol nu dégradé », qui aura des caractéristiques moyennes aux trois (3) états de surface mentionnés. Ainsi le découpage du bassin BV2 se fera en fonction du réseau hydrographique (*Figure 4*).

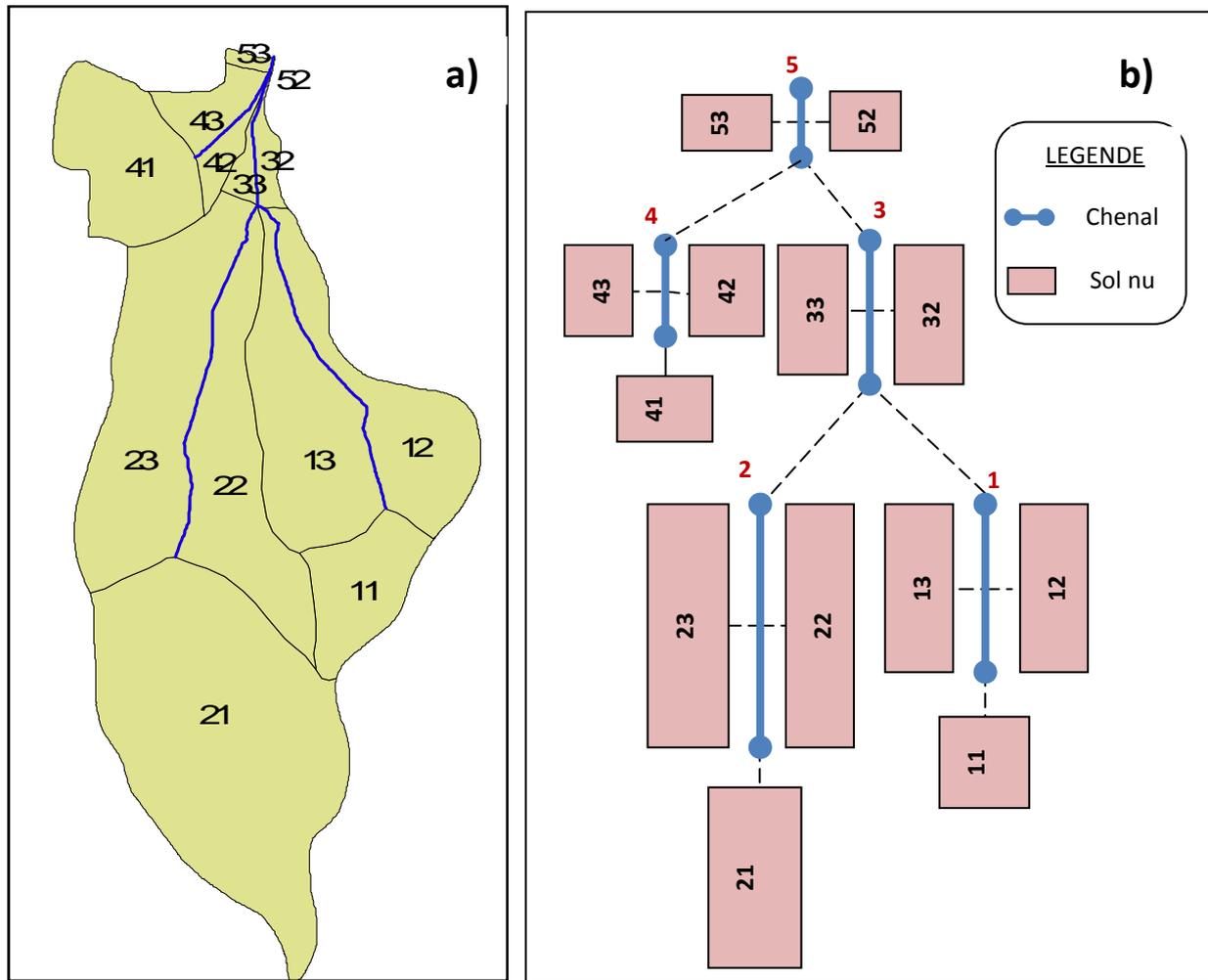


Figure 4 : Découpage du bassin BV2 : a) bassin initial, b) bassin découpé

c) *Paramétrisation du modèle*

Les paramètres du modèle sont tirés de la base de données des mesures du terrain. Ceux qui font défaut ont été adaptés soit des mesures du bassin de Katchari (Karambiri, 2003) dont les propriétés sont similaires à celles du BV2, soit tirées de la littérature.

Paramètres communs

Trois (3) classes de sédiments ont été considérées à savoir argile, limon et sable. Leurs taille moyennes sont respectivement de 0,001 mm ; 0,026 mm et 1,025 mm (Mermoud, 2008). Les densités moyennes respectives sont 2,52 ; 2,57 et 2,80. La proportion de ces particules dans le sol, adapté de celle du bassin de Katchari (Karambiri, 2003), sont de 17,8%, 30,3% et 51,9%. La température moyenne des eaux ruisselées est de 29°C.

Paramètres liés aux plans

- Les dimensions (longueurs et largeurs), les pentes et la micro topographie des plans rectangulaires sont tirés du modèle numérique de terrain (MNT) des versants à l'aide des logiciels Surfer et ArcView (Voir Annexe 2:).
- La conductivité hydraulique à saturation (Ks) moyenne du sol, tirée des résultats expérimentaux est de 3,3 mm/h.
- La poussée capillaire effective (G) et l'indice de distribution des pores (λ) sont tirés des résultats de Rawls et al (1982), données par le manuel du modèle KINEROS. Ils sont respectivement de 77 mm et 0,35 correspondant au sol argilo-sableux.
- La porosité totale (ϕ) est de 0,44. Elle est déterminée par $\phi = 1 - da/dr$ où da , la densité apparente moyenne du sol, est de 1,49 (donnée expérimentale) et dr , la densité réelle moyenne d'un sol, est de 2,65 (Compaoré, 2005).
- La Saturation relative initiale (SAT) est déterminée avant chaque épisode pluvieux (donnée expérimentale).
- Le coefficient de rugosité de Manning (n) est tiré des travaux de Woolhiser (1975). Il est de 0,022 correspondant à un sol argileux, érodé.
- Le coefficient de cohésion (Cg) : Foster et Smith (1984) estiment ce paramètre en fonction du facteur d'érodibilité de sol (K_{USLE}) et du pourcentage d'argile (f_{cl}), par

$$C_g = 5,6 \times K_{USLE} \times \phi_r / a_T$$

avec

- $a_T = 188 - 468 \times f_{cl} + 907 \times f_{cl}^2$ si $f_{cl} < 0,22$
- ou $a_T = 130$ si $f_{cl} > 0,22$

- K_{USLE} : Facteur d'érodibilité du sol de USLE (Universal Soil Loss Equation)
- ϕ_r : Facteur de résistance à l'érosion due aux pratiques d'aménagement (0 à 1)

Le pourcentage moyen d'argile est de 0,178, K_{USLE} donné par le manographe d'érodibilité de sol de USLE (Annexe 4) en fonction du pourcentage des particules, de la structure du sol et de la perméabilité est de 0,47 et $\phi_r = 1$ (sol nu).

Ce qui donne un Coefficient de cohésion (Cg) de **0,02**.

- Le coefficient d'érodibilité splash du sol (c_f) : Selon Foster et al (1983),

$$C_f = 422 K_{uste} \phi_f$$

avec

\emptyset_f : Facteur adimensionnel représentant la réduction de l'érosion Splash par le paillage du sol (varie de 0 à 1). Sol nu, donc $\emptyset_f = 1$

Le coefficient d'érodibilité splash du sol (cf) est donc de **198,3**.

Paramètres liés aux chenaux

- Une largeur de **1 m** est adoptée pour les chenaux du sous bassin BV2 qui sont de type 1 et 2 selon la classification de Strahler (*Annexe 3*) réalisée par Somda (2008).
- L'infiltration est négligée dans les chenaux, en se rapportant aux travaux de Descloitres (2003) à Katchari. La conductivité hydraulique (Ks) est donc nulle.
- Le coefficient de rugosité de Manning est pris égal à 0,025 selon Lancaster (2008) pour les terres en mauvaises états.
- L'érodibilité par effet Splash est négligée dans les chenaux et le coefficient de cohésion est considéré identique à celui des versants.

Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres initiaux du bassin BV2

Désignation	Notation	Valeurs		Unité	Méthode d'acquisition
		Plans	chenaux		
Conductivité hydraulique à saturation	Ks	3,3	0	mm/h	Mesure de terrain
Poussée capillaire effective	G	77	-	mm	(Rawls et al., 2000)
Indice de distribution des pores	λ	0,35	-	-	(Rawls et al., 2000 ; Karambiri, 2003)
Porosité totale	ϕ	0,44	-	m ³ /m ³	Mesure de terrain
Coefficient de rugosité de Manning	n	0,022	0,025	-	(Woolhiser, 1975 ; Lancaster, 2008)
Coefficient de cohésion	Cg	0,02	0,02	-	(Foster et Smith, 1984)
coefficient d'érodibilité Splash	Cf	198,3	0	-	(Foster et al, 1983)

d) Calage des paramètres hydrologiques

Le calage est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètre du modèle qui consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètre pour reproduire au mieux la réponse observée (Gnouma, 2006). Un critère d'arrêt du processus doit être défini pour assurer l'optimisation de la réponse.

Le modèle KINEROS2 donne la possibilité de caler dans un premier temps, trois (3) paramètres du régime hydrologique à savoir la conductivité hydraulique à saturation (Ks), le coefficient de rugosité de Manning (n) et la poussée capillaire effective (G). Par la suite, les paramètres d'érosion sont calés en fonction des paramètres d'écoulements préalablement obtenus. Les paramètres sont calés pour chaque élément (plans et chenaux) du bassin décomposé à travers une simulation offerte par le modèle, permettant d'introduire un facteur multiplicateur (FM) pour chaque type de paramètre. Ainsi à chaque étape de la simulation, les résultats obtenus avec les nouveaux paramètres issus de la multiplication des ceux de l'étape précédente par les facteurs choisis sont comparés aux données expérimentales. Ils sont conservés s'il y a convergence ou le cas échéant, l'étape suivante est abordée.

Cependant cette procédure reste très fastidieuse avec KINEROS2 car le nombre d'étapes avant convergence reste souvent très grand. C'est ainsi qu'un programme nommé KINAUTO a été développé et couplé au modèle KINEROS2 par Karambiri (2003), en vue non seulement d'automatiser les étapes de la simulation mais aussi de calculer les fonctions critères d'optimisation des résultats. Ce programme est conçu pour définir une plage de variation et un pas de parcours pour chacun des paramètres. Ainsi le programme balaye les plages des différents paramètres et réalise toutes les combinaisons possibles par itération. A chaque combinaison, il lance le programme KINEROS2 puis calcule les fonctions critères et écrit les fichiers résultats. Avec l'exemple de deux paramètres P1 et P2 variant entre leurs valeurs minimales et maximales, à chaque valeur de P1 allant du minimum au maximum, on fait varier P2 de son minimum à son maximum, définissant ainsi des jeux de paramètres (P1, P2). Le modèle est mis en œuvre pour chaque jeu et la fonction critère est calculée. On retiendra à la fin, après réalisation de toutes les combinaisons, le jeu qui donne la valeur optimale du critère choisi (Karambiri, 2003).

Des pas et plages assez larges sont initialement choisis puis resserrés autour de la zone optimale au fur et à mesure des simulations.

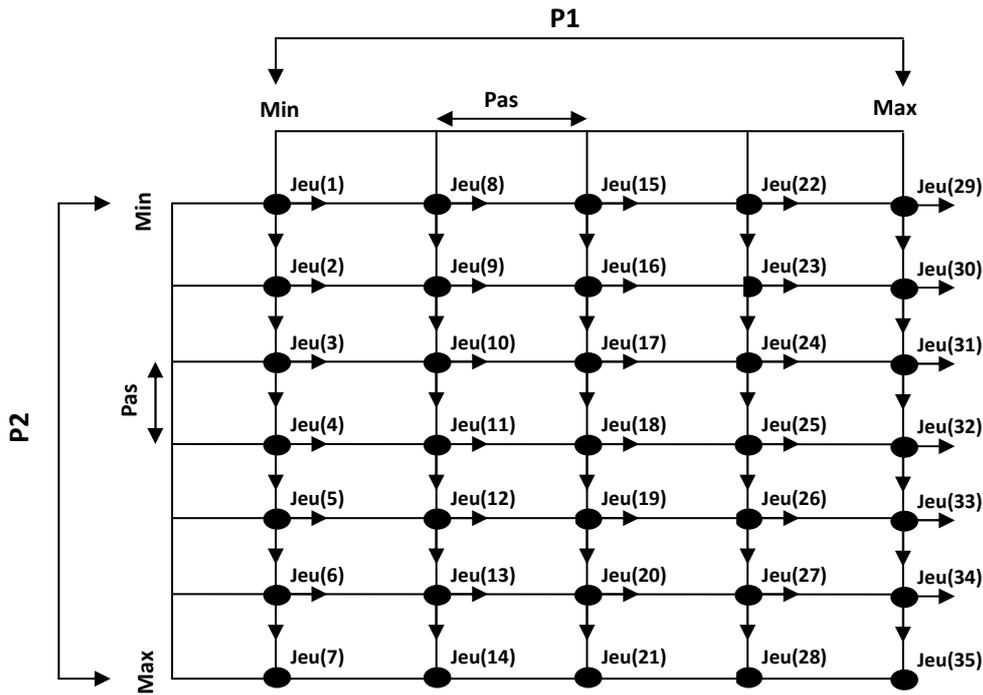


Figure 5 : Principe de la procédure d'optimisation automatique pour le modèle KINEROS2 (Karambiri, 2003)

e) Optimisation du calage

Cette étape s'exécute au moment de la simulation. En effet le programme KINAUTO intègre le calcul des fonctions d'optimisation des résultats. Les fonctions d'optimisations proposées par ce programme sont le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) pour les hydrogrammes de crue, l'écart quadratique moyen (EQM) et le critère de Nash pour les volumes d'eau ruisselés (V_r), les débits de pointe (Q_{max}), les instants des débits de pointe ($T_{Q_{max}}$) et les quantités sédiments (Sed).

Critère de Nash

C'est un critère adimensionnel proposé par Nash–Sutcliffe (1970) pour tester la performance des modèles hydrologiques. Il est défini par

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (Q_{Obs}^n - Q_{Sim}^n)^2}{\sum_{n=1}^N (Q_{Obs}^n - \bar{Q}_{Obs})^2}$$

- Où
- Q_{Obs}^n : n^{ième} débit observé
 - Q_{Sim}^n : n^{ième} débit simulé
 - \bar{Q}_{Obs} : Moyenne des débits observés
 - N : nombre de couple débit observé – débit simulé

Le critère Nash varie de $-\infty$ à 1. Nash = 1 signifie qu'à chaque instant t, le débit simulé est égal au débit observé et lorsqu'il est égal à 0 le débit simulé est égal à la moyenne des débits observés à chaque instant t.

Le résultat optimal est celui qui présente le critère NASH le plus proche de 1.

Ecart quadratique moyen (EQM)

L'écart quadratique moyen ou l'écart type est la racine carré de la somme des carrés des écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs simulées. Il indique l'écart moyen entre les valeurs. Les résultats sont optimaux si EQM est le plus proche de zéro (0).

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_{exp}^n - X_{sim}^n)^2}$$

Où X_{exp}^n et X_{sim}^n désignent respectivement la n^{ième} valeur expérimentale et la n^{ième} valeur simulée pour N couples de valeurs.

f) Validation des paramètres hydrologiques

La validation est l'étape de vérification de la capacité du modèle à produire de résultats adéquats avec les paramètres retenus au calage. Elle se fera sur des données pluie-débit-sédiment non utilisées dans la phase du calage.

Pour ce qui est des critères de validation, les fonctions critères utilisées précédemment lors du calage notamment le critère de Nash et l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) permettrons de juger de la reproductivité des résultats par le modèle.

g) Calage et validation des paramètres d'érosion

Cette étape s'exécute après la validation des paramètres hydrologiques. Ceux-ci sont utilisés pour caler les paramètres d'érosion. Il s'agit du coefficient de cohésion du sol (cg) et du coefficient d'érodibilité par effet Splash (cf). Le jeu optimal de ces deux (2) paramètres est retenu pour la validation. Le critère d'optimisation retenu est la minimisation des écarts entre les valeurs observées et simulées. Ainsi les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- Comme les matières solides déplacés regroupent les matières en suspension (MES) et les charriages de fond et que nous disposons de trois (3) classes de sédiments (sable, limon et argile), nous supposons que le charriage se compose essentiellement de sable et les MES regroupent l'argile et le limon.
- Vu que, sur le site de Tougou, les matières solides sont prélevées au milieu de section et à mi-hauteur d'eau pendant les crues, nous supposons que les matières solides prélevés sont des MES observés (sans charriage). La fonction critère

concernera donc les MES observé et les MES simulés. Ce qui conduira à déterminer le charriage simulé en fonction des MES observés.

3.2.4 Mise en œuvre du modèle sur le bassin BV0

Les paramètres issus du calage sur le sous bassin BV2 sont maintenus sur les parties sol nu du bassin BV0 pour caler les états surface type sol cultivé. Ce calage concernera les paramètres hydrologiques faute des données complètes d'érosion. Pour ce faire, nous utiliserons la schématisation réalisée par Somda (2008) du bassin BV0 (*Annexe 5:*) ainsi que les paramètres initiaux des sols cultivés (*Tableau 3*). Ce qui nous permettra de comparer les différents résultats. En outre, les résultats générés par le modèle KINEROS2 seront comparés aux résultats du modèle ATHYS obtenus par Dior & Zougrana (2009) et Piou (2010) sur le même bassin BV0.

Tableau 3 : Paramètres initiaux des sols cultivés (Somda, 2008)

	Sols cultivés	chenaux
Porosité	0,370	–
Conductivité hydraulique à saturation (Ks en mm/h)	23,4	0
Coefficient de rugosité de Manning (n)	0,1	0,05
Poussée capillaire effective (G en cm)	26	–
Indice de distribution des pores (λ)	0,32	–

a) Calage et validation des paramètres hydrologiques sur BV0

La procédure de calage et validation reste la même. On dispose de 10 événements averses-cruue (*Tableau 4*) dont les 5 premiers, classés par ordre de débit maximal, seront consacrés au calage des paramètres et les 5 autres à la validation.

Tableau 4 : Evénement averse-crue du bassin BV0

	Date	Débit maxi (m3/s)
CALAGE	04 juin 2005	42.9
	14 juillet 2006	24.4
	10 juillet 2005	23.3
	09 août 2005	16.1
	19 juillet 2006	15.5
VALIDATION	16 août 2004	11.2
	30 juin 2005	14.9
	21 juillet 2005	3.7
	29 juillet 2005	1.9
	04 août 2005	10.5

IV. RESULTATS

4.1 Modélisation du sous bassin BV2

4.1.1 Simulation sans calage

Une simulation sans calage est préalablement exécutée en vue d'apprécier la portée du choix de des paramètres initiaux. Ceci permettra de vérifier la possibilité d'utiliser le modèle KINEROS2 couplé aux paramètres physiques expérimentaux et/ou estimé du bassin de Tougou pour prévoir les crues et les terres susceptibles d'être dégradées suites aux événements pluvieux donnés. Les fonctions critères annoncée précédemment serviront d'outils d'appréciation des résultats.

La simulation effectuée sur le bassin BV2 avec tous les 9 événements averse-crues retenues donne un résultat satisfaisant avec un critère Nash moyen des crues Nash(Q) de 54,6 %. Les valeurs du critère Nash des volumes ruisselés (V_r), débit maximums (Q_{max}) et temps des débits maximums sont respectivement de 55,2% - 84,4% et 87,3 (Figure 6)

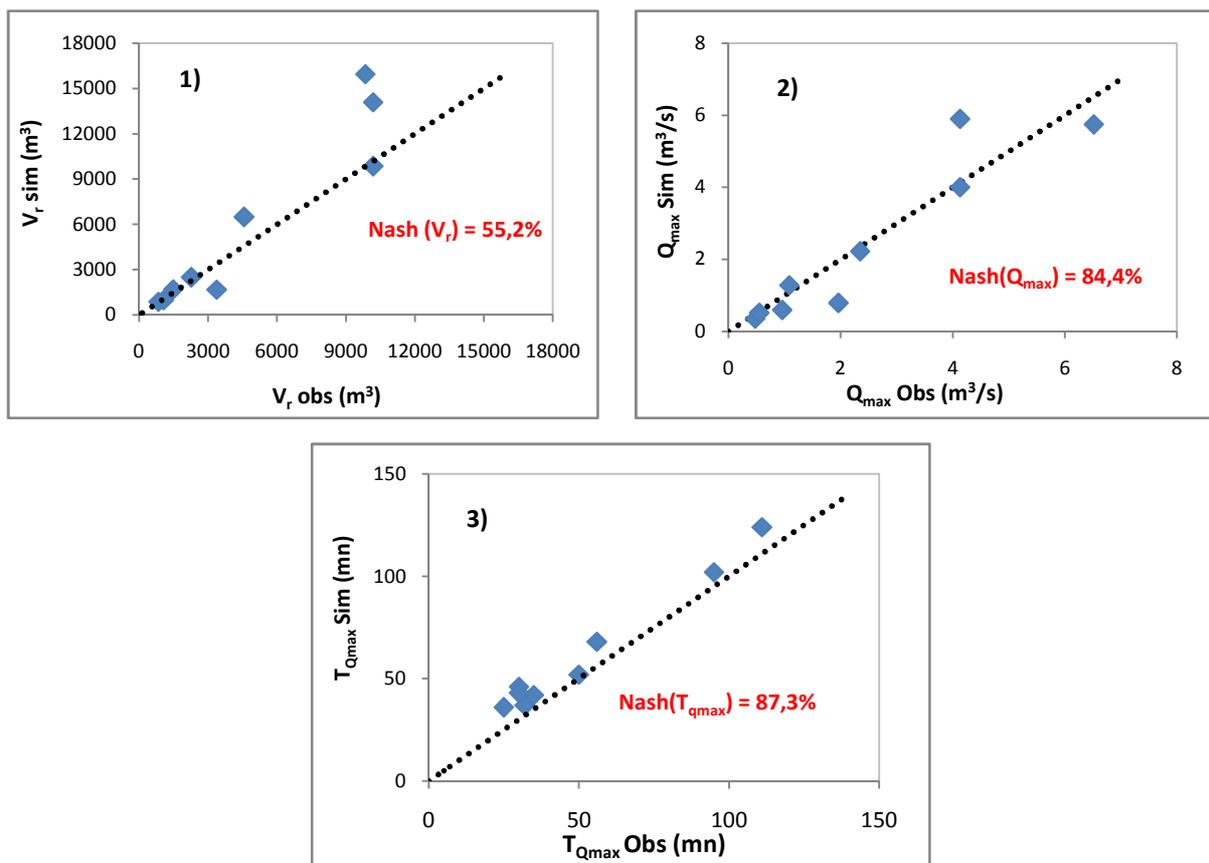


Figure 6 : Simulation sans calage : 1) Volume ruisselé (V_r), 2) Débit maxi (Q_{max}), 3) temps de débit maxi ($T_{Q_{max}}$)

Les débits maximaux sont bien reproduits à des temps très proches des instants d'observation. De même, les volumes ruisselés sont en grande parties reproduits avec satisfaction, où deux événements s'écartent légèrement et fonds baisser le critère Nash à 55%.

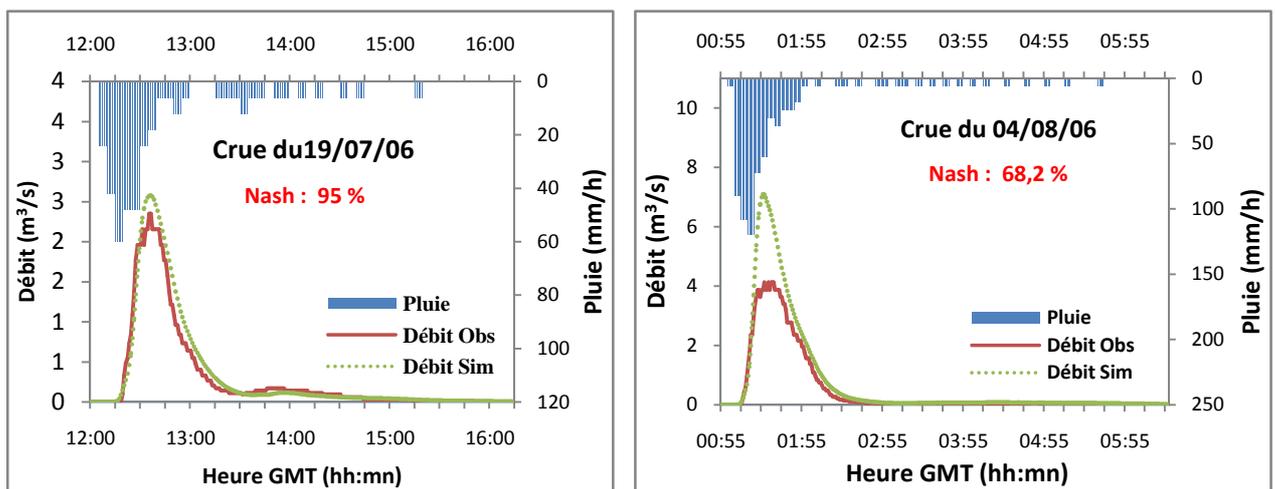
4.1.2 Résultats du calage des paramètres hydrologiques

Les étapes de simulation sont guidées par le choix de plages et pas de parcours des paramètres à travers les facteurs multiplicateurs (FM). Ce choix est guidé par les valeurs initiales et les potentialités de résultats réalistes. Après une série de simulations et en faisant varier les valeurs des facteurs multiplicateurs des paramètres initiaux, on trouve une solution optimale avec un critère de Nash de 83.2%. Les paramètres calés ne s'écartent pas trop des paramètres initiaux (Tableau 5).

Tableau 5 : Paramètres hydrologiques optimaux du modèle

	Conductivité hydraulique à saturation (Ks)	Coefficient de rugosité de Manning (n)	Poussée capillaire effective (G)
Paramètres Initiaux	3.3	0.022	77
Facteurs multiplicateurs (FM)	1.75	0.54	1.13
Paramètres optimaux	5.775	0.0119	87.01

Les hydrogrammes de crue observées et simulées avec les paramètres optimaux pour les 5 événements retenus pour le calage sont présentés sur la Figure 7.



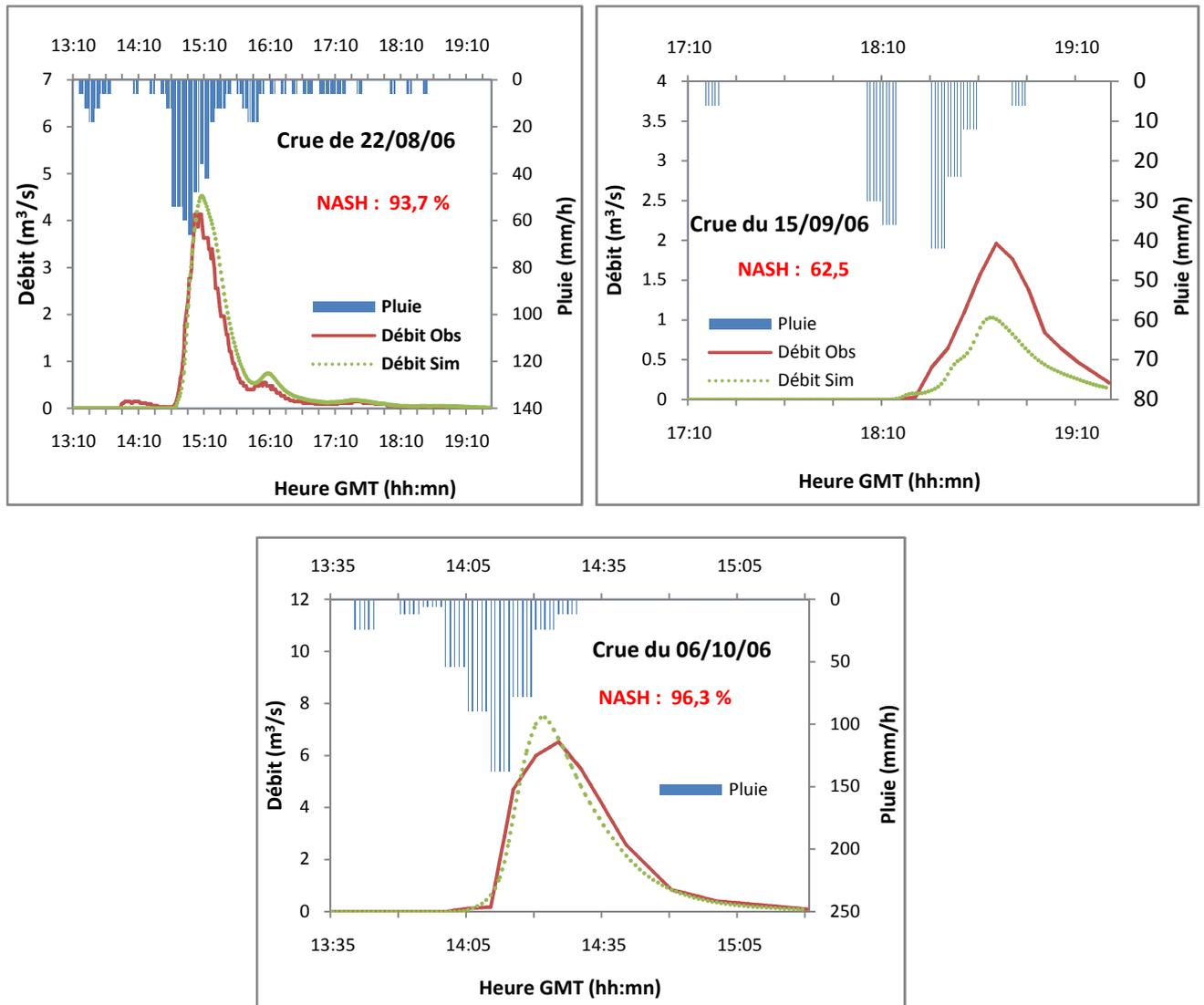


Figure 7 : Hydrogrammes de crues observés-simulés en calage avec les 5 événements crues-averses sur le BV2

Les événements du 19/07/06, 22/08/06 et 06/10/06 sont très bien reproduits par le modèle avec environ 95% de critère Nash. De même la simulation retrace parfaitement la forme et le profil de l'événement du 04/08/06 avec un léger écartement des débits maximaux observé et simulé. L'événement du 15/09/06, dont l'averse est faible, retrouve très bien sa forme et est bien reproduit à 62% de critère Nash.

Analysons à présent les graphes X-Y des volumes ruisselés, débits maximaux et instants des débits maximaux à la *Figure 8*.

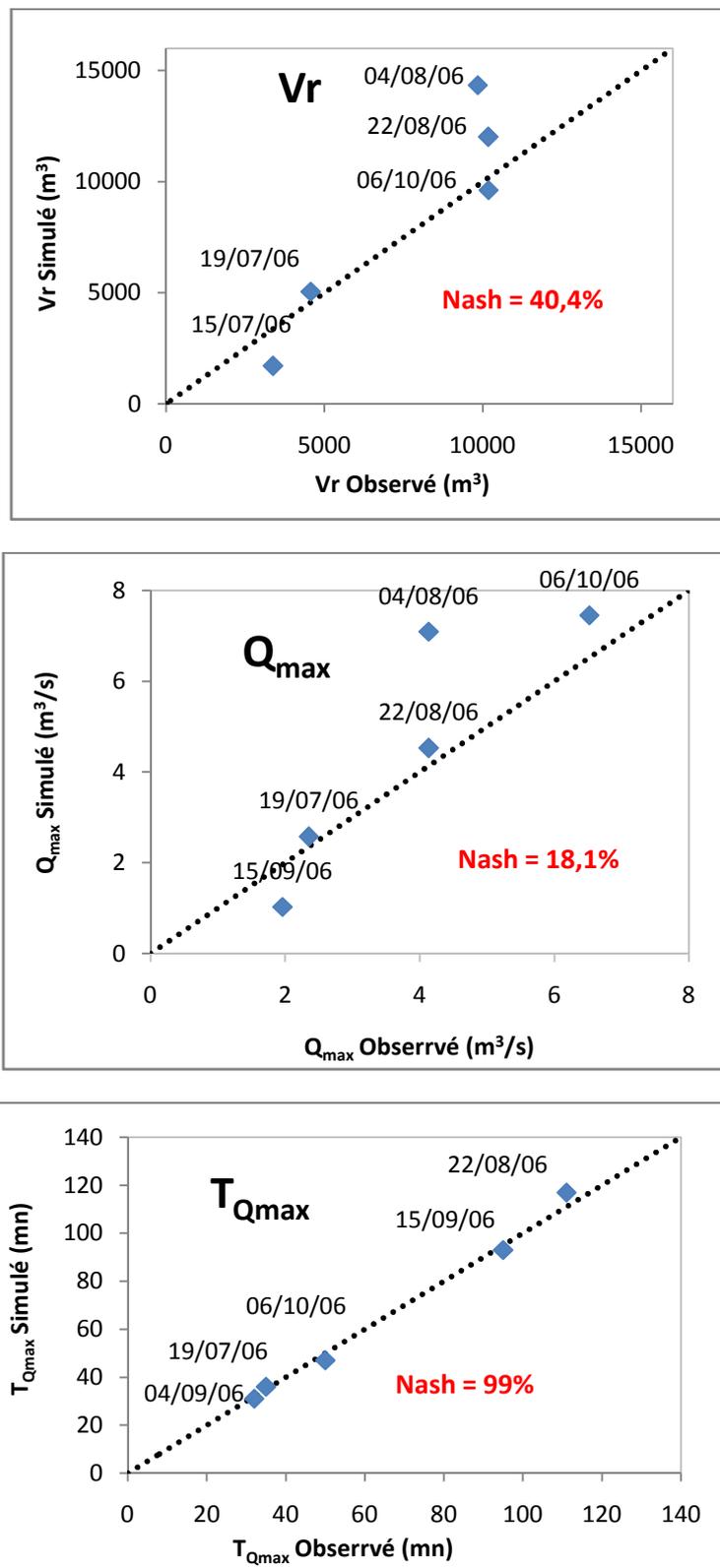


Figure 8 : Valeurs observées et simulées au calage hydrologique avec V_r : Volumes ruisselés, Q_{max} : débits maximaux et T_{Qmax} : instants des débits observés

La figure ci-dessus confirme bien les résultats annoncés. En effet les instants des débits observés ($T_{Q_{max}}$) sont parfaitement reproduits à 99% de critère Nash (quasiment alignés le long de la 1^{ère} bissectrice). Au niveau des débits maximaux (Q_{max}) les événements du 04/08/06, du 06/10/06 et du 15/09/06 ont leurs débits maximaux surestimés pour les deux premiers et légèrement sous-estimé pour le troisième. Ce qui chute le critère Nash à 18%. Les volumes ruisselés (V_r) dont les événements 04/08/06 et du 22/08/06 sont légèrement surestimés, fonds chuter le critère à 40%.

4.1.3 Validation des paramètres hydrologiques

Les paramètres calés ont servi de validation sur les quatre (4) événements crue-averse retenus à cet effet et le critère de Nash est utilisé pour l'appréciation des résultats. Ainsi, Le Nash moyen des crues observées-simulées (Figure 9) de la validation est de 73,8%.

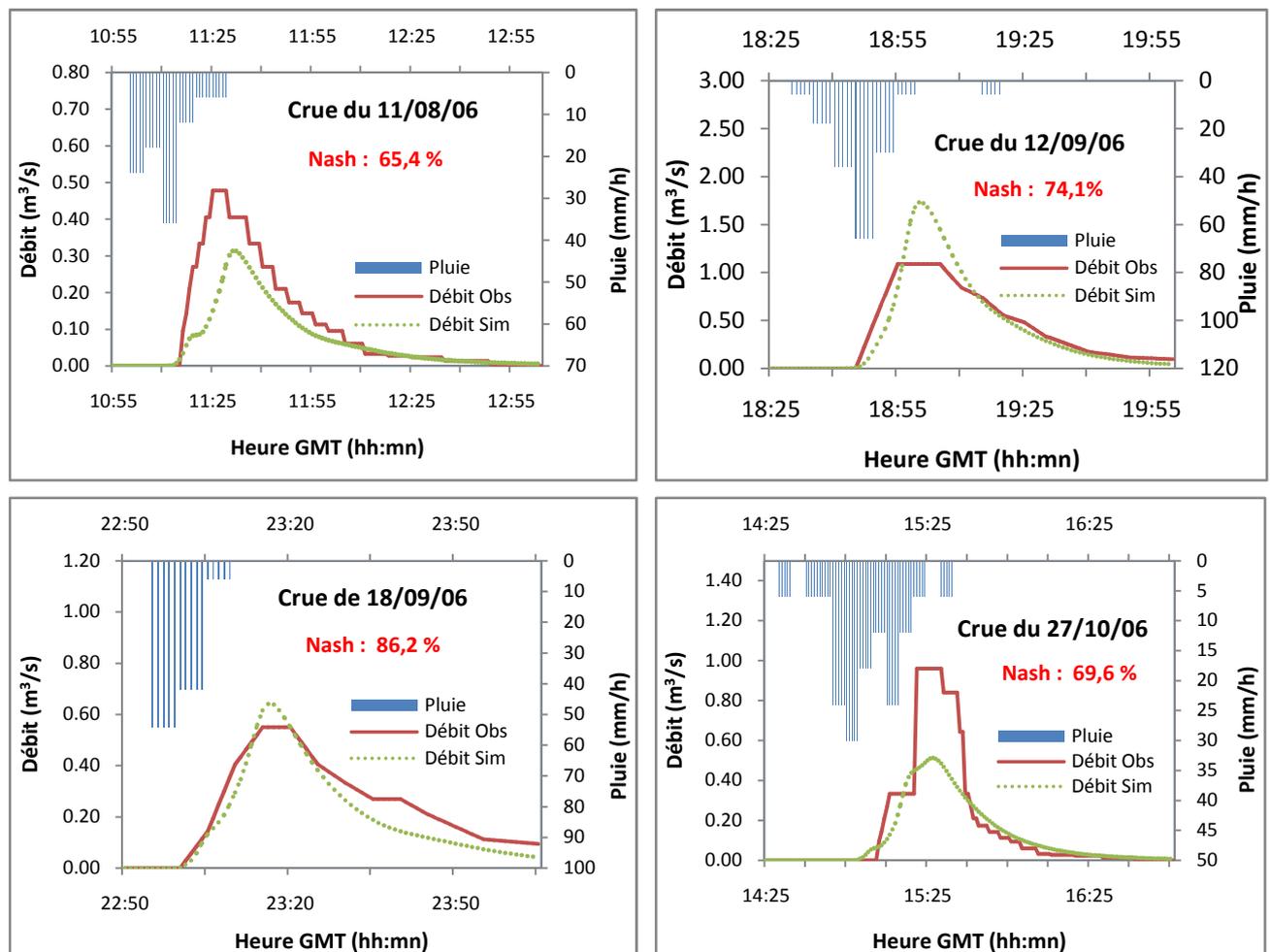
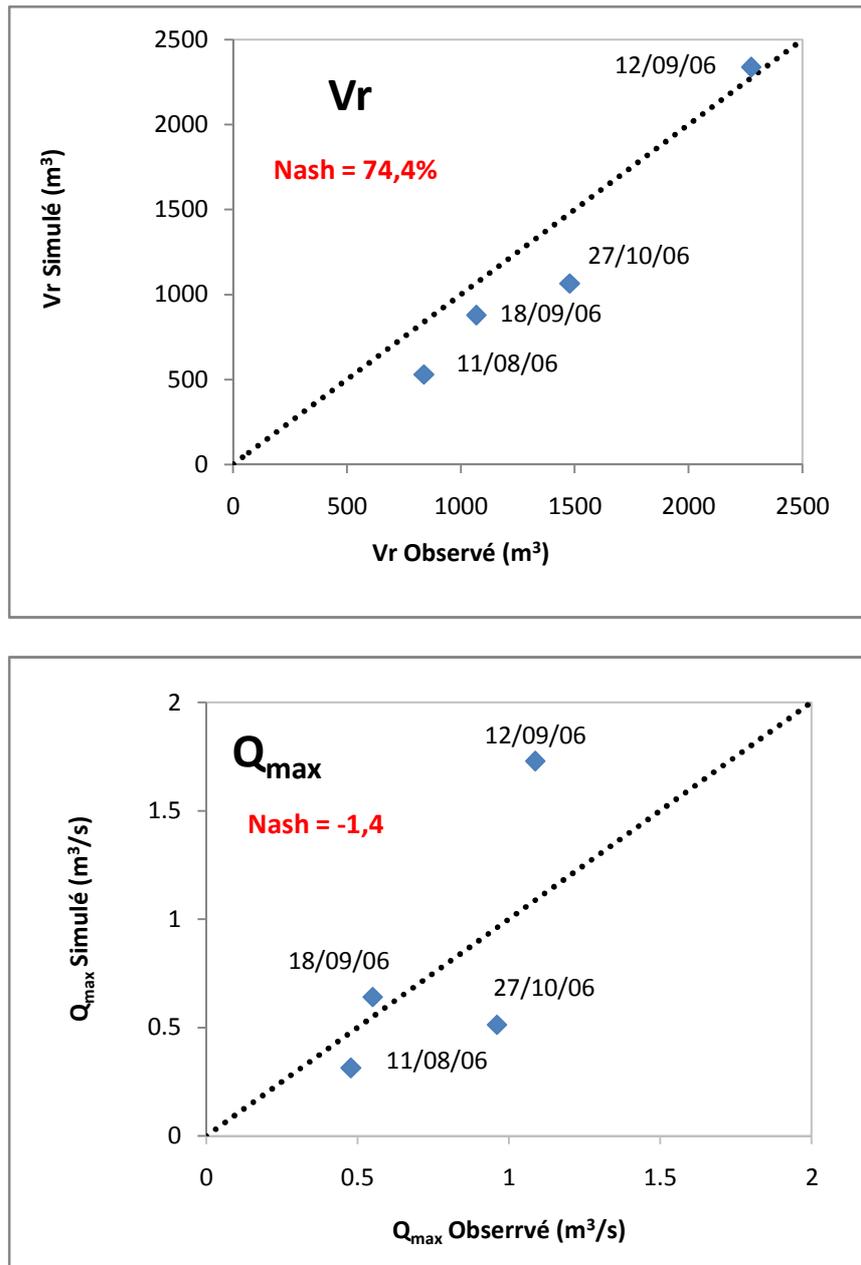


Figure 9 : Hydrogrammes de crue observée-simulée à la validation avec les quatre événements crues-averses sur le BV2

Les hydrogrammes sont simulés avec satisfaction lors de la validation hydrologique dont le critère Nash varie de 86 % pour la crue du 18/09/06 à 65 % pour la crue du 11/08/06. Les résultats globaux à la *Figure 10* sont aussi satisfaisant où le critère Nash est de 74% pour les volumes ruisselés et 81 % pour les instants des débits maximaux. Les débits maximaux ont quant à eux un critère Nash faible du aux événements du 12/09/06 et du 27/10/06 qui sont surestimé pour le premier et sous-estimé pour le second. Cela ressort à la *figure 9*.



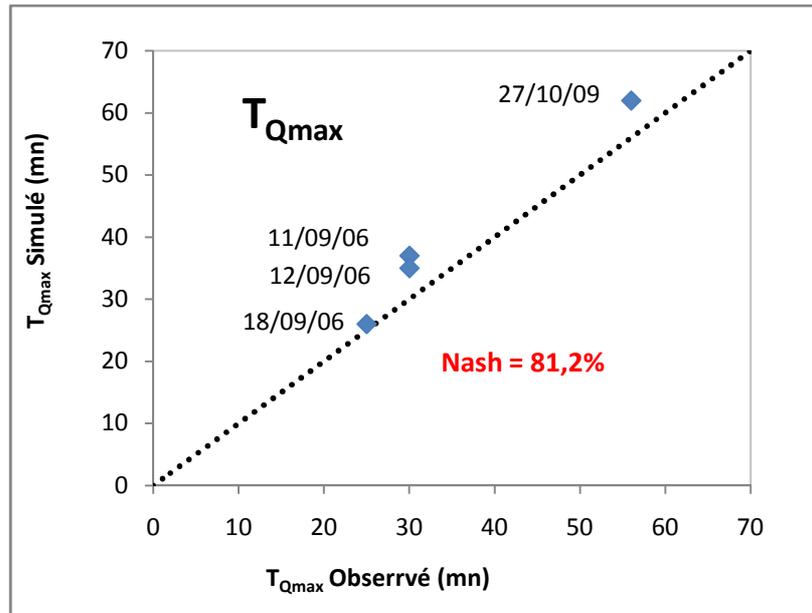


Figure 10 : Valeurs observées et simulées à la validation hydrologique avec V_r : Volumes ruisselés, Q_{max} : débits maximaux et $T_{Q_{max}}$: instants des débits observés

4.1.4 Simulation sans calage des paramètres d'érosion

L'appréciation des paramètres initiaux d'érosion s'effectue à travers une simulation sans calage et comparaison des MES observées aux MES simulés (Figure 11). Il est à remarquer que ces paramètres sous estiment les MES simulée faces celles qui sont observés.

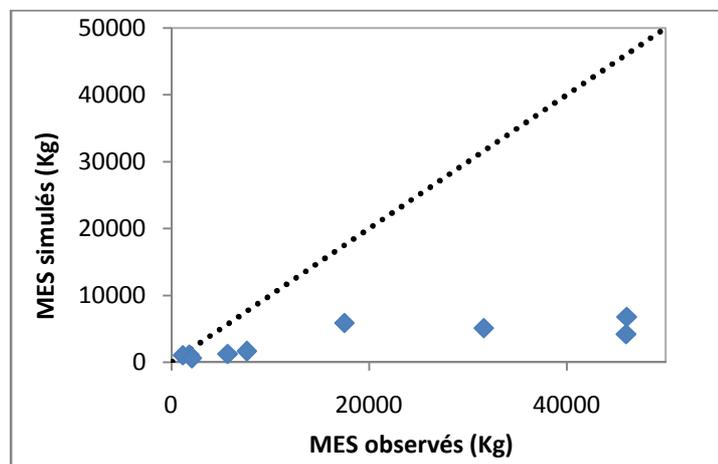


Figure 11 : Simulation sans calage des paramètres initiaux d'érosion sur BV2

4.1.5 Calage et validation des paramètres d'érosions sur BV2

Le jeu des facteurs multiplicateurs (FM) correspondant paramètres optimaux est obtenu à l'atteinte d'un écart quadratique moyen minimal entre les valeurs observée et simulés des 5 événements du calage. C'est ainsi qu'une large plage initiale de 1 à 5000 a été considérée pour chacun des deux paramètres d'érosion. A l'issu de la simulation, la fonction

critère a convergé à un critère Nash de 64,2% pour des paramètres d'érosion donnée au *Tableau 6*. Ces paramètres ont servi de validation sur les 4 autres évènements averse-crue avec un critère Nash de 78,7%. Les MES observés et simulés au calage ainsi qu'à la validation sont représentés à la *figure 9*.

Tableau 6 : paramètres optimaux d'érosion

	Paramètres Initiaux	Paramètres calés
Erodibilité SPLASH (cf)	198,3	2111,181
Cohésion du sol (cg)	0,02	39.52

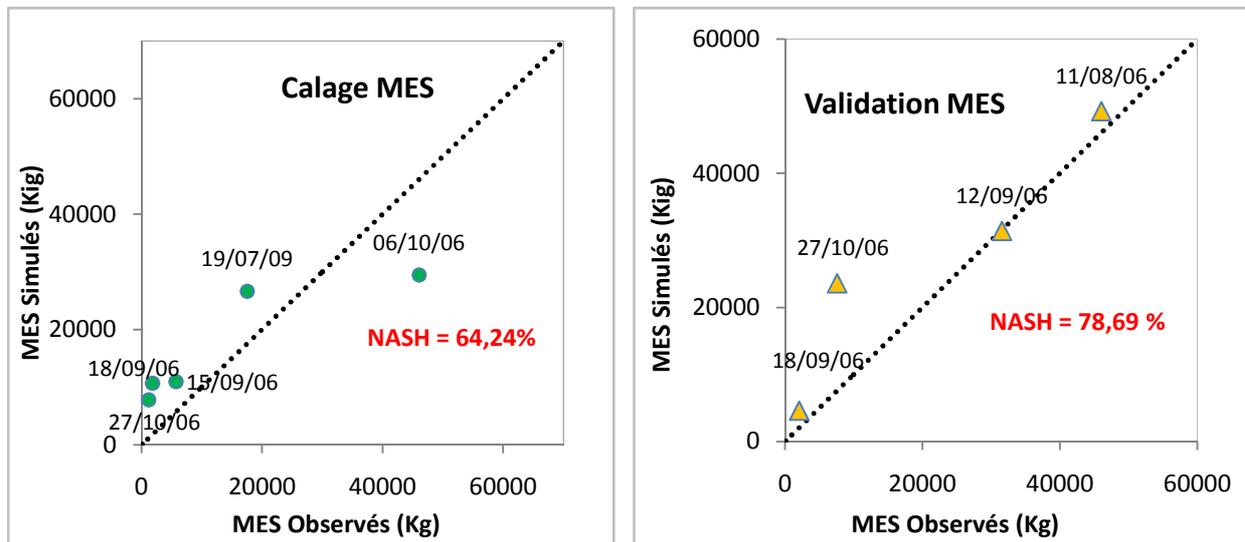


Figure 12 : Calage et validation des paramètres d'érosion sur BV2

Tout comme le en hydrologique, le calage et la validation des paramètres d'érosions sur le sous bassin BV2 donnent des résultats satisfaisantes avec un critère Nash de 64 % et 79% au calage et à la validation respectivement.

4.2 Modélisation du bassin BV0

4.2.1 Calage des paramètres hydrologiques

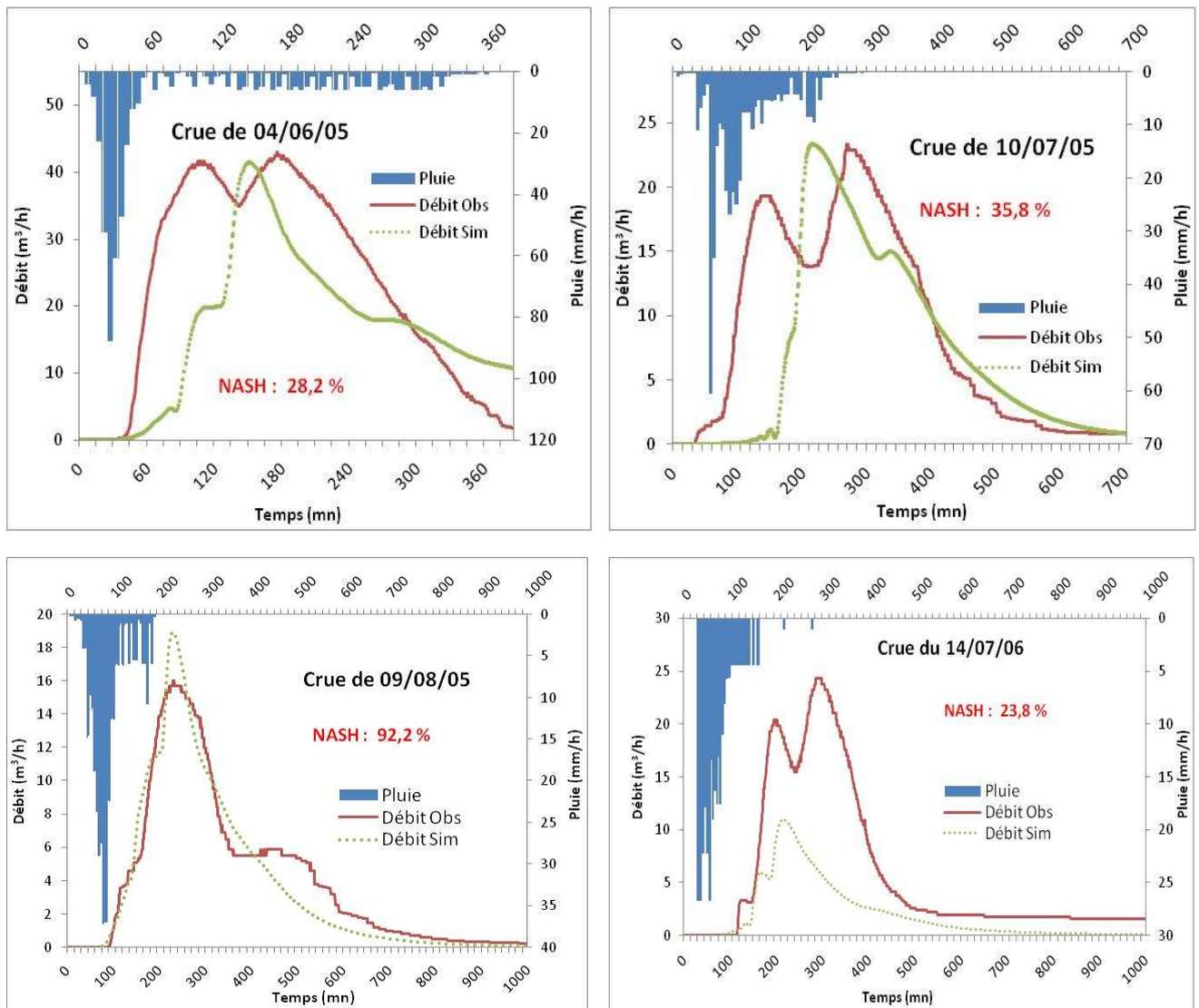
Il faut rappeler que le calage concerne les paramètres des sols cultivés. Initialement, une simulation sans calage des paramètres à donné un critère Nash de -0,84. Puis une plage de facteurs multiplicateurs (FM) de 1 à 10 a été adopté pour chacun de trois paramètres hydrologiques au premier calage. La fin des simulations est marquée par la convergence du

critère Nash de 40% correspondant aux paramètres optimaux donnés au *Tableau 7*. Ceux-ci sont proches des paramètres initiaux.

Tableau 7 : Paramètres hydrologiques des sols cultivés sur BV0

	Conductivité hydraulique à saturation (Ks)	Coefficient de rugosité de Manning (n)	Poussée capillaire effective (G)
Paramètres Initiaux	23.4	0.1	26
Facteurs multiplicateurs (FM)	0.84	0.3	0.84
Paramètres optimaux	19.656	0.03	21.84

Les hydrogrammes de crue générés par ces paramètres pour les 5 événements crue-averse servi au calage sont présentés sur la *figure 10*.



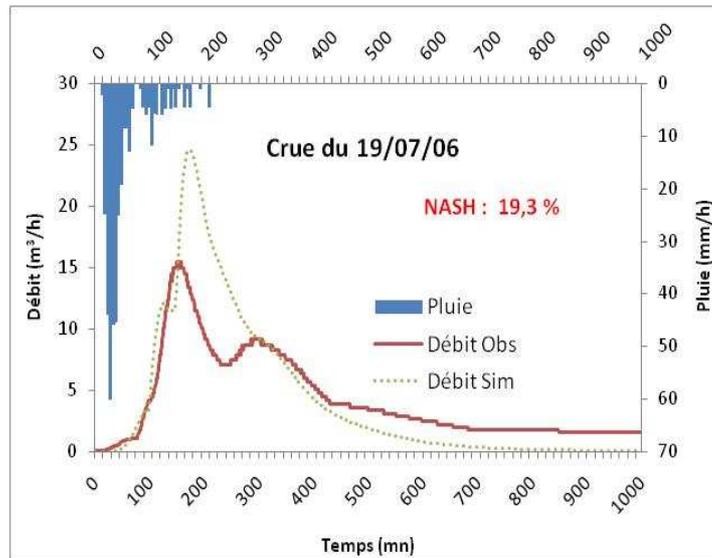


Figure 13: Hydrogrammes des 5 crues de calage des sols cultivés sur BV0

Le critère Nash varie de 92,2 % à 19,3 %. Il convient de remarquer que les crues observées présentent deux pics de crues. L'événement du 09/08/05 dont le 2^{ème} pic est faible face au premier, donne le critère Nash le plus élevé. Les crues simulées quant à elles, sont unimodales.

V. DISCUSSION ET ANALYSES

5.1 Sous bassin BV2

5.1.1 Paramètres hydrologiques

L'objectif visé est la conformité des paramètres calés à la réalité. Il est important de rappeler que la croûte superficielle du bassin BV2 est considéré comme moyenne des croûtes d'érosion (ERO), gravillonnaires (G) et de dessiccation (DES) faute d'une cartographie des états de surface du bassin. Cette dimension est prise en compte, et conduit à une appréciation globale des résultats du sol nu.

Dans l'ensemble, le modèle donne un résultat hydrologique satisfaisant pour les sols nus au sous bassin BV2. Déjà la simulation sans calage des paramètres initiaux produits des crues simulés à un critère Nash de plus de 50% (*Figure 6*). Puis les paramètres sont calés à 83,2% de critère Nash et validés à un Nash de 73,4%. Les paramètres calés, quant à eux, reflètent bien les réalités physiques d'un bassin versant dégradé.

Concernant la conductivité hydraulique à saturation (K_s), on passe d'une valeur initiale de 3,3 mm/h à une valeur calée de 5,78 mm/h. De nombreuses études donnent des K_s pochant de cette valeur pour les sols nus. En effet, Thiombiano et al. (2000) situent les conductivités hydrauliques à saturation à 2 mm/h pour les croûtes d'érosion (ERO) et 28 mm/h pour les croûtes de dessiccation (DES). Casenave et Valentin (1989) quant à eux, obtiennent en zone sahélienne 0 à 2 mm/h pour les croûtes d'érosion (ERO) et 10 à 20 mm/h pour les croûtes de dessiccation (DES).

Quant au manuel d'utilisation de KINEROS, il situe la valeur calée de K_s , sur la base des travaux de Rawls et al. (1982), entre un sol limoneux ($K_s = 6,8$ mm/h) et un sol argilo-sableux ($K_s = 4,3$ mm/h). Or les croûtes d'érosion (ERO) sont en général constituées de pellicule d'argile sur matériaux argileux ou argilo-sableux avec une pellicule d'argile compacte en surface tandis que les croûtes de dessiccation (DES) sont des plaquages de sable avec parfois des pellicules superficielles d'argile.

Il ressort que la valeur calée de K_s traduit bien les états de surface du bassin BV2. Cette valeur se rapproche plus de la conductivité hydraulique des croûtes d'érosion et gravillonnaires qui sont majoritaires sur le sous bassin BV2. L'étude cartographique du sous bassin permettra de vérifier les proportions des différentes croûtes sur le bassin.

Pour ce qui est du coefficient de rugosité de Manning (n), la valeur passe de 0,022 à 0,012. Cette valeur est réaliste car la plus part des études donnent, pour les sols nus, des

plages qui intègrent la valeur calée. Engman (1986) donne 0,012 à 0,033 pour les sols limoneux-argileux nus et 0,01 à 0,016 pour les sables nus. Le manuel du modèle Kineros donne les mêmes valeurs que Engman (1986).

Quant à la poussée capillaire effective, elle passe d'une valeur initiale de 77 cm à une valeur calée de 87,01 cm. Cette valeur se situe dans les larges intervalles définies par le manuel du modèle (travaux de Rawls et al., 1982) pour les sols argilo-sableux (37 à 147 mm) et argile limoneux (37 à 170 mm). Cette valeur est proche de celle donnée par Peugeot (1995) (< 72 mm) mais très faible face à celles trouvées par Karambiri (2003) qui est de 175 mm pour les croûtes DES et 325 mm pour les croûtes ERO sur le bassin de Katchari

5.1.2 Paramètres d'érosion

Le calage de paramètres d'érosion des sols nus dégradés sur le bassin BV2 donne un résultat globalement satisfaisant avec un critère Nash de 64,2% au calage et 78,7% à la validation pour les matières en suspension (MES) variant de 1,4 t/ha à 0,05 t/ha soit 0,5 t/ha/averse.

Il faut remarquer que ces valeurs de MES déplacées par averse sont élevées, mais reste comparables aux résultats trouvés par Karambiri (2003) sur le bassin de Katchari qui varient de 1,4 t/ha à 0,047 t/ha dont la moyenne est de 0,3t/ha/averse. Cela témoigne des taux d'érosion très élevés au Sahel. Au Nord-Ouest de la Tunisie, zone également aride, Jaoued et al. (2005) trouvent quant à eux, un taux d'érosion de 1,03 t/ha en une seule averse.

Toutefois, quand on regarde de près les paramètres calés d'érosions, l'appréciation reste difficile due au manque de valeurs de référence en fonction des types de sols dans la littérature. Cette situation a été signalée dans plusieurs études similaires.

Pour ce qui est de l'érodibilité par effet Splash (cf), la valeur calée de 2111 paraît élevée vu certains résultats comme ceux de Zigler et al (2001) qui trouvent une valeur de 261,6 sur des routes non pavées de montagne au Nord Thaïlande. Karambiri (2003) a calé ce paramètre sur les croûtes d'érosion (ERO) au Sahel à 650 avec les événements de 1999 et à 1600 pour les événements de 2000. Ce qui montre une certaine disparité des valeurs de ce paramètre.

Quant à la cohésion du sol, la valeur calée de 39,5 reste également très élevée face aux résultats des études rencontrées. En effet la plupart résultats donnent des valeurs de cohésions de sol inférieures à 1. Karambiri (2003) trouve une cohésion de 0,242 et 0,982 sur les croûtes d'érosion (ERO) sur le bassin de Katchari. Zigler et al. (2001) quant à lui trouve une valeur de 0,0196.

Les valeurs élevées de ces deux paramètres pourraient s'expliquer par la forte influence des conditions d'écoulement sur l'érosion. En effet le calage des paramètres hydrologiques, impose déjà des contraintes aux gammes de variations des paramètres d'érosion. D'ailleurs Smith et al. (1999) précisent que ces deux paramètres d'érosion restent très sensibles aux changements des volumes ruisselés et des vitesses d'écoulement.

5.2 Bassin BV0

5.2.1 Paramètres hydrologiques

Le calage des paramètres hydrologiques sur le BV0 donnent des résultats encourageants. Il faut noter que les paramètres des sols cultivés devraient être calés sur le sous bassin BV1 (en cultures) comme le calage des sols nus sur le sous bassin BV2. Ceci aurait permis de mieux analyser la dégradation de ces sols indépendamment des sols nus.

Dès l'appréciation des paramètres initiaux, la simulation sans calage donne un résultat mitigé avec un critère Nash de -0,84. Puis malgré une simulation marquée par plus de 2600 jeux de paramètres, le critère NASH converge à 40%. Rappelons que pour les mêmes événements averses-crues, les travaux de Somda (2008) ont convergé à un critère Nash de 26%. La principale explication est l'observation des crues bimodales tandis que le modèle KINEROS2 produit de crues à un seul pic pour chaque averse unimodale. D'ailleurs Zoungrana et Dior (2009) se sont confrontés aux mêmes problèmes avec le modèle ATHYS sur le bassin BV0 avec les mêmes événements averses-crues du *Tableau 4*.

Piou (2010) travaillant sur la modélisation pluie-débit du bassin de Tougou avec le modèle ATHYS avait pris l'hypothèse qu'un « rétrécissement du bassin BV0 entre deux collines au centre » serait à l'origine des crues bimodales. Ce qui retarde les écoulements amont qui arrivent à l'exutoire après le pic produit par les écoulements rapides de la partie aval. Nous avons opté pour cette hypothèse dans l'analyse de l'aspect bimodal dans la partie §4.2.2.

Quand on analyse les valeurs des paramètres du sol cultivé obtenues, on se rend compte qu'elles s'approchent de celles trouvées dans d'autres études similaires, surtout en assimilant les sols cultivés aux croûtes de dessiccation sur placages sableux perméables.

En effet, la conductivité hydraulique à saturation trouvés ($K_s = 19,7$ mm/h) est similaire à celle trouvée par Casenave et Valentin (1989) qui est de 20 mm/h pour les croûtes de dessiccation (DES). Les travaux de Rawls et al. (1982) révèlent quant à eux, des valeurs de K_s de 13 à 26 mm/h pour ces types de sols.

Pour le coefficient de rugosité de Manning (n), Woolhiser (1975) donne des valeurs comprises entre 0,053 et 0,13 pour les sols à végétation parsemée. La valeur de (n) calée sur

le bassin de Tougou est de 0,03 et est proche de cet intervalle. La poussée capillaire effective (G) qui est de 21,8 cm correspond bien aux sols cultivés. En effet les travaux de Rawls et al. (1982) donnent une valeur moyenne de 24,8 cm (entre 9,8 à 52,6 cm) pour ce type de sol.

Bien que les critères de Nash soit faible sur les hydrogrammes, les paramètres calés reflètent bien les propriétés physiques des états de surface du bassin. Cela montre que la couverture du sol ne serait pas à l'origine de la contre performance du modèle, mais probablement le fonctionnement hydrologique du bassin BV0 se traduisant par des crues bimodales (même pour des averses uni-modales) dues à une contribution différenciées des parties du bassin.

5.2.2 Analyse de la forme bimodale des crues

Quand on analyse la *Figure 13*, seule la crue du 09/08/06 dont le 2^{ème} pic de crue est faible par rapport au premier, donne un critère Nash 92,2 %. Pour les quatre (4) autres crues qui sont bimodales, les critères de Nash varient de 19,3 à 35,8 %. Cette bimodalité des crues rend difficile le calage hydrologique sur le bassin BV0.

Partant de l'hypothèse de Piou (2010), d'un rétrécissement au centre du bassin, nous avons analysé la topographie et l'hydrographie du bassin pour l'adapter au modèle.

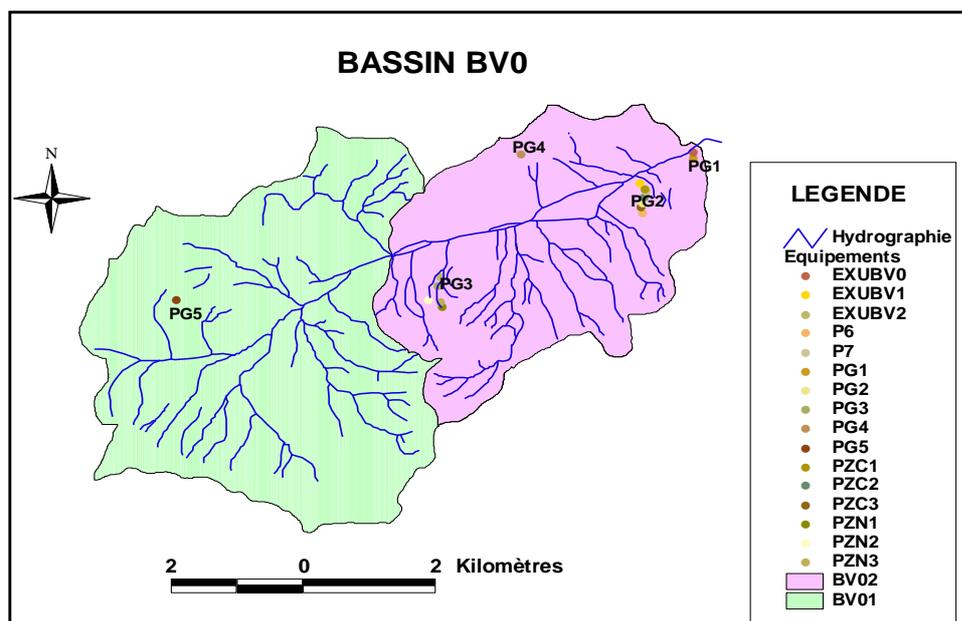


Figure 14: BV0 : Aspect bimodal des crues

Ainsi nous proposons une décomposition du bassin BV0 en deux bassins BV01 et BV02 (*Figure 14*). On remarque une configuration qui pourrait conduire à un certain parallélisme de fonctionnement quant à la concentration des crues au centre de chacun des

deux bassins. Cela conduirait à conclure aux deux pics de crue à l'exutoire dont le premier est dû au bassin BV02 et le deuxième dû au bassin BV01.

Cela conduirait à mettre le modèle KINEROS2 sur chacun des deux bassins. L'hydrogramme issu du BV0 serait donc la somme des deux hydrogrammes issus de BV01 et BV02.

Ces hypothèses confirmeraient avec l'observation des crues à l'intersection de ces deux sous bassins BV01 et BV02.

VI. CONCLUSION

La dégradation des terres sur le bassin versant de Tougou, tout comme dans toute la zone sahélienne, reste un problème majeur avec en moyenne de 0,5 t/ha/averse de matière en suspension (MES) déplacées sur les zones dégradées et nus. Le modèle Kineros2, à bases physiques et distribué se révèle être un outil approprié à l'étude et la quantification des processus d'écoulement et d'érosion sur le bassin de Tougou. En effet ce modèle reproduit avec satisfaction la réponse du bassin dégradé BV2 avec un critère Nash moyen de 83% en calage et 73% en validation pour l'hydrologie et pour l'érosion, un critère de Nash de 64% et 79% respectivement en calage et en validation. Toutefois, le modèle, appliqué au bassin BV0 a du mal à reproduire la forme bimodale des crues observées, malgré la bonne signification physique des paramètres issus du calage. Cette situation est probablement due à la morphologie du bassin BV0 qui occasionne un fonctionnement différencié des parties amont et aval du bassin. Par ailleurs, certaines hypothèses adoptées pendant de l'étude pour faute de données disponibles, pourraient être revues afin d'améliorer les résultats obtenus. Il s'agit notamment :

- de la cartographie des états de surface du sous bassin BV2 ;
- des données pédologiques détaillées des bassins permettant de déterminer la granulométrie, les classes de sédiment et les pourcentages de classe des sédiments pour chacun des états des états de surface (croûtes ERO, G, DES et les sols cultivés).
- des données complètes de mesures d'érosion sur le sous bassin BV1 ainsi que les charriages de fonds sur les trois (3) bassins (BV0, BV1, BV2).

Cet état de fait nous conduit à une formulation des recommandations pour une meilleure adaptation du modèle KINEROS2 au bassin versant de Tougou.

VII. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

La poursuite de l'étude sur les processus de ruissellement et de dégradation des terres sur le bassin de Tougou avec le modèle KINEROS2 nécessite un effort supplémentaire dans l'acquisition des données et la mise en œuvre du modèle. Pour cela, il nous semble nécessaire de :

- ✓ mener une étude pédologique complète des états de surfaces. Cela permettra de connaître avec précision les classes des particules des sédiments, leurs proportions et leurs densités.
- ✓ mener une campagne complète de mesures simultanées des crues et de l'érosion sur les trois (3) bassins de Tougou. Même si ces données existent sur plusieurs années, le fait qu'elles soient observées en des périodes différentes sur les différents bassins, ne permet pas de relever tous les défis de la modélisation avec KINEROS2.
- ✓ Installer à long terme une station hydrométrique (section de contrôle) à l'exutoire des sous bassins BV01 et BV02 proposés au §5.2.2 afin de comprendre et quantifier la contribution de la partie amont du bassin BV0. Cela permettra d'apporter un éclairage nouveau à la compréhension du fonctionnement hydrologique bimodal du bassin.

BIBLIOGRAPHIE

- Agora Encyclopédie (1998). Consulté le 21 Mars 2010, sur <http://agora.qc.ca/mot.nsf/Dossiers/Sahel>
- Al-Qurashi, A., McIntyre, N., Wheeler, H., & Unkrich, C. (2008). Application of the KINEROS2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology* (2008) 355, 91-105 .
- Ambroise, B. (1998). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles*. Bucarest: *H*G*A*.
- AMMA-CATCH. (1982). *Résultats Scientifiques*. Consulté le 09 Juin 2010, sur http://www.lthe.hmg.inpg.fr/catch/index.php?page=scientific_result&lang=fr
- Augusto, G. S., Marques, d. S., & Alves, N. I. (2002). Numerical modeling for surface runoff and sediment yield coupled to GIS.
- Bissiri, M., Othman, F., & Sholichin, M. (2004). Determination of runoff value using KINEROS model (Case study in Sumpil catchment, Indonesia). *ICCBT2008* .
- Boudhra, H. (2007). Modélisation pluie-débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural tunisien : Association d'approches directe et inverse. *Thèse de Doctorat en sciences agronomiques* . Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Agricole - Université de 7 Novembre à Carthage, TUNISIE.
- Casenave, A., & Valentin, C. (1989). *Les états de surfaces de la zone sahélienne : Influence sur l'infiltration*. Paris: Edition de l'ORSTOM, Collection Didactique, 229p.
- CILSS. (2010). Le Sahel face aux changements climatiques : Enjeux pour un développement durable. Bulletin mensuel. *Bulletin mensuel, Numéro spécial* , pp. 25-28.
- Compaoré, M. L. (2005). Les données de base de l'irrigation, 3ème édition. *Cour EIER*, 167p. Groupe EIER-ETSHER.
- Descloitres, M., Ribolzi, O., & Le Troquer, Y. (2003). Study of infiltration in a gully eroded sahelian area using time-lapse electrical resistivity. *Catena* .
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., et al. (2009). Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of west Africa : A synthesis. *Journal of Hydrology*, 375(1-2) , 90-102.
- Engman, E. T. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 112(1): 39-53.
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulin, N., et al. (2009). Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger. *Water Resources Research*, Vol. 45, W00A16, doi: 10.1029/200WR006785 , 1.

- Gnouma, R. (2006). Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. *Thèse de doctorat, Génie civil*, 412 p. Institut national des sciences appliquées de LYON,.
- Jaoued, M., Gueddari, M., & Saadaoui, M. (2005). Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued M'Khachbia (Nord-Ouest de la Tunisie). *Geo-Eco-Trop*, 10.
- Karambiri, H. (2003). Crues et érosion au sahel : étude et modélisation des flux d'eau et de matière sur un petit bassin versant pastoral au nord du Burkina Faso. *Thèse de doctorat, sciences de la terre. Université Paris VI – Pierre et Marie Curie. Paris 3*.
- Lencastre, A. (2008). *Hydraulique générale*. Edition Eyrolles & SAFEGE, cinquième tirage. 633 p.
- Mahé, G. (2006). Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changement hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. *Mémoire, Habilitation à Diriger des Recherches*, 101-103. HydroSciences Montpellier & Université Montpellier 2.
- Mermoud, A. (2008). Cour de physique du sol. EPFL de Lausanne et 2iE de Ouagadougou.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.
- Nord, G. (2006). Modélisation à base Physique des processus de l'érosion hydrique à la parcelle. *Thèse de doctorat, Océan, Atmosphère, Hydrologie*. Grenoble 1: Université Joseph Fourier.
- Ouedraogo, M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. *Thèse de doctorat, Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental*, 257 p. Université Montpellier II, Sciences Techniques du Languedoc.
- Piou, G. (2010). *Modélisation Pluie Débit avec Athys, Test de différentes fonctions de production et de transfert*. Projet Industriel de Fin d'Etude (PIFE) pour la STE5, Polytech'Montpellier. 24 p.
- Raynaud, C. (2001). Societies and nature in the Sahel: Ecological diversity and social dynamics. *Global Environ. Change*, doi: 10.1010/S0959-3780(00)00041-8, 11, 9-18.
- Reenberg, A., Loring-Nielsen, T., & Rasmussen, K. (1998). Field expansion and reallocation in the Sahel - Land-use pattern dynamics in a fluctuating biophysical and socio-economic environment. *Global Environ. Change*, 8, 309-327, doi: 10.1016/S0959-3780(98)00003-X.
- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, vol. 198, n° 1-4.

- Smith, R. E., Goodrich, D. C., & Quinton, J. N. (1995). Dynamic, distributed simulation of watershed erosion : KINEROS2 and EUROSEM models. *Journal of soil and water conservation* 50(5): 517-520 .
- Somda, M. L. (2008). Modélisation de la réponse hydrologique du bassin versant de Tougou à l'aide au modèle KINEROS2. *Mémoire d'Ingénieur de l'Équipement Rural* , 46p. Institut International de l'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement, Ouagadougou.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E., & Goodrich, D. A. (1990). KINEROS, a Kinematique Runoff Model : Documentation and user manual. ARS-77, US Departement of Agriculture, Agricultural research service, 25(5) : 519-534.
- Zigler, A. D., & Sutherland, R. A. (2001). Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modelling using KINEROS2. *Hydrological Processes*, 15: 337–358.
- Zoungrana, T., & Dior, T. (2009). *Modélisation Pluie-Débit distribuée – Mise en œuvre sur un bassin versant sahélien avec le logiciel Athys*. Projet Industriel de Fin d'Étude (PIFE) pour la STE5, Polytech'Montpellier. 45 p.

ANNEXES

Annexe 1: Equipements de mesure	II
Annexe 2: Plan et chenaux du BV2.....	III
Annexe 3: Carte de classification de Strahler du réseau hydrographique	IV
Annexe 4 : Manographe d'érodibilité de sol de USLE	V
Annexe 5: découpage du bassin BV0 par SOMDA (2008).....	VI

Annexe 1: Equipements de mesure

EQUIPEMENT	EMPLACEMENT	DESIGNATION	FONCTION
PZC1	Zone cultivée		
PZC2	Zone cultivée		
PZC3	Zone cultivée	Parcelles	Echantillonnage
PZN1	Croûte d'érosion (ERO)	de 1m sur 1m	
PZN2	Croûte Gravillonnaire (G)		
PZN3	Croûte de dessiccation (DES)		
PG1	Exutoire BV0		
PG2	Centre BV1		
PG3	Centre BV2	Pluviographes	Intensité de pluie
PG4	Centre BV0		
PG5	Tête BV0		
P1	Couplé au PG1		
P2	Couplé au PG2		
P3	Couplé au PG3		
P4	Couplé au PG4		
P5	Couplé au PG	Pluviomètres	Hauteur de pluie
P6	En tête de BV1		
P7	En amont de l'exutoire de BV1		
P8	Associé à la parcelle PZN1		
P9	Associé à la parcelle PZN2		
SND1	Couplé à PG1 et P1	Pluviomètres	Hauteur de pluie
SND3	Couplé à PG3 et P3	type snowdown	
STATION METEO	Bassin BV0	Station météorologique type Campbell	température, humidité relative, direction et vitesse du vent
THALIMEDES	Exutoire de BV0, BV1, BV2	Thalimèdes	Hauteur d'eau
LIMNIGRAPHERS	Exutoire de BV0, BV1, BV2	Limnigraphes	Hauteur d'eau

Annexe 2: Plan et chenaux du BV2

Tableau A-2.1 : Plans BV2 :

Numéro	Surface (m ²)	Largeur (m)	Longueur (m)	Pente (m/m)
11	20488.194	136.5	150.2	-0.011
12	32451.291	432.3	75.1	-0.011
13	41288.177	506.5	81.5	-0.013
21	110324.847	279.5	394.7	-0.016
22	41808.224	499.8	83.7	-0.015
23	60397.487	521.4	115.8	-0.006
32	3890.476	139.5	27.9	-0.011
33	2586.240	86.1	30.0	-0.027
41	31587.140	234.6	134.6	-0.014
42	4326.829	123.9	34.9	-0.027
43	8553.723	151.0	56.6	-0.046
52	50.099	14.2	3.5	-0.010
53	1132.732	18.6	60.8	-0.031

Tableau A-2.2 : Chenaux A-2.2 :

Numéro	Am ont	Latéral	Longueur
1	11	12; 13	452.8
2	21	22; 23	486.1
3	1,2	32; 33	179.8
4	41	42; 43	150.6
5	3,4	52; 53	20.2

Annexe 3: Carte de classification de Strahler du réseau hydrographique

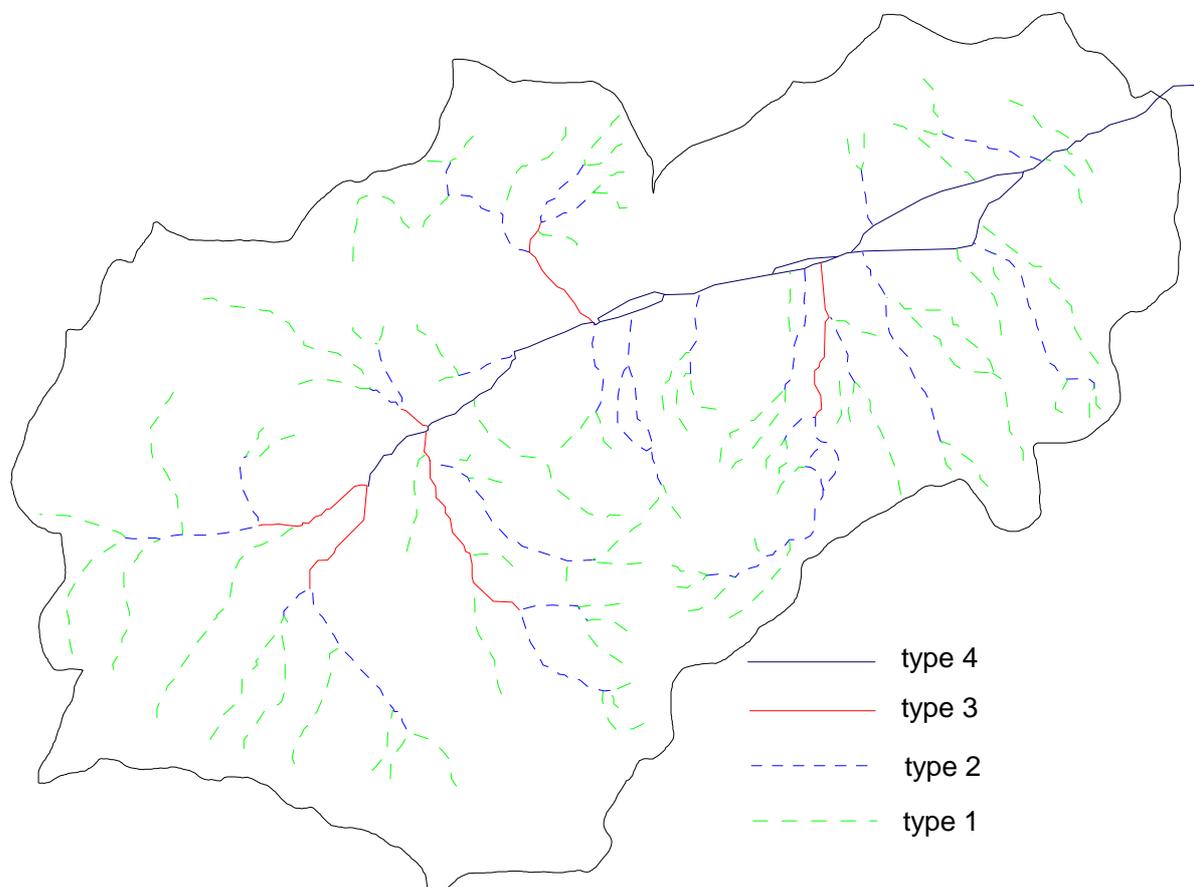
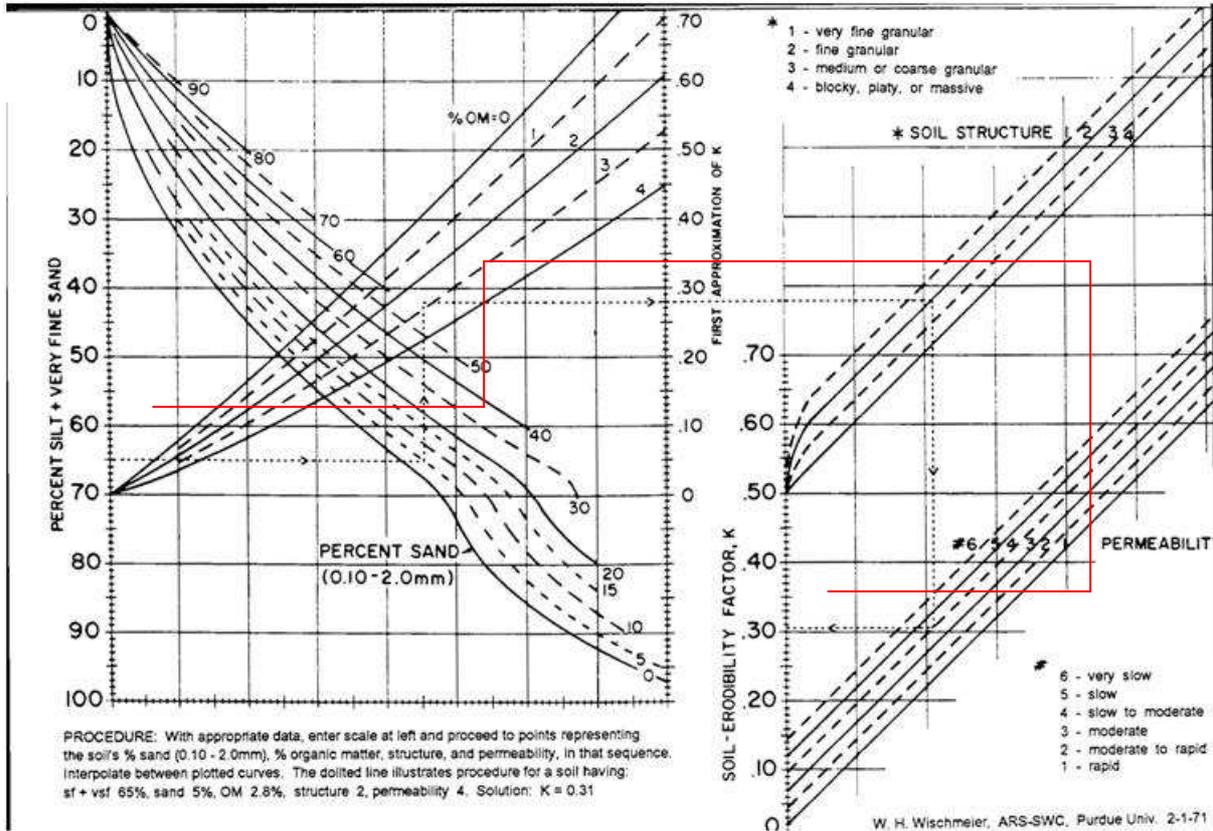


Figure A-3.1 : Classification de Strahler du réseau hydrographique

Annexe 4 : Manographe d'érodibilité de sol de USLE



Reprinted from the Journal of Soil and Water Conservation

September-October 1971, Volume 26, Number 5

Annexe 5: découpage du bassin BV0 par SOMDA (2008)

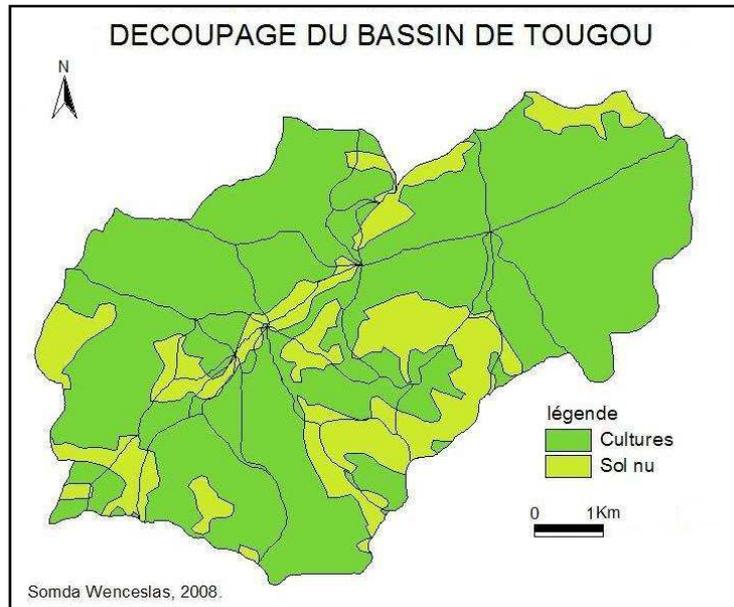


Figure A-5.1 : découpage final du bassin de Tougou en tenant compte des lignes de séparation des écoulements et des états de surface

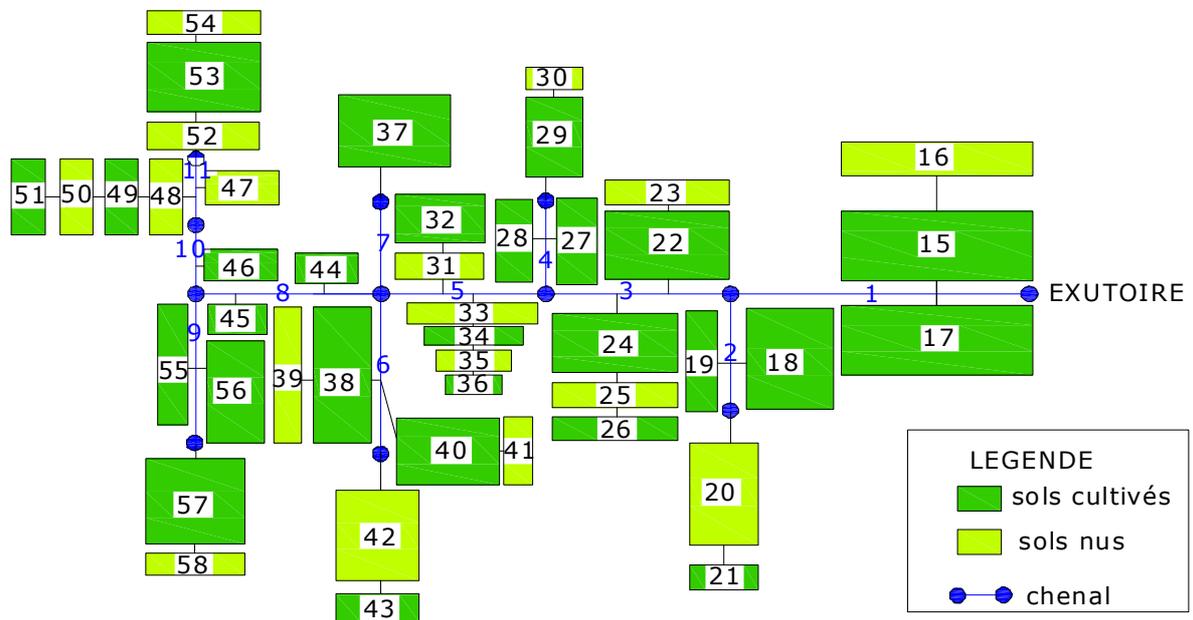


Figure A-5.2 : schématisation du bassin versant de Tougou pour KINEROS2